



dept

Departman za energetiku  
i procesnu tehniku

# PREDNOSTI UPOTREBE TOPLOTNE PUMPE U KOMORNOJ SUŠARI ZA PEČURKE

---

Nikola B. Milivojević

nikola.milivojevic@uns.ac.rs

Damir D. Đaković

djakovic@uns.ac.rs

# SADRŽAJ

---

- Materijalni i toplotni bilans sušare
- Regulacija temperature sušenja
- Regulacija protoka vazduha
- Tehno-ekonomska analiza

# UVOD

---

- Sušenje pečurki vrste šampinjoni (*Agraricus Bispourus*)
- Sušara sa toplotnom pumpom ili gasnim kotlom
- Upotreba solarnih kolektora
- Automatizacija procesa



Šampinjoni (*Agraricus Bispourus*)

# Materijalni bilans sušare

---

- Kapacitet sušare 100 kg vlažnog materijala
- Početna i krajnja vlažnost pečurki: 90 % i 10 % (po vlažnoj osnovi)
- Izdvojena količina vlage: 88,9 kg
- Količina osušenih pečurki: 11,1 kg
- Potrebna količina vazduha za sušenje: 12.054 kg

# Parametri sušenja

---

- Početna temperatura vazduha za sušenje 60 °C
- Brzina strujanja vazduha 1 m/s
- Sušenje u tankom sloju
- Sušenje u toku cele godine
- Proračun prema najnepovoljnijim vremenskim uslovima u toku godine

Tabela 1. Temperatura i relativna vlažnost vazduha u januaru

Temperatura vazduha [°C]				Relativna vlažnost vazduha [%]			
vreme				vreme			
7 h	14 h	21 h	srednja	7 h	14 h	21 h	srednja
-7,2	-2,2	-5,5	-4,9	91	79	90	87

# Kinetika sušenja

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + c$$

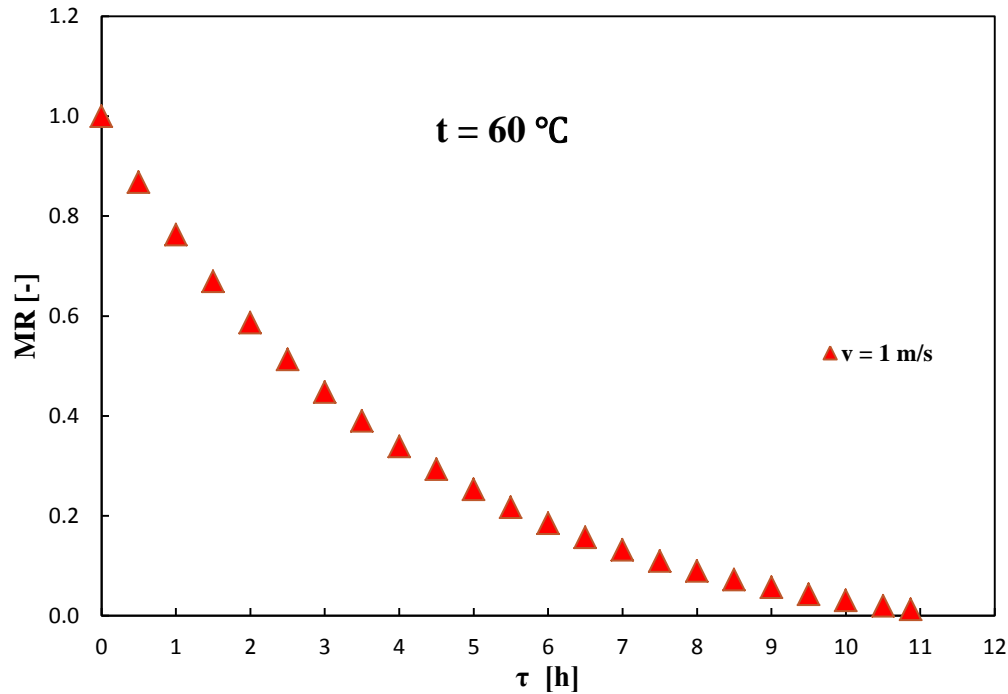


Tabela 1. Brzina i vreme sušenja

Vreme [h]	Brzina sušenja [kg <sub>w</sub> /kg <sub>sm</sub> h]	Vlažnost [kg <sub>w</sub> /kg <sub>sm</sub> ]
0	0	9
1	2,14	6,86
2	1,59	5,28
3	1,25	4,03
4	0,98	3,05
5	0,77	2,27
6	0,61	1,66
7	0,48	1,18
8	0,38	0,81
9	0,30	0,51
10	0,23	0,27
10,87	0,16	0,11

# Toplotni bilans sušare

---

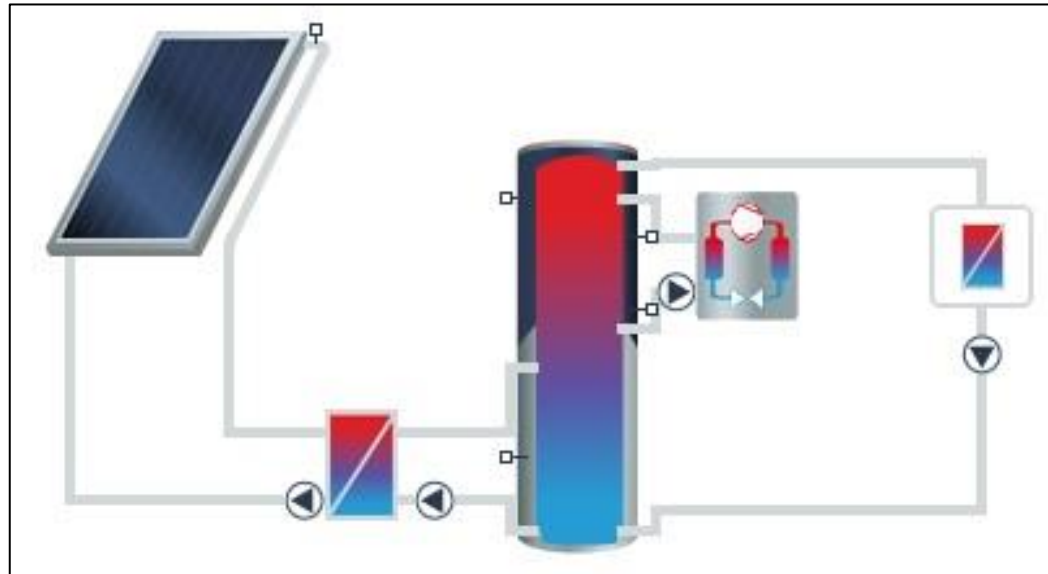
- Zagrevanje vazduha u razmenjivaču toplote sa orebrenim cevima

$$\dot{Q} = \dot{L} \cdot c_{pV} \cdot (t_2 - t_1)$$

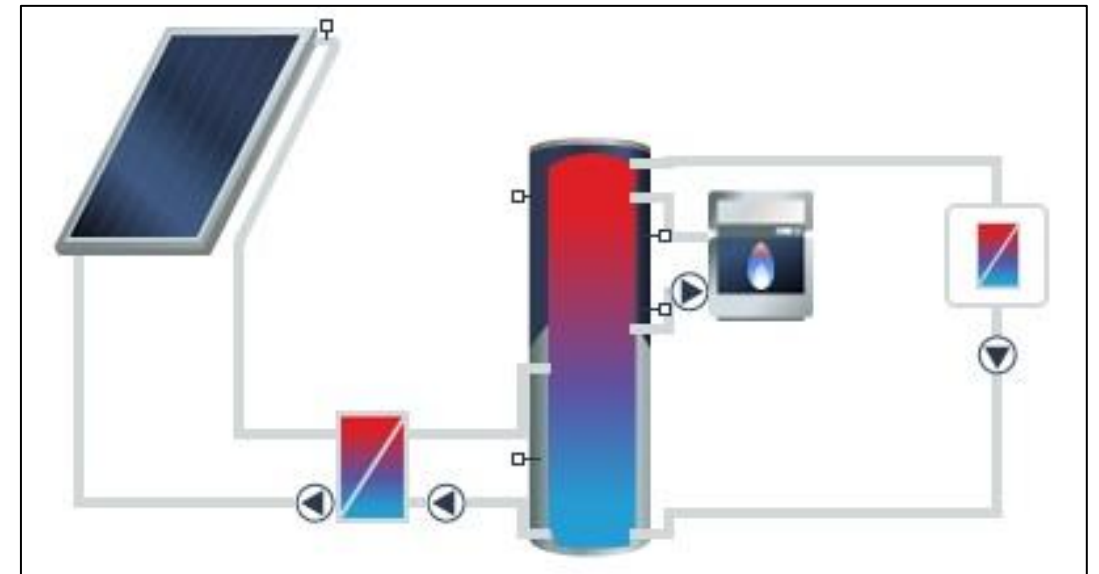
- Maksimalni protok vazduha za sušenje: 0,9 kg/s
- Temperatura vode u razmenjivaču toplote: 80 °C
- Temperatura vazduha za sušenje: 60 °C
- Maksimalna potrebna snaga razmenjivača toplote: 61 kW

# Analiza troškova rada sušare

- Simulacija rada sistema u softveru TSol



Scenario 1 - Toplotna pumpa zemlja - voda u kombinaciji sa solarnim kolektorima



Scenario 2 - Gasni kotao u kombinaciji sa solarnim kolektorima



# Režimi rada sušare

---

- Režim 1 - bez rekuperacije otpadnog vazduha i bez regulacije protoka vazduha
- Režim 2 - sa rekuperacijom otpadnog vazduha i bez regulacije protoka vazduha
- Režim 3 - bez rekuperacije otpadnog vazduha i sa regulacijom protoka vazduha
- Režim 4 - sa rekuperacijom otpadnog vazduha i sa regulacijom protoka vazduha

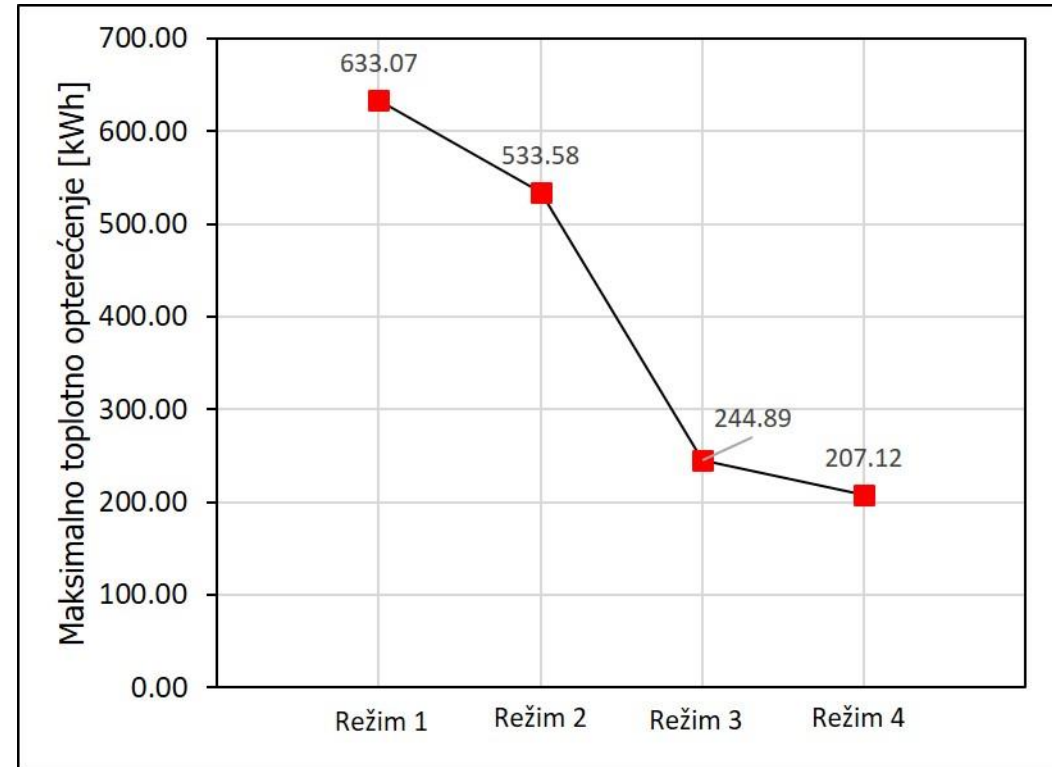
Simulacija rada sistema je izvršena za rad sušare u toku cele godine u trajanju od 11 h dnevno, u periodu od 7 h pre podne do 18 h posle podne.

# Rezultati simulacije rada sušare

Prosečna temperatura u jutarnjim časovima za mesec januar:  $-7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

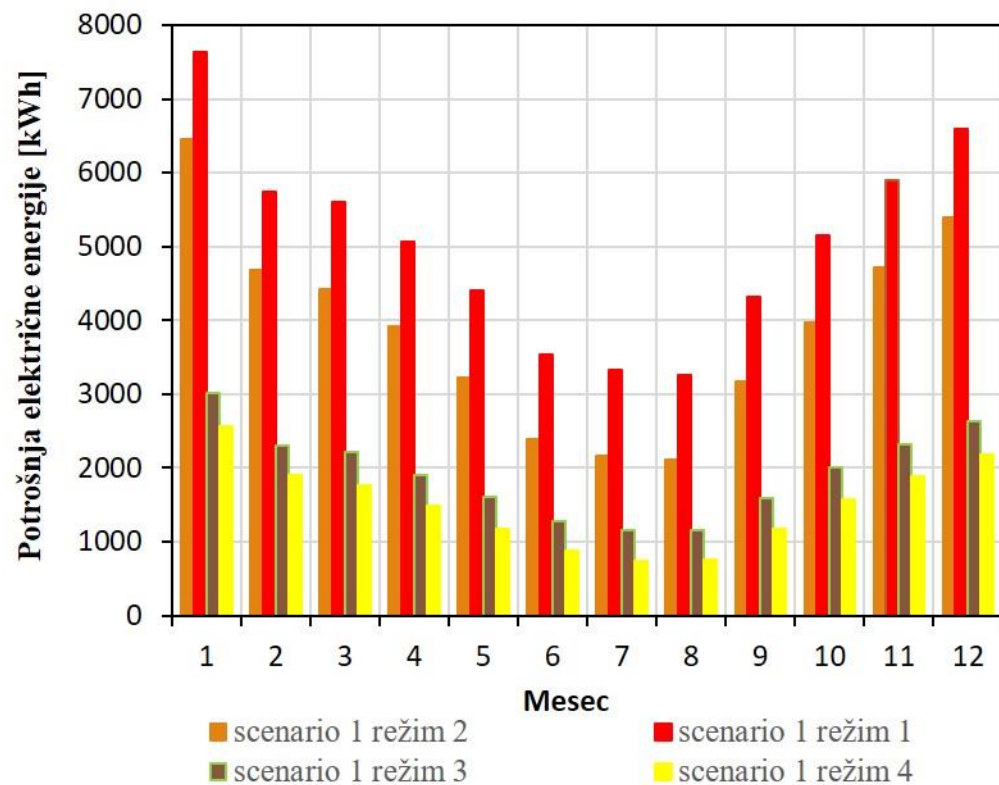
Maksimalni protok vazduha:  $0,9\text{ kg/s}$

Temperatura zagrevanja vazduha:  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

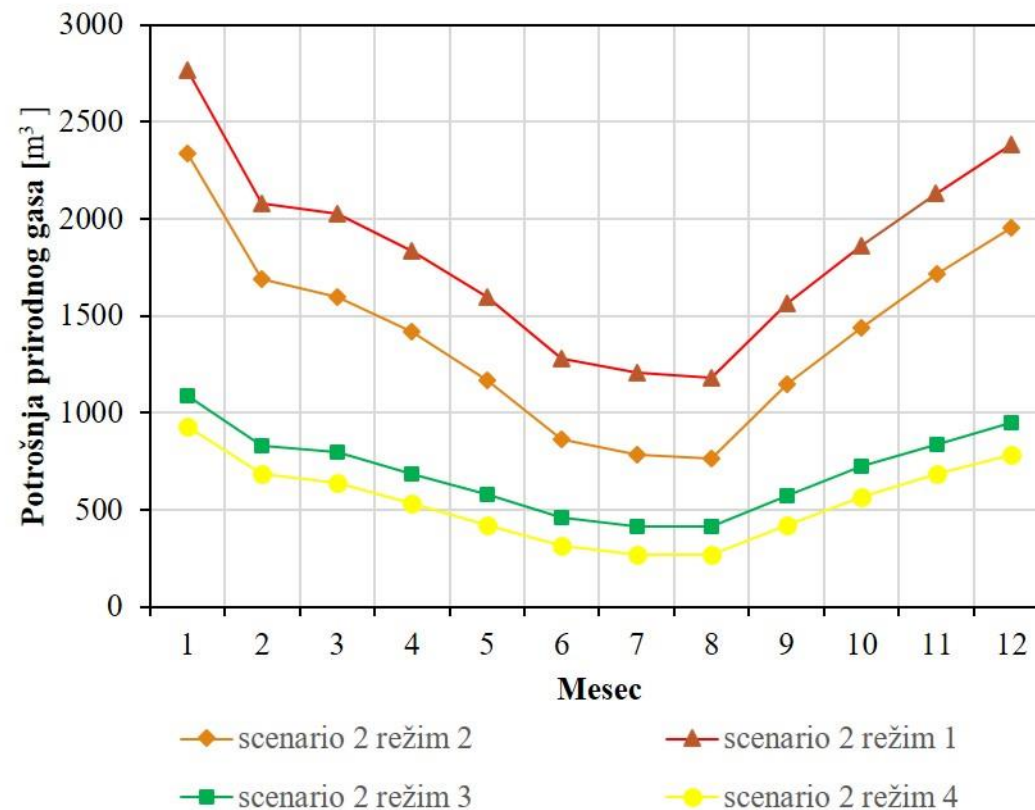


Dnevno maksimalno toplotno opterećenje u januaru

# Rezultati simulacije rada sušare



Godišnja potrošnja električne energije



Godišnja potrošnja prirodnog gasa

# Rezultati simulacije rada sušare

Tabela 3. Godišnji troškovi i potrošnja goriva

Sistem	scenario 1 režim 1	scenario 1 režim 2	scenario 1 režim 3	scenario 1 režim 4	scenario 2 režim 1	scenario 2 režim 2	scenario 2 režim 3	scenario 2 režim 4
Potrošnja struje [kWh]	60.517	46.629	23.165	6.531	x	x	x	x
Potrošnja gasa [m <sup>3</sup> ]	x	x	x	x	21.920	16.890	8.380	6.531
Godišnji troškovi el. energije [RSD]	1.025.098	744.109	279.914	199.651	x	x	x	x
Godišnji troškovi gasa [RSD]	x	x	x	x	849.684	655	325	253
Prosečni troškovi po šarži [RSD]	2.808	2.038	767	547	2.327	1.793	890	694

# Regulacija temperature vazduha

---

- PID regulacija temperature
- Regulacija protoka vode kroz razmenjivač toplote na osnovu temperature vazduha u sušari
- Regulacioni ventil protoka sa aktuatorom

# Regulacija temperature vazduha

---

Tabela 4. Potrošnja toplotne energije pri regulaciji temperature i bez regulacije protoka za mesec januar

Vreme [h]	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura [°C]	-7,2	-6,0	-5,0	-4,1	-3,4	-2,8	-2,4	-2,2	-2,1	-2,2	-2,5	-2,9
Protok vazduha [kg/s]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Q[kWh]	60,8	59,7	58,8	58,0	57,3	56,8	56,5	56,3	56,2	56,3	56,5	

Ukupna potrošnja toplotne energije u datom periodu: 633 kWh

# Regulacija protoka vazduha

---

- Regulacija protoka = ušteda energije
- Regulacija protoka promenom brzine obrtanja ventilatora
- Frekventna regulacija
- Kombinacija sa rekuperacijom = ušteda energije i do 70 %

# Regulacija protoka vazduha

---

Tabela 5. Potrošnja toplotne energije pri regulaciji protoka vazduha i temperature za mesec januar

Vreme [h]	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura [°C]	-7,2	-6,0	-5,0	-4,1	-3,4	-2,8	-2,4	-2,2	-2,1	-2,2	-2,5	-2,9
Protok vazduha [kg/s]	0,90	0,67	0,53	0,41	0,33	0,26	0,20	0,16	0,13	0,10	0,07	
Q[kWh]	61,1	44,6	34,5	26,7	20,7	16,3	12,7	10,0	7,9	6,1	4,2	

Ukupna potrošnja toplotne energije: 244 kWh

Ušteda: 60 %



# Investiciona ulaganja

Troškovi konstrukcije i opreme:

cca 27.500 €

Godišnji troškovi rada:

cca 1700 €

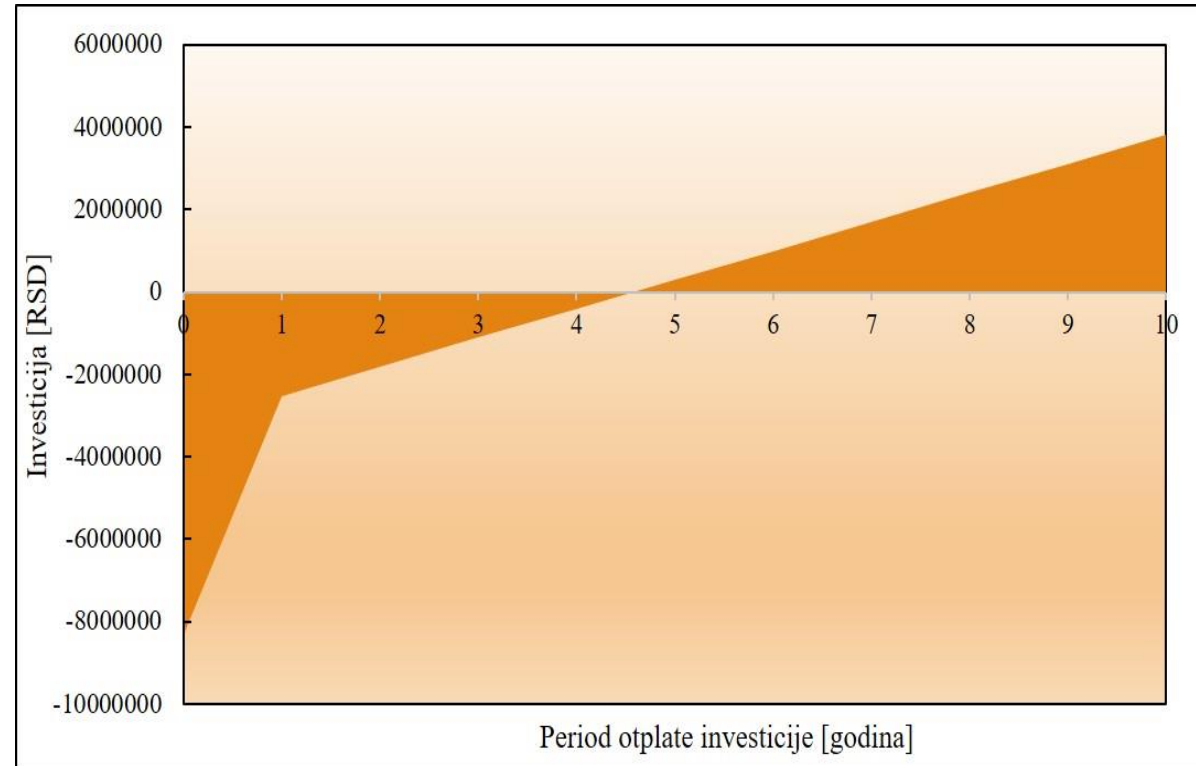
Troškovi svežih pečurki:

cca 43.500 €

Dobit ostvarena prodajom

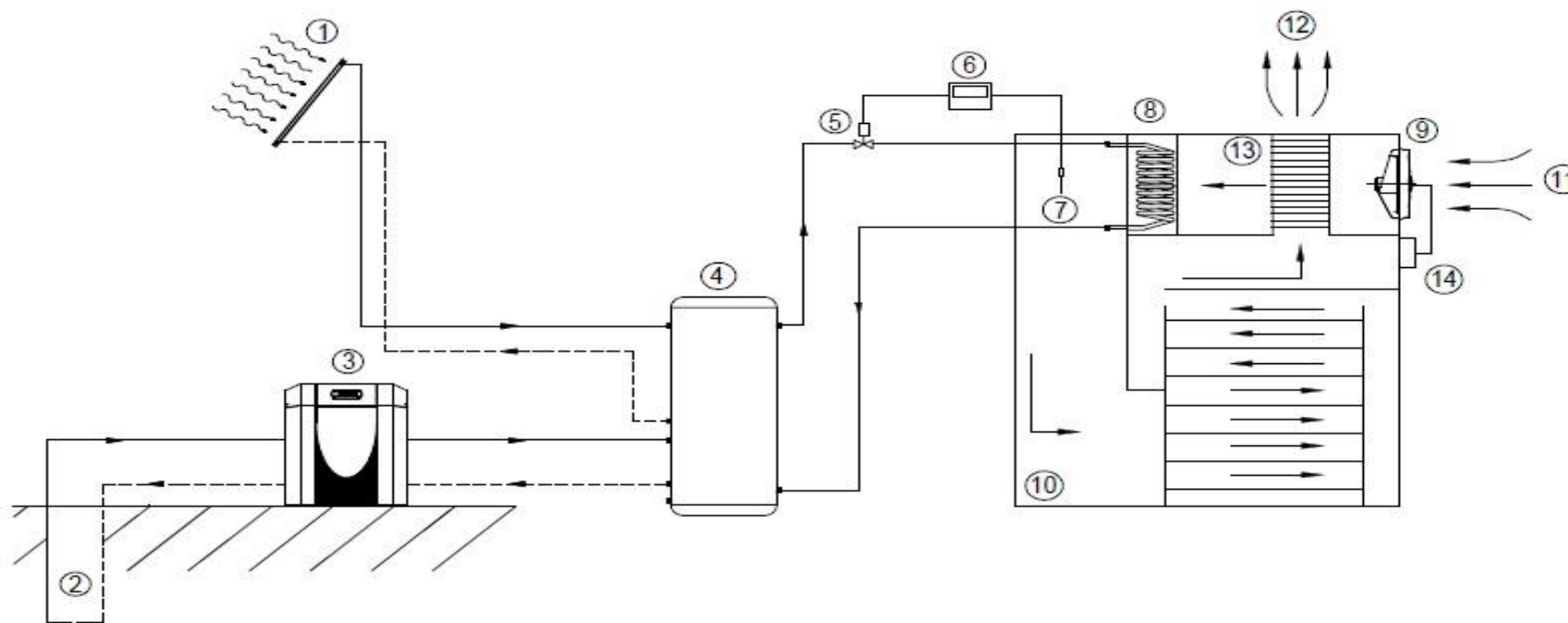
sušenih pečurki:

cca 51.700 €



Period otplate investicije

# Sistem toplotne pumpe zemlja - voda i solarnih kolektora



- 1 - Solarni kolektori 2 - Geotermalne sonde 3 - Toplotna pumpa 4 - Akumulacioni rezervoar 5 - Regulacioni ventil  
6 - PID regulator 7- Temperaturna sonda 8 - Razmenjivač toplote 9 - Ventilator 10 - Sušara 11 - Ulaz svežeg vazduha  
12 - Izlaz otpadnog vazduha 13 - Rekuperator

# Zaključci

---

- Ekonomska opravdanost primene toplotnih pumpi u odnosu na gasne kotlove
- Niži troškovi rada
- Period otplate investicije 4,5 godina
- Zavisnost perioda otplate od tržišne cene osušenih pečurki
- Visoka početna investiciona ulaganja

HVALA NA PAŽNJI!

---