

**UNIVERZITET U BEOGRADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET
INSTITUT ZA POLJOPRIVREDNU TEHNIKU
i
ZADRUŽNI SAVEZ SRBIJE**

19. Naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem
AKTUELNI PROBLEMI MEHANIZACIJE POLJOPRIVREDE

19th Scientific Conference
CURRENT PROBLEMS AND TENDENCIES IN AGRICULTURAL ENGINEERING

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS

ISBN 978-86-7834-318-6

UDK 631 (059)

Poljoprivredni fakultet, Nemanjina 6
Zemun – Beograd, Republika Srbija
14.12.2018. godine

ANALIZA UTICAJA TOPLOTNE IZOLOVANOSTI SEKCIJE GREJAČA TUNELSKJE KONVEKTIVNE SUŠARE NA POSTIZANJE RADNIH PARAMETARA, ENERGETSKU EFIKASNOST I EKONOMIČNOST

Mihailo Milanović^{*1}, Ivan Zlatanović², Mirko Komatina³, Milan Dražić², Kosta Gligorević², Nedžad Rudonja³, Miloš Pajić², Milovan Živković²

¹ Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar mašinskog fakulteta

² Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd-Zemun

³ Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet

SAŽETAK

U radu je objašnjen postupak merenja temperature i određivanja toplotnih gubitaka ekperimentalne sušare u cilju povećanja energetske efikasnosti. Merena je spoljašnja temperatura sušare kako bi se utvrdili gubici toplote i potencijali za uštedu energije postavljanjem termoizolacije. Eksperimentalna sušara je podeljena u 15 sekcija na kojima je merena površinska temperatura u toku rada sušare pri vrednostima temperature vazduha koji cirkuliše kroz sušaru 50, 60 i 70 °C. Ustanovljeno je da sekcija grejača ima najviše specifične gubitke toplote, te da bi se postavljanjem termoizolacije na tom delu sušare postigle značajne uštede energije. Time je opravdano postavljanje termoizolacije na sekciju grejača i povećana energetska efikasnost sušare.

Ključne reči: termoizolacija, grejna sekcija, eksperimentalna sušara, energetska efikasnost.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL INSULATION OF THE HEATER SECTION OF TUNNEL CONVECTIVE DRYER ON WORK PARAMETERS, ENERGY EFFICIENCY AND ECONOMY

Mihailo Milanovic^{*1}, Ivan Zlatanovic², Mirko Komatina³, Milan Drazic², Kosta Gligorevic², Nedžad Rudonja³, Miloš Pajić², Milovan Zivkovic²

¹ University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Innovation Center

² University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Nemanjina 6, Zemun, Serbia

³ University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16, Belgrade

ABSTRACT

The paper presents the procedure for measuring the temperature and determining the heat losses of the experimental dryer in order to increase energy efficiency. The external drying temperature is measured to determine heat losses and potentials for energy savings by installing thermal insulation.

* Kontakt adresa: mihailo988@gmail.com

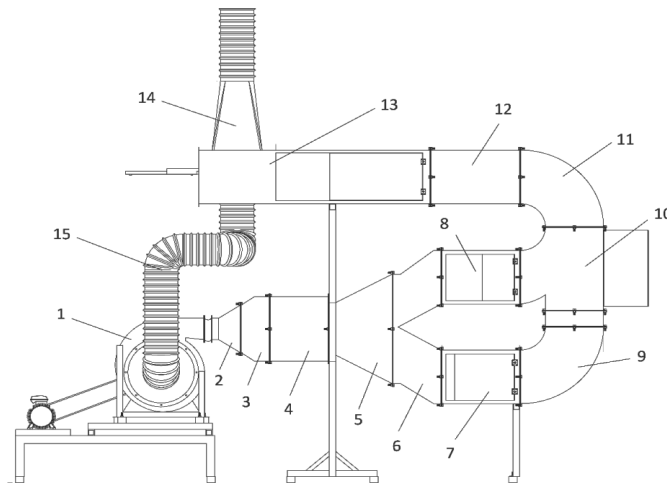
The experimental dryer was divided into 15 sections, and the surface temperatures of the sections were measured during the operation of the dryer at the temperatures of the air circulating through the dryer 50, 60 and 70 °C. It has been found that the section of heaters has the most specific heat losses, and that by installing thermal insulation on that part of the dryer, significant energy savings will be achieved. Thus, it is justified to install thermal insulation on the heaters section and increase the energy efficiency of the dryer.

Keywords: thermal insulation, heating section, experimental dryer, energy efficiency.

UVOD

Proces sušenja je jedan od najznačajnijih i energetski najzahtevnijih industrijskih procesa [1]. Zbog toga je energetska efikasnost od izuzetnog značaja prilikom projektovanja i izrade sušara. Kao značajan fenomen, sušenje se proučava i na Poljoprivrednom fakultetu u Zemunu, gde je napravljena eksperimentalna sušara za voće. Na postojećoj eksperimentalnoj instalaciji – sušari, identifikovane su neizolovane sekcije, čijom bi se toplotnom izolacijom povećala energetska efikasnost. Eksperimentalna sušara je prikazana na slici 1, a radi preciznijeg određivanja temperature, tj. gubitaka toplote, podeljena je u 15 sekcija, i to: 1- centrifugalni ventilator ; 2-difuzor ; 3-sekcija pre grejača ; 4- sekcija grejača ; 5-difuzor ; 6- usmerivač vazduha; 7- donja komora; 8-gornja komora; 9- donje koleno; 10- sekcija za sušenje u fluidizovanom sloju 11- gornje koleno; 12- pretkomora; 13- sekcija za sušenje na lesama; 14 – konfuzor ; 15- crevo.

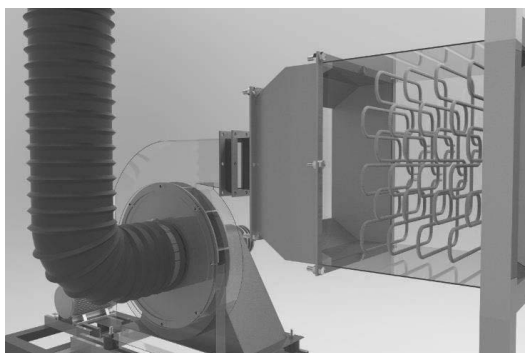
Na postojećoj sušari postoji toplotna izolacija, ali ona nije postavljena na sekcijama 1 (centrifugalni ventilator), 4 (sekcija grejača), 14 (konfuzor) i 15 (crevo). Kako bi se utvrdili tačni gubici toplote na svakoj sekciji i njenog ukupnog učešća u toplotnim gubicima sušare, izvršeno je merenje temperature svih sekcija sušare u tri eksperimenta sa različitim temperaturama vazduha (50, 60 i 70 °C) koji cirkuliše kroz sušaru, a zatim su izračunati gubici toplote na svakoj sekciji. Ustanovljeno je da najveće specifične gubitke, a samim tim i najveći potencijal za smanjenje toplotnih gubitaka ima sekcija grejača sušare.



Slika. 1. Eksperimentalna sušara podeljena po sekcijama
Figure 1. Experimental dryer divided by sections

MATERIJAL I METODE RADA

Eksperimentalna sušara je konstruisana tako da se sušenje materijala vrši toplim vazduhom koji cirkuliše kroz sušaru. Vazduh se potiskuje kroz instalaciju centrifugalnim ventilatorom (sekcija 1), a zagreva u sekciji grejača (sekcija 4). Za zagrevanje vazduha u sušari na raspolaganju su tri grejača snage $600W$ i šest grejača snage $2000W$. Temperatura toplog vazduha koji cirkuliše reguliše se PID termoregulatorom. Za potrebe eksperimenta temperatura vazduha je podešena na tri temperature vazduha - 50 , 60 i 70 °C. Eksperimentalna sušara poseduje sistem za recirkulaciju vazduha, koji je smešten u sekciji 14. Prilikom svih merenja, instalacija je radila u režimu potpune recirkulacije. Merna mesta na svakoj od sekcija određena su tako da srednja temperatura bude što približnija stvarnoj temperaturi površine sekcije. U sekciji grejača smešteno je pomenutih devet električnih grejača, koji su raspoređeni kao što je prikazano na slici 2. Zbog rasporeda grejača, temperatura površine sekcije grejača nije uniformna, već ona strana sekcije grejača bliže uključenom grejaču ima višu temperaturu, tako da je na svakoj strani izabrano 9 mernih mesta, kako bi se ustanovila srednja temperatura ove sekcije. Za sekciju 1 (ventilator) i sekciju 15 (crevo) merenje temperature je takođe vršeno na većem broju tačaka zbog nepravilne geometrije ovih sekcija. Temperature ostalih sekcija utvrđene su tako što je merena po jedna temperatura na svakoj strani sekcije izložene okolnom vazduhu, pod pretpostavkom da se temperatura u mernoj tački ne razlikuje značajno od prosečne temperature površine, što je i potvrđeno dodatnim merenjima termovizijskom kamerom. Tokom eksperimenata vazduh je cirkulisao u krugu 1-2-3-4-5-6-8-10-11-12-13-15-1, gde brojevi predstavljaju brojeve sekcija. Tok cirkulacije vazduha je izabran zbog činjenice da će se većina eksperimentalnih merenja vršiti u komori 8. Samim tim je sekcija 8 imala nešto višu temperaturu od sekcije 7.



Slika 2. Eksperimentalna sušara podeljena po sekcijama

Figure 2. Experimental dryer divided by sections

Korišćeni merni instrumenti za merenje temperature su infracrveni beskontaktni termometar DT8220, opsega merenja $-50\sim 220$ °C, rezolucije $0,1$ °C i tačnosti $\pm 2\%$ ili 2 °C, infracrveni termometar FLIR TG165 tačnosti $\pm 1.5\%$ ili 1.5 °C, opsega merenja od -25 do 380 °C, i rezolucije 0.1 °C, i termovizijska kamera FLUKE Ti100, opsega merenja -20 °C do $+250$ °C, termalne osetljivosti ≤ 0.10 °C na 30 °C (100 mK).

Uprkos složenoj problematici prenošenja količine toplote konvekcijom, ustanovljeno je da je ona proporcionalna razlici temperatura površine preko koje se razmenjuje toplota i

temperature okolnog fluida. Toplotna snaga preneta konvekcijom može se izraziti Njutnovim zakonom konvekcije, čija je matematička interperacija data izrazom [2]:

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

, gde je:

h – koeficijent prelaza toplote [$Wm^{-2}K^{-1}$]

A_s – površina preko koje se razmenjuje toplota [m^2]

T_s – temperatura površine preko koje se razmenjuje toplota [K]

T_∞ – temperatura okolnog vazduha [K]

Za koeficijent prelaza toplote h usvojena je vrednost $h=5 Wm^{-2}K^{-1}$ prema preporukama iz literature [1] za prirodnu konvekciju gasova. Površina svake sekcije je određena korišćenjem modela sušare u softverskom paketu SolidWorks®. Temperatura okolnog vazduha je usvojena kao konstantna prilikom vršenja merenja i iznosi $t_\infty = 23,5 ^\circ C$.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Eksperiment se sastojao iz dve serije merenja, za tri različite temperature toplog vazduha 50, 60 i 70 °C, pri sledećim uslovima:

1. Temperatura prostorije 23.5 °C;
2. Brzina vazduha kroz sušaru je bila 3 ms^{-1} ;
3. Potpuna recirkulacija vazduha.

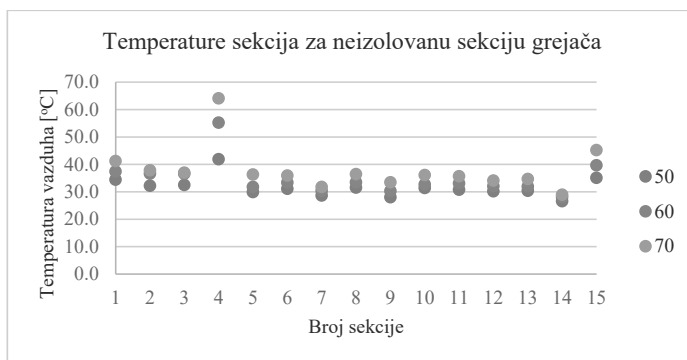
Prva serija eksperimenata urađena je na postojećem stanju sušare. Na postojećoj sušari, toplotna izolacija je postavljena na svim sekcijama sem na sekcijama 1 (centrifugalni ventilator), 4 (sekcija grejača), 14 (konfuzor) i 15 (crevo). Izmerene srednje temperature sekcija za prvu seriju merenja prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Zbirno predstavljene temperature sekcija sušare za temperature vazduha 50, 60 i 70 °C i neizolovanu sekciju grejača

Table 1. Temperatures of the dryer sections for three different air temperatures 50, 60 i 70 °C for uninsulated heater section

Sek. Tem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
50°C	34.4	32.2	32.5	41.9	29.9	31.1	28.6	31.5	28.0	31.4	30.7	30.2	30.4	26.6	35.1
60°C	37.4	36.6	36.6	55.2	31.8	33.3	30.3	33.4	30.3	32.7	33.1	32.1	31.9	28.1	39.7
70°C	41.2	37.8	37.0	64.1	36.3	35.9	31.8	36.5	33.4	36.1	35.7	34.1	34.6	28.9	45.2

Poređenjem temperatura površina sekcija prilikom rada sušare, jasno se može konstatovati da je temperatura površine sekcije grejača (sekcija 4) najviša. Dodatno se može zaključiti da se temperatura površine sekcije grejača značajno povećava sa povećanjem temperature vazduha koji cirkuliše kroz sušaru, nego što je slučaj sa temperaturom ostalih sekcija, kao što se može videti sa dijagrama na slici 3.



Slika. 3. Zbirni dijagram temperatura po sekcijama za tri temperature vazduha u sušari bez izolacije sekcije grejača

Figure 3. Diagram of the heater section for three different air temperatures, for uninsulated heater section

Za režime 50, 60 i 70 °C izračunati su toplotni gubici po sekcijama. Kao što se vidi iz tabele 2, najveći specifični gubici toplote javljaju se na sekciji grejača 4, pa je samim tim opravdano da se postavi izolacija na sekciju grejača. Sekcija 15 (crevo), iako ima veće ukupne toplotne gubitke od sekcije grejača, ima manje specifične toplotne gubitke. Prilikom planiranja postavljanja izolacije mora se uzeti u obzir i cena izolacionog materijala, pa je parametar koji pokazuje ekonomičnost postavljanja izolacije upravo specifični toplotni gubici. Kao što je već napomenuto, merenja temperature vršena su pri potpunoj recirkulaciji vazduha u sušari. Eksperimentalna sušara je predviđena da radi i pri drugim režimima (npr. 100% svežeg vazduha), pa gubici toplote sekcije creva i ventilatora zavise u značajnoj meri od temperature ulaznog vazduha. S druge strane, gubici toplote sekcije grejača zavise od temperature, brzine vazduha i postavljene izolacije, a manje od recirkulacije vazduha.

Tabela 2. Toplotni gubici za režime 50, 60 i 70 °C i neizolovanu sekciju grejača

Table 2. Heat losses for air temperatures 50, 60 i 70 °C for uninsulated heater section

Sekcija	Površina [m ²]	$\Delta T - 50$	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]	$\Delta T - 60$	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]	$\Delta T - 70$	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]
1	0.6	10.9	32.7	54.5	13.9	41.6	69.4	17.7	53.1	88.5
2	0.15	8.7	6.5	43.4	13.1	9.8	65.6	14.3	10.7	71.6
3	0.26	9.0	11.7	45.0	13.1	17.0	65.3	13.5	17.5	67.4
4	0.54	18.4	49.6	91.9	31.7	85.5	158.4	40.6	109.5	202.8
5	0.7	6.4	22.4	32.0	8.3	29.0	41.4	12.8	44.8	64.0
6	0.87	7.6	33.0	37.9	9.8	42.8	49.2	12.4	53.9	61.9
7	0.7	5.1	17.9	25.6	6.8	23.9	34.1	8.3	29.0	41.4
8	0.7	8.0	28.0	40.0	9.9	34.7	49.6	13.0	45.3	64.8
9	0.79	4.5	17.8	22.5	6.8	26.8	33.9	9.9	39.2	49.6
10	1.04	7.9	41.0	39.4	9.2	47.6	45.8	12.6	65.6	63.1
11	0.79	7.2	28.5	36.1	9.6	37.7	47.8	12.2	48.1	60.9
12	0.82	6.7	27.4	33.4	8.6	35.1	42.8	10.6	43.4	52.9
13	2.075	6.9	71.3	34.4	8.4	87.4	42.1	11.1	115.5	55.7
14	0.4	3.1	6.2	15.4	4.6	9.1	22.8	5.4	10.9	27.1
15	1.24	11.6	71.9	58.0	16.2	100.1	80.8	21.7	134.5	108.5

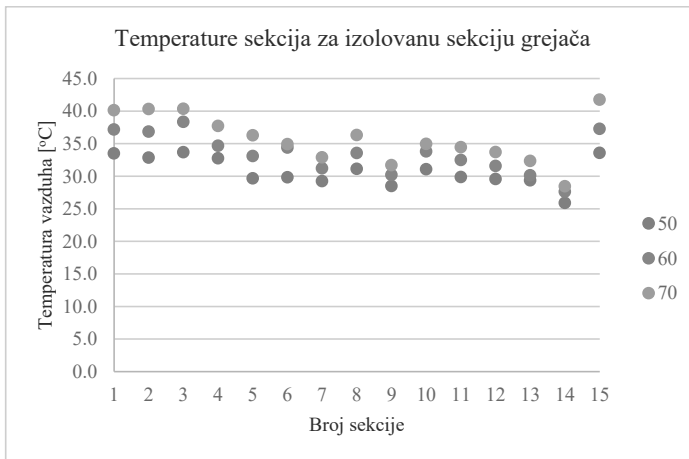
Iz analize temperatura i toplotnih gubitaka jasno se vidi da postoji opravdana potreba da se postavi izolacija na sekciju grejača sušare jer su specifični gubici toplote na toj sekciji najveći. U cilju smanjenja gubitaka toplote sa površine sušare, a samim tim povećanja energetske efikasnosti, sekcija grejača je izolovana kamenom vunom debljine 70mm, koeficijenta toplotne provodljivosti $\lambda = 0,035 Wm^{-1}K^{-1}$ [3]. Kamena vuna je izabrana zbog svojih termofizičkih karakteristika, kao i zbog dostupnosti. Kada je izolacija postavljena, ponovljena su merenja temperatura sekcija pri istim režimima kao i za slučaj pre postavljanja izolacije za 50, 60 i 70 °C, što je prikazano u tabeli 3.

Tabela 3. Zbirno predstavljene temperature sekcija sušare za temperature vazduha 50, 60 i 70 °C i izolovanu sekciju grejača

Table 3. Temperatures of the dryer sections for three different air temperatures 50, 60 i 70 °C for insulated heater section

Sek.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
50°C	33.5	32.9	33.7	32.7	29.7	29.8	29.3	31.1	28.5	31.1	29.9	29.6	29.4	25.9	33.6
60°C	37.2	36.9	38.4	34.7	33.1	34.4	31.2	33.6	30.2	33.8	32.5	31.6	30.1	27.6	37.3
70°C	40.1	40.3	40.4	37.7	36.3	34.9	32.9	36.3	31.7	35.0	34.5	33.7	32.4	28.5	41.7

Poređenjem temperatura površina sekcija nakon postavljanja izolacije, može se zaključiti da je temperatura na površini sekcije grejača (sekcija 4) značajno manja u poređenju sa slučajem bez izolacije ove sekcije. Takođe, temperatura površine sekcije grejača povećava se srazmerno sa povećanjem temperature vazduha koji cirkuliše kroz sušaru. Ovo je prikazano na dijagramu na slici 4.



Slika. 4. Zbirni dijagram temperatura po sekcijama za tri temperature vazduha u sušari sa izolovanom sekcijom grejača

Figure 4. Diagram of the heater section for three different air temperatures, for insulated heater section

Nakon postavljanja izolacije toplotni gubici na sekciji grejača značajno su smanjeni, dok se toplotni gubici ostalih sekcija mogu smatrati nepromenjenim. U tabeli 4 dat je pregled toplotnih gubitaka, kao i razlika temperatura sekcija za slučaj posle izolovanja sekcije grejača. Poređenjem temperatura površina sekcija nakon postavljanja izolacije, može se

zaključiti da je temperatura na površini sekcije grejača (sekcija 4) značajno manja u poređenju sa slučajem bez izolacije ove sekcije. Takođe, temperatura površine sekcije grejača povećava se srazmerno sa povećanjem temperature vazduha koji cirkuliše kroz sušaru. Ovo je prikazano na dijagramu na slici 4.

Tabela 4. Toplotni gubici za režime 50, 60 i 70 °C i izolovanu sekciju grejača
Table 4. Heat losses for air temperatures 50, 60 i 70 °C for insulated heater section

Sekcija	Površina [m ²]	ΔT - 50	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]	ΔT - 60	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]	ΔT - 70	Toplotni gubici [W]	Spec. toplotni gubici [W/m ²]
1	0.6	10.0	30.0	50.0	13.7	41.0	68.4	16.6	49.9	83.1
2	0.15	9.3	7.0	46.8	13.4	10.0	66.8	16.8	12.6	84.0
3	0.26	10.2	13.2	50.9	14.9	19.3	74.3	16.9	21.9	84.3
4	0.54	9.2	25.0	46.2	11.2	30.2	55.9	14.2	38.4	71.1
5	0.7	6.2	21.6	30.9	9.6	33.6	48.0	12.8	44.7	63.9
6	0.87	6.3	27.5	31.6	10.9	47.3	54.4	11.4	49.7	57.1
7	0.7	5.8	20.1	28.8	7.7	27.0	38.5	9.4	32.9	47.0
8	0.7	7.6	26.7	38.1	10.1	35.2	50.3	12.8	44.9	64.1
9	0.79	5.0	19.8	25.0	6.7	26.5	33.5	8.2	32.4	41.0
10	1.04	7.6	39.3	37.8	10.3	53.6	51.5	11.5	59.6	57.3
11	0.79	6.4	25.2	31.9	9.0	35.5	44.9	11.0	43.3	54.8
12	0.82	6.1	24.9	30.4	8.1	33.1	40.4	10.2	41.8	51.0
13	2.075	5.9	60.9	29.3	6.6	68.8	33.2	8.9	91.8	44.3
14	0.4	2.4	4.8	12.0	4.1	8.3	20.6	5.0	9.9	24.8
15	1.24	10.1	62.5	50.4	13.8	85.3	68.8	18.2	113.1	91.2

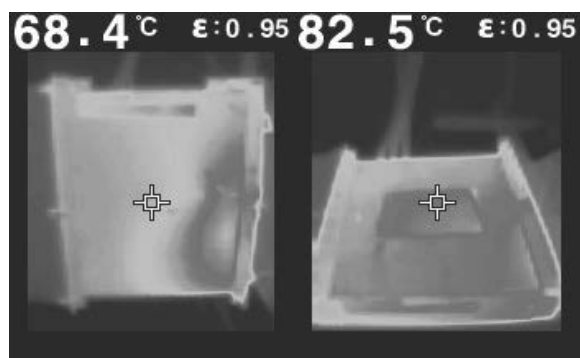
Postavljanjem izolacije na sekciju grejača smanjeni su gubici toplote, a takođe je ostvarena i ušteda energije. Ušteda u toplotnoj snazi nakon postavljanja izolacije na sekciju grejača iznosi od 11,72% do 16,33%, što je prikazano u tabeli 5.

Tabela 5. Ušteda u toplotnoj snazi kada se izoluje sekcija grejača sušare za režime 50, 60 i 70 °C

Table 5. Savings in heat power with insulation of heater section for air temperatures 50, 60 and 70 °C

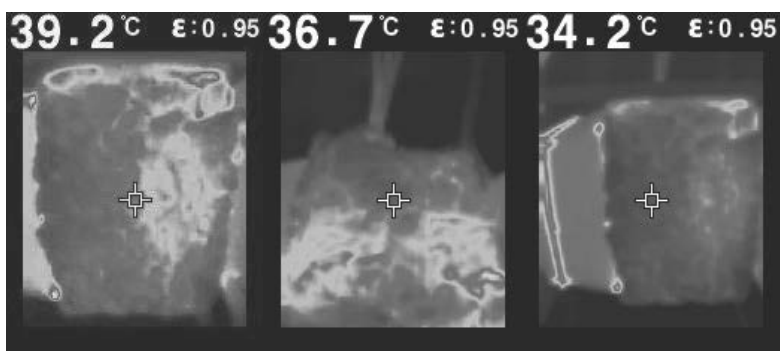
Režim	Ukupni toplotni gubici na instalaciji [W]		Procentualno smanjenje toplotnih gubitaka [%]
	Bez izolacije sekcije grejača	Sa izolovanom sekcijom grejača	
70	820,9	686,8	16,33%
60	628,1	554,5	11,72%
50	465,8	408,5	12,32%

Za što optimalniji odabir mernih mesta sekcije grejača (zbog nehomogenosti temperaturnog polja na površini grejača), kao i za proveru rezultata merenja korišćen je infracrveni termometar FLIR TG165 sa ekranom. Primeri prikaza termovizijskim termometrom dati su za neizolovanu i izolovanu sekciju grejača na slikama 5 i 6.



Slika. 5. Grejač (sekcija 4) za režim 70°C - prikaz termovizijskim termometrom– bez izolacije

Figure 5. The heater section for air temperature of 70°C, for insulated heater section



Slika. 4. Grejač (sekcija 4) za režim 70°C - prikaz termovizijskim termometrom– sa izolacijom

Figure 4. The heater section for air temperature of 70°C, for uninsulated heater section

ZAKLJUČAK

Izolovanjem sekcije grejača dovedeno je do značajnih smanjenja gubitaka toplote na eksperimentalnoj instalaciji - sušari. U skladu sa rezultatima merenja temperatura po sekcijama, može se zaključiti da su najveći specifični gubici toplote na sekciji grejača (sekcija 4). Izolovana je sekcija grejača i pri tome je dovedeno do smanjenja gubitaka toplote do 16,33%. Primećeno je da sekcija 15 (crevo) takođe ima potencijala za smanjenje gubitaka toplote, pa je u planu izolovanje i te sekcije sušare.

LITERATURA

- [1] Dincer, I., Zamfirescu, C., *Drying Phenomena - Theory and Application*, John Wiley & Sons, Ltd., 2016
- [2] Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer, Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill Education, 2015.
- [3] Kozić, Đ., Vasiljević, B., Bekavac, V., *Priručnik za Termodinamiku u Jedinicama SI, petnaesto izdanje*, Mašinski fakultet Beograd, 2008.