

PENINGKATAN KAPASITAS TERMAL PENAMPUNG AIR PANAS *SOLAR HEATER* MENGGUNAKAN *CAPSULATED PARAFFIN*

Rani Anggrainy¹, Dibyo Setiawan², Danies Seda Yuseva³, Muhammad Nurtanto⁴

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Krisnadwipayana,

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular,

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Buana Perjuangan

⁴ Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

rani_anggrainy@unkris.ac.id

dibyosetiawan@mputantular.ac.id

denis.seda@ubpkarawang.ac.id

mnurtanto23@untirta.ac.id

Abstrak— Matahari merupakan sumber energi terbarukan yang berkontribusi penting dalam kehidupan manusia untuk kegiatan sehari-hari. Aplikasi pemanas air tenaga matahari secara signifikan mampu mengurangi beban listrik pemanasan air sehingga metode ini secara tidak langsung mampu menghemat kebutuhan energi. Tantangan terbesar adalah meningkatkan densitas energi penyimpanan air hangat. Media penyimpanan terbaik adalah *paraffin*, namun terkendala terhadap rendahnya konduktivitas termal dari *paraffin* dan juga media pembungkusnya. Penelitian ini fokus pada upaya perbaikan termal konduktivitas *paraffin* sebagai media penyimpanan panas dengan menggunakan campuran nikel pada rasio (volume) 10 – 50%. Sampel *paraffin* dan campuran *paraffin* nikel dimasukkan ke dalam pembungkus dari material aluminium 6063 kemudian diuji untuk proses penyerapan dan pelepasan panas. Penyerapan panas terbaik diperlihatkan oleh sampel dengan kandungan nikel paling banyak, sedangkan pada proses pelepasan panas sampel dengan performa terbaik ditunjukkan dengan campuran nikel antara 20–40%. Hasil ini berhubungan langsung dengan power rate dari tiap sampel. Hasil studi ini dapat dijadikan sebagai referensi untuk peningkatan kapasitas termal penyimpanan air hangat dari pemanas air tenaga matahari.

Kata Kunci— *Encapsulated; Paraffin; PCM; Penyimpanan termal; Solar heater.*

Abstract— *Solar power is considered as the most essential renewable energy in human life, particularly for daily activities. The application of solar water heater is significantly able to reduce the electric load of water heating so that this method is indirectly able to save energy needs. The biggest challenge is increasing the energy density of warm water storage. The best storage medium is paraffin, but it is constrained by the low thermal conductivity of the paraffin and also the wrapping media. This study focuses on efforts to improve thermal conductivity of paraffin as a heat storage medium by using nickel mixture at a ratio (volume) of 10 - 50%. Samples of paraffin and nickel paraffin mixture are inserted into the wrapper of aluminum 6063 material and then tested for heat absorption and release process. The best heat absorption is shown by the sample with the most nickel content, while in the heat release process the best performing sample is shown with a nickel mixture between 20–40%. These results are directly related to the power rate of each sample. The results of this study can be used as a reference for increasing the thermal capacity of warm water storage from solar water heaters.*

Keywords— *Encapsulated; Paraffin; PCM; Solar heater; Thermal storage.*

PENDAHULUAN

Krisis energi menjadi isu terpenting pada abad 21. Inovasi dan perkembangan terus dilakukan untuk bisa memaksimalkan serapan energi baru terbarukan dan mengurangi ketergantungan terhadap energi tidak terbarukan [1]. Energi matahari merupakan energi terbarukan yang paling potensial untuk dimanfaatkan sebaik mungkin di Indonesia khususnya [2]. Sebagai negara khatulistiwa, Indonesia mendapat suplai matahari yang tinggi sepanjang tahun sehingga pemanfaatan energi matahari sangat tepat dilakukan di Indonesia [3].

Salah satu aplikasi sederhana dari pemanfaatan energi matahari adalah *solar water heater* atau pemanas air tenaga matahari [4]. Sistem pemanas air tenaga matahari memanfaatkan pancaran sinar matahari yang diserap oleh kolektor, kemudian panas ini dialirkan ke air yang bersirkulasi [5]. Agar penggunaannya bisa bertahan lebih lama, maka sistem ini dilengkapi dengan penampungan air hangat yang berfungsi sebagai penyimpan kalor [6]. Permasalahannya adalah, penyimpanan panas melalui media air membutuhkan satuan volume yang lebih besar karena sifat pemanasan yang bersifat *sensibel*, sehingga dibutuhkan volume yang lebih besar per satuan energi yang disimpan [7].

Perbaikan sistem penyimpanan termal pada *solar water heater* umumnya dilakukan dengan memanfaatkan media penyimpanan berbasis *Phase Change Material* (PCM), seperti *paraffin wax* [8]. Keuntungan utama dari penggunaan *paraffin wax* adalah densitas energi yang lebih tinggi pada satuan volume dibandingkan dengan menggunakan air. Permasalahannya adalah *paraffin wax* memiliki konduktivitas termal yang rendah, dapat terbakar dan rentan bercampur dengan air [9]. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam proses penempatan *paraffin wax* pada sistem *solar water heater*.

Beberapa kajian secara khusus membahas tentang upaya peningkatan aplikasi *paraffin wax* pada *solar water heater*. C. Shen, dkk [10] membahas tentang perbaikan *paraffin wax* untuk bentuk yang lebih stabil dengan menggunakan *salt hydrate* yang mana perbaikan ini mampu menjaga kekompakan bentuk dari *paraffin wax* saat memasuki fasa cair dan kembali ke fasa padat. B. Sivapalan, dkk [11] melakukan pengayaan *paraffin wax* dengan menggunakan *nanoemulsion* untuk memperbaiki performa perpindahan panas dari *paraffin wax* pada aplikasi sistem penyimpanan energi. Upaya yang lebih baik dilakukan oleh B. Shang, dkk [12] dengan fokus pada pembuatan *composite paraffin* dengan mencampur *paraffin* dengan material yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi.

Salah satu poin terpenting yang harus dipertimbangkan dari seluruh upaya pengayaan *paraffin wax* pada aplikasi *solar water heater* adalah mempertimbangkan kemudahan dari proses pembuatan dan juga biaya [13]. Hal ini harus dijadikan pertimbangan penting mengingat umumnya *solar water heater* digunakan pada aplikasi perumahan sehingga poin tersebut harus dijadikan landasan penting. Studi ini fokus pada upaya pengayaan *paraffin wax* pada aplikasi *solar water heater* dengan mengkombinasikan *paraffin wax* menggunakan bungkus *encapsulated* yang dikombinasikan dengan penambahan material sensibel berbasis nikel. Penggunaan nikel didasari pada karakteristik stabilitas yang baik dan tidak mudah korosi serta pertimbangan harga yang lebih baik.

METODE

Paraffin wax yang digunakan pada penelitian ini adalah *paraffin komersil* dengan sifat utama sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat umum *paraffin*

No.	Parameter	Nilai
1.	Titik leleh	60 °C
2.	Kalor laten	189 J/g
3.	Panas spesifik (padat)	2.48 J/g.K
4.	Panas spesifik (cair)	2.76 J/g.K
5.	Densitas	0.79 gram/ml

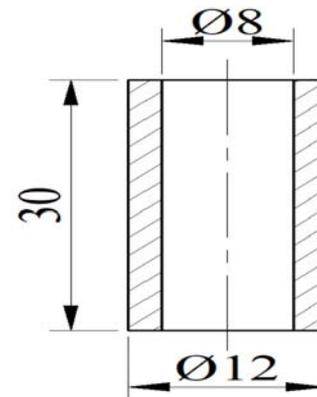
Nikel yang digunakan adalah bubuk nikel dengan tingkat kemurnian 99.6% dengan rerata ukuran butir sebesar 200 *mesh* (75 μ m), dengan kalor spesifik 0.44 J/g.K dan densitas 8.8 g/cm³. Penggunaan ukuran butir yang lebih kecil memberikan keuntungan untuk distribusi partikel yang lebih

baik sehingga peningkatan dari konduktivitas termal pada *paraffin* bisa diperoleh lebih maksimal. Selanjutnya disiapkan enam kategori sampel dengan mempertimbangkan rasio volume antara *paraffin* dan nikel. Sampel pertama adalah *paraffin* murni, sampel kedua dan sampai sampel ke enam adalah penambahan nikel sebesar 10% sampai dengan 50%. Detail sampel ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Detail Sampel

Nama Sampel	Volume (%)	
	Paraffin	Nickel
A ₁	100	0
A ₂	90	10
A ₃	80	20
A ₄	70	30
A ₅	60	40
A ₆	50	50

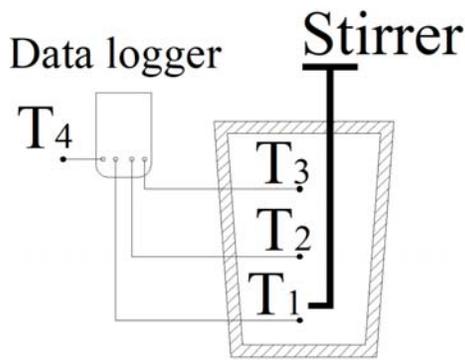
Setelah sampel disiapkan, selanjutnya bungkus *encapsulated* dibuat menggunakan tabung aluminium 6063-T5 dengan nilai densitas 2.69 g/cm³ memiliki kalor spesifik 0.9 J/g.K. Detail ukuran dari bungkus *encapsulated* diperlihatkan pada gambar 1.



Gambar 1. Detail bungkus *encapsulated* untuk *paraffin* dan nikel

Ukuran yang kecil dari bungkus *encapsulated* bertujuan untuk memaksimalkan distribusi energi pada penampungan air. Dari detail gambar 1, maka diperoleh luas penampang, dan volume isi yakni 1.35 cm² dan 1.51 cm³.

Kalorimeter model *coffee cup* digunakan sebagai wadah penampungan untuk media air panas dengan tujuan untuk meminimalisir keluar masuknya panas dari dan ke air panas saat proses pelepasan panas. Volume total yang digunakan kalorimeter adalah 300 ml. Volume total dari tiap bungkus adalah 3.39 cm³. Tiap pengujian menggunakan dua puluh bungkus *encapsulated* dengan total volume maksimal yang digunakan pada kalorimeter adalah 200 ml. Total volume air yang digunakan adalah 132 ml. Pengukuran dari kalorimeter menggunakan *thermocouple* tipe K yang dilakukan pada 4 titik berbeda seperti diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi titik pengukuran pada kalorimeter

T₁–T₃ digunakan untuk mengukur temperatur air di bagian dalam kalorimeter. Tiga titik pengukuran bertujuan untuk menjamin kesetimbangan temperatur pada seluruh bagian kalorimeter. T₄ digunakan untuk mengukur suhu udara sekitar. *Stirrer* digunakan untuk mengaduk air dan juga bungkus *encapsulated paraffin* untuk mencegah konsentrasi panas yang tidak merata. Pengambilan data dilakukan tiap 30 detik. Deviasi pengukuran dari termometer yang digunakan adalah 0.2 %. Seluruh data yang disajikan telah memperhitungkan nilai deviasi tersebut. Proses penyerapan panas dilakukan dengan menggunakan prinsip yang sama. Laju pemanasan dari air dan bungkus *encapsulated paraffin* dibuat pada laju pemanasan tetap menggunakan *plate heater*.

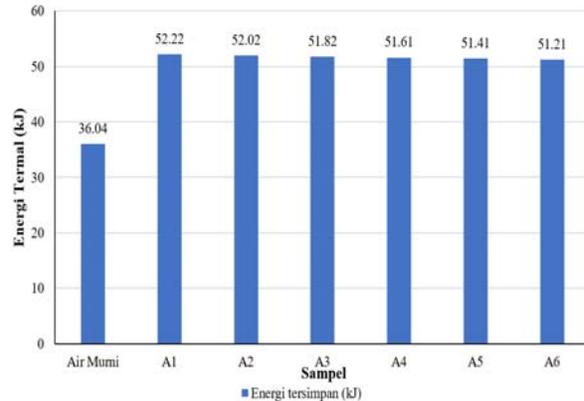
HASIL DAN DISKUSI

Kesetimbangan energi menjadi kunci paling mendasar dalam analisis kapasitas penyimpanan energi termal pada penampungan air hangat. Kapasitas energi yang diterima saat proses penyerapan panas secara teori akan sama dengan kapasitas pelepasan panas saat pelepasan energi. Mempertimbangkan seluruh variabel yang ada serta data teknis yang digunakan pada penelitian ini, maka besarnya energi yang diserap oleh sistem menunjukkan nilai yang berbeda. Total serapan energi dengan massa air sebanyak 132 ml dengan total perubahan suhu (ΔT) dari suhu awal 30 °C hingga suhu maksimal 95 °C disajikan pada gambar 3.

Total serapan energi merupakan banyaknya energi kalor yang diserap oleh sistem (dalam hal ini sampel yang digunakan). Serapa energi air lebih sedikit dikarenakan hanya dipengaruhi oleh kalor jenis sensibel air. Sampel A₁ sampai dengan A₆ merupakan total serapan energi gabungan antara air, dan *encapsulated paraffin*. Sampel A₁ relatif lebih tinggi dikarenakan tidak menggunakan pengayaan nikel sehingga hanya dipengaruhi oleh panas sensibel pembungkus dan kalor laten *paraffin*. Sampel A₂–A₆ dipengaruhi oleh panas sensibel nikel sehingga nilai total serapan energinya menjadi lebih kecil.

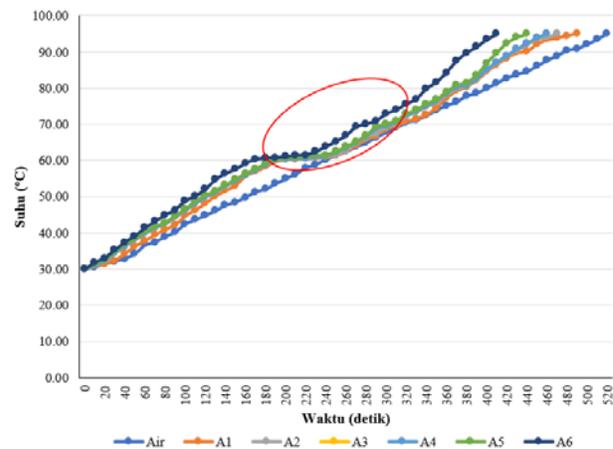
Perbedaan jelas terkait kapasitas energi penyimpanan diperlihatkan antara pada penyimpanan dengan air murni dan menggunakan *encapsulated paraffin* dimana kapasitas yang disimpan oleh sistem yang menggunakan *encapsulated paraffin* lebih tinggi dibandingkan dengan air murni. Poin ini

menjadi informasi penting karena penggunaan *encapsulated paraffin* mampu menaikkan kapasitas penyimpanan secara signifikan. Kenaikan ini disebabkan oleh sifat *paraffin* yang memiliki 2 fasa saat proses penyerapan panas yakni fasa padat dan cair dengan nilai kalor lebur yang tinggi. Keuntungan tersebut juga diperkuat dengan penggunaan bungkus *encapsulated* dari material sensibel tahan karat. Kombinasi metode ini memberikan keuntungan secara signifikan untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan energi panas pada sistem.



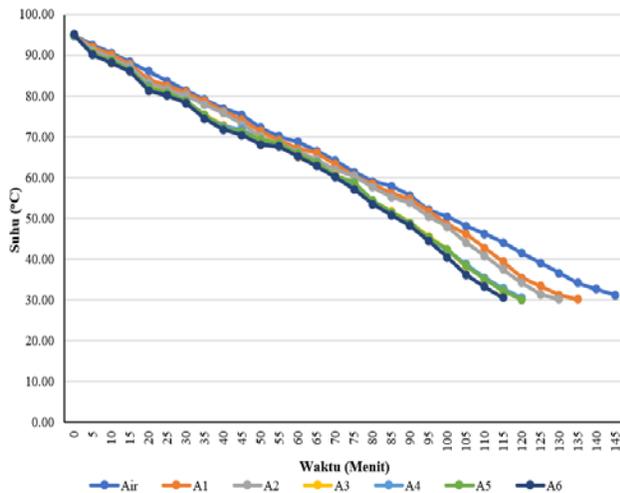
Gambar 3. Serapan energi untuk masing–masing media penyimpanan

Perbedaan energi pada sampel yang menggunakan *encapsulated paraffin* (A₁ – A₆) menunjukkan pola yang identik yakni kapasitas penyimpanan menurun dari sampel A₁ sampai dengan sampel A₆. Perbedaan ini disebabkan oleh penambahan nikel pada sampel A₂–A₆ dimana kapasitas *paraffin* berkurang seiring dengan penambahan nikel pada sampel. Data ini dengan jelas menunjukkan bahwa kapasitas penyimpanan lebih dipengaruhi oleh total *paraffin* yang digunakan pada tiap bungkus. Semakin banyak kapasitas *paraffin* memberikan keuntungan terkait kapasitas penyimpanan energi yang lebih banyak, namun laju pelepasan dan penyerapan panas perlu diketahui karena berkaitan dengan *power rate* dari sistem penyimpanan.



Gambar 4. Grafik karakteristik penyerapan energi

Grafik karakteristik penyerapan panas ditampilkan pada gambar 4 dalam bentuk hubungan antara waktu dan kenaikan temperatur. Sampel air memiliki karakteristik linear sesuai dengan sifat aslinya yakni sensibel. Hal berbeda ditunjukkan untuk semua sampel yang mengandung *paraffin* dimana terjadi perlambatan kenaikan temperatur setelah suhu 60 °C. Hal ini disebabkan oleh sifat perubahan fasa pada *paraffin* dimana kalor laten berperan aktif pada kondisi ini. Kenaikan suhu pada sampel dipengaruhi oleh sifat sensibel dari bungkus *encapsulated* dan aditif nikel untuk sampel A₂–A₅. Sampel dengan kandungan nikel lebih banyak mampu mencapai temperatur target (95 °C) lebih cepat dan menjadi bukti pengaruh dari penambahan material sensibel dengan konduktivitas termal yang baik.



Gambar 5. Grafik karakteristik pelepasan energi

Pola yang cukup berbeda ditunjukkan untuk semua sampel campuran nikel dan *paraffin* saat proses pelepasan panas. Dari gambar 5 terlihat, tidak semua sampel mampu melepas panas secara cepat meskipun saat proses penyerapan panas menunjukkan performa yang baik. Perbedaan ini disebabkan efek fenomena pendinginan cepat (*supercooling*) yang merupakan salah satu masalah pada sistem *paraffin* sebagai media penyimpanan termal. Sampel terbaik berdasarkan pengujian pelepasan panas adalah sampel A₃, A₄ dan A₅ dengan laju penurunan panas yang cukup cepat dan derajat pembekuan tidak berbeda secara signifikan saat proses penyerapan panas. hal ini menandakan, rasio penambahan nikel pada sampel *paraffin* ideal dilakukan pada cakupan nilai tersebut yakni 20–40% dari volume total sampel yang digunakan.

Aspek terakhir yang perlu dilihat adalah *power rate* dari tiap sampel, pada kondisi penyerapan dan pelepasan panas. *Power rate* merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menentukan kemampuan material penyimpanan energi untuk melepas dan menyerap panas. Semakin cepat material menyerap panas, maka semakin tinggi nilai *power rate* material tersebut. Nilai *power rate* diperoleh berdasarkan

banyaknya energi yang diserap atau dilepas dibagi total waktu yang dibutuhkan untuk melepas atau menyerap energi. Nilai serapan energi, grafik karakteristik penyerapan dan pelepasan energi sudah diperoleh sehingga nilai *power rate* dapat diketahui.

Tabel 3. menyajikan data *power rate* untuk tiap sampel pada kondisi penyerapan dan pelepasan panas. Meskipun terjadi perbedaan yang signifikan dari *power rate* saat pelepasan dan penyerapan panas, hal ini tidak merubah kualitas dari nilai tersebut karena pada prinsipnya *power rate* berkaitan sepenuhnya dengan kemampuan sampel untuk melepas panas sesuai kebutuhan. Terlihat pada penyerapan panas, penambahan nikel berkontribusi langsung terhadap *power rate* dimana semakin banyak nikel maka semakin tinggi *power rate* dari sampel.

Tabel 3. Data *power rate* dari tiap sampel

Sampel	Power Rate (W)	
	Penyerapan Panas	Pelepasan Panas
Air	98.42	5.84
A ₁	106.57	6.49
A ₂	110.68	6.80
A ₃	112.64	7.02
A ₄	112.20	7.06
A ₅	116.84	7.05
A ₆	124.90	7.34

Hubungan berbeda diperlihatkan pada *power rate* dari tiap sampel saat pelepasan panas. Tidak ada perbedaan signifikan antara sampel A₃–A₅ terkait dengan nilai *power rate*. Hal ini sesuai dengan grafik model pelepasan panas dari seluruh sampel tersebut dimana laju penurunan panas mendekati waktu yang sama dan juga derajat pembekuan tidak berbeda secara tajam dengan penyerapan panas. Pembekuan yang lebih stabil menandakan penyebaran panas yang lebih baik dan karena nilai konduktivitas termal *paraffin* lebih baik saat berada pada fasa padat, maka laju penurunan panasnya menjadi lebih baik.

Dari tabel 3 juga terlihat jelas bahwa *power rate* dari air murni lebih rendah dibandingkan dengan semua sampel. Hal ini dikarenakan sifat sensibel air dan juga rendahnya konduktivitas termal dari air. Pada poin, terlihat pengaruh dari penambahan *encapsulated paraffin* pada sistem untuk mampu menaikkan *power rate* air. Hal ini menjadi indikator bahwa penambahan *encapsulated paraffin* mampu meningkatkan kapasitas termal sistem penyimpanan air panas dan terbukti lebih baik dibandingkan dengan air murni.

KESIMPULAN

Pemanfaatan *paraffin* untuk menaikkan kapasitas termal penyimpanan air panas untuk pemanas air *solar heater* menunjukkan hasil yang signifikan dibandingkan dengan menggunakan media air saja. Upaya perbaikan sifat *paraffin* sebagai media penyimpanan panas dilakukan dengan menggunakan nikel dan juga memanfaatkan media pembungkus dari material dengan konduktivitas termal yang tinggi. Keseluruhan upaya ini secara signifikan mampu menaikkan kapasitas termal dari media penyimpanan air hangat. Lebih lanjut, laju pelepasan dan penyerapan panas dari sampel

campuran *paraffin* dengan nikel menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan *paraffin* murni maupun air. Keseluruhan karakteristik dari tiap sampel saat penyerapan dan pelepasan panas yang berkaitan erat juga dengan *power rate* dari tiap sampel dapat dijadikan referensi penting bagi pengembangan media penyimpanan air hangat yang lebih baik. Kenaikan nilai kapasitas penyimpanan energi mampu membuat penggunaan air hangat yang lebih banyak sehingga densitas energi per satuan volume menjadi lebih baik. Penelitian berikutnya perlu fokus pada pemilihan model alat penukar kalor yang ideal untuk proses pelepasan dan penyerapan panas pada sistem, khususnya untuk kebutuhan yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak berkontribusi serta mendukung peneliti baik moril maupun materil sehingga terlaksananya penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Peinado A, Pliego A, Pedro F, Márquez G. *A review of the application performances of concentrated solar power systems*. *Appl Energy* 2019;255:113893. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113893>.
- [2] Simsek Y, Watts D, Escobar R. *Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM)*. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;93:421–38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.090>.
- [3] Januar R. *Comparative Analysis of 20-MW Solar Thermal and PV Power Plant in Rongkop, Indonesia Using LCOE Simulation Method*. *J Clean Energy Technol* 2017;5:383–8. <https://doi.org/10.18178/jocet.2017.5.5.402>.
- [4] Zelzouli K, Guizani A, Kerkeni C. *Numerical and experimental investigation of thermosyphon solar water heater*. *Energy Convers Manag* 2014;78:913–22. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.064>.
- [5] Zou B, Dong J, Yao Y, Jiang Y. *An experimental investigation on a small-sized parabolic trough solar collector for water heating in cold areas*. *Appl Energy* 2016;163:396–407. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.186>.
- [6] IEA ETSAP, IRENA. *Thermal Energy Storage-Insights for Policy Makers* 2013:9.
- [7] Nivaskarthick R. *Analysis of Thermal Energy Storage system using Paraffin Wax as Phase Change Material*. *Int Conf Innov Eng Technol* 2016:38–47.
- [8] Dsilva Winfred Rufuss D, Rajkumar V, Suganthi L, Iniyan S. *Studies on latent heat energy storage (LHES) materials for solar desalination application-focus on material properties, prioritization, selection and future research potential*. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2019;189:149–65. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.031>.
- [9] Sarbu I, Sebarchievici C, Sarbu I, Sebarchievici C. Chapter 4 – *Thermal Energy Storage*. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811662-3.00004-9>.
- [10] Shen C, Li X, Yang G, Wang Y, Zhao L, Mao Z, et al. *Shape-stabilized hydrated salt/paraffin composite phase change materials for advanced thermal energy storage and management*. *Chem Eng J* 2020;385:123958. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123958>.
- [11] Sivapalan B, Neelesh Chandran M, Manikandan S, Saranprabhu MK, Pavithra S, Rajan KS. *Paraffin wax–water nanoemulsion: A superior thermal energy storage medium providing higher rate of thermal energy storage per unit heat exchanger volume than water and paraffin wax*. *Energy Convers Manag* 2018;162:109–17. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.073>.
- [12] Shang B, Hu J, Hu R, Cheng J, Luo X. *Modularized thermal storage unit of metal foam/paraffin composite*. *Int J Heat Mass Transf* 2018;125:596–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.117>.
- [13] Vergura S, Lameira V. *Technical-Financial Comparison Between a PV Plant and a CSP Plant*. *Sist Gestão* 2011;6:210–20. <https://doi.org/10.7177/sg.2011.v6.n2.a9>.