

**PRIKAZ REZULTATA MERENJA I ANALIZE TEHNOEKONOMSKIH
PARAMETARA NA REALIZOVANOM DEMONSTRACIONOM POSTROJENJU ZA
REKUPERACIJU TOPLOTE NA VMA**

**Ivan JOJIĆ, Miodrag ISAKOV, Dimitrije VORONJEC, Institut „Kirilo Savić”a.d. –
Beograd, e-mail: ivan.jojic@iks.rs
Đorđe ČANTRAK, Dejan ILIĆ, Miloš BANJAC, Mašinski fakultet – Beograd
e-mail: mbanjac@mas.bg.ac.rs**

UVOD

Sistem klimatizacije na VMA – Beograd radi sa 100 % svežim vazduhom. Prvobitni sistem rekuperacije toplote otpadnog vazduha na centralnoj pripremi CPV-1 na VMA u Beogradu izveden je sa lamelastim razmenjivačima toplote sa razmakom između lamela $\delta = 1,8$ mm što se u specifičnim radnim uslovima pokazalo kao neadekvatno jer je veoma brzo došlo do začepjenja rekuperatora i do stavljanja sistema rekuperacije van funkcije. U okviru Naučno-istraživačkog projekta tehnološkog razvoja TP18003 urađeno je projektovanje novog sistema rekuperacije i ugradnja novih bakar-aluminijum lamelastih razmenjivača toplote u skladu sa DIN 1946 sa razmakom između lamela

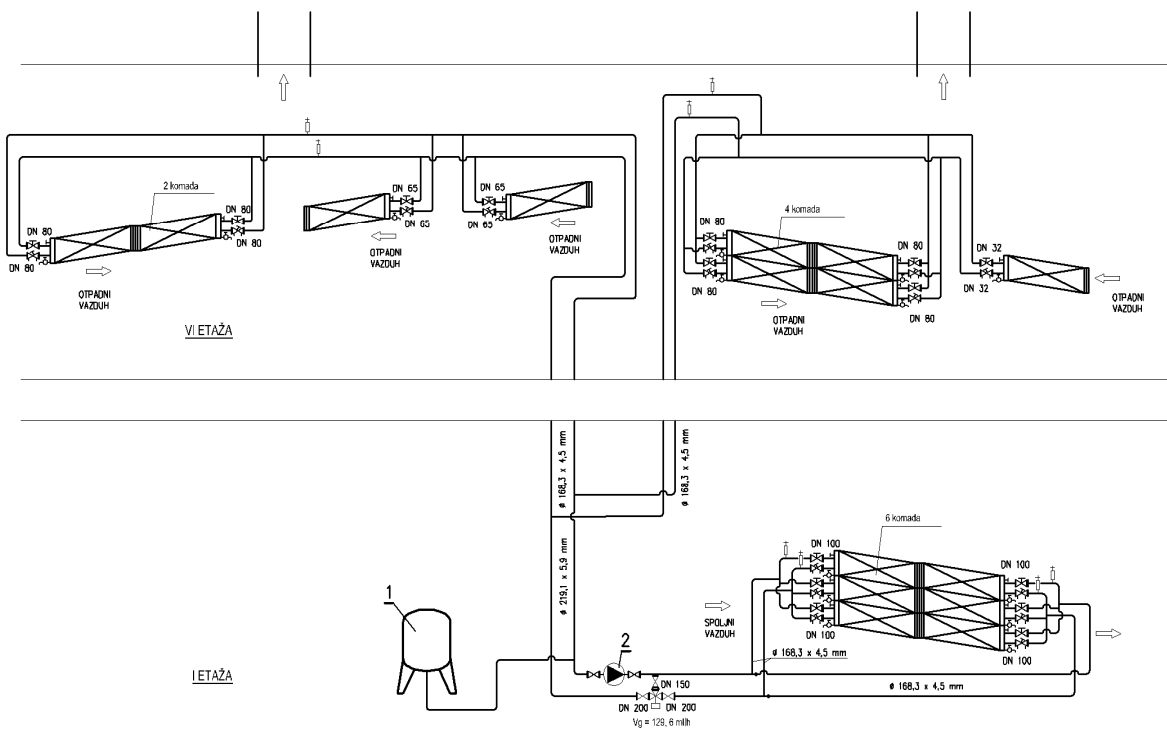
$\delta = 3,0$ mm.

Po puštanju postrojenja u rad izvršeno je merenje karakterističnih termofizičkih parametara.

TEHNIČKI OPIS SISTEMA

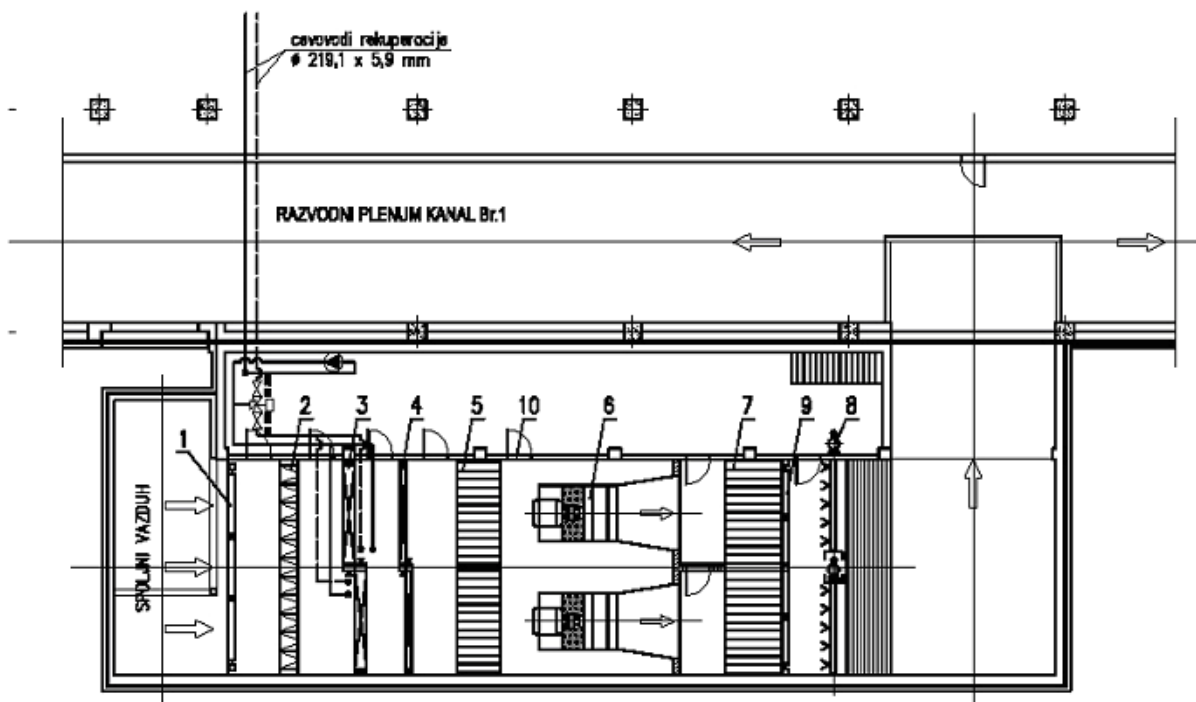
Ugrađeno je 6 lamelnih razmenjivača na usisnoj strani i 9 na odsisnoj. Svi razmenjivači su osmoredi, sa šahovskim rasporedom cevi. Novoprojektovani kapacitet sistema za rekuperaciju otpadne toplote pri spoljnoj temperaturi $t_s = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznosi 1838 kW. Fluid za razmenu toplote je 30% rastvor etilen-glikola.

Na slici 1. data je šema veze novoizgrađenog sistema rekuperacije toplote otpadnog vazduha.



Slika 1. Šema veze sistema rekuperacije CPV-1

Na slici 2. data je dispozicija opreme sistema CPV-1.



Slika 2. Dispozicija opreme centralne pripreme vazduha CPV-1 sa rekuperacijom otpadne toplote

Legenda:

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Demper na motorni pogon | 6. Aksijalni ventilator sa promenljivim kapacitetom |
| 2. Vrećasti filter | 7. Prigušivač zvuka |
| 3. Rekuperativni izmenjivač toplote | 8. Parni ovlaživač vazduha |
| 4. Lamelasti grejač vazduha | 9. Demper na motorni pogon |
| 5. Prigušivač zvuka | 10. Metalna kontrolna vrata |

Metodologija korištena pri termičkom proračunu rekuperatora toplote zasnovana je na istraživanjima ruskih i američkih autora Judina, Karasine, Kanaveca, Kejsa, Londona, Gianolio-a i Cuti-a.

Specifičnost ove metodologije je što se u izrazu za proračun koeficijenta konvektivnog prenosa toplote koristi Reynoldsov broj Re_s čija je karakteristična veličina korak lamele s , tako da se pri istom obliku i rasporedu lamela može vršiti izbor optimalnog cevnog snopa u pogledu prečnika okruglih cevi kao i njihovog rasporeda.

Prema usvojenoj metodologiji koristi se jedinstvena kriterijalna jednačina za proračun koeficijenta konvektivnog prenosa toplote na strani orebrenog dela snopa cevi Gajić i Isakov [2]:

$$Nu_{ok} = m \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_o}{s}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_r}{s}\right)^{-0,14}$$

gde su:

$$Nu_{ok} = \frac{\alpha_{ok} \cdot s}{\lambda}$$

$$Re = \frac{w \cdot s}{\nu}$$

λ , ν , Pr – termička provodnost, kinematski viskozitet i Prantlov broj fluida na njegovoj srednjoj temperaturi

w – brzina fluida u uskom preseku snopa cevi [m/s]

d_o – prečnik osnovne cevi koja nosi rebro [m]

h_r – visina rebra [m]

s – korak rebra na cevi [m]

m, n – koeficijenti koji uzimaju u obzir oblik snopa cevi, odnosno njihov raspored

EKSPERIMENTALNA MERENJA

Merna instalacija

Merenje termofizičkih parametara vazduha izvršeno je na izvedenom demonstracionom postrojenju za dva režima:

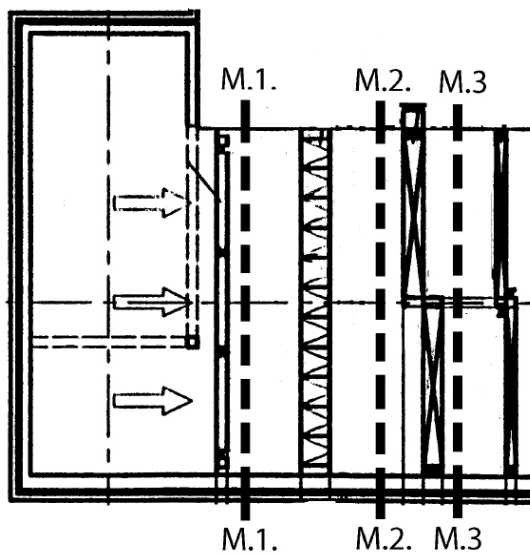
1. U pogonu je samo aksijalni ventilator A (srednje opterećenje 110A)

2. U pogonu su obadva ventilatora i to A sa opterećenjem 110A i B sa opterećenjem 130A.

Ušisna rešetka (demper) je za oba režima merenja bila potpuno otvorena.

Na slici 3. prikazani su merni preseki za merenje termofizičkih parametara:

- Merni presek M1 (neposredno iza dempera) - merenje protoka svežeg vazduha
- Merni presek M2 – merenje temperature i pritiska ispred rekuperativnog razmenjivača toplote
- Merni presek M3 – merenje temperature i pritiska vazduha iza rekuperativnog razmenjivača toplote.

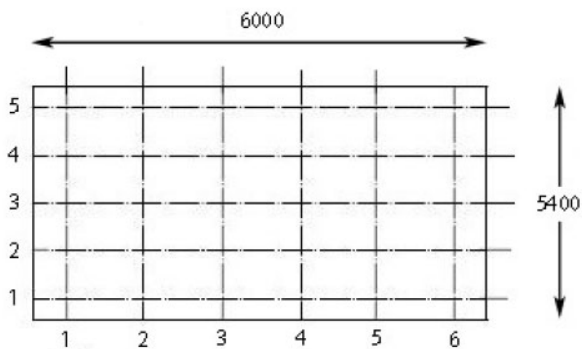


Slika 3. Merni preseki

Merenje brzina je izvršeno turbinskim anemometrom u potrebnom broju tačaka mernog preseka M1 u skladu sa standardom ISO 5802, dok je merenje temperature urađeno u više reprezentativnih tačaka mernih preseka M2 i M3 elektronskim davačima temperature.

Rezultati merenja

Na slici 4. prikazan je raspored mernih tačaka u mernom preseku M1.



Slika 4. Raspored mernih tačaka u mernom preseku M1

U tabelama 1 i 2 prikazane su izmerene vrednosti brzina kao i izračunate vrednosti protoka svežeg vazduha za režime 1 i 2:

TABELA 1. – IZMERENE VREDNOSTI U POLJU BRZINA ZA REŽIM 1

	c_i						c	Q
	[m/s]							
5	2,40	1,67	2,00	0,80	0,60	0,50	2,39	278381
4	3,60	2,40	1,10	0,98	0,50	2,00		
3	2,20	1,00	0,40	0,60	2,20	3,10		
2	3,88	3,60	2,11	2,70	3,81	3,60		
1	2,10	4,10	4,10	4,72	5,87	2,96		
	1	2	3	4	5	6		

TABELA 2. – IZMERENE VREDNOSTI U POLJU BRZINA ZA REŽIM 2

	c_i						c	Q
	[m/s]							
5	5,30	5,50	1,60	1,00	0,32	0,82	4,12	479974
4	7,50	4,50	1,40	2,10	0,32	2,33		
3	3,77	2,50	1,00	1,00	3,16	5,50		
2	7,80	6,10	4,00	6,30	5,80	2,80		
1	3,50	8,00	7,50	8,68	9,55	3,80		
	1	2	3	4	5	6		

U tabelama 3 i 4 date su srednje vrednosti izmerenih temperatura i relativne vlažnosti vazduha ispred i iza rekuperatora, kao i pad pritiska na rekuperatoru za režime 1 i 2.

TABELA 3. – OSREDNJENE IZMERENE VREDNOSTI TEMPERATURE ZA REŽIM 1

	t_{sr}	Δt_{sr}
	°C	°C
Ulaz	0,28	4,58
Izlaz	4,85	

TABELA 4. – OSREDNJENE IZMERENE VREDNOSTI TEMPERATURE ZA REŽIM 2

	t_{sr}	Δt_{sr}
	°C	°C
Ulaz	1,80	4,80
Izlaz	6,60	

Izmerene vrednosti su uz ograničavajući faktor tehničke nemogućnost pronalaženja dovoljno duge prave deonice za merenje protoka, pokazale slaganje sa izabranom proračunskom metodologijom u granicama od 10 % u pogledu kapaciteta rekuperatora.

TEHNOEKONOMSKA ANALIZA

Tehnoekonomska analiza izvršene zamene rekuperatora otpadne toplote sistema CPV-1 na VMA, pokazuje sledeće:

- Srednja temperatura spoljnog vazduha u sezoni grejanja za Beograd:

$$t_s = 4,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Ukupna predračunska vrednost investicionih troškova projektovanja, demontaže nestandardne opreme i delova i ugradnje novih razmenjivača, opreme i delova iznosi:

$$c_i = 9.700.000 \text{ din}$$

- Ukupni procenjeni eksplatacioni troškovi u sezoni grejanja koji se odnose na sistem za rekuperaciju toplote otpadnog vazduha CPV-1 (energija + održavanje):

$$c_e = 900.000 \text{ din/god}$$

- Ukupna količina toplotne energije dobijene u sistemu za rekuperaciju CPV-1 u toku jedne sezone grejanja primenom novih lamelnih razmenjivača toplote iznosi:

$$Q = h z Q_{sr} = 2.198.859 \text{ kWh/god}$$

gde su:

z – broj dana u sezoni grejanja = 175

h - prosečan broj sati dnevno za angažovanje = 14 h

Q_{sr} - srednja časovna ušteda topl. energije za $t_s = 4,6 \text{ } ^\circ\text{C} = 897,49 \text{ kW}$

- Vrednost dobijene toplotne energije po tržišnoj ceni za poslovne prostore u Beogradu:

$$c = c_1 Q = 8.795.436 \text{ din/god}$$

gde je c_1 – jedinična tržišna cena toplotne energije = 4 din/kWh

- Neto vrednost godišnje uštede u troškovima potrošnje toplotne energije:

$$c_n = c - c_e = 7.895.436 \text{ din/god}$$

- Statički period povraćaja uložениh sredstava iznosi:

$$\tau = c_i / c_n = 1,23 \text{ god}$$

- Godišnja ušteda u potrošnji prirodnog gasa kao pogonskog goriva iznosi:

$$N = \frac{Q}{H_d \eta} = 292.401 \text{ m}^3 / \text{god}$$

gde su:

H_d - donja toplotna moć prirodnog gasa = 9,4 kWh/m³

η - stepen korisnosti kotlovskeg postrojenja = 0,8

- Godišnje smanjenje emisije CO₂ iznosi:

$$E_{CO_2} = 1,9 N = 555.563 \text{ kg/god}$$

ZAKLJUČAK

Sistemi klimatizacije koji rade sa 100% svežim vazduhom su veliki potrošači energije tako da je ugradnja sistema rekuperacije toplote u mnogim zemljama EU postala zakonska obaveza. U radu je pokazano i koliko je velika isplativost ovih sistema odnosno koliko je kratak statički period povraćaja uloženi sredstava. Sa druge strane pokazana je i pouzdanost izabrane metodologije proračuna prenosa toplote kod orebrenih lamelastih razmenjivača toplote, što ima poseban značaj s obzirom na složenost samog procesa prenosa, kao i na malu zastupljenost problema u literaturi.

LITERATURA

1. I. Jojić, D. Gajić, B. Aleksić, , 2008, "Glavni mašinski projekat ugradnje novog sistema za rekuperaciju toplote otpadnog vazduha na centralnoj pripremi vazduha CPV-1 za klimatizaciju dela VMA", Institut "Kirilo Savić" - Beograd
2. D. Gajić, M. Isakov, 2001, NIP "Osnove za razvoj konstrukcije i metodologija termotehničkih i hidrauličkih proračuna lamelnih razmenjivača toplote", EVB 2401/2001, Institut "Kirilo Savić" - Beograd, 2001
3. Đ. Kozić, B.Vasiljević, V.Bekavac, 1983, "Priručnik za termodinamiku i prostiranje toplote", Građevinska knjiga - Beograd