

Eksperimentalna analiza pada tlaka u spiralnom isparivaču

Dalla Libera, G.¹, Soldo, V.², Boban, L.³, De Carli, M.⁴ i
Cukrov, A.⁵

Sažetak

Ovim radom su analizirane različite korelacije za izračun pada tlaka pri dvofaznom strujanju propana unutar isparivača uređaja za hlađenje pića. Analizirani rashladni uređaj je izveden kao spremnik vode unutar kojeg su uronjene isparivačke cijevi. Predmetni isparivač izveden je kao spiralni izmjenjivač topline pravokutne geometrije. Kroz cijevi isparivača struji propan koji, primajući na sebe toplinski tok koji odaje voda, potpuno isparava. Kako se stjenka cijevi izmjenjivača nalazi na temperaturi nižoj od temperature ledišta vode, oko vanjske stjenke isparivača formira se sloj leda koji omogućuje akumulaciju rashladnog učina za potrebe hlađenja pića. Pri analizi isparivača korišteni su programski paketi MATLAB® i REFPROP®.

Ključne riječi: propan, rashladnik, spiralni isparivač, pad tlaka,

1 **Gastone Dalla Libera, mag. ing. energ.**, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via Gradenigo, 6/a, 35131 Padova, e-mail: gastone.dallalibera@studenti.unipd.it

2 **Prof. dr. sc. Vladimir Soldo, dipl. ing. stroj.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: vladimir.soldo@fsb.hr

3 **Luka Boban, mag. ing. mech.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: luka.boban@fsb.hr

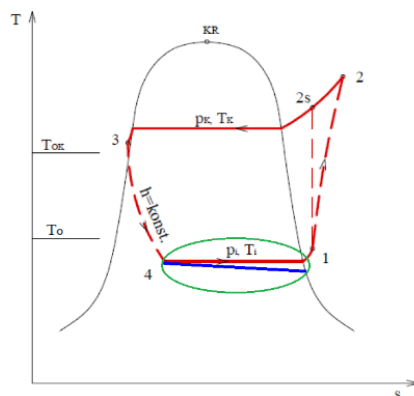
4 **Prof. dr. sc. Michele De Carli.**, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via Gradenigo, 6/a, 35131 Padova, e-mail: michele.decarli@unipd.it

5 **Alen Cukrov, mag. ing. mech.**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, e-mail: alen.cukrov@fsb.hr

1 Uvod

Procesnim hlađenjem se neko tijelo hladi na temperaturu nižu od temperature okoliša. Intenzivan prijenos topline s hlađenog tijela na rashladni medij se postiže isparivanjem potonjeg uslijed toplinskog toka kojeg odaje hlađeno tijelo. Proces isparivanja radne tvari se odvija unutar isparivača. Procesi hlađenja imaju izrazit značaj u mnogim granama industrije, pa tako i prehrambenoj industriji gdje se hlađenjem ponajprije onemogućuje razvoj mikroorganizama u namirnicama.

U ovom radu je analizirano ponašanje isparivača u sustavu za hlađenje pića. Radna tvar u sustavu je propan. Propan (R290) odlikuju izrazito povoljna termodinamička svojstva, poput visoke specifične topline isparivanja, te relativno niske vrijednosti tlakova kondenzacije. Također, posjeduje veoma niske vrijednosti potencijala globalnog zagrijavanja (*engl.* Global Warming Potential, GWP) u usporedbi s konvencionalnim radnim tvarima (1).

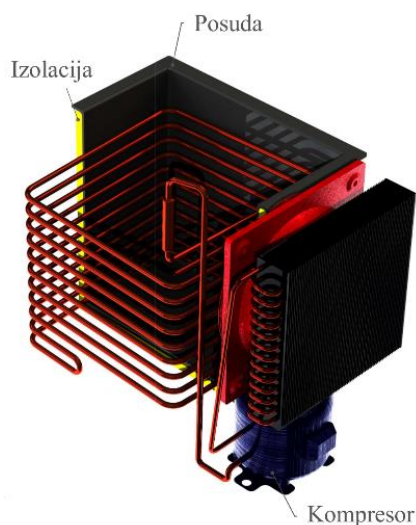


Slika 5. T-s dijagram procesa s R290 te prikaz utjecaja pada tlaka na temperaturu isparavanja

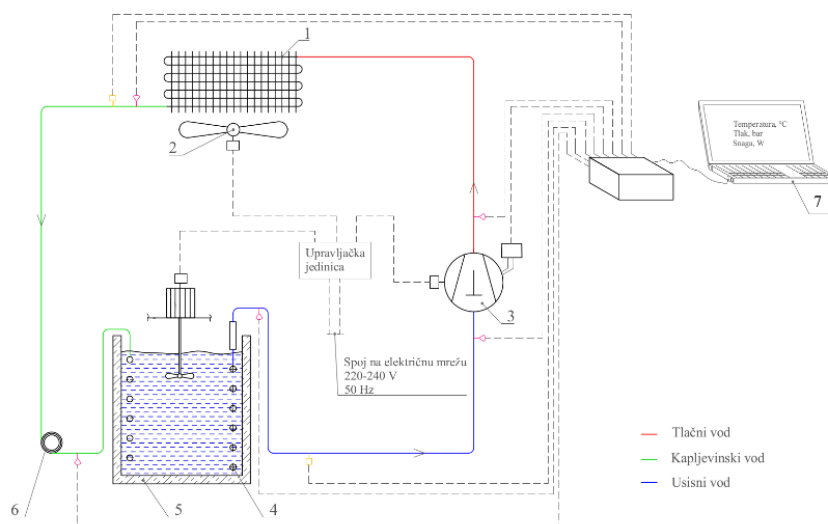
2 Eksperimentalni sustav

Promatrani isparivač dio je rashladnog uređaja koji se koristi za hlađenje pića akumulacijom rashladne energije u ledu. Spiralni izmjenjivač uronjen je u spremnik vode te propan u izmjenjivač ulazi kao pothlađena kapljevina te prolaskom kroz isparivač mijenja agregatno stanje. Ekspanzijski ventil osigurava pregrijanje radne tvari kako bi kompresor usisavao pregrijanu paru. Nakon uključivanja uređaj radi dok se na cijevima isparivača ne formira dovoljna debljina sloja leda koja se kontrolira pomoću tri osjetnika temperature postavljena s konstantnim korakom na određenoj udaljenosti od cijevi isparivača. Sami uređaj te shema spajanja mjerne opreme prikazani su na Slikama 2 i 3, a mjerenja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Stanja radne tvari mjerena su s dva pretvarača tlaka te termoparovima. Pretvarači tlaka postavljeni su na usisni vod kompresora i kapljevinski vod, dok termoparovi mjere stanje na ulazu u isparivač, izlazu iz isparivača, usisu u kompresor, tlačnom i kapljevinskom vodu. Temperatura pregrijanja se mjeri na izlazu iz isparivača u samoj kupci te na ulazu u kompresor.



Slika 6. Rashladni uređaj s prikazom cijevnog isparivača



Slika 7. Eksperimentalni postav: (1) kondenzator, (2) ventilator, (3) kompresor, (4) isparivač, (5) izolirani spremnik, (6) prigušna kapilara i (7) akvizicija

Maseni protok radne tvari koreliran je s električnom snagom kompresora te bilanciranjem entalpija na usisnoj i tlačnoj strani kompresora. Sam isparivač sastoji se od 12 četverokutnih prstena u spiralnoj formi te je prikazan na Slici 2.

Tablica 1 Dimenzije isparivača

Unutarnji promjer cijevi	$d_i = 9 \text{ mm}$
Vanjski promjer cijevi	$d_e = 10 \text{ mm}$
Broj prstena	$N = 12$
Duljina izmjenjivača	$L_{\text{circ}} = 15,8 \text{ m}$
Materijal	Cu
Hrapavost cijevi	$R_p = 0,2 \text{ } \mu\text{m}$

Ukupni pad tlaka u dvofaznom strujanju može se raspisati kao (2):

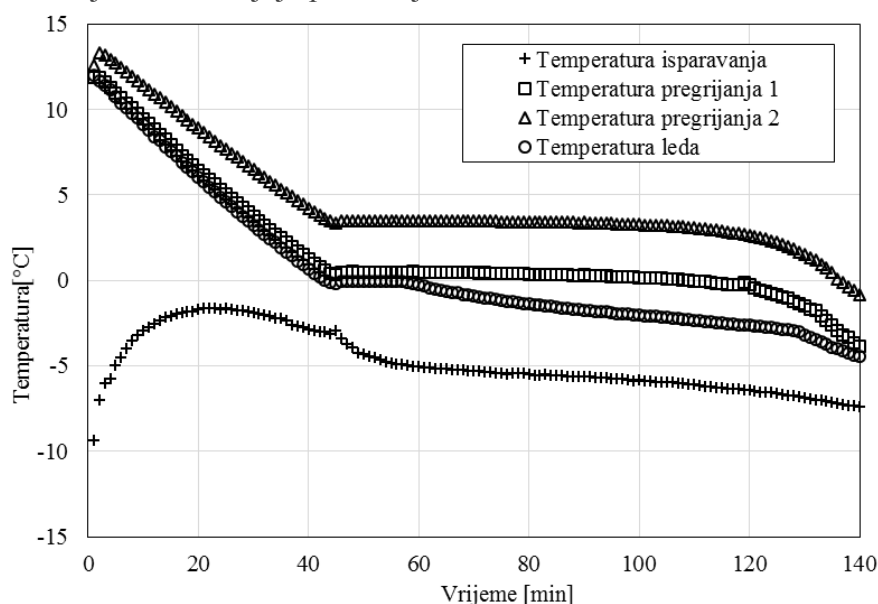
$$\Delta p_{tot} = \Delta p_f + \Delta p_{ac} + \Delta p_g$$

pri čemu je Δp_f pad tlaka uslijed trenja, Δp_{ac} uslijed ubrzanja struje te Δp_g uslijed gravitacije. Za potrebe usporedbe korištene su četiri korelacije često korištene u literaturi: *Churchill*-ova (3) za jednofazno strujanje pare propana, te *Friedel*-ova (4), *Bankoff*-ova (5) i *Martinelli*-eva (6) za dvofazno strujanje.

3 Rezultati i diskusija

Eksperimentalni rezultati provedenog mjerenja prikazani su na Slici 4 dok su pojedine karakteristične točke sumirane u Tablici 2. Prikazane su temperature isparavanja, temperature prerijane radne tvari na izlazu iz isparivača te na usisu kompresora te temperatura leda. Sam proces može se podijeliti u nekoliko karakterističnih procesa:

- hlađenje vode od 1. do 42. minute
- stvaranje leda na cijevima isparivača do 60. minute
- pothlađivanje leda te daljnje povećanje mase leda

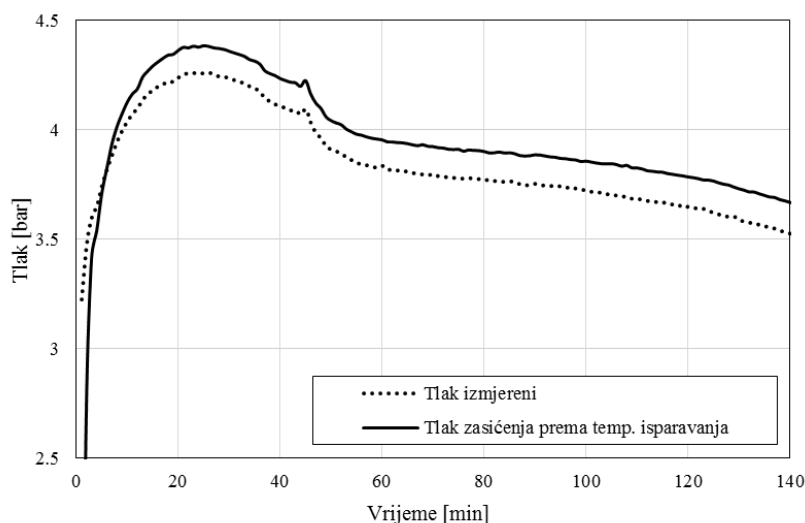


Slika 8. Promjene temperatura prilikom rada uređaja

Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja u pojedinim točkama

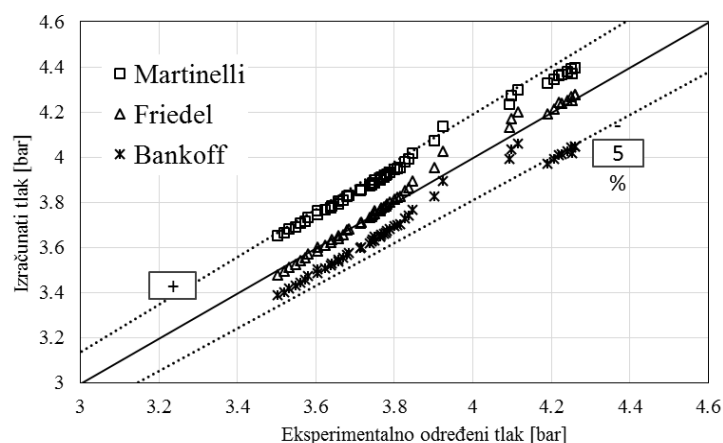
Vrijeme [min]	Tlak isparavanja [bar]	Temperatura isparavanja [°C]	Temp. prerijanja 1 [°C]	Temp. prerijanja 2 [°C]	Pad tlaka [bar]
3	3,60	-6,03	11,59	13,18	0,893
15	4,18	-2,05	7,94	10,16	0,322
60	3,84	-5,03	0,49	3,51	0,217
134	3,57	-7,09	-2,32	0,76	0,265

U prvoj fazi prilikom pokretanja uređaja temperatura isparavanja se povećava od početne vrijednosti $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ i približava temperaturi hladene vode. Nakon uspostavljanja ravnotežnog rada rashladnog uređaja temperatura isparavanja se linearno smanjuje od $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ kada dolazi do zamrzavanja vode i stvaranja leda na cijevima isparivača. U drugoj fazi temperatura leda i temperature pregrijanja konstantnog su iznosa do 58. minute kada nastali sloj leda predstavlja dominantni toplinski otpor pri prijelazu topline. Posljedica je pothlađenje leda ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ te snižavanje temperature isparavanja. U posljednjih 40 minuta rada uređaja dolazi do naglog pada temperature isparavanja i leda što se pripisuje činjenici da se u tom trenutku formira sloj leda koji obuhvaća i dio isparivača na izlazu na kojem struji pregrijana para propana. Navedeni zaključak temelji se na činjenici da dolazi do izjednačavanja temperature leda i temperature pregrijanja na izlazu iz isparivača oko 140. minute. Temperature nastalog leda na kraju procesa hlađenja iznosi $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dok se prilikom zamrzavanja leda temperatura isparavanja smanjuje s $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tlak i temperatura jednoznačno su definirani tijekom isparavanja, stoga je moguće usporediti izmjereni tlak pretvaračem tlaka te tlak određen prema temperaturi na ulazu u isparivač na temelju linije zasićenja propana. Usporedba dobivenih vrijednosti tlaka mjerenjem i preračunavanjem prikazana je na Slici 5. Vidljivo je da je razlika konstantna, izuzev pri početku rada uređaja dok neravnotežnosti u radu rashladnika dominiraju. Tijekom eksperimenta utvrđen je pad tlaka od 0,23 bar nakon ustaljivanja rada rashladnog uređaja.

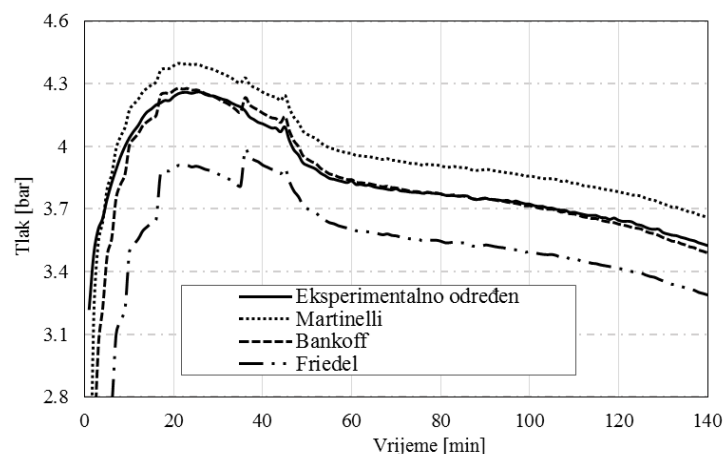


Slika 9. Tlakovi prije i nakon isparivača

Za proračun pada tlaka tri različite korelacije su upotrijebljene i uspoređene. Rezultati su prikazani na zajedničkom dijagramu na kojem je naglašen raspon odstupanja $\pm 5\%$. Dijagram je prikazan na Slici 6 te daje usporedbu izmjerenog tlaka nakon isparivača te korigiranih tlakova uzimajući u obzir izračunati pad tlaka. Najmanje odstupanje dobiveno je koristeći korelaciju prema *Bankoff*-u, a najveće odstupanje za *Martinelli*-evu.



Slika 10. Odstupanja tlakova na izlazu iz isparivača za različite korelacije



Slika 11. Promjena tlaka u vremenu: izmjerena i izračunata korelacijama za pad tlaka

4 Zaključak

U radu je predstavljena analiza isparivača s propanom kao rashladnom radnom tvari. Za potrebe spiralnog isparivača sastavljenog od pravokutnih elemenata određen je pad tlaka sa svrhom usporedbe različitih korelacija dostupnih u literaturi. Uz horizontalne elemente cijevi, u analizi su uzeta u obzir i koljena od 90° . Sve tri uspoređene korelacije nalaze se unutar raspona od $\pm 5\%$ u odnosu na mjerene vrijednosti. Ipak, od uspoređenih korelacija, najbolje poklapanje pokazuje *Bankoff*-ova korelacija te će se u budućim analizama koristiti za potrebe modeliranja cijelokupnog uređaja. Osim pada tlaka, za opis rada isparivača ključan je i prijelaz topline što je ujedno i cilj budućih istraživanja.

Nomenklatura

d_i	– promjer	[m]	Fr_L	– tekući Froudeov broj	[-]
ρ_L	– gustoća	[kg/m ³]	We_L	– tekući Weberov broj	[-]
L	– duljina cijevi	[m]	SH	– temperature pregrijanja (razlika)	[°C]
m	– maseni protok	[kg/s]	T_{ev}	– temperatura isparavanja	[°C]
Re	– Reynoldsov broj	[-]	E, F, H	– konstante Friedelove korelacije	[-]

Literatura

1. I. Colombo, G. G. Maidment, D. Cowan (2015): *Whole life emission for air to water heat pumps: an investigation*, International Congress of Refrigeration, Yokohama
2. G. Dalla Libera (2017). *Modelling of finned coil evaporators with air dehumidification*. Master thesis in Energetic Engineering, University of Padua, Italy.
3. S. W. Churchill (1973). *Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe*. American Institute of Chemical Engineering Journal, pag. 375-376.
4. L. Friedel (1979). *Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase flow*. 3 R Int., pag. 485-491.
5. S. G. Bankoff (1960). *A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow*. J. Heat Transfer, 11, pag. 165-172.
6. R. W. Lockhart and R. C. Martinelli (1949). *Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes*. Chem. Eng. Progr., 4.5, pag. 39-48.
7. ASHRAE Standard 34-2007, *Designation and Safety Classification of Refrigerants*, 2008.
8. S. M. Sami and B. Song (1995). *Heat transfer and pressure drop characteristics of HFC quaternary refrigerant mixtures inside horizontal enhanced surface tubing*. Mechanical Engineering, School of Engineering, University of Moncton, Moncton.