

UDK: 631(059)

Originalni naučni rad  
Original scientific paper

## EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE AKUMULACIJE TOPLOTE U AKUMULATORU TOPLOTE PRIMENOM FAZNOPROMENLJIVOG MATERIJALA

Nedžad R. Rudonja<sup>\*1</sup>, Goran S. Živković<sup>2</sup>, Mirko S. Komatina<sup>1</sup>, Branislav S. Repić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

<sup>2</sup> Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za termotehniku i energetiku

**Sažetak:** U radu je data opšta diskusija o razlozima primene akumulatora toplote i fazno-promenljivih materijala kao skladišnih medijuma. Dat je deo eksperimentalnih rezultata dobijenih merenjem tokom procesa promene faze parafina. Uočeno je da je potrebno povećati broj zapreminskih izvora toplote u akumulatoru kako bi se dobila manja stratifikacija temperature tokom procesa zagrevanja.

**Ključne reči:** akumulator toplote, promena faze, parafin

### UVOD

Akumulacija toplote primenom fazno-promenljivih materijala predstavlja veoma značajno polje istraživanja u nauci i tehnici. Problem akumulacije toplote potiče još iz perioda daleke istorije, ali se danas sve više pominje u oblasti energetske efikasnosti (solarna energija, toplotne pumpe i sl.), i korišćenja toplote dobijene sagorevanjem biomase. Biomasa predstavlja nuzproizvod u poljoprivredi (slama, kukuruzovina, sojina sačma, ostaci orezivanja voća, ostaci seče šuma itd.), pa njeno korišćenje može dovesti do značajne uštede u samim poljoprivrednim gazdinstvima, ali i uštede na nivou države ostvarene smanjenim uvozom energenata. Važno je napomenuti da najveće učešće pojedinih obnovljivih izvora energije u energtskom potencijalu Srbije pripada biomasi sa 63% i solarnoj energiji sa 17% [4]. Ostali potencijal leži u geotermalnoj energiji, energiji vetra i energiji malih vodenih tokova. Osim biomase koja predstavlja poljoprivredni „otpad“ sve češće se javlja i planska sadnja

---

\* Kontakt autor. E-mail: nrudonja@mas.bg.ac.rs

Razvoj i unapređenje tehnologija za energetske efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnos kogeneracije, III42011, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

visokoenergetskih, brzorastućih biljaka čijim se sagorevanjem može dobiti značajna količina toplote (Miskantus-visokoenergetska biljka). Tokom sagorevanju biomase javlja se problem skladištenja trenutno dobijene toplote. Akumulacija dobijene toplote najčešće se vrši zagrevanjem vode [1] u velikim rezervoarima. Međutim, u slučajevima kada su skladišni kapaciteti ograničeni, kada je potrebno da se toplota skladišti u nekom materijalu na određenoj temperaturi, ili kada su temperature skladištenja više, mora se ići na optimizaciju samog skladištenja toplote koja, u najvećem broju slučajevima, kao rezultat daje primenu fazno-promenljivih materijala [3]. Akumulacija toplote fazno-promenljivim materijalima (PCM - phase change material) predstavlja sve češće tehničko rešenje u gradnji solarnih sistema čime se želi ublažiti „ahilova peta“ solarnih sistema koja se ogleda u nedostatku kontinualnog snabdevanja toplotom. Dakle, onda kada postoji trenutno oslobađanje toplote koje je više od zahtevanih toplotnih potreba vrši se akumulacija toplote u toplotnim akumulatorima (TES – Thermal Energy Storage) na određenoj temperaturi. Izbor fazno-promenljivog materijala zavisi od više faktora, ali se kao najznačajniji mogu navesti sledeći:

- a) temperatura skladištenja toplote,
- b) raspoloživi skladišni prostor,
- c) hemijska agresivnost fazno-promenljivog materijala,
- d) zapaljivost,
- e) eksplozivnost.

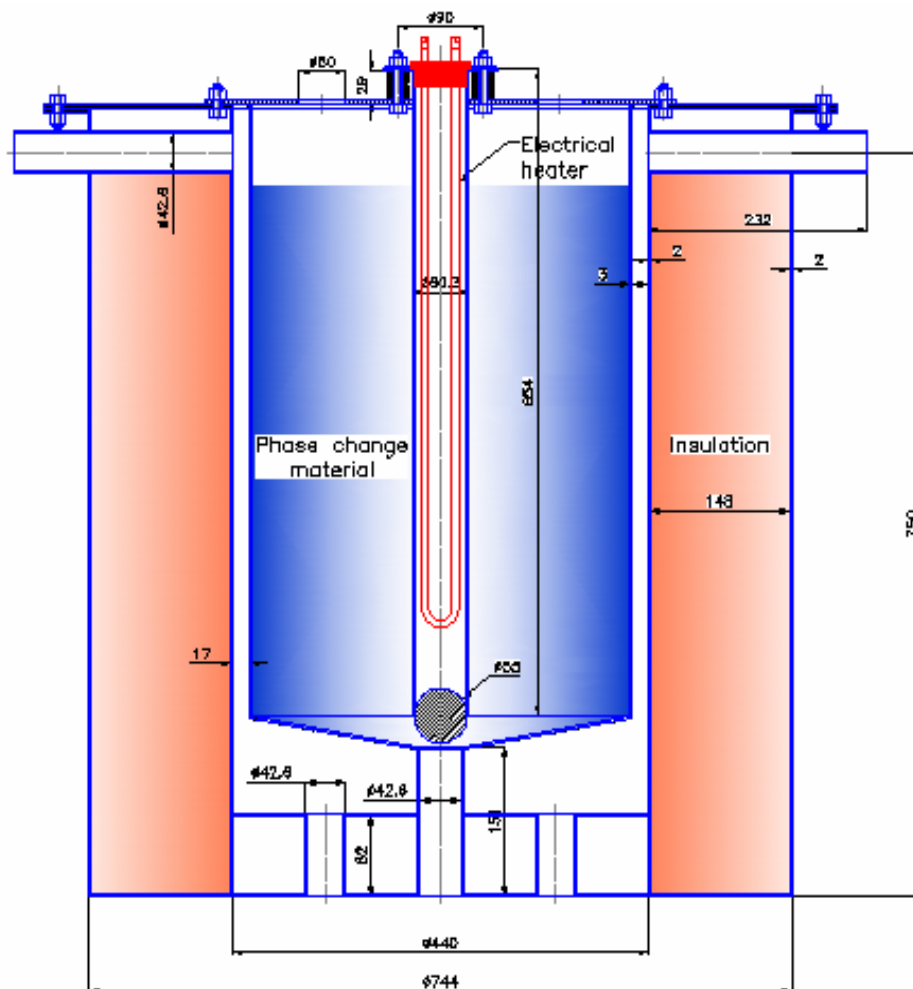
U skladu sa iznetim zahtevima najčešće su podele fazno-promenljivih materijala je na fazno-promenljive materijale organskog i neorganskog tipa. Druga podela je prema temperaturi promene faze i ona predstavlja polaznu instancu pri izboru fazno-promenljivog materijala. Kao fazno-promenljivi materijali najčešće se koriste razne parafinske frakcije, polimeri, hidratne soli, metali itd.

U okviru Projekta III 42011 razvijena je eksperimentalna instalacija za ispitivanje karakteristika fazno-promenljivih materijala i mogućnosti akumulacije toplote u akumulatorima toplote. Izvršena su merenja sa parafinom kao fazno-promenljivim materijalom, što je u nastavku ovog rada prikazano.

## MATERIJAL I METOD RADA

### Eksperimentalna instalacija i opis merenja

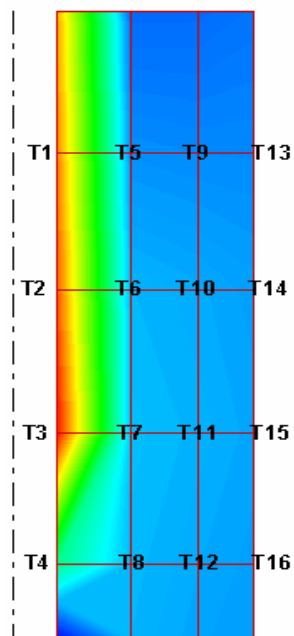
Kao što je prethodno navedeno u okviru projekta III 42011 Ministarstva nauke i prosvete konstruisana je i izvedena eksperimentalna instalacija akumulatora toplote na kojoj su izvršena određena merenja i posmatranja promene faze parafina kao fazno-promenljivog materijala. Ukupna zapremina akumulatora toplote koja je ispunjena fazno-promenljivim materijalom iznosi 77 dm<sup>3</sup>. Po celoj zapremini akumulatora toplote raspoređeno je ukupno 16 termo-parova kojima je vršeno merenje temperature parafina, dok je posebnim termo-parovima merena temperatura vazduha na ulazu i izlazu iz akumulatora toplote. Vazduh je služio za „pražnjenje“ akumulatora toplote, tj. hlađenje parafina.



Slika. 1 Akumulator toplote

Figure 1 Thermal energy storage

Topljenje parafina vršeno je električnim grejačem napajanim trofaznom električnom energijom. Snaga električnog grejača kontrolisana je reostatom preko promene napona. Električni grejač je, kao što se vidi na Slici 1, smešten u centralnoj oblasti akumulatora toplote. Ulaz hladnog vazduha nalazi se na dnu, a izlaz zagrejanog vazduha je pri vrhu akumulatora toplote. Vazduh se zagreva strujanjem kroz međuprostor između cilindra u kome se nalazi parafin i cilindra sa čije se spoljašnje strane nalazi izolacija od mineralne vune. Raspored termo-parova kojima su merene temperature parafina prikazan je na Slici 2.

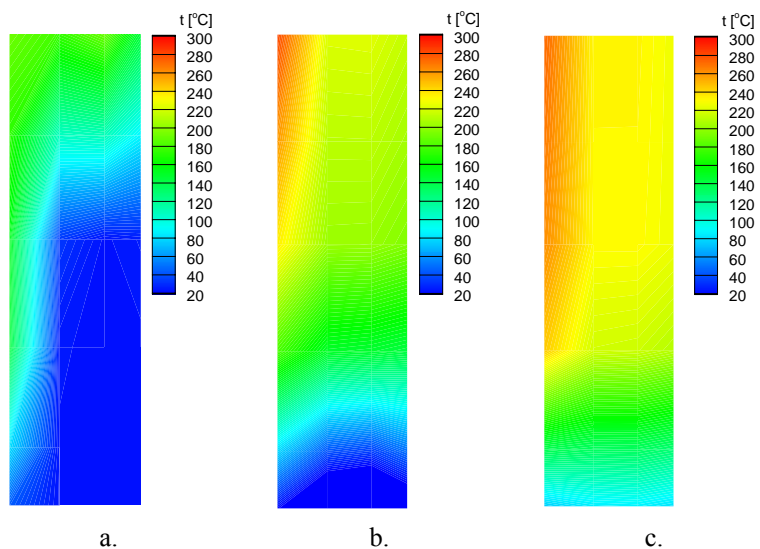


Slika. 2 Raspored termoparova u parafinu

Figure 2 Arrangement of thermocouples in paraffin

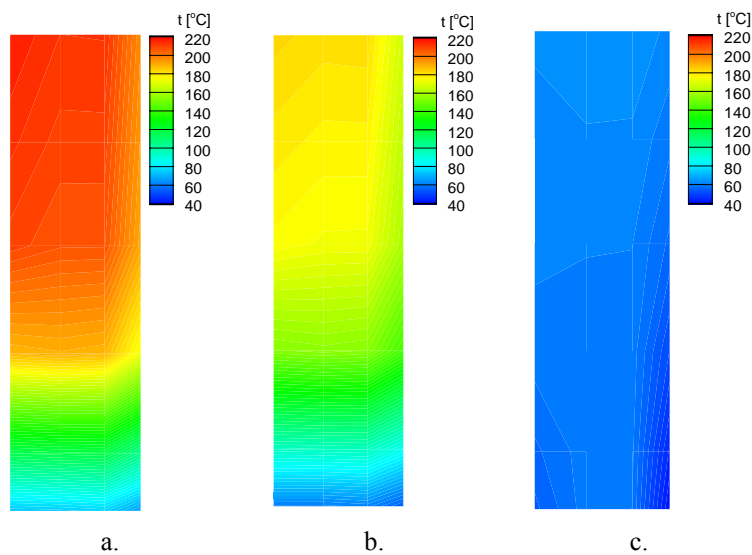
## REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Na osnovu podataka dobijenih merenjem temperature izvršena je i vizuelizacija temperaturnog polja u akumulatoru toplote, odnosno u parafinu, a što je prikazano u nastavku rada. Dobijeni temperaturni profili odgovaraju i teorijskim razmatranjima i zaključcima [2]. Dakle, prvo dolazi do topljenja u uskom sloju koji je smešten neposredno uz grejač. U ovom sloju dominira prenošenje toplote kondukcijom. Dalje, kako se proces dovođenja toplote nastavlja dolazi do topljenja veće količine materijala u kome, usled razlike u gustinama, dolazi do prirodnog strujanja, pa se toplota sa grejača na istopljeni materijal prenosi prirodnom konvekcijom. Front istopljenog materijala se ubrzano prostire sa leva na desno, uz istovremeno dovođenje toplote sa vrha akumulatora, od istopljenog materijala iz gornjih zona, ka neistopljenom materijalu koji se nalazi na dnu akumulatora. Proces topljenja se završava potpunim topljenjem parafina kada dolazi do blage stratifikacije temperature parafina. Nakon završavanja procesa topljenja, tj. promene faze, izvršno je gašenje električnog grejača i uključeno hlađenje istopljenog parafina ambijentalnim vazduhom koji je pomoću ventilatora prinudno opstrujavao cilindar u kome se nalazio istopljeni parafin. Proces hlađenja parafina prikazan je na Slici 4. Slika 5 prikazuje vertikalnu stratifikaciju temperature u parafinu tokom vremena. Upoređujući gornju i donju sliku na Slici 5 može se odrediti brzina kretanja fronta rastopljenog materijala. Takođe se može zapaziti da je razlika temperatura u gornjoj i donjoj oblasti parafina i do 100°C.



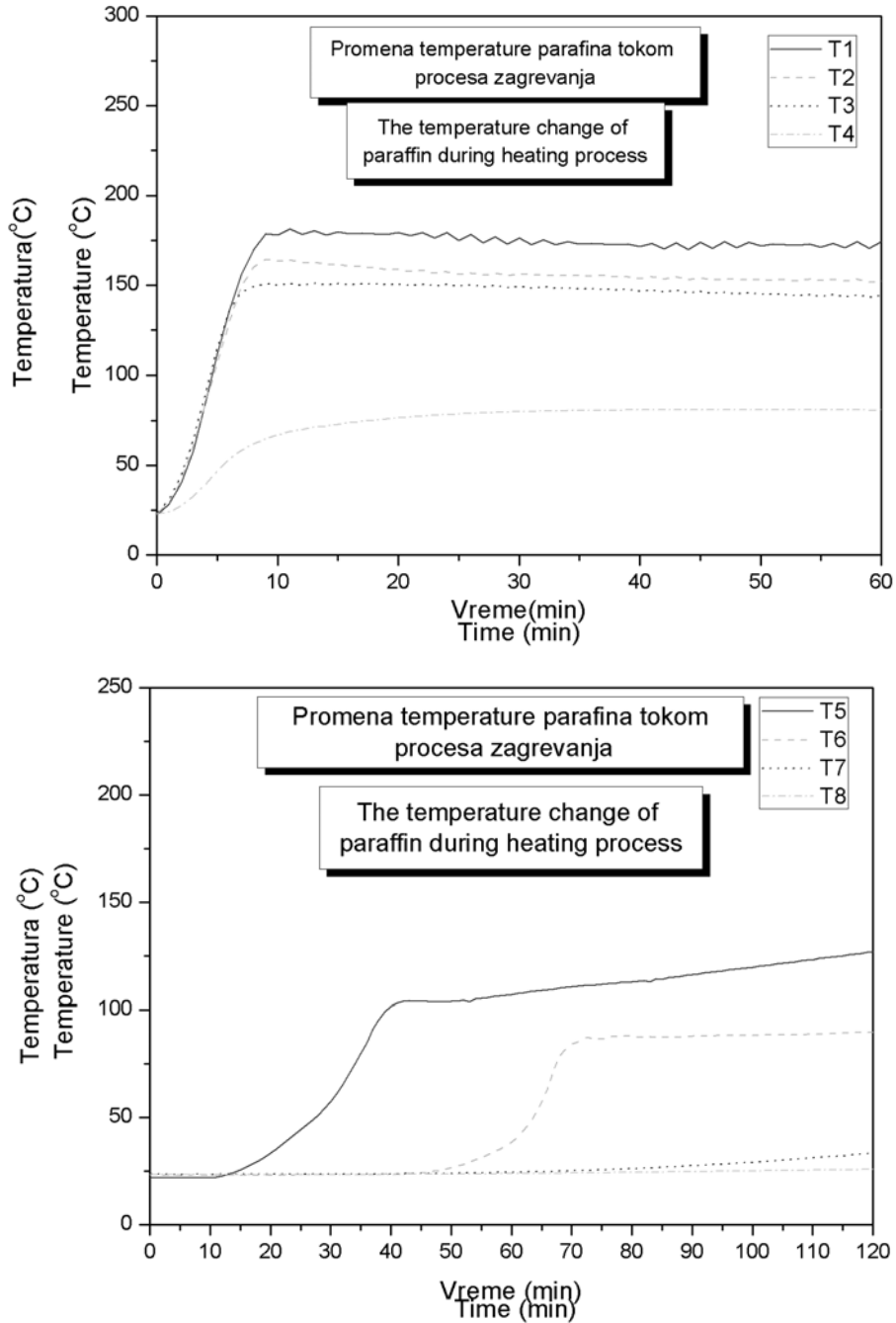
Slika 3. Temperaturski profil u akumulatoru toplote nakon:  
60 min (a), 600 min (b), 1400 min grejanja (c)  
(snaga grejača 2.4 kW)

*Figure 3. Paraffin temperature profiles in the tank after:  
60 min (a), 600 min (b), the whole heating period of 1400 min (c)  
(heating power 2.4 kW)*

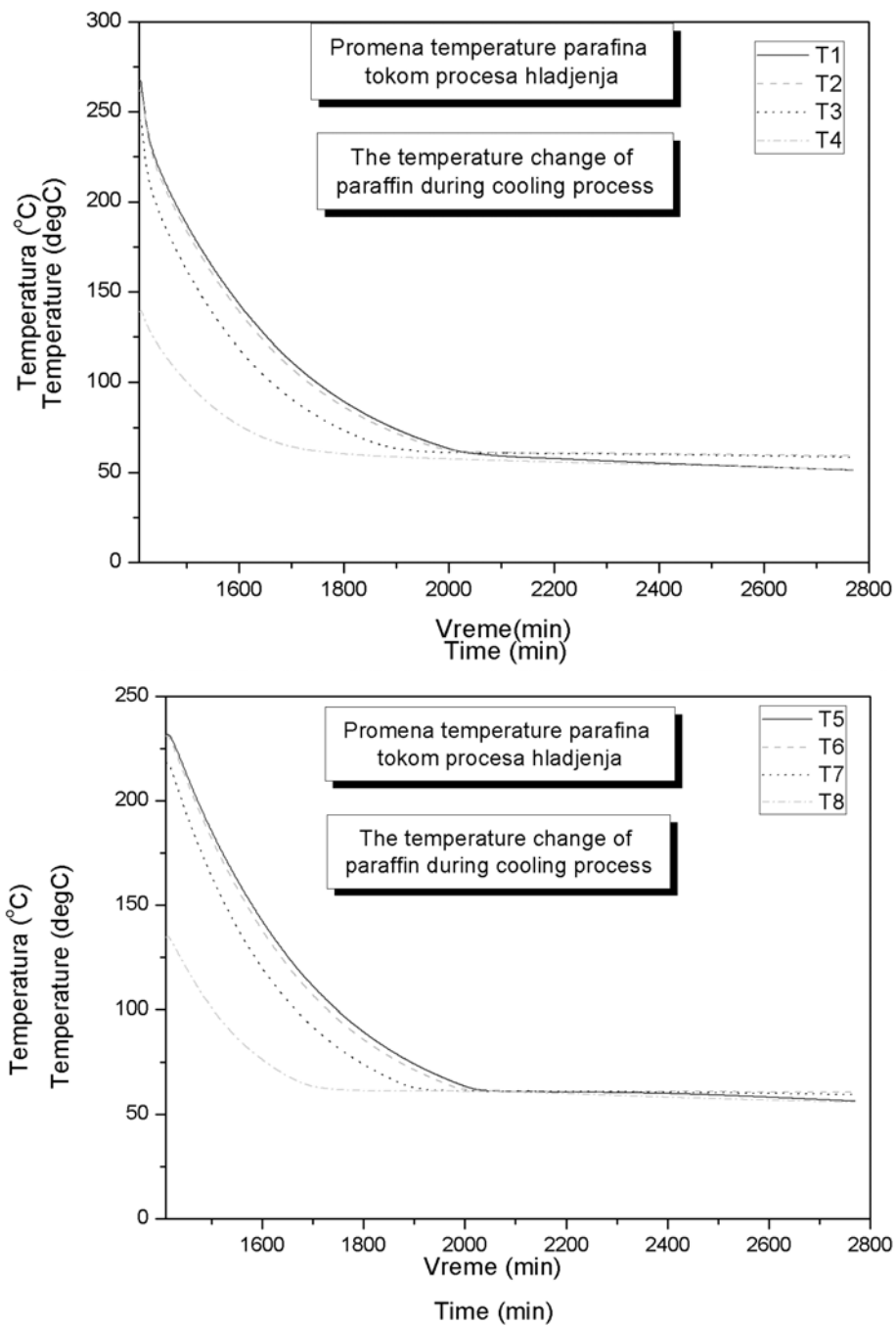


Slika 4. Temperaturski profil u akumulatoru toplote nakon:  
60 min (a), 120 min (b), 600 min hlađenja (c)

*Figure 4. Paraffin temperature profiles in the tank after:  
60 min (a); 120 min (b); 600 min cooling (c)*



Slika 5. Promena temperature parafina tokom procesa dovođenja toplote  
Figure 5. The temperature change of paraffin during heating process



Slika 6. Promena temperature parafina tokom procesa odvođenja toplote  
 Figure 6. The temperature change of paraffin during cooling process

Iskustva dobijena tokom merenja potvrđuju da je korišćenje parafina kao PCM-a pogodno za temperaturski opseg od 40 i 120°C [5], što idealno odgovara uslovima za zagrevanje sanitarne potrošne vode. Ako se pogleda Slika 6 može se videti da brzina hlađenja akumulatora osim fizičkih i strujnih karakteristika vazduha zavisi i od termofizičkih osobina PCM. Interesantno je zapaziti da se protemperiranje parafina u celoj zapremini postiže gotovo jednovremeno, tj. u jako malom vremenskom periodu, a što nije bio slučaj tokom procesa zagrevanja. Razlog ove nesimetričnosti procesa treba tražiti u kontinualnom hlađenju PCM-a vazduhom preko veće razmenjivačke površi.

### ZAKLJUČAK

Radi ravnomernije raspodele temperature u parafinu tokom procesa zagrevanja potrebno je povećati razmenjivačku površ između grejača i parafina. Drugim rečima, nakon urađene numeričke analize procesa razmene toplote biće moguće definisati optimalni raspored razmenjivačkih površi unutar PCM-a. Kao što je bilo i očekivano, pojedine parafinske frakcije topile su se na nižim temperaturama, dok pojedine frakcije topljene su tek na temperaturama koje su bile veće i od 100°C. Dakle, primena parafina kao radnog medijuma u akumulatoru toplote pogodna je za temperaturske opsege između 40 i 120°C, dok se za više temperature preporučuju drugi fazno-promenljivi materijali.

### LITERATURA

- [1] Živković, G., Mirkov, N., Dakić, D., Mladenović, M., Erić, A., Erić, M., Rudonja, N. 2010. Numerical Simulation of Thermo-Fluid Properties and Optimisation of Hot Water Storage Tank in Biomass Heating System. *FME Transactions*. Vol. 38, p.p. 63-70.
- [2] Bejan, A. 2004. *Convection heat transfer*. Third edition. 482-500. John Wiley & Sons, INC.
- [3] Mohammed, F., Amar, K., Siddique, R., Said, A. 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*. Vol. 45, p.p. 1597–1615.
- [4] Ministarstvo Rudarstva i Energetike Republike Srbije. 2008. *Energetski bilans Republike Srbije za 2008 godinu*. Dostupno na: [http://www.ssl-link.com/mre/cms/mestoZaUploadFajlove/ENERGETSKI\\_BILANS\\_PLAN\\_ZA\\_2008.pdf](http://www.ssl-link.com/mre/cms/mestoZaUploadFajlove/ENERGETSKI_BILANS_PLAN_ZA_2008.pdf) [datum pristupa: 09.11.2012.]
- [5] Halime, P. 2005. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy*. Springer 257-277.



**EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ACCUMULATION OF HEAT BY  
PHASE CHANGE MATERIAL IN THE THERMAL ENERGY STORAGE**

**Nedžad R. Rudonja<sup>1</sup>, Goran S. Živković<sup>2</sup>, Mirko S. Komatina<sup>1</sup>, Branislav S. Repić<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering,  
Belgrade, Republic of Serbia*

<sup>2</sup> *Institute of Nuclear Sciences "Vinča",  
Laboratory for Thermal Engineering and Energy, Belgrade, Republic of Serbia*

**Abstract:** The paper includes a general discussion of reasons for the application of heat storage and phase change material as storage medium. A part of experimental results obtained by measuring during the process of paraffin phase change was presented. It was observed that in order to obtain lower temperature stratification during the heating process it is necessary to increase the number of volume heat sources in the thermal storage.

**Key words:** *thermal energy storage, phase change, paraffin*

Datum prijema rukopisa: 09.11.2012.  
Datum prijema rukopisa sa ispravkama: 12.11.2012.  
Datum prihvatanja rada: 15.11.2012.

