

Eksperimentalna analiza kondenzacije vodene pare u spiralnim cijevima uz prisutnost nekondenzirajućih plinova

Pasanec, Josip

Doctoral thesis / Disertacija

2024

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:235:441946>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-18**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Josip Pasanec

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA
KONDENZACIJE VODENE PARE U
SPIRALNIM CIJEVIMA UZ PRISUTNOST
NEKONDENZIRAJUĆIH PLINOVA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Josip Pasanec

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF WATER
VAPOR CONDENSATION IN SPIRAL
TUBES IN THE PRESENCE OF
NON-CONDENSABLE GASES**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Josip Pasanec

**EKSPERIMENTALNA ANALIZA
KONDENZACIJE VODENE PARE U
SPIRALNIM CIJEVIMA UZ PRISUTNOST
NEKONDENZIRAJUĆIH PLINOVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Josip Pasanec

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF WATER
VAPOR CONDENSATION IN SPIRAL
TUBES IN THE PRESENCE OF
NON-CONDENSABLE GASES**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji

Zagreb, 2024.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 536.24

Ključne riječi: spiralne cijevi, kondenzacija, nekondenzirajući plinovi, eksperimentalna analiza

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji

Broj stranica: 155

Broj slika: 94

Broj tablica: 59

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 56

Datum obrane: 28.03.2024.

Povjerenstvo: Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, predsjednica povjerenstva

Izv. prof. dr. sc. Nenad Ferdelji, član

Doc. dr. sc. Saša Mudrinić, član

Doc. dr. sc. Danijel Šestan, član

Prof. dr. sc. Veljko Filipan, član

Institucije u kojima je rad pohranjen:

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Nenadu Ferdeljiju na podršci pri izradi ovog rada. U mnogobrojnim turbulentnim situacijama njegovo razumijevanje i korisni savjeti bili su od presudnog značaja.

Zahvaljujem članovima Povjerenstva na izdvojenom vremenu za pregled rada te stručnim i konstruktivnim savjetima koje su mi pružili za vrijeme izrade ovog rada.

Hvala Marijani Pavlović, vlč. Dubravku Škrlin Hren i drugim dragim Prijateljima na velikoj i uvjerljivoj podršci prilikom upisa na doktorski studij. Vi ste me uvalili u ovo.

Zahvaljujem i svim mojim kolegama i prijateljima s Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Vaši savjeti, podrška i mnogobrojne riječi ohrabrenja bili su mi velik poticaj za izradu ovog rada.

Riječi zahvale upućujem i članovima Kulturno-umjetničkog društva „Matija Gubec“ iz Gornje Stubice. U mladosti vi ste me odgajali, za vrijeme studija podržavali, a sada me svojom prisutnošću održavate mladim. Fala vam!

Zahvalio bih i mojim kolegama iz poduzeća Pireko d.o.o. na podršci, savjetima i kolegijalnosti tijekom cijelog studija. Posebno zahvaljujem svojem najvećem uzoru, najboljem inženjeru i velikom čovjeku, svojem ocu Josipu Pasancu, dipl. ing. stroj. Tata, ti možeš sve.

Veliko hvala cijeloj mojoj obitelji.

Sestrama Katarini i Ivani zahvaljujem na bezuvjetnoj podršci. Vi ste moje najbolje i najiskrenije kritičarke, hvala vam što na vas uvijek mogu računati.

Posebnu zahvalu upućujem svojim roditeljima Đurđici i Josipu. Hvala vam na beskrajnom razumijevanju i strpljenju tijekom mojeg odrastanja i obrazovanja. Najviše vam zahvaljujem što ste mi vlastitim primjerom ukazali na prave vrijednosti u životu.

Na kraju, najveću i najiskreniju zahvalnost dugujem svojoj supruzi Maji Pasanec r. Ilinić, nevjerojatnoj ženi, majci i odgojiteljici. Ljubi, bez tvoje podrške ovog rada ne bi bilo, niti bi on imao smisla. Hvala ti na razumijevanju, bezuvjetnoj podršci i beskrajnoj ljubavi koju svakodnevno pružaš meni i našoj djeci.

Ovaj rad posvećujem našoj djeci, sinu Josipu i kćerima Klari, Gabrijeli i Magdaleni. Neka im ne bude na teret, već na poticaj da u životu teže višem i boljem, ali ne zanemarujući ono najvažnije, Obitelj.

Budite jaki, budite hrabri i budite svoji! Vi ste moje sve.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	VI
EXTENDED ABSTRACT.....	VII
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA.....	XIV
POPIS OZNAKA	XVII
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja	4
1.2. Motivacija.....	6
1.3. Cilj i hipoteza istraživanja.....	7
1.4. Metodologija i plan istraživanja	8
1.5. Struktura doktorskog rada	9
2. TEORIJSKE OSNOVE	11
2.1. Nusseltov model filmske kondenzacije.....	11
2.2. Utjecaj nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare	18
2.3. Sekundarna strujanja kod spiralnih cijevi	21
3. RAZVOJ MJERNE LINIJE	24
3.1. Opis mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	26
3.1.1. Energetski dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	26
3.1.2. Ispitni dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	29
3.2. Opis mjerne linije u toplovodnom režimu rada.....	36
3.3. Opis postupka mjerenja u kondenzacijskom režimu rada.....	39
3.4. Opis postupka mjerenja u toplovodnom režimu rada.....	42
4. METODOLOGIJA ANALIZE NEGATIVNIH UTJECAJA NKP.....	43
4.1. Metodologija usporedbe negativnih utjecaja NKP.....	43
4.2. Temperaturni potencijal pri kondenzaciji	48
4.3. Mjerenje u kondenzacijskom režimu rada	50
4.4. Proračunski modeli konvencionalnih izmjenjivačkih površina	53
4.4.1. Proračunski modeli kondenzacije u horizontalnim ravnim cijevima	53
4.4.2. Proračunski modeli kondenzacije u vertikalnim ravnim cijevima	55
4.4.3. Analiza utjecaja temperaturnog potencijala	58

4.4.4.	Analiza utjecaja promjera izmjenjivačke cijevi	60
4.5.	Razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi.....	61
5.	REZULTATI MJERENJA	67
5.1.	Rezultati mjerenja u kondenzacijskom režimu rada	67
5.2.	Rezultati mjerenja u toplovodnom režimu rada	78
5.3.	Mjerna nesigurnost.....	81
5.3.1.	Mjerna nesigurnost u kondenzacijskom režimu rada	81
5.3.2.	Mjerna nesigurnost u toplovodnom režimu rada.....	100
6.	ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA.....	109
6.1.	Rezultati proračunskih modela kondenzacije na konvencionalnim izmjenjivačkim površinama	109
6.2.	Rezultati usporedbe negativnih utjecaja NKP	122
7.	SAŽETA DISKUSIJA I ZAKLJUČAK	139
7.1.	Ostvareni znanstveni doprinos	147
7.2.	Mogući smjerovi nastavka istraživačkog rada	147
	LITERATURA.....	148
	KRATAK ŽIVOTOPIS.....	154
	KRATAK ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU.....	155

SAŽETAK

Poznavanje procesa prijenosa topline neophodno je za pravilno projektiranje toplinskih aparata koji se koriste u naftnoj, kemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji te energetici. Kondenzacija vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova predstavlja proces prijenosa topline koji je često zastupljen u navedenim industrijskim granama. U ovom radu se provodi eksperimentalno istraživanje i analiza procesa kondenzacije vodene pare u vertikalnim spiralnim cijevima izmjenjivača topline rekuperativnog tipa. U svrhu provođenja istraživanja razvijena je i izrađena mjerna linija koja omogućuje ispitivanja toplinskih karakteristika izmjenjivača topline u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada, uz i bez prisutnosti nekondenzirajućih plinova. Opisani su postupci i metodologija mjerenja u oba režima rada, definiran je parametar negativnog utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova, te je detaljno prikazana metodologija usporedbe negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama. Dodatno je prikazana metodologija razvoja proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi koji je potreban za provođenje prethodno navedene usporedbe.

Mjerni rezultati prilikom kondenzacije vodene pare unutar spiralnih cijevi uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina prikazani su i interpretirani u odgovarajućim tablicama i dijagramima. Nadalje, prikazani su i interpretirani rezultati mjerenja u toplovodnom režimu rada, uz prikaz razvijenog proračunskog modela prisilne konvekcije vode oko snopa spiralnih cijevi. Rezultati provedenog eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka u spiralnim cijevima su zatim uspoređeni s rezultatima izračuna kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina prema proračunskim modelima kondenzacije u ravnim horizontalnim i vertikalnim cijevima koji predstavljaju druge konvencionalne izmjenjivačke površine, a sve uz pridruživanje izračunatih sastavljenih standardnih mjernih nesigurnosti.

Ključne riječi: izmjenjivači topline, spiralna cijev, kondenzacija, vodena para, nekondenzirajući plinovi

EXTENDED ABSTRACT

A water vapor condensation in the presence of non-condensable gases (NCG) is a very common phenomenon in process plants of various industries. The presence of even a small amount of NCG during water vapor condensation can significantly reduce the heat transfer coefficients and the efficiency of the heat exchanger. Heat exchangers with spiral tubes are widely used as condensers in process plants. Knowing the above mentioned heat transfer mechanism is necessary for optimal design of thermal appliances (apparatus) and process plants in general. A review of the open literature revealed that there are a number of works dealing with the water vapor condensation with and without the presence of NCG in straight tubes of all orientations. There are number of works dealing with condensation of refrigerants in spiral tubes used in refrigeration technology. However, when we talk about water vapor condensation in spiral tubes, it is evident from the review of the open literature that this area is still not sufficiently investigated, especially if NCG are present in mixture with water vapor. For this reason, in the present study an experimental analysis of water vapor condensation in vertical spiral tubes in the presence of NCG was conducted.

Based on theoretical knowledge about the positive effects of the appearance of secondary flows in spiral tubes, and the negative effects of NCG presence on the condensation, the hypothesis of this work is that the negative effects of NCG presence during the water vapor condensation in spiral tubes are smaller comparing with other conventional geometries of heat transfer surfaces.

The experimental research and analysis was performed with the following objectives:

- Develop an experimental line for enabling an examination of water vapor condensation in heat exchangers with spiral tubes, with and without the presence of NCG.
- Based on the experimental analysis, quantify the negative effects of NCG presence on the water vapor condensation in heat exchangers with spiral tubes.
- Analyze and compare the negative effects of NCG presence on the water vapor condensation in spiral tubes and other conventional geometries of heat transfer surfaces.

The experimental investigation and analysis resulted in the following:

1. Multi-purpose experimental line for enabling an investigation of thermal behavior in heat exchangers was developed and produced. The experimental line enables examinations of the thermal characteristics of heat exchangers with spiral tubes in single phase and two phase flow, with or without the presence of air as a non-condensing gas. As part of the measuring line, a system for venting non-condensable gases after the condensation process and a system that ensures that only the condensation process takes place on the complete heat transfer surface are integrated. With certain modifications, it is possible to use the same experimental line for examination of thermal behavior in other types of heat exchangers and to use other non-condensable gases. As such, it represents valuable equipment for further experimental research in the field of heat transfer.
2. Experimental methods of water vapor condensation analysis in the presence of NCG inside spiral tubes have been developed. Measurement procedures and methodology, analysis of results and comparisons with other conventional heat exchanger surfaces are described in detail. Furthermore, the methodology of developing a model of forced convection around spiral tubes is presented.
3. Based on the obtained measurement data, the negative effects of NCG presence on the water vapor condensation in spiral tubes were quantified. Negative effects are defined through the negative effect parameter (ϵ), which represents the ratio of the mean heat flux during condensation in the presence of NCG and the mean heat flux during condensation without the presence of NCG. It has been shown that with the increase of air mass fraction in the mixture with water vapor, the values of parameter of negative effects decrease, that is, that the negative effects of the presence of non-condensable gases are increasing.
4. Based on the obtained measurement data, in-tube heat transfer coefficients were calculated. Their dependence on the mass fraction of air as a NCG during the condensation of water vapor in spiral tubes is shown. With the increase of air mass fraction in the mixture with water vapor, the values of the heat transfer coefficients decrease. A significant decrease occurs in cases of air mass fraction in vapour up to 5 %. With a further increase in the air mass fraction, the value of the heat transfer coefficients continues to decrease, but with a lower intensity. Furthermore, the dependence of heat transfer coefficients on water vapor

mass fluxes is presented. For approximately the same air mass fractions and temperature potentials, the values of the heat transfer coefficients increase with an increase of water vapor mass fluxes.

5. The quantified negative effects of the a NCG presence on the water vapor condensation in spiral tubes were compared with the corresponding negative effects in horizontal and vertical tubes, as other conventional geometries of heat transfer surfaces, with the addition of calculated combined standard measurement uncertainties. Comparable negative effects of NCG presence on the water vapor condensation in horizontal and vertical tubes are calculated according to models from literature. The comparison confirms the hypothesis that the negative effects of NCG presence during the water vapor condensation in spiral tubes are smaller compared to the same in other conventional heat transfer surfaces, with the following remarks:
 - The analysis carried out included a comparison of the negative effects of NCG presence during the condensation of water vapor in spiral tubes with the same negative effects in horizontal and vertical tubes, as conventional heat exchanger surfaces.
 - The analysis of the results explicitly confirms that the negative effect of NCG presence on the water vapor condensation in spiral tubes is smaller compared to the same in horizontal tubes.
 - The analysis shows that the negative effect of the NCG presence on the water vapor condensation in spiral tubes is smaller compared to the same in vertical tubes, which is shown with non-negligible certainty for air mass fractions greater than 9.3 %. For smaller air mass fractions, there are indications that the conclusions could be the same, but it is definitely advisable to conduct additional research.
6. Based on the obtained measurement data in single phase flow, a calculation model of forced convection of water around bundle of spiral tubes is developed.

Keywords: heat exchangers, spiral tube, condensation, water vapor, non-condensable gases

POPIS SLIKA

Slika 1. Izmjenjivači topline s ravnim cijevima	1
Slika 2. U-cijevni snop izmjenjivača topline	1
Slika 3. Kompaktna toplinska stanica	2
Slika 4. Cijevni snopovi od spiralnih cijevi	3
Slika 5. Fizikalni model kondenzacije čiste vodene pare.....	12
Slika 6. Filmska kondenzacija uz vertikalnu stijenku – Nusseltov model	13
Slika 7. Fizikalni model kondenzacije vodene pare i zraka	18
Slika 8. Fizikalni model kondenzacije vodene pare i zraka u cijevi	19
Slika 9. Utjecaj prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare	20
Slika 10. Utjecaj temperaturne razlike na kondenzaciju vodene pare.....	20
Slika 11. Osnovni parametri spiralne cijevi	21
Slika 12. Polja brzine i temperature unutar spiralnih i torusnih cijevi.....	22
Slika 13. Sekundarna strujanja u torusnim cijevima	22
Slika 14. Usporedba koeficijenata prolaza topline za ravne i spiralne cijevi.....	23
Slika 15. Razvijena mjerna linija	24
Slika 16. Shema mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	25
Slika 17. Energetski dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	26
Slika 18. Izgled proizvedenog parnog kotla.....	27
Slika 19. Parni kotao u presjeku.....	28
Slika 20. Ionski omekšivač.....	29
Slika 21. Kondenzni spremnik	29
Slika 22. Ispitni dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada	30
Slika 23. Ispitivani izmjenjivač topline.....	30
Slika 24. Cijevni snop ispitivanog izmjenjivača topline	30
Slika 25. Ispitivani izmjenjivač topline.....	31
Slika 26. Sklop ispitivanog i dodatnog izmjenjivača topline	31
Slika 27. Pripremna i mjerna grupa uređaja za dovod zraka.....	32
Slika 28. Ulaz zraka u mjernu liniju.....	32
Slika 29. Odražna mjesta na mjernoj liniji	33
Slika 30. Sklop revizijskih nivokaza	34
Slika 31. PT100 temperaturni osjetnik.....	35

Slika 32. Primjer smještaja osjetnika	35
Slika 33. Turbinski protokomjer	35
Slika 34. Shema mjerne linije u toplovodnom režimu rada	37
Slika 35. Energetski dio mjerne linije u toplovodnom režimu rada.....	38
Slika 36. Ispitni dio mjerne linije u toplovodnom režimu rada.....	38
Slika 37. Razvijena mjerna linija	39
Slika 38. Igličasti ventil i izljevno mjesto s menzurom	40
Slika 39. Shema tokova vodene pare, zrak, kondenzata i rashladne vode	45
Slika 40. Dijagram toka izračuna negativnih utjecaja.....	47
Slika 41. Setovi mjernih točaka.....	52
Slika 42. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A1 (horizontalne cijevi)	58
Slika 43. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A3 (horizontalne cijevi)	58
Slika 44. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A1 (vertikalne cijevi)	59
Slika 45. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A3 (vertikalne cijevi)	59
Slika 46. Ovisnost parametra ε o unutarnjem promjeru (horizontalne cijevi)	60
Slika 47. Ovisnost parametra ε o unutarnjem promjeru (vertikalne cijevi)	60
Slika 48. Shema tokova tople i hladne vode	63
Slika 49. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka A1	73
Slika 50. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka A2	73
Slika 51. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka A3	74
Slika 52. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka B1.....	74
Slika 53. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka B2.....	74
Slika 54. Negativni utjecaji (ε) u setu mjernih točaka B3.....	74
Slika 55. Negativni utjecaji (ε)u svim setovima mjernih točaka	75
Slika 56. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka A1, A2 i A3.....	76
Slika 57. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka B1, B2 i B3	76
Slika 58. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka A1, A2 i A3.....	77
Slika 59. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka B1, B2 i B3	77
Slika 60. Dijagram regresijske analize	80

Slika 61. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka A1	116
Slika 62. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka A2	116
Slika 63. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka A3	117
Slika 64. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka B1	117
Slika 65. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka B2	118
Slika 66. Negativni utjecaji (ε) u setu usporednih točaka B3	118
Slika 67. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka A1	120
Slika 68. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka A2	120
Slika 69. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka A3	120
Slika 70. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka B1	120
Slika 71. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka B2	121
Slika 72. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka B3	121
Slika 73. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka A1	127
Slika 74. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka A2	127
Slika 75. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka A3	127
Slika 76. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka B1	127
Slika 77. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka B2	128
Slika 78. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka B3	128
Slika 79. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka A1	129
Slika 80. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka A2	129
Slika 81. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka A3	130
Slika 82. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka B1	130
Slika 83. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka B2	130

Slika 84. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka B3	130
Slika 85. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A1	132
Slika 86. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A2	132
Slika 87. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A3	132
Slika 88. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B1	132
Slika 89. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B2	133
Slika 90. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B3	133
Slika 91. Usporedba spiralnih s horizontalnim cijevima u svim setovima usporednih točaka.....	133
Slika 92. Usporedba spiralnih s vertikalnim cijevima u svim setovima usporednih točaka ..	135
Slika 93. Parametri negativnog utjecaja (ϵ) u setu usporednih točaka A2.....	137
Slika 94. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka A2	137

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A1	68
Tablica 2. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A2	68
Tablica 3. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A3	68
Tablica 4. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B1	68
Tablica 5. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B2	69
Tablica 6. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B3	69
Tablica 7. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A1	70
Tablica 8. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A2	70
Tablica 9. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A3	71
Tablica 10. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B1	71
Tablica 11. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B2	72
Tablica 12. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B3	72
Tablica 13. Vrijednosti mjerenih veličina u toplovodnom režimu rada.....	78
Tablica 14. Vrijednosti izračunatih veličina u toplovodnom režimu rada	79
Tablica 15. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 0 °C.....	82
Tablica 16. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 30 °C.....	83
Tablica 17. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 60 °C.....	83
Tablica 18. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 90 °C.....	84
Tablica 19. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 120 °C.....	84
Tablica 20. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 150 °C.....	85
Tablica 21. Budžet mjerne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka	86
Tablica 22. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ϵ) za set mjernih točaka A1	98
Tablica 23. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ϵ) za set mjernih točaka A2	98
Tablica 24. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ϵ) za set mjernih točaka A3	98
Tablica 25. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ϵ) za set mjernih točaka B1	98
Tablica 26. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ϵ) za set mjernih točaka B2	99

Tablica 27. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B3	99
Tablica 28. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka A1	107
Tablica 29. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka A2.....	107
Tablica 30. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka A3.....	107
Tablica 31. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka B1	107
Tablica 32. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka B2.....	108
Tablica 33. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\theta_{ks}$ za set mjernih točaka B3	108
Tablica 34. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A1 za horizontalne cijevi	110
Tablica 35. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A2 za horizontalne cijevi	110
Tablica 36. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A3 za horizontalne cijevi	111
Tablica 37. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B1 za horizontalne cijevi	111
Tablica 38. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B2 za horizontalne cijevi	112
Tablica 39. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B3 za horizontalne cijevi	112
Tablica 40. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A1 za vertikalne cijevi	113
Tablica 41. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A2 za vertikalne cijevi	113
Tablica 42. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A3 za vertikalne cijevi	114
Tablica 43. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B1 za vertikalne cijevi	114
Tablica 44. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B2 za vertikalne cijevi	115
Tablica 45. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B3 za vertikalne cijevi	115
Tablica 46. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A1	116
Tablica 47. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A2	116
Tablica 48. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A3	117
Tablica 49. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B1	117
Tablica 50. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B2	118
Tablica 51. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B3	118
Tablica 52. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A1.....	124

Tablica 53. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A2.....	124
Tablica 54. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A3.....	124
Tablica 55. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B1.....	125
Tablica 56. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B2.....	125
Tablica 57. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B3.....	125
Tablica 58. Vrijednosti omjera negativnih utjecaja za set mjernih točaka A1, A2 i A3	131
Tablica 59. Vrijednosti omjera negativnih utjecaja za set mjernih točaka B1, B2 i B3	131

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

Simbol	Mjerna jedinica	Opis
A_p	m^2	Površina unutarnjeg poprečnog presjeka cijevi
$A_{\text{plašt}}$	m^2	Površina poprečnog presjeka plašta
A_s	m^2	Površina poprečnog presjeka strujanja vode oko cijevi
A_u	m^2	Ukupna izmjenjivačka površina svedena na unutarnji promjer cijevi
A_v	m^2	Ukupna izmjenjivačka površina svedena na vanjski promjer cijevi
$c_{p,w}$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Specifični toplinski kapacitet vode
$c_{p,z}$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Specifični toplinski kapacitet zraka
d_h	m	Hidraulički promjer cijevi
D_s	m	Promjer zakrivljenosti spiralne cijevi
d_u	m	Unutarnji promjer cijevi
$h_{p,1}$	kJ/kg	Entalpija pare na ulazu u cijevi izmjenjivača
$h_{k,2}$	kJ/kg	Entalpija kondenzata na izlazu iz cijevi izmjenjivača
k_v	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi
k_u	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Koeficijent prolaza topline sveden na unutarnju površinu cijevi
p'	bar	Parcijalni tlak vodene pare
p_{uk}	bar	Ukupni tlak smjese
$q_{m,k}$	kg/s	Maseni protok kondenzata
$q_{m,p}$	kg/s	Maseni protok vodene pare
$q_{m,w}$	kg/s	Maseni protok vode
$q_{m,z}$	kg/s	Maseni protok zraka
$q_{v,k}$	m^3/s	Volumenski protok kondenzata
$q_{v,w}$	m^3/s	Volumenski protok vode
$q_{v,z}$	m^3/s	Volumenski protok zraka

q_x	W/m ²	Srednja gustoća toplinskog toka pri određenom masenom udjelu zraka
q_0	W/m ²	Srednja gustoća toplinskog toka bez prisutnosti zraka
r_u	m	Unutarnji radijus cijevi
r_v	m	Vanjski radijus cijevi
S_s	m ²	Površina u kontaktu s vodom na strani plašta
t	s	Vrijeme
t_{kon}	s	Vrijeme završetka mjerenja
$t_{poč}$	s	Vrijeme početka mjerenja
$u(x)$	kao za x	Procijenjeno standardno odstupanje
$u_c(x)$	kao za x	Sastavljena standardna nesigurnost
$u_c^2(x)$	kao za x^2	Sastavljena procijenjena varijanca
$U(x)$	kao za x	Proširena mjerna nesigurnost
V	m ³	Volumen vode
V_c	m ³	Volumen cijevi
V_{kon}	m ³	Završni volumen vode
$V_{plašt}$	m ³	Volumen plašta
$V_{poč}$	m ³	Početni volumen vode
V_s	m ³	Volumen unutar plašta
w_s	m/s	Brzina unutar plašta
x_z	-	Maseni udio zraka

Grčke oznake

$\alpha_{p,p}$	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi
$\alpha_{p,w}$	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline prilikom strujanja vode u spiralnoj cijevi
$\alpha_{s,w}$	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi
ε	-	Parametar negativnog utjecaja prisutnosti NKP
$\Delta\vartheta_{\log}$	$^{\circ}C$	Srednja logaritamska razlika temperatura
$\Delta\vartheta_{ks}$	$^{\circ}C$	Temperaturna razlika između temperature kondenzacije i stijenke
Δx	-	Inkrement sadržaja pare
ϑ_1'	$^{\circ}C$	Temperatura kondenzacije vodene pare u smjesi vodena para – zrak na parcijalnom tlaku
ϑ_1	$^{\circ}C$	Temperatura na ulazu u cijevi izmjenjivača
ϑ_2	$^{\circ}C$	Temperatura na izlazu iz cijevi izmjenjivača
ϑ_3	$^{\circ}C$	Temperatura na ulazu u plašt izmjenjivača
ϑ_4	$^{\circ}C$	Temperatura na izlazu iz plašt izmjenjivača
ϑ_{izlaz}	$^{\circ}C$	Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača
ϑ_{ulaz}	$^{\circ}C$	Temperatura vode na ulazu u izmjenjivač
ϑ_s	$^{\circ}C$	Srednja temperatura stijenke cijevi
ϑ_{sr}	$^{\circ}C$	Srednja temperatura vode
ϑ_z	$^{\circ}C$	Temperatura zasićenja
λ_c	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost cijevi
λ_w	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost vode
ρ_p	kg/m^3	Gustoća vodene pare
ρ_w	kg/m^3	Gustoća vode
ρ_z	kg/m^3	Gustoća zraka
ϕ_x	kW	Toplinski tok pri određenom masenom udjelu zraka
ϕ_0	kW	Toplinski tok bez prisutnosti zraka
ϕ_w	kW	Toplinski tok u toplovodnom režimu rada
ψ	-	Volumenska poroznost

Bezdimenzijske (kriterijske) značajke

De	-	Deanova značajka
Fr_{so}	-	Froudeova značajka
Nu	-	Nusseltova značajka
Pr	-	Prandtllova značajka
Re	-	Reynoldsova značajka
Re_{kr}	-	Kritična Reynoldsova značajka

Napomena: Oznake statističkih veličina iz poglavlja **5.3**, kao i ostalih veličina koje nisu na ovom popisu, objašnjene su u dijelu teksta na mjestu gdje se koriste ili u povezanoj literaturi.

Kratice

Simbol	Opis
NKP	Nekondenzirajući plinovi
NCG	Non-condensable gases

1. UVOD

Izmjenjivači topline su toplinski aparati koji se koriste za izmjenu toplinske energije između dva ili više fluida različitih temperatura. Kod većine izmjenjivača topline fluidi su razdvojeni čvrstom stijenkom kroz koju toplina prolazi s jednog na drugi fluid bez njihovog međusobnog miješanja [1]. Takve izmjenjivače topline nazivamo rekuperativnim izmjenjivačima topline, odnosno rekuperatorima. Čvrsta stjenka kod rekuperatora je najčešće cijev. Svoju primjenu rekuperatori nalaze kao sastavni dijelovi raznih procesnih postrojenja u sklopu naftne, kemijske i prehrambene industrije te rashladne tehnike i energetike. Kondenzacija, kao jedan od efikasnih procesa izmjene topline, često se koristi u prethodno navedenim industrijama [2], [3]. Poznavanje prijenosa topline pri kondenzaciji iznimno je važno za pravilno i efikasno projektiranje izmjenjivača topline kao dijelova procesnih postrojenja [4]. U izmjenjivačima topline kondenzirati mogu vodena para, rashladne radne tvari te razni drugi procesni fluidi. Kondenzacija se može odvijati u ili na izmjenjivačkim cijevima cijevnih snopova koji u izmjenjivačima topline mogu biti vertikalno, horizontalno ili koso orijentirani. Izmjenjivačke cijevi mogu biti glatke, hrapave ili orebrene, odnosno ravne ili savijene u određeni oblik (U-cijevi, spiralne cijevi...)



Slika 1. Izmjenjivači topline s ravnim cijevima (izvor: Pireko d.o.o)



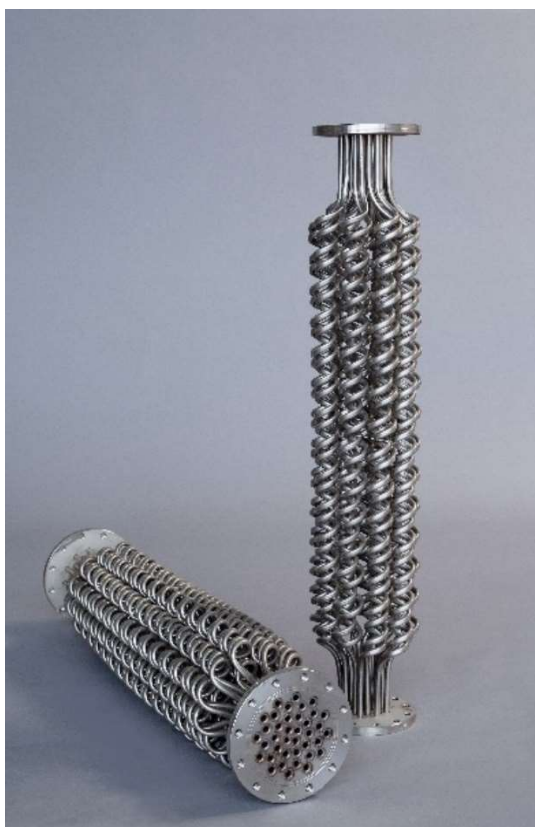
Slika 2. U-cijevni snop izmjenjivača topline (izvor: Pireko d.o.o)

Izmjenjivači topline sa spiralnim cijevima nalaze svoju primjenu u energetici, rashladnoj tehnici, klimatizaciji i ostalim industrijskim granama [5]. Zbog kompaktne konstrukcije, jednostavne izrade te poboljšanog prijenosa topline uslijed sekundarnih strujanja [6], navedeni tipovi izmjenjivača se u Hrvatskoj i susjednim državama često koriste kao kondenzatori u toplinskim podstanicama sustava daljinskih grijanja. U njima pregrijana vodena para iz primarne proizvođačke mreže kondenzira na račun izmjene topline s vodom iz sekundarne potrošačke mreže. Slikom 3 prikazana je tipična kompaktna parna toplinska stanica u koju su ugrađena dva izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima. Jedan od njih ima funkciju kondenzatora, a drugi pothlađivača kondenzata.



Slika 3. Kompaktna toplinska stanica (izvor: Pireko d.o.o)

Cijevni snopovi ovih izmjenjivača topline izvode se iz više spiralno oblikovanih izmjenjivačkih cijevi koje su po definiranom rasporedu složene i zavarene za cijevne stijene izmjenjivača topline. Uz osnovne prednosti poput poboljšanog prijenosa topline, kompaktne konstrukcije i jednostavne izrade, velika prednost je i što spiralna konstrukcija izmjenjivačkih cijevi eliminira probleme koji se javljaju uslijed toplinskih dilatacija. Slikom 4 prikazan je izgled cijevnih snopova koji se sastoje od spiralnih cijevi.



Slika 4. Cjevni snopovi od spiralnih cijevi (izvor: Pireko d.o.o)

Kondenzacija uz prisutnost nekondenzirajućih plinova (NKP) često je prisutna u procesnim postrojenjima raznih industrijskih grana [7]. S obzirom da prisutnost čak i male količine NKP prilikom kondenzacije vodene pare može značajno smanjiti koeficijente prolaza topline, odnosno efikasnost izmjenjivača topline [8], [9], poznavanje navedenog prijenosa topline je u tim slučajevima izrazito važno za projektiranje i rad procesnih postrojenja. Upravo iz tog razloga, u ovom radu nastoje se istražiti negativni utjecaji prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u prethodno opisanim izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima. Očekuje se da će nove spoznaje iz navedenog područja poslužiti preciznijim procjenama koeficijenta prijelaza topline pri projektiranju toplinskih aparata i uređaja

1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

U dostupnoj literaturi razni autori teorijski, numerički ili eksperimentalno obrađuju kondenzaciju vodene pare, freona i drugih radnih tvari u i na cijevima cijevnih snopova izmjenjivača topline. C. Bonneau i sur. [10] u svojem radu daju sveobuhvatni pregled postojećih radova vezanih uz kondenzaciju vodene pare na glatkim horizontalnim cijevima. Osim sveobuhvatnog pregleda radova, autori daju i određene preporuke konstruktorima kondenzatora temeljene na vlastitim analizama. Kondenzacija vodene pare unutar vertikalnih, horizontalnih ili kosih cijevi analizirana je u [11]-[16]. Pregled i usporedba proračunskih modela kondenzacije raznih radnih tvari u cijevima dani su u [17]. M. M. Shah u svojim radovima [18], [19] i [20] donosi proračunske modele kondenzacije u vertikalnim, horizontalnim i kosim cijevima za više od 22 radna medija te širok raspon radnih parametara.

Kao što je već istaknuto u uvodu, izmjenjivači topline sa spiralnim cijevima često nalaze svoju primjenu u energetici, rashladnoj tehnici, klimatizaciji i ostalim industrijskim granama. Iz objavljenih radova [21], [22] i [23] vidi se da je prijelaz topline kod jednofaznog strujanja u spiralnim cijevima intenzivniji od onoga u ravnim. Valja napomenuti da je dvofazno strujanje prilikom kondenzacije unutar spiralnih cijevi značajno kompleksnije u odnosu na ono kod ravnih cijevi [24]. Iz objavljenih radova [25], [26] i [27] vidi se da su kod kondenzacije radnih tvari u rashladnoj tehnici koeficijenti prijelaza topline u spiralnim cijevima također veći u odnosu na one kod ravnih cijevi. Detaljan pregled postojećih radova koji se bave jednofaznim strujanjem u spiralnim cijevima izradili su D. Akgul i sur. [28]. Zbog česte primjene spiralnih cijevi u rashladnoj tehnici i klimatizaciji postoji značajan broj radova koji se bave kondenzacijom raznih radnih tvari kao radnih medija. Detaljan pregled postojećih radova donose A. M. Fsadni i J. P. M. Whitty [29] te G. Humic i A. Humic [27]. Osim spomenutih preglednih radova, recentniji radovi koji se bave ovom problematikom u dostupnoj literaturi su [3], [24], [26], [30] i [31].

Pregledom do sada spomenutih radova uviđa se da svi obrađuju temu kondenzacije freona kao radnog medija u spiralnim cijevima dok je kondenzacija vodene pare tek rijetko zastupljena. Pregledom dostupne recentne literature pronađeno je tek nekoliko radova koji se bave

kondenzacijom vodene pare kao radnog medija u spiralnim cijevima. U radu [32] autori provode eksperimentalnu analizu utjecaja raznih radnih i geometrijskih parametara na koeficijente prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare unutar spiralne cijevi. Na temelju rezultata analize autori su dali prijedlog optimalnih geometrijskih parametara spirale za ispitivane uvjete. Također valja napomenuti da su eksperimentalna istraživanja provedena s izrazitom malim protocima pare (specifični maseni protoci $< 20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$). Drugi rad [33] provodi eksperimentalna istraživanja s većim protocima pare (specifičnim maseni protoci u rasponu od 60 do $116 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$), ali na niskom apsolutnom tlaku vodene pare od 154 kPa. Na temelju rezultata provedenog eksperimenta autori provjeravaju i potvrđuju razvijeni teorijski model filmske kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi.

Nadalje, izrazito zanimljivo područje je i utjecaj nekondenzirajućih plinova (NKP) na proces kondenzacije, s obzirom da je kondenzacija uz prisutnost NKP također često prisutna u procesnim postrojenjima raznih industrijskih grana [7], [34]. S obzirom da prisutnost čak i male količine NKP prilikom kondenzacije vodene pare može značajno smanjiti koeficijente prolaza topline [8], [9], postoji niz radova koji istražuju navedeno područje. U radovima [2], [35], [36] i [37] autori analiziraju djelovanje NKP na kondenzaciju vodene pare na vertikalnim cijevima. U radovima [38] i [39] autori analiziraju djelovanje NKP na kondenzaciju vodene pare na horizontalnim cijevima. Kondenzacijom vodene pare uz prisustvo NKP u vertikalnim cijevima bave se [8], [25], [40] i [41], a u horizontalnim cijevima [7] i [42]. Pregled ostalih radova vezanih uz područje kondenzacije u vertikalnim i horizontalnim cijevima uz prisutnost NKP može se pronaći u radu [43]. Kondenzacijom vodene pare uz prisutnost zraka u cijevnim snopovima kosih cijevi različitih promjera bave se B. Cao i sur. [44] i [45]. Pregledom literature vezane uz kondenzaciju vodene pare uz prisutnost NKP može se primijetiti kako je velik broj njih nastao za svrhu projektiranja izmjenjivača topline koji se koriste u pasivnim sigurnosnim sustavima hlađenja nuklearnih reaktora kod kojih je u slučaju nesreće potrebno kondenzirati vodenu paru s velikim masenim udjelima zraka kao NKP [1-2], [10], [14], [15], [35] [46], [47] i [48]. U dostupnoj literaturi nije pronađeno ispitivanje utjecaja NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima.

Pregledom dostupnih i recentnih radova može se zaključiti da je prijenos topline pri kondenzaciji unutar ravnih cijevi svih orijentacija prilično dobro teorijski i eksperimentalno istražen. Navedeno se također odnosi i na kondenzaciju unutar spiralnih cijevi za slučaj

kondenzacije radnih tvari koje se često primjenjuju u rashladnoj tehnici i klimatizaciji. Vezano uz kondenzaciju vodene pare unutar spiralnih cijevi situacija je drugačija. U dostupnoj literaturi postoje tek rijetki radovi koji istražuju ovo područje. Isto tako, postoji niz radova koji istražuju utjecaj NKP na proces kondenzacije na drugim konvencionalnim geometrijama dok to za spiralne cijevi nije slučaj.

1.2. Motivacija

Poznavanje procesa prijenosa topline neophodno je za pravilno projektiranje toplinskih aparata koji se koriste u naftnoj, kemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji te energetici. Kondenzacija vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova (NKP) predstavlja proces prijenosa topline koji je često zastupljen u navedenim industrijskim granama. Iz pregleda dostupnih i recentnih radova vidi se kako je navedeni proces prijenosa topline prilično dobro obrađen za slučajeve kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP na i unutar ravnih cijevi svih orijentacija. Također, postoji niz radova koji se bave kondenzacijom freona unutar spiralnih cijevi, ali tek rijetki obrađuju kondenzaciju čiste vodene pare unutar spiralnih cijevi. Međutim, radovi koji se bave kondenzacijom vodene pare uz prisutnost NKP u spiralnim cijevima nisu pronađeni u dostupnoj literaturi. Upravo to je područje kojim se bavi ovo eksperimentalno istraživanje.

Iz objavljenih radova [21] i [22] vidimo da je prijelaz topline kod jednofaznog strujanja u spiralnim cijevima veći od onoga u ravnim. Iz objavljenih radova [25], [26] i [27] vidljivo je da su pri kondenzaciji radnih tvari u rashladnoj tehnici koeficijenti prijelaza topline u spiralnim cijevima također veći u odnosu na one kod ravnih cijevi. Nadalje, iz radova [43], [46] vidi se da prisutnost NKP prilikom kondenzacije vodene pare značajno smanjuje koeficijente prolaza topline, odnosno utjecaj prisutnosti NKP je negativan.

S obzirom na navedeno, uzimajući u obzir da su NKP često prisutni pri kondenzaciji u raznim procesnim postrojenjima [7], jedan od motiva ovog rada je eksperimentalnom analizom utvrditi i kvantificirati negativne utjecaje prisutnosti NKP na prolaz topline pri kondenzaciji vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova unutar spiralnih cijevi koje se u praktičnoj primjeni koriste unutar prethodno opisanih izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima.

Očekuje se da će nove spoznaje iz navedenog područja omogućiti projektantima izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima preciznije procjene koeficijenta prijelaza topline pri projektiranju navedenih izmjenjivača topline, ali i ostalih toplinskih aparata i uređaja. Drugi motiv, koji proizlazi iz već navedenog, je mogućnost da se, na temelju novih spoznaja o negativnim utjecajima NKP na kondenzaciju vodene pare unutar spiralnih cijevi i njihove usporedbe s istim negativnim utjecajima koji se javljaju kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina, donesu određeni zaključci i indikacije o novim potencijalnim područjima primjenjivosti predmetnih izmjenjivača topline. Dodatna motivacija za ovo istraživanje je prilika za razvoj mjerne linije, kao i metodologije mjerenja, analize i obrade rezultata, koji će omogućiti ne samo ovo istraživanje, već i daljnja istraživanja utjecaja NKP na kondenzaciju, a sve s ciljem popularizacije primjene izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima u postojećim i novim područjima primjene.

1.3. Cilj i hipoteza istraživanja

Istraživanje se temelji na sljedećoj hipotezi: negativni utjecaj prisutnosti nekondenzirajućih plinova pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima je manji u odnosu na isti kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina.

Ciljevi ovog istraživanja su:

1. Razviti mjernu liniju za provođenje eksperimentalnih istraživanja kondenzacije vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima, uz i bez prisutnosti nekondenzirajućih plinova
2. Na temelju eksperimentalne analize kvantificirati negativni utjecaj nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima
3. Analizirati i usporediti negativne utjecaje prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama

1.4. Metodologija i plan istraživanja

Istraživanje u okviru ovog doktorskog rada je eksperimentalnog karaktera, a provedeno je u tri faze.

Prva faza istraživanja uključuje razvoj i izradu mjerne linija za provođenje eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare u spiralnim cijevima uz ili bez prisutnosti nekondenzirajućih plinova (NKP). Mjerna linija se sastoji od energetskog dijela i ispitnog dijela. Energetski dio sačinjava kotao, kondenzni spremnik, ionski omekšivač, regulacijska armatura te spojni cjevovod. Ispitni dio se sastoji od izmjenjivača topline na kojemu će se provoditi ispitivanja, dodatnog izmjenjivača za pothlađivanje kondenzata, akumulacijskog spremnika, pumpi, spojnih cjevovoda i pripadajuće armature, mjerne opreme za mjerenje temperature i protoka te akvizicijskog sustava za prikupljanje mjernih podataka. Ispitivani izmjenjivač topline je rekuperativnog tipa, s cijevnim snopom izrađenim od spiralnih cijevi. Posebna pažnja posvećena je sustavu odzračivanja NKP nakon procesa kondenzacije unutar spiralnih cijevi. Također, sastavni dio ispitivanog izmjenjivača i mjerne linije je sklop revizijskih nivokaza pomoću kojih se može pratiti sam proces kondenzacije, odnosno pomoću kojeg se osigurava da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. Navedeno je važno osigurati zbog daljnje analize i obrade podataka mjerenja.

U **drugoј fazi** istraživanja provode se mjerenja na razvijenoj i izrađenoj mjernoj liniji. Nakon razvoja i preliminarne provjere mjerne linije, pristupa se provođenju mjerenja toplinskih karakteristika izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima. Variranjem radnih parametara prikupljaju se setovi podataka mjerenja koji se u sljedećoj fazi analiziraju. Mjerenja su podijeljena na tri dijela. Prvo se provode mjerenja u kondenzacijskom režimu rada bez prisutnosti NKP, a zatim s prisutnošću NKP. Na kraju se provode mjerenja u toplovodnom režimu rada koja se koriste za razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi. Metodologija svih mjerenja je detaljno opisana u poglavlju 4.

U okviru **treće faze** istraživanja provodi se analiza i obrada mjernih podataka. Na temelju teorijskih spoznaja o pozitivnom utjecaju pojave sekundarnih strujanja unutar spiralni cijevi te negativnom utjecaju prisutnosti NKP na proces kondenzacije postavljena je hipoteza ovog rada, o čijem se prihvaćanju zaključuje na temelju analize i obrade prikupljenih podataka mjerenja. Najprije se izmjereni podaci obrađuju s ciljem kvantifikacije negativnog utjecaja NKP na kondenzaciju vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima. Zatim se na temelju tih rezultata provodi kvantitativna usporedba negativnog utjecaja prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s negativnim utjecajem prisutnosti NKP unutar horizontalnih i vertikalnih cijevi kao primjer drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina.

1.5. Struktura doktorskog rada

U prvom poglavlju rada dan je uvod i pregled dosadašnjih istraživanja. Potom je pojašnjena motivacija za eksperimentalnu analizu kondenzacije vodene pare u izmjenjivaču topline sa spiralnim cijevima. Postavljeni su ciljevi i hipoteza istraživanja te je razrađena metodologija i plan istraživanja.

U drugom poglavlju teorijski su obrađene osnove filmske kondenzacije prema Nusseltovom modelu, dan je osvrt na prijenos topline kod spiralnih cijevi te je opisan utjecaj nekondenzirajućih plinovi (NKP) na prijenos topline.

U trećem poglavlju je prikazana i opisana razvijena mjerna linija na kojoj se provodi eksperimentalno istraživanje. Detaljno su opisani svi osnovni sastavni dijelovi mjerne linije, kao i sami postupci provođenja mjerenja.

U četvrtom poglavlju objašnjena je metodologija analize i usporedbe negativnih utjecaja prisutnosti NKP. Opisani su postupci mjerenja u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada te je prikazan razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi.

U petom poglavlju su prikazani i interpretirani rezultati provedenih mjerenja u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada. Također, u ovom poglavlju obrađena je i prikazana mjerna nesigurnost dobivenih rezultata.

U šestom poglavlju provodi se analiza rezultata istraživanja. Na početku su dani rezultati izračuna kondenzacije vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova za druge konvencionalne izmjenjivačke površine, koji su zatim uspoređeni s rezultatima provedenog mjerenja kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP u spiralnim cijevima. Uspoređeni

rezultati su analizirani i interpretirani s ciljem donošenja zaključaka o negativnim utjecajima prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima i drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama.

U sedmom poglavlju dana je sažeta diskusija i zaključak provedenog istraživanja, navedeni su ostvareni znanstveni doprinosi te su definirani mogući smjerovi nastavka istraživanja.

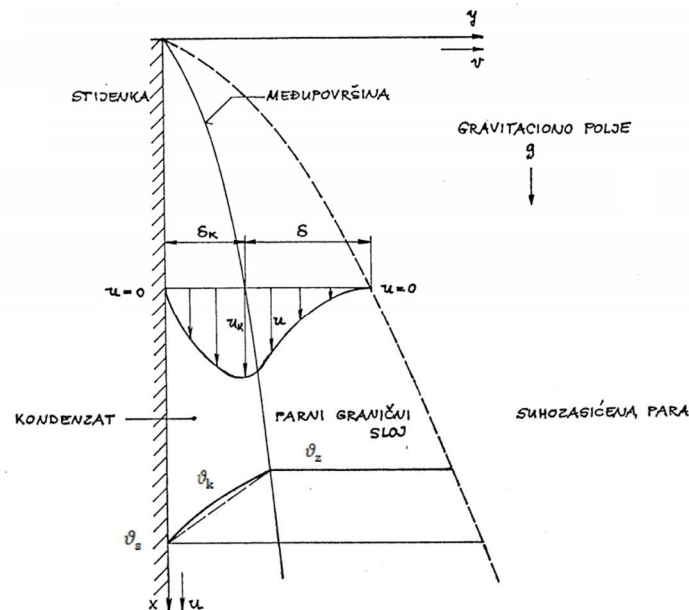
2. TEORIJSKE OSNOVE

U ovom poglavlju teorijski su obrađene osnove kondenzacije, prikazan je Nusseltov model filmske kondenzacije, opisan je utjecaj nekondenzirajućih plinovi na prijenos topline te je dan osvrt na sekundarna strujanja koja se javljaju kod strujanja u spiralnim cijevima.

2.1. Nusseltov model filmske kondenzacije

Kondenzacija je proces u kojem dolazi do promjene agregatnog stanja iz plinovitog u kapljevito. Do njega dolazi ako se para nekog fluida dovede u doticaj s tijelom čija je temperatura niža od temperature zasićenja pare za pripadajući tlak. Ovisno o fizikalnim svojstvima medija, stanju površine stijenke i drugim uvjetima u kojima se kondenzacija odvija, razlikujemo pojavu dva oblika kondenzacije, filmsku i kapljičastu. Pri filmskoj kondenzaciji nastaje tanki kontinuirani kapljeviti sloj kondenzata na stijenci na kojoj se kondenzacija odvija, dok se pri kapljičastoj kondenzaciji na površini krute stijenske kondenzat formira u obliku diskretnih kapljica. Koeficijenti prijelaza topline kod kapljičaste kondenzacije su značajno veći u odnosu na one kod filmske kondenzacije, međutim kapljičasta kondenzacija se najčešće održava samo kratkotrajno i to najčešće samo na jednom dijelu površine čvrste stijenske. Filmska kondenzacija je mnogo češći i stabilniji oblik kondenzacije pa se stoga najčešće pri proračunima toplinskih aparata unaprijed pretpostavlja upravo filmska kondenzacija. Stoga, poznavanje teorije filmske kondenzacije jako je značajno za rješavanje praktičnih problema [49].

Slikom 5 prikazan je općeniti fizikalni model kondenzacije čiste vodene pare. Pored vertikalne stijenske jednolike temperature ϑ_s nalazi se vodena para temperature ϑ_z . Temperatura stijenske je niža od temperature zasićenja vodene pare pa stoga nastupa proces kondenzacije. Prostor koji je oslobođen kondenzacijom pare trenutačno se popunjava novom parom iz okoline. Dotok pare prema stijenci, odnosno nastalom kondenzatu, je nesmetan. Nastali kondenzat otječe niz stijenu stvarajući kapljeviti sloj, odnosno kapljeviti film, čija se debljina sve više povećava u smjeru strujanja. Na međupovršini je stanje zasićenja. Toplinski tok kondenzacije vodene pare prenosi se provođenjem do stijenske kroz nastali kapljeviti film. U odsutnosti prisilne konvekcije, sva gibanja unutar pare uzrokovana su samim procesom kondenzacije.



Slika 5. Fizikalni model kondenzacije čiste vodene pare [50]

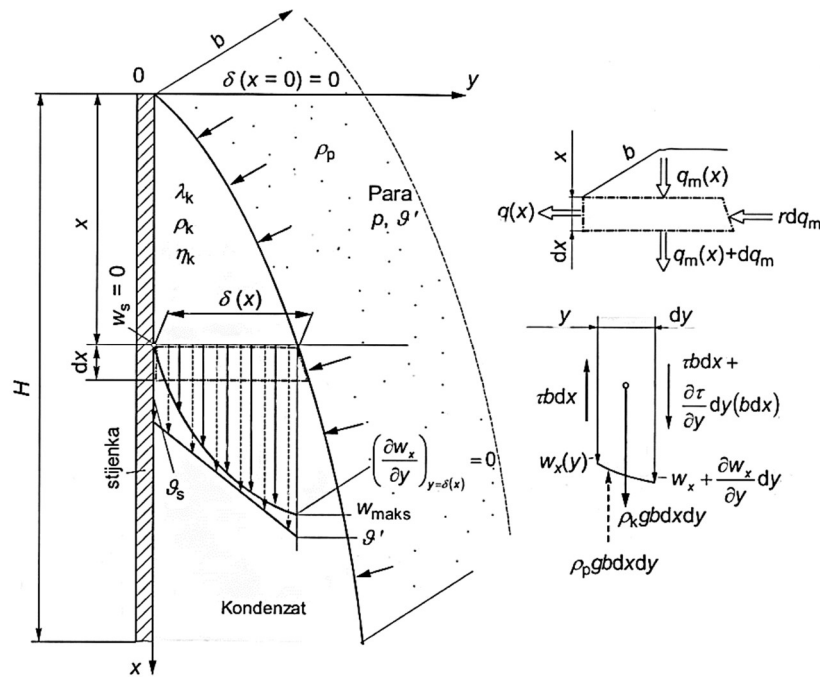
Djelovanju gravitacijske sile, uslijed koje se kondenzat giba prema dolje, suprotstavlja se sila trenja na stijenci, inercijske sile te trenje na međupovršini između kapljevito sloja i pare. Na samoj stijenci komponenta brzine u smjeru osi x jednaka je nuli. Udaljavanjem od stijenke u smjeru osi y , brzina se povećava do maksimalne vrijednosti, a zatim se smanjuje dok ne postane ponovno jednaka nuli na dovoljnoj udaljenosti od stijenke. U cijelom prostoru kojeg ispunjava vodena para, zajedno s međupovršinom, temperatura je konstantna i odgovara vrijednosti temperature zasićenja ϑ_z . U kapljevito sloju temperatura se mijenja od vrijednosti ϑ_z na međupovršini, do vrijednosti temperature stijenke ϑ_s [50].

Teoriju filmske kondenzacije postavio je i razradio Wilhelm Nusselt 1916. godine u svom radu pod nazivom „Die Oberfleachen kondensation des Wasserdampfes“. Nusseltova teorija filmske kondenzacije predstavlja karakterističan model na kojem se uspješno primjenjuje teorija graničnog sloja. Kasnije provedeni eksperimenti pokazali su njezinu ispravnost.

Tijekom razrade modela filmske kondenzacije Nusselt je uveo sljedeće pretpostavke [49]:

- Laminarno otjecanje i konstantna fizikalna svojstva kondenzata na vertikalnoj stijenci

- Para se nalazi na temperaturi zasićenja ϑ' i u pari ne postoje temperaturni gradijenti. Stoga se prijenos topline para - kapljevina odvija samo kondenzacijom na slobodnoj površini para - kapljevina, a ne i provođenjem topline kroz paru
- Zanimaruje se poprečno naprezanje kapljevina – para na slobodnoj površini, pa je $\left(\frac{\partial w_x}{\partial y}\right)_{y=\delta(x)} = 0$
- Zanimaruje se impuls količine gibanja i adveksijski energetski prijenos u filmu kondenzata. To je prihvatljivo kod malih brzina otjecanja kondenzata. Iz navedenog slijedi da se prijenos topline kroz sloj kondenzata odvija samo kondukcijom, a temperaturni profil kroz kondenzat je linearan.



Slika 6. Filmska kondenzacija uz vertikalnu stijenku – Nusseltov model [49]

Prema usvojenoj pretpostavci da se prijenos topline kroz sloj kondenzata odvija samo kondukcijom, gustoća toplinskog toka oslobođena pri kondenzaciji prema Fourierovom stavku izražava se kao

$$q(x) = \frac{\lambda_k}{\delta(x)} (\vartheta' - \vartheta_s) \quad (2-1)$$

odnosno prema Newtonovom stavku kao

$$q(x) = \alpha(x)(\vartheta' - \vartheta_s) \quad (2-2)$$

Izjednačavanjem prethodna dva izraza proizlazi da je lokalni koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji jednak

$$\alpha(x) = \frac{\lambda_k}{\delta(x)} \quad (2-3)$$

Prema slici 6 na elementarni volumen kapljevine u sloju kondenzata postavlja se jednadžba ravnoteže sila u smjeru osi x

$$g\rho_k b dx dy + \tau b dx + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy(b dx) - \tau b dx - \rho_p g b dx dy = 0 \quad (2-4)$$

koja nakon skraćivanja glasi

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = -g(\rho_k - \rho_p) \quad (2-5)$$

Prema Newtonovom zakonu viskoznosti posmično naprezanje je $\tau = \eta_k \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} \right)$ pa se gornja jednadžba piše u obliku

$$\frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = -\frac{g(\rho_k - \rho_p)}{\eta_k} \quad (2-6)$$

Prva integracija glasi

$$\frac{\partial w_x}{\partial y} = -\frac{g(\rho_k - \rho_p)}{\eta_k} y + C_1 \quad (2-7)$$

Druga integracija glasi

$$w_x(y) = -\frac{g(\rho_k - \rho_p)}{\eta_k} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \quad (2-8)$$

Rubni (granični uvjeti)

$$y = 0 \rightarrow w_x = 0 \quad (2-9)$$

$$y = \delta(x) \rightarrow \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} \right)_{y=\delta(x)} = 0 \quad (2-10)$$

Integracijske konstante dobivaju se uvrštavanjem rubnih uvjeta u jednadžbe (2-7) i (2-8)

$$C_2 = 0 \quad (2-11)$$

$$C_1 = \frac{g(\rho_k - \rho_p)}{\eta_k} \delta(x) \quad (2-12)$$

Uvrštavanjem integracijskih konstanta u jednadžbu (2-8) dobiva se partikularno rješenje profila brzina u filmu kondenzata:

$$w_x(y) = \frac{g(\rho_k - \rho_p)}{\eta_k} \delta^2(x) \left(\frac{y}{\delta(x)} - \frac{1}{2} \frac{y^2}{\delta^2(x)} \right) \quad (2-13)$$

Maseni protok kondenzata na koordinati x glasi

$$q_m(x) = \int_0^{\delta(x)} \rho_k w_x(y) dy \quad (2-14)$$

Nakon uvrštavanja jednadžbe (2-13) u podintegralnu funkciju jednadžbe (2-14) te provođenja postupka integriranja dobiva se jednadžba za maseni protok kondenzata

$$q_m(x) = \frac{g\rho_k(\rho_k - \rho_p)}{3\eta_k} \delta^3(x) \quad (2-15)$$

Prema slici 6 na elementarni volumen kapljevine u sloju kondenzata postavlja se energijska bilanca

$$q(x) = r \frac{dq_m}{dx} \quad (2-16)$$

Uvrštavanje Fourieova stavka (2-1) u jednadžbu (2-16) daje sljedeću jednadžbu

$$\lambda_k \frac{\vartheta' - \vartheta_s}{\delta(x)} = r \frac{dq_m}{dx} \quad (2-17)$$

Jednadžba (2-15) derivira se po varijabli x i derivacija se uvrštava u (2-17). Nakon separacije varijabli dobiva se jednadžba

$$\delta^3(x) d\delta = \frac{\eta_k \lambda_k (\vartheta' - \vartheta_s) dx}{gr(\rho_k - \rho_p) \rho_k} \quad (2-18)$$

Odnosno integralni oblik

$$\int_{\delta=0}^{\delta(x)} \delta^3(x) d\delta = \frac{\eta_k \lambda_k (\vartheta' - \vartheta_s) dx}{gr(\rho_k - \rho_p) \rho_k} \int_{x=0}^x dx \quad (2-19)$$

Nakon integracije dobiva se izraz za lokalnu debljinu kondenzata

$$\delta(x) = \sqrt[4]{\frac{4\eta_k \lambda_k (\vartheta' - \vartheta_s) x}{gr(\rho_k - \rho_p) \rho_k}} \quad (2-20)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (2-20) u (2-3) dobiva se izraz za lokalni koeficijent prijelaza topline

$$\alpha(x) = \sqrt[4]{\frac{(\rho_k - \rho_p) \rho_k gr \lambda_k^3}{4\eta_k (\vartheta' - \vartheta_s) x}} \quad (2-21)$$

S obzirom da je gustoća pare puno manja od gustoće pripadajućeg kondenzata, gustoća pare može se u proračunima zanemariti. Tada jednadžba (2-21) poprima sljedeći oblik

$$\alpha(x) = \sqrt[4]{\frac{\rho^2 g r \lambda^3}{4\eta(\vartheta' - \vartheta_s)x}} \quad (2-22)$$

U praktičnoj primjeni najčešće je od interesa prosječna vrijednost koeficijenta prijelaza topline na ukupnoj visini H , odnosno površini bH stijenke

$$\alpha_m = \frac{1}{H} \int_{x=0}^{x=H} \alpha(x) dx \quad (2-23)$$

Uvrštavanjem (2-22) u (2-23), integracijom te zamjenom dinamičke žilavosti s kinematičkom dobiva se izraz za prosječni koeficijent prijelaza topline prilikom kondenzacije na vertikalnoj stijenci

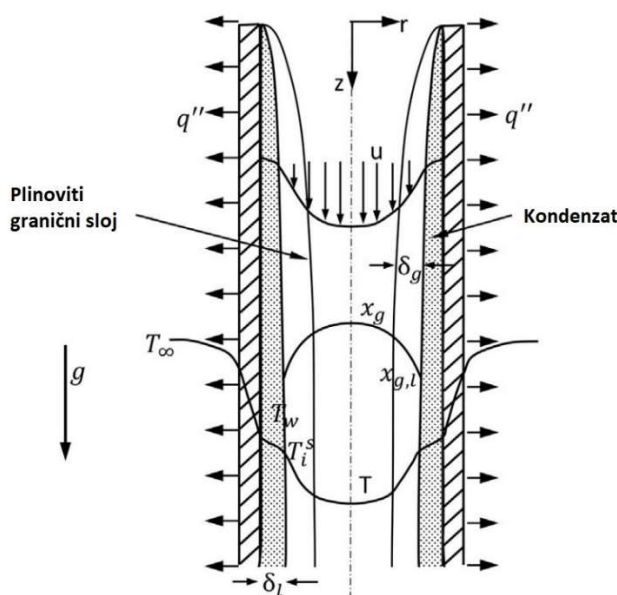
$$\alpha_m = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{\rho g r \lambda_k^3}{4\nu(\vartheta' - \vartheta_s)H}} = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\rho g r \lambda_k^3}{\nu(\vartheta' - \vartheta_s)H}} \quad (2-24)$$

Jednadžba (2-24) može se koristiti i za kondenzaciju pare na kosoj stijenci duljine L , za kut φ , prema horizontali:

$$\alpha_m = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\rho g r \lambda_k^3}{\nu(\vartheta' - \vartheta_s)L}} \sin \varphi \quad (2-24)$$

Prikazani Nusseltov model predstavlja osnovni model koju su kasnije nadograđivali i poboljšavali mnogi autori. Pregled razvoja teorije filmske kondenzaciji, kao i detaljnije opisani analitički modeli mogu se pronaći u [49]. Reference na proračunske modele filmske kondenzacije na i unutar cijevi raznih orijentacija navedene su u potpoglavlju 1.1 ovog rada.

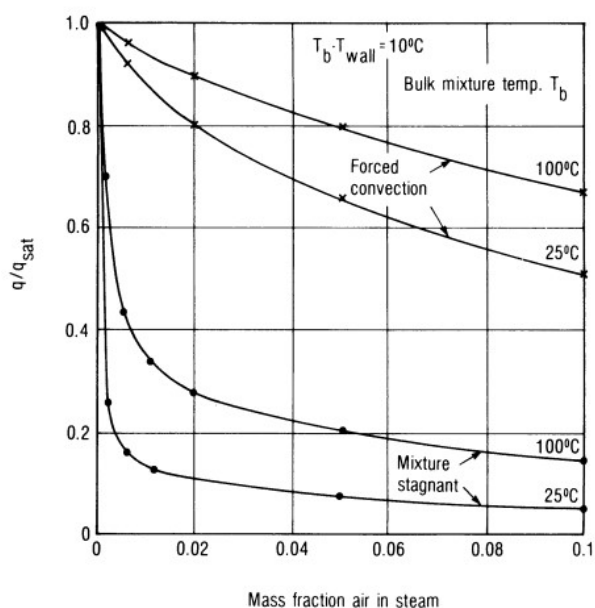
Slikom 8 prikazani su profili brzine, temperature i udjela zraka u smjesi na primjeru kondenzacije uz prisutnost nekondenzirajućeg plina unutar cijevi [43]. Na slici se vidi da je udio zraka u smjesi najmanji u jezgri plinske mješavine. Približavanjem prema međupovršini udio zraka se povećava. Navedeno je posljedica prethodno opisanog nakupljanja zraka uz nastali kondenzat. Lokalno veći udio zraka ima za posljedicu povećanje parcijalnog tlaka zraka u smjesi, odnosno smanjenja parcijalnog tlaka vodene pare. Navedeno je također prikazano slikom 8 kroz profil temperatura. Vidljivo je kako se s približavanjem međupovršini temperatura kondenzacije smanjuje kao posljedica smanjenog parcijalnog tlaka vodene pare.



Slika 8. Fizikalni model kondenzacije vodene pare i zraka u cijevi [43]

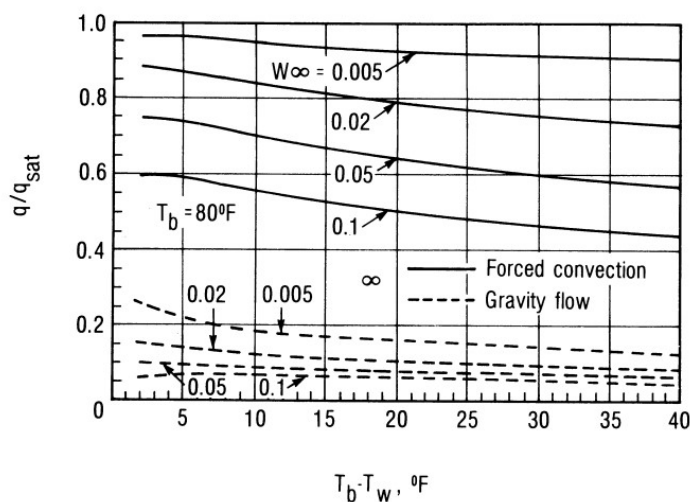
Posljedica navedenih pojava u plinovitom graničnom sloju je značajno smanjenje toplinskih tokova, odnosno koeficijenata prijelaza topline pri kondenzaciji vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova, u odnosu na one u slučaju kondenzacije čiste vodene pare.

M. K. Jensen u svojem radu [51] također navodi gore navedene utjecaje prisutnosti nekondenzirajućih plinova. Na slici 9 prikazan je utjecaj prisutnosti zraka pri kondenzaciji vodene pare, za slučajeve strujanja potaknutog gravitacijom i prisilnog strujanja, kao omjer toplinskog toka uz prisutnost zraka i toplinskog toka bez prisutnosti zraka. Vidljivo je kako prisutnost zraka puno značajnije smanjuje prenesene toplinske tokove kod strujanja potaknutog gravitacijom, nego kod prisilnog strujanja.



Slika 9. Utjecaj prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare [51]

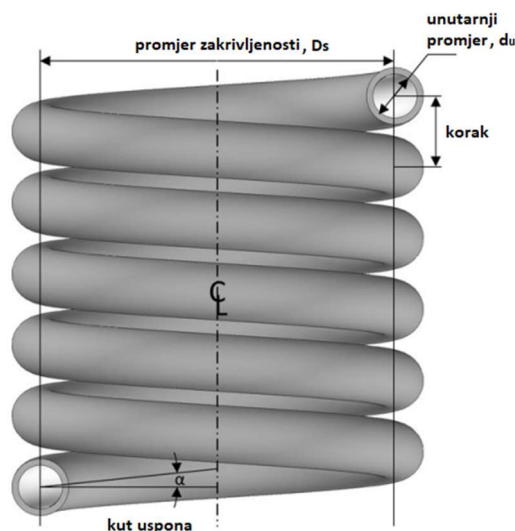
Slikom 10 prikazan je prethodno navedeni utjecaj prisutnosti zraka pri kondenzaciji vodene pare, za slučajeve strujanja potaknutog gravitacijom i prisilnog strujanja, u ovisnosti o razlici temperatura jezgre plinske mješavine i temperatura stijenke. Vidljivo je kako prisutnost zraka smanjuje omjere toplinskih tokova s povećanjem navedenih temperaturnih razlika. Odnosno, na većim temperaturnim razlikama preneseni toplinski tokovi su manji.



Slika 10. Utjecaj temperaturne razlike na kondenzaciju vodene pare [51]

2.3. Sekundarna strujanja kod spiralnih cijevi

Prijenos topline unutar spiralnih cijevi ovisi o Reynoldsovoj značajki, unutarnjem promjeru cijevi, promjeru zakrivljenosti spirale, koraku spirale i kutu uspona spirale. Ukoliko je kut uspona jednak nuli, onda govorimo o torusnim cijevima [21]. Slikom 11 prikazani su navedeni osnovni parametri spiralnih cijevi.

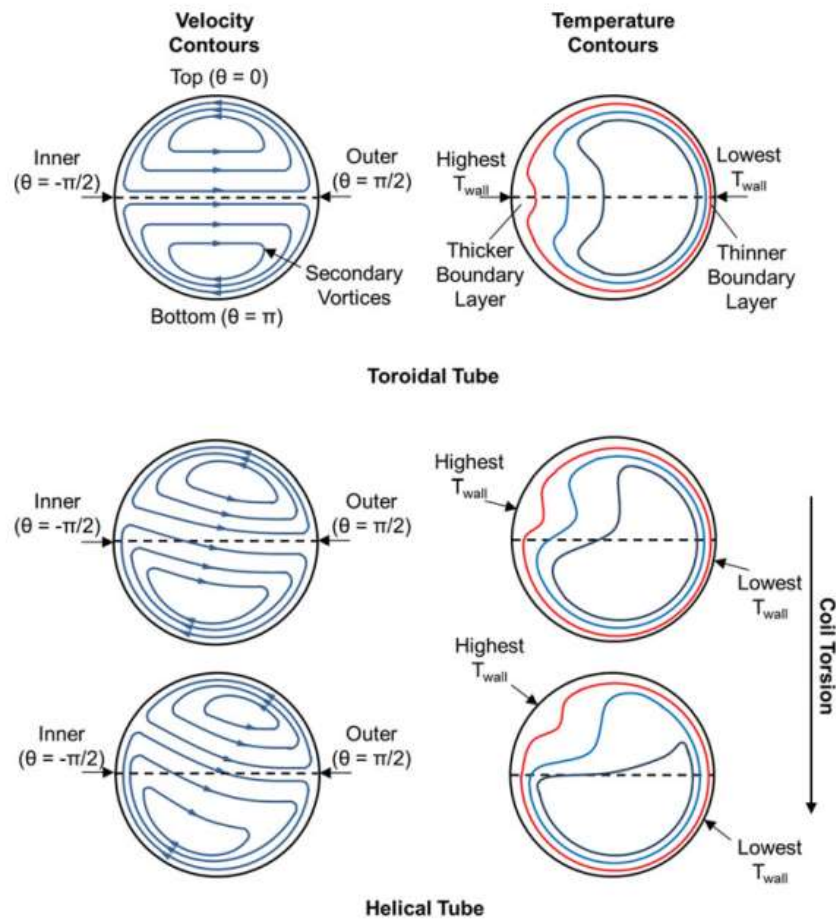


Slika 11. Osnovni parametri spiralne cijevi [21]

U literaturi protok unutar spiralnih i torusnih cijevi opisuje se pomoću bezdimenzijske značajke koja se naziva Deanov broj

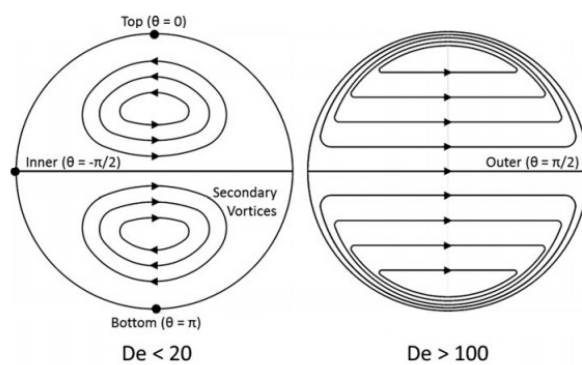
$$De = Re \left(\frac{d_u}{D_s} \right)^{1/2} \quad (2-25)$$

Uslijed strujanja radnog medija unutar spiralnih cijevi javljaju se centrifugalne sile koje generiraju sekundarna strujanja u ravnini okomitoj na smjer strujanja. Na slikama 12 i 13 prikazana su navedena sekundarna strujanja kao dva vrtloga u gornjoj i donjoj polovici poprečnog presjeka cijevi. Vrtlozi su simetrični u slučaju torusnih cijevi, dok kod spiralnih cijevi uslijed utjecaja koraka spirale oni postaju asimetrični i različiti u veličini. Vidljivo je kako sekundarna strujanja stanjuju granični sloj na vanjskom rubu spiralne cijevi, a podebljavaju ga na unutarnjem rubu.



Slika 12. Polja brzine i temperature unutar spiralnih i torusnih cijevi [21]

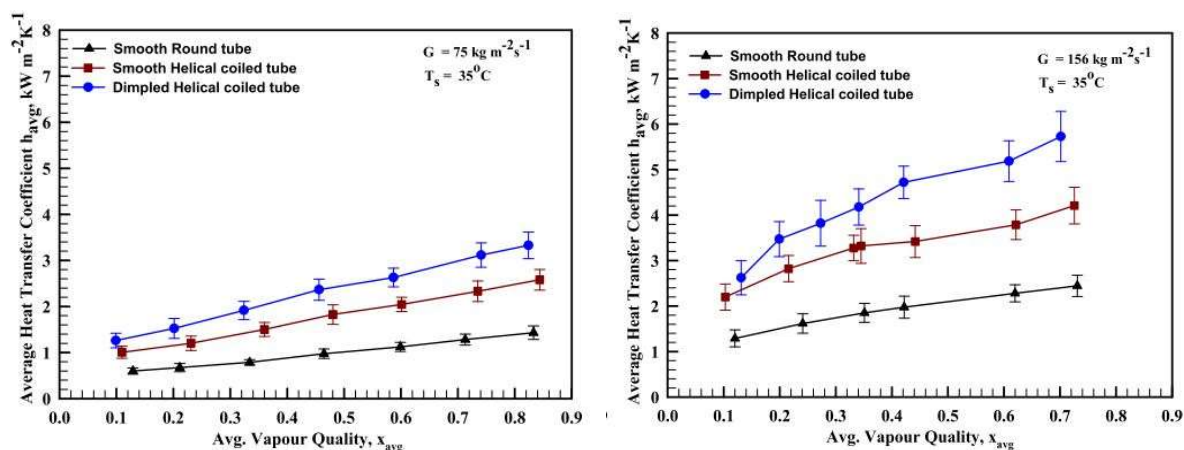
Iz slike 13 vidljivo je kako su sekundarna strujanja, odnosno vrtlozi, na manjim Reynoldsovim i Deanovim brojevima više kružni i centrirani unutar gornje i donje polovice cijevi. Na većim vrijednostima oni postaju veći te im se centar pomiče prema rubovima cijevi.



Slika 13. Sekundarna strujanja u torusnim cijevima [21]

Kombinacija primarnih i sekundarnih strujanja, odnosno pojava asimetričnih i kompleksnih polja brzina unutar spiralnih cijevi, ima za posljedicu povećanje koeficijenata prijelaza topline, ali i povećanje pada tlaka, u odnosu na ravne izmjenjivačke cijevi pri prisilnoj konvekciji [21]. Proračunski modeli za izračun prijelaza topline kod jednofaznog strujanja unutar spiralnih cijevi mogu se pronaći u radovima [16], [21] i [22].

Dvofazno strujanje prilikom kondenzacije je značajno kompleksnije u odnosu na prethodno opisano jednofazno strujanje, međutim i u jednom i drugom slučaju javljaju se sekundarna strujanja kao posljedica geometrije izmjenjivačkih cijevi. Objavljeni radovi [25], [26] i [27] potvrđuju da su i kod kondenzacije radnih tvari u spiralnim cijevima koeficijenti prijelaza topline također veći u odnosu na one kod ravnih cijevi. Razlog navedenom su upravo sekundarna strujanja, odnosno vrtlozi, koji unutar cijevi djelomično kidaju kapljevite i parne granične slojeve te omogućuju pari olakšan put do stijenke izmjenjivačke cijevi. Na slici 14 prikazana je usporedba koeficijenata prolaza topline pri kondenzaciji rashladne radne tvari unutar ravnih i spiralnih cijevi na temelju eksperimentalnog istraživanja navedenog u radu [26].



Slika 14. Usporedba koeficijenata prolaza topline za ravne i spiralne cijevi [26].

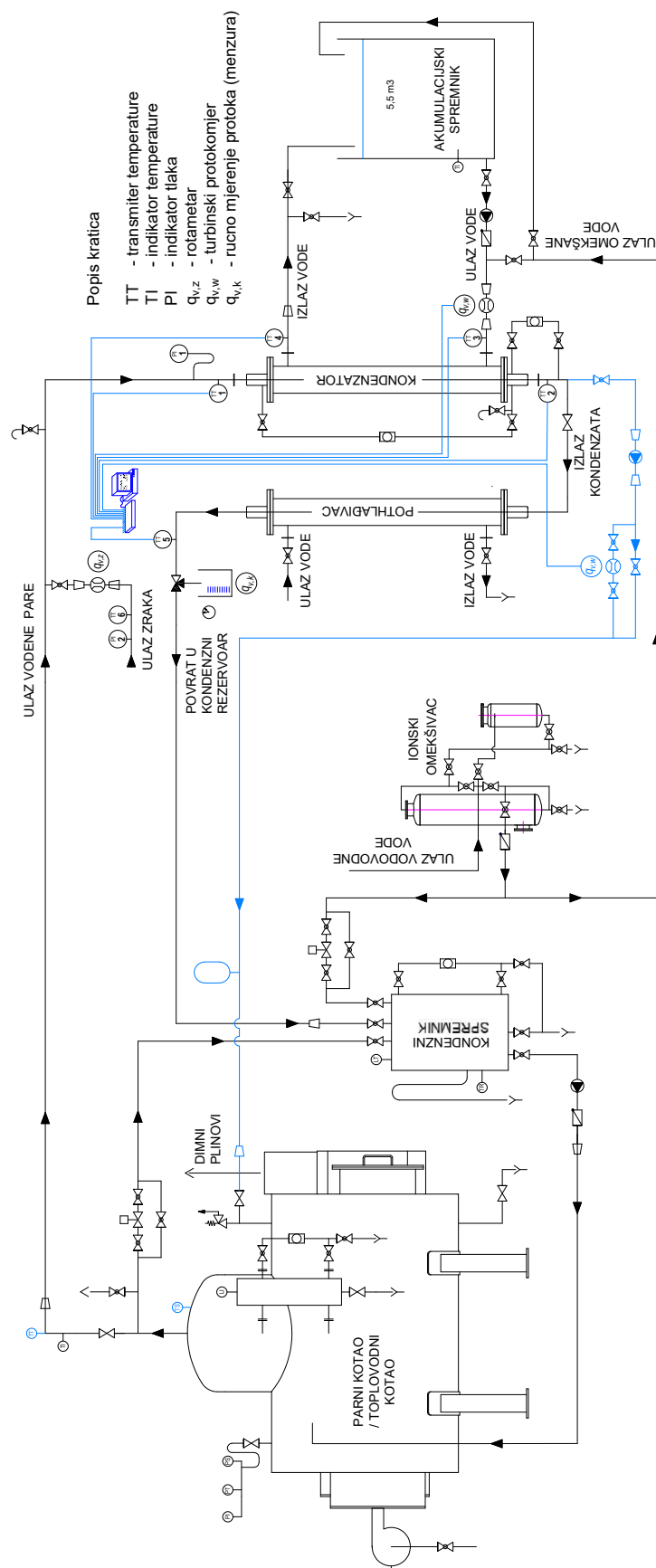
3. RAZVOJ MJERNE LINIJE

S ciljem provođenja eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare u spiralnim cijevima razvijena je i izrađena nova mjerna linija koja će biti prikazana i opisana u ovom poglavlju. Mjerna linija je razvijena na način da uz jednostavne preinake i podešavanja omogućuje provođenje ispitivanja toplinskih karakteristika izmjenjivača topline u kondenzacijskom ili u toplovodnom režimu rada, uz ili bez prisutnosti zraka kao nekondenzirajućeg plina te kao takva predstavlja vrijednu opremu za daljnja eksperimentalna istraživanja u području prijenosa topline. U sklopu mjerne linije razvijeni su sustavi kontinuiranog odzračivanja nekondenzirajućih plinova nakon procesa kondenzacije i osiguravanja da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. Osim prikaza mjerne linije, u ovom poglavlju bit će detaljno opisani i postupci provođenja mjerenja u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada.

Slikom 15 prikazana je razvijena mjerna linija smještena u prostorima poduzeća Pireko d.o.o.



Slika 15. Razvijena mjerna linija



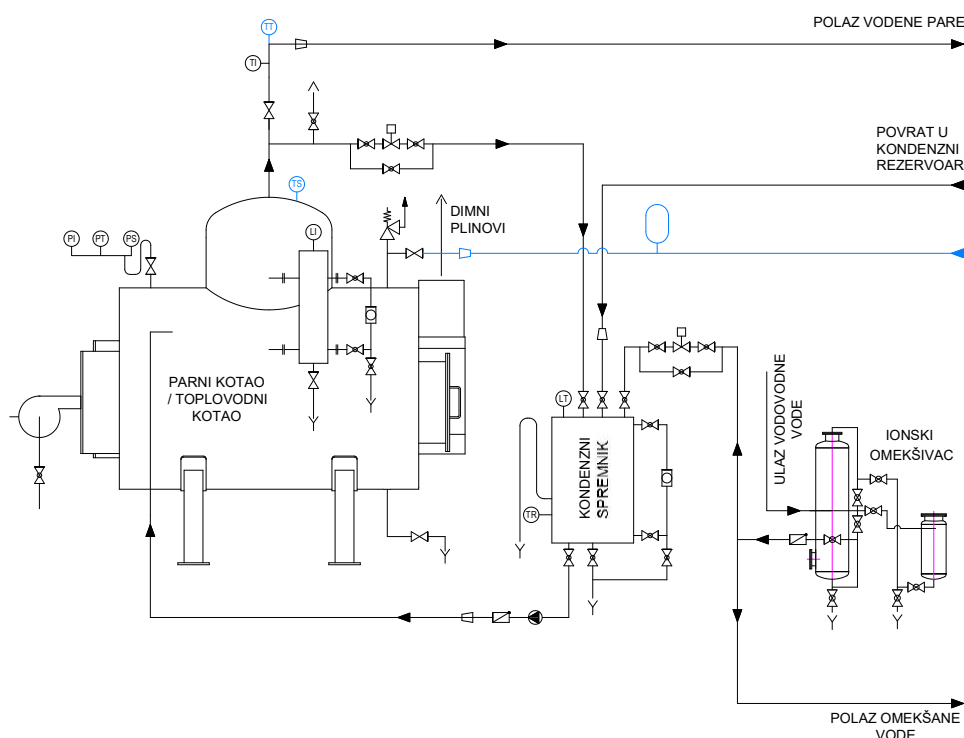
Slika 16. Shema mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada

3.1. Opis mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada

Razvijena mjerna linija za provođenje eksperimentalnih istraživanja se u osnovi sastoji od energetskeg dijela i ispitnog dijela. Osnovna funkcija energetskeg dijela je priprema radnog medija (tople vode ili vodene pare) koji se zatim spojnim cjevovodima odvodi do ispitnog dijela u kojem se provode mjerenja i prikupljaju mjerni podaci. Shematskim prikazom na slici 16 prikazana je kompletna razvijena mjerna linija podešena za rad u kondenzacijskom režimu rada.

3.1.1. Energetski dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada

Energetski dio mjerne linije namijenjene za kondenzacijski režim rada, detaljnije prikazan slikom 17, sačinjava kotao, kondenzni spremnik, ionski omekšivač, regulacijska armatura te spojni cjevovod. Njegove osnovne funkcije su priprema omekšane napojne vode, njezino kontrolirano i regulirano zagrijavanje na određenu temperaturu i tlak, dovođenje do ispitnog dijela mjerne linije te kasnije njezino prikupljanje u kondenzni spremnik i povrat u kotao na ponovno zagrijavanje.

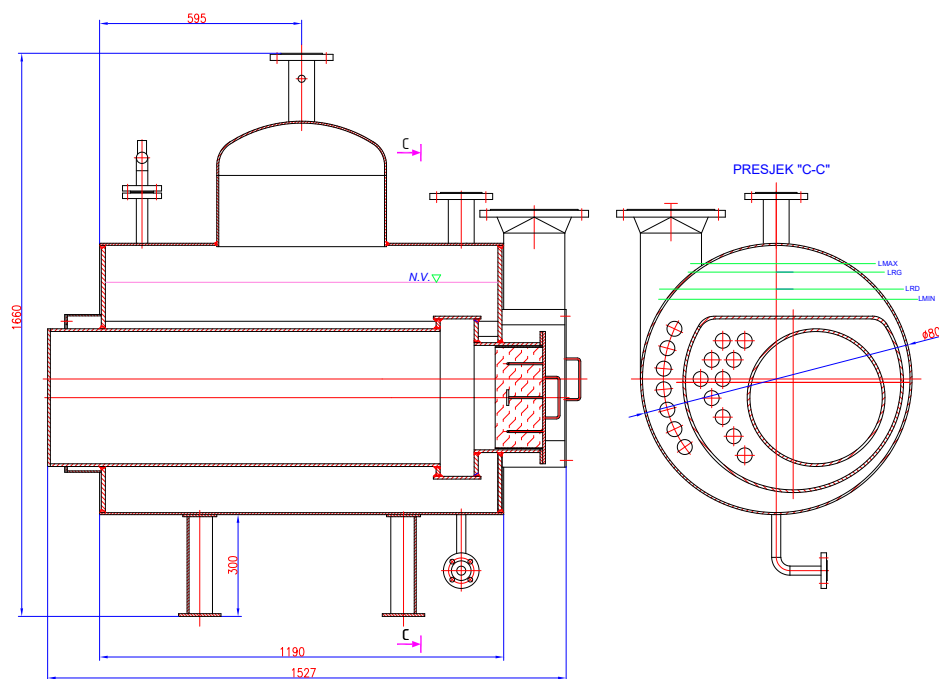


Slika 17. Energetski dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada

Za proizvodnju niskotlačne vodene pare potrebne za provođenje eksperimentalnog istraživanja proizveden je parni kotao vatrocijevnog tipa. Kotao je izrađen iz ugljičnog čelika ukupne izmjenjivačke površine $4,4 \text{ m}^2$. Projektiran je za tlakove do 6 bar pretlaka i temperature do $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Opremljen je dvostupanjskim plinskim plamenikom ukupnog toplinskog učina do 120 kW. Sastavni dio kotla je sigurnosna, mjerna i upravljačka armatura. Automatskim radom kotla upravlja PLC ugrađen u upravljački elektroormar. Upravljačko sučelje omogućuje odabir parnog ili toplovodnog režima rada kotla. U parnom režimu rada upravljanje se vodi po tlaku preko osjetnika tlaka koji je smješten na mjernoj i sigurnosnoj grupi kotla. U toplovodnom režimu rada upravljanje se vodi po temperaturi mjerenoj pomoću temperaturnog osjetnika smještenog na izlazu iz kotla. Vanjski izgled kotla prikazan je slikom 18, dok slika 19 prikazuje kotao u presjeku.



Slika 18. Izgled proizvedenog parnog kotla



Slika 19. Parni kotao u presjeku

Priprema napojne vode kotla i rashladne vode izmjenjivača topline, odvija se u ionskom omekšivaču (tip OV-0,5-S, proizvođač Pireko d.o.o.) koji je prikazan slikom 20. Voda se omekšava do tvrdoće manje od 0,1 °dH. Uređaj se sastoji od jednog ionskog filtera, posude za sol, cjevovoda s armaturom, vodomjera i ionske mase. Za vrijeme provođenja ispitivanja kontrolira se tvrdoća omekšane vode na izlazu iz omekšivača kako bi se na vrijeme provela regeneracija filtera prije nego što se on zasiti. Osim za osiguranje dugotrajnog i sigurnog rada kotla, osiguravanje adekvatno pripremljene vode je važno i za pravilno provođenje eksperimentalnog istraživanja. Omekšana voda neće stvarati kamenac na izmjenjivačkim cijevima, odnosno neće biti dodatnog vremenski promjenjivog toplinskog otpora prijenosu topline. Navedeno osigurava jednakost uvjeta i usporedivost rezultata mjerenja neovisno o vremenskom trenutku provođenja samog mjerenja.

Omekšana napojna voda, kao i povratni kondenzat iz ispitnog dijela mjerne linije, pohranjuju se u kondenznom spremniku prikazanom na slici 21. Spremnik je pravokutnog oblika, ukupnog volumena 375 l, izrađen iz ugljičnog čelika te izvana toplinski izoliran mineralnom vunom debljine 50 mm. Opremljen je pumpom, termostatom, nivo sondama, cjevovodima s armaturom te upravljačkim elektroormarom s PLC-om. Osnovna mu je funkcija automatska nadopuna napojne vode parnog kotla. Osim navedenog, uređaj vrši funkcije prihvata povratnog kondenzata i predgrijavanja napojne vode korištenjem dijela vodene pare iz parnog kotla.



Slika 20. Ionski omekšivač

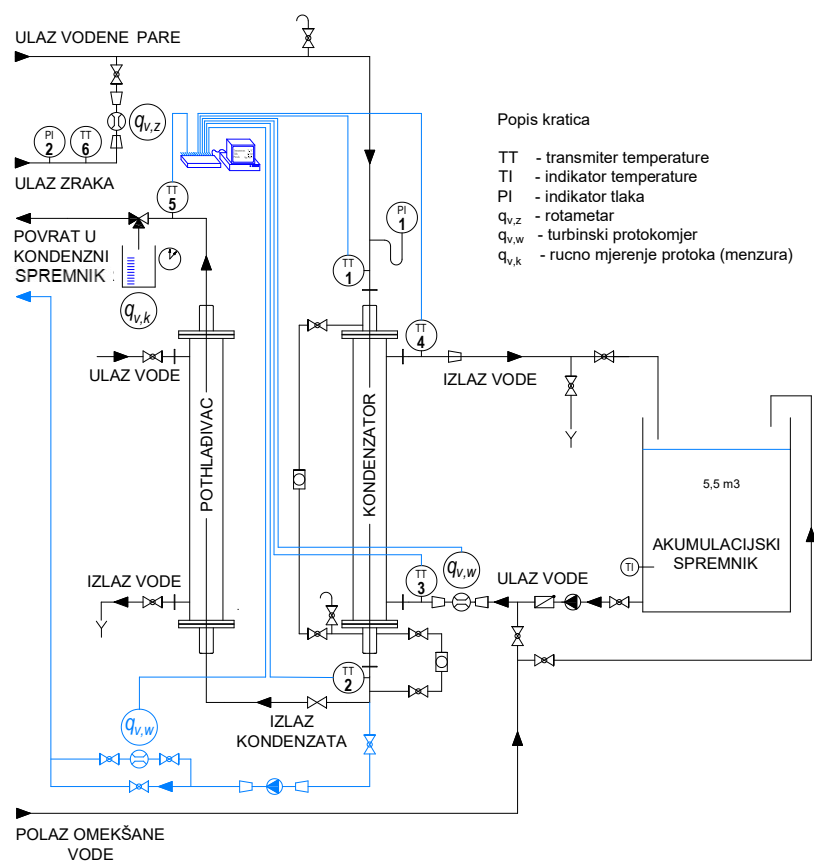


Slika 21. Kondenzni spremnik

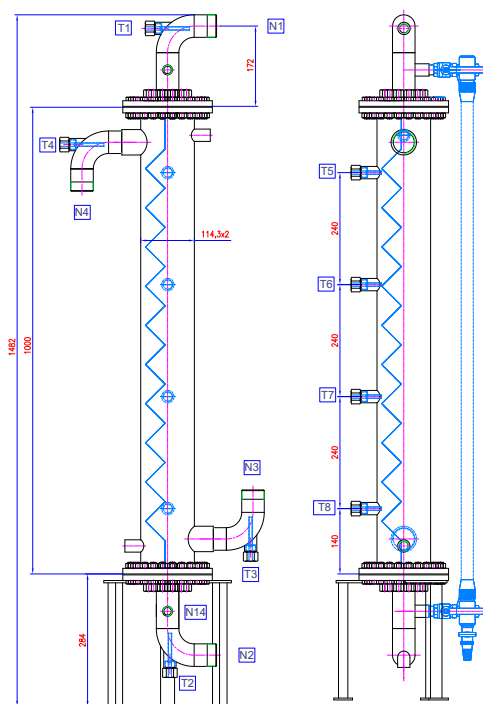
3.1.2. Ispitni dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada

Ispitni dio mjerne linije namijenjene za kondenzacijski režim rada, detaljnije prikazan slikom 22, sastoji se od izmjenjivača topline na kojemu se provode ispitivanja, dodatnog izmjenjivača topline koji služi za pothlađivanje kondenzata, akumulacijskog spremnika, pumpi, spojnih cjevovoda i pripadajuće armature, mjerne opreme za mjerenje temperature, tlaka i protoka te akvizicijskog sustava za prikupljanje mjernih podataka. Sastavni dio ispitnog dijela mjerne linije je i pripremna i mjerna grupa uređaja za dovod zraka kao nekondenzirajućeg plina u struju vodene pare.

Ispitivani izmjenjivač topline je rekuperativnog tipa. Izrađen je kompletno iz nehrđajućeg čelika kvalitete W.Nr. 1.4301. Cijevni snop izmjenjivača topline sastoji se od 6 vertikalnih spiralnih cijevi dimenzija $\phi 10 \times 1$, ukupne izmjenjivačke površine $0,339 \text{ m}^2$. Izmjenjivač je opremljen osnovnim priključcima DN40 za ulaz pare, izlaz kondenzata, ulaz i izlaz rashladne vode, priključcima DN15 za mjerne instrumente te ostalim potrebnim priključcima koji omogućuju siguran rad uređaja i ispravno provođenje eksperimentalnog istraživanja. Izmjenjivač je izoliran 19 mm debelim slojem Armaflex izolacije.



Slika 22. Ispitni dio mjerne linije u kondenzacijskom režimu rada



Slika 23. Ispitivani izmjenjivač topline



Slika 24. Cijevni snop ispitivanog izmjenjivača topline

Slikama 23 i 25 prikazan je ispitivani izmjenjivač topline, dok je slikom 24 prikazan njegov cijevni snop koji je ugrađen unutar plašta izmjenjivača.

Dodatni izmjenjivač topline je također rekuperativnog tipa s ugrađenim identičnim cijevnim snopom od spiralnih cijevi kao i kod ispitivanog izmjenjivača. Izmjenjivač je serijski spojen iza ispitivanog izmjenjivača. Njegova osnovna funkcija je pothlađivanje vrelog kondenzata na temperature ispod 50 °C, a sve kako bi se omogućilo mjerenje protoka na za to predviđenom mjernom mjestu. Slikom 26 prikazan je sklop ispitivanog (na slici gore) i dodatnog (na slici dolje) izmjenjivača topline.



Slika 25. Ispitivani izmjenjivač topline



Slika 26. Sklop ispitivanog i dodatnog izmjenjivača topline

Akumulacijski spremnik služi za akumulaciju omekšane vode koja se koristi kao rashladni medij prilikom kondenzacije vodene pare u ispitivanom izmjenjivaču topline te pothlađivanja kondenzata u dodatnom izmjenjivaču topline. Spremnik je ukupnog volumena 5500 l te je izrađen iz nehrđajućeg čelika W.Nr. 1.4301. Sastavni dio spremnika je cirkulacijska pumpa CR3-7 proizvođača Grundfos, sustav cjevovoda za napajanje izmjenjivača topline te povratni cjevovod.

Slikom 27 prikazana je mjerna grupa uređaja za dovod zraka kao nekondenzirajućeg plina u struju vodene pare unutar mjerne linije. Protok komprimiranog zraka određenog tlaka i temperature iz centralnog razvoda se regulira pomoću zapornih ventila i mjernih uređaja (rotametri). Zrak se zatim pomoću pripadnog cjevovoda dovodi na priključno mjesto na ispitnoj liniji koje je prikazano slikom 28. Smjesa vodene pare i zraka prolazi kroz ravni dio cjevovoda (zonu miješanja) u kojoj se miješa prije ulaska u ispitivani izmjenjivač topline.



Slika 27. Pripremna i mjerna grupa uređaja za dovod zraka



Slika 28. Ulaz zraka u mjernu liniju

Posebna pažnja je posvećena sustavu odzračivanja nekondenzirajućih plinova. Na mjernoj liniji ugrađena su dva odzračna mjesta (slika 29). Prvo odzračno mjesto se nalazi na najvišoj točki mjerne linije. Na kraju zone miješanja, prije ulaza radnog medija u spiralne cijevi izmjenjivača topline, ugrađen je odzračni lonac sa zapornom armaturom.

Drugo odzračno mjesto smješteno je na izlazu radnog medija iz spiralnih cijevi izmjenjivača topline. Na izlaznom priključku ugrađen je dodatni cjevovod kroz koji se pomoću pripadajuće zaporne armature provodi odzračivanje.

Prije provođenja ispitivanja i tijekom puštanja ispitne linije u rad važno je odzračiti sav zaostali zrak koji se nalazi unutar sustava. Odzračivanje se u tom slučaju provodi kroz oba odzračna mjesta. Također, prilikom provođenja ispitivanja s nekondenzirajućim plinovima, važno je zrak koji miješamo s vodenom parom kontinuirao odzračivati nakon procesa kondenzacije unutar spiralnih cijevi. U protivnom bi se zrak nakupljao u zoni kondenzacije unutar izmjenjivača topline te time narušio proces kondenzacije. Odzračivanje se tada provodi preko drugog odzračnog mjesta smještenog na izlazu radnog medija iz spiralnih cijevi izmjenjivača topline.



Slika 29. Odzračna mjesta na mjernoj liniji

Također, sastavni dio ispitivanog izmjenjivača topline i mjerne linije je sklop revizijskih nivokaza (slika 30) pomoću kojih se prati sam proces kondenzacije, odnosno osigurava da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. Prilikom regulacije protoka na strani kondenzata vizualno se na nivokazima prati trenutni nivo kondenzata. Pomoću regulacijskog igličastog ventila protok se smanjuje ili povećava ovisno o nivou kondenzata koji se nastoji dovesti što bliže nivou izlaza iz izmjenjivačkih cijevi. Navedeno je važno osigurati zbog daljnje analize i obrade podataka mjerenja.



Slika 30. Sklop revizijskih nivokaza

Mjerna linija opremljena je mjernom opremom za mjerenje temperature i protoka te akvizicijskim sustavom za prikupljanje mjernih podataka. Za mjerenje temperature koriste se platinski otpornički termometri s PT100 osjetnicima klase A prema EN 60751 (slika 31). Termometri su umetnuti u zaštitnu cijev ispunjenu termopastom. Mjerenja temperature se provode na ulazu vodene pare, izlazu kondenzata te ulazu i izlazu omekšane rashladne vode. Na ulazima i izlazima radnih medija osjetnici su smješteni u koljenima cjevovoda radi točnijeg očitavanja vrijednosti temperature.

Osjetnici su trožilno spojeni s akvizicijskim sustavom. Za vrijeme mjerenja vrijednosti i promjene temperature se numerički i grafički prate na računalu koje je spojeno s akvizicijskim sustavom. Svi termometri su umjereni u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Volumenski protoci rashladne vode na strani plašta izmjenjivača topline mjere se turbinskim protokomjerom s impulsnim izlaznim signalom koji je spojen na akvizicijski sustav. Ovisno o broju primljenih impulsa u određenom vremenu, akvizicijski sustav proračunava vrijednost volumenskog protoka. Protokomjer je umjeren u Laboratoriju za toplinsku energiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 31. PT100 temperaturni osjetnik



Slika 32. Primjer smještaja osjetnika



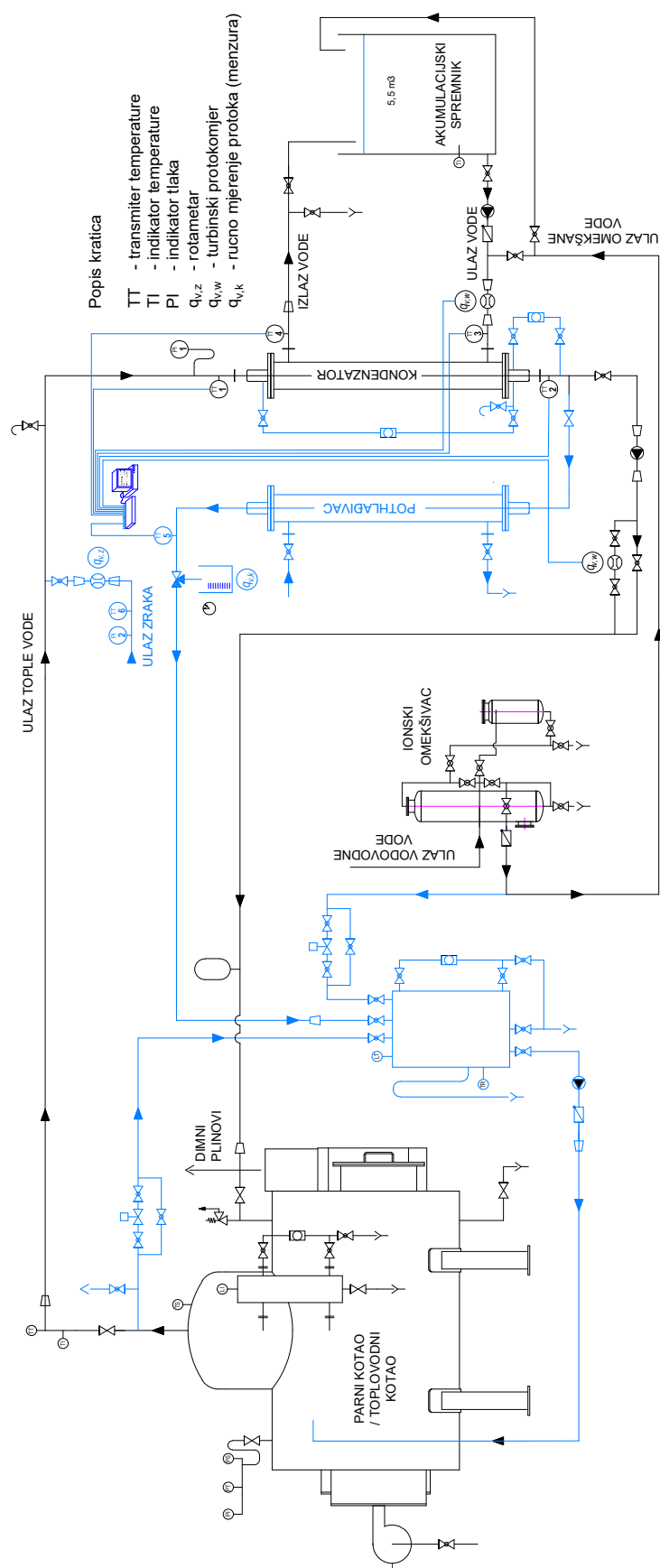
Slika 33. Turbinski protokomjer

Volumenski protoci pothlađenog kondenzata se mjere na izljevnom mjestu nakon dodatnog izmjenjivača topline pomoću gradirane menzure volumena 1000 ml i štoperice. Ovisno o očitanoj volumenu vode u menzuri u određenom vremenu proračunava se volumenski protok. Volumenski protoci zraka mjere se pomoću dva umjerena rotametra koji su ugrađeni na dovodu zraka u sustav (slika 27). Svaki rotametar pokriva određeno mjerno područje pa se ovisno o potrebnom volumenskom protoku zraka za ispitivanje koristi odgovarajući rotametar.

Akvizijski sustav je proizvođača National Instruments. Sustav je spojen na računalo gdje se numerički i grafički prate vrijednosti mjerenja.

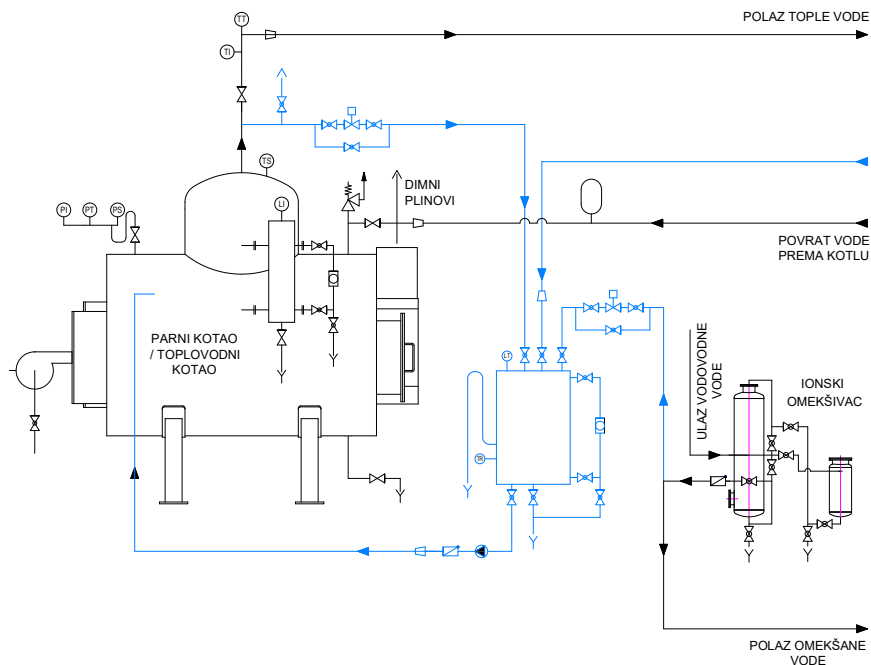
3.2. Opis mjerne linije u toplovodnom režimu rada

Razvijena mjerna linija omogućuje rad u kondenzacijskom i toplovodnom režimu. Iako se većina eksperimentalnog istraživanja ovog rada odvija u kondenzacijskom režimu rada, mogućnost rada mjerne linije u toplovodnom režimu rada je omogućena zbog potrebe za dodatnim eksperimentalnim istraživanjem toplinskih karakteristika na strani plašta izmjenjivača topline sa spiralnim cijevima, a sve u svrhu razvoja proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi. Navedeno je detaljnije opisano u poglavlju 4. Za toplovodni režim rada na mornoj liniji potrebno je odraditi određene preinake i podešavanja. U energetskom dijelu mjerne linije provodi se preinaka cjevovoda na način da se povrat ohlađene vode iz izmjenjivača topline više ne vodi u kondenzni spremnik, već se prespoji direktno na ulazni priključak kotla. U novi povratni cjevovod se ugrađuje cirkulacijska pumpa, koja omogućuje strujanje tople vode kroz sustav. Na PLC-u kotla odabire se toplovodni način rada s upravljanjem vođenim po temperaturi. U ispitnom dijelu također postoje određene preinake. Na ulazu rashladne vode u ispitivani izmjenjivač ne koristi se voda iz akumulacijskog spremnika, već voda konstantne temperature direktno iz ionskog omekšivača. Također, u povratni cjevovod prema kotlu ugrađuje se kontrolni turbinski vodomjer. Ispitivani izmjenjivač topline i ostala mjerna oprema su isti kao i kod mjerenja u kondenzacijskom režimu rada. Mjerna grupa uređaja za dovod zraka kao nekondenzirajućeg plina te sklop revizijskih nivokaza u ovom režimu rada se ne koriste. Shematskim prikazom na slici 34 prikazana je mjerna linija podešena za rad u toplovodnom režimu rada.

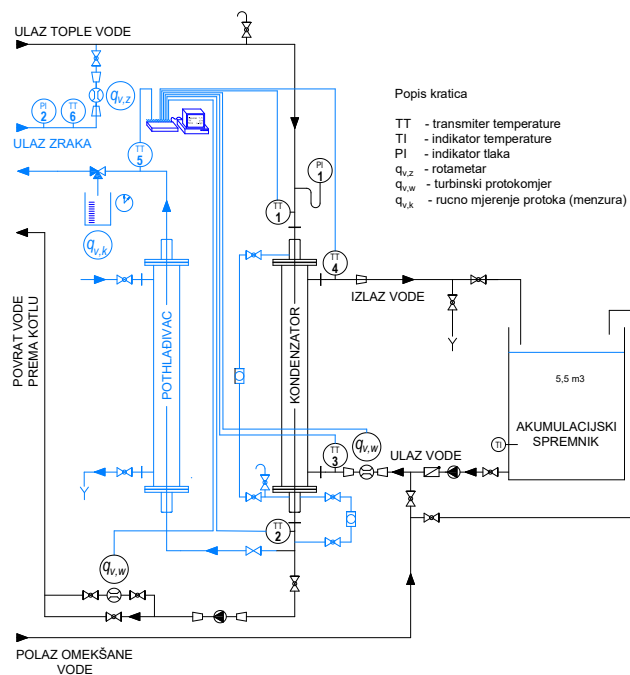


Slika 34. Shema mjerne linije u toplovodnom režimu rada

Slikama 35 i 36 zasebno su shematski prikazani energetske i ispitni dijelovi mjerne linije u toplovodnom režimu rada. Slikom 37 prikazana je kompletna razvijena mjerna linija.



Slika 35. Energetski dio mjerne linije u toplovodnom režimu rada



Slika 36. Ispitni dio mjerne linije u toplovodnom režimu rada



Slika 37. Razvijena mjerna linija

3.3. Opis postupka mjerenja u kondenzacijskom režimu rada

Nakon razvoja i sastavljanja mjerne linije prvo se provode preliminarna mjerenja s ciljem provjere tehničke i operativne funkcionalnosti opreme, detekcije potencijalnih nedostataka i definiranja načina za poboljšanje i usavršavanje mjerne linije. Osim navedenog, preliminarna mjerenja su važna i za stjecanje mjeriteljskog iskustva osoblja koje provodi mjerenje, kako bi se službena mjerenja provela što sigurnije i točnije. Također, prije početka svakog mjerenja potrebno je izvršiti sigurnosnu i tehničku provjeru svih sustava unutar i oko mjerne linije.

Mjerenja u kondenzacijskom režimu rada započinju uključivanjem parnog kotla i odabirom tlaka vodene pare. Odzračna mjesta prije i nakon ispitivanog izmjenjivača topline se otvaraju. Uključuje se pumpa koje osigurava cirkulaciju rashladne vode kroz plašteve ispitivanog i dodatnog izmjenjivača topline te se odabire željeni protok. Postizanjem odabranog tlaka u parnom kotlu, polagano se otvara glavni zaporni ventil te se vodena para pušta prema ispitivanom izmjenjivaču topline u kojem se uspostavlja kondenzacija.

Vodena para potiskuje zaostali zrak iz sustava kroz otvorena odzračna mjesta, koja se vizualno i zvučno prate. Prilikom promjene intenziteta zvuka koji se javlja prilikom izlaza zraka kroz odzračna mjesta, te uočavanja pojave vodene pare, zaporni ventili na odzračnim mjestima se pritvaraju do razine da vodena para izlazi s jako malim protokom. Na akvizicijskom sustavu se prate sve mjerene temperature. Nivo kondenzata se prati na revizijskim nivokazima te se prema potrebi podešava pomoću zapornog igličastog ventila koji se nalazi na izlazu iz dodatnog izmjenjivača topline. Mjerna linija se tada pušta da 10 do 20 minuta radi u uspostavljenom režimu rada kako bi se svi sastavni dijelovi mjerne linije progrijali i eventualno zaostali zrak odzračio. Zatim se zatvaraju sva odzračna mjesta te je mjerna linija spremna za početak službenih mjerenja mjernih točaka bez i sa prisutnosti zraka kao nekondenzirajućeg plina.

Za provedbu analize eksperimentalnog istraživanja potrebno je izmjeriti više setova mjernih točaka. Jedan set mjernih točaka se sastoji od jedne mjerne točke bez prisutnosti nekondenzirajućeg plina i više mjernih točaka s različitim udjelima zraka kao nekondenzirajućeg plina u struji vodene pare. Na početku se mjeri mjerna točka bez prisutnosti zraka kao nekondenzirajućeg plina. Vodena para odabranog tlaka se iz kotla cjevovodom vodi do ispitivanog izmjenjivača topline gdje kondenzira na račun izmjene topline s rashladnom vodom koja konstantnim protokom cirkulira na strani plašta. Nastali vreli kondenzat se priključnim cjevovodom vodi do dodatnog izmjenjivača topline u kojem se pothlađuje te takav odlazi u kondenzni spremnik. Na izlazu iz dodatnog izmjenjivača, prije kondenznog spremnika, nalazi se regulacijski igličasti ventil kojim se regulira protok kondenzata te izljevno mjesto na kojem se provodi mjerenja volumenskog protoka kondenzata.



Slika 38. Igličasti ventil i izljevno mjesto s menzurom

Za pravilno uzimanje mjernih podataka za pojedinu mjernu točku, potrebno je uspostaviti stabilan rad mjerne linije, odnosno kondenzacijskog procesa. Bitno je osigurati da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. To se osigurava regulacijom protoka kondenzata na regulacijskom ventilu i vizualnim praćenja nivoa kondenzata na revizijskim nivokazima (slika 30). Podešava se onaj protok koji daje stabilan nivo kondenzata što bliže nivou izlaza iz izmjenjivačkih cijevi. Nakon uspostave stabilnog nivoa kondenzata, numerički i grafički se na računalu prate vrijednosti mjerenih temperatura i specifičnog toplinskog toka. Nakon što specifični toplinski tok postane stabilan, te se mjerene temperature ne mijenjaju, uzimaju se podaci mjerenja kao valjani.

Zatim slijedi mjerenje mjernih točaka uz sve veću prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina. Vodena para odabranog tlaka se iz parnog kotla cjevovodom vodi do točke miješanja sa zrakom odabranog protoka, te kao smjesa prolazi kroz ravni dio cjevovoda (zonu miješanja) sve do ulaska u ispitivani izmjenjivač topline. Ulaskom u izmjenjivač topline vodena para iz smjese kondenzira na račun izmjene topline s rashladnom vodom na strani plašta, a zrak kao nekondenzirajući plin prolazi kroz izmjenjivač topline te se kontinuirano odzračuje preko drugog odzračnog mjesta smještenog na izlazu iz spiralnih cijevi ispitivanog izmjenjivača topline. Zrak pritom negativno utječe na kondenzacijski proces, kao što je to opisano u poglavlju 2. Nakon postizanja stabilnosti podaci mjerenja se uzimaju kao valjani. Isti proces se ponavlja i za mjerenje drugih mjernih točaka s drugim volumenskim protocima zraka ili drugim radnim tlakovima vodene pare.

Važno je da se između svake točke mjerenja provede proces odzračivanja na oba odzračna mjesta kako bi bili sigurni da nema zaostalog zraka nakupljenog unutar spiralnih cijevi na kojima se odvija proces kondenzacije. Navedeno se radi na način opisanom u potpoglavlju 3.1.2. Dinamika provođenja eksperimentalnih istraživanja je ograničena konstrukcijskom i procesnom izvedbom mjerne linije, a provodi se prema metodologiji opisanoj u potpoglavlju 4.3. Rezultati mjerenja prikazani su u potpoglavlju 5.1.

3.4. Opis postupka mjerenja u toplovodnom režimu rada

Prilikom provođenja postupka mjerenja u toplovodnom režimu rada potrebno je odraditi preinake i podešavanja opisana u potpoglavlju 3.2. Mjerenja započinju uključivanjem kotla i odabirom polazne temperature tople vode. Zatim se uključuju cirkulacijske pumpe koje osiguravaju cirkulaciju vode unutar cijevi i kroz plašt izmjenjivača topline. Pomoću regulacijskih ventila podešavaju se željeni volumenski protoci na obje strane izmjenjivača topline. Na odzračnim mjestima potrebno je provjeriti da li je ispitni sustav odzračen. Nakon postizanja odabrane polazne temperature tople vode, mjerna linija se pušta da 10 do 20 minuta radi u uspostavljenom režimu kako bi se svi sastavni dijelovi mjerne linije progrijali. Nakon navedenih koraka mjerna linija je spremna za početak službenih mjerenja mjernih točaka potrebnih za razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi.

Na početku mjerenja se odabire ulazna temperatura tople vode iz toplovodnog kotla, ulazna temperatura rashladne vode, volumenski protok tople vode kroz cijevi i volumenski protok rashladne vode kroz plašt. Topla voda iz kotla ulazi u cijevi ispitivanog izmjenjivača topline te se hladi na račun izmjene topline s omekšanom rashladnom vodom koja struji kroz plašt. Na akvizicijskom sustavu se numerički i grafički prate vrijednosti svih mjerenih temperatura i specifičnog toplinskog toka. Nakon postizanja stabilnosti mjerenih temperatura i toplinskog toka, podaci mjerenja uzimaju se kao valjani. U sljedećem mjerenju mijenja se volumenski protok rashladne vode kroz plašt izmjenjivača topline, dok se ulazna temperatura tople vode iz toplovodnog kotla, ulazna temperatura rashladne vode i volumenski protok tople vode kroz cijevi zadržavaju istima kao i kod prve točke mjerenja. Nakon postizanja stabilnosti podaci mjerenja ponovno se uzimaju kao valjani. Navedeno se ponavlja za više mjernih točaka prema metodologiji opisanoj u potpoglavlju 4.5. Rezultati mjerenja prikazani su u potpoglavlju 5.2.

4. METODOLOGIJA ANALIZE NEGATIVNIH UTJECAJA NKP

U ovom poglavlju bit će opisana metodologija analize negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (NKP) na kondenzaciju vodene pare. Prvo će se definirati parametar negativnog utjecaja prisutnosti NKP te opisati metodologija usporedbe negativnih utjecaja prisutnosti NKP pri kondenzacije vodene pare u spiralnim cijevima s onima pri kondenzacije vodene pare kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina. Definirat će se konvencionalne izmjenjivačke površine te prikazati korišteni proračunski modeli kondenzacije. Posebni osvrt dat će se na utjecaj i izračun temperaturnog potencijala pri kondenzaciji, odnosno temperaturne razlike između temperature kondenzacije i temperature stijenke cijevi. Zatim će se detaljno opisati i metodologija mjerenja uz navođenje svih mjerenih veličina na mjernoj liniji. Dodatno će biti opisan razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije prilikom strujanja vode oko spiralnih cijevi. Razvoj navedenog modela je nužan za izračun temperatura stijenki cijevi prilikom procesa kondenzacije u spiralnim cijevima.

4.1. Metodologija usporedbe negativnih utjecaja NKP

Negativni utjecaj prisutnosti nekondenzirajućeg plina (NKP) na kondenzaciju vodene pare procijenit će se pomoću parametra ε definiranog kao omjer srednje gustoće toplinskog toka pri određenom masenom udjelu nekondenzirajućeg plina i srednje gustoće toplinskog toka bez prisutnosti NKP. Pomoću navedene veličine kvantificirat će se negativni utjecaji prisutnosti NKP te provesti njihova usporedba.

Definicijski izraz za negativni utjecaj (ε) dan je sljedećom jednačinom

$$\varepsilon = \frac{q_x}{q_0} \quad (4-1)$$

Izrazi za srednje gustoće toplinskih tokova glase

$$q_x = \frac{\phi_x}{A_u} \quad (4-2)$$

$$q_0 = \frac{\phi_0}{A_u} \quad (4-3)$$

Ukupna izmjenjivačka površina svedena na unutarnji promjer cijevi (A_u) definirana je geometrijom izmjenjivača topline na kojem se provode toplinska ispitivanja te je njezina vrijednost konstantna. U potpoglavlju **3.1.** opisan je način osiguravanja da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije.

Vrijednosti toplinskih tokova (ϕ_0) koje vodena para prilikom kondenzacije preda rashladnoj vodi na cjelokupnoj izmjenjivačkoj površini računa se prema sljedećem izrazu

$$\phi_0 = q_{v,k} \cdot \rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) \quad (4-4)$$

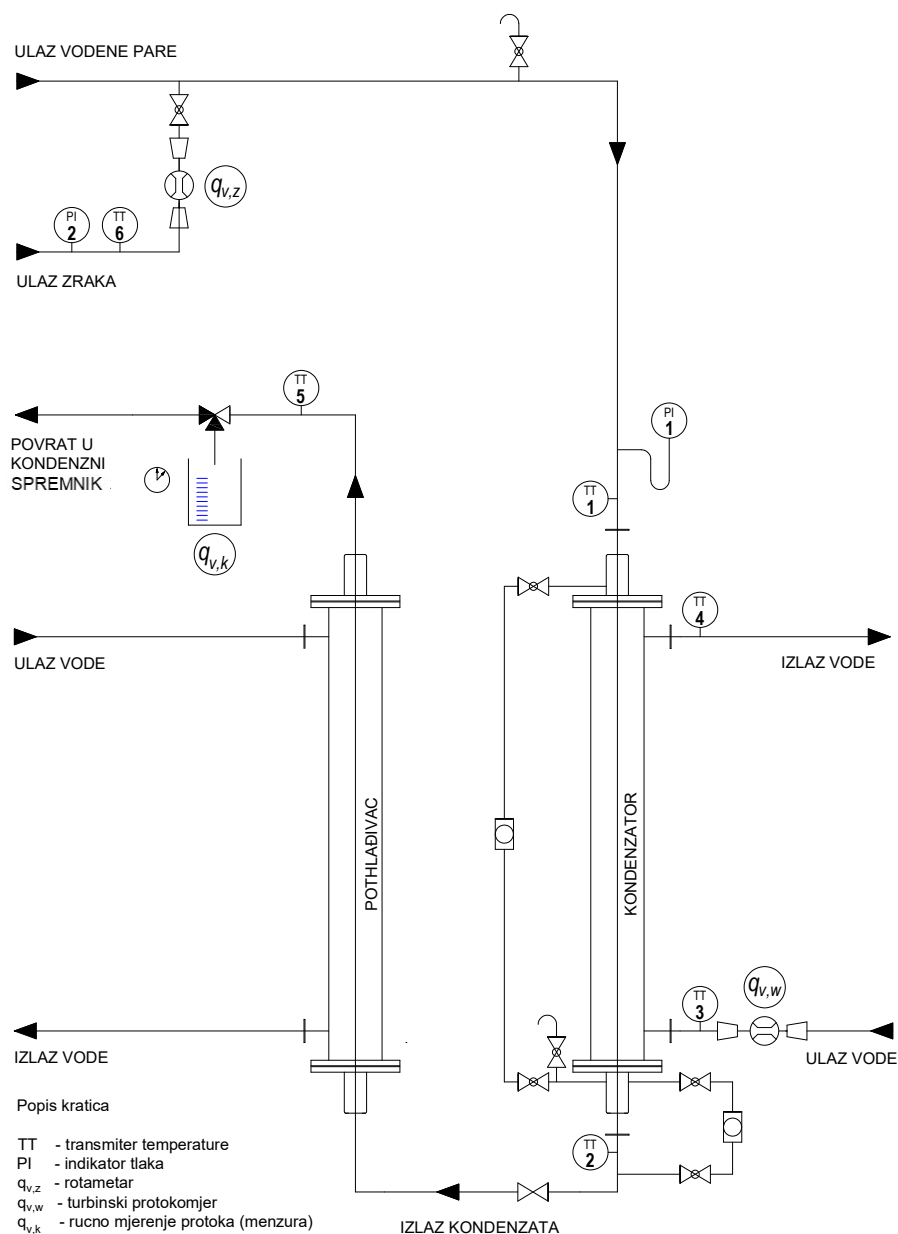
Vrijednosti gustoće kondenzata (ρ_k) očitavaju se za tlak i temperaturu kondenzata na mjestu mjerenja volumenskog protoka kondenzata ($q_{v,k}$). Entalpije vodene pare ($h_{p,1}$) i entalpije kondenzata ($h_{k,2}$) očitavaju se za temperature izmjerene na ulaznim i izlaznim mjernim mjestima izmjenjivača topline.

Za slučaj kondenzacije vodene pare uz prisutnosti zraka kao NKP izraz za izračun toplinskih tokova (ϕ_x) glasi

$$\phi_x = q_{v,k} \cdot \rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) + q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4-5)$$

Vrijednosti gustoće kondenzata (ρ_k) ponovno se očitavaju za tlak i temperaturu kondenzata na mjestu mjerenja volumnog protoka kondenzata ($q_{v,k}$). Vrijednosti gustoće (ρ_z) i specifičnog toplinskog kapaciteta ($c_{p,z}$) zraka očitavaju se za tlak i temperaturu zraka na mjestu mjerenja volumnog protoka zraka ($q_{v,z}$). Entalpije vodene pare ($h_{p,1}$) očitavaju se za temperature i parcijalne tlakove vodene pare u smjesi vodena para – zrak, izmjerene na ulaznom mjernom mjestu izmjenjivača topline. Entalpije kondenzata ($h_{p,2}$) očitavaju se za temperature i tlakove kondenzata na izlaznom mjernom mjestu izmjenjivača topline.

Na slici 39 prikazane su pozicije i oznake mjernih instrumenata te shema tokova struja vodene pare, zraka, kondenzata i rashladne vode u ispitnom dijelu mjerne linije. Vrijednosti potrebne za izračun prethodno navedenih toplinskih tokova i negativnih utjecaja (ε) dobivaju se mjerenjima na razvijenoj mjernoj liniji prema metodologiji opisanoj u potpoglavlju 4.3.



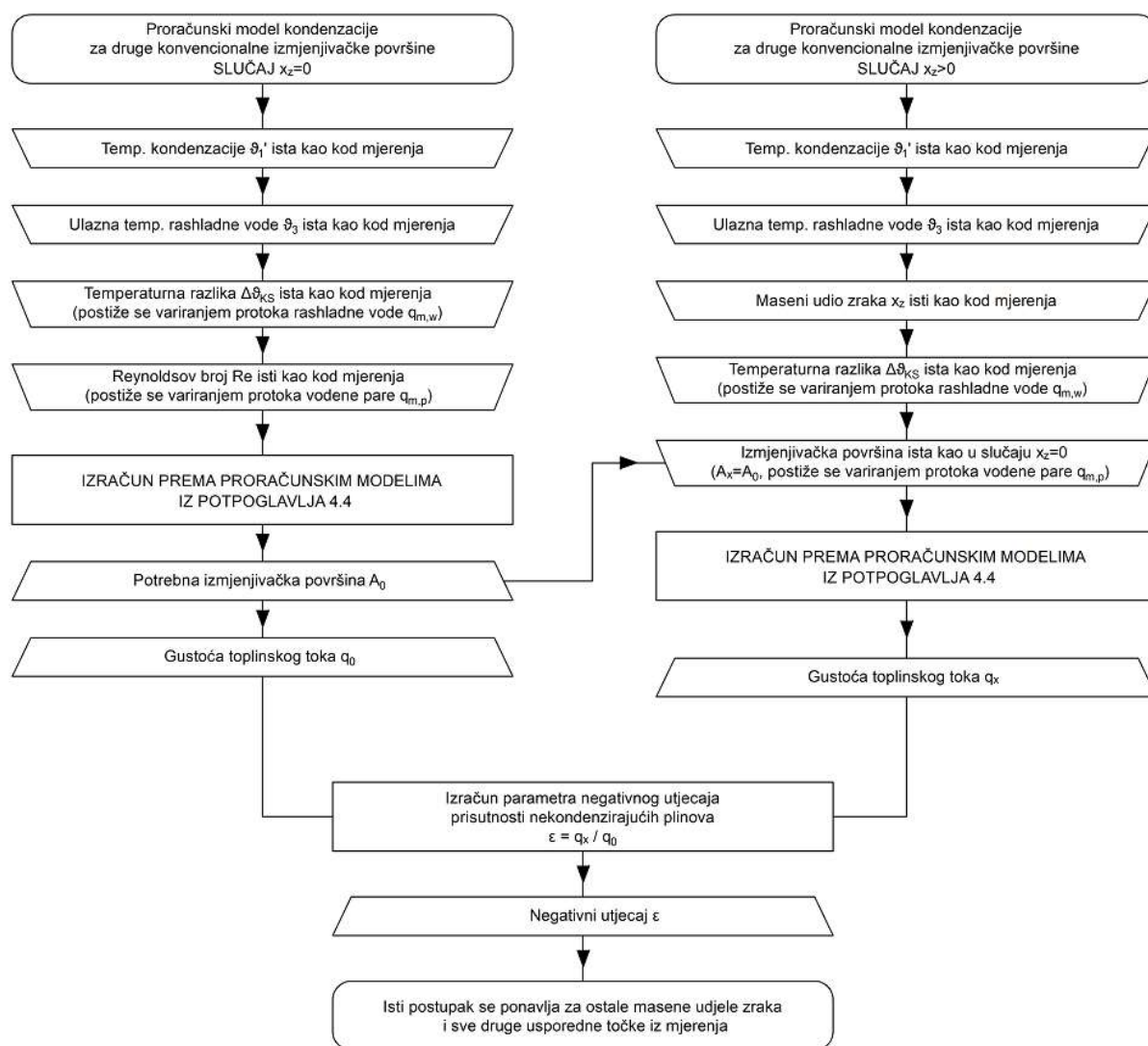
Slika 39. Shema tokova vodene pare, zrak, kondenzata i rashladne vode

Jedan od ciljeva istraživanja je usporedba negativnih utjecaja prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama. Navedena usporedba temelji se na usporedbi parametra negativnog utjecaja (ε), prema jednadžbi 4-1, za slučaj kondenzacije za spiralne cijevi i za konvencionalne izmjenjivačke površine. Negativni utjecaj prisutnosti NKP u spiralnim cijevima izračunava se na temelju rezultata mjerenja na razvijenoj mjernoj liniji. Negativni utjecaj prisutnosti NKP kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina izračunava se pomoću proračunskih modela iz dostupne literature. Pod pojmom konvencionalne izmjenjivačke površine u ovom istraživanju se misli na horizontalne i vertikalne ravne izmjenjivačke cijevi čiji su proračunski modeli kondenzacije navedeni i detaljnije opisani u potpoglavlju 4.4.

Da bi rezultati bili usporedivi, potrebno je negativne utjecaje uspoređivati uz jednake uvjete na strani pare i na strani vode za svaku točku usporedbe. Navedeno predstavlja svojevrsan problem s obzirom da se izmjenjivačke površine po svojoj geometriji razlikuju. Jednakost uvjeta osigurava se izjednačavanjem Reynoldsovih značajki vodene pare, temperatura kondenzacije te temperaturnih razlika između temperatura kondenzacije i temperatura stijenke cijevi. Jednakošću Reynoldsovih značajki osiguravaju se isti uvjeti koji se odnose na režim strujanja, a jednakošću navedenih temperatura isti potencijal za kondenzaciju. S obzirom da je dinamika provođenja mjerenja definirana i ograničena konstrukcijskom izvedbom ispitne linije, osiguravanje spomenutih uvjeta jednakosti provodi se kroz proračunske modele za horizontalne i vertikalne cijevi. Postupak proračuna usporedivih rezultata prema modelima kondenzacije u horizontalnim i vertikalnim cijevima s rezultatima mjerenja u spiralnim cijevima bit će opisan u nastavku.

Proračunu se pristupa na način da se proračunski simulira postupak provođenja samog mjerenja, poštujući dinamiku i korake opisane u potpoglavlju 4.3. Za početak se proračunava usporedna točka u kojoj vodena para kondenzira bez prisutnosti zraka ($x_z = 0$). U proračunskom modelu za stranu pare koristi se maseni protok vodene pare koji daje istu Reynoldsovu značajku kao i kod eksperimentalnog istraživanja. Također, da bi točke bile usporedive, u proračunskom modelu koristi se ista temperatura kondenzacije vodene pare te ulazna temperatura rashladne vode.

Variranjem masenog protoka rashladne vode oko cijevi određuje se željena temperaturna razlika između temperature kondenzacije i temperature stijenke ($\Delta\vartheta_{ks}$). Navedena temperaturna razlika određuje se na temelju temperaturnih razlika izračunatih iz rezultata mjerenja na razvijenoj mjernoj liniji. Metodologija izračuna spomenutih temperaturnih razlika objašnjena je u potpoglavlju 4.2. Nakon provedenog izračuna prema prethodnim napomenama, iz rezultata se očitava gustoća toplinskog toka (q_0) i potrebna površina za izmjenu topline (A_0).



Slika 40. Dijagram toka izračuna negativnih utjecaja

Zatim se pristupa izračunu usporedne točke u kojoj vodena para kondenzira uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina ($x_z > 0$). S ciljem osiguravanja uvjeta jednakosti s mjernim rezultatima, u ovoj fazi izračuna potrebno je pratiti dinamiku provedenog mjerenja. Kao što je to opisano u potpoglavlju 3.1 i 4.3, na kompletnoj i nepromjenjivoj izmjenjivačkoj površini odvija se samo proces kondenzacije u svim točkama mjerenja. Iz tog razloga, prilikom izračuna usporedne točke za $x_z > 0$, koristi se ista izmjenjivačka površina (A_0) izračunata za slučaj $x_z = 0$. Navedena površina proračunski se osigurava variranjem masenog protoka vodene pare, odnosno smjese. Variranjem masenog protoka rashladne vode oko cijevi određuje se temperaturna razlika između temperature kondenzacije i temperature stijenke ($\Delta\vartheta_{ks}$). Ona odgovara temperaturnoj razlici izračunatoj iz rezultata mjerenja. Navedeno je važno kako bi se osigurao isti temperaturni potencijal, odnosno isti uvjeti za kondenzaciju. Kao rezultat provođenja izračuna očitava se gustoća toplinskog toka (q_x) te izračunava negativni utjecaj prisutnosti NKP (ε). Isti postupak ponavlja se za ostale masene udjele zraka, odnosno ostale usporedne točke.

4.2. Temperaturni potencijal pri kondenzaciji

Temperaturna razlika ($\Delta\vartheta_{ks}$) između temperature kondenzacije (ϑ'_1) vodene pare u smjesi sa zrakom na pripadajućem parcijalnom tlaku i temperature stijenke cijevi (ϑ_s) predstavlja temperaturni potencijal pri kondenzaciji. Navedeni temperaturni potencijal značajno utječe na negativni utjecaj prisutnosti nekondenzirajućeg plina (NKP) prilikom procesa kondenzacije unutar horizontalnih i vertikalnih cijevi. S povećanjem temperaturne razlike povećava se i negativni utjecaj prisutnosti NKP (ε), što je detaljnije prikazano u potpoglavlju 4.4.3. Stoga da bi izračunati negativni utjecaji NKP (ε) bili usporedivi potrebno ih je svesti na iste temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ kako bi osigurali iste uvjete za kondenzaciju. Temperaturni potencijal je sveden na stvarne temperaturne razlike koje se pojavljuju unutar izmjenjivačke cijevi pri kondenzaciji uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina.

Navedene temperaturne razlike izračunavaju se prema sljedećoj formuli

$$\Delta\vartheta_{ks} = \vartheta'_1 - \vartheta_s \quad (4-6)$$

Kao što je to već spomenuto u potpoglavlju 4.1, temperaturne razlike koje koristimo prilikom izračuna negativnih utjecaja prema proračunskim modelima za horizontalne i vertikalne cijevi određuju se na temelju temperaturnih razlika izračunatih iz rezultata mjerenja za spiralne cijevi. Temperature kondenzacije (ϑ'_1) su poznate iz mjernih rezultata, međutim srednje temperature stijenke cijevi (ϑ_s) potrebno je izračunati.

Srednja temperatura stijenke izračunava se prema sljedećoj formuli

$$\vartheta_s = \vartheta'_1 - \frac{\phi_x}{\alpha_{p,p} \cdot A_u} \quad (4-7)$$

U formuli (4-7) nepoznata je vrijednost koeficijenta prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$). Za izračun navedene veličine potrebno je prvo iz rezultata mjerenja izračunati koeficijent prolaza topline (k_u).

Koeficijent prolaza topline (k_u) izračunava se prema sljedećoj formuli

$$k_u = \frac{\phi_x}{\Delta\vartheta_{\log} \cdot A_u} \quad (4-8)$$

Nakon izračuna vrijednosti koeficijenta prolaza topline, slijedi izračun koeficijenta prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$) iz sljedeće formule

$$k_u = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{p,p}} + \frac{r_u}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_{s,w}}} \quad (4-9)$$

U formuli (4-9) nepoznata je vrijednosti koeficijenta prijelaza topline prilikom prisilne konvekcije vode oko snopa spiralnih cijevi ($\alpha_{s,w}$). S obzirom da u dostupnoj literaturi nije pronađen relevantan proračunski model za ispitivanu geometriju snopa spiralnih cijevi, provedeno je zasebno eksperimentalno istraživanje prisilne konvekcije vode oko snopa spiralnih cijevi te je razvijen novi proračunski model. Metodologija eksperimentalnog istraživanja i razvoja navedenog modela opisani su u potpoglavlju 4.5.

Mjerni podaci, rezultati izračuna te proračunski model prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi prikazani su u potpoglavlju 5.2.

Koristeći navedeni razvijeni proračunski model prisilne konvekcije na vodu oko snopa spiralnih cijevi izračunavaju se vrijednosti koeficijenata prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi ($\alpha_{s,w}$) za mjerne točke izmjerene prilikom eksperimentalnog istraživanja u kondenzacijskom režimu rada. Zatim se, uz izračunati koeficijent prolaza topline (k_u), izračunava koeficijent prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$), srednje temperature stijenke (ϑ_s) prema formuli (4-7) i temperaturna razlika između temperature kondenzacije i srednje temperature stijenke ($\Delta\vartheta_{ks}$) prema formuli (4-6).

4.3. Mjerenje u kondenzacijskom režimu rada

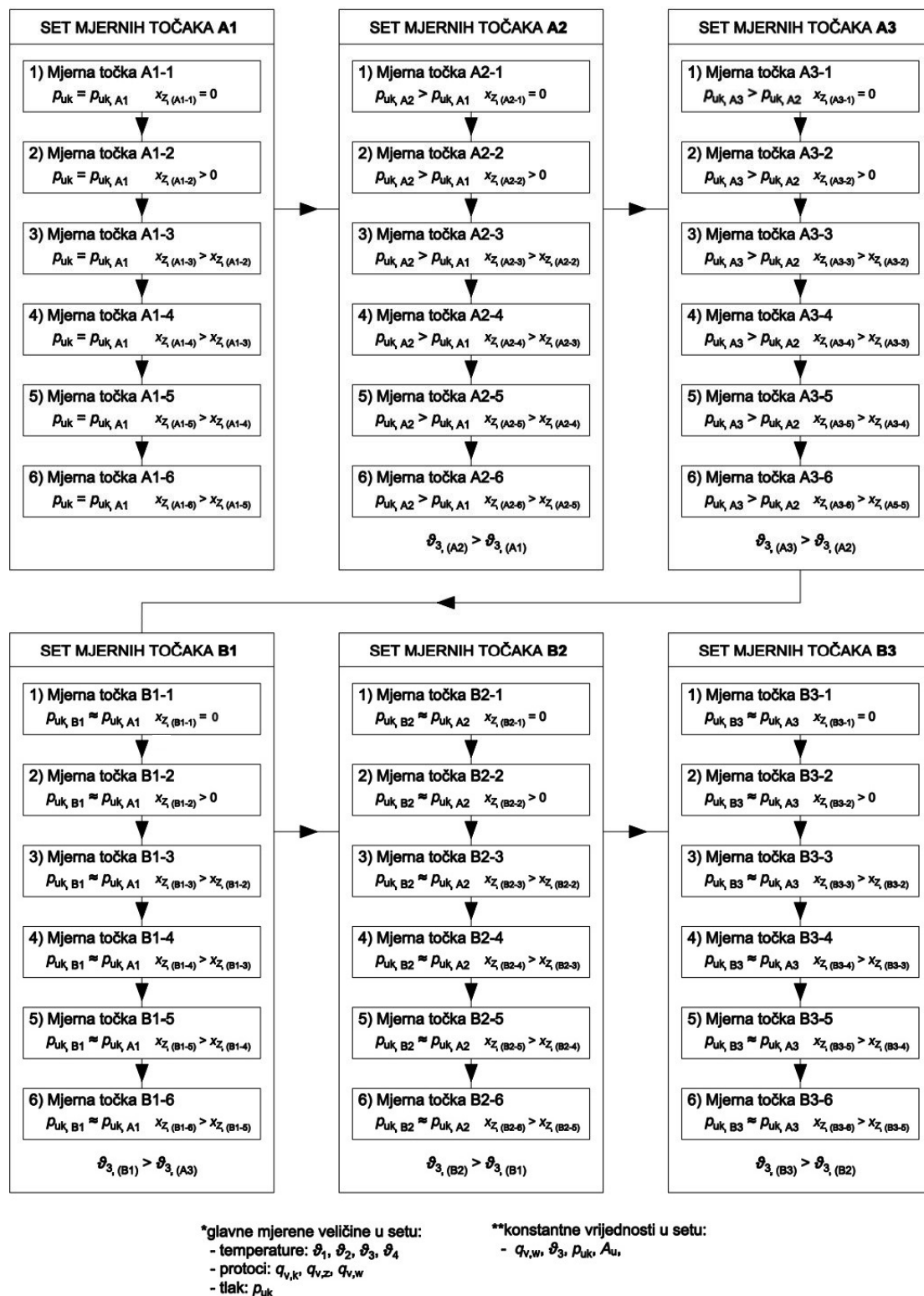
Za izračun vrijednosti negativnih utjecaja (ε) prisutnosti nekondenzirajućeg plina na kondenzaciju vodene pare u spiralnoj cijevi prema izrazima iz potpoglavlja 4.1 potrebno je provesti mjerenja na razvijenoj mornoj liniji i prikupiti točne mjerene vrijednosti svih potrebnih mjernih veličina. Cjeloviti postupak provođenja mjerenja detaljno je opisan u poglavlju 3. te se stoga neće ponovno ovdje opisivati. Naglasak ovog potpoglavlja je na metodologiji mjerenja.

Mjerene veličine ključne za izračun negativnih utjecaja (ε) su temperature na ulazu i izlazu iz cijevi izmjenjivača topline te volumenski protoci izlaznog kondenzata i ulaznog zraka. Mjerene veličine dodatno potrebne za usporedbu i analizu izračunatih negativnih utjecaja su temperature na ulazu u i izlazu iz plašta izmjenjivača te volumenski protok rashladne vode. Dodatno se mjere i temperature pothlađenog kondenzata na mjestu mjerenja volumenskog protoka kondenzata te temperatura i tlak zraka na pripadajućem mjernom mjestu, a sve sa svrhom točnog određivanja gustoća i specifičnih toplinskih kapaciteta potrebnih u izračunu. Uz navedeno, mjeri se i tlak smjese vodene pare i zraka, neposredno prije ulaska u zonu kondenzacije ispitivanog izmjenjivača topline. Sve navedene mjerene veličine predstavljaju jednu mjernu točku. Prilikom provođenja mjerenja mjere se setovi mjernih točaka. Jedan set mjernih točaka sastoji se od jedne mjerne točke bez prisutnosti nekondenzirajućeg plina i više mjernih točaka s različitim udjelima zraka kao nekondenzirajućeg plina u struji vodene pare.

Konstantne vrijednosti u setu mjernih točaka su protok rashladne vode, ulazna temperatura rashladne vode, izmjenjivačka površina na kojoj vodena para kondenzira, te približno jednak tlak smjese vodene pare i nekondenzirajućeg plina. Protok vodene pare i ostale veličine se mijenjaju s povećanjem udjela zraka u struji vodene pare.

Na početku se mjeri mjerna točka bez prisutnosti zraka kao NKP ($x_z = 0$). Odabire se tlak vodene pare, volumenski protok vodene pare, volumenski protok rashladne vode te ulazna temperatura rashladne vode. Nakon uspostave stabilnog nivoa kondenzata koji osigurava da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije, te postizanja nepromjenjivosti specifičnog toplinskog toka i mjerenih temperatura, proglašava se stacionarno stanje te se podaci mjerenja uzimaju kao valjani. Zatim slijedi mjerenje mjernih točaka uz sve veću prisutnost zraka u smjesi. U vodenu paru ubacuje se mali udio zraka kao nekondenzirajućeg plina uz održavanje konstantnog protoka rashladne vode, konstantnih ulaznih temperatura rashladne vode te približno jednakog tlaka smjese. Pritom se protok vodene pare i ostale veličine mijenjaju zbog potrebe da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini osigura odvijanje samo procesa kondenzacije, bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. Nakon postizanja stacionarnog stanja podaci mjerenja uzimaju se kao valjani te se pristupa mjerenju sljedećih mjernih točaka s većim udjelom zraka u vodenoj pari koja kondenzira unutar spiralnih cijevi.

Na opisani način prikupljen je prvi set mjernih podataka. Zatim slijedi odabir drugog tlaka i protoka vodene pare, ponovno za mjernu točku bez prisutnosti zraka kao NKP. Ulazna temperatura rashladne vode se također mijenja zbog konstrukcijske i procesne izvedbe mjerne linije. Nakon postizanja stacionarnog stanja podaci mjerenja uzimaju se kao valjani te zatim ponovno slijedi mjerenje mjernih točaka uz sve veću prisutnost zraka kao NKP u smjesi. Na taj način mjerenja se ponavljaju te se prikuplja više setova mjernih podataka. Setovi mjernih točaka prikazani su slikom 41 te u potpoglavlju 5.1.



Slika 41. Setovi mjernih točaka

4.4. Proračunski modeli konvencionalnih izmjenjivačkih površina

Nakon prikupljanja setova mjernih podataka i izračuna parametra negativnog utjecaja (ε) za svaku pojedinu točku mjerenja, iste je potrebno usporediti s negativnim utjecajima izračunatim za druge konvencionalne izmjenjivačke površine. Pod pojmom konvencionalne izmjenjivačke površine u ovom istraživanju se misli na horizontalne i vertikalne ravne izmjenjivačke cijevi. Za usporedbu s horizontalnim cijevima koristit će se rezultati izračuna prema modelu navedenom u radu autora B. Ren, L. Zhang, H. Xu, J. Cao i Z. Tao [42]. Podaci za usporedbu vertikalnih cijevi će se izračunati prema modelu navedenom u radu autora K.-Y. Lee i M. H. Kim [41].

4.4.1. Proračunski modeli kondenzacije u horizontalnim ravnim cijevima

U nastavku je opisan proračunski model kondenzacije vodene pare u horizontalnim ravnim cijevima prema radu autora B. Ren i ostalih [42]. U radu autori su proveli eksperimentalno istraživanje na detaljno opisanoj mjernoj liniji. Vodena para je kondenzirala unutar horizontalne izmjenjivačke cijevi uz i bez prisutnosti zraka kao nekondenzirajućeg plina (NKP). U međuplaštu, oko unutrašnje cijevi, je strujala voda koja se zagrijavala na račun izmjene topline s vodenom parom. Eksperimentalno istraživanje provedeno je s gustoćama masenog protoka smjese raspona od 41 do 164 kg/(m² s), uz masene udjele NKP od 0 % do 40 % te radne tlakove od 1 do 4 bar. Unutarnji promjer izmjenjivačke cijevi iznosio je 16 mm. Rezultate mjerenja autori su usporedili s dostupnim modelima u recentnoj literaturi te su prikazali utjecaje masenog udjela zraka, masenog protoka smjese i ulaznog tlaka smjese na proces kondenzacije. Osim navedenog, autori su razvili i nove proračunske modele kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP, koji će biti opisani u nastavku.

U proračunskim modelima autori strujanje smjese u ravnoj cijevi dijele na slojevito ili prstenasto. Prijelaz između navedena dva tipa strujanja je na vrijednostima Froudeovog broja $Fr_{so} = 7$. Postupak proračuna Froudeovog broja je opisan u radu H. M. Soliman [52] te se ovdje neće posebno prikazivati.

Nusseltova značajka za slojevito strujanje čiste pare bez prisutnosti zraka ($Fr_{so} \leq 7$)

$$Nu = 0,728 \left[1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{-0,75} \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)gh_{fg}d^3}{k_l\mu_l\Delta T} \right]^{0,25} \quad (4-9)$$

Nusseltova značajka za slojevito strujanje smjese vodene pare i zraka ($Fr_{so} \leq 7$)

$$Nu = 1,45\alpha^{7,849} \left[\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}d^3}{k_l\mu_l\Delta T} \right]^{0,25} \left(\frac{\omega}{1-\omega} \right)^{-0,315} \quad (4-10)$$

gdje je

$$\alpha = \frac{x}{\rho_v} \left\{ [1 + 0,12(1-x)] \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} \right) + \frac{1,18(1-x)[g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0,25}}{G\rho_l^{0,5}} \right\}^{-1} \quad (4-11)$$

Nusseltova značajka za prstenasto strujanje čiste pare bez prisutnosti zraka ($Fr_{so} \geq 7$)

$$Nu = 0,023Re_l^{0,8}Pr_l^{0,33} \left\{ 2,64 \left[1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,5} \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right\}^{0,8} \quad (4-12)$$

Nusseltova značajka za prstenasto strujanje smjese vodene pare i zraka ($Fr_{so} \geq 7$)

$$Nu = 0,023Re_l^{0,8}Pr_l^{0,33} \left\{ 0,6 \left[1 + \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,5} \left(\frac{x}{1-x} \right) \right] \right\} \left(\frac{\omega}{1-\omega} \right)^{-0,1} \quad (4-13)$$

Froudeov broj za sve usporedne mjerne točke iznosi $Fr_{so} \geq 7$, što znači da je strujanje u izmjenjivačkim cijevima prstenastog tipa, odnosno Nusseltove značajke računaju se prema jednadžbi (4-12) za slučajeve čiste vodene pare i jednadžbi (4-13) za slučajeve prisutnosti zraka u vodenoj pari.

Koeficijenti prijelaza topline na strani rashladne vode koja struji u međuplaštu računaju se prema sljedećoj formuli

$$h_{co} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_{co} - 1000) Pr_{co} \lambda_{co}}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{f}{8}} \left(Pr_{co}^{\frac{2}{3}} - 1\right) D_i - d_o} \quad (4-14)$$

gdje je

$$f = (1.82 \log_{10} Re_D - 1,64)^{-2} \quad (4-15)$$

S obzirom da su jednadžbe za izračun Nusseltovih značajki prema formulama (4-12) i (4-13) izvedene za lokalne vrijednosti ovisno o sadržaju vodene pare uzduž cijevi, u svrhu izračuna izmjenjivačka površina dijeli se na segmente s inkrementom sadržaja pare $\Delta x = 0,1$. Za svaki segment računaju se prosječne Nusseltove značajke, koeficijenti prijelaza toplije, koeficijenti prolaza topline, gustoće toplinskih tokova te potrebne izmjenjivačke površine, odnosno duljine izmjenjivačkih cijevi. Gustoće toplinskih tokova zatim se osrednjavaju u ovisnosti o izračunatim potrebnim duljinama izmjenjivačkih cijevi, kako bi dobili prosječne vrijednosti za cijelu zonu kondenzacije.

Primjer navedenog osrednjavanja gustoće toplinskog toka prikazan je sljedećom formulom

$$q_x = \frac{q_{x=0,95} \cdot L_{x=0,95} + q_{x=0,85} \cdot L_{x=0,85} + \dots + q_{x=0,05} \cdot L_{x=0,05}}{L_{uk}} \quad (4-16)$$

4.4.2. Proračunski modeli kondenzacije u vertikalnim ravnim cijevima

Za proračunski model kondenzacije vodene pare u vertikalnim ravnim cijevima koristimo model autora K.-Y. Lee i M. H. Kim [41]. Model je razvijen na temelju eksperimentalnog istraživanja koje je provedeno na vertikalnom izmjenjivaču topline. Vodena para je kondenzirala unutar vertikalne izmjenjivačke cijevi uz i bez prisutnosti dušika kao nekondenzirajućeg plina. Rashladna voda je strujala kroz međuplašt, oko unutrašnje cijevi.

Eksperimentalno istraživanje provedeno je s masenim protocima vodene pare u rasponu od 5 do 30 kg/h, uz masene udjele NKP od 0 % do 40 % te radne tlakove od oko 1 bar. Unutarnji promjer izmjenjivačke cijevi iznosio je 13 mm. Na temelju analize rezultata mjerenja prikazani su utjecaji prisutnosti nekondenzirajućeg plina na proces kondenzacije pri prstenastom strujanju smjese u cijevi. Također, autori u radu navode da razvijeni model vrijedi za izmjenjivačke cijevi manjih i većih promjera (do 2").

Iako je eksperiment proveden s dušikom, autori navode da je razvijeni model primjenjiv također i za zrak kao NKP zbog slične molekularne mase. Model je prikazan u formi degradacijskog faktora koji je definiran kao omjer eksperimentalnog koeficijenta prijelaza topline i referentnog koeficijenta prijelaza topline. Za referentni koeficijent prijelaza topline autori koriste Nusseltov model filmske kondenzacije na vertikalnoj stijenci.

Degradacijski faktor za kondenzaciju čiste pare bez prisutnosti zraka

$$f_{\text{pure}} = \frac{h_{\text{exp,pure}}}{h_{\text{Nu}}} = 0,8247 \tau_{\text{pure}}^{*0,3124} \quad (4-17)$$

Degradacijski faktor za kondenzaciju smjese vodene pare i dušika, odnosno zraka

$$f_{\text{mix}} = \frac{h_{\text{exp,mix}}}{h_{\text{Nu}}} = \tau_{\text{mix}}^{*0,3124} (1 - 0,964 W_{\text{nc}}^{0,402}) \quad (4-18)$$

Bezdimenzijsko posmično naprezanje

$$\tau_{\text{mix}}^* = \frac{0,5 \rho_{\text{mix}} u_{\text{mix}}^2 f}{g \rho_f L} \quad (4-19)$$

gdje je

$$u_{\text{mix}} = \frac{Re_{\text{mix}} \mu_{\text{mix}}}{\rho_{\text{mix}} d} \quad (4-20)$$

$$L = \left(\frac{v_f^2}{g} \right)^{1/3} \quad (4-21)$$

$$f = 0,079 Re_{\text{mix}}^{-1/4} \quad \text{za } Re_{\text{mix}} > 2300 \quad (4-22)$$

$$f = \frac{16}{Re_{\text{mix}}} \quad \text{za } Re_{\text{mix}} < 2300 \quad (4-23)$$

Nusseltov model filmske kondenzacije [49]

$$h_{\text{Nu}} = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \lambda^3 g \Delta h}{4\mu(\vartheta' - \vartheta_s)H}} \quad (4-24)$$

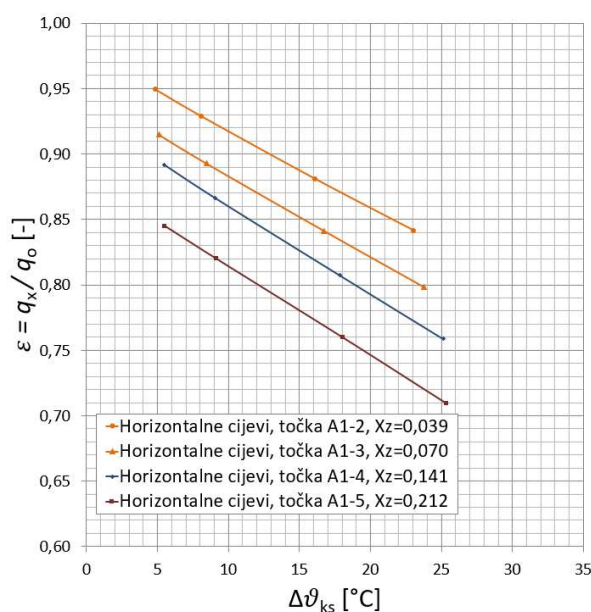
Koeficijenti prijelaza topline na strani rashladne vode koja struji u međuplaštu računaju se prema formulama (4-14) i (4-15) iz potpoglavlja 4.4.1.

Za razliku od modela za horizontalne cijevi iz potpoglavlja 4.4.1., jednadžbe iz modela za vertikalne cijevi već daju prosječne vrijednosti za cijelu zonu kondenzacije, pa stoga nema potrebe za lokalnim pristupom proračunu.

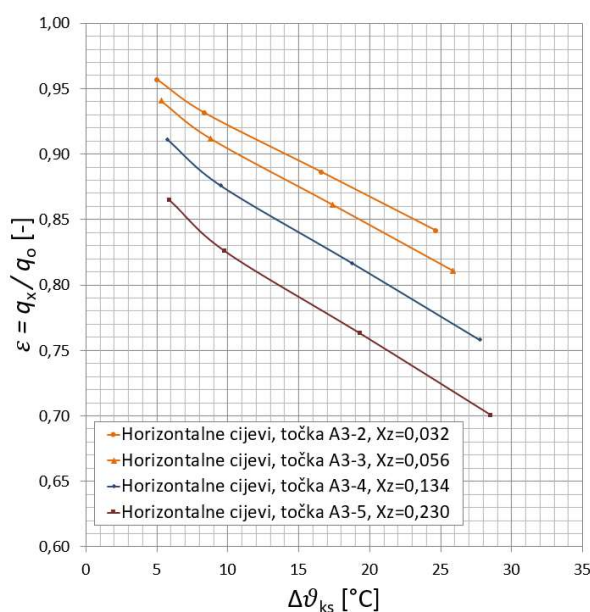
4.4.3. Analiza utjecaja temperaturnog potencijala

U ovom potpoglavlju prikazan je utjecaj temperaturnog potencijala pri kondenzaciji, odnosno temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$, na negativne utjecaje prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ε) prema proračunskim modelima autora B. Ren i ostalih [42] za horizontalne cijevi i K.-Y. Lee i M. H. Kim [41] za vertikalne cijevi. Kao što je to definirano u potpoglavlju 4.2, temperaturna razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ predstavlja razliku između temperature kondenzacije (ϑ_1') vodene pare u smjesi sa zrakom na pripadajućem parcijalnom tlaku i temperature stijenke cijevi (ϑ_s).

Slikom 42 prikazan je utjecaj temperaturne razlike između temperature kondenzacije i temperature stijenke na negativne utjecaje prisutnosti NKP prilikom procesa kondenzacije izračunatim pomoću proračunskog modela za horizontalne cijevi (prema potpoglavlju 4.4.1), za tlak 0,94 bar i više masenih udjela zraka u smjesi.

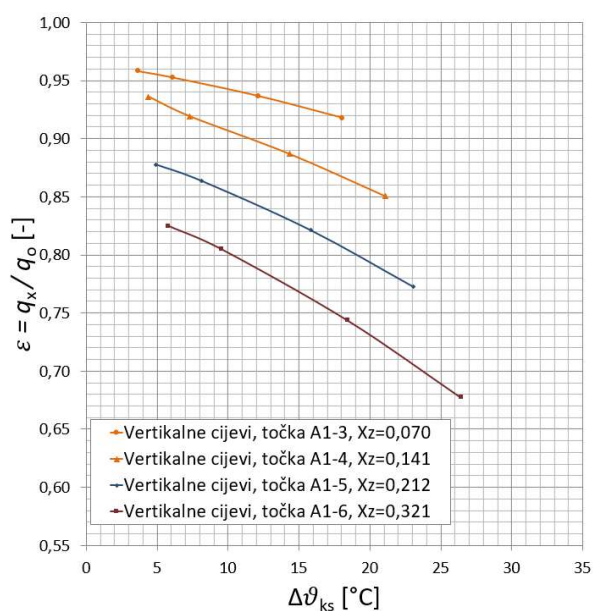


Slika 42. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A1 (horizontalne cijevi)

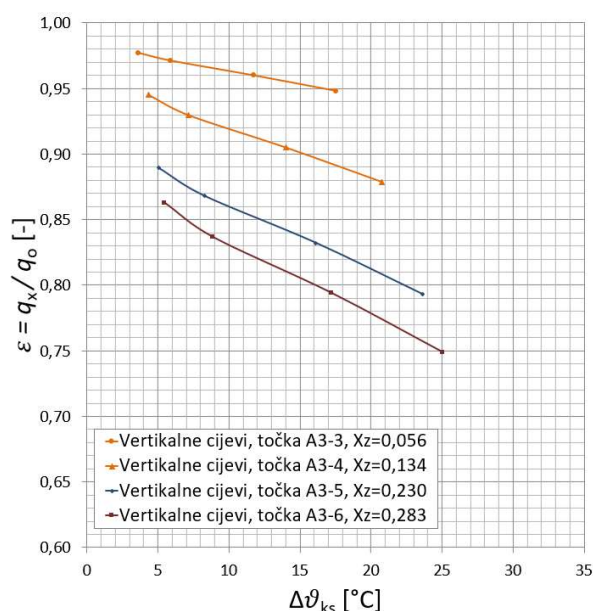


Slika 43. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A3 (horizontalne cijevi)

Slikom 43 prikazan je isti utjecaj na tlaku 3,87 bar. U oba slučaja vidljivo je da porastom temperaturne razlike pada vrijednost negativnog utjecaja (ε), odnosno negativni utjecaj prisutnosti NKP na kondenzaciju je veći. Također, navedeni utjecaj je prisutan kod svih prikazanih masenih udjela zraka.



Slika 44. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A1 (vertikalne cijevi)



Slika 45. Ovisnost parametra ε o temp. potencijalu u setu usp. točaka A3 (vertikalne cijevi)

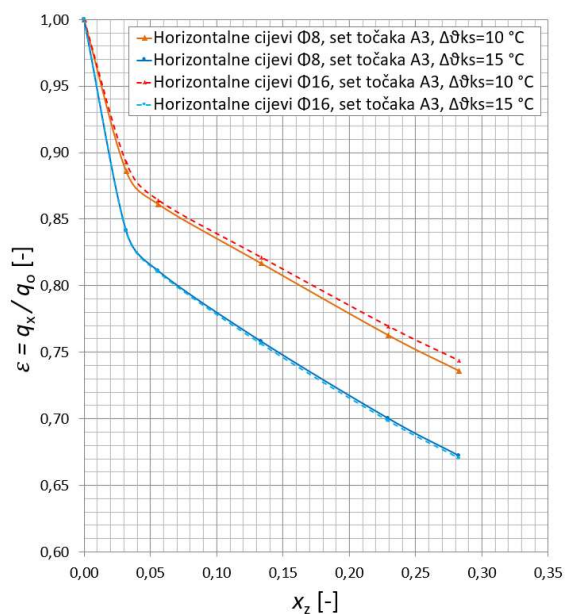
Isti efekt porasta negativnog utjecaj nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju uz prisutnost NKP javlja i kod proračunskog modela za vertikalne cijevi (prema potpoglavlju 4.4.2), što je i prikazano slikama 44 i 45.

Iz prikazanih slika vidljivo je da temperaturna razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ ima značajan utjecaj na vrijednosti negativnih utjecaja (ε). Na svim tlakovima i masenim udjelima zraka, kod horizontalnih i vertikalnih cijevi, vidljivo je da porastom temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ pada vrijednost negativnog utjecaja (ε), odnosno negativni utjecaj NKP je sve veći. Stoga se prilikom usporedbe negativnih utjecaja prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama navedena temperaturna razlika svakako mora uzeti u obzir. Da bi izračunati negativni utjecaji (ε) bili usporedivi potrebno ih je svesti na iste temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$. O navedenoj temperaturnoj razlici, odnosno temperaturnom potencijalu, direktno ovisi intenzitet hlađenja, odnosno prijenosa topline.

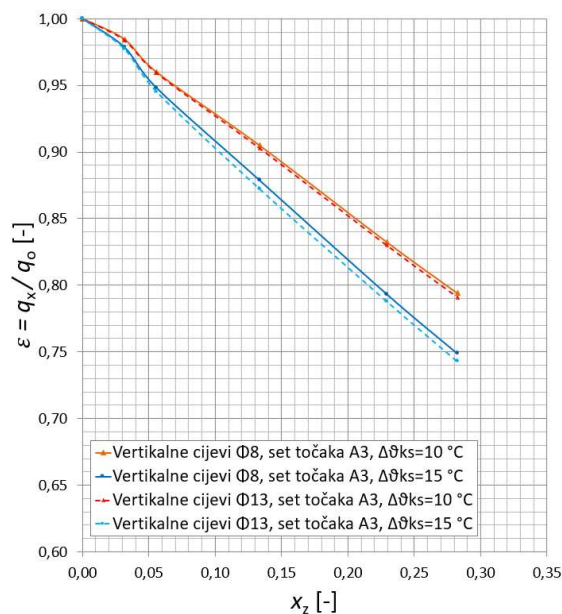
4.4.4. Analiza utjecaja promjera izmjenjivačke cijevi

U ovom potpoglavlju prikazan je utjecaj unutarnjeg promjera izmjenjivačke cijevi (d_u) na negativni utjecaj (ε) prisutnosti nekondenzirajućih plinova (NKP). Autori prethodno navedenih proračunskih modela kondenzacije u horizontalnim i vertikalnim cijevima navode kako su eksperimentalna istraživanja provedena na cijevima unutarnjeg promjer 16 mm kod horizontalnih cijevi, odnosno 13 mm kod vertikalnih cijevi. S obzirom da se mjerenja kondenzacije u spiralnim cijevima provode na izmjenjivačkim cijevima unutarnjeg promjera 8 mm, provedeni su zasebni izračuni iste mjerne točke pomoću proračunskih modela kondenzacije u horizontalnim i vertikalnim cijevima za slučajeve promjera cijevi 16 mm, odnosno 13 mm i 8 mm. Usporedba navedenih izračuna prikazana je na slikama 46 i 47.

Slikom 46 prikazan je utjecaj promjera horizontalne izmjenjivačke cijevi na negativne utjecaje prisutnosti NKP prilikom procesa kondenzacije izračunatim pomoću proračunskog modela za horizontalne cijevi (prema potpoglavlju 4.4.1). Na slici su prikazane vrijednosti koje daje proračunski model za cijevi unutarnjeg promjer 8 mm i 16 mm pri temperaturnim razlikama $\Delta\theta_{ks}$ od 10 °C i 15 °C. Iz slike je vidljivo da, u slučaju proračunskog modela za horizontalne cijevi, razlika u promjerima izmjenjivačkih cijevi 8 mm i 16 mm ne utječe značajno na vrijednosti parametara negativnog utjecaja ($< 1\%$).



Slika 46. Ovisnost parametra ε o unutarnjem promjeru (horizontalne cijevi)



Slika 47. Ovisnost parametra ε o unutarnjem promjeru (vertikalne cijevi)

Slikom 47 prikazan je utjecaj promjera vertikalne izmjenjivačke cijevi na negativne utjecaje prisutnosti NKP prilikom procesa kondenzacije izračunatim pomoću proračunskog modela za vertikalne cijevi (prema potpoglavlju 4.4.2). Na slici su prikazane vrijednosti koje daje proračunski model za cijevi unutarnjeg promjer 8 mm i 13 mm pri temperaturnim razlikama $\Delta\vartheta_{ks}$ od 10 °C i 15 °C. Iz slike je također vidljivo da i u slučaju proračunskog modela za vertikalne cijevi razlika u promjerima izmjenjivačkih cijevi ne utječe značajno na vrijednosti parametara negativnog utjecaja (< 1 %). S obzirom da u oba slučaja promjer izmjenjivačkih cijevi nema značajan utjecaj na rezultate proračunskih modela u izračunu usporednih točaka za točke provedenog mjerenja prema navedenim modelima koristiti će se unutarnji promjer izmjenjivačkih cijevi 8 mm.

4.5. Razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi

Vrijednosti koeficijenata prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi ($\alpha_{s,w}$) ključne su za izračun koeficijenata prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$), temperatura stijenki cijevi i temperaturnih razlika ($\Delta\vartheta_{ks}$), odnosno za provođenje usporedbe rezultata eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina (NKP) u spiralnim cijevima s rezultatima koje daju proračunski modeli za ostale konvencionalne izmjenjivačke površine, čija je metodologija opisana u potpoglavlju 4.1.

Pregledom dostupne literature nije pronađen relevantan proračunski model za izračun koeficijenta prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi eksperimentalno istraživane geometrije. Iz tog razloga na razvijenoj mjernoj liniji provedeno je zasebno eksperimentalno istraživanje prisilne konvekcije strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi te je razvijen novi proračunski model. U nastavku se ukratko opisuje postupak provođenja mjerenja, dok je cjeloviti postupak provođenja mjerenja detaljno opisan u potpoglavlju 3.4. Naglasak ovog potpoglavlja je na metodologiji mjerenja i razvoja novog proračunskog modela.

Mjerene veličine ključne za razvoj proračunskog modela su volumenski protok vode u plaštu ispitivanog izmjenjivača topline, temperature na ulazu i izlazu iz cijevi izmjenjivača topline te temperature na ulazu i izlazu iz plašta izmjenjivača topline. Navedene mjerene veličine predstavljaju jednu mjernu točku. Prilikom provođenja mjerenja mjeri se više mjernih točaka. Na početku mjerenja odabire se ulazna temperatura tople vode iz toplovodnog kotla, ulazna temperatura rashladne vode, volumenski protok tople vode kroz cijevi i volumenski protok rashladne vode oko cijevi unutar plašta izmjenjivača topline. Nakon postizanja stacionarnog stanja podaci mjerenja uzimaju se kao valjani. Zatim slijedi mjerenje drugih mjernih točaka kod kojih se ulazna temperatura tople vode iz toplovodnog kotla, ulazna temperatura rashladna vode i volumenski protok tople vode kroz cijevi drže konstantnim, dok se volumenski protoci rashladne vode oko cijevi unutar plašta iz točke u točku povećavaju. Na taj način provodi se prikupljanje mjernih podataka za 8 mjernih točaka koji su prikazani u potpoglavlju 5.2.

Za razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi potrebno je poznavati proračunski model prisilne konvekcije u spiralnim cijevima pomoću kojeg se izračunavaju vrijednosti Nusseltovih značajki, odnosno vrijednosti koeficijenata prijelaza topline unutar spiralnih cijevi. Odabir proračunskog modela za izračun navedenih vrijednosti ovisi o tome da li je strujanje vode unutar spiralnih cijev laminarno ili turbulentno. Prema VDI Heat Atlas [16], zbog utjecaja sekundarnih strujanja koja se javljaju unutar spiralnih cijevi, vrijednost kritične Reynoldsove značajke pomiče se na više vrijednosti u odnosu na ravne cijevi. Njezina vrijednost za mjerne podatke računa se prema sljedećoj formuli

$$Re_{kr} = 2300 \cdot \left[1 + 8,6 \left(\frac{d_u}{D_s} \right)^{0,45} \right] \quad (4-25)$$

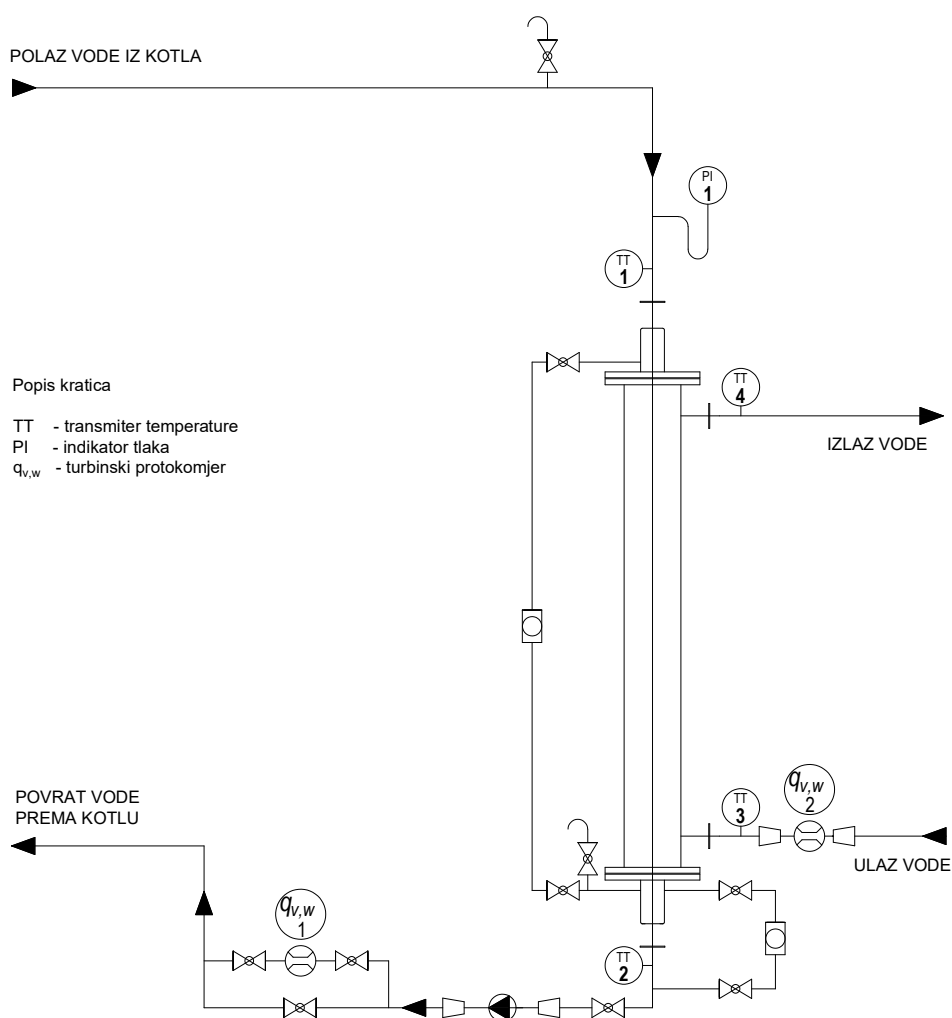
Nakon izračuna kritičnog broja i usporedbe s Reynoldsovim značajkama iz provedenog mjerenja zaključuje se da je strujanje tople vode unutar spiralnih cijevi za sve mjerne točke turbulentno.

Za izračun prijelaza topline pri turbulentnom strujanju u spiralnim cijevima koristi se proračunski model prema B. Slipčević [53], kod kojeg se Nusseltove značajke računaju prema sljedećoj formuli

$$Nu = 0,023 \cdot \left[1 + 3,6 \cdot \left(1 - \frac{d_u}{D_s} \right) \cdot \left(\frac{d_u}{D_s} \right)^{0,8} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \quad (4-26)$$

Nakon izračuna Nusseltovih značajki za mjerne točke, slijedi izračun pripadajućih koeficijenata prijelaza topline prilikom strujanja vode unutar cijevi ($\alpha_{p,w}$)

$$\alpha_{p,w} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_u} \quad (4-27)$$



Slika 48. Shema tokova tople i hladne vode

Nakon provođenja mjerenja i prikupljanja mjernih podataka slijedi razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi, što je prikazano u nastavku.

Krajnji cilj razvoja proračunskog modela je dobiti formulu oblika

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \quad (4-28)$$

Nakon izračuna bezdimenzijskih značajki Re , Nu i Pr pristupa se regresijskoj analizi. Potrebno je izraditi $\frac{Nu}{Pr^{1/3}} - Re$ dijagram, odnosno odrediti vrijednost koeficijenta C i eksponenta n u formuli (4-28) i (4-29)

$$\frac{Nu}{Pr^{1/3}} = C \cdot Re^n \quad (4-29)$$

Za navedeno, prvo se nakon provođenja mjerenja pristupa izračunu ukupnog toplinskog toka prema sljedećoj formuli

$$\phi_w = q_{v,w} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) \quad (4-30)$$

Vrijednosti gustoće (ρ_w) i specifičnog toplinskog kapaciteta ($c_{p,w}$) vode očitavaju se za srednju temperaturu vode unutar plašta izmjenjivača topline. Protok $q_{v,w}$ predstavlja volumenski protok rashladne vode kroz plašt ispitivanog izmjenjivača topline. Temperature ϑ_4 i ϑ_3 su temperature na izlazu, odnosno ulazu u plašt izmjenjivača topline.

Zatim slijedi izračun koeficijenta prolaza topline (k_v)

$$k_v = \frac{\phi_w}{\Delta\vartheta_{\log} \cdot A_v} \quad (4-31)$$

Nakon izračuna vrijednosti koeficijenta prolaza topline, slijedi izračun koeficijenta prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi ($\alpha_{s,w}$) iz sljedeće formule

$$k_v = \frac{1}{\frac{r_v}{r_u \cdot \alpha_{p,w}} + \frac{r_v}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{\alpha_{s,w}}} \quad (4-32)$$

U formuli (4-32) vrijednost koeficijenta prijelaza topline u spiralnim cijevima ($\alpha_{p,w}$) računa se prema prethodno navedenom proračunskom modelu.

Zatim se za mjerne točke računaju Nusseltove značajke prema sljedećoj formuli

$$Nu = \frac{\alpha_{s,w} \cdot \lambda_w}{d_h} \quad (4-33)$$

Vrijednost d_h predstavlja hidraulički promjer koji se prema [54] računa na sljedeći način

$$d_h = 4 \cdot \frac{V_s}{S_s} \quad (4-34)$$

Volumen unutar plašta (V_s) predstavlja razliku ukupnog volumena unutar plašta i volumena izmjenjivačkih cijevi. Površina u kontaktu s vodom unutar plašta (S_s) predstavlja zbroj unutarnje površine plašta izmjenjivača topline i vanjske površine svih spiralnih izmjenjivačkih cijevi.

Reynoldsove značajke unutar plašta ispitivanog izmjenjivača topline računaju se prema sljedećem izrazu

$$Re = \frac{w_s \cdot \rho_w \cdot d_h}{\mu_w} \quad (4-35)$$

Vrijednosti gustoće (ρ_w) i dinamičke viskoznosti (μ_w) vode očitavaju se za srednju temperaturu vode unutar plašta izmjenjivača topline. Hidrauličkog promjera (d_h) računa se prema formuli (4-34). Brzina strujanja vode unutar plašta izmjenjivač topline (w_s) računa se pomoću volumenske poroznosti prema [54] na sljedeći način

$$w_s = \frac{q_{v,w}}{A_s} \quad (4-36)$$

$$A_s = \psi \cdot A_{\text{plášť}} \quad (4-37)$$

$$\psi = 1 - \frac{V_c}{V_{\text{plášť}}} \quad (4-38)$$

Na prethodno navedeni način izračunate su bezdimenzijske značajke Re , Nu i Pr te se zatim pristupa regresijskoj analizi kako bi se definirale vrijednost koeficijenta C i eksponenta n u formuli (4-28).

Prikazanom metodologijom dolazi se do proračunskog modela koji se koristi kao ulazni model za izračun koeficijenta prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$), temperatura stijenki cijevi (ϑ_s) i temperaturnih razlika između temperatura kondenzacija i temperatura stijenki ($\Delta\vartheta_{ks}$), a sve s ciljem da se omogući provođenje usporedbe rezultata eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina u spiralnim cijevima s rezultatima koje daju proračunski modeli za ostale konvencionalne izmjenjivačke površine. Mjerni podaci, rezultati izračuna te proračunski model prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi prikazani su u potpoglavlju 5.2.

5. REZULTATI MJERENJA

U ovom poglavlju dani su rezultati mjerenja toplinskih karakteristika izmjenjivač topline sa spiralnim cijevima. Toplinske karakteristike mjerene su u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada. U prvom dijelu poglavlja zajedno su prikazani rezultati mjerenja toplinskih karakteristika prilikom kondenzacije vodene pare unutar spiralnih cijevi bez i uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina (NKP). U drugom dijelu poglavlja prikazuju se rezultati mjerenja toplinskih karakteristika prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi. Također, prikazan je i razvijeni proračunski model prisilne konvekcije prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi. Na kraju je obrađena nesigurnost mjerenja u kondenzacijskom i toplovodnom režimu rada te su prikazani rezultati izračuna mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti.

5.1. Rezultati mjerenja u kondenzacijskom režimu rada

U poglavlju 4 detaljno je opisana metodologija mjerenja kao i mjerene veličine. Mjere se setovi mjernih točaka. Jedan set mjernih točaka se sastoji od jedne mjerne točke bez prisutnosti nekondenzirajućeg plina (NKP) i više mjernih točaka s različitim udjelima zraka kao NKP u struji vodene pare. Ključne veličine koje se mjere su temperature na ulazu i izlazu iz cijevi izmjenjivača topline, temperature na ulazu i izlazu iz plašta izmjenjivača, volumenski protoci izlaznog kondenzata, volumenski protoci ulaznog zraka, volumenski protoci rashladne vode te ukupni tlak smjese vodene pare i zraka. Navedene mjerene veličine predstavljaju jednu mjernu točku. Dodatno se mjere temperature pothlađenog kondenzata te temperatura i tlak ulaznog zraka. Konstantne vrijednosti u setu mjernih točaka su protok rashladne vode, ulazna temperatura rashladne vode, izmjenjivačka površina na kojoj vodena para kondenzira, te približno jednak tlak smjese vodene pare i nekondenzirajućeg plina. Protok vodene pare i ostale veličine se mijenjaju s povećanjem udjela zraka kao NKP u struji vodene pare. Vrijednosti mjerenih veličina za sve setove mjernih točaka prikazane su u sljedećim tablicama.

Tablica 1. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A1

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A1-1	0	78,26	118,94	116,51	0,94	1115	26,37	62,00
A1-2	0,51	73,02	118,70	105,19	0,94	1115	26,50	61,40
A1-3	0,90	70,18	118,29	101,49	0,94	1115	27,42	61,24
A1-4	1,90	67,92	118,93	93,80	0,93	1115	27,69	61,02
A1-5	3,00	65,69	117,52	94,60	0,93	1115	28,49	60,53
A1-6	4,95	61,54	117,96	93,71	0,92	1115	28,86	60,10

Tablica 2. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A2

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A2-1	0,00	95,74	137,97	135,95	2,42	1115	33,98	76,68
A2-2	0,51	88,67	138,03	123,95	2,42	1115	33,94	75,71
A2-3	0,92	85,71	137,85	113,50	2,42	1115	33,93	75,03
A2-4	2,30	84,11	137,39	122,03	2,42	1115	33,94	74,50
A2-5	4,00	80,36	136,58	114,00	2,41	1115	33,92	74,05
A2-6	6,20	75,00	136,20	95,00	2,40	1115	33,92	72,90

Tablica 3. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka A3

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A3-1	0,00	100,56	150,56	148,37	3,87	1115	40,20	86,43
A3-2	0,54	97,83	150,95	147,00	3,87	1115	40,22	85,08
A3-3	0,95	94,74	150,49	142,00	3,87	1115	40,21	84,90
A3-4	2,40	91,84	150,43	140,20	3,86	1115	40,23	83,67
A3-5	4,40	87,10	149,27	130,46	3,86	1115	40,16	82,37
A3-6	5,70	85,31	148,86	124,44	3,85	1115	40,23	81,28

Tablica 4. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B1

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B1-1	0,00	65,45	119,39	116,80	0,96	1115	40,16	70,91
B1-2	0,50	61,22	119,30	114,46	0,96	1115	40,17	70,48
B1-3	0,98	59,21	118,52	108,40	0,96	1115	40,18	69,35
B1-4	1,52	58,06	118,15	109,05	0,94	1115	40,18	69,00
B1-5	2,40	57,14	117,90	105,47	0,94	1115	40,16	68,65
B1-6	4,00	54,96	118,27	98,61	0,93	1115	40,18	68,04

Tablica 5. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B2

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B2-1	0,00	78,26	137,65	135,72	2,40	1115	49,34	85,30
B2-2	0,54	73,47	137,39	133,40	2,40	1115	49,45	85,00
B2-3	1,00	71,43	137,58	131,63	2,40	1115	49,52	84,61
B2-4	1,95	70,59	137,36	129,21	2,39	1115	49,48	84,37
B2-5	3,20	68,83	136,85	123,49	2,39	1115	49,54	83,57
B2-6	5,00	64,75	135,64	114,70	2,38	1115	49,51	81,85

Tablica 6. Vrijednosti mjerenih veličina u setu mjernih točaka B3

<i>Mjerna točka</i>	<i>unutar cijevi</i>					<i>unutar plašta</i>		
	$q_{v,z}$ m ³ /h	$q_{v,k}$ l/h	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B3-1	0,00	93,51	151,00	149,33	3,90	1115	52,46	93,93
B3-2	0,50	88,24	150,83	143,92	3,90	1115	52,37	92,82
B3-3	0,97	85,31	150,32	137,72	3,90	1115	52,46	92,27
B3-4	2,27	79,65	149,73	126,36	3,89	1115	52,64	91,17
B3-5	4,00	77,59	149,61	127,55	3,89	1115	52,62	90,83
B3-6	6,00	76,60	149,11	133,32	3,88	1115	52,68	90,59

Nakon prikupljanja setova mjerenih veličina slijedi postupak njihove obrade koji je opisan u nastavku. Za početak izračunavaju se toplinski tokovi za slučajeve kondenzacije vodene pare sa i bez zraka kao nekondenzirajućeg plina (ϕ_0) i (ϕ_x), odnosno pripadajuće gustoće toplinskih tokova (q_0) i (q_x). Zatim slijedi izračun parametara negativnog utjecaja (ε). Dodatno se iz protoka vodene pare i zraka računaju maseni udjeli zraka u smjesi (x_z), parcijalni tlakovi vodene pare u smjesi (p'), koeficijenti prolaza topline (k_v), koeficijenti prijelaza topline unutar plašta ($\alpha_{s,w}$) i unutar cijevi ($\alpha_{p,p}$), temperature stijenki (ϑ_s) te temperaturene razlike između temperature kondenzacije i temperature stijenki ($\Delta\vartheta_{ks}$), a sve prema metodologiji opisanoj u poglavlju 4. Vrijednosti izračunatih veličina za sve setove mjernih točaka prikazane su u sljedećim tablicama.

Tablica 7. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A1

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A1-1	0,000	0,94	0,94	71,76	43784	118,94	116,51	1104,77	26,37	62,00
A1-2	0,039	0,94	0,89	66,96	40882	118,70	105,19	1104,85	26,50	61,40
A1-3	0,070	0,94	0,85	64,35	39336	118,29	101,49	1104,70	27,42	61,24
A1-4	0,141	0,93	0,75	62,28	38001	118,93	93,80	1104,69	27,69	61,02
A1-5	0,212	0,93	0,65	60,24	36906	117,52	94,60	1104,62	28,49	60,53
A1-6	0,321	0,92	0,48	56,43	34525	117,96	93,71	1104,63	28,86	60,10
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0/x kW	q_0/x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
A1-1	47,96	176,69	1,000	2410,02	16702,36	2658,10	10,58			
A1-2	45,72	168,42	0,953	2297,41	12495,18	2656,52	13,48			
A1-3	44,24	163,00	0,922	2243,33	11008,52	2659,30	14,81			
A1-4	43,53	160,39	0,908	2187,72	9785,19	2659,52	16,39			
A1-5	42,05	154,90	0,877	2156,68	9180,82	2660,83	16,87			
A1-6	39,59	145,86	0,826	2015,72	7076,27	2660,58	20,61			

Tablica 8. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A2

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A2-1	0,000	2,42	2,42	87,68	50914	137,97	135,95	1099,18	33,98	76,68
A2-2	0,033	2,42	2,35	81,20	47144	138,03	123,95	1099,45	33,94	75,71
A2-3	0,060	2,42	2,29	78,50	45596	137,85	113,50	1099,63	33,93	75,03
A2-4	0,139	2,42	2,11	77,03	44805	137,39	122,03	1099,77	33,94	74,50
A2-5	0,227	2,41	1,88	73,59	42904	136,58	114,00	1099,90	33,92	74,05
A2-6	0,328	2,40	1,61	68,68	40087	136,20	95,00	1100,20	33,92	72,90
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0/x kW	q_0/x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
A2-1	57,10	210,35	1,000	2604,31	25881,23	2746,83	8,13			
A2-2	54,16	199,53	0,949	2450,44	16039,13	2743,04	12,44			
A2-3	53,43	196,86	0,936	2410,88	14541,16	2740,47	13,54			
A2-4	51,63	190,23	0,904	2334,25	12169,28	2738,47	15,63			
A2-5	50,19	184,90	0,879	2284,26	10945,63	2736,71	16,89			
A2-6	48,82	179,88	0,855	2214,31	9549,30	2732,31	18,84			

Tablica 9. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka A3

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
A3-1	0,000	3,87	3,87	92,06	51809	150,56	148,37	1094,63	40,20	86,43
A3-2	0,032	3,87	3,77	89,43	50271	150,95	147,00	1095,03	40,22	85,08
A3-3	0,056	3,87	3,70	86,60	48749	150,49	142,00	1095,08	40,21	84,90
A3-4	0,134	3,86	3,43	84,08	47331	150,43	140,20	1095,44	40,23	83,67
A3-5	0,230	3,86	3,10	79,74	45044	149,27	130,46	1095,84	40,16	82,37
A3-6	0,283	3,85	2,90	78,10	44166	148,86	124,44	1096,13	40,23	81,28
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0/x kW	q_0/x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
A3-1	58,91	217,04	1,000	2548,41	18871,84	2803,90	11,50			
A3-2	57,42	211,55	0,975	2449,17	14615,00	2799,33	14,47			
A3-3	56,17	206,93	0,953	2406,05	13213,77	2798,72	15,66			
A3-4	54,81	201,92	0,930	2329,68	11251,67	2794,53	17,95			
A3-5	53,09	195,60	0,901	2266,82	9971,11	2789,77	19,62			
A3-6	52,72	194,22	0,895	2245,72	9609,37	2786,19	20,21			

Tablica 10. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B1

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B1-1	0,000	0,96	0,96	60,06	36596	119,39	116,80	1099,06	40,16	70,91
B1-2	0,046	0,96	0,90	56,17	34240	119,30	114,46	1099,18	40,17	70,48
B1-3	0,089	0,96	0,85	54,36	33209	118,52	108,40	1099,48	40,18	69,35
B1-4	0,133	0,94	0,77	53,27	32580	118,15	109,05	1099,57	40,18	69,00
B1-5	0,198	0,94	0,68	52,46	32105	117,90	105,47	1099,67	40,16	68,65
B1-6	0,300	0,93	0,52	50,46	30844	118,27	98,61	1099,83	40,18	68,04
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0/x kW	q_0/x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
B1-1	40,12	147,81	1,000	2361,26	12767,29	2748,37	11,58			
B1-2	37,70	138,90	0,940	2213,31	9392,56	2746,79	14,79			
B1-3	36,90	135,94	0,920	2170,84	8705,98	2742,62	15,61			
B1-4	36,13	133,10	0,900	2131,15	8110,10	2741,31	16,41			
B1-5	35,85	132,07	0,893	2116,08	7905,54	2739,88	16,71			
B1-6	35,04	129,10	0,873	2044,60	7003,96	2737,64	18,43			

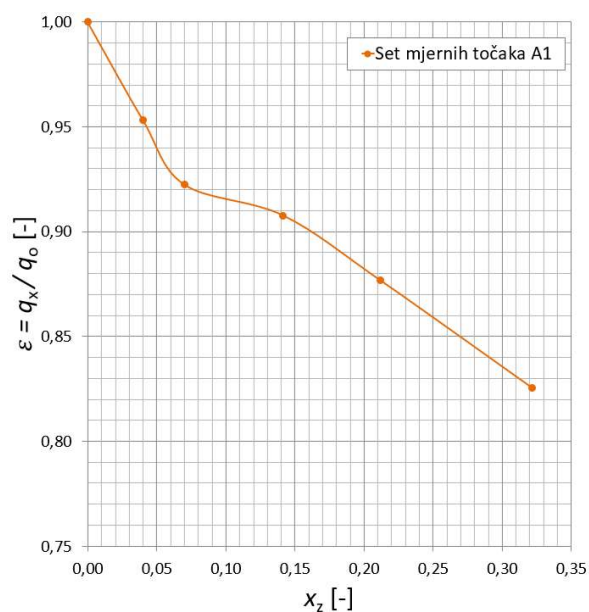
Tablica 11. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B2

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B2-1	0,000	2,40	2,40	71,72	41681	137,65	135,72	1092,20	49,34	85,30
B2-2	0,042	2,40	2,31	67,33	39158	137,39	133,40	1092,26	49,45	85,00
B2-3	0,076	2,40	2,23	65,50	38073	137,58	131,63	1092,36	49,52	84,61
B2-4	0,140	2,39	2,08	64,73	37648	137,36	129,21	1092,44	49,48	84,37
B2-5	0,215	2,39	1,90	63,12	36767	136,85	123,49	1092,67	49,54	83,57
B2-6	0,313	2,38	1,63	59,37	34707	135,64	114,70	1093,21	49,51	81,85
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0 / x kW	q_0 / x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
B2-1	46,72	172,11	1,000	2502,94	15920,56	2830,62	10,81			
B2-2	44,06	162,32	0,943	2364,94	11619,51	2830,00	13,97			
B2-3	43,04	158,57	0,921	2296,97	10155,17	2828,96	15,61			
B2-4	42,77	157,58	0,916	2285,05	9935,09	2828,06	15,86			
B2-5	42,23	155,59	0,904	2258,24	9469,25	2825,63	16,43			
B2-6	40,50	149,20	0,867	2171,85	8154,29	2819,81	18,30			

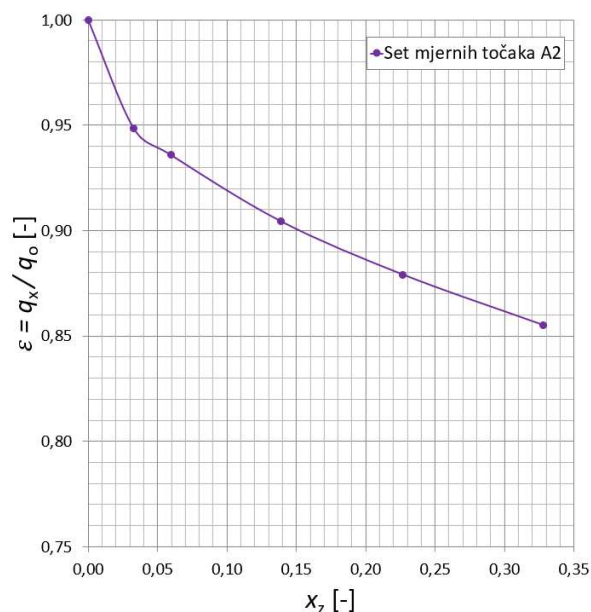
Tablica 12. Vrijednosti izračunatih veličina u setu mjernih točaka B3

	<i>unutar cijevi</i>							<i>unutar plašta</i>		
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	Re -	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
B3-1	0,000	3,90	3,90	85,54	48085	151,00	149,33	1088,45	52,46	93,93
B3-2	0,032	3,90	3,80	80,72	45397	150,83	143,92	1088,84	52,37	92,82
B3-3	0,063	3,90	3,70	78,04	43956	150,32	137,72	1088,99	52,46	92,27
B3-4	0,144	3,89	3,43	72,86	41107	149,73	126,36	1089,29	52,64	91,17
B3-5	0,233	3,89	3,11	70,98	40058	149,61	127,55	1089,40	52,62	90,83
B3-6	0,316	3,88	2,79	70,07	39602	149,11	133,32	1089,46	52,68	90,59
	<i>topl. tokovi i negativni utjecaji</i>				<i>ostali toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	ϕ_0 / x kW	q_0 / x kW/m ²	ε -	k_u W/(m ² K)	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C			
B3-1	54,64	201,30	1,000	2651,46	14402,05	3154,32	13,98			
B3-2	52,14	192,09	0,954	2512,35	11112,13	3150,27	17,29			
B3-3	51,04	188,05	0,934	2467,00	10289,60	3148,73	18,28			
B3-4	48,82	179,85	0,893	2359,66	8667,70	3145,61	20,75			
B3-5	47,56	175,22	0,870	2296,68	7880,35	3144,44	22,24			
B3-6	46,48	171,25	0,851	2255,93	7423,28	3143,79	23,07			

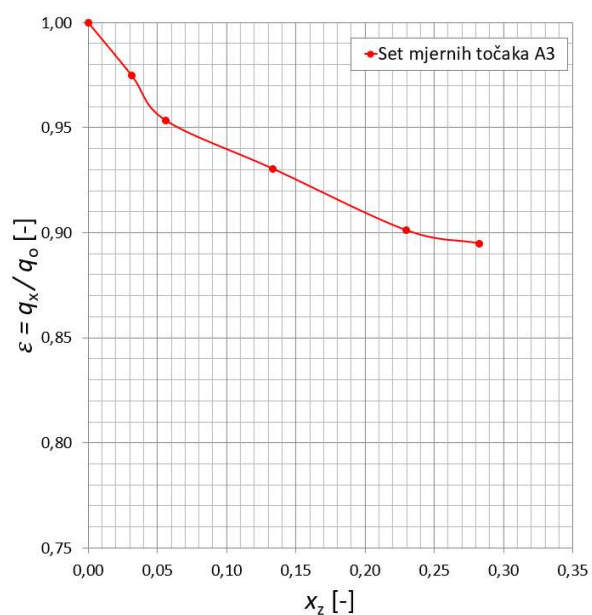
Slikama 49 do 54 prikazani su utjecaji prisutnosti zraka kao NKP na parametar negativnog utjecaja (ε) koji predstavlja omjer srednje gustoće toplinskog toka pri određenom masenom udjelu NKP i srednje gustoće toplinskog toka bez prisutnosti NKP. Iz slika se vidi kako se kod svih setova mjernih točaka povećanjem masenog udjela zraka u smjesi s vodenom parom parametar negativnog utjecaja smanjuje, odnosno negativni utjecaj prisutnosti zraka na proces kondenzacije vodene pare je sve veći. Navedeno je direktna posljedica prisutnosti zraka kao NKP u smjesi s vodenom parom koja kondenzira unutar spiralnih cijevi. Prilikom kondenzacije, uz nastali kapljeviti sloj kondenzata, stvara se i sloj nakupljenog zraka koji predstavlja otpor konvektivnom toku svježje pare prema stijenci, odnosno kondenzatu. Povećanjem udjela zraka, na površini kondenzata raste parcijalni tlak nakupljenog zraka, odnosno pada parcijalni tlak vodene pare. Navedeno ima za posljedicu smanjenja temperatura kondenzacije te prenesenih toplinskih tokova.



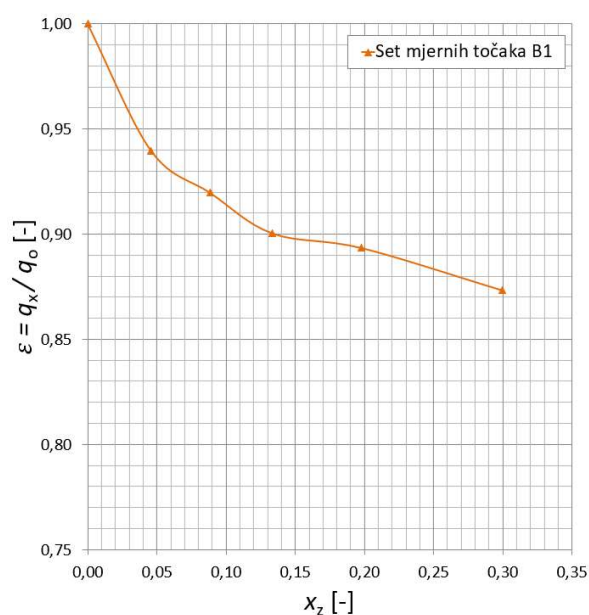
Slika 49. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka A1



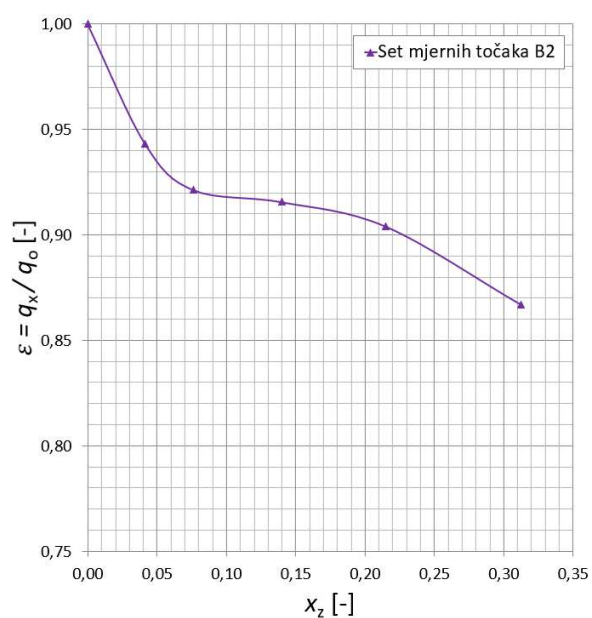
Slika 50. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka A2



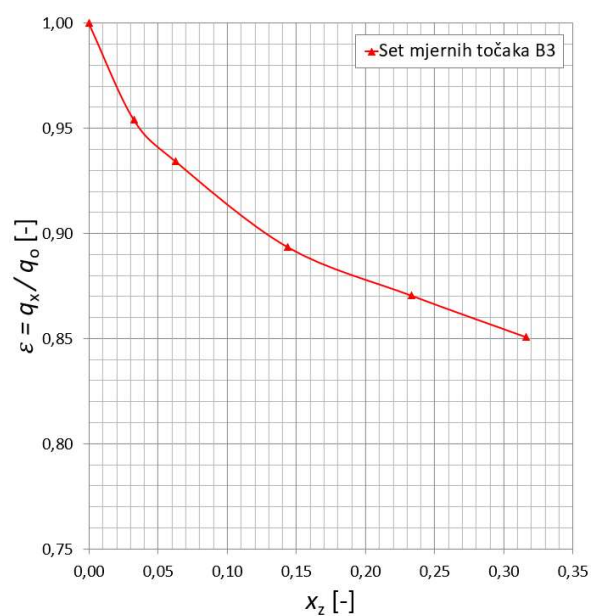
Slika 51. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka A3



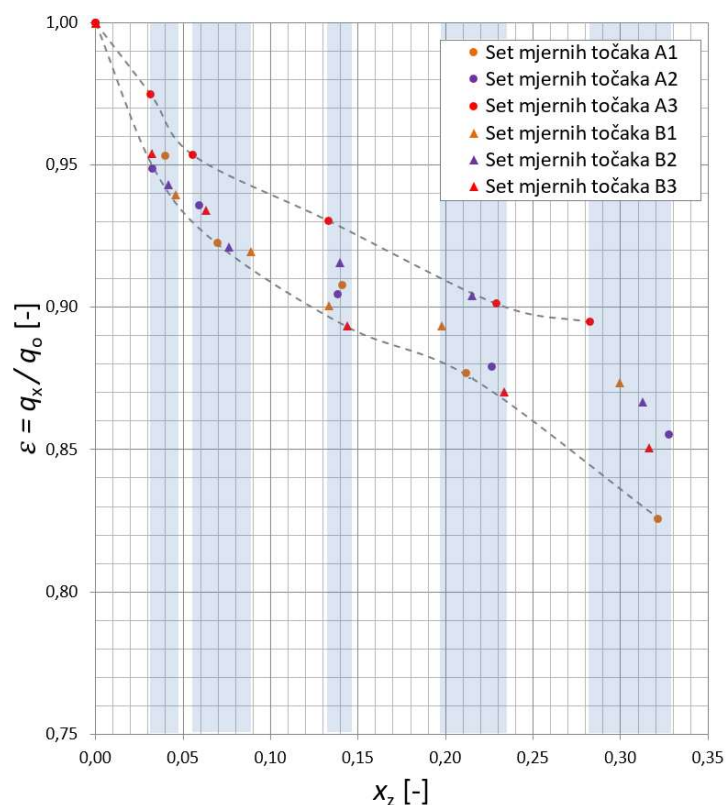
Slika 52. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka B1



Slika 53. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka B2



Slika 54. Negativni utjecaji (ε)
u setu mjernih točaka B3



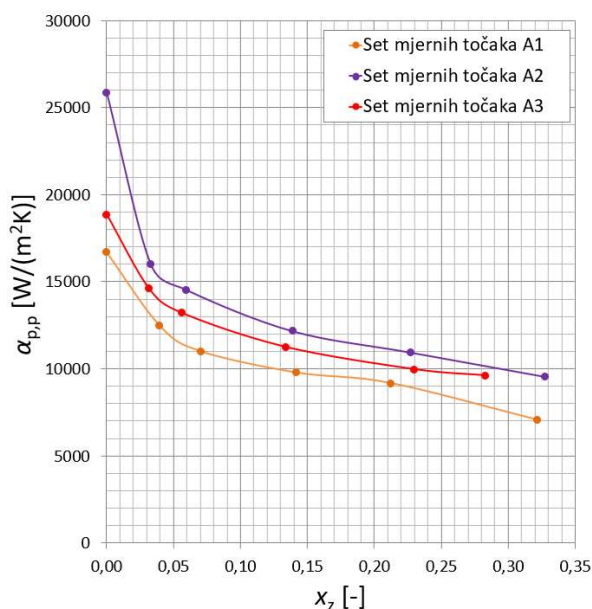
Slika 55. Negativni utjecaji (ε) u svim setovima mjernih točaka

Slikom 55 zajednički su prikazani negativni utjecaji prisutnosti zraka u svim setovima mjernih točaka. Iz prethodnih tablica može se očitati da se vrijednosti parametra negativnog utjecaja (ε) kreću u sljedećim rasponima:

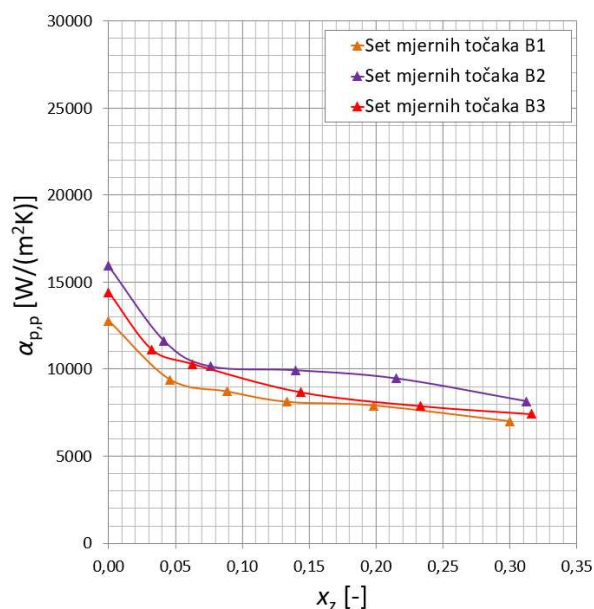
- Za masene udjele zraka (x_z) od 3,2 % do 4,6 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,940 do 0,975, što znači da smanjenje gustoće toplinskog toka u navedenom rasponu masenih udjela zraka iznosi 2,5 do 6 %.
- Za masene udjele zraka (x_z) od 5,6 % do 8,9 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,920 do 0,953.
- Za masene udjele zraka (x_z) od 13,3 % do 14,4 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,893 do 0,930.
- Za masene udjele zraka (x_z) od 19,8 % do 23,3 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,870 do 0,904.
- Za masene udjele zraka (x_z) od 28,3 % do 32,8 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,826 do 0,873.

Rasponi masenih udjela zraka (x_z) prikazani su vertikalnim sjenčanim područjima plave boje na slici 55. Crtkanim linijama prikazane su granice maksimalnih i minimalnih vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) uzimajući u obzir sve mjerene točke iz ovog istraživanja. Navedenom slikom omogućena je jednostavna inženjerska procjena vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε), odnosno procjena smanjenja izmijenjenih toplinskih tokova pri određenim masenim udjelima NKP, u odnosu na toplinske tokove bez prisutnosti NKP, a sve u rasponu mjerenih radnih parametara, odnosno ispitivane geometrije spiralne cijevi.

Slikama 56 i 57 prikazane su ovisnosti izračunatih koeficijenata prijelaza topline ($\alpha_{p,p}$) o masenim udjelima zraka (x_z) kao NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima. Iz slika je vidljivo kako se vrijednosti koeficijenata prijelaza topline značajno smanjuju do 5 % masenih udjela zraka (x_z) u smjesi s vodenom parom. Daljnjim povećanjem masenih udjela zraka pad vrijednosti koeficijenata prijelaza topline se nastavlja, ali smanjenim intenzitetom. Smanjenje koeficijenata prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao NKP posljedica je pojave sloja zraka na kapljevitom sloju kondenzata unutar cijevi koji dovodi do smanjenja parcijalnog tlaka vodene pare, odnosno temperature kondenzacije vodene pare.

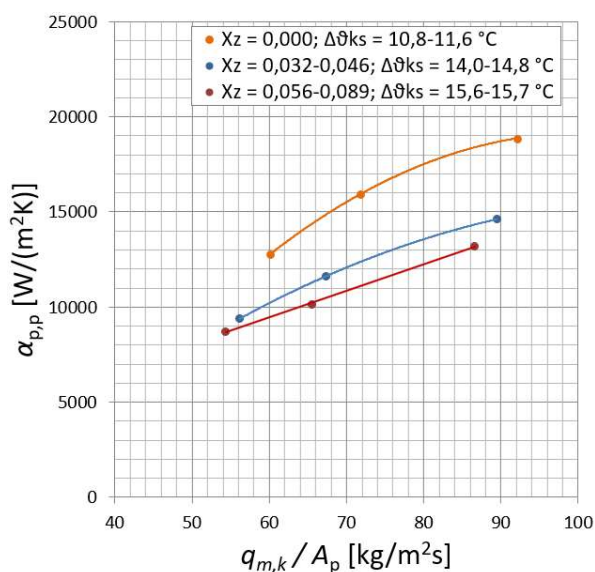


Slika 56. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka A1, A2 i A3

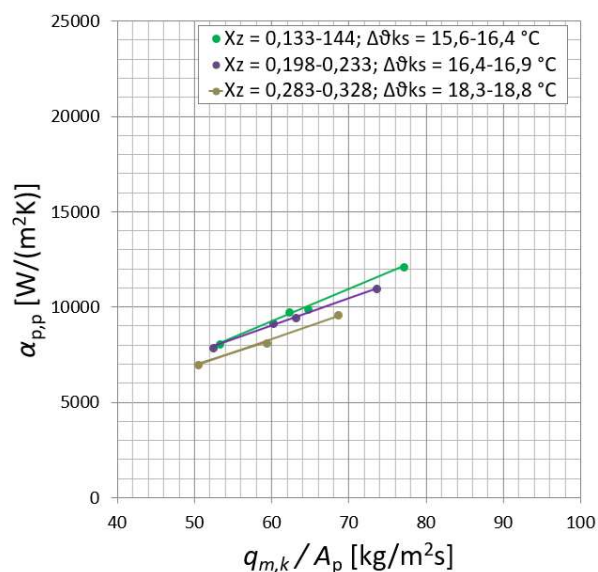


Slika 57. Koeficijenti prijelaza topline u setu mjernih točaka B1, B2 i B3

Slikama 58 i 59 prikazane su ovisnosti izračunatih koeficijenata prijelaza topline ($\alpha_{p,p}$) prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi o gustoćama masenog protoka vodene pare. Gustoća masenog protoka definira se kao omjer masenog protoka vodene pare ($q_{m,k}$) i površine unutarnjeg poprečnog presjeka cijevi (A_p). Iz slika je vidljivo kako vrijednosti koeficijenata prijelaza topline rastu s povećanjem gustoće masenog protoka vodene pare. Također, vidljivo je da su krivulje strmije na manjim masenim udjelima zraka (x_z) u smjesi s vodenom parom, dok s povećanjem masenog udjela zraka poprimaju položeniji oblik. Navedeno je posljedica utjecaja masenog protoka vodene pare na nastali sloj kondenzata i sloj zraka unutar spiralnih cijevi. Na manjim masenim udjelima zraka i većim masenim protocima, vodena para kao posljedica sekundarnih strujanja značajno djeluje na kidanje sloja zraka te time pospješuje konvektivni toplinski tok vodene pare prema stijenci cijevi. Na većim masenim udjelima zraka nastali sloj nakupljenog zraka je deblji pa su stoga navedeni utjecaji, kao i vrijednosti koeficijenata prijelaza topline, manji.



Slika 58. Koeficijenti prijelaza topline
u setu mjernih točaka A1, A2 i A3



Slika 59. Koeficijenti prijelaza topline
u setu mjernih točaka B1, B2 i B3

Izračunate i prikazane vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) u ovom potpoglavlju se dalje analiziraju i uspoređuju u poglavlju 6. prilikom analize rezultata istraživanja. Vrijednosti se uspoređuju s izračunatim usporednim vrijednostima dobivenim pomoću proračunskih modela za druge konvencionalne izmjenjivačke površine. Rezultati se prikazuju uzimajući u obzir izračunate mjerne nesigurnosti.

5.2. Rezultati mjerenja u toplovodnom režimu rada

U ovom potpoglavlju prikazani su mjerni rezultati u toplovodnom režimu rada. Detaljno opisana metodologija mjerenja kao i mjerene veličine nalaze se u potpoglavlju 4.5. Ključne veličine koje se mjere u jednoj mjernoj točki su temperature na ulazu i izlazu iz cijevi izmjenjivača topline, temperature na ulazu i izlazu iz plašta izmjenjivača te volumenski protoci vode unutar plašta ispitivanog izmjenjivača topline. Prilikom provođenja mjerenja mjeri se više mjernih točaka. Vrijednosti mjerenih veličina za sve mjerne točke prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 13. Vrijednosti mjerenih veličina u toplovodnom režimu rada

Mjerna točka	unutar cijevi			unutar plašta		
	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	p_{uk} bar,g	$q_{v,w}$ l/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C
1	99,34	83,10	3,96	1047	18,53	49,95
2	99,26	81,79	3,96	1319	18,43	45,05
3	99,38	81,38	3,96	1418	18,51	43,92
4	99,40	80,69	3,96	1665	18,50	41,81
5	99,53	79,80	3,96	1943	18,73	40,50
6	99,50	79,30	3,96	2110	18,64	39,04
7	99,28	77,70	3,96	2678	18,31	35,90
8	99,29	75,13	3,96	3714	18,24	32,00

Nakon prikupljanja vrijednosti mjerenih veličina slijedi postupak njihove obrade koji je opisan u nastavku. Za početak, izračunavaju se toplinski tokovi (ϕ_w) i koeficijenti prolaza topline (k_v). Zatim slijedi izračun koeficijenata prijelaza topline u cijevima ($\alpha_{p,w}$) pomoću proračunskog modela prisilne konvekcije u spiralnim cijevima opisanog u potpoglavlju 4.5. Na temelju tih vrijednosti izračunavaju se koeficijenti prijelaza topline oko cijevi unutar plašta ($\alpha_{s,w}$), Nusseltove značajke ($Nu_{s,w}$) te Prandtlove značajke ($Pr_{s,w}$). Nakon izračuna bezdimenzijskih značajki Re , Nu i Pr pristupa se regresijskoj analizi prema metodologiji opisanoj u potpoglavlju 4.5. Vrijednosti izračunatih veličina za sve mjerne točke prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 14. Vrijednosti izračunatih veličina u toplovodnom režimu rada

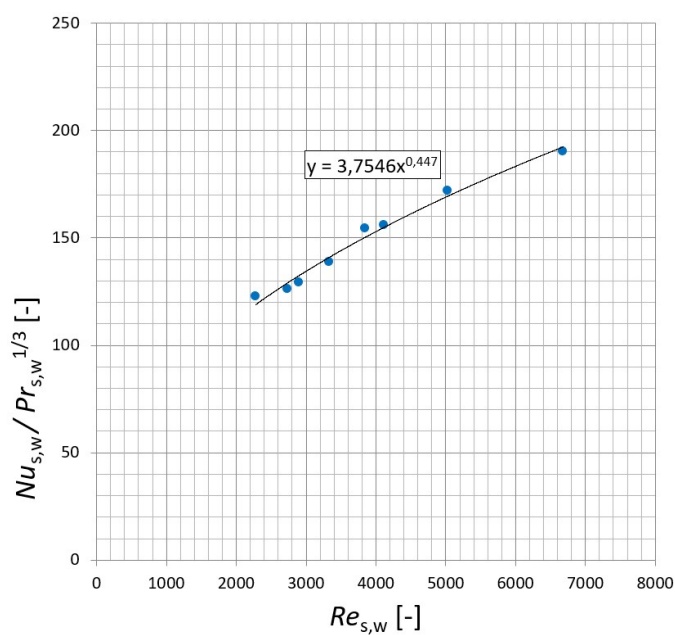
	unutar cijevi		unutar plašta			ostali toplinski parametri		
Mj. točka	ϑ_1 °C	ϑ_2 °C	$q_{m,w}$ kg/h	ϑ_3 °C	ϑ_4 °C	$\Delta\vartheta_{log}$ °C	ϕ_w kW	k_v W/(m²K)
1	99,34	83,10	1041	18,53	49,95	56,64	38,16	1985,45
2	99,26	81,79	1313	18,43	45,05	58,67	40,76	2047,68
3	99,38	81,38	1411	18,51	43,92	59,09	41,83	2086,51
4	99,40	80,69	1658	18,50	41,81	59,86	45,08	2219,51
5	99,53	79,80	1935	18,73	40,50	60,04	49,14	2412,03
6	99,50	79,30	2101	18,64	39,04	60,56	50,02	2434,10
7	99,28	77,70	2668	18,31	35,90	61,36	54,78	2631,04
8	99,29	75,13	3703	18,24	32,00	61,94	59,49	2830,23
	ostali toplinski parametri							
Mj. točka	$Re_{p,w}$ -	$\alpha_{p,w}$ W/(m²K)	$Re_{s,w}$ -	$\alpha_{s,w}$ W/(m²K)	$Nu_{s,w}$ -	$Pr_{s,w}$ -	$\frac{Nu_{s,w}}{Pr_{s,w}^{1/3}}$	
1	48039,36	25385,17	2282,30	2585,30	208,38	4,91	122,63	
2	47326,97	25139,01	2733,37	2695,31	218,48	5,20	126,16	
3	47062,54	25038,14	2906,61	2764,51	224,36	5,27	129,03	
4	48606,04	25720,43	3338,71	2991,05	243,35	5,40	138,80	
5	50026,07	26351,85	3852,09	3338,52	271,96	5,47	154,46	
6	49581,10	26186,40	4114,57	3384,38	276,21	5,57	155,90	
7	50298,16	26566,62	5030,92	3767,79	308,80	5,81	171,86	
8	48061,36	25723,72	6678,12	4217,36	347,37	6,11	190,16	

Prethodno navedeni podaci mjerenja koriste se za razvoj proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi. Izrađuje se $\frac{Nu}{Pr^{1/3}} - Re$ dijagram te se određuju vrijednost koeficijenta C i eksponenta n u sljedećoj formuli

$$\frac{Nu}{Pr^{1/3}} = C \cdot Re^n \quad (5-1)$$

Cilj razvoja proračunskog modela prisilne konvekcije oko spiralnih cijevi je dobiti formulu oblika

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{1/3} \quad (5-2)$$



Slika 60. Dijagram regresijske analize

Konačno, proračunski model prisilne konvekcije oko snopa spiralnih cijevi daje se sljedećom formulom

$$Nu = 3,7546 \cdot Re^{0,447} \cdot Pr^{1/3} \quad (5-3)$$

Razvijeni proračunski model koristi se za izračun koeficijenata prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi ($\alpha_{p,p}$), temperatura stijenki cijevi i temperaturnih razlika ($\Delta\vartheta_{ks}$) u kondenzacijskom režimu rada, sve prema metodologiji opisanoj u potpoglavljima 4.1 i 4.2.

5.3. Mjerna nesigurnost

5.3.1. Mjerna nesigurnost u kondenzacijskom režimu rada

Osnovna mjerena veličina u kondenzacijskom režimu rada je parametar negativnog utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ε) prikazan jednačbom (5-4). Detaljan opis navedenog parametra dan je u potpoglavlju 4.1. U nastavku su za provedena mjerenja izračunate sastavljene standardne mjerne nesigurnosti.

$$\varepsilon = \frac{q_x}{q_0} = \frac{\phi_x}{\phi_0} \quad (5-4)$$

Sastavljena varijanca računa se na sljedeći način

$$u_c^2(\varepsilon) = \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi_x} u_c(\phi_x) \right]^2 + \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi_0} u_c(\phi_0) \right]^2 \quad (5-5)$$

Sastavljena standardna nesigurnost računa se kao pozitivni drugi korijen sastavljene standardne varijance. Ona predstavlja procjenu standardnog odstupanja i opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo prepisati mjerenoj veličini [55]. Sastavljene mjerne nesigurnosti iz jednačbe (5-5) računaju se pomoću standardnih nesigurnosti ili sastavljenih standardnih nesigurnosti.

Standardna nesigurnost mjerenja temperatura PT100 osjetnicima

Temperature se mjere platinskim otporničkim termometrima s PT100 osjetnicima koji su trožilno spojeni na akvizicijski sustav za prikupljanje mjernih podataka. Određivanje standardne mjerne nesigurnosti mjerenja temperature za jedan osjetnik prikazano je tablicama 15 do 20. Umjeravanje je provedeno u šest točaka, 0 °C, 30 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C i 150 °C. Isti postupak, proveden na svim ostalim PT100 osjetnicima, pokazao je da se za sve osjetnike mogu uzeti standardne nesigurnost koje iznose

$$u(\vartheta_{PT100, \leq 90\text{ °C}}) = 0,085 - \text{za mjereno područje od } 0\text{ °C do uključivo } 90\text{ °C} \quad (5-6)$$

$$u(\vartheta_{PT100, > 90\text{ °C}}) = 0,149 - \text{za mjereno područje od } 90\text{ °C do } 150\text{ °C} \quad (5-7)$$

Tablica 15. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 0 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje etalona	-0,027 °C	0,0005 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	0,5 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	9,9 °C/Ω@t _s	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	9,9 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0150 °C	pravokutna	1,0 [-]	8,7 mK
	Samozagrijavanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	0,0406 °C	pravokutna	1,0 [-]	23,4 mK
A&B	Referentna temp.	-0,027 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,029 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje DUT-a	-0,271 °C	0,00150 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	1,5 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,002 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,2 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	0,001 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,029 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	29,0 mK
A&B	Očitavanja s umjeravanog instr.	-0,271 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,041 °C

Tablica 16. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 30 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje etalona	30,138 °C	0,0009 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	0,9 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	10,0 °C/Ω@t _s	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	10,0 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0150 °C	pravokutna	1,0 [-]	8,7 mK
	Samozagrijanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	-0,0176 °C	pravokutna	1,0 [-]	10,2 mK
A&B	Referentna temp.	30,138 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,020 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje DUT-a	29,903 °C	0,00250 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	2,5 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,002 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,2 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	0,000 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,2 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,020 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	20,0 mK
A&B	Očitanja s umjeravanog instru.	29,903 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,036 °C

Tablica 17. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 60 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje etalona	59,949 °C	0,0030 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	3,0 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	10,1 °C/Ω@t _s	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	10,1 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0150 °C	pravokutna	1,0 [-]	8,7 mK
	Samozagrijanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	-0,0752 °C	pravokutna	1,0 [-]	43,4 mK
A&B	Referentna temp.	59,949 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,047 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost (k=1)
A	Očitavanje DUT-a	59,784 °C	0,05960 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	59,6 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,002 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,2 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	-0,002 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,0 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,047 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	46,8 mK
A&B	Očitanja s umjeravanog instru.	59,784 °C	Ukupna standardna nesigurnost (k=1)			0,081 °C

Tablica 18. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 90 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje etalona	90,297 °C	0,0021 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	2,1 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	10,2 °C/Ω@t _s	2,0 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	10,2 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0200 °C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Samozagrijanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	-0,1338 °C	pravokutna	1,0 [-]	77,2 mK
A&B	Referentna temp.	90,297 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,080 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje DUT-a	89,969 °C	0,00870 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	8,7 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,003 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,7 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	-0,003 °C	pravokutna	1,0 [-]	1,8 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,080 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	79,5 mK
A&B	Očitavanja s umjeravanog instru.	89,969 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,085 °C

Tablica 19. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 120 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje etalona	120,257 °C	0,0025 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	2,5 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	10,3 °C/Ω@t _s	2,1 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	10,3 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0200 °C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Samozagrijanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	-0,1916 °C	pravokutna	1,0 [-]	110,6 mK
A&B	Referentna temp.	120,257 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,112 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje DUT-a	119,867 °C	0,00300 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	3,0 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,004 °C	pravokutna	1,0 [-]	2,3 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	-0,005 °C	pravokutna	1,0 [-]	2,6 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,112 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	112,2 mK
A&B	Očitavanja s umjeravanog instru.	119,867 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,116 °C

Tablica 20. Budžet mjerne nesigurnosti PT100 osjetnika pri temperaturi 150 °C

Nesigurnost etalonske opreme i zone kontrolirane temperature:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje etalona	150,251 °C	0,0044 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	4,4 mK
B	Umjeravanje etalona	0,000 °C	0,0050 °C	normalna (2s)	1,0 [-]	2,5 mK
	Drift etalona	0,000 °C	0,0250 °C	pravokutna	1,0 [-]	14,4 mK
	Umj. mosta	0,000 mW	0,40 mΩ	normalna (2s)	10,4 °C/Ω@t _s	2,1 mK
	Rezolucija mosta	0,000 mW	0,04 mΩ	pravokutna	10,4 °C/Ω@t _s	0,1 mK
	Grad. i nest. kupke	0,000 °C	0,0200 °C	pravokutna	1,0 [-]	11,5 mK
	Samozagrijavanje	0,000 °C	0,0010 °C	pravokutna	1,0 [-]	0,6 mK
	Pogreška dub. uranj.	0,000 °C	-0,2495 °C	pravokutna	1,0 [-]	144,1 mK
A&B	Referentna temp.	150,251 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,145 °C

Nesigurnost umjeravanog termometra:						
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitavanje / korekcija	Doprinos nesigurnosti	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost ($k=1$)
A	Očitavanje DUT-a	149,766 °C	0,01000 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	10,0 mK
B	Rezolucija indikatora	0,000 °C	0,100 °C	pravokutna	1,0 [-]	28,9 mK
	Histereza	0,000 °C	0,004 °C	pravokutna	1,0 [-]	2,3 mK
	samozagrijavanje	0,000 °C	0,010 °C	pravokutna	1,0 [-]	5,8 mK
	Pogreška dub. uranj	0,000 °C	-0,006 °C	pravokutna	1,0 [-]	3,4 mK
	Utjecaj etalonske opr.	0,000 °C	0,145 °C	normalna (1s)	1,0 [-]	145,3 mK
A&B	Očitavanja s umjeravanog instru.	149,766 °C	Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$)			0,149 °C

Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka turbinskim protokomjerima

Za mjerenja volumenskog protoka vode koriste se turbinski protokomjeri s impulsnim izlaznim signalom koji su spojeni na akvizicijski sustav. Akvizicijski sustav daje vrijednost volumenskog protoka ovisno o broju primljenih impulsa u određenom vremenu. Za pravilnu procjenu sastavljene mjerne nesigurnosti volumenskog protoka uzeti su u obzir doprinosi zbog nesigurnosti očitavanja početnog i završnog volumena s akvizicijskog sustava, nesigurnosti očitavanja vremena početka i završetka mjerenja, nesigurnosti umjeravanja mjerila volumena te nesigurnosti mogućih promjena karakteristika protokomjera u period od vremena umjeravanja. Određivanje sastavljene mjerne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka na jednom protokomjeru prikazano je tablicom 21.

Tablica 21. Budžet mjerne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka

Korištena oprema										
Etalon:		Vaga: MAVAG-01								
Ispitna linija:		MT10_15-40								
Objekt umjeravanja (OU):		Maddalena, CD ONE TRP MID WATER METER								
Nesigurnost određivanja referentnog volumena										
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitanje		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent		Doprinos	
A	Očitanja etalona	59,353	kg	0,002	kg	normalna (1σ)	0,0010	m³/kg	0,002	dm³
B	Umjeravanje etalona	0,00	kg	0,002	kg	normalna (2σ)	0,0010	m³/kg	0,001	dm³
	Drift etalona	0,00	kg	0,001	kg	pravokutna	0,0010	m³/kg	0,001	dm³
	Rezolucija	0,00	kg	0,001	kg	pravokutna	0,0010	m³/kg	0,000	dm³
	Gustoća vode	0,00	kg/m³	7,8	kg/m³	pravokutna	0,00006	m³/kg/ m³	0,268	dm³
	Diverter	0,00	dm³	0,005	dm³	pravokutna	1,0	[-]	0,003	dm³
	Ishlapljivanje vode	0,00	dm³	0,0348	dm³	pravokutna	1,0	[-]	0,020	dm³
A&B	Volumen vode kroz OU	0,0594	m³	Sastavljena standardna mjerna nesigurnost (1σ)					0,269	dm³
Nesigurnost objekta umjeravanja		V _{cal} :		0,0594		m³				
Tip	Izvor nesigurnosti	Očitanje		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent		Doprinos	
A	Očitanje OU	58,00	dm³	0,5774	dm³	normalna (1σ)	1,0	[-]	0,577	dm³
B	Rezolucija OU	0,00	dm³	1,0000	dm³	Pravokutna	1,0	[-]	0,289	dm³
	Nesigurnost ref. volumena	0,00	dm³	0,2686	dm³	normalna (1σ)	1,0	[-]	0,269	dm³
A&B	Volumen OU	0,0580	m³	Sastavljena standardna mjerna nesigurnost (1σ)					0,7	dm³

Volumenski protok se računa prema sljedećem izrazu

$$q_{v,w} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{kon} - V_{poč}}{t_{kon} - t_{poč}} \quad (5-8)$$

Nesigurnost očitavanja vremena početnog i završnog volumena procjenjuje se na 1 sekundu. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe, doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja vremena početnog i završnog volumena iznosi

$$u_c(t_{kon}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial t_{kon}} \frac{u(t_{kon})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{-(V_{kon} - V_{poč})}{(t_{kon} - t_{poč})^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-9)$$

$$u_c(t_{\text{poč}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial t_{\text{poč}}} \frac{u(t_{\text{poč}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{(V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-10)$$

Rezolucija protokomjera iznosi 1 dm^3 , odnosno $0,001 \text{ m}^3$. Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja početnog i završnog volumena, uz pretpostavku pravokutne razdiobe, iznosi

$$u_c(V_{\text{kon}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial V_{\text{kon}}} \frac{u(V_{\text{kon}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})} \frac{0,001}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-11)$$

$$u_c(V_{\text{poč}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial V_{\text{poč}}} \frac{u(V_{\text{poč}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{-1}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})} \frac{0,001}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-12)$$

Drift mjerila protoka procjenjuje se na 1 dm^3 , odnosno $0,001 \text{ m}^3$. Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja početnog i završnog volumena, uz pretpostavku pravokutne razdiobe, iznosi

$$u_c(V_{\text{dr}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial (V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})} \frac{u(V_{\text{dr}})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})} \frac{0,001}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-13)$$

Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti umjeravanja protokomjera iznosi

$$u_c(V_{\text{umj}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,w}}{\partial (V_{\text{kon}} - V_{\text{poč}})} u(V_{\text{umj}}) \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{(t_{\text{kon}} - t_{\text{poč}})} 0,0007 \right]^2} \quad (5-14)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka iznosi

$$u_c(q_v) = \sqrt{u_c^2(t_{\text{kon}}) + u_c^2(t_{\text{poč}}) + u_c^2(V_{\text{kon}}) + u_c^2(V_{\text{poč}}) + u_c^2(V_{\text{dr}}) + u_c^2(V_{\text{umj}})} \quad (5-15)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka menzurom i štopericom

Za mjerenja protoka kondenzata koristi se gradirana menzura ukupnog volumena 1 dm³ i štoperica. Za pravilnu procjenu sastavljene mjerne nesigurnosti volumenskog protoka uzeti su u obzir doprinosi zbog nesigurnosti očitavanja volumena na gradiranoj menzuri te nesigurnosti očitavanja vremena mjerenja na štoperici.

Volumenski protok se računa kao omjer volumena kondenzata izmjenjenog u menzuri i proteklog vremena mjerenog na štoperici prema sljedećem izrazu

$$q_{v,k} = \frac{V_m}{t_s} \quad (5-16)$$

Nesigurnost očitavanja vremena punjenja menzure procjenjuje se na 1 sekundu. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe, doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja vremena iznosi

$$u_c(t_s) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,k}}{\partial t_s} \frac{u(t_s)}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{-V_m}{t_s^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-17)$$

Nesigurnost očitavanja volumena punjenja menzure procjenjuje se na 0,01 dm³, odnosno 0,00001 m³. Uz pretpostavku pravokutne razdiobe, doprinos mjernoj nesigurnosti zbog nesigurnosti očitavanja volumena iznosi

$$u_c(V_m) = \sqrt{\left[\frac{\partial q_{v,k}}{\partial V_m} \frac{u(V_m)}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{t_s} \frac{0,00001}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-18)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka gradiranom menzurom i štopericom iznosi

$$u_c(q_{v,k}) = \sqrt{u_c^2(t_s) + u_c^2(V_m)} \quad (5-19)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja volumenskog protoka zraka rotametrom

Za mjerenja volumenskih protoka zraka koriste se dva rotametra. Svaki rotametar pokriva određeno mjerno područje pa se ovisno o mjerenom volumenskom protoku zraka za ispitivanje koristi odgovarajući rotametar. U tehničkim specifikacijama korištenih rotametara navodi se da njihova preciznost iznosi $\pm 5 \%$ od očitavanja, dok je rezolucija očitavanja $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, odnosno $0,00001389 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pretpostavljajući pravokutnu razdiobu, mjerna nesigurnost mjerenja volumenskih protoka rotametrima iznosi

$$u_c(q_{v,z}) = \sqrt{\left[\frac{0,05 \cdot q_{v,z}}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{0,00001389}{\sqrt{3}}\right]^2} \quad (5-20)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost mjerenja tlaka

Za mjerenja tlaka koristi se manometar mjernog područja 0 do 6 bar pretlaka. Rezolucija očitavanja protoka je 0,02 bar. Manometar je umjeren u akreditiranom laboratoriju te mu mjerna nesigurnost iznosi

$$u(p_{\text{man}}) = 0,01 \quad (5-21)$$

Pretpostavljajući pravokutnu razdiobu, mjerna nesigurnost mjerenja ukupnog tlaka iznosi

$$u_c(p_{\text{uk}}) = \sqrt{\left[\frac{0,01 \cdot p_{\text{uk}}}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{0,02}{\sqrt{3}}\right]^2} \quad (5-22)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost gustoće

Vrijednost gustoće računa se za temperaturu i tlak vode na mjestu mjerenja volumenskog protoka. Kao uzroci nesigurnosti gustoće uzeti su u obzir doprinosi od nesigurnosti mjerenja temperature te nesigurnosti jednadžbe iz koje se računa gustoća. Vrijednosti gustoće očitavaju se iz IAPWS [56].

Nesigurnost gustoće kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(\rho_\vartheta)}{\rho_\vartheta} = \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} u(\vartheta) \quad (5-23)$$

Koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu

$$\frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} \approx \frac{\Delta \rho}{\Delta \vartheta} = \frac{\rho(\vartheta + 0,001) - \rho(\vartheta - 0,001)}{(\vartheta + 0,001) - (\vartheta - 0,001)} \quad (5-24)$$

Nesigurnost jednadžbe iz koje se računa gustoća prema [56] iznosi 0,003 %. Pripadajuća nesigurnost gustoće iznosi

$$\frac{u(\rho_{jedn})}{\rho_{jedn}} = \frac{0,003\rho}{100} \quad (5-25)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost gustoće iznosi

$$u_c(\rho) = \sqrt{[u_c(\rho_\vartheta)]^2 + \left[\frac{u(\rho_{jedn})}{\sqrt{3}} \right]^2} = \sqrt{\left[\frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} u(\vartheta) \right]^2 + \left[\frac{0,00003\rho}{\sqrt{3}} \right]^2} \quad (5-26)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta

Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta računa se za srednju temperaturu i tlak vode koja se zagrijava u izmjenjivaču topline. Kao uzroci nesigurnosti gustoće uzeti su u obzir doprinosi od nesigurnosti mjerenja temperature te nesigurnosti jednadžbe iz koje se računa specifični toplinski kapacitet. Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta očitavaju se iz IAPWS [56].

Nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(c_\vartheta)}{c_\vartheta} = \frac{\partial c_p}{\partial \vartheta_{sr}} u_c(\vartheta_{sr}) \quad (5-27)$$

Koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu

$$\frac{\partial c_p}{\partial \vartheta_{sr}} \approx \frac{\Delta c_p}{\Delta \vartheta_{sr}} = \frac{c_p(\vartheta_{sr} + 0,001) - c_p(\vartheta_{sr} - 0,001)}{(\vartheta_{sr} + 0,001) - (\vartheta_{sr} - 0,001)} \quad (5-28)$$

Srednja temperatura određuje se prema izrazu

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{izlaz} + \vartheta_{ulaz}}{2} \quad (5-29)$$

Uz jednake nesigurnosti mjerenja temperature na dva osjetnika, iz prethodnog izraza proizlazi

$$u_c(\vartheta_{sr}) = \frac{u(\vartheta)}{\sqrt{2}} \quad (5-30)$$

Nesigurnost jednadžbe iz koje se računa specifični toplinski kapacitet prema [56] iznosi 0,2 %. Pripadajuća nesigurnost gustoće iznosi

$$\frac{u(c_{p,jedn})}{c_{p,jedn}} = \frac{0,2c_p}{100} \quad (5-31)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost specifičnog toplinskog kapaciteta iznosi

$$u_c(c_p) = \sqrt{[u_c(c_{p,\vartheta})]^2 + \left[\frac{u(c_{p,jedn})}{\sqrt{3}}\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{\partial c_{p,\vartheta}}{\partial \vartheta_{sr}} \frac{u(\vartheta)}{\sqrt{2}}\right]^2 + \left[\frac{0,002c_p}{\sqrt{3}}\right]^2} \quad (5-32)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost entalpije

Za slučaj kondenzacije vodene pare bez prisutnosti zraka kao nekondenzirajućeg plina, vrijednosti entalpija računaju se za temperature i tlak na ulaznom i izlaznom mjernom mjestu izmjenjivača topline. Kao uzroci nesigurnosti entalpije uzeti su u obzir doprinosi od nesigurnosti mjerenja temperature te nesigurnosti jednadžbe iz koje se računa entalpija. Vrijednosti entalpije očitavaju se iz IAPWS [56].

Nesigurnost entalpije kao posljedica nesigurnosti mjerenja temperature računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(h_\vartheta)}{h_\vartheta} = \frac{\partial h}{\partial \vartheta} u(\vartheta) \quad (5-33)$$

Koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu

$$\frac{\partial h}{\partial \vartheta} \approx \frac{\Delta h}{\Delta \vartheta} = \frac{h(\vartheta + 0,001) - h(\vartheta - 0,001)}{(\vartheta + 0,001) - (\vartheta - 0,001)} \quad (5-34)$$

Nesigurnost jednadžbe iz koje se računa entalpija prema [56] iznosi 0,2 %. Pripadajuće nesigurnosti entalpije iznose

$$\frac{u(h_{jedn})}{h_{jedn}} = \frac{0,2h}{100} \quad (5-35)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost entalpije za slučaj kondenzacije vodene pare bez prisutnosti zraka iznosi

$$u_c(h_0) = \sqrt{[u_c(h_\vartheta)]^2 + \left[\frac{u(h_{jedn})}{\sqrt{3}}\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{\partial h}{\partial \vartheta} u(\vartheta)\right]^2 + \left[\frac{0,002h}{\sqrt{3}}\right]^2} \quad (5-36)$$

Za slučaj kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina, vrijednost entalpije računa se za temperaturu i parcijalni tlak vodene pare u smjesi, izmjerene na ulaznom mjernom mjestu izmjenjivača topline. Kao uzroci nesigurnosti entalpije uzeti su u obzir doprinosi od nesigurnosti mjerenja temperature prema formuli (5-33), nesigurnosti jednadžbe iz koje se računa entalpija prema formuli (5-35) te nesigurnost određivanja parcijalnog tlaka vodene pare prema sljedećem izrazu

$$\frac{u_c(h_{p'})}{h_{p'}} = \frac{\partial h}{\partial p'} u(p') \quad (5-37)$$

Koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu

$$\frac{\partial h}{\partial p'} \approx \frac{\Delta h}{\Delta p'} = \frac{h(p' + 0,001) - h(p' - 0,001)}{(p' + 0,001) - (p' - 0,001)} \quad (5-38)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost entalpije za slučaj kondenzacije vodene pare uz prisutnosti zraka iznosi

$$\begin{aligned} u_c(h_x) &= \sqrt{[u_c(h_\vartheta)]^2 + \left[\frac{u(h_{jedn})}{\sqrt{3}}\right]^2 + [u_c(h_{p'})]^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{\partial h}{\partial \vartheta} u(\vartheta)\right]^2 + \left[\frac{0,002h}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{\partial h}{\partial p'} u(p')\right]^2} \end{aligned} \quad (5-39)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost masenog udjela zraka u smjesi

Maseni udio zraka kao nekondenzirajućeg plina u smjesi s vodenom parom računa se prema sljedećem izrazu

$$x_z = \frac{q_{m,z}}{q_{m,z} + q_{m,p}} = \frac{q_{v,z} \cdot \rho_z}{q_{v,z} \cdot \rho_z + q_{v,p} \cdot \rho_p} \quad (5-40)$$

Standardne nesigurnosti mjerenja volumenskih protoka te određivanja gustoća prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost određivanja masenog udjela zraka iznosi

$$u_c(x_z) = \sqrt{\left[\frac{\partial x_z}{\partial q_{v,z}} u_c(q_{v,z})\right]^2 + \left[\frac{\partial x_z}{\partial q_{v,p}} u_c(q_{v,p})\right]^2 + \left[\frac{\partial x_z}{\partial \rho_z} u_c(\rho_z)\right]^2 + \left[\frac{\partial x_z}{\partial \rho_p} u_c(\rho_p)\right]^2}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{\rho_z \cdot q_{v,p} \cdot \rho_p}{(q_{v,z} \cdot \rho_z + q_{v,p} \cdot \rho_p)^2} u_c(q_{v,z}) \right]^2 + \left[-\frac{q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot \rho_p}{(q_{v,z} \cdot \rho_z + q_{v,p} \cdot \rho_p)^2} u_c(q_{v,p}) \right]^2 + \left[\frac{q_{v,z} \cdot q_{v,p} \cdot \rho_p}{(q_{v,z} \cdot \rho_z + q_{v,p} \cdot \rho_p)^2} u_c(\rho_z) \right]^2 + \left[-\frac{q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot q_{v,p}}{(q_{v,z} \cdot \rho_z + q_{v,p} \cdot \rho_p)^2} u_c(\rho_p) \right]^2} \quad (5-41)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost parcijalnog tlaka vodene pare

Parcijalni tlak vodene pare u smjesi sa zrakom računa se prema sljedećem izrazu

$$p' = \frac{1 - x_z}{1 - x_z \cdot \left(1 - \frac{M_p}{M_z}\right)} \cdot p_{uk} = \frac{1 - x_z}{1 - x_z \cdot \left(1 - \frac{18}{28,96}\right)} \cdot p_{uk} \quad (5-42)$$

$$= \frac{1 - x_z}{1 - x_z \cdot 0,378} \cdot p_{uk}$$

Standardne nesigurnosti mjerenja ukupnog tlaka te određivanja masenog udjela zraka u smjesi prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost određivanja parcijalnog tlaka vodene pare u smjesi sa zrakom iznosi

$$u_c(p') = \sqrt{\left[\frac{\partial p'}{\partial x_z} u_c(x_z) \right]^2 + \left[\frac{\partial p'}{\partial p_{uk}} u_c(p_{uk}) \right]^2} \quad (5-43)$$

$$= \sqrt{\left[-\frac{0,622 \cdot p_{uk}}{(1 - 0,378 \cdot x_z)^2} u_c(x_z) \right]^2 + \left[\frac{1 - x_z}{1 - 0,378 \cdot x_z} u_c(p_{uk}) \right]^2}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka ϕ_0

Toplinski tok kojeg vodena para prilikom kondenzacije bez prisutnosti nekondenzirajućeg plina preda rashladnoj vodi računa se kao

$$\phi_0 = q_{v,k} \cdot \rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) \quad (5-44)$$

Standardne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka te određivanja gustoća i entalpija prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena mjerna nesigurnost računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned} u_c(\phi_0) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \phi_0}{\partial q_{v,k}} u_c(q_{v,k}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_0}{\partial \rho_k} u_c(\rho_k) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_0}{\partial h_{p,1}} u_c(h_{p,1}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_0}{\partial h_{k,2}} u_c(h_{k,2}) \right]^2} \\ &= \sqrt{\left[\rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) u_c(q_{v,k}) \right]^2 + \left[q_{v,k} \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) u_c(\rho_k) \right]^2 + \left[q_{v,k} \cdot \rho_k u_c(h_{p,1}) \right]^2 + \left[-q_{v,k} \cdot \rho_k u_c(h_{k,2}) \right]^2} \end{aligned} \quad (5-45)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka ϕ_x

Toplinski tok kojeg vodena para prilikom kondenzacije uz prisutnosti nekondenzirajućeg plina preda rashladnoj vodi računa se kao

$$\phi_x = \phi_{\text{para}} + \phi_{\text{zrak}} \quad (5-46)$$

gdje je

$$\phi_{\text{para}} = q_{v,k} \cdot \rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) \quad (5-47)$$

$$\phi_{\text{zrak}} = q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (5-48)$$

Standardne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka te određivanja gustoće i entalpija prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka vodene pare (ϕ_{para}) računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned}
 u_c(\phi_{\text{para}}) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \phi_{\text{para}}}{\partial q_{v,k}} u_c(q_{v,k}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{para}}}{\partial \rho_k} u_c(\rho_k) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{para}}}{\partial h_{p,1}} u_c(h_{p,1}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{para}}}{\partial h_{k,2}} u_c(h_{k,2}) \right]^2} \\
 &= \sqrt{\left[\rho_k \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) u_c(q_{v,k}) \right]^2 + \left[q_{v,k} \cdot (h_{p,1} - h_{k,2}) u_c(\rho_k) \right]^2 + \left[q_{v,k} \cdot \rho_k u_c(h_{p,1}) \right]^2 + \left[-q_{v,k} \cdot \rho_k u_c(h_{k,2}) \right]^2}
 \end{aligned} \tag{5-49}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka zraka (ϕ_{zrak}) računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned}
 u_c(\phi_{\text{zrak}}) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \phi_{\text{zrak}}}{\partial q_{v,z}} u_c(q_{v,z}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{zrak}}}{\partial \rho_z} u_c(\rho_z) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{zrak}}}{\partial c_{p,z}} u_c(c_{p,z}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{zrak}}}{\partial \vartheta_1} u_c(\vartheta_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_{\text{zrak}}}{\partial \vartheta_2} u_c(\vartheta_2) \right]^2} \\
 &= \sqrt{\left[\rho_z \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) u_c(q_{v,z}) \right]^2 + \left[q_{v,z} \cdot c_{p,z} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) u_c(\rho_z) \right]^2 + \left[q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) u_c(c_{p,z}) \right]^2 + \left[q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot c_{p,z} u_c(\vartheta_1) \right]^2 + \left[-q_{v,z} \cdot \rho_z \cdot c_{p,z} u_c(\vartheta_2) \right]^2}
 \end{aligned} \tag{5-50}$$

Konačno, sastavljena mjerna nesigurnost ukupnog toplinskog toka ϕ_x računa se prema izrazu

$$u_c(\phi_x) = \sqrt{[u_c(\phi_{\text{para}})]^2 + [u_c(\phi_{\text{zrak}})]^2} \tag{5-51}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost parametra negativnog utjecaja ε

Osnovna mjerena veličina je parametar negativnog utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ε) prikazan jednadžbom

$$\varepsilon = \frac{\phi_x}{\phi_0} \quad (5-52)$$

Sastavljene mjerne nesigurnosti ukupnog toplinskog toka prilikom kondenzacije vodene pare uz prisutnosti nekondenzirajućeg plina (ϕ_x) i ukupnog toplinskog toka prilikom kondenzacije vodene pare bez prisutnosti nekondenzirajućeg plina (ϕ_0) prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti parametar negativnog utjecaja (ε) prikazan je sljedećom jednadžbom

$$\begin{aligned} u_c(\varepsilon) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi_x} u_c(\phi_x)\right]^2 + \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi_0} u_c(\phi_0)\right]^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{1}{\phi_0} u_c(\phi_x)\right]^2 + \left[-\frac{\phi_x}{\phi_0^2} u_c(\phi_0)\right]^2} \end{aligned} \quad (5-53)$$

Proširene sastavljene mjerna nesigurnost s faktorom prekrivanja $k = 2$ izračunavaju se prema sljedećem izrazu

$$U(\varepsilon) = k \cdot u_c(\varepsilon) = 2 \cdot u_c(\varepsilon) \quad (5-54)$$

Vrijednosti sastavljenih mjernih nesigurnosti i proširenih sastavljenih mjernih nesigurnosti za sve mjerne točke prikazane su u sljedećim tablicama.

Tablica 22. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A1

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
A1-1	0,000	0,94	1,000	0,00921	0,01841
A1-2	0,039	0,94	0,954	0,00903	0,01806
A1-3	0,070	0,94	0,922	0,00888	0,01777
A1-4	0,141	0,93	0,908	0,00888	0,01776
A1-5	0,212	0,93	0,877	0,00874	0,01748
A1-6	0,321	0,92	0,826	0,00854	0,01708

Tablica 23. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A2

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
A2-1	0,000	2,42	1,000	0,00752	0,01504
A2-2	0,033	2,42	0,949	0,00735	0,01469
A2-3	0,060	2,42	0,936	0,00735	0,01469
A2-4	0,139	2,42	0,904	0,00718	0,01436
A2-5	0,227	2,41	0,879	0,00713	0,01426
A2-6	0,328	2,40	0,855	0,00716	0,01432

Tablica 24. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A3

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
A3-1	0,000	3,87	1,000	0,00714	0,01428
A3-2	0,032	3,87	0,975	0,00704	0,01408
A3-3	0,056	3,87	0,953	0,00697	0,01395
A3-4	0,134	3,86	0,930	0,00690	0,01380
A3-5	0,230	3,86	0,901	0,00684	0,01367
A3-6	0,283	3,85	0,895	0,00685	0,01370

Tablica 25. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B1

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
B1-1	0,000	0,96	1,000	0,01064	0,02128
B1-2	0,046	0,96	0,940	0,01030	0,02061
B1-3	0,089	0,96	0,920	0,01024	0,02048
B1-4	0,133	0,94	0,900	0,01014	0,02028
B1-5	0,198	0,94	0,893	0,01015	0,02031
B1-6	0,300	0,93	0,873	0,01014	0,02028

Tablica 26. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B2

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
B2-1	0,000	2,40	1,000	0,00887	0,01774
B2-2	0,042	2,40	0,943	0,00860	0,01721
B2-3	0,076	2,40	0,921	0,00852	0,01703
B2-4	0,140	2,39	0,916	0,00852	0,01703
B2-5	0,215	2,39	0,904	0,00851	0,01702
B2-6	0,313	2,38	0,867	0,00841	0,01683

Tablica 27. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B3

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	ε	$u_c(\varepsilon)$	$U(\varepsilon)$
B3-1	0,000	3,90	1,000	0,00757	0,01515
B3-2	0,032	3,90	0,954	0,00740	0,01480
B3-3	0,063	3,90	0,934	0,00735	0,01469
B3-4	0,144	3,89	0,893	0,00725	0,01449
B3-5	0,233	3,89	0,870	0,00716	0,01431
B3-6	0,316	3,88	0,851	0,00706	0,01411

Iz izračunatih mjernih nesigurnosti može se primijetiti da je na nižim tlakovima mjerna nesigurnost veća nego što je to slučaj na višim tlakovima. Također, primjećuje se trend blagog porasta mjerne nesigurnosti parametra negativnog utjecaja (ε) s povećanjem masenog udjela zraka (x_z) kao nekondenzirajućeg plina.

5.3.2. Mjerna nesigurnost u toplovodnom režimu rada

Za usporedbu utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ϵ) prilikom kondenzacije vodene pare unutar spiralnih cijevi s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama važan parametar je temperaturna razlika između temperature kondenzacije i temperature stijenke ($\Delta\vartheta_{ks}$). Navedena temperaturna razlika mora biti jednaka u jednom i drugom slučaju da bi parametri utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ϵ) bili usporedivi. Metodologija usporedbe spomenutih temperaturnih razlika objašnjena je u potpoglavlju 4.1., dok je metodologija izračuna objašnjena u potpoglavlju 4.2.

Navedene temperaturne razlike izračunavaju se prema sljedećoj formuli

$$\Delta\vartheta_{ks} = \vartheta'_1 - \vartheta_s \quad (5-55)$$

Sastavljena varijanca računa se na sljedeći način

$$u_c^2(\Delta\vartheta_{ks}) = \left[\frac{\partial \Delta\vartheta_{ks}}{\partial \vartheta'_1} u_c(\vartheta'_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial \Delta\vartheta_{ks}}{\partial \vartheta_s} u_c(\vartheta_s) \right]^2 \quad (5-56)$$

U nastavku su prikazani izrazi za izračun sastavljenih standardnih mjernih nesigurnosti te su prikazani rezultati izračuna za provedena mjerenja.

Sastavljena mjerna nesigurnost temperature kondenzacije ϑ'_1

Vrijednost temperature kondenzacije računa se kao temperatura zasićenja na parcijalnom tlaku vodene pare u smjesi. Kao uzroci nesigurnosti uzeti su u obzir doprinosi od nesigurnosti određivanja parcijalnog tlaka te nesigurnosti jednadžbe iz koje se računa temperatura zasićenja. Vrijednosti temperature zasićenja očitavaju se iz IAPWS [56].

Nesigurnost temperature kondenzacije kao posljedica nesigurnosti određivanja parcijalnog tlaka računa se prema izrazu

$$\frac{u_c(\vartheta'_{1,p'})}{\vartheta'_{1,p'}} = \frac{\partial \vartheta'_1}{\partial p'} u(p') \quad (5-57)$$

Koeficijent osjetljivosti određen je prema izrazu

$$\frac{\partial \vartheta'_1}{\partial p'} \approx \frac{\Delta \vartheta'_1}{\Delta p'} = \frac{\vartheta'_1(p' + 0,001) - \vartheta'_1(p' - 0,001)}{(p' + 0,001) - (p' - 0,001)} \quad (5-58)$$

Nesigurnost jednadžbe iz koje se računa temperatura zasićenja na parcijalnom tlaku prema [56] iznosi 0,04 %. Pripadajuća nesigurnost gustoće iznosi

$$\frac{u(\rho_{jedn})}{\rho_{jedn}} = \frac{0,04\rho}{100} \quad (5-59)$$

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost gustoće iznosi

$$u_c(\vartheta'_1) = \sqrt{[u_c(\vartheta'_{1,p'})]^2 + \left[\frac{u(\vartheta_{jedn})}{\sqrt{3}}\right]^2} = \sqrt{\left[\frac{\partial \vartheta'_1}{\partial p'} u(p')\right]^2 + \left[\frac{0,0004\vartheta'_1}{\sqrt{3}}\right]^2} \quad (5-60)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost toplinskog toka ϕ_w

Toplinski tok kojeg topla voda iz kotla preda rashladnoj vodi računa se kao

$$\phi_w = q_{v,w} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) \quad (5-61)$$

Standardne nesigurnosti mjerenja volumenskog protoka te određivanja gustoća i specifičnih toplinskih kapaciteta prikazane su u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena mjerna nesigurnost računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned}
 u_c(\phi_0) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \phi_w}{\partial q_{v,w}} u_c(q_{v,w})\right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial \rho_w} u_c(\rho_w)\right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial c_{p,w}} u_c(c_{p,w})\right]^2} \\
 &\quad + \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial \vartheta_3} u_c(\vartheta_4)\right]^2 + \left[\frac{\partial \phi_w}{\partial \vartheta_2} u_c(\vartheta_3)\right]^2} \\
 &= \sqrt{\left[\rho_w \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) u_c(q_{v,w})\right]^2 + \left[q_{v,w} \cdot c_{p,w} \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) u_c(\rho_w)\right]^2} \\
 &\quad + \left[q_{v,w} \cdot \rho_w \cdot (\vartheta_4 - \vartheta_3) u_c(c_{p,w})\right]^2 + \left[q_{v,w} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} u_c(\vartheta_4)\right]^2} \\
 &\quad + \left[-q_{v,w} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} u_c(\vartheta_3)\right]^2}
 \end{aligned} \tag{5-62}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost srednje logaritamske razlike temperatura

Srednja logaritamska razlika temperatura računa se kao

$$\Delta\vartheta_{\log} = \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_4) - (\vartheta_2 - \vartheta_3)}{\ln \frac{(\vartheta_1 - \vartheta_4)}{(\vartheta_2 - \vartheta_3)}} = \frac{\Delta\vartheta_{1-4} - \Delta\vartheta_{2-3}}{\ln \frac{\Delta\vartheta_{1-4}}{\Delta\vartheta_{2-3}}} \tag{5-63}$$

Standardna nesigurnost mjerenja temperature prikazana je u prethodnim potpoglavljima.

Sastavljena mjerna nesigurnost razlike temperatura $\Delta\vartheta_{1-4}$ i $\Delta\vartheta_{2-3}$ iznosi

$$u_c(\Delta\vartheta_{1-4}) = \sqrt{[u(\vartheta_1)]^2 + [u(\vartheta_4)]^2} \tag{5-64}$$

$$u_c(\Delta\vartheta_{2-3}) = \sqrt{[u(\vartheta_2)]^2 + [u(\vartheta_3)]^2} \tag{5-65}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost srednje logaritamske razlike temperatura računa se prema sljedećem izrazu

$$\begin{aligned}
u_c(\Delta\vartheta_{\log}) &= \sqrt{\left[\frac{\partial\Delta\vartheta_{\log}}{\partial\Delta\vartheta_{1-4}}u_c(\Delta\vartheta_{1-4})\right]^2 + \left[\frac{\partial\Delta\vartheta_{\log}}{\partial\Delta\vartheta_{2-3}}u_c(\Delta\vartheta_{2-3})\right]^2} \\
&= \sqrt{\left[\frac{\Delta\vartheta_{1-4} \cdot \ln\left(\frac{\Delta\vartheta_{1-4}}{\Delta\vartheta_{2-3}}\right) - \Delta\vartheta_{1-4} + \Delta\vartheta_{2-3}}{\Delta\vartheta_{1-4} \cdot \ln^2\left(\frac{\Delta\vartheta_{1-4}}{\Delta\vartheta_{2-3}}\right)}u_c(\Delta\vartheta_{1-4})\right]^2 + \left[\frac{-\Delta\vartheta_{2-3} \cdot \ln\left(\frac{\Delta\vartheta_{1-4}}{\Delta\vartheta_{2-3}}\right) + \Delta\vartheta_{1-4} - \Delta\vartheta_{2-3}}{\Delta\vartheta_{2-3} \cdot \ln^2\left(\frac{\Delta\vartheta_{1-4}}{\Delta\vartheta_{2-3}}\right)}u_c(\Delta\vartheta_{2-3})\right]^2} \quad (5-66)
\end{aligned}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost koeficijenta prolaza topline

Koeficijent prolaza topline računa se kao

$$k_v = \frac{\phi_w}{\Delta\vartheta_{\log} \cdot A_v} \quad (5-67)$$

Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti koeficijenta prolaza topline prikazan je sljedećom formulom

$$\begin{aligned}
u_c(k_v) &= \sqrt{\left[\frac{\partial k_v}{\partial\phi_w}u_c(\phi_w)\right]^2 + \left[\frac{\partial k_v}{\partial\Delta\vartheta_{\log}}u_c(\Delta\vartheta_{\log})\right]^2} \\
&= \sqrt{\left[\frac{1}{\Delta\vartheta_{\log} \cdot A_v}u_c(\phi_w)\right]^2 + \left[-\frac{\phi_w}{\Delta\vartheta_{\log}^2 \cdot A_v}u_c(\Delta\vartheta_{\log})\right]^2} \quad (5-68)
\end{aligned}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost koeficijenta prijelaza topline $u_c(k_u)$ računa se na isti način, uz primjenu izmjenjivačke površine A_u .

Sastavljena mjerna nesigurnost koeficijenta prijelaza topline $\alpha_{p,w}$

Za izračun koeficijent prijelaza topline prilikom strujanja vode u spiralnoj cijevi koristi se proračunski model prema B. Slipčević [53]. Procjenjuje se da je širina intervala pouzdanosti koeficijenta prijelaza topline dobivenog tim proračunskim modelom $\pm 10 \%$ njegove vrijednosti.

Pretpostavljajući pravokutnu razdiobu, njegova nesigurnost iznosi

$$\frac{u(\alpha_{p,w})}{\alpha_{p,w}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \quad (5-69)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost koeficijenta prijelaza topline $\alpha_{s,w}$

Koeficijent prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi ($\alpha_{s,w}$) računa se kao

$$\alpha_{s,w} = \frac{1}{\frac{1}{k_v} - \frac{r_v}{r_u \cdot \alpha_{p,w}} - \frac{r_v}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u}} = \frac{1}{\frac{1}{k_v} - \frac{1,25}{\alpha_{p,w}} - 0,000067619} \quad (4-70)$$

Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti koeficijenta prolaza topline prikazan je sljedećom formulom

$$u_c(\alpha_{s,w}) = \sqrt{\left[\frac{\partial \alpha_{s,w}}{\partial k_v} u_c(k_v) \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha_{s,w}}{\partial \alpha_{p,w}} u(\alpha_{p,w}) \right]^2} \\ = \sqrt{\left[-\frac{1}{\left(\frac{1}{k_v} - \frac{1,25}{\alpha_{p,w}} - 0,000067619 \right)^2} \left(-\frac{1}{k_v^2} \right) u_c(k_v) \right]^2 + \left[-\frac{1}{\left(\frac{1}{k_v} - \frac{1,25}{\alpha_{p,w}} - 0,000067619 \right)^2} \left(\frac{1,25}{\alpha_{p,w}^2} \right) u(\alpha_{p,w}) \right]^2} \quad (5-71)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost koeficijenta prijelaza topline $\alpha_{p,p}$

Koeficijent prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare u spiralnoj cijevi računa se kao

$$\alpha_{p,p} = \frac{1}{\frac{1}{k_u} - \frac{r_u}{r_v \cdot \alpha_{s,w}} - \frac{r_u}{\lambda_c} \ln \frac{r_v}{r_u}} = \frac{1}{\frac{1}{k_u} - \frac{0,8}{\alpha_{s,w}} - 0,000054095} \quad (5-72)$$

Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti koeficijenta prolaza topline prikazan je sljedećom formulom

$$u_c(\alpha_{p,p}) = \sqrt{\left[\frac{\partial \alpha_{p,p}}{\partial k_u} u_c(k_u) \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha_{p,p}}{\partial \alpha_{s,w}} u(\alpha_{s,w}) \right]^2}$$

$$= \sqrt{\left[-\frac{1}{\left(\frac{1}{k_u} - \frac{0,8}{\alpha_{s,w}} - 0,000054095 \right)^2} \left(-\frac{1}{k_u^2} \right) u_c(k_u) \right]^2 + \left[-\frac{1}{\left(\frac{1}{k_u} - \frac{0,8}{\alpha_{s,w}} - 0,000054095 \right)^2} \left(\frac{0,8}{\alpha_{s,w}^2} \right) u(\alpha_{s,w}) \right]^2} \quad (5-73)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost temperature stijenke ϑ_s

Temperatura stijenke izračunava se prema sljedećoj formuli

$$\vartheta_s = \vartheta'_1 - \frac{\phi_x}{\alpha_{p,p} \cdot A_u} \quad (5-74)$$

Izračun sastavljene mjerne nesigurnosti temperature stijenke prikazan je sljedećom formulom

$$\begin{aligned}
u_c(\vartheta_s) &= \sqrt{\left[\frac{\partial \vartheta_s}{\partial \vartheta'_1} u_c(\vartheta'_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial \vartheta_s}{\partial \phi_x} u_c(\phi_x)\right]^2 + \left[\frac{\partial \vartheta_s}{\partial \alpha_{p,p}} u_c(\alpha_{p,p})\right]^2} \\
&= \sqrt{[u_c(\vartheta'_1)]^2 + \left[-\frac{1}{\alpha_{p,p} \cdot A_u} u_c(\phi_x)\right]^2 + \left[\frac{\phi_x}{\alpha_{p,p}^2 \cdot A_u} u_c(\alpha_{p,p})\right]^2}
\end{aligned} \tag{5-75}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost razlike temperatura $\Delta\vartheta_{ks}$

Temperaturne razlike između temperature kondenzacije i temperature stijenke ($\Delta\vartheta_{ks}$) izračunavaju se prema sljedećoj formuli

$$\Delta\vartheta_{ks} = \vartheta'_1 - \vartheta_s \tag{5-76}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ izračunava se prema izrazu

$$u_c(\Delta\vartheta_{ks}) = \sqrt{[u_c(\vartheta'_1)]^2 + [u_c(\vartheta_s)]^2} \tag{5-77}$$

Proširene sastavljene mjerna nesigurnost s faktorom prekrivanja $k = 2$ izračunavaju se prema sljedećem izrazu

$$U(\Delta\vartheta_{ks}) = k \cdot u_c(\Delta\vartheta_{ks}) = 2 \cdot u_c(\Delta\vartheta_{ks}) \tag{5-78}$$

Na temelju izračunatih proširenih sastavljenih mjernih nesigurnosti temperaturnih razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ izračunavaju se parametri utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova (ε) za svaku mjernu točku prema proračunskim modelima za horizontalne i vertikalne cijevi. Tako izračunati parametri se zatim uspoređuju s parametrima utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova prilikom kondenzacije vodene pare unutar spiralnih cijevi.

Vrijednosti sastavljenih mjernih nesigurnosti i proširenih sastavljenih mjernih nesigurnosti za sve mjerne točke prikazane su u sljedećim tablicama.

Tablica 28. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka A1

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
A1-1	0,000	0,94	10,58	0,536	1,073
A1-2	0,039	0,94	14,49	0,526	1,052
A1-3	0,070	0,94	14,81	0,517	1,034
A1-4	0,141	0,93	16,39	0,519	1,039
A1-5	0,212	0,93	16,87	0,520	1,041
A1-6	0,321	0,92	20,61	0,537	1,074

Tablica 29. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka A2

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
A2-1	0,000	2,42	8,13	0,588	1,177
A2-2	0,033	2,42	12,44	0,569	1,138
A2-3	0,060	2,42	13,54	0,564	1,129
A2-4	0,139	2,42	15,63	0,555	1,110
A2-5	0,227	2,41	16,89	0,552	1,104
A2-6	0,328	2,40	18,84	0,556	1,113

Tablica 30. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka A3

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
A3-1	0,000	3,87	11,50	0,603	1,207
A3-2	0,032	3,87	14,47	0,593	1,187
A3-3	0,056	3,87	15,66	0,585	1,171
A3-4	0,134	3,86	17,95	0,578	1,156
A3-5	0,230	3,86	19,62	0,571	1,141
A3-6	0,283	3,85	20,21	0,572	1,144

Tablica 31. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka B1

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
B1-1	0,000	0,96	11,58	0,484	0,969
B1-2	0,046	0,96	14,79	0,476	0,953
B1-3	0,089	0,96	15,61	0,474	0,949
B1-4	0,133	0,94	16,41	0,476	0,952
B1-5	0,198	0,94	16,71	0,481	0,963
B1-6	0,300	0,93	18,43	0,498	0,997

Tablica 32. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka B2

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
B2-1	0,000	2,40	10,81	0,513	1,026
B2-2	0,042	2,40	13,97	0,499	0,998
B2-3	0,076	2,40	15,61	0,495	0,989
B2-4	0,140	2,39	15,86	0,495	0,990
B2-5	0,215	2,39	16,43	0,496	0,992
B2-6	0,313	2,38	18,30	0,499	0,998

Tablica 33. Mjerne nesigurnosti i proširene mjerne nesigurnosti temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ za set mjernih točaka B3

Mjerna točka	x_z	p_{uk} [bar,g]	$\Delta\vartheta_{ks}$	$u_c(\Delta\vartheta_{ks})$	$U(\Delta\vartheta_{ks})$
B3-1	0,000	3,90	13,98	0,566	1,133
B3-2	0,032	3,90	17,29	0,552	1,103
B3-3	0,063	3,90	18,28	0,545	1,090
B3-4	0,144	3,89	20,75	0,535	1,070
B3-5	0,233	3,89	22,24	0,533	1,066
B3-6	0,316	3,88	23,07	0,535	1,070

Iz izračunatih mjernih nesigurnosti može se primijetiti da se s povećanjem masenog udjela zraka (x_z) kao nekondenzirajućeg plina mjerna nesigurnost temperaturne razlike $\Delta\vartheta_{ks}$ blago smanjuje. Nije primijećena ovisnost povećanja ili smanjenja tlaka s vrijednostima mjernih nesigurnosti temperaturnih razlika $\Delta\vartheta_{ks}$.

6. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Na početku ovog poglavlja prikazat će se rezultati izračuna kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao nekondenzirajućeg plina (NKP) prema proračunskim modelima kondenzacije u ravnim horizontalnim i vertikalnim cijevima koji predstavljaju druge konvencionalne izmjenjivačke površine. Zatim će se ti rezultati usporediti s rezultatima provedenog eksperimentalnog istraživanja kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka u spiralnim cijevima. Usporedbe se temelje na kvantifikaciji parametra negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare. Na kraju će se prikazati i omjeri parametara negativnog utjecaja kod spiralnih cijevi i kod ravnih horizontalnih, odnosno ravnih vertikalnih cijevi, s ciljem kvantitativne usporedbe negativnog utjecaja NKP kod spiralnih, odnosno horizontalnih i vertikalnih cijevi.

6.1. Rezultati proračunskih modela kondenzacije na konvencionalnim izmjenjivačkim površinama

Rezultati izračuna prema proračunskim modelima kondenzacije za druge konvencionalne izmjenjivačke površine potrebni su za provođenje usporedbe negativnog utjecaja prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama. Pod pojmom konvencionalne izmjenjivačke površine u ovom istraživanju se misli na horizontalne i vertikalne ravne izmjenjivačke cijevi. Izračun usporednih rezultata za horizontalne cijevi provodi se prema proračunskom modelu kondenzacije navedenom u radu autora B. Ren, L. Zhang, H. Xu, J. Cao i Z. Tao [42]. Izračun usporednih rezultata za vertikalne cijevi provodi se prema proračunskom modelu kondenzacije navedenom u radu autora K.-Y. Lee i M. H. Kim [41]. Detaljan opis modela te metodologija izračuna i usporedbe navedeni su poglavlju 4.

Sljedećim tablicama prikazane su vrijednosti rezultata izračuna prema navedenim modelima kondenzaciji unutar horizontalnih i vertikalnih cijevi. Izračunati parametri negativnog utjecaja NKP (ε) pri kondenzaciji unutar horizontalnih i vertikalnih cijevi usporedivi su s parametrima negativnog utjecaja NKP iz eksperimentalnog istraživanja kondenzacije unutar spiralnih cijevi jer su svedeni na isti temperaturni potencijal.

Koeficijenti prijelaza topline nisu usporedivi jer se pri svođenju na isti temperaturni potencijal proračunski prilagođavaju uvjeti strujanja rashladne vode na strani plašta izmjenjivača topline.

Tablica 34. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A1 za horizontalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A1-1	0,000	0,94	0,94	71,76	118,94	26,37
A1-2	0,039	0,94	0,89	64,34	118,70	26,50
A1-3	0,070	0,94	0,85	61,07	118,29	27,42
A1-4	0,141	0,93	0,75	58,41	118,93	27,69
A1-5	0,212	0,93	0,65	54,67	117,52	28,49
A1-6	0,321	0,92	0,48	49,74	117,96	28,86
<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A1-1	156,93	1,000	19801,55	2395,92	10,58	
A1-2	140,69	0,897	15271,78	1909,70	13,48	
A1-3	133,88	0,853	13851,23	1993,00	14,81	
A1-4	128,20	0,817	12252,00	2047,14	16,39	
A1-5	120,46	0,768	11278,02	2054,22	16,87	
A1-6	109,93	0,700	9692,27	2397,15	20,61	

Tablica 35. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A2 za horizontalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A2-1	0,000	2,42	2,42	87,68	137,97	33,98
A2-2	0,033	2,42	2,35	79,10	138,03	33,94
A2-3	0,060	2,42	2,29	76,93	137,85	33,93
A2-4	0,139	2,42	2,11	72,08	137,39	33,94
A2-5	0,227	2,41	1,88	67,28	136,58	33,92
A2-6	0,328	2,40	1,61	61,87	136,20	33,92
<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A2-1	127,98	1,000	20620,46	1864,72	8,13	
A2-2	115,51	0,903	15411,72	1729,58	12,44	
A2-3	112,48	0,879	14147,34	1763,22	13,54	
A2-4	105,70	0,826	12284,51	1849,74	15,63	
A2-5	99,07	0,774	11125,43	1903,72	16,89	
A2-6	91,62	0,716	10026,04	2033,39	18,84	

Tablica 36. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A3 za horizontalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A3-1	0,000	3,87	3,87	95,59	150,56	40,20
A3-2	0,032	3,87	3,77	85,82	150,95	40,22
A3-3	0,056	3,87	3,70	83,20	150,49	40,21
A3-4	0,134	3,86	3,43	78,24	150,43	40,23
A3-5	0,230	3,86	3,10	72,04	149,27	40,16
A3-6	0,283	3,85	2,90	69,03	148,86	40,23
<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A3-1	182,36	1,000	20141,97	2378,35	11,50	
A3-2	164,59	0,898	14395,33	1892,45	14,47	
A3-3	160,27	0,871	13261,84	1923,93	15,66	
A3-4	150,62	0,822	11522,76	1994,49	17,95	
A3-5	141,17	0,761	10313,85	2060,50	19,62	
A3-6	130,56	0,731	9813,25	2083,03	20,21	

Tablica 37. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B1 za horizontalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B1-1	0,000	0,96	0,96	60,06	119,39	40,16
B1-2	0,046	0,96	0,90	51,35	119,30	40,17
B1-3	0,089	0,96	0,85	48,65	118,52	40,18
B1-4	0,133	0,94	0,77	46,54	118,15	40,18
B1-5	0,198	0,94	0,68	44,27	117,90	40,16
B1-6	0,300	0,93	0,52	40,67	118,27	40,18
<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B1-1	148,56	1,000	16694,27	2709,67	11,58	
B1-2	127,21	0,856	11845,71	2159,58	14,79	
B1-3	120,77	0,813	10608,22	2157,68	15,61	
B1-4	115,70	0,779	9799,69	2189,52	16,41	
B1-5	110,32	0,743	9060,69	2163,85	16,71	
B1-6	101,63	0,684	8021,11	2300,11	18,43	

Tablica 38. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B2 za horizontalne cijevi

	<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>					
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B2-1	0,000	2,40	2,40	71,72	137,65	49,34
B2-2	0,042	2,40	2,31	62,22	137,39	49,45
B2-3	0,076	2,40	2,23	60,00	137,58	49,52
B2-4	0,140	2,39	2,08	57,31	137,36	49,48
B2-5	0,215	2,39	1,90	53,94	136,85	49,54
B2-6	0,313	2,38	1,63	48,29	135,64	49,51
	<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B2-1	145,18	1,000	16796,05	2592,43	10,81	
B2-2	126,14	0,869	11505,14	2068,07	13,97	
B2-3	121,74	0,839	10415,23	2164,75	15,61	
B2-4	116,55	0,803	9454,87	2094,45	15,86	
B2-5	110,05	0,758	8662,62	2099,58	16,43	
B2-6	99,09	0,683	7666,36	2275,20	18,30	

Tablica 39. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B3 za horizontalne cijevi

	<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>					
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B3-1	0,000	3,90	3,90	85,54	151,00	52,46
B3-2	0,032	3,90	3,80	73,76	150,83	52,37
B3-3	0,063	3,90	3,70	70,84	150,32	52,46
B3-4	0,144	3,89	3,43	65,11	149,73	52,64
B3-5	0,233	3,89	3,11	60,39	149,61	52,62
B3-6	0,316	3,88	2,79	55,89	149,11	52,68
	<i>Horizontalne cijevi - toplinski parametri</i>					
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B3-1	202,39	1,000	18004,38	3100,35	13,98	
B3-2	175,85	0,864	12193,94	2320,61	17,29	
B3-3	169,71	0,831	11019,68	2308,96	18,28	
B3-4	162,48	0,766	9417,23	2437,17	20,75	
B3-5	153,42	0,713	8424,32	2514,25	22,24	
B3-6	138,13	0,663	7709,88	2566,06	23,07	

Tablica 40. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A1 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A1-1	0,000	0,94	0,94	71,76	118,94	26,37
A1-2	0,039	0,94	0,89	69,85	118,70	26,50
A1-3	0,070	0,94	0,85	66,33	118,29	27,42
A1-4	0,141	0,93	0,75	62,56	118,93	27,69
A1-5	0,212	0,93	0,65	57,90	117,52	28,49
A1-6	0,321	0,92	0,48	51,39	117,96	28,86
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A1-1	238,06	1,000	22504,98	4289,77	10,58	
A1-2	231,87	0,974	19450,36	5185,95	13,48	
A1-3	220,93	0,928	17206,10	5332,91	14,81	
A1-4	208,47	0,876	13762,99	4836,06	16,39	
A1-5	193,84	0,814	11586,29	4306,79	16,87	
A1-6	172,67	0,725	8913,72	4685,93	20,61	

Tablica 41. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A2 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A2-1	0,000	2,42	2,42	87,68	137,97	33,98
A2-2	0,033	2,42	2,35	85,67	138,03	33,94
A2-3	0,060	2,42	2,29	83,14	137,85	33,93
A2-4	0,139	2,42	2,11	77,12	137,39	33,94
A2-5	0,227	2,41	1,88	71,28	136,58	33,92
A2-6	0,328	2,40	1,61	64,78	136,20	33,92
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A2-1	175,71	1,000	21589,09	2373,74	8,13	
A2-2	171,72	0,977	19350,70	3896,14	12,44	
A2-3	166,90	0,950	17143,25	3848,26	13,54	
A2-4	155,45	0,885	13398,74	3662,95	15,63	
A2-5	144,13	0,820	10893,36	3370,01	16,89	
A2-6	131,66	0,749	8788,51	3268,54	18,84	

Tablica 42. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka A3 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
A3-1	0,000	3,87	3,87	92,06	150,56	40,20
A3-2	0,032	3,87	3,77	90,23	150,95	40,22
A3-3	0,056	3,87	3,70	87,68	150,49	40,21
A3-4	0,134	3,86	3,43	81,58	150,43	40,23
A3-5	0,230	3,86	3,10	74,20	149,27	40,16
A3-6	0,283	3,85	2,90	70,55	148,86	40,23
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
A3-1	232,59	1,000	20229,53	3435,64	11,50	
A3-2	228,05	0,980	18322,31	4135,81	14,47	
A3-3	221,40	0,952	16467,26	4134,84	15,66	
A3-4	206,92	0,890	12955,31	3940,81	17,95	
A3-5	189,35	0,814	10345,33	3693,16	19,62	
A3-6	180,67	0,777	9247,15	3518,24	20,21	

Tablica 43. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B1 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B1-1	0,000	0,96	0,96	60,06	119,39	40,16
B1-2	0,046	0,96	0,90	56,97	119,30	40,17
B1-3	0,089	0,96	0,85	53,44	118,52	40,18
B1-4	0,133	0,94	0,77	50,70	118,15	40,18
B1-5	0,198	0,94	0,68	47,49	117,90	40,16
B1-6	0,300	0,93	0,52	42,67	118,27	40,18
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B1-1	241,75	1,000	20891,79	5691,79	11,58	
B1-2	229,31	0,949	17479,23	6894,16	14,79	
B1-3	215,88	0,893	14862,95	6397,17	15,61	
B1-4	204,91	0,848	12977,44	6052,05	16,41	
B1-5	192,49	0,796	10992,47	5231,29	16,71	
B1-6	173,63	0,718	8636,47	4860,28	18,43	

Tablica 44. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B2 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B2-1	0,000	2,40	2,40	71,72	137,65	49,34
B2-2	0,042	2,40	2,31	68,64	137,39	49,45
B2-3	0,076	2,40	2,23	66,02	137,58	49,52
B2-4	0,140	2,39	2,08	62,09	137,36	49,48
B2-5	0,215	2,39	1,90	57,75	136,85	49,54
B2-6	0,313	2,38	1,63	51,08	135,64	49,51
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B2-1	215,36	1,000	19925,35	4175,36	10,81	
B2-2	206,27	0,958	17106,76	5171,81	13,97	
B2-3	198,60	0,922	14904,19	5250,82	15,61	
B2-4	187,34	0,870	12372,45	4453,84	15,86	
B2-5	174,82	0,812	10323,23	3944,39	16,43	
B2-6	155,55	0,722	8258,07	3934,04	18,30	

Tablica 45. Vrijednosti veličina u setu usporednih točaka B3 za vertikalne cijevi

<i>Ulazne vrijednosti za proračunske modele</i>						
<i>Mj. točka</i>	x_z -	p_{uk} bar,g	p' bar,g	$q_{m,k}/A_p$ kg/(m ² s)	ϑ_1 °C	ϑ_3 °C
B3-1	0,000	3,90	3,90	85,54	151,00	52,46
B3-2	0,032	3,90	3,80	82,77	150,83	52,37
B3-3	0,063	3,90	3,70	79,31	150,32	52,46
B3-4	0,144	3,89	3,43	71,98	149,73	52,64
B3-5	0,233	3,89	3,11	65,48	149,61	52,62
B3-6	0,316	3,88	2,79	59,54	149,11	52,68
<i>Vertikalne cijevi - toplinski parametri</i>						
<i>Mj. točka</i>	q_0 / x kW/m ²	ε -	$\alpha_{p,p}$ W/(m ² K)	$\alpha_{s,w}$ W/(m ² K)	$\Delta\vartheta_{ks}$ °C	
B3-1	275,47	1,000	19799,28	5059,72	13,98	
B3-2	267,33	0,970	17614,47	5949,53	17,29	
B3-3	255,77	0,928	15436,52	5707,10	18,28	
B3-4	233,18	0,846	12072,71	5496,04	20,75	
B3-5	213,15	0,774	9732,82	5102,81	22,24	
B3-6	194,89	0,707	8110,27	4737,66	23,07	

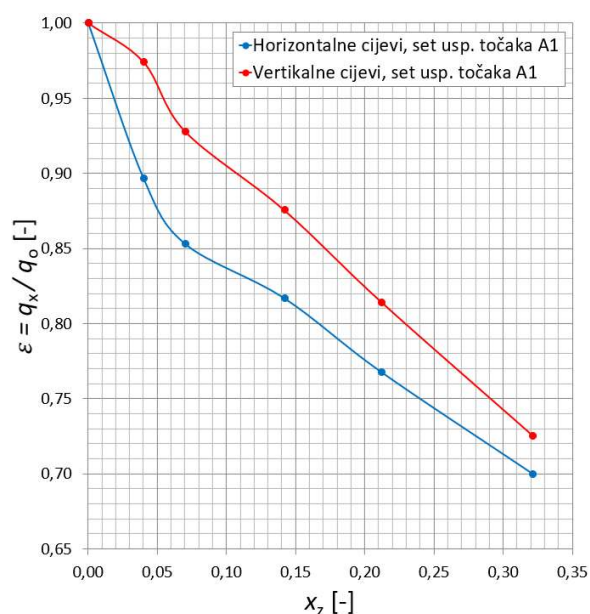
Sljedećim tablicama i slikama zajednički su prikazani rezultati izračuna parametara negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP pri kondenzaciji pare unutar horizontalnih i vertikalnih cijevi.

Tablica 46. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A1

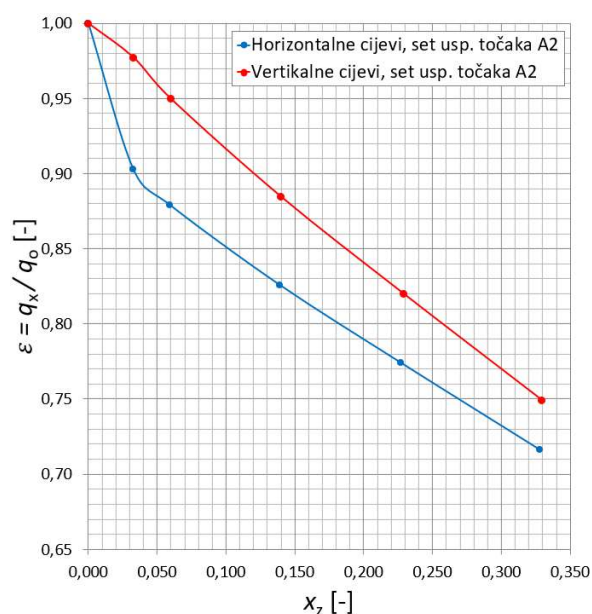
		<i>horizontalne cijevi</i>	<i>vertikalne cijevi</i>
<i>Usporedna točka</i>	x_z	ε	ε
A1-1	0,000	1,000	1,000
A1-2	0,039	0,897	0,974
A1-3	0,070	0,853	0,928
A1-4	0,141	0,817	0,876
A1-5	0,212	0,768	0,814
A1-6	0,321	0,700	0,725

Tablica 47. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A2

		<i>horizontalne cijevi</i>	<i>vertikalne cijevi</i>
<i>Usporedna točka</i>	x_z	ε	ε
A2-1	0,000	1,000	1,000
A2-2	0,033	0,903	0,977
A2-3	0,060	0,879	0,950
A2-4	0,139	0,826	0,885
A2-5	0,227	0,774	0,820
A2-6	0,328	0,716	0,749



Slika 61. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka A1



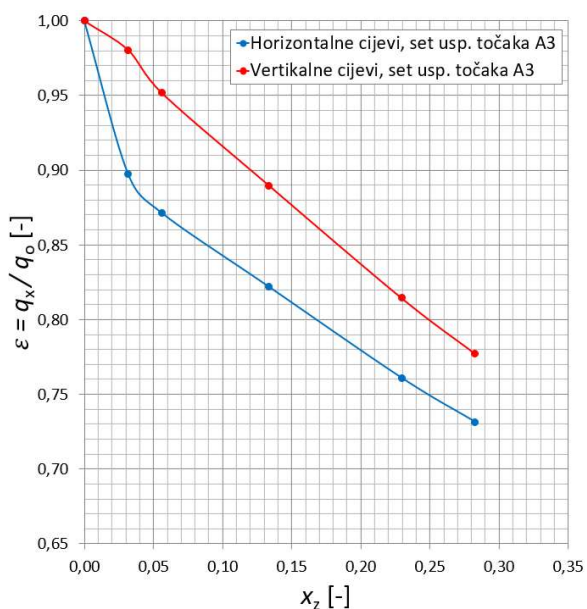
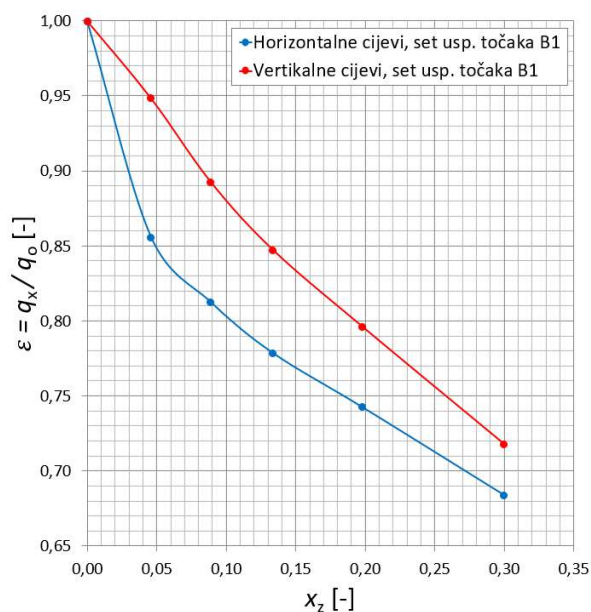
Slika 62. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka A2

Tablica 48. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka A3

		horizontalne cijevi	vertikalne cijevi
Usporedna točka	x_z	ε	ε
A3-1	0,000	1,000	1,000
A3-2	0,032	0,898	0,980
A3-3	0,056	0,871	0,952
A3-4	0,134	0,822	0,890
A3-5	0,230	0,761	0,814
A3-6	0,283	0,731	0,777

Tablica 49. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B1

		horizontalne cijevi	vertikalne cijevi
Usporedna točka	x_z	ε	ε
B1-1	0,000	1,000	1,000
B1-2	0,046	0,856	0,949
B1-3	0,089	0,813	0,893
B1-4	0,133	0,779	0,848
B1-5	0,198	0,743	0,796
B1-6	0,300	0,684	0,718

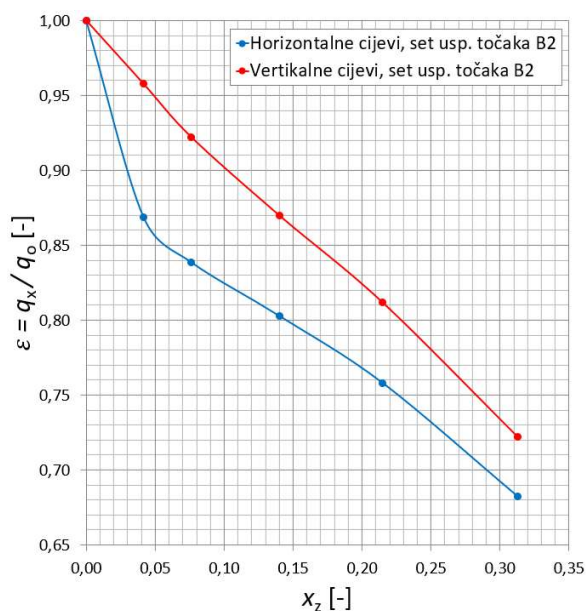
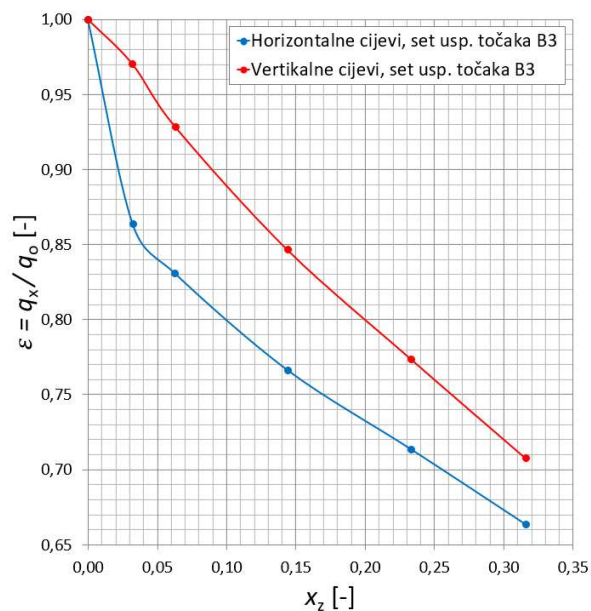
Slika 63. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka A3Slika 64. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka B1

Tablica 50. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B2

		horizontalne cijevi	vertikalne cijevi
Usporedna točka	x_z	ε	ε
B2-1	0,000	1,000	1,000
B2-2	0,042	0,869	0,958
B2-3	0,076	0,839	0,922
B2-4	0,140	0,803	0,870
B2-5	0,215	0,758	0,812
B2-6	0,313	0,683	0,722

Tablica 51. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set usporednih točaka B3

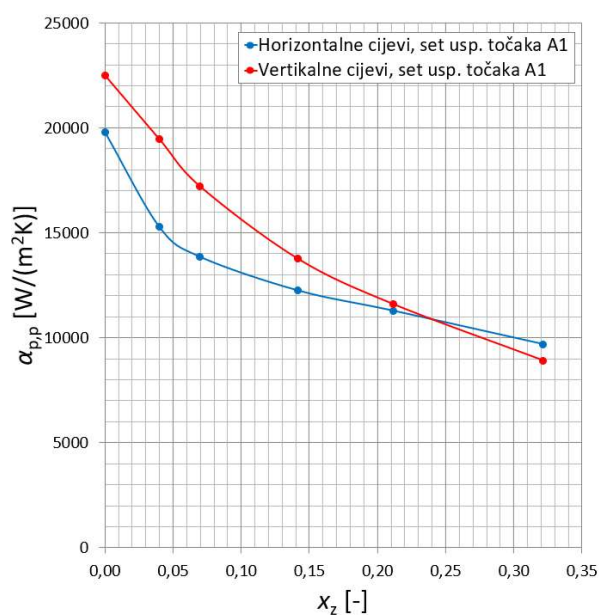
		horizontalne cijevi	vertikalne cijevi
Usporedna točka	x_z	ε	ε
B3-1	0,000	1,000	1,000
B3-2	0,032	0,864	0,970
B3-3	0,063	0,831	0,928
B3-4	0,144	0,766	0,846
B3-5	0,233	0,713	0,774
B3-6	0,316	0,663	0,707

Slika 65. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka B2Slika 66. Negativni utjecaji (ε)
u setu usporednih točaka B3

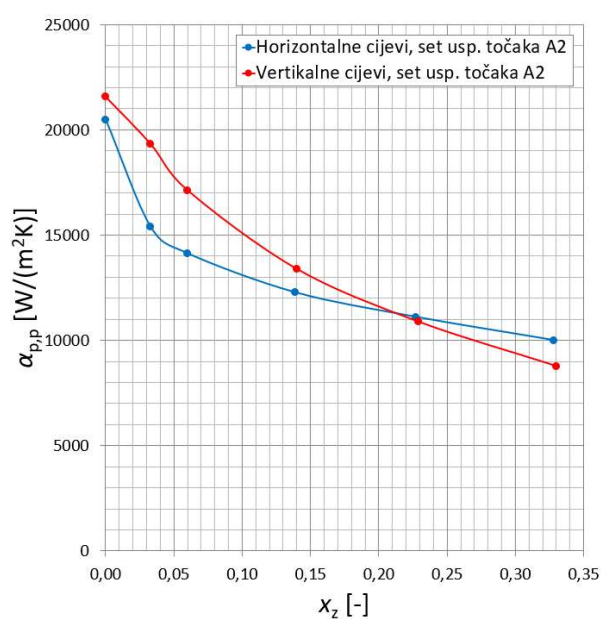
Iz prethodnih tablica i slika vidljivo je kako s povećanjem masenog udjela zraka (x_z) vrijednosti negativnog utjecaja (ε) padaju, odnosno negativni utjecaji nekondenzirajućih plinova su sve veći. Također, vidljivo je da je u svim usporednim točkama negativni utjecaj kod horizontalnih cijevi veći nego kod vertikalnih cijevi. Razlog navedenom je upravo orijentacija izmjenjivačkih cijevi. Pri vertikalnim cijevima gravitacija pospješuje odvođenje sloja kondenzata te sudjeluje u kidanju sloja nakupljenog zraka koji uzrokuje smanjenje parcijalnog tlaka vodene pare, odnosno temperature kondenzacije vodene pare.

Slikama 67 do 72 prikazane su ovisnosti izračunatih koeficijenata prijelaza topline ($\alpha_{p,p}$) prilikom kondenzacije vodene pare u horizontalnim i vertikalnim cijevima o masenim udjelima zraka (x_z) kao nekondenzirajućeg plina. Povećanjem masenog udjela zraka koeficijenti prijelaza topline se smanjuju. Vidljivo je da se pri kondenzaciji vodene pare u vertikalnim cijevima uz prisutnost manjih masenih udjela zraka postižu viši koeficijenti prijelaza topline nego pri kondenzaciji u horizontalnim cijevima. Povećanjem masenih udjela zraka navedena razlika koeficijenata prijelaza topline između vertikalnih i horizontalnih cijevi se značajno smanjuje. U usporednim točkama A1, A2 i A3 vidljivo je da se nakon određenog masenog udjela zraka postižu veći koeficijenti prijelaza topline kod horizontalnih nego kod vertikalnih izmjenjivačkih cijevi. Povećanjem masenog udjela zraka, nakupljeni sloj zraka se sve više podebljava te gravitacijske sile više nemaju toliki utjecaj na kidanje graničnog sloga kao u slučaju manjih masenih udjela. U tom slučaju odvođenje kondenzata uglavnom uzrokuju smične sile koje se javljaju između kondenzata i pare uslijed strujanja pa orijentacija cijevi nema značajnu ulogu na vrijednosti koeficijenata prijelaza topline koji se javljaju pri kondenzaciji vodene pare uz prisutnost NKP.

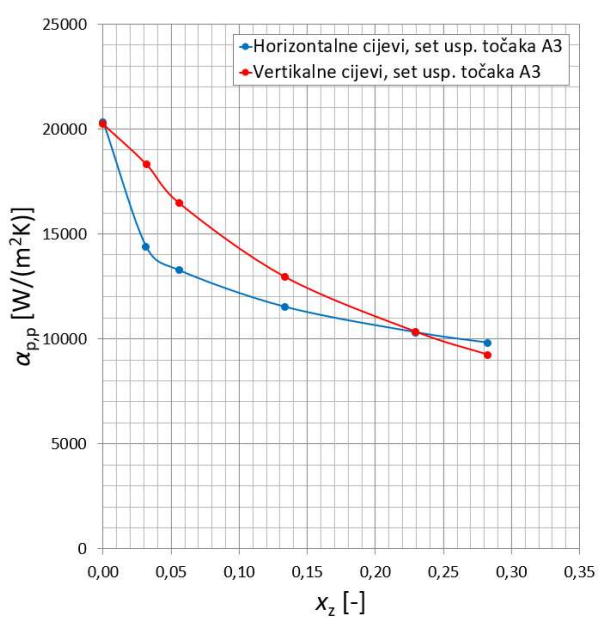
Opisani efekti utjecaja udjela prisutnosti NKP na koeficijente prijelaza topline pri kondenzaciji vodene pare u horizontalnim i vertikalnim cijevima primjećuje se i kod utjecaja na parametar negativnog utjecaja (ε) na slikama 61 do 66. Vidljivo je kako su pri kondenzaciji vodene pare u vertikalnim cijevima uz prisutnost manjih masenih udjela zraka negativni utjecaji prisutnosti NKP manji nego pri kondenzaciji u horizontalnim cijevima. Na većim masenim udjelima zraka navedena razlika u negativnim utjecajima kod vertikalnih i horizontalnih cijevi se značajno smanjuje zbog prethodno opisanih efekata.



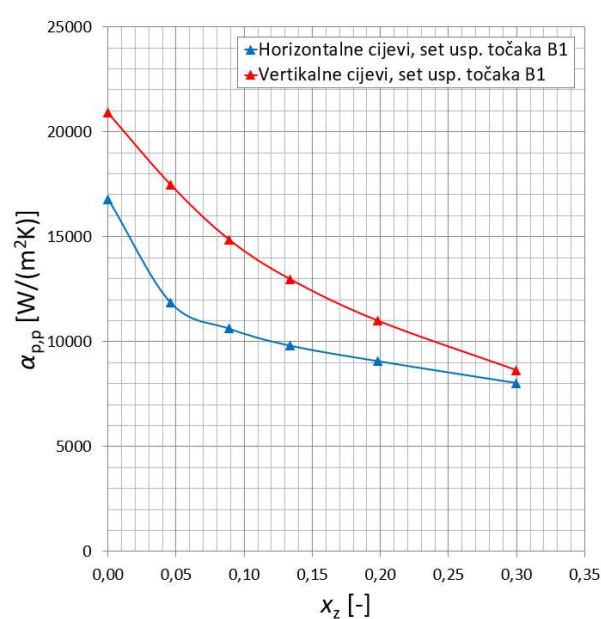
Slika 67. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka A1



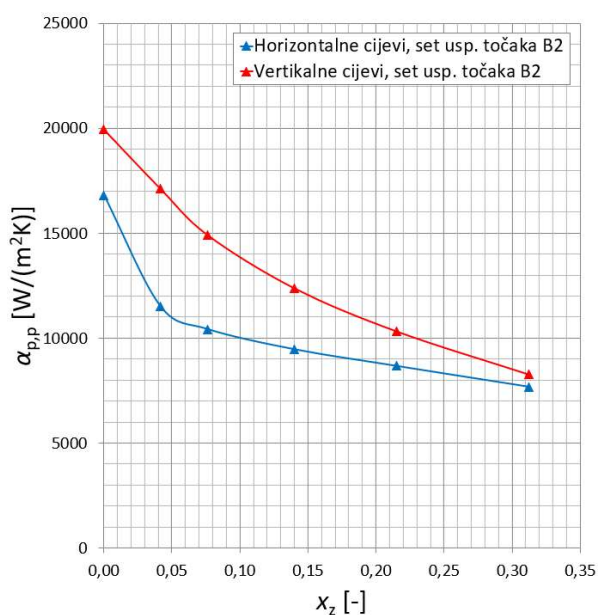
Slika 68. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka A2



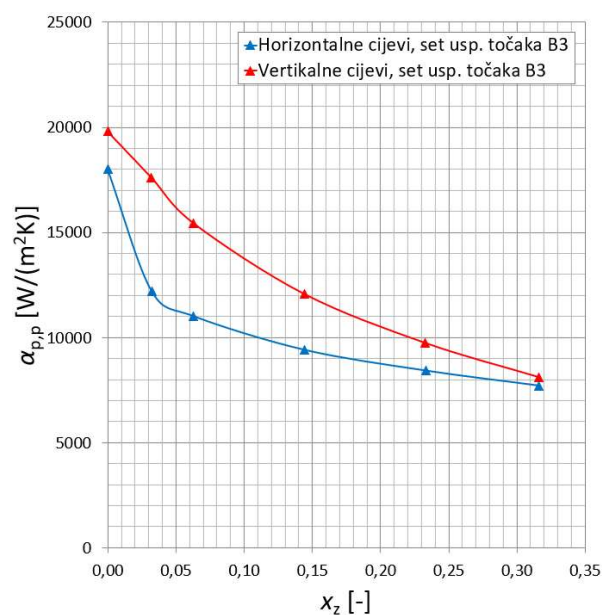
Slika 69. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka A3



Slika 70. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka B1



Slika 71. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka B2



Slika 72. Koeficijenti prijelaza topline
u setu usporednih točaka B3

Izračunate i u ovom potpoglavlju prikazane vrijednosti negativnog utjecaja prisutnosti zraka kao NKP na kondenzaciju u horizontalnim i vertikalnim izmjenjivačkim cijevima se u sljedećem potpoglavlju uspoređuju s rezultatima eksperimentalnog istraživanja kondenzacije uz prisutnost NKP u spiralnim cijevima. Da bi rezultati bili usporedivi, prilikom izračuna prema proračunskim modelima za horizontalne i vertikalne cijevi, ulaznim proračunskim podacima osigurani su uvjeti jednakosti na strani pare i na strani vode za svaku točku usporedbe. Jednakost uvjeta osigurava se izjednačavanjem Reynoldsovih značajki vodene pare, temperatura kondenzacije te temperaturnih potencijala, odnosno temperaturnih razlika između temperatura kondenzacije i temperatura stijenki cijevi. Navedeni temperaturni potencijal ima značajnu ulogu u usporedbi jer značajno utječe na vrijednosti negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP pa se njegovom jednakošću osiguravaju isti uvjeti, odnosno jednaki potencijal za kondenzaciju.

6.2. Rezultati usporedbe negativnih utjecaja NKP

Usporedba rezultata provedenog eksperimentalnog istraživanja s rezultatima proračunskih modela temelji se na usporedbi parametara negativnog utjecaja (ε) prisutnosti nekondenzirajućih plinova (NKP) na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s parametrima negativnog utjecaja izračunatih za druge konvencionalne izmjenjivačke površine. Parametar negativnog utjecaja (ε) definira se kao omjer srednje gustoće toplinskog toka pri određenom masenom udjelu NKP i srednje gustoće toplinskog toka bez prisutnosti NKP. Parametri negativnog utjecaja prisutnosti NKP u spiralnim cijevima izračunavaju se na temelju rezultata eksperimentalnog istraživanja na razvijenoj mjernoj liniji, a sve prema metodologiji opisanoj u poglavlju 4. Parametri negativnog utjecaja prisutnosti NKP kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina izračunavaju se pomoću proračunskih modela opisanih u potpoglavlju 4.4.

Tablicama 52 do 57 prikazani su zbirni rezultati izračuna parametara negativnog utjecaja (ε) pri kondenzaciji unutar spiralnih, horizontalnih i vertikalnih cijevi. Uz izračunate vrijednosti navedene su i granice intervala pouzdanosti izračuna pojedinih vrijednosti. Granice intervala pouzdanosti izračunatih vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) kod spiralnih cijevi definiraju proširene sastavljene mjerne nesigurnosti ($k = 2$) izračunate u potpoglavlju 5.3.1. Granice intervala pouzdanosti izračunatih vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) kod horizontalnih i vertikalnih cijevi definiraju proširene sastavljene mjerne nesigurnosti temperaturnih razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ izračunate u potpoglavlju 5.3.2 te netočnosti proračunskih modela. Gornja granica intervala kod horizontalnih i vertikalnih cijevi definira se izračunom vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) uz korištenje maksimalne vrijednosti temperaturnih razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ uzimajući u obzir izračunate proširene sastavljene mjerne nesigurnosti. Tako izračunate vrijednosti se zatim dodatno uvećavaju za netočnosti proračunskog modela, odnosno netočnosti izračuna parametara negativnog utjecaja (ε). Na sličan način se definira i donja granica intervala. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) izračunava se uz korištenje minimalne vrijednosti temperaturnih razlika $\Delta\vartheta_{ks}$ uzimajući u obzir izračunate proširene sastavljene mjerne nesigurnosti. Vrijednosti se zatim dodatno umanjuju za netočnosti izračuna parametra negativnog utjecaja (ε) preko proračunskih modela.

Kako u proračunskim modelima za izračun kondenzacije u horizontalnim i vertikalnim cijevima nisu navedene proširene sastavljene mjerne nesigurnosti, prethodno navedena netočnost proračunskih modela, odnosno netočnost izračuna parametara negativnog utjecaja (ε), se procjenjuje. Procjena se temelji na pretpostavci da su pri kondenzaciji koeficijenti prijelaza topline određeni proračunskim modelima za horizontalne i vertikalne cijevi unutar ± 15 % njegovih vrijednosti. S obzirom da se vrijednosti koeficijenata prijelaza topline pri kondenzaciji kreću u rasponu od 8000 do 24000 W/(m² K), što je značajno više od vrijednosti koeficijenata prijelaza topline pri prisilnoj konvekciji rashladne vode oko cijevi, može se zaključiti da utjecaj netočnosti proračunskog modela ne utječe značajno na vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε). Analizom proračunskih modela utvrđeno je da je taj utjecaj maksimalno $\pm 2,5$ %. Također, prema potpoglavlju 5.3.2, proširene sastavljene mjerne nesigurnosti izračuna parametara negativnog utjecaja (ε) kod spiralnih cijevi na temelju eksperimentalnih istraživanja se kreću u granicama od 1,43 do 2,32 %. Uzimajući u obzir navedeno, usvaja se da netočnost izračuna parametara negativnog utjecaja (ε) preko proračunskih modela za horizontalne i vertikalne cijevi ne prelazi granice $\pm 2,5$ %.

Prethodno navedeni način definiranja granica intervala pouzdanosti parametara negativnog utjecaja (ε) NKP kod spiralnih cijevi prikazan je sljedećim izrazima

$$\varepsilon_{\text{spir(max)}} = \varepsilon_{\text{spir}} + U(\varepsilon_{\text{spir}}) \quad (6-1)$$

$$\varepsilon_{\text{spir(min)}} = \varepsilon_{\text{spir}} - U(\varepsilon_{\text{spir}}) \quad (6-2)$$

Prethodno navedeni način definiranja granica intervala pouzdanosti parametara negativnog utjecaja (ε) NKP kod horizontalnih i vertikalnih cijevi prikazan je sljedećim izrazima

$$\Delta\vartheta_{\text{ks(max)}} = \Delta\vartheta_{\text{ks}} + U(\Delta\vartheta_{\text{ks}}) \quad (6-3)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{ks(min)}} = \Delta\vartheta_{\text{ks}} - U(\Delta\vartheta_{\text{ks}}) \quad (6-4)$$

$$\varepsilon_{\text{horiz/vert(max)}} = \varepsilon_{\text{horiz/vert}(\Delta\vartheta_{\text{ks(max)}}) \cdot 1,025 \quad (6-5)$$

$$\varepsilon_{\text{horiz/vert(min)}} = \varepsilon_{\text{horiz/vert}(\Delta\vartheta_{\text{ks(min)}}) \cdot 0,975 \quad (6-6)$$

Tablica 52. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A1

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
A1-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
A1-2	0,039	0,935	0,954	0,971	0,868	0,897	0,925	0,948	0,974	-
A1-3	0,070	0,905	0,922	0,940	0,825	0,853	0,881	0,902	0,928	0,955
A1-4	0,141	0,890	0,908	0,925	0,790	0,817	0,844	0,848	0,876	0,903
A1-5	0,212	0,859	0,877	0,894	0,742	0,768	0,794	0,787	0,814	0,842
A1-6	0,321	0,808	0,826	0,843	0,675	0,700	0,725	0,699	0,725	0,753

Tablica 53. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A2

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
A2-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
A2-2	0,033	0,934	0,949	0,963	0,875	0,903	0,931	0,952	0,977	-
A2-3	0,060	0,921	0,936	0,951	0,852	0,879	0,908	0,923	0,950	0,976
A2-4	0,139	0,890	0,904	0,919	0,800	0,826	0,857	0,858	0,885	0,912
A2-5	0,227	0,865	0,879	0,893	0,749	0,774	0,804	0,794	0,820	0,847
A2-6	0,328	0,841	0,855	0,869	0,690	0,716	0,743	0,723	0,749	0,776

Tablica 54. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka A3

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
A3-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
A3-2	0,032	0,961	0,975	0,989	0,869	0,898	0,927	0,955	0,980	-
A3-3	0,056	0,939	0,953	0,967	0,843	0,871	0,900	0,926	0,952	0,978
A3-4	0,134	0,917	0,930	0,944	0,794	0,822	0,850	0,863	0,890	0,916
A3-5	0,230	0,888	0,901	0,915	0,734	0,761	0,788	0,788	0,814	0,841
A3-6	0,283	0,881	0,895	0,909	0,705	0,731	0,758	0,751	0,777	0,803

Tablica 55. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B1

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
B1-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
B1-2	0,046	0,919	0,940	0,960	0,829	0,856	0,885	0,922	0,949	0,975
B1-3	0,089	0,899	0,920	0,940	0,786	0,813	0,841	0,866	0,893	0,920
B1-4	0,133	0,880	0,900	0,921	0,752	0,779	0,809	0,821	0,848	0,875
B1-5	0,198	0,873	0,893	0,914	0,716	0,743	0,773	0,769	0,796	0,824
B1-6	0,300	0,853	0,873	0,894	0,656	0,684	0,712	0,691	0,718	0,746

Tablica 56. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B2

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
B2-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
B2-2	0,042	0,926	0,943	0,960	0,841	0,869	0,898	0,932	0,958	0,984
B2-3	0,076	0,904	0,921	0,938	0,811	0,839	0,867	0,896	0,922	0,949
B2-4	0,140	0,899	0,916	0,933	0,776	0,803	0,834	0,843	0,870	0,897
B2-5	0,215	0,887	0,904	0,921	0,732	0,758	0,788	0,785	0,812	0,839
B2-6	0,313	0,850	0,867	0,884	0,657	0,683	0,710	0,696	0,722	0,749

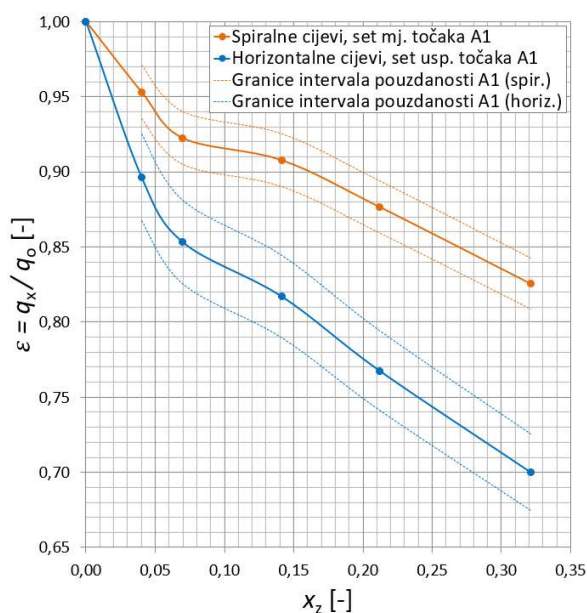
Tablica 57. Vrijednosti parametara negativnog utjecaja (ε) za set mjernih točaka B3

		<i>spiralne cijevi</i>			<i>horizontalne cijevi</i>			<i>vertikalne cijevi</i>		
<i>Usporedna točka</i>	x_z	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{spir}}$	$\varepsilon_{\text{spir}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{horiz}}$	$\varepsilon_{\text{horiz}}$ (max)	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (min)	$\varepsilon_{\text{vert}}$	$\varepsilon_{\text{vert}}$ (max)
B3-1	0,000	-	1,000	-	-	1,000	-	-	1,000	-
B3-2	0,032	0,939	0,954	0,969	0,835	0,864	0,892	0,947	0,970	0,994
B3-3	0,063	0,919	0,934	0,949	0,802	0,831	0,859	0,904	0,928	0,953
B3-4	0,144	0,879	0,893	0,908	0,739	0,766	0,794	0,822	0,846	0,871
B3-5	0,233	0,856	0,870	0,885	0,687	0,713	0,740	0,749	0,774	0,799
B3-6	0,316	0,837	0,851	0,865	0,638	0,663	0,689	0,683	0,707	0,732

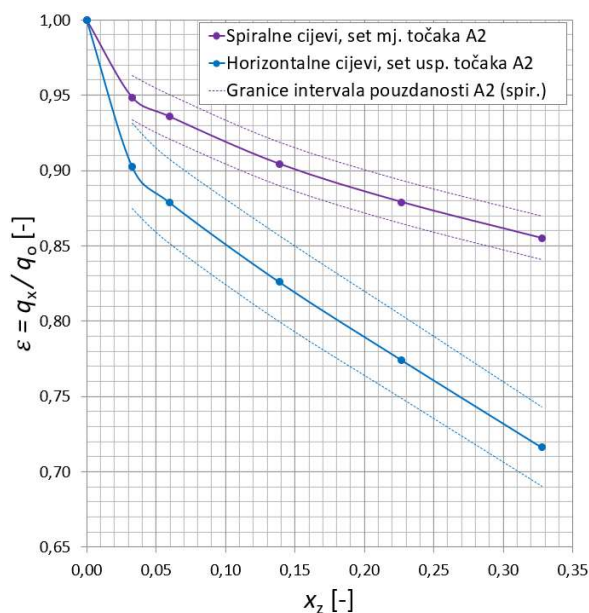
Slike 73 do 78 u nastavku prikazuju usporedbe spiralnih i horizontalnih izmjenjivačkih cijevi pri kondenzaciji vodene pare uz prisutnost zraka kao NKP. Analiza se temelji na usporedbama parametara negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s parametrima negativnog utjecaja izračunatih za horizontalne cijevi. Parametri negativnog utjecaja (ε) prikazuju se u ovisnosti o masenom udjelu zraka (x_z). Uz izračunate vrijednosti prikazane su i granice intervala pouzdanosti izračuna pojedinih vrijednosti. Vrijednosti mjernih i usporednih točaka te pripadajuće granice intervala pouzdanosti mogu se očitati iz Tablica 52 do 57.

Iz sljedećih slika vidljivo je da su u svim mjernim i usporednim točkama negativni utjecaji prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare kod spiralnih cijevi manji u odnosu na one kod horizontalnih cijevi. Također, vidljivo je kako u svim točkama s masenim udjelima zraka većim od 3,5 % ne dolazi do preklapanja granica intervala pouzdanosti. Na manjim masenim udjelima zraka dolazi do preklapanja navedenih granica intervala, što znači da s manjom vjerojatnošću možemo biti sigurni da su u tom području negativni utjecaji NKP kod spiralnih cijevi manji u odnosu na one kod horizontalnih cijevi.

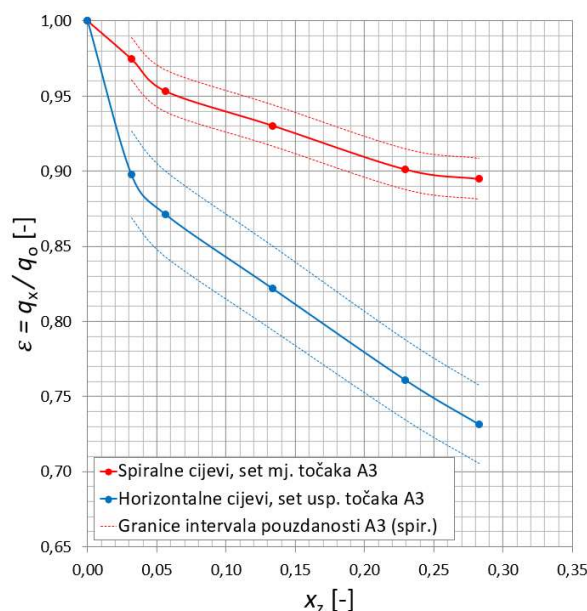
Razlog manjih negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova pri kondenzaciji u spiralnim cijevima je upravo spiralna geometrija cijevi. Zbog same geometrije spiralne cijevi, prilikom prisilnog strujanja radnog medija kroz njih, javljaju se centrifugalne sile. Centrifugalne sile uzrokuju pojavu sekundarnih strujanja koja djeluju u ravnini okomitoj na smjer glavnog strujanja smjese vodene pare, zraka i kondenzata. Sekundarna strujanja se teoretski sastoje od asimetričnih vrtloga različitih u veličini koji vrtloženjem radnog medija djeluju na sloj kondenzata, sloj nakupljenog zraka te plinoviti granični sloj. Sloj kondenzata i plinoviti granični sloj se stanjuju i kidaju što omogućuje svježoj vodenoj pari olakšan put do stijenke izmjenjivačke cijevi. Također, sloj zraka kao nekondenzirajućeg plina koji ima tendenciju nakupljanja na međupovršini između kondenzata i pare se neprestano kida i raznosi po presjeku cijevi. Navedeno osigurava manje parcijalne tlakove zraka koji se nalazi na površini kondenzacije, odnosno veće parcijalne tlakove vodene pare koja kondenzira na višim temperaturama kondenzacije. Sve navedeno ima za posljedicu bolje prijelaze topline odnosno veće izmijenjene toplinske tokove.



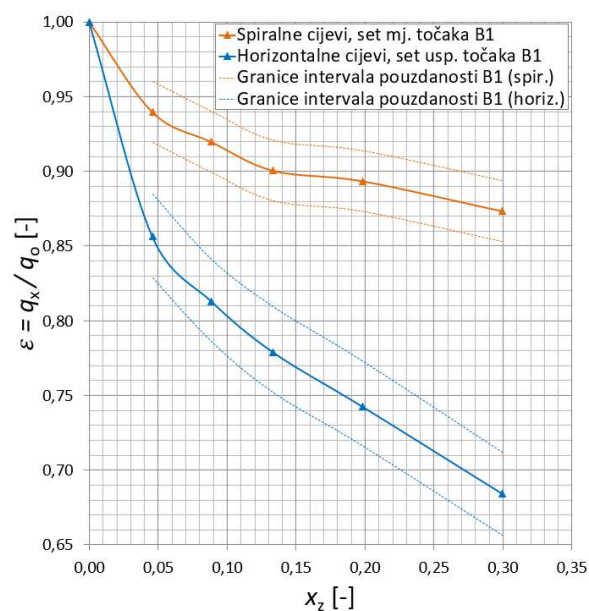
Slika 73. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točkaka A1



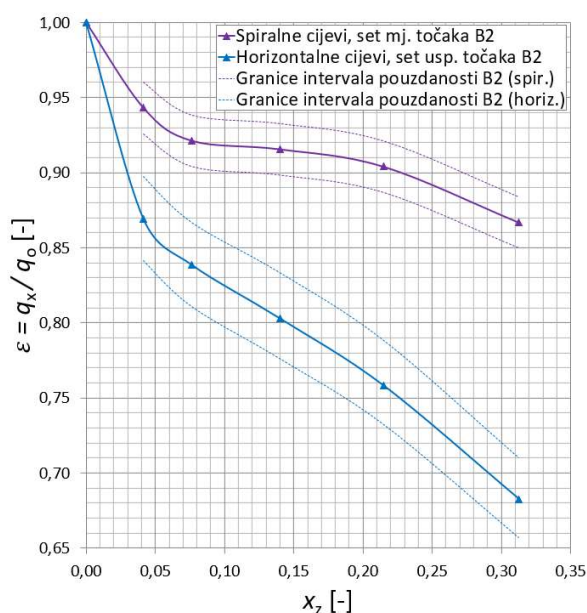
Slika 74. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točkaka A2



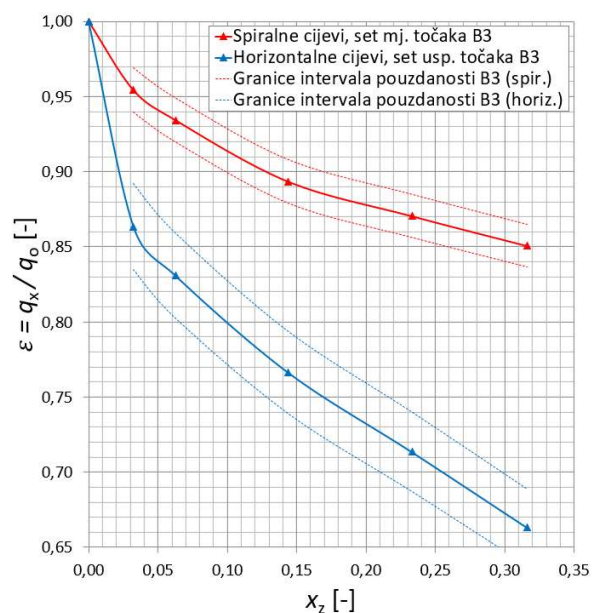
Slika 75. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točkaka A3



Slika 76. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točkaka B1



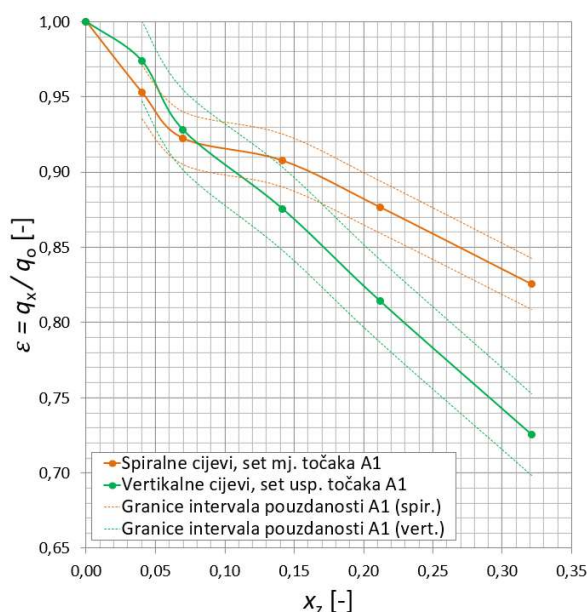
Slika 77. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka B2



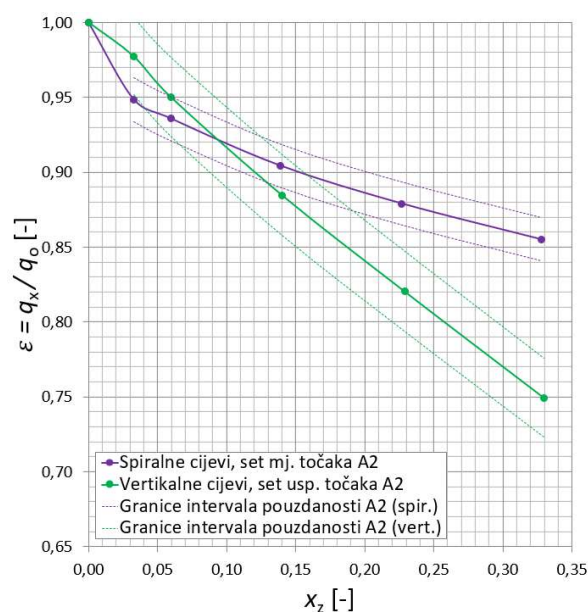
Slika 78. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i horizontalnih cijevi u setu točaka B3

Slike 79 do 84 u nastavku prikazuju usporedbe spiralnih i vertikalnih izmjenjivačkih cijevi pri kondenzaciji vodene pare uz prisutnost zraka kao NKP. Kao i kod prethodne analize za slučaj horizontalnih cijevi, uspoređuju se parametri negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s parametrima negativnog utjecaja izračunatih za vertikalne cijevi. Parametri negativnog utjecaja (ε) prikazuju se u ovisnosti o masenom udjelu zraka (x_z). Uz izračunate vrijednosti prikazane su i granice intervala pouzdanosti izračuna pojedinih vrijednosti. Vrijednosti mjernih i usporednih proračunskih točaka te pripadajuće granice intervala pouzdanosti mogu se očitati iz Tablica 52 do 57. Iz slika je vidljivo da, za razliku od usporedbe s horizontalnim cijevima, u svim mjernim i usporednim točkama negativni utjecaj prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare kod spiralnih cijevi nisu manji u odnosu na one kod vertikalnih cijevi. Uočava se pojava da na manjim masenim udjelima zraka dolazi do izjednačavanja negativnog utjecaja, a u nekim točkama može se očitati kako je negativni utjecaj kod vertikalnih cijevi manji u odnosu na onaj kod spiralnih cijevi. Navedeno se događa kod masenih udjela zraka (x_z) manjih od raspona 5,4 % do 9,3 % ovisno o promatranoj usporednoj točki.

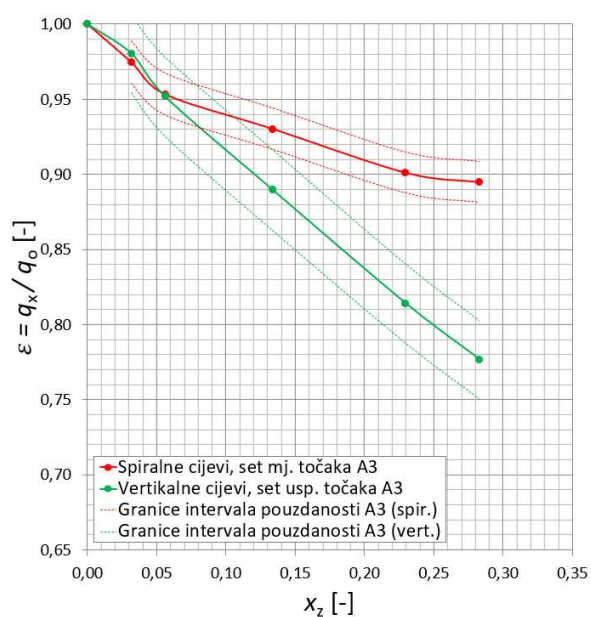
Mogući uzroci ove pojave bit će komentirani na kraju ovog poglavlja. Na višim masenim udjelima vidljivo je da su negativni utjecaji prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare kod spiralnih cijevi manji u odnosu na one kod vertikalnih cijevi, što je slučaj i kod usporedbe svih mjernih točaka s horizontalnim cijevima. Također, iz sljedećih slika vidi se kako se granice intervala pouzdanosti kod usporedbe parametara negativnog utjecaja prisutnosti NKP kod spiralnih cijevi s onima kod vertikalnih cijevi, počinju preklapati na višim masenim udjelima zraka nego je to slučaj kod horizontalnih. U područjima gdje dolazi do preklapanja granica intervala pouzdanosti, možemo s manjom vjerojatnošću biti sigurni da su negativni utjecaji NKP kod spiralnih cijevi manji ili viši u odnosu na one kod vertikalnih cijevi. Radi lakše kvantifikacije rezultata usporedbe i objašnjenja uzroka primijećenih pojava izrađuju se dijagrami prikazani slikama 85 do 90. Na navedenim dijagramima prikazuju se razlike između negativnog utjecaja (ε) prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima i negativnih utjecaja koji su izračunati za horizontalne i vertikalne cijevi.



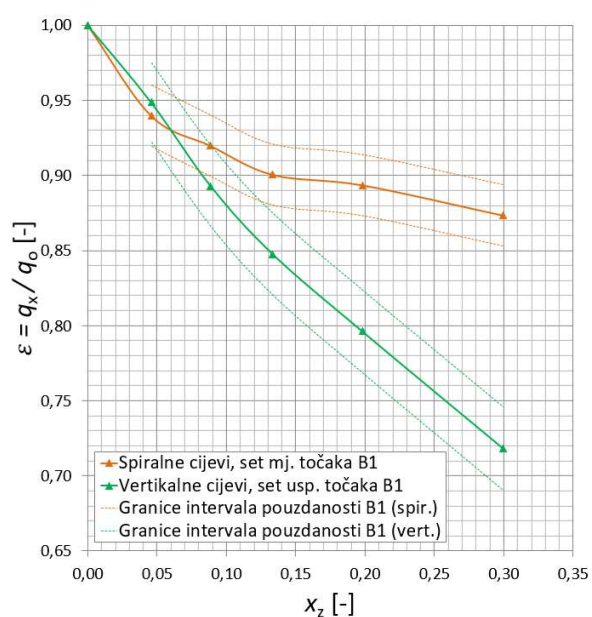
Slika 79. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka A1



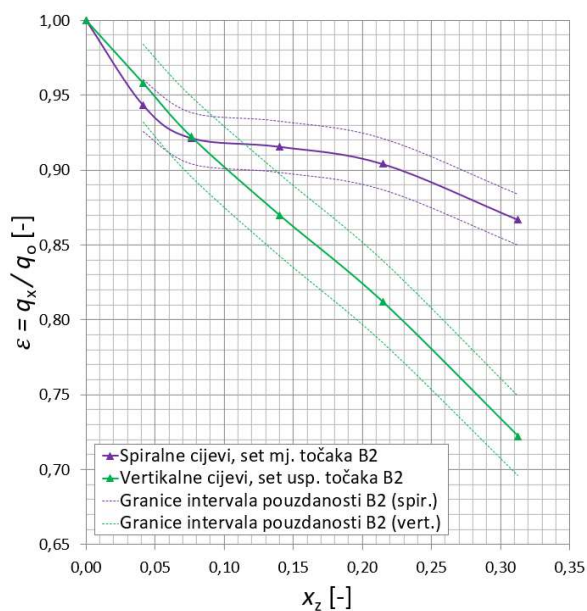
Slika 80. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točaka A2



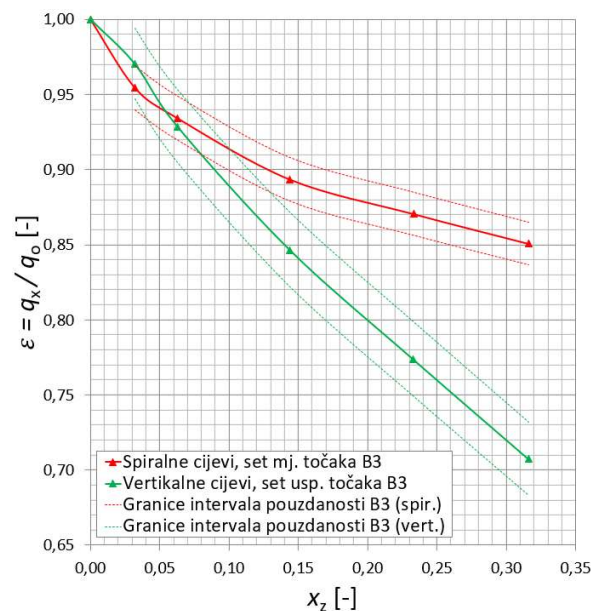
Slika 81. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točkaka A3



Slika 82. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točkaka B1



Slika 83. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točkaka B2



Slika 84. Usporedba negativnih utjecaja kod spiralnih i vertikalnih cijevi u setu točkaka B3

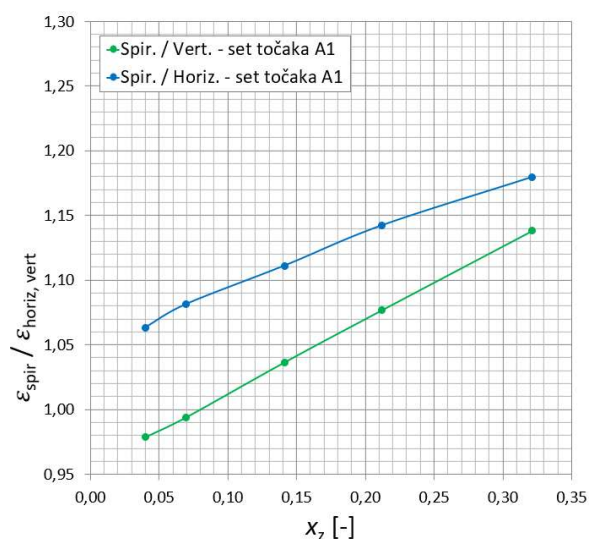
Na slikama 85 do 90 grafički su prikazane razlike u negativnim utjecajima (ε) prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s negativnim utjecajima koji su izračunati za horizontalne i vertikalne cijevi. Razlike u negativnim utjecajima prikazane su kao omjeri negativnih utjecaja kod spiralnih cijevi i negativnih utjecaja kod horizontalnih ($\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{horiz}}$), odnosno vertikalnih ($\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{vert}}$) cijevi. Navedeni omjeri predstavljaju kvantificirane vrijednosti koliko su spiralne cijevi bolje ili lošije od horizontalnih i vertikalnih cijevi u pogledu negativnih utjecaja prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare unutar cijevi. Omjeri negativnih utjecaja $\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{horiz}}$ i $\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{vert}}$ prikazuju se u ovisnosti o masenom udjelu zraka (x_z). Vrijednosti omjera negativnih utjecaja za sve usporedne točke mogu se očitati iz Tablica 58 i 59.

Tablica 58. Vrijednosti omjera negativnih utjecaja za set mjernih točaka A1, A2 i A3

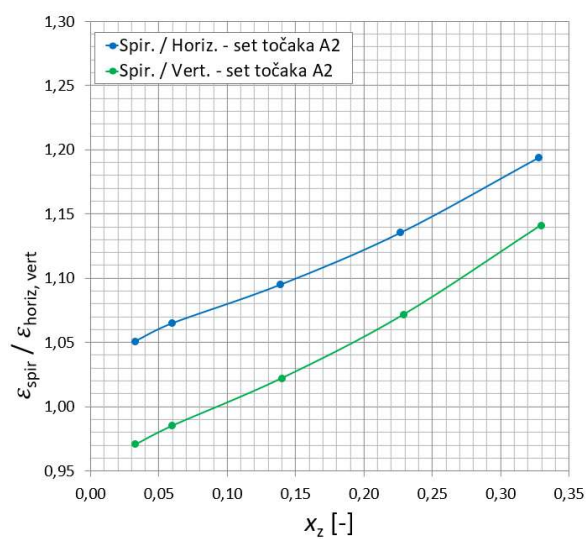
Usporedna točka A1				Usporedna točka A2				Usporedna točka A3			
usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$	usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$	usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$
A1-1	0,000	-	-	A2-1	0,000	-	-	A3-1	0,000	-	-
A1-2	0,039	1,063	0,979	A2-2	0,033	1,051	0,971	A3-2	0,032	1,086	0,994
A1-3	0,070	1,081	0,994	A2-3	0,060	1,065	0,985	A3-3	0,056	1,094	1,002
A1-4	0,141	1,111	1,037	A2-4	0,139	1,095	1,022	A3-4	0,134	1,132	1,046
A1-5	0,212	1,142	1,077	A2-5	0,227	1,136	1,072	A3-5	0,230	1,184	1,107
A1-6	0,321	1,180	1,138	A2-6	0,328	1,194	1,141	A3-6	0,283	1,224	1,152

Tablica 59. Vrijednosti omjera negativnih utjecaja za set mjernih točaka B1, B2 i B3

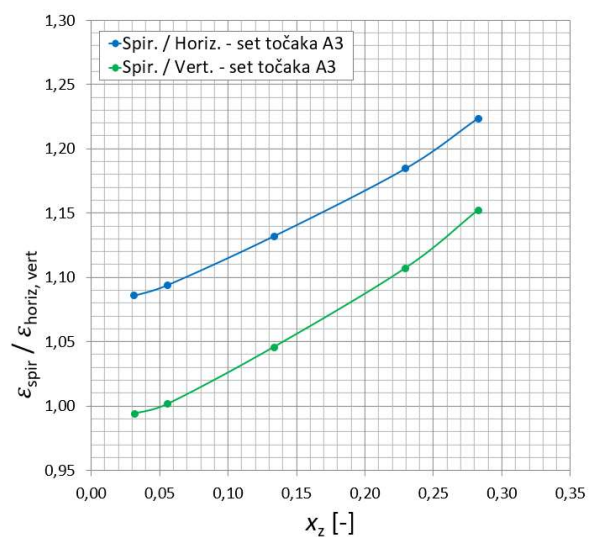
Usporedna točka B1				Usporedna točka B2				Usporedna točka B3			
usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$	usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$	usp. točka	x_z	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{hor}}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{spir}}}{\varepsilon_{\text{vert}}}$
B1-1	0,000	-	-	B2-1	0,000	-	-	B3-1	0,000	-	-
B1-2	0,046	1,097	0,991	B2-2	0,042	1,085	0,985	B3-2	0,032	1,105	0,983
B1-3	0,089	1,131	1,030	B2-3	0,076	1,099	0,999	B3-3	0,063	1,125	1,006
B1-4	0,133	1,156	1,062	B2-4	0,140	1,140	1,053	B3-4	0,144	1,166	1,055
B1-5	0,198	1,203	1,122	B2-5	0,215	1,193	1,114	B3-5	0,233	1,220	1,125
B1-6	0,300	1,277	1,216	B2-6	0,313	1,270	1,200	B3-6	0,316	1,283	1,202



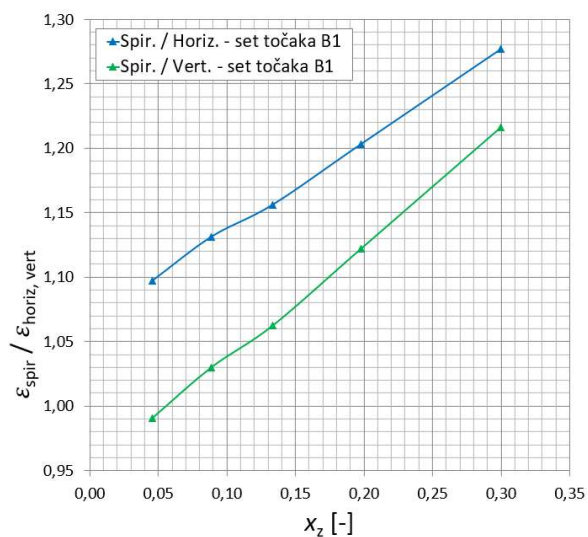
Slika 85. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A1



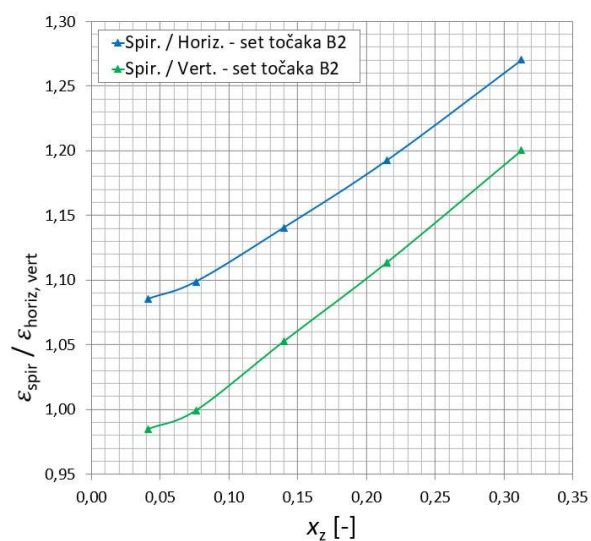
Slika 86. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A2



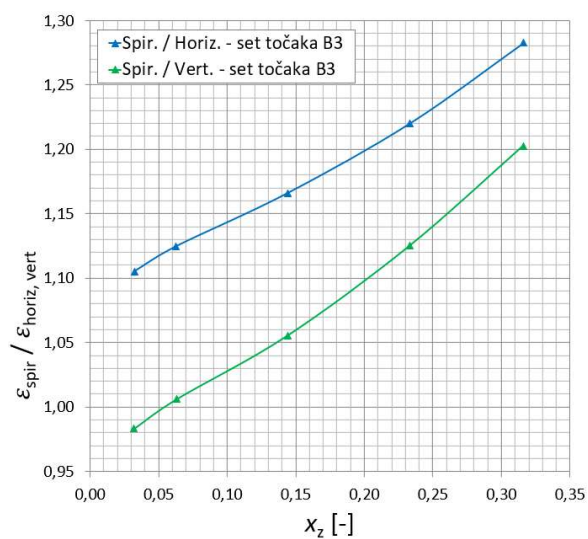
Slika 87. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka A3



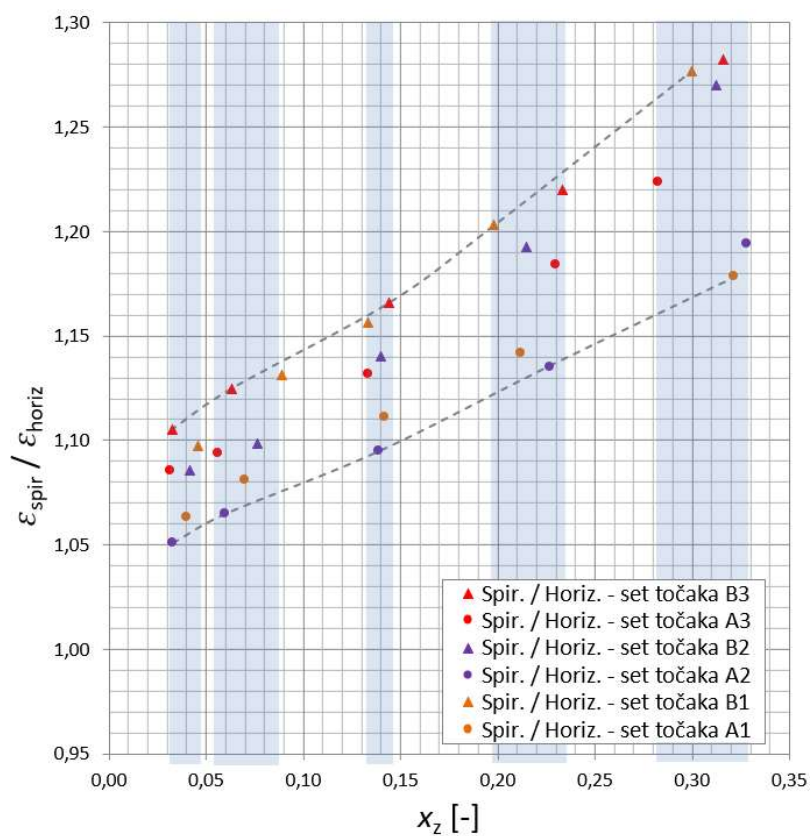
Slika 88. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B1



Slika 89. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B2



Slika 90. Usporedba spiralnih s horizontalnim i vertikalnim cijevima u setu točaka B3



Slika 91. Usporedba spiralnih s horizontalnim cijevima u svim setovima usporednih točaka

Slikom 91 zajednički su prikazani omjeri parametara negativnog utjecaja NKP kod spiralnih cijevi i parametara negativnog utjecaja NKP kod horizontalnih cijevi ($\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{horiz}}$). Omjeri se mogu tumačiti i kao postotne vrijednosti koje opisuju koliko su spiralne cijevi bolje ili lošije od horizontalnih cijevi u pogledu negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare. Iz slike 91 i tablica 58 i 59 može se očitati da se vrijednosti omjera negativnih utjecaja kreću u sljedećim rasponima:

- Za masene udjele zraka (x_z) od 3,2 % do 4,6 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,051 (+5,1 %) do 1,105 (+10,5 %), što znači da su spiralne cijevi bolje od horizontalnih od 5,1 do 10,5 %.
- Za masene udjele zraka (x_z) od 5,6 % do 8,9 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,065 (+6,5 %) do 1,131 (+13,1 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 13,3 % do 14,4 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,095 (+9,5 %) do 1,166 (+16,6 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 19,8 % do 23,3 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,136 (+13,6 %) do 1,220 (+22 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 28,3 % do 32,8 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,180 (+18,0 %) do 1,283 (+28,3 %).

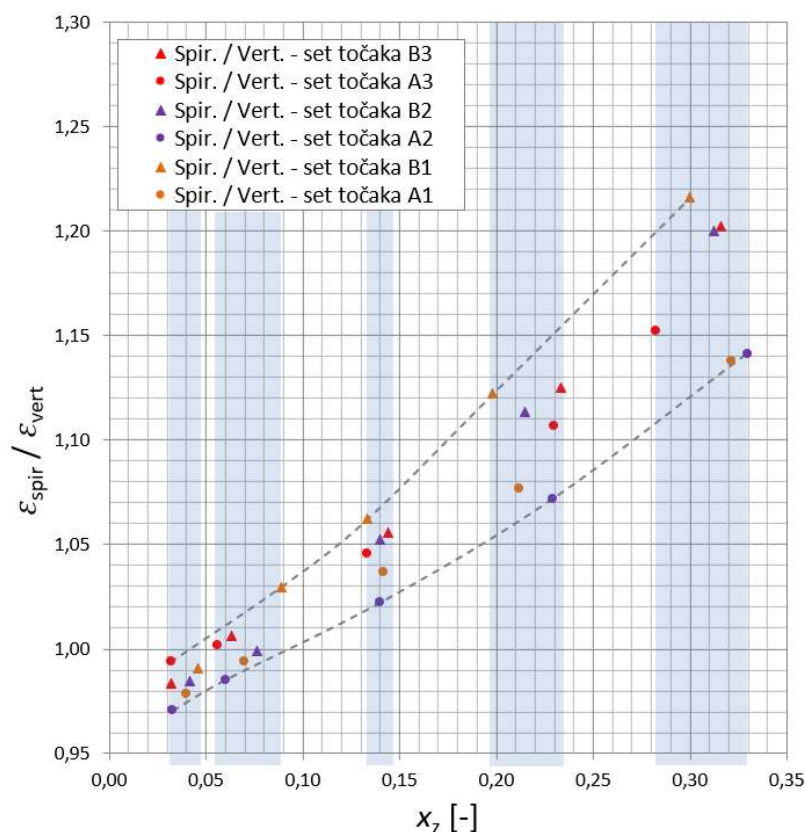
Navedeni rasponi masenih udjela zraka (x_z), na slici 91 prikazani su vertikalnim sjenčanim područjima plave boje. Crtkanim linijama prikazane su granice maksimalnih i minimalnih vrijednosti omjera parametara negativnog utjecaja NKP uzimajući u obzir sve mjerene točke iz ovog eksperimentalnog istraživanja. Iz dijagrama i navedenih omjera može se primijetiti kako se s povećanjem masenog udjela zraka (x_z), povećavaju i omjeri negativnih utjecaja, odnosno spiralne cijevi postaju značajno bolje od horizontalnih.

Slikom 92 zajednički su prikazani omjeri negativnog utjecaja kod spiralnih cijevi i negativnog utjecaja kod vertikalnih cijevi ($\varepsilon_{\text{spir}}/\varepsilon_{\text{vert}}$). Iz slike 92 i tablica 58 i 59 može se očitati da se vrijednosti omjera negativnih utjecaja kreću u sljedećim rasponima:

- Za masene udjele zraka (x_z) od 3,2 % do 4,6 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 0,971 (-2,9 %) do 0,994 (-0,6 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 5,6 % do 8,9 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 0,985 (-1,5 %) do 1,006 (+0,6 %).

- Za masene udjele zraka (x_z) od 13,3 % do 14,4 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,022 (+2,2 %) do 1,062 (+6,2 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 19,8 % do 23,3 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,072 (+7,2 %) do 1,125 (+12,5 %).
- Za masene udjele zraka (x_z) od 28,3 % do 32,8 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,138 (+13,8 %) do 1,216 (+21,6%).

Navedeni rasponi masenih udjela zraka (x_z), na slici 92 prikazani su vertikalnim sjenčanim područjima plave boje. Crtkanim linijama prikazane su granice maksimalnih i minimalnih vrijednosti omjera parametara negativnog utjecaja NKP. Slikama 91 i 92 omogućena je jednostavna inženjerska procjena vrijednosti omjera negativnog utjecaja (ε), odnosno procjena koliko su spiralne cijevi bolje za korištenje od horizontalni ili vertikalnih cijevi, a sve u rasponu eksperimentalno istraženih radnih parametara, odnosno ispitivane geometrije spiralne cijevi.



Slika 92. Usporedba spiralnih s vertikalnim cijevima u svim setovima usporednih točaka

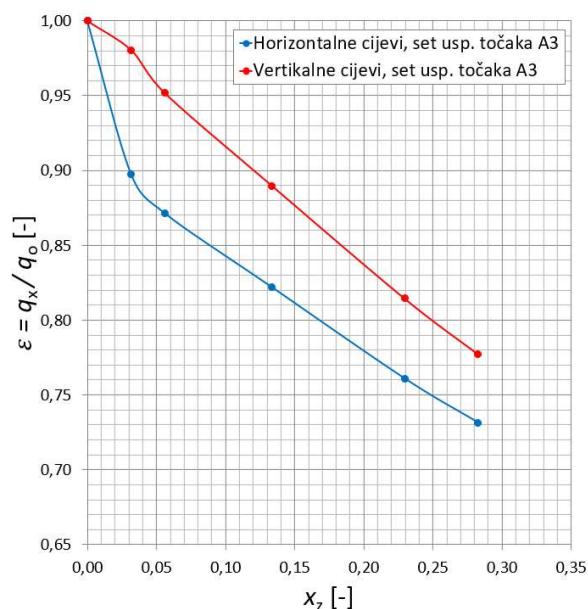
Iz prethodnih dijagrama i navedenih omjera negativnih učinaka prisutnosti NKP može se uočiti kako kod masenih udjela zraka (x_z) manjih od raspona 5,4 % do 9,3 % (ovisno o promatranoj usporednoj točki) dolazi do izjednačavanja negativnih utjecaja prisutnosti NKP između spiralnih i vertikalnih cijevi, a u nekim točkama može se očitati kako su negativni utjecaji kod vertikalnih cijevi do 2,9 % manji nego isti kod spiralnih cijevi. Također, sa slika 79 do 84 vidljivo je kako u navedenom području manjih masenih udjela zraka dolazi do preklapanja intervala pouzdanosti pa negativni učinci kod spiralnih cijevi mogu biti manji ili veći u odnosu na one kod vertikalnih cijevi. Uzimajući u obzir navedeno, ne može se sa sigurnošću potvrditi koje izmjenjivačke cijevi u promatranom području daju manje negativne utjecaje prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare pa je stoga preporučljivo provesti dodatna istraživanja. U nastavku će se navesti nekoliko mogućih indikacija uzroka navedenog.

U prethodnom potpoglavlju, slikama 61 do 66 prikazano je kako su negativni utjecaji prisutnosti NKP kod vertikalnih cijevi manji od istih kod horizontalnih cijevi. Razlog tome je što u vertikalnom položaju na nastali sloj kondenzata uz prisilno strujanje djeluje i gravitacija, koja pospješuje njegovo odvođenje. Za razliku od vertikalnih, kod horizontalnih cijevi nastali kondenzat se slijeva u donju zonu cijevi te takav odvodi uslijed prisilnog strujanja niz cijev, ako se radi o slojevitom strujanju. Kod većih protoka i brzina vodene pare moguća je pojava prstenastog strujanja koje se ponaša slično kao kod vertikalne cijevi, ali bez utjecaja gravitacije na odvođenje kapljevito sloja iz cijevi. U oba slučaja odvođenje kondenzata je slabije nego kod vertikalnih pa su i prijelazi topline manji. Spiralne cijevi koje su korištene u ovom istraživanju izrađene su s kutom uspona od 30°. Geometrijski gledano, one su bliže horizontalnim nego vertikalnim cijevima. Promatrajući samo djelovanje gravitacijske sile na odvođenje kondenzacijom nastalog kapljevito sloja, možemo zaključiti kako ona najviše djeluje kod vertikalnih cijevi, zatim kod spiralnih i najmanje kod horizontalnih. Osim gravitacijske sile, kod spiralnih cijevi djeluje naravno i centrifugalna sila koja uzrokuje sekundarna strujanja koja zatim pospješuju kidanje graničnih slojeva. Uzimajući navedeno u obzir, moguće je da za ispitivane mjerne parametre, upravo na malim masenim udjelima zraka zbroj gravitacijske sile i sile prisilnog strujanja bolje odvodi kondenzati i kida sloj nakupljenog zraka unutar vertikalne cijevi, neko to radi komponenta gravitacijske sile, sile prisilnog strujanja i sekundarna strujanja koja se javljaju unutar spiralne cijevi. Međutim, navedeno bi

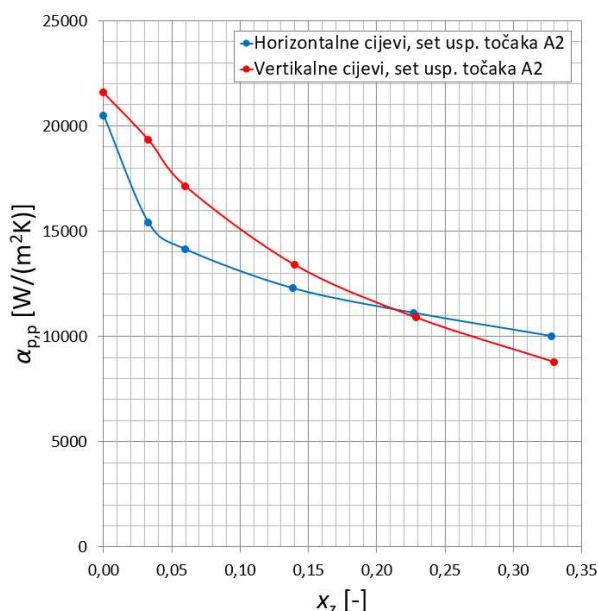
indiciralo kako vertikalne cijevi daju intenzivnije prijelaze topline od spiralnih cijevi kod vrlo malih masenih udjela zraka, ili čak u slučajevima bez prisutnosti zraka, što je u suprotnosti sa zaključcima istraživanja drugih autora navedenih u poglavlju 2.

Drugi mogući uzrok prethodno navedene pojave na malim masenim udjelima zraka pri kondenzaciji vodene pare je upitna vjerodostojnost mjernih podataka na kojima je razvijen model za vertikalne cijevi upravo pri malim masenim protocima NKP. U prilog navedenom ide promatranje krivlja utjecaja masenih udjela zraka na parametre negativnih utjecaja (ε) i koeficijente prijelaza topline na slikama 93 i 94. Vidljivo je kako crvene linije koje predstavljaju vertikalne cijevi imaju neobičnu trajektoriju na masenim udjelima zraka manjim od 7 %, koja je u suprotnosti sa istraživanjima drugih autora. U literaturi se obično navodi eksponencijalni oblik krivulje negativnog utjecaja (ε) i koeficijenata prijelaza topline u ovisnosti o masenom udjelu zraka.

Sve navedeno dovodi do zaključka kako su pojave u navedenom području masenih udjela nekondenzirajućih plinova manjih od 9,3 % vrlo zanimljive za daljnja razmatranja, te ih je potrebno dodatno istražiti.



Slika 93. Parametri negativnog utjecaja (ε) u setu usporednih točaka A2



Slika 94. Koeficijenti prijelaza topline u setu usporednih točaka A2

Slikam 73 do 84 i prethodnom diskusijom dokazana je hipoteza rada da je negativni utjecaj prisutnosti nekondenzirajućih plinova pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina, uz sljedeće napomene:

- Provedena analiza je načelno obuhvatila usporedbu negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima s negativnim utjecajima prisutnosti NKP koji se javljaju pri kondenzaciji unutar horizontalnih i vertikalnih izmjenjivačkih cijevi kao konvencionalnih izmjenjivačkih površina.*
- Analizom rezultata usporedbe, za ispitivani raspon radnih parametara, eksplicitno je dokazano da je negativni utjecaj prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod horizontalnih cijevi.*
- Analiza pokazuje također da je, za ispitivani raspon radnih parametara, negativni utjecaj prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod vertikalnih cijevi, što je sa nezanemarivom sigurnošću pokazano za masene udjele NKP veće od 9,3 %. Za manje masene udjele postoje indikacije da bi zaključci mogli biti isti, ali je svakako preporučljivo provesti dodatna istraživanja.*

7. SAŽETA DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Kondenzacija uz prisutnost nekondenzirajućih plinova (NKP) je često prisutna u procesnim postrojenjima raznih industrijskih grana. Prisutnost čak i male količine NKP prilikom kondenzacije vodene pare može značajno smanjiti koeficijente prolaza topline, odnosno efikasnost izmjenjivača topline. Izmjenjivači topline sa spiralnim cijevima često nalaze svoju primjenu upravo kao kondenzatori u procesnim postrojenjima. Poznavanje navedenog procesa prijenosa topline je izrazito važno za pravilno projektiranje izmjenjivača topline te rad procesnih postrojenja općenito. Pregledom dostupne literature utvrđeno je kako postoji velik broj radova koji obrađuju kondenzaciju vodene pare uz i bez prisutnosti NKP unutar ravnih izmjenjivačkih cijevi svih orijentacija. Navedeno se također odnosi i na kondenzaciju raznih radnih tvari unutar spiralnih cijevi koje se koriste u rashladnoj tehnici. Međutim, kada se radi o kondenzaciji vodene pare unutar spiralnih cijevi, iz pregleda literature je vidljivo kako ovo područje još uvijek nije dovoljno istraženo, a naročito ukoliko su uz vodenu paru prisutni i NKP. Iz tog razloga, u sklopu ovog rada provedena je eksperimentalna analiza kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP u spiralnim cijevima, a sve s ciljem stjecanja novih spoznaja iz navedenog područja.

Na temelju teorijskih spoznaja o pozitivnom utjecaju pojave sekundarnih strujanja unutar spiralnih cijevi, te negativnom utjecaju prisutnosti NKP na proces kondenzacije, postavljena je hipoteza ovog rada da je negativni utjecaj prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina.

Za ciljeve istraživanja postavljeno je sljedeće:

- Razviti mjernu liniju za provođenje eksperimentalnih istraživanja kondenzacije vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima, uz i bez prisutnosti nekondenzirajućih plinova.
- Na temelju eksperimentalne analize kvantificirati negativni utjecaj nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima.

- Analizirati i usporediti negativne utjecaje prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama.

Na osnovi provedenog istraživanja mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Razvijena je i izrađena višenamjenska mjerna linija za provođenje eksperimentalnih istraživanja. Mjerna linija omogućuje provođenje ispitivanja toplinskih karakteristika raznih tipova izmjenjivača topline u toplovodnom ili kondenzacijskom režimu rada, uz ili bez prisutnosti zraka kao NKP. U sklopu mjerne linije razvijeni su sustavi kontinuiranog odzračivanja NKP nakon procesa kondenzacije i osiguravanja da se na kompletnoj izmjenjivačkoj površini odvija samo proces kondenzacije bez dodatnog pothlađivanja kondenzata. Navedeni sustavi su detaljno opisani te prikazani slikama i procesnim shemama u poglavlju 3. Metoda provođenja mjerenja korištenjem navedenih sustava pokazala se tehnički ispravna i praktična za izvedbu pa se stoga preporuča njezino korištenje i kod budućih ispitivanja. Također, kompletna razvijena mjerna linija predstavlja vrijednu opremu za daljnja eksperimentalna istraživanja u području prijenosa topline.
2. Razvijene su eksperimentalne metode ispitivanja i analize kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP unutar spiralnih cijevi te usporedbe s drugim konvencionalnim izmjenjivačkim površinama. U poglavlju 4. detaljno su opisani postupci i metodologija mjerenja, analize rezultata te usporedbe s horizontalnim i vertikalnim cijevima, čiji su proračunski modeli također navedeni i opisani. Usporedba kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP u spiralnim cijevima s kondenzacijom u horizontalnim i vertikalnim cijevima, koje u ovom radu predstavljaju druge konvencionalne izmjenjivačke površine, temelji se na usporedbama negativnih utjecaja prisutnosti NKP. Negativni utjecaji definirani su pomoću parametra negativnog utjecaja (ε), koji predstavlja omjer srednje gustoće toplinskog toka izmijenjenog kondenzacijom pri određenom masenom udjelu NKP i srednje gustoće toplinskog toka izmijenjenog kondenzacijom bez prisutnosti NKP. Parametri negativnog utjecaja kod spiralnih cijevi računaju se na temelju rezultata mjerenja, dok se parametri negativnog utjecaja kod horizontalnih i vertikalnih cijevi računaju pomoću proračunskih modela dostupnih u literaturi. Da bi parametri negativnog utjecaja bili usporedivi potrebno ih je svesti na jednake uvjete na strani pare i na strani vode promatranih

izmjenjivača topline za svaku točku usporedbe. S obzirom da je dinamika provođenja mjerenja ograničena konstrukcijskom izvedbom mjerne linije, osiguravanje spomenutih uvjeta jednakosti se provodi kroz proračunske modele za horizontalne i vertikalne cijevi. Jednakost uvjeta se postiže jednakošću Reynoldsovih značajki, čime osiguravamo iste uvjete koji se odnose na režim strujanja, te jednakošću temperatura kondenzacije i temperaturnih potencijala pri kondenzaciji. Temperaturni potencijal se definira kao razlika između temperature kondenzacije vodene pare u smjesi sa zrakom na pripadajućem parcijalnom tlaku i temperature stijenke cijevi, te kao takav predstavlja stvarni potencijal za kondenzaciju. Slikama 42 do 45 prikazan je utjecaj temperaturnog potencijala na parametar negativnog utjecaja (ε). Porastom temperaturnog potencijala, negativni utjecaji NKP su veći. Za izračun temperaturnog potencijala kod mjernih točaka iz mjerenja potrebno je izračunati srednje temperature stijenke cijevi. Za navedeno potrebno je izračunati koeficijente prijelaza topline prilikom kondenzaciji vodene pare u spiralnoj cijevi (računaju se iz rezultata mjerenja) i koeficijente prijelaza topline prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi koji su nepoznati. S obzirom da u dostupnoj literaturi nije pronađen relevantan proračunski model za ispitivanu geometriju snopa spiralnih cijevi, provedeno je zasebno eksperimentalno istraživanje prisilne konvekcije prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi, prikazana je metodologija analize mjerenih podataka te je razvijen novi proračunski model koji glasi

$$Nu = 3,7546 \cdot Re^{0,447} \cdot Pr^{1/3} \quad (7-1)$$

Prikazane metode analize kondenzacije vodene pare uz prisutnost NKP u spiralnih cijevi te usporedbe s kondenzacijom uz prisutnost NKP u horizontalnim i vertikalnim cijevima predstavljaju metodologiju koja je primjenjiva i za buduće usporedbe drugih konvencionalnih i nekonvencionalnih izmjenjivačkih površina. Također, razvijeni proračunski model prisilne konvekcije prilikom strujanja vode oko snopa spiralnih cijevi primjenjiv je za korištenje kod proračuna izmjenjivača topline koji rade u kondenzacijskom ili toplovodnom režimu rada.

3. Mjerenja su provedena u sljedećim rasponima radnih i toplinskih parametara:

- Maseni udjeli zraka kao NKP od 0 % do 32,8 %
- Gustoće masenih tokova vodene pare od 50,46 kg/(m² s) do 92,06 kg/(m² s)
- Reynoldsove značajke vodene pare od 30844 do 51809
- Tlakovi smjese vodene pare i zraka od 0,92 bar do 3,9 bar pretlaka
- Temperaturni potencijali od 8,13 °C do 23,07 °C
- Gustoće toplinskih tokova od 129,10 kW/m² do 217,04 kW/m²
- Koeficijenti prolaza topline od 2015,72 W/(m² K) do 2651 W/(m² K)
- Koeficijenti prijelaza topline pri kondenzaciji unutar spiralne cijevi od 7003,96 W/(m² K) do 25881,23 W/(m² K).

Na temelju rezultata provedenih mjerenja u kondenzacijskom režimu rada, pomoću parametra negativnog utjecaja (ε), kvantificirani su negativni utjecaji prisutnosti zraka kao NKP na kondenzaciju vodene pare unutar spiralnih cijevi. Slikama 49 do 54 prikazane su ovisnosti parametra negativnog utjecaja o masenim udjelima zraka kao NKP u smjesi s vodenom parom. Prema slici 49, za maseni udio zraka 3,9 %, parametar negativnog utjecaja iznosi 0,953, odnosno toplinski tok se smanji za 4,7 % u odnosu na onaj u slučaju kondenzacije bez prisutnosti zraka kao NKP. Za maseni udio zraka 14,1 %, parametar negativnog utjecaja iznosi 0,908, odnosno toplinski tok se smanji za 9,2 %. Za maseni udio zraka 32,1 %, parametar negativnog utjecaja iznosi 0,826, odnosno toplinski tok se smanji čak za 14,5 %. Iz navedenih podataka vidljivo je da se s povećanjem masenog udjela zraka parametar negativnog utjecaja smanjuje, odnosno da su negativni utjecaji prisutnosti NKP sve veći. Drugim riječima, povećanjem masenog udjela zraka smanjuju se vrijednosti toplinskih tokova izmijenjenih pri kondenzaciji. Do navedenog smanjenja dolazi jer se pri kondenzaciji, uz nastali kapljeviti sloj kondenzata, stvara i sloj nakupljenog zraka koji predstavlja otpor dotoku svježeg pare prema sloju kondenzata i stijenci. Nakupljanjem zraka raste njegov parcijalni tlak, a smanjuje se parcijalni tlak vodene pare u smjesi. Navedeno ima za posljedicu smanjenje temperature kondenzacije vodene pare, odnosno smanjenje prenesenog toplinskog toka. Slikom 55 zajednički su prikazani parametri negativnog utjecaja prisutnosti NKP u svim setovima mjernih točaka. Za masene udjele zraka od 3,2 % do 4,6 %, negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,975 do 0,940, što znači da se u navedenom rasponu masenih udjela zraka očekuje smanjenje toplinskog toka od 2,5 % do 6 %. Za masene udjele zraka od 13,3 % do 14,4 % negativni utjecaji (ε) su u rasponu od 0,930 do

0,893, odnosno smanjenje toplinskog toka je od 7,0 % do 10,7 %. Za masene udjele zraka od 28,3 % do 32,8 % negativni utjecaji (ϵ) su u rasponu od 0,873 do 0,826, odnosno smanjenje toplinskog toka je od 12,7 % do 17,4 %.

Na temelju rezultata provedenih eksperimentalnih istraživanja u kondenzacijskom režimu rada izračunati su koeficijenti prijelaza topline pri kondenzaciji vodene pare unutar spiralnih cijevi. Slikama 56 i 57 prikazana je njihova ovisnost o masenim udjelima zraka kao NKP u smjesi s vodenom parom. Pokazano je da se s povećanjem masenih udjela zraka vrijednosti koeficijenata prijelaza topline smanjuju. Značajno smanjenje događa se do 5 % masenih udjela zraka. Daljnjim povećanjem masenih udjela zraka pad vrijednosti koeficijenata prijelaza topline se nastavlja, ali smanjenim intenzitetom. Prema slici 56 u setu mjernih točaka A1, za maseni udio zraka 0 %, vrijednost koeficijenta prijelaza topline iznosi 16702 W/(m² K). Povećanjem masenog udjela zraka na 7 %, vrijednost koeficijenta prijelaza topline se smanjuje na 11009 W/(m² K), što je smanjenje od 34,1 %. Daljnjim povećanjem masenog udjela zraka na 32,1 %, vrijednost koeficijenta prijelaza topline se smanjuje na 7076 W/(m² K), što je ukupno smanjenje od 57,6 % u odnosu na slučaj bez prisutnosti zraka kao NKP. Smanjenje koeficijenata prijelaza topline prilikom kondenzacije vodene pare uz prisutnost zraka kao NKP također je posljedica pojave sloja zraka na kapljevitom sloju kondenzata unutar cijevi, koji dovodi do smanjenja parcijalnog tlaka vodene pare, odnosno temperature kondenzacije vodene pare. Vrijednosti smanjenja koeficijenata prijelaza topline kod ostalih mjernih točaka mogu se izračunati iz tablica 7 do 12.

Ovisnost koeficijenata prijelaza topline o gustoćama masenog protoka vodene pare prikazana je slikama 58 i 59. Za približno iste masene udjele zraka i temperaturne potencijale, vrijednosti koeficijenata prijelaza topline rastu s povećanjem gustoće masenog protoka pare. Primijećena je pojava da je navedeni rast veći na manjim masenim udjelima zraka u smjesi s vodenom parom, u odnosu na isti kod većih masenih udjela. Navedeno je posljedica utjecaja masenog protoka vodene pare na nastali sloj kondenzata i sloj zraka unutar spiralnih cijevi. Na manjim masenim udjelima zraka i većim masenim protocima, vodena para uz pojavu sekundarnih strujanja značajno djeluje na kidanje sloja zraka te time pospješuje konvektivni toplinski tok vodene pare prema stijenci cijevi. Na većim masenim udjelima zraka nastali sloj nakupljenog zraka je deblji pa su stoga navedeni utjecaji, kao i vrijednosti koeficijenata prijelaza topline, manji.

Kvantificirani negativni utjecaji prisutnosti zraka kao NKP na kondenzaciju vodene pare unutar spiralnih cijevi uspoređeni su s usporedivim negativnim utjecajima prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina, uz pridruživanje izračunatih sastavljenih standardnih mjernih nesigurnosti. Usporedba je provedena kako bi se provjerila hipoteza rada. Slikama 73 do 84 dokazana je hipoteza rada da je negativni utjecaj prisutnosti nekondenzirajućih plinova pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod drugih konvencionalnih izmjenjivačkih površina, uz sljedeće napomene:

- Provedena analiza je načelno obuhvatila usporedbu negativnih utjecaja prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima s negativnim utjecajima prisutnosti NKP koji se javljaju pri kondenzaciji unutar horizontalnih i vertikalnih izmjenjivačkih cijevi kao konvencionalnih izmjenjivačkih površina.
- Analizom rezultata usporedbe, za ispitivani raspon radnih parametara, eksplicitno je dokazano da je negativni utjecaj prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod horizontalnih cijevi.
- Analiza pokazuje također da je, za ispitivani raspon radnih parametara, negativni utjecaj prisutnosti NKP pri kondenzaciji vodene pare u spiralnim cijevima manji u odnosu na isti kod vertikalnih cijevi, što je sa nezanemarivom sigurnošću pokazano za masene udjele NKP veće od 9,3 %. Za manje masene udjele postoje indikacije da bi zaključci mogli biti isti, ali je svakako preporučljivo provesti dodatna istraživanja.

Razlike u negativnim utjecajima prisutnosti NKP na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima s negativnim utjecajima koji su izračunati za horizontalne i vertikalne cijevi kvantificirane su preko omjera parametara negativnog utjecaja kod spiralnih cijevi i parametara negativnog utjecaja kod horizontalnih, odnosno vertikalnih cijevi. Slikama od 85 do 90 prikazani su navedeni omjeri u ovisnosti o masenim udjelima zraka kao NKP. Prema slici 88, kod horizontalnih cijevi za maseni udio zraka 8,9 %, omjer parametara negativnog utjecaja iznosi 1,131, što znači da je negativni utjecaj kod spiralne cijevi 13,1 % manji nego kod horizontalnih cijevi. U slučaju vertikalnih cijevi za isti maseni udio zraka omjer parametara negativnog utjecaja iznosi 1,03, što znači da je negativni utjecaj kod spiralne cijevi 3 % manji nego kod vertikalnih cijevi u istoj promatranoj točki. Kod horizontalnih cijevi, za maseni udio zraka 19,8 %, omjer parametara negativnog utjecaja iznosi 1,203, što znači da je negativni utjecaji kod spiralne cijevi 20,3 % manji. U slučaju

vertikalnih cijevi za isti maseni udio zraka omjer parametar negativnih utjecaja iznosi 1,122, što znači da je negativni utjecaj kod spiralne cijevi 12,2 % manji. Iz navedenih podataka vidljivo je da se s porastom masenih udjela zraka rastu i navedeni omjeri, odnosno negativni utjecaji kod spiralnih cijevi postaju sve manji u odnosu na one kod horizontalnih, odnosno vertikalnih cijevi. Razlog manjih negativnih utjecaja prisutnosti NKP pri kondenzaciji u spiralnim cijevima su centrifugalne sile koje se javljaju uslijed strujanja unutar spiralne geometrije cijevi te uzrokuju pojavu sekundarnih strujanja. Sekundarna strujanja vrtloženjem radnog medija djeluju na sloj kondenzata, sloj nakupljenog zraka te plinoviti granični sloj. Sloj kondenzata i plinoviti granični sloj se stanjuju i kidaju što omogućuje svježoj vodenoj pari olakšan put do stijenke izmjenjivačke cijevi. Sloj zraka koji ima tendenciju nakupljanja na međupovršini između kondenzata i pare se u opisanom strujanju neprestano kida i raznosi po presjeku cijevi. Navedeno osigurava manje parcijalne tlakove zraka koji se nalazi na površini kondenzacije, odnosno veće parcijalne tlakove vodene pare koja kondenzira na višim temperaturama kondenzacije. Sve navedeno ima za posljedicu bolje prijelaze topline odnosno veće izmijenjene toplinske tokove.

Slikom 91 zajednički su prikazani omjeri parametara negativnog utjecaja prisutnosti NKP za spiralne i horizontalne cijevi. Vidljivo je kako su za masene udjele zraka od 3,2 % do 4,6 % omjeri negativnih utjecaja u rasponu od 1,051 (+5,1 %) do 1,105 (+10,5 %), što znači da su negativni utjecaji kod spiralnih cijevi od 5,1 do 10,5 % manji nego kod horizontalnih cijevi za promatrani raspon masenih udjela zraka. Za masene udjele zraka od 13,3 % do 14,4 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,095 (+9,5 %) do 1,166 (+16,6 %). Za masene udjele zraka od 28,3 % do 32,8 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,180 (+18,0 %) do 1,283 (+28,3 %).

Slikom 92 zajednički su prikazani omjeri parametara negativnog utjecaja prisutnosti NKP za spiralne i vertikalne cijevi. Vidljivo je kako su za masene udjele zraka od 3,2 % do 4,6 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 0,971 (-2,9 %) do 0,994 (-0,6 %). Za masene udjele zraka od 13,3 % do 14,4 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,022 (+2,2 %) do 1,062 (+6,2 %). Za masene udjele zraka od 28,3 % do 32,8 % omjeri negativnih utjecaja su u rasponu od 1,138 (+13,8 %) do 1,216 (+21,6%).

Iz navedenih omjera negativnih učinaka prisutnosti NKP i dijagrama sa slika 91 i 92 može se zaključiti kako u cijelom rasponu ispitivanih masenih udjela zraka spiralne cijevi daju manje negativne učinke u odnosu na horizontalne cijevi. Kod usporedbe spiralnih cijevi s vertikalnima isto možemo zaključiti za masene udjele zraka veće od raspona 5,4 % do 9,3 %, ovisno o promatranoj usporednoj točki. Za manje masene udjele zraka dolazi do izjednačavanja negativnih utjecaja prisutnosti NKP između spiralnih i vertikalnih cijevi, a u nekim točkama može se očitati kako su negativni utjecaji kod vertikalnih cijevi do 2,9 % manji nego isti kod spiralnih cijevi. Međutim, u navedenom području manjih masenih udjela zraka dolazi do preklapanja intervala pouzdanosti pa negativni učinci kod spiralnih cijevi mogu biti manji ili veći u odnosu na one kod vertikalnih cijevi. Uzimajući u obzir navedeno, ne može se sa sigurnošću potvrditi koje izmjenjivačke cijevi u promatranom području daju manje negativne utjecaje prisutnosti zraka na kondenzaciju vodene pare pa je stoga preporučljivo provesti dodatna istraživanja.

4. Usporedba parametara negativnog utjecaja prisutnosti zraka kao NKP na kondenzaciju vodene pare unutar spiralnih cijevi s usporedivim negativnim utjecajima koji bi se javili kod horizontalnih i vertikalnih cijevi eksplicitno je pokazala kako su negativni utjecaji kod spiralnih cijevima manji u odnosu na negativne utjecaje koji bi se javili u slučaju korištenja horizontalnih i vertikalnih cijevi na masenim udjelima zraka većim od 9,3%, a sve za ispitivani raspon radnih parametara. Iz pregleda dosadašnjih istraživanja vidljivo je kako je velik broj radova koji se bavi kondenzacijom vodene pare u ravnim cijevima uz prisutnost NKP nastao iz potrebe za razvojem proračunskih modela kojima će se modelirati izmjenjivači topline korišteni u sigurnosnim sustavima pasivnog hlađenja nuklearnih reaktora. Također navedeno je kako se u tim sustavima često pojavljuju veći maseni udjeli zraka u struji vodene pare koju je potrebno kondenzirati u slučaju nesreće. Uzimajući u obzir navedeno, na temelju ovog rada može se zaključiti kako spiralne cijevi svakako treba uzeti u razmatranje prilikom projektiranja izmjenjivača topline u kojima će kondenzirati vodena para uz veće masene udjele zraka kao nekondenzirajućeg plina. Jedno od potencijalnih područja primjene svakako bi mogli biti i prethodno navedeni sustavi pasivnog hlađenja nuklearnih reaktora.

7.1. Ostvareni znanstveni doprinos

Provedenim istraživanjima ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

- Razvijene su eksperimentalne metode ispitivanja kondenzacije vodene pare uz prisutnost nekondenzirajućih plinova.
- Kvantificirani su negativni utjecaji prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima.
- Uspoređena su i kvantificirana smanjenja negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima i na drugim konvencionalnim izmjenjivačkim geometrijama.

7.2. Mogući smjerovi nastavka istraživačkog rada

Uzimajući u obzir zaključke ovog istraživanja, mogući smjerovi za nastavak istraživanja su sljedeći:

- Provođenje eksperimentalnih istraživanja na usporedivim novim izmjenjivačima topline s ravnim horizontalnim i vertikalnim izmjenjivačkim cijevima. Posebnu pažnju posvetiti analizi slučaja kondenzacije unutar vertikalnih cijevi uz prisutnost malih masenih udjela nekondenzirajućih plinova.
- Provođenje eksperimentalnih istraživanja na izmjenjivačima topline sa spiralnim cijevima raznih geometrija. Osigurati više cijevnih snopova sa spiralnim cijevima različitih promjeri cijevi, različitih promjera zakrivljenosti i koraka spirale te različitih presjeka spirale, a sve s ciljem određivanja optimalne geometrije spirale za ispitivane raspone radnih parametara.
- Provođenje eksperimentalnih istraživanja s raznim nekondenzirajućim plinovima.
- Provođenje eksperimentalnih istraživanja sa širokim rasponom radnih parametara te izvođenje generalne jednadžbe za izračun negativnih utjecaja prisutnosti nekondenzirajućih plinova na kondenzaciju vodene pare u spiralnim cijevima.

LITERATURA

- [1] K. Thulukkanam, *Heat Exchanger Design Handbook*, second edit., CRC Press, 2013.
- [2] G. Fan, P. Tong, Z. Sun, Y. Chen, „Experimental study of pure steam and steam–air condensation over a vertical corrugated tube“, *Process in Nuclear Energy*, vol. 109, p. 239-249, Elsevier, 2018.
- [3] S. H. Hosseini, M. A. Moradkhani, Mirza M. Shah, M. Edalati, „General equation for flow condensation heat transfer coefficient in different orientations of helical coils of smooth tubes using genetic programming“, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 119, Elsevier, 2020.
- [4] N. R. Abadi, M. Mehrabi, J. P. Meyer, J. Dirker, „Effect of saturation temperature on the condensation of R134a inside an inclined smooth tube“, *International Journal of Refrigeration*, vol. 94, p. 186-204, Elsevier, 2018.
- [5] H. F. Elattar, A. Fouda, S. A. Nada, H. A. Reafaey, A. Al-Zahrani, „Thermal and hydraulic numerical study for a novel multi tubes in tube helically coiled heat exchangers: Effects of operating/geometric parameters“, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 128, p. 70-83, Elsevier, 2018.
- [6] B. S. Onal, S. M. Kirkar, D. Akgul i sur., „Heat transfer and pressure drop characteristics of two phase flow in helical coils“, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 27, 101143, Elsevier, 2022.
- [7] K. Qin, Q. Go, S. Geng i sur., „Forced condensation heat transfer characteristics of vapour in the presence of noncondensable gas in horizontal tubes operating at high pressures“, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, Elsevier, 2022.
- [8] F. Toman, P. Kracik, J. Pospisil, „Heat transfer during condensation of water vapour in the presence of non-condensable gas in vertical tube of small diameter“, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 40, Elsevier, 2022.
- [9] J. Lu, H. Cao, S. Wang, J. Li, „Effects of liquid film waviness, suction, and fog formation on condensation in the presence of noncondensable gases“, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 137, Elsevier, 2021.

- [10] C. Bonneau, C. Josset, v. Melot, B. Auvity, „Comprehensive review of pure vapour condensation outside of horizontal smooth tubes“, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 349, p. 92-108, Elsevier, 2019.
- [11] A. O. Adelaja, D. R. E. Ewim, J. Dirker, J. P. Meyer, „An improved heat transfer correlation for condensation inside inclined smooth tubes“, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 117, Elsevier, 2020.
- [12] T. Ahn, J. Kang, B. Bae, J. J. Jeong, B. Yun, „Steam condensation in horizontal and inclined tubes under stratified flow conditions“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 141, p. 71-87, Elsevier, 2019.
- [13] N. R. Abadi, M. Mehrabi, J. P. Meyer, „Numerical study of steam condensation inside a long, inclined, smooth tube at different saturation temperatures“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, p. 15-25, Elsevier, 2018.
- [14] J. Gou, B. Wang, J. Shan, „Development fin analytical model for pure vapor downflow condensation in a vertical tube“, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 320, p. 346-360, Elsevier, 2017.
- [15] D. Papini, A. Cammi, „Modelling of heat transfer phenomena for vertical and horizontal configurations fin-pool condensers and comparison with experimental findings“, *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2010, article ID 815754, 2010.
- [16] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI Heat Atlas*, Springer, 2010.
- [17] W. Xiaoyong, F. Xiande, S. Rongrong, „A Comparative Study of Heat Transfer Coefficients for Film Condensation“, *Energy Science and Technology*, vol. 3, p. 1-9, CSCanada, 2012.
- [18] M. M. Shah, „Prediction of heat transfer during condensation in inclined plain tubes“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 94, p.82-89, Elsevier, 2016.
- [19] M. M. Shah, „General Correlation For Heat Transfer During Condensation in Plain Tubes: Further development and verification“, *ASHRAE Transactions*, vol. 119, part 2, 2013.
- [20] M. M. Shah, „An Improved and Extended General Correlation for Heat transfer During Condensation in Plane Tubes“, *HVAC&R Research*, vol. 15, no. 5, ASHRAE, 2009.

- [21] M. S. El-Genk, T. M. Schriener, „A Review and Correlations for Convection Heat Transfer and Pressure Losses in Toroidal and Helically Coiled Tubes“, *Heat Transfer Engineering*, vol. 38, no. 5, p. 447-474, Taylor & Francis, 2017.
- [22] M. Wang, M. Zheng, R. Wang, L. Tian, C. Ye, Y. Chen, H. Gu, „Experimental studies on local and average heat transfer characteristics in helical pipes with single phase flow“, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 123, p. 78-85, Elsevier, 2019.
- [23] A. B. Colak, D. A. Akgul, H. Mercan i sur., „Estimation of heat transfer parameters of shell and helically coiled tube heat exchangers by machine learning“, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, Elsevier, 2023.
- [24] J. Yu, Y. Jiang, W. Cai, F. Li, „Forced convective condensation flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon mixtures refrigerant in helically coiled tubes“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 124, p. 646-654, Elsevier, 2018.
- [25] T. H. Phan, S. S. Won, W. G. Park, „Numerical simulation of air–steam mixture condensation flows in a vertical tube“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, p. 568-578, Elsevier, 2018.
- [26] A. K. Solanki, R. Kumar, „Condensation of R-134a inside dimpled helically coiled tube-in-shell type heat exchanger“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 129, p. 535-548, Elsevier, 2018.
- [27] G. Huminic, A. Huminic: „Heat transfer and flow characteristics of conventional fluids and nanofluids in curved tubes, A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, p. 1327-1347, Elsevier, 2016.
- [28] D. Akgul, S. M. Kirkar, B. S. Onal i sur., „Single-phase flow heat transfer characteristics in helically coiled tube heat exchangers“, *Kerntechnik*, vol. 87, Elsevier, 2022.
- [29] A. M. Fsadni, J. P. M. Whitty, „A review on the two-phase heat transfer characteristics in helically coiled tube heat exchangers“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, p. 551-565, Elsevier, 2016.
- [30] A. K. Solanki, R. Kumar, „Two-phase flow condensation heat transfer characteristic of R-600a inside the horizontal smooth and dimpled helical coiled tube in shell type heat exchanger“, *International Journal of Refrigeration*, vol. 107, p. 155-164, Elsevier, 2019.

- [31] Z. Tian, W. Zheng, J. Guo i sur., „Condensation heat transfer and correlation analysis in helical tube of mixed carbon-hydro refrigerant, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 194, Elsevier, 2023.
- [32] M. A. A. Raboh, H. M. Mostafa, M. A. M. Ali and A. M. Hassaan, „Experimental Study for Condensation Heat transfer Inside Helical Coil“, *Evaporation, Condensation and Heat transfer*, Intech, 2011.
- [33] J. Wu, X. Su, X. Li, Y. Liu, „Research on film condensation heat transfer at the inside of spiral coil tube“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, 2019.
- [34] A. Dehbi, „Correcting for tube curvature effects on condensation in the presence of a noncondensable gas in turbulent free convection“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 164, Elsevier, 2021.
- [35] G. Fan, P. Tong, Z. Sun, Y. Chen, „Development of a new empirical correlation for steam condensation rates in the presence of air outside vertical smooth tube“, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 113, p. 139-146, Elsevier, 2018.
- [36] K. Kanatani, „Reconsideration of correlation for condensation outside a vertical tube in the presence of noncondensable gas“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 136, p. 427-435, Elsevier, 2019.
- [37] J. Kang, J. Kim, J. Bak i sur., „Condensation of steam mixed with non-condensable gas on vertical heat exchanger tubes in circumstances with free convection“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 169, Elsevier, 2021.
- [38] A. Dehbi, „A correlation spanning the entire laminar convection regime for vapor condensation over a horizontal tube in the presence of a noncondensable gas“, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 128, Elsevier, 2021.
- [39] J. Kang, J. Moon, Y. Ko i sur., „Steam condensation on tube-bundle in presence of non-condensable gas under free convection“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 178, Elsevier, 2021.
- [40] A. Tanrikut, O. Yesin, „Experimental research on in-tube condensation under steady-state and transient conditions“, *Nuclear Technology*, vol. 149, p. 88-100, 2005.

- [41] K.-Y. Lee, M. H. Kim, „Experimental and empirical study of steam condensation heat transfer with noncondensable gas in small-diameter vertical tube“, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, p. 207-216, Elsevier, 2008.
- [42] B. Ren, L. Zhang, H. Xu, J. Cao, Z. Tao, „Experimental study on condensation of steam/air mixture in a horizontal tube“, *Thermal and Fluid Science*, vol. 58, p. 145-155, Elsevier, 2014.
- [43] J. Huang, J. Zhang, L. Wang, „Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 89, p. 469-484, Elsevier, 2015.
- [44] B. Cao, Y. Li, S. Zhou, „Experimental study of air–steam condensation on the influence of tube diameter and inclination angle“, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 381, Elsevier, 2021.
- [45] B. Cao, Y. Li, Y. Sun, „Experimental investigation of tube diameter and inclination angle on steam condensation accompanying with air in tube bundles“, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 166, Elsevier, 2022.
- [46] G. Fan, P. Tong, Z. Sun, Y. Chen, „Development of a new empirical correlation for steam condensation rates in the presence of air outside vertical smooth tube“, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 113, p. 139-146, Elsevier, 2018.
- [47] J. Yang, T. Ahn, H. Bae, H. Park, „Investigation of condensation with non-condensable gas in natural circulation loop for passive safety system“, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 113, p. 139-146, Elsevier, 2018.
- [48] H. Cao, B. Cao, C. Xia, Z. Meng, H. Bian, M. Ding, „Prediction of heat transfer coefficients for steam condensation in the presence of air based on ANN method“, *International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology*, vol. 5, Elsevier, 2023.
- [49] A. Galović, *Termodinamika II*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB – Zagreb, 2007.
- [50] M. Tadić, *Kondenzacija u prisustvu inertnog plina*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, FSB – Zagreb, 1979.

-
- [51] M. K. Jensen, „Condensation with noncondensables and in multicomponent mixtures“ *Rensselaer Polytechnic Institute*, New York, 1988.
- [52] H. M. Soliman, „On the Annular-to-Wavy Flow Pattern Transition during Condensation Inside Horizontal Tubes,“ *The Canadian journal of chemical engineering*, vol. 60, p. 475-481, 1982.
- [53] B. Slipčević, *Razmjenjivači topline*, SMEITS, Beograd, 1989.
- [54] S. B. Genić, B. M. Jećimović i ostali, „Research on the shell-side thermal performances of heat exchangers with helical tube coils,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, p. 4295-4300, Elsevier, 2012.
- [55] Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti, Državni zavod za mjeriteljstvo, Zagreb, JCGM 100:2008, 2009.
- [56] W. Wagner et al., „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 122, 150-184, 2000.

KRATAK ŽIVOTOPIS

Josip Pasanec rođen je 08. studenog 1988. godine u Zagrebu. Osnovnu školu završava u Gornjoj Stubici. Srednju tehničku školu završava 2007. godine u Oroslavju kao učenik generacije. Za vrijeme srednje škole osvaja prvo mjesto na državnom natjecanju iz područja strojarstva. Akademske godine 2007/2008. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme preddiplomskog studija sudjeluje na svijetskom natjecanju „World Skills Competition“ u Japanu, a za vrijeme diplomskog studija nagrađen je Dekanskom nagradom za rad iz područja tehničke termodinamike. Diplomirao je 2012. godine na studiju strojarstva, smjer Procesno energetski, usmjerenje Termotehnika. U akademskoj godini 2012/2013. stječe diplomu „International welding engineer IWE/EWE“. Akademske godine 2013/2014. upisuje poslijediplomski doktorski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Od 2013. godine zaposlen je u poduzeću Pireko d.o.o. gdje do 2019. godine kao voditelj projekata radi na poslovima projektiranja i tehničke razrade procesne tlačne opreme. Od 2019. godine prelazi u odjel prodaje na mjesto prodajnog inženjera i voditelja prodaje.

Područja kojima se bavi su projektiranje i tehnička razrada procesne opreme, proračuni čvrstoće tlačne opreme, termodinamički proračuni toplinskih aparat, tehnološko-ekonomske analize proizvodnje procesne opreme.

Govori i piše engleski jezik.

KRATAK ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU

Josip Pasanec was born on November 8, 1988 in Zagreb. He finished elementary school in Gornja Stubica. He finished high school in Oroslavje in 2007 as a student of the generation. During high school, he won first place in a national competition in the field of mechanical engineering. He enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture of the University of Zagreb in the academic year 2007/2008. During the bachelor degree study he participated in the "World Skills Competition" in Japan, and during master study he was awarded the Dean's Award for work in the field of technical thermodynamics. He finished his master study in Mechanical Engineering (Process and Energy Engineering, Thermotechnics) in 2012. In the academic year 2012/2013 he obtains the diploma "International Welding Engineer IWE/EWE". In the academic year 2015/2016 he enrolled in postgraduate doctoral study at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Since 2013 he has been employed at the company Pireko d.o.o. where he works as a project manager on the design and technical development of process pressure equipment until 2019. From 2019 he moved to the sales department to the position of sales engineer and sales manager.

His areas of expertise are the design and technical development of process equipment, mechanical calculations of pressure equipment, thermodynamic calculations of thermal devices, technological and economic analyzes of the production of process equipment.

He speaks and writes English.