

# METODE SMANJENJA POTROŠNJE ENERGIJE U SUŠARAMA ZA DRVO (REKUPERACIJA TOPLOTE)\*

Vladislav Zdravković

UDK 674.047.3:66.042.882  
Stručni rad

**Izvod:** Konvencionalni sistemi za sušenje drveta su energetska neefikasni jer se velika količina toplote gubi kada se topao, vlažan vazduh odstrani iz sušare, dok se istovremeno troši dodatna energija na zagrevanje svežeg vazduha koji je doveden spolja. Vlažan vazduh je još uvek topao kada se odstranjuje iz sušare. Ako bi se ta toplota iz vlažnog vazduha, putem posebnog uređaja-rekuperatora, na neki način povratila, pre njegovog izlaska iz sušare i upotrebila za delimično zagrevanje svežeg vazduha, značajno bi se smanjili troškovi za toplotnu energiju. Procene proizvođača rekuperatora o uštedi energije se kreću od 10% do 23%..

**Ključne reči:** sušenje rezane građe, rekuperacija toplote, troškovi sušenja.

## METHODS OF REDUCING THE CONSUMPTION OF ENERGY IN WOOD DRYING KILNS (HEAT RECUPERATION)

**Abstract:** Conventional wood drying systems are energy inefficient because a lot of heat is lost when the warm, moist air is dispelled, and energy is used to heat more fresh air incoming outside the kiln. The moist air still is hot when it is vented from the kiln. If that heat can be recovered from the moist air before it is exhausted and used to heat fresh air, by special device-recuperator, energy costs can be reduced significantly. The assessments of some recuperators producers about energy savings are between 10% and 23%..

**Key words:** sawn wood drying, heat recuperation, wood drying costs.

### 1. UVOD

Povećanje troškova energije primorava proizvođače i korisnike sušara da smanje troškove sušenja. Veliki deo toplotne energije se troši na grejanje vazduha i sušenje drveta, prema podacima FAO od 1,00-2,85 GJ/m<sup>3</sup>. U poslednje vreme neki proizvođači sušara razvijaju sisteme za ponovno iskorišćenje toplote iz toplog, vlažnog vazduha koji se izbacuje izvan sušare. To je toplota koja se kod klasičnih sušara gubi kada se vlažan, topao vazduh izbacuje napolje putem ventilacionih otvora. Sistemi rekuperacije toplote su česti u zemljama gde su zimske temperature ispod -20°C. Te niske temperature zahtevaju veliku količinu toplotne energije potrebne da se svež vazduh doveden spolja zagreje na temperaturu koju zahteva režim sušenja, kako bi se ciklus sušenja nastavio. Danas postoje tehnološko

tehnička rešenja koja omogućavaju da se sve skuplja energija efikasnije koristi. Jedan od načina je upotreba uređaja koji izlaznom vazduhu oduzima maksimalno toplotu pre nego ga ispusti izvan sušare, i tako dobijenu toplotu koristi za zagrevanje svežeg ulaznog vazduha. U ovome radu razmatrane su mogućnosti primene takvih uređaja – rekuperatora procenjena je njihova efikasnost i ekonomski efekti.

### 2. PREDMET I CILJ RADA

Predmet istraživanja u ovom radu mogućnosti uštede energije u konvencionalnim sušarama za rezanu građu, sa posebnim osvrtom na pravilno rukovanje i održavanje sušare, ugradnju modernih kontrolera broja obrtaja glavnih elektromotora i procesa sušenja uopšte. Izdvojeno se tretira primena efikasnih rekuper-

atora toplote čija je uloga da povrate deo toplote koja odlazi zajedno sa zasićenim vazduhom iz sušare.

Osnovni cilj je da se afirmišu primena relativno jeftinog sistema za bolje iskorišćenje toplotne energije, i unapredi ciklus sušenja rezane građe u ekonomskom, ekološkom i socijalnom smislu. Zbog velikog broja varijabli koje utiču na efikasnost rekuperatora toplote (stanje sušare, vrsta drveta, dimenzija, spoljašnja temperatura, razlike u cenama energije i troškova rada) nije bilo moguće napraviti tačnu ekonomsku analizu, ali je napravljena orijentaciona procena troškova i perioda isplate ovakvih sistema.

*Dr Vladislav Zdravković, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.*

\* Rad je finansiran sredstvima projekta TR20026 Ministarstva nauke Republike Srbije.

### 3. METODE SMANJENJA UTROŠKA ENERGIJE U SUŠARAMA

Nekoliko jeftinih metoda za smanjene utroška svih vrsta energije mogu se primeniti u svakoj sušari za drvo. Naime potrebno je primeniti konzistentan program održavanja kako izvora toplotne energije, tako same sušare za drvo. Mere koje treba sprovesti uključuju:

- Redovno održavanje sistema za grejanje, sprečavanje korozije i zakrečenja u izmenjivačima toplote. U suprotnom, često dolazi do otežanog protoka vode i smanjenog prenosa toplote.
- Redovno održavanje i zamena gumenih zasuna u sušari, čija je uloga da spreče ili umanje nefikasno strujanje vazduha iznad i sa strane složaja.
- Sprečavanje curenja-gubitka toplote iz sušare kroz vrata sušare i spojeve između sekcija. Curenje pare se najbolje primećuje zimi. U slučaju curenja potrebno je zameniti ili popraviti zaptivke, i izvršiti površinski tretman zidova i krova sušare.
- Efikasan način smanjenja gubitaka toplote u sušari je održavanje i zamena toplotne izolacije, kako zidova same sušare, tako izolacije komponenata, kao što su ventili, spojnice razdelnici i pumpe. Kod sušara starije konstrukcije koeficijent razmene toplote je 0,35–0,45 W/m<sup>2</sup>°K, a kod novijih sušara on je 0,15–0,20 W/m<sup>2</sup>°K. Pažnju treba posvetiti i izolaciji poda sušare, jer njegova dobra izolacija takođe smanjuje gubitke toplote i skraćuje vreme zagrevanja postrojenja. Bolja izolacija može doneti oko 17% ukupne uštede energije u projektu. (Horn, 2004).
- Dobra izolacija svih komponenti u sistemu za snabdevanje sušare toplotom (razdelnici, ventili, pumpe, cevi) mogu doneti uštede do 5 GWh

godišnje, u odnosu na neizolovane, tako da je period isplativosti ugradnje izolacije 3–4 meseca. Moderniji, fleksibilni sistem izolacije se lako postavlja ali je skuplji, donosi uštedu oko 3GWh godišnje, i period isplativosti je oko jedne godine. Bolja izolacija pomenutih sistema može doneti uštedu od 20% (Horn, 2004).

- Optimizacija režima sušenja je uvek aktuelno pitanje. Istraživanja Horn (Salin 2001, Salin 2004) pokazala su da u mnogim slučajevima postoji mogućnost povećanja temperature sušenja i prilagođavanje kontrolnog programa na veću psihrometarsku razliku. Na primer, pri sušenju šarže od 70 m<sup>3</sup> smrče preseka 50x100mm od početne vlažnosti od 70% do konačne vlažnosti od 18% postignute su sledeće uštede: vreme sušenja je smanjeno za 21,5%, sa 144 h na 113 h. Potrošnja energije je smanjena za 12,4%, sa 278 kWh/m<sup>3</sup> na 243 kWh/m<sup>3</sup>.
- Postoje veliki potencijali za uštedu električne energije ako se instaliraju frekventni inverteri za kontrolu broja obrtaja ventilatora. Neka norveška istraživanja su pokazala da se pri sušenju smrče dimenzija 75x150 mm, dobija isti sadržaj vlage kao i kvalitet građe ako se putem kontrole frekvencije rada motora snaga smanji za 60%. Pri smanjenju broja obrtaja motora treba biti oprezan i uveriti se da je brzina strujanja vazduha u svim delovima složaja dovoljna da se sušenje pravilno odvija.
- Primena sistema za rekuperaciju toplote izlaznog vazduha može doneti značajne uštede toplotne energije. Zbog aktuelnosti, složenosti problema i velikog broja varijabli ovaj sistem ćemo razmotriti detaljnije u daljem tekstu.

### 4. PRINCIP RADA REKUPERATORA

Rekuperator je izmenjivač toplote čija je namena da povрати deo izgubljene toplote preko gasova koji se ispuštaju iz procesa. Izmenjivač toplote sklop namenjen za efikasnu razmenu toplote između dva medijuma koji su odvojeni čvrstim zidom tako da se nikada ne mešaju.

Rekuperator toplote za sušare je izmenjivač toplote tipa vazduh-vazduh, posebno konstruisan za sušare za drvo. Jedinica rekuperatora toplote je napravljena od nerđajućeg čelika sa aluminijumom u zoni izmenjivača toplote. Komponente od aluminijuma su maksimalno efikasne u izmeni toplote, dok komponente od nerđajućeg čelika obezbeđuju otpornost na koroziju i trajnost. Tipičan rekuperator ima toplotnu izolaciju debljine oko 6,35 cm. Tipična jedinica za rekuperaciju se pričvršćuje za krov sušare pomoću posebnog profila od nerđajućeg čelika koji služi kao nosač i kao zaptivka (slika 1).

Svaka jedinica sadrži dva aluminijumska reverzibilna ventilatora koje pokreću specijalni motori sa frekventnom regulacijom broja obrtaja snage 1 kW, od kojih jedan služi za ulazni vazduh u sušaru a drugi za izlazni vazduh iz sušare. Vrlo je važno da je smer okretanja ventilatora na rekuperatoru usklađen sa smerom okretanja glavnih ventilatora u sušari, tako da kada se smer kretanja glavnih ventilatora promeni, automatski se menja i smer ventilatora u rekuperatoru. (slika 2).

Jedinica za elektronsku kontrolu rekuperatora sadrži kolo za kontrolu broja obrtaja i smera ventilatora u rekuperatoru, sistem zaštite, PLC i sistem za hlađenje. Kontrolna jedinica upravlja ventilacijom sušare, tako što varira brzinu i upravlja smerom obrtanja u toku ciklusa sušenja, a u skladu sa režimom sušenja koji je pod kontrolom računara. Sistem može da radi u tri moda: kao rekuperator koji radi u skladu sa režimom sušenja, u modu za brzo uklanjanje vazduha iz sušare pokretanjem oba

ventilatora na rekuperatoru u istom smeru-da izvlače vazduh iz sušare, ili se oba ventilatora mogu podesiti da ubacuju svež vazduh u sušaru, kako bi je brzo ohladili, za slučaj hitne intervencije u smislu popravke i održavanja.

Pojednostavljeno, konvencionalna sušara u toku procesa sušenja ubacuje svež vazduh spolja i zagreva ga, čime vazduh dobija kapacitet da sadrži (veže) veću količinu vlage. Zagrejan vazduh struji kroz složajevе drveta. Neravnoteža između sadržaja vlage u drvetu i u suvom vazduhu dovodi do toga da se vlaga iz drveta ispušta u obliku vodene pare i biva apsorbovana u vazduhu. Kada vazduh postane maksimalno vlažan (zasićen) i ne može da apsorbuje više vlage, otvaraju se klapne i on biva odstranjen iz sušare. Svež spolješnji vazduh se ponovo uvodi u sušaru i ciklus se ponavlja.

Takvi sistemi su energetski neefikasni jer se velika količina toplote gubi kada se topao, vlažan vazduh odstrani iz sušare, dok se istovremeno troši dodatna energija na zagrevanje svežeg vazduha koji je doveden spolja. Vlažan vazduh je još uvek topao kada se odstranjuje iz sušare. Ako bi se ta toplota iz vlažnog vazduha na neki način

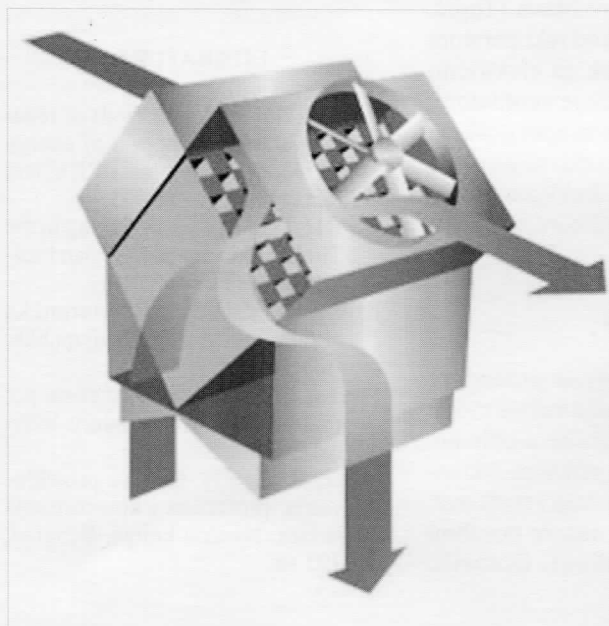


Slika 1: *Rekuperatori na krovu sušare*  
Figure 1: *Recuperators on the roof of the kiln*

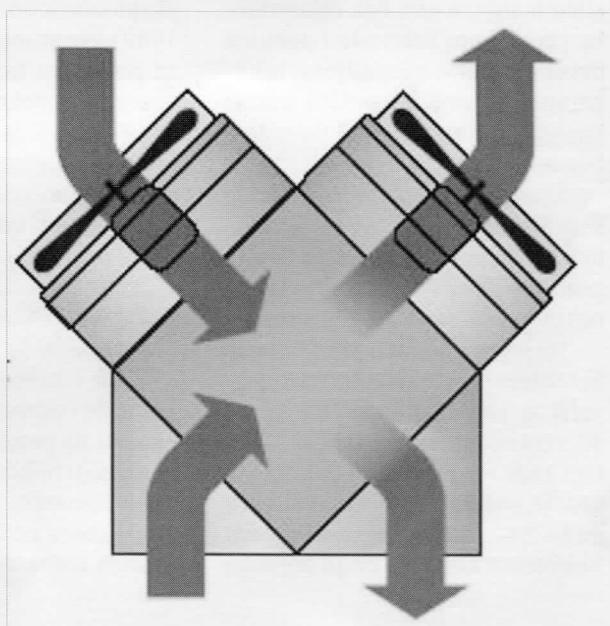
povratila, pre njegovog izlaska iz sušare i upotrebila za delimično zagrevanje svežeg vazduha, značajno bi se smanjili troškovi za toplotnu energiju.

Sistem rekuperacije toplote je baziran na tome da topao vlažan vazduh koji izlazi iz sušare prvo prelazi preko aluminijumskog izmenjivača toplote. Prelaskom

preko izmenjivača toplote, topao vazduh ga zagreva. Na taj način se oduzima toplota izlaznom vazduhu i upotrebljava se za zagrevanje svežeg vazduha dovedenog spolja. Kako je ulazni svež vazduh sada topliji, potrebno je manje energije da se završi njegovo zagrevanje do temperature koju propisuje režim sušenja.



Slika 2: *Izgled ventilatora u rekuperatoru*  
Figure 2: *Fans in the recuperator*



Slika 3: *Poprečni presek rekuperatora sa reverzibilnim ventilatorima*  
Figure 3: *Cross section of recuperator with reversible fans*



## 5. PROCENA EKONOMIČNOSTI UGRADNJE REKUPERATORA

Troškovi sušenja drveta sastojе se od četiri osnovna elementa: kapitalne investicije, troškova sirovine, troškova energije i troškova rada, kao što su troškovi punjenja i pražnjenja sušare kao njene eksploatacije i održavanja. Troškovi energije za sušenje takođe se mogu podeliti u četiri kategorije: troškovi za toplotnu energiju, troškovi za pokretanje vazdušne struje u sušari, troškovi sistema za automatiku i upravljanje i troškovi za ekstrakciju zasićenog vazduha iz sušare (ako je takav sistem ugrađen).

Upotreba rekuperatora je važna u ekonomskom, ekološkom i socijalnom pogledu. Dublja ekonomska analiza je otežana zbog velikog broja varijabli koji utiču na konačnu uštedu, kao što su konstrukcija sušare, vrsta drveta koja se najviše suši, dimenzije građe, početna i konačna vlažnost drveta, lokacija, ali se može napraviti gruba procena na osnovu literarnih podataka. Istraživanja sprovedena u Danskoj pokazala su efikasnost primene rekuperatora tako što se poredila potrošnja energije kod 16 sličnih sušara sa i bez rekuperatora, pri sušenju iste vrste i debljine drveta. Sušare opremljene rekuperatorima trošile su 33% manje energije u poređenju sa sušarama bez rekuperatora.

Upotreba rekuperatora može da smanji ukupne troškove jer se sa istom količinom energije može osušiti značajno veća količina drveta, po nekim podacima i 40–50% više.

Na primer, prema analizi Groupe Schneider, tipična sušara srednjeg/velikog kapaciteta od 190 m<sup>3</sup> sa 10 ventilatora snage od po 3 kW koji rade 90 časova nedeljno, 48 nedelja godišnje, troši 129.600 kWh godišnje. Ako se ugradi sistem frekventne kontrole broja obrataja

ventilatora i snaga se smanji na 80% pune snage, potrošnja će biti 103.680 kWh godišnje. Proračuni su pokazali da je moguće obavljati efikasno sušenje čamove građe sa 60% pune snage ventilatora, ako se vodi računa o minimalnim brzinama strujanja vazduha u svim delovima složaja i svim delovima sušare.

Različiti proizvođači rekuperatora toplote navode različite procenete uštede energije u odnosu na konvencionalne sisteme, i oni se kreću od 10% a najčešće od 15–23%. Studije pokazuju da uštede zavise od spoljašnjih uslova, koji su podeljeni u tri različite kategorije: ekstremna zima, prosečna zima, i prosečno leto. Efikasnost rekuperacije toplote je utoliko veća ukoliko je spoljna temperatura niža. Ako za jedinicu uzmemo prosečnu letnju temperaturu od 30°C, tada će ušteda na prosečno niskoj zimskoj temperaturi od 10°C biti 50% veća, a na ekstremno niskoj prosečnoj zimskoj temperaturi od -5°C biti tri puta veća nego leti (Cooper, 2004).

Opravdanost recirkulacije i njen optimalni stepen moguće je odrediti samo na osnovu tehničko-ekonomske analize uzimanjem u obzir vrednosti investicionih i eksploatacionih sredstava (Topić, 1989). Na primer kod rekuperatora se povećava trošak za električnu energiju za pokretanje ventilatora, ali to ne znači da će ukupni troškovi biti veći, pogotovo ako se primene pomenute mere za frekventnu kontrolu glavnih ventilatora.

## 6. ZAKLJUČAK

Čak i jednostavne procedure kontrole i održavanja sušare mogu ukazati na potencijalne probleme, omogućiti njihovo efikasno otklanjanje i smanjiti zastoje i troškove. Kod izbora nove sušare posebnu pažnju treba posvetiti izolaciji,

tako da ona bude odgovarajuća za projektovane temperature sušenja i ostale uslove. Vrlo je važna i izolacija prateće opreme, cevi, ventila, razdelnika, elektroventila i ostalog van same komore. Upotreba motora sa frekventnom regulacijom broja okretaja i odgovarajućim softverom može doneti značajne uštede u troškovima električne energije.

Ugradnja i upotreba rekuperatora toplote može doneti značajne uštede u potrošnji toplotne energije. Prema podacima komercijalnih proizvođača rekuperatora, uštede zavise od spoljašnje temperature, i kreću od se od minimalnih 10% do maksimalnih 23% u odnosu na slične sisteme bez rekuperatora. Period otplate ovakvih sistema zavisi od mnogo činilaca, ali se grubo kreće oko 12 meseci, kroz smanjene račune za toplotnu i električnu energiju, a u nekim zemljama se dobijaju i bonusi od vlada za uštedu energije, tako da su efekti uštede još izraženiji.

Indirektne koristi od ugradnje rekuperatora toplote su važne sa ekološkog aspekta, jer manja potrošnja toplotne i električne energije umanjuje emisiju CO<sub>2</sub>, a lakša je kontrola emisije štetnih materija tokom procesa sušenja.

## LITERATURA

- Cooper, G. (2003): Methods of reducing the consumption of energy on wood drying kilns. BRE Client report number 211-915.
- Horn H. (2004): Energy Saving in the Timber Industry. Norwegian Institute of Wood Technology.
- Kolin, B. (2000): Hidrotermička obrada drveta. Jugoslavijapublik, Beograd.
- Petree, J. (2001): Energy costs put focus on kiln heat recovery. Internet document.
- Topić, R. (1989): Osnove projektovanja, proračuna i konstruisanja sušara. Naučna knjiga, Beograd, 193 str.