

# REKUPERACIJA TOPLOTNE ENERGIJE PRIMENOM TOPLOTNE PUMPE

## THERMAL ENERGY RECOVERY BY USING HEAT PUMP

JOZSEF M. NYERS, ARPAD NYERS, LEHEL NYERS, ROBERT SANTA,  
Polytechnic Engineering College of Subotica, Subotica

*U članku je prikazan jedan izvedeni sistem za rekuperaciju toplote iz otpadne vode. U rekuperaciji toplote neposredno učestvuju jedan površinski razmenjivač toplote i dve toplotne pumpe. Spomenute komponente su redno vezane. Čista voda se dobija iz bunara sa 40 m dubine i zagreva se sa 14°C na 50°C. Otpadna voda se hladi sa 45°C na 13°C. Protok čiste i otpadne vode je isti i istovremeni. Navedenim rekuperacionim procesom toplote postiže se veoma visok energetske stepen dobrote, oko 85%.*

*This paper deals with a system for waste water heat recovery. One surface heat exchanger and two heat pumps are directly involved in heat recovery. The above-mentioned components are connected in order. Clean water is obtained from the well, from depth of 40m, and water is heated from 14°C to 50°C. Waste water is cooled down from 45°C to 13°C. The flow rate of clean and waste water is equal and simultaneous. By this heat recovery process, a very high energy quality coefficient of approx. 85% is achieved.*

**Ključne reči:** rekuperacija; toplotna pumpa; energetske stepen dobrote; ekonomičnost; otpadna voda; čista voda

**Key words:** recovery; heat pump; energy quality coefficient; efficiency; waste water; clean water

### 1. Uvod

U procesu proizvodnje subotičke galanterijske firme vrši se pranje gotovih proizvoda. Za pranje se troši velika količina tople vode, 5000 litara na čas, temperature od 50°C. Čista voda se dobija iz više bunara sa dubine od 40 m. Temperatura čiste bunarske vode se kreće između 13°C i 14°C. Potrebna snaga za zagrevanje te količine vode sa 13°C na 50°C je oko 215 kW. Bez rekuperacije praonicu bi napustila količina otpadne vode 5000 L/h na temperaturi oko 45°C.

Primenom rekuperativnog sistema toplotna energija iz otpadne vode prenosi se na ulaznu čistu vodu. Temperatura i protok ulazne kao i izlazne vode približno su isti i kreću se oko 5000 kg po času između 13°C i 14°C.

## 2. Struktura rekuperativnog sistema

Rekuperativni sistem se sastoji od sledećih komponenata:

- tri bunara dubine 40 m za izvor sveže vode,
- tri centrifugalne pumpe za podizanje i strujanje vode iz bunara,
- pločasti razmenjivač toplote,
- toplotna pumpa za nižu temperaturu (prva),
- toplotna pumpa za višu temperaturu (druga),
- termički izolovan rezervoar za toplu čistu vodu, izdignut na držače,
- termički izolovan rezervoar za toplu otpadnu vodu, smešten u zemlju,
- centrifugalna pumpa za podizanje i strujanje otpadne vode iz podzemnog rezervoara,
- cevovod za dovođenje čiste vode,
- cevovod za odvođenje otpadne vode,
- sistem za automatsko upravljanje,
- sistem mernih instrumenata.

## 3. Funkcionisanje sistema

U centru zbivanja rekuperativnog sistema je razmena toplotne energije između tople otpadne vode i čiste hladne vode.

Prvi stepen razmene toplote se ostvaruje u pločastom protivsmernom površinskom razmenjivaču toplote. U razmenjivaču sa jedne strane struji čista hladna voda iz bunara, a sa druge strane topla otpadna voda iz praonice. Strujnu energiju za oba fluida obezbeđuju centrifugalne pumpe.

Drugi stepen razmene toplote realizuje se u prvoj toplotnoj pumpi. Čista voda struji preko dobošastog kondenzatora, dok otpadna voda struji preko isparivača toplotne pumpe.

Treći stepen razmene toplote odvija se u drugoj toplotnoj pumpi. Toplotne pumpe su redno vezane, zato čista voda iz kondenzatora prve toplotne pumpe struji preko kondenzatora druge toplotne pumpe. Otpadna voda iz isparivača prve toplotne pumpe vodi se u isparivač druge toplotne pumpe.

Čista zagrejana voda iz kondenzatora druge toplotne pumpe skuplja se u rezervoaru, dok se ohlađena otpadna voda neposredno ispušta u kanalizaciju.

Rezervoar čiste tople vode je izdignut i termički izolovan. Iz ovog rezervoara otvaranjem kuglastog ventila čista topla voda se pušta slobodnim padom u mašine za pranje.

Iz mašine za pranje otvaranjem drugog kuglastog ventila topla otpadna voda se ispušta u cevovod i slobodnim padom sliva u podzemni rezervoar. Rezervoar je od vode i termički izolovan i nalazi se u zemlji. Crpljenje vode iz ovog rezervoara vrši se centrifugalnim pumpama.

## 4. Regulacija i upravljanje sistemom

Zadatak regulacije je da obezbedi odgovarajuću količinu i protok čiste i otpadne vode u toku funkcionisanja sistema. Pri regulaciji se polazi od toga da otpadna voda mora da napusti sistem, a zbog kontinuiteta ista količina čiste vode istovremeno mora da uđe u sistem. Elementi za regulaciju protoka su prigušni ventili koji su postavljeni u usisnu granu centrifugalnih pumpi. Spomenuta tradicionalna regulacija funkcioniše uz rasipanje strujne energije. Bolje rešenje je regulacija protoka vode preko bro-

ja obrtaja centrifugalnih pumpi. Međutim, regulacija protoka preko broja obrtaja centrifugalne pumpe zahteva mnogo složeniji i skuplji upravljački sistem i upravljanje pomoću mikroprocesora.

Upravljanje radom celog sistema je bazirano na činjenici da rezervoari ne smeju biti prazni niti prepunjeni. U oba rezervoara su postavljene senzori nivoa sa mikroprekidačem. Sistem je uključen ako je nivo vode u oba rezervoara iznad minimalnog i ispod maksimalnog. Sistem ostaje u radu sve dok nivo vode u jednom rezervoaru ne postigne maksimum ili ne padne na minimum.

Dok sistem radi, rezervoar za čistu vodu se puni, a rezervoar za otpadnu vodu prazni.

## 5. Nadzor sistema

Za sada se nadzor celog sistema vrši vizuelno. Izuzetak čine toplotne pumpe čiji je nadzor rešen unutar uređaja. Nadzor sistema se realizuje primenom mernih instrumenata, termometara i manometara. Manometri su postavljeni u potisne grane centrifugalnih pumpi ispred pločastog površinskog razmenjivača. Termometri mere temperaturu vode u oba rezervoara, zatim ispred i iza pločastog razmenjivača, kao i temperaturu ulazne i izlazne vode za obe toplotne pumpe.

Na rezervoaru za čistu vodu postavljeni su pokazivači nivoa vode. Nivomeri su izrađeni od providnih staklenih cevi.

## 6. Matematički opis

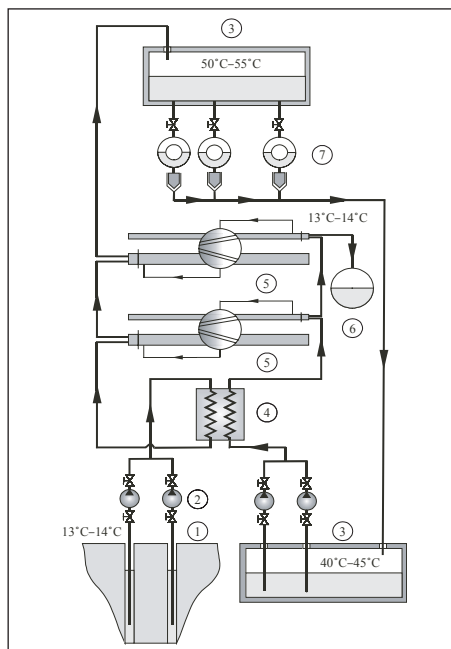
Pri posmatranju rekuperaciju toplotne energije osnovno pitanje uvek je energetski stepen dobrote procesa. Odgovor možemo dobiti primenom matematike, određivanjem količine razmenjene toplotne energije i uloženog mehaničkog rada za pokretanje elektromotora pumpi i kompresora.

Matematički opis se daje za stacionarni režim rada rekuperativnog sistema.

### 6.1. Predata količina toplote u jedinici vremena sa strane otpadne vode ( $q_{ov}$ )

Prenos toplote se ostvaruje u tri stepena:

- u primarnom delu pločastog površinskog razmenjivača,
- u isparivaču prve toplotne pumpe.



Slika 1. Šema rekuperativnog sistema sa razmenjivačem i toplotnim pumpama; 1 – bušotina; 2 – centrifugalna pumpa; 3 – rezervoar; 4 – razmenjivač toplote; 5 – toplotna pumpa; 6 – odvodna cev; 7 – mašina za pranje rublja

– u isparivaču druge toplotne pumpe.

Uređaji u postrojenju su redno vezani; zato možemo napisati sledeću jednačinu:

$$q_{ov} = q'_{PIZ} + q'_{1TP} + q'_{2TP} = C_{pv} \cdot \dot{m}_{ov} \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

$$\Delta T = T_u - T_i \text{ [K]}$$

gde je:

$q_{OV}$  [W] – predata toplotna snaga sa strane otpadne vode,

$q'_{PIZ}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u primarnom delu razmenjivača,

$q'_{1TP}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u isparivaču prve toplotne pumpe,

$q'_{2TP}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u isparivaču druge toplotne pumpe,

$C_{pv}$  [J/kgK] – toplotni kapacitet vode,

$\dot{m}_{ov}$  [kg/s] – maseni protok vode,

$T_u$  [K] – temperatura ulazne otpadne vode,

$T_i$  [K] – temperatura izlazne otpadne vode.

### 6.2. Priljena toplotna snaga sa strane čiste vode ( $q_{cv}$ )

$$q_{cv} = q''_{PIZ} + q''_{1TP} + q''_{2TP} = C_{pv} \cdot \dot{m}_{ov} \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

$$\Delta T = T_u - T_i \text{ [K]}$$

gde su:

$q_{CV}$  [W] – priljena toplotna snaga sa strane čiste vode,

$q''_{PIZ}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u sekundarnom delu razmenjivača,

$q''_{1TP}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u kondenzatoru prve toplotne pumpe,

$q''_{2TP}$  [W] – razmenjena toplotna snaga u kondenzatoru druge toplotne pumpe,

$P_{komp}$  [W] – potrebna snaga za pogon kompresora,

$P_{pump}$  [W] – potrebna snaga za pogon centrifugalne pumpe.

### 6.3. Potrebna električna snaga za pokretanje elektromotora kompresora i centrifugalnih pumpi

$$P_e = \sum_1^2 P_{komp} + \sum_1^4 P_{pump} = P_{komp1} + P_{komp2} + 4P_{pumpa}$$

### 6.4. Energetski stepen dobrote ( $\eta$ )

Rekuperativni energetski stepen dobrote je odnos između priljene količine toplotne snage u jedinici vremena sa strane čiste vode i uložene električne snage kompletnog postrojenja:

$$h = \frac{q_{CV}}{P_e} \quad (6\div 6,5)$$

## 7. Energetski stepen dobrote na osnovu merenih vrednosti

U pogonu rekuperativnog sistema energije izvršena su merenja potrebnih parametara stanja radi određivanja energetskog stepena dobrote i vremenskog perioda vraćanja investiranog novca.

Merene vrednosti su :

– temperatura ulazna otpadne vode	$T_{ov} = 37^{\circ}\text{C}$
– maseni protok otpadne vode	$\dot{m}_{ov} = 87 \text{ kg/min}$
– temperatura ulazne čiste vode	$T_{CVU} = 14^{\circ}\text{C}$
– temperatura izlazne čiste vode	$T_{CVI} = 52^{\circ}\text{C}$
– protok čiste vode	$\dot{m}_{CV} = 79 \text{ kg min}^{-1}$
– primljena električna snaga elektromotora toplotne pumpe 1	$P_{\text{hpump1}} = 15\,337 \text{ W}$
– primljena električna snaga elektromotora toplotne pumpe 2	$P_{\text{hpump2}} = 19\,338 \text{ W}$

Vrednost primljene toplotne snage čiste vode:

$$Q_{CV} = C_{pv} \cdot \dot{m}_{ov} \cdot \Delta T = 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \cdot 4740 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (52 - 14) ^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{CV} = 209\,479 \text{ [W]}$$

Vrednost ukupne uložene električne snage:

$$P_e = \sum_1^2 P_{\text{toplpump}} = 15\,337 + 19\,338 \text{ [W]}$$

$$= 34\,675 \text{ [W]}$$

Vrednost energetskog stepena dobrote rekuperacije:

$$h = \frac{P_{CV}}{P_e} = \frac{209\,479 \text{ [W]}}{34\,675 \text{ [W]}} = 6,05 \text{ [-]} \quad (83,5\%)$$

## 8. Ekonomska analiza

Trenutna (2000. g.) prosečna cena električne energije za privredu Srbije iznosi 0,0263 €/kWh.

Predviđena prosečna potrošnja čiste vode je 5 000 kg/h.

Potrebna snaga za zagrevanje 5000 kg/h čiste vode sa 13°C na 50°C je 215 kW.

Dnevno se radi u dve smene ukupno 16 h.

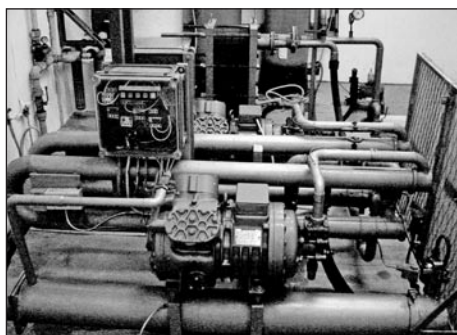
Potrošena energija dnevno 215 kW 16 h = 3440 kWh/dan.

Broj radnih dana godišnje:

$$(52 - 4) \text{ [nedelja /god. 5 dan/nedelja]} = 240 \text{ dan/god.}$$

Godišnja potrošnja toplotne energije u obliku električne energije:

$$3440 \text{ kWh} \cdot 240 \text{ dan/god.} = \mathbf{825\,600 \text{ kWh/god.}}$$



Slika 2. Sekundarna, primarna, toplotna pumpa i pločasti razmenjivač toplote

Rekuperativni sistem na godišnjem nivou prosečno troši za zagrevanje vode od 5 000 kg/h, sa 13°C na 50°C sledeću količinu električne energije:

$$34,67 \text{ kW} \cdot 16 \text{ h} \cdot 240 \text{ dan/god.} = 133 \text{ 132 kWh/god.}$$

Godišnja ušteda električne energije primenom rekuperativnog sistema je:

$$825.600 \text{ kWh/god.} - 133 \text{ 132 kWh/god.} = \mathbf{692 \text{ 468 kWh}}$$

Vrednost uštedene električne energije godišnje:

$$660 \text{ 480 kWh/god.} \cdot 0,0263 \text{ €/kWh} = \mathbf{18 \text{ 212 € /god.}}$$

Ukupna investicija za rekuperativni sistem je oko 60 000 €.

Period povratka investiranog novca:

$$60 \text{ 000 €} / 18 \text{ 212 €} = \mathbf{3,29 \text{ godina}}$$

## 9. Zaključak

Na osnovu navedenih činjenica možemo konstatovati da je priloženi rekuperativni sistem u energetske smislu veoma efikasan. Energetski stepen dobrote sistema je veoma visok, kreće se između 6 i 6,5. Ušteda je u procentima izražena:

$$(1-1/6) 100\% = 83\% \text{ ili}$$

$$(1-1/6,5) 100\% = 85\%$$



Slika 3. Mašine za pranje rublja, a iznad njih termički izolovani rezervoar za čistu vodu

Sa ovakvom uštedom period vraćanja uloženog novca je relativno kratak – iznosi svega 3–3,5 godine.

Pored energetske uštede rekuperativni sistem čuva okruženje direktno i indirektno. Direktno, jer topla otpadna voda ne izlazi u toplom stanju u kanalizaciju. Otpadna voda se čisti filtracijom, a nečistoća ne odlazi u kanalizaciju. Indirektno, zbog ogromne uštede toplotne energije troši se manja količina električne energije, a time termocentrale koriste manje fosilnih goriva i manje opterećuju okolinu emisijom  $\text{CO}_x$  i  $\text{NO}_x$ .

## 10. Literatura

- [1] **Nyers, J., G. Stoyan**, *The discrete evaporator model's solution for heat pump by means of Gauss–Newton method*, Bull. Appl. Maths, 799/92, Balatonfüred, 1992.
- [2] **Nyers, J., G. Stoyan**, *A Dynamical Model Adequate for Controlling the Evaporator of a Heat Pump*, Internationale Journal of Refrigeration, 1994, Vol. 17, No. 2, 1994, pp. 101–108.
- [3] **Nyers, J.**, *Heat energy transfer between heat pump and floor heating in steady operation mode*, Hőerőgépek és környezetvédelem kongresszus, Proceedings 274–278, Tata, 1997.
- [4] **Nyers, J.**, *Grejanje i hlađenje poslovne zgrade primenom toplotne pumpe sa podnim cevnim paketima*, SMEITS, Beograd, 1998.
- [5] **Nyers, J.**, *Comparison of a traditional and a microprocessor-controlled heat pump control strategy*, International Conference, Proceedings 141–146, Schweinfurt, May 2001.
- [6] **Nyers, J.**, *Monitoring heat pumps with discret components. International Conference, INES 2002*, Opatija, 26–29 maj 2002.
- [7] **Nyers, J.**, *The diagnostics of heat pumps with the application of a microprocessor*, 20th International Conference on “Science in Practice”, Osijek, 5–6. maj, 2003.

kgH