

**SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE PRIMJENOM REVERZIBILNE TOPLOTNE PUMPE, TOPLOTNOG SKLADIŠTA I ORC CIKLUSA****REVERSIBLE HEAT PUMP, HEAT STORAGE AND ORC CYCLE AS ENERGY STORAGE**Marija Nježić, Borivoj Stepanov, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

**Kratak sadržaj** – Očuvanje životne sredine i proces dekarbonizacije doveli su do sve veće upotrebe obnovljivih izvora energije. Sistemi za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora zahtijevaju izgradnju skladišta električne energije da bi se njihov potencijal iskoristio. Postoje različite tehnologije skladištenja energije. Jedan od njih je i toplotno-pumpno skladište u kome se električna energija skladišti u vidu toplotne, te potom ponovo transformiše u električnu. U ovom radu, ispitano je da li ovi sistemi mogu da dostignu efikasnost veću od 70% za definisane parametre i radno sredstvo. Takođe, ispitan je uticaj efikasnosti energetske mašine na ukupnu efikasnost sistema.

**Ključne reči:** Skladištenje električne energije, Toplotno-pumpno skladište, ORC ciklus

**Abstract** – Environment protection and decarbonization have led to increase in renewable energy source usage. In order to fulfill renewable energy source potential, it is necessary to install energy storage. There are several energy storage technologies. One of them is pumped thermal energy storage. Pumped thermal energy storage stores electricity in form of heat, which is transformed back into electricity. The first aim of this paper, is to investigate whether these storage systems can reach efficiency higher than 70%. The second aim is to determine the impact of energy machine efficiency on the overall efficiency of the storage.

**Keywords:** Electricity energy storage, Pumped thermal energy storage, ORC cycle

**1. UVOD**

Očuvanje životne sredine i smanjenje negativnih posljedica klimatskih promjena, odnosno smanjenje ukupnog karbonskog otiska su postali jedan od ključnih zadataka zemalja svijeta. Da bi se postigao postavljeni cilj Evropske Unije o potpunoj dekarbonizaciji do 2050. godine procenat električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora je u značajnom porastu. Pored povećanja udjela energije dobijene iz obnovljivih izvora, potrebno je posvetiti pažnju i skladištima energije koja obezbjeđuju fleksibilnost energetske mreže. Postoje različite tehnolo-

gije za skladištenje energije, među kojima je toplotno-pumpno skladište (TPS).

**2. SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Skladištenje električne energije podrazumijeva pretvaranje viška električne energije u odgovarajući vid energije koji je moguće uskladištiti (mehanička, elektrohemijaska, hemijska, toplotna) te potom ponovo pretvoriti u električnu energiju kada se za to javi potreba. Na ovaj način se omogućuje integracija energije proizvedene iz obnovljivih izvora (energija vjetra, solarna energija), ekonomska arbitraža (punjenje skladišta kada su potražnja za energijom i cijena niske, prodaja kada su potražnja i cijena visoki), izravnavanje opterećenja i smanjenje vršnog opterećenja (smanjenje potrebe za proizvodnjom električne energije iz termoelektrana, nuklearnih elektrana i sl.), te za potrebe ujednačavanja u snabdijevanju iz obnovljivih izvora sa prekidima u proizvodnji ili za skladištenje proizvedenih viškova za odloženo snabdijevanje [1,2].

Najveći procenat izgrađenih kapaciteta skladišta električne energije, čak 94% na svjetskom nivou, izveden je u vidu hidro-pumpnih skladišta energije [3]. Osnovni nedostatak ovog vida skladištenja jeste geografska ograničenost.

**2.1 Toplotno-pumpna skladišta električne energije (TPS)**

Princip rada TPS sistema zasniva se na skladištenju viška proizvedene električne energije u vidu toplotne energije, te pretvaranje uskladištene toplotne energije ponovo u električnu kada je potražnja velika.

Osnovne prednosti TPS-a jesu geografska nezavisnost, velika gustine energije, dug vijek trajanja, komercijalna dostupnost elemenata sistema i slično.

Osnovni nedostaci se odnose na nedovoljnu istraženost tehnologije i nizak stepen efikasnosti (50-70%) [4]. Sistem koji je posmatran u radu sastoji se od toplotne pumpe kojom se podiže temperaturni nivo otpadne toplotne, skladišta toplotne i ORC ciklusa za proizvodnju električne energije.

**3. ORGANSKI RANKINOV CIKLUS**

Organski Rankinov ciklus (ORC) predstavlja zatvoreni termodinamički proces koji je baziran na klasičnom Rankin-Klauzijusovom ciklusu, pri čemu se umjesto vode kao radno sredstvo koriste organski fluidi. Sastoji se od četiri komponente – isparivač, turbina, kondenzator i pumpa.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Borivoj Stepanov, vanr. prof.

Prednosti ORC ciklusa ogledaju se u mogućnosti izgradnje postrojenja ostrvskog tipa, širok spektar radnih sredstava, niski troškovi održavanja, upravljanje sistemom je automatizovano i ne zahtijave kvalifikovanu radni snagu, ne podliježu najstrožim regulativama po pitanju bezbjednosti i slično. Nedostaci su izraženi na polju primjene radnih sredstava koja povećavaju investiciona ulaganja i mogu negativno da utiču na životnu sredinu, kao i nizak stepen efikasnosti [1,5].

#### 4. IZBOR OSNOVNIH ELEMENATA TPS SISTEMA

Izbor radnog sredstva i energetske mašine predstavljaju najvažniji korak pri projektovanju TPS sistema.

##### 4.1 Izbor radnog sredstva (fluida)

Izbor radnog sredstva ima značajan uticaj na termodinamičke osobine, veličinu i cijenu postrojenja. Postoje različiti kriterijumi na osnovu kojih se vrši izbor odgovarajućeg radnog sredstva. Prema [5] najvažniji kriterijumi su: uticaj na životnu sredinu, vrijednost entalpijskog pada, tačka ključanja, vrsta fluida, vrijednost latentne toplote, termofizičke karakteristike, bezbjednosni zahtjevi, pristupačnost i cijena.

##### 4.2 Izbor toplotne mašine

Odabir vrste i kapaciteta energetske mašine zavisi od karakteristika radnog sredstva i radnih uslova. Energetske

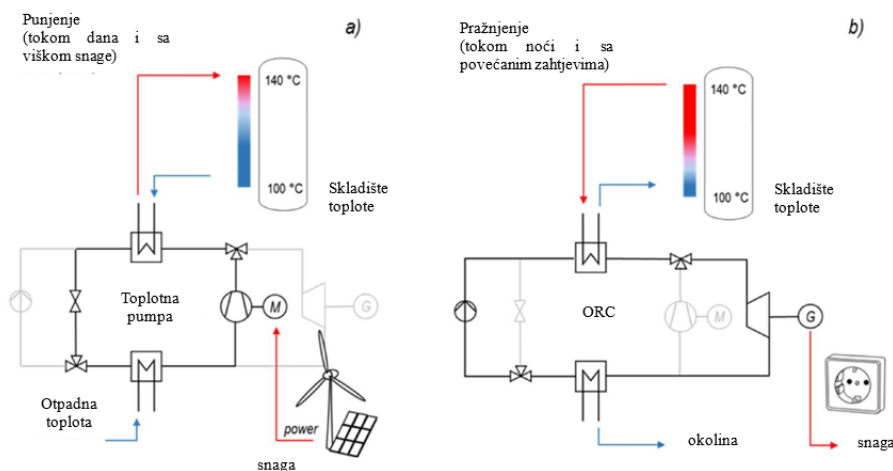
mašine se dijela u dvije grupe, zapreminske mašine i turbomašine. Zapreminske mašine se koriste za snage manje od 100 kW, odnosno primjenjuju se u sistemima za koje je karakterističan nizak protok, veći odnos pritiska i mali broj obrtaja. Turbomašine se koriste za veće snage, velike protoke i veliki broj obrtaja [6,7].

#### 5. OPIS POSMATRANOG TPS SISTEMA

Posmatrani sistem se sastoji od reverzibilne toplotne pumpe, skladišta toplotne energije i ORC sistema.

Proces punjenja skladišta, prikazan na Slici 1. a), predstavlja fazu rada toplotne pumpe. Niskotemperaturna otpadna toplota isparava radno sredstvo u isparivaču toplotne pumpe, nakon čega se para radnog sredstva komprimuje i odvodi u kondenzator gdje toplotu predaje radnom sredstvu skladište toplotne. Kondenzovano radno sredstvo se odvodi u ekspanzioni ventil i potom ponovo u isparivač nakon čega se ciklus ponavlja.

Proces pražnjenja, faza rada ORC ciklusa, se vrši tako što radno sredstvo ORC ciklusa isparava u isparivaču dovođenjem uskladištene toplotne energije. Para radnog sredstva potom ekspanzira u turbini, pri čemu turbine pokreće generator i proizvodi električnu energiju. Radno sredstvo se nakon turbine vodi u kondenzator, gdje se kondenzuje i zatim vodi u pumpu, nakon čega se ciklus ponavlja, kao što je prikazano na Slici 1. b).



Slika 1. Šematski prikaz procesa punjenja i pražnjenja posmatranog sistema [8]

#### 6. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Kako se cjelokupan sistem sastoji od tri podsistema (toplotna pumpa, skladište toplotne i ORC sistem), efikasnost sistema se definiše sljedećim izrazom [9]:

$$\eta_{P2P} = COP \cdot \eta_{st} \cdot \eta_{ORC} \quad (1)$$

Svaki od podsistema karakteriše odgovarajući koeficijent efikasnosti [9]:

- Za toplotnu pumpu (eng. COP - Coefficient of Performance):

$$COP = \frac{Q_{st}}{L_{hp}} \quad (2)$$

gdje su  $Q_{st}$  toplotna energija koja je iz toplotne pumpe predata toplotnom skladištu i  $L_{hp}$  električna energija iskorišćena za rad toplotne pumpe

- Za toplotno skladište:

$$\eta_{st} = \frac{Q_{ORC}}{Q_{st}} \quad (3)$$

gdje je  $Q_{ORC}$  toplota predata ORC sistemu iz toplotnog skladišta

- Za ORC sistem:

$$\eta_{ORC} = \frac{L_{ORC}}{Q_{ORC}} \quad (4)$$

gdje je  $L_{ORC}$  električna energija proizvedena u ORC sistemu.

U Tabli 1 su navedene usvojene vrijednosti parametra za proračun posmatranog sistema.

Tabela 1. Usvojene vrijednosti parametara rada sistema

	Vrijednost	Jedinica
Električna snaga kompresora	100	kW
Temperatura izvora toplote (otpadna toplota)	90	°C
Pritisak kondenzacije ORC ciklusa	1,01	bar
Temperatura isparavanja toplotne pumpe	75	°C
Donja temperatura skladištenja	90	°C
Minimalna gornja temperatura skladištenja	110	°C
Maksimalna gornja temperatura skladištenja	160	°C
Minimalna razlika temperatura pri procesu razmjene toplote	5	°C
Temperatura rashladnog sredstva na ulazu u kondenzator	20	°C
Maseni protok rashladnog sredstva kroz kondenzator	10	kg/s
Izentropska efikasnost kompresora/ekspanzionog uređaja	0,7	-
Izentropska efikasnost pumpe	0,7	-
Efikasnost skladišta	1	-

U proračunu su analizirana tri radna sredstva R365mfc, R123 i R245ca.

## 7. REZULTATI I DISKUSIJA

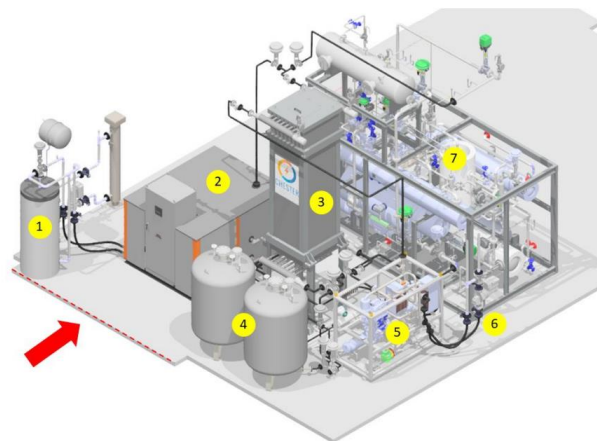
Analizom rezultata proračuna izdvajaju se sljedeći zaključci:

1. R245ca se pokazalo kao najbolja opcija za posmatrani sistem,
2. Efikasnost toplotne pumpe opada sa povećanjem gornje temperature skladištenja,
3. Efikasnost ORC ciklusa raste sa povećanjem gornje temperature skladištenja,
4. Ukupna efikasnost sistema se smanjuje sa povećanjem gornje temperature skladištenja,
5. Efikasnost toplotne pumpe se povećava se povećanjem efikasnosti kompresora,
6. Efikasnost ORC ciklusa se povećava se povećanjem efikasnosti turbine i
7. Sa povećanjem efikasnosti energetskih uređaja povećava se i ukupna efikasnost sistema.

## 8. TOPLOTNO-PUMPNO SKLADIŠTE – PROJEKAT CHEST

CHEST (eng. Compressed Heat Energy Storage) je istraživački projekat koji je sproveden u periodu od aprila 2018. do marta 2023. godine, sa ciljem razvoja, izrade i laboratorijskog ispitivanja CHEST koncepta. CHEST predstavlja toplotno-pumpno skladište električne energije, koje se sastoji od [10] visokotemperaturske toplotne pumpe (eng. High Temperature Heat Pump - HTHP) - za transformaciju toplotne energije niskotemperaturskog izvora u električnu energiju, primjenom električne energije iz obnovljivih izvora, visokotemperaturskog skladišta toplote (eng. High-Temperature Thermal Energy Storage System - HT-TESS) - za skladištenje toplotne energije koju predaje toplotna pumpa i organskog Rankinovog ciklusa (eng. Organic Rankine Cycle - ORC) - za proizvodnju električne energije i niskotemperaturske toplote.

Cilj CHESTER projekta jeste razvoj, konstrukcija i eksperimentalno testiranje prvog prototipa TPS sistema. Kao laboratorijski model (prototip) je korišćeno laboratorijsko postrojenje sa izlaznom električnom snagom od 10 kW<sub>e</sub> i koje se sastojalo se od osnovnih elemenata CHEST sistema: toplotne pumpe, toplotnog skladišta i ORC sistema. Dispozicija opreme u laboratoriji prikazana je na Slici 2.



Slika 2. Dispozicija opreme u laboratoriji za ispitivanje CHEST sistema: 1-izvor toplote, 2 – isparivač toplotne pumpe, 3 – skladište latentne toplote, 4 – skladište osjetne toplote, 5 – ORC sistem, 6 – toplotni ponor, 7 – generator pare radnog sredstva [11]

### 8.1 Rezultati laboratorijskih ispitivanja

Nakon sprovedenih 11 testova i analize dobijenih podataka došlo se do sljedećih rezultata [12]:

1. Proces punjenja skladišta, odnosno rada toplotne pumpe i skladišta toplote, traje 4,7 h sa prosječnim utroškom električne energije od 45,5 kWh<sub>e</sub>, odnosno utroškom snage od 10 kW<sub>e</sub>;
2. Proces pražnjenja skladišta, odnosno rad skladišta toplote i ORC ciklusa, je trajao 1,6 h proizvodeći 10,9 kWh<sub>e</sub> električne energije pri snazi između 5 i 8 kW<sub>e</sub>;
3. Efikasnost prototipa od 10 kW<sub>e</sub> kreće se u rasponu od 17,9% do 37,2% za manje veličine postrojenja, dok se za velika postrojenja predviđa efikasnost od 68%;
4. Povećanje stepena tehnološkog razvoja sa TRL3 na TRL5.

Na osnovu sprovedenih ispitivanja i analiza ustanovljeno je da teorijski koncept komprimovanog skladišta toplotne energije CHEST uspješno funkcioniše u laboratorijskim uslovima.

## 9. ZAKLJUČAK

Analizom posmatranog toplotno-pumpnog skladišta ustanovljeno je da ovaj vid skladištenja električne energije ima potencijal za dalji razvoj i komercijalizaciju. Rezultati proračuna daju zadovoljavajuće rezultate. Ukupna efikasnost sistema, za usvojene parametre i radno sredstvo, se kreće između 75 i 97%.

Dalja istraživanja treba usmjeriti na ispitivanja sistema većih kapaciteta i unapređenje elemenata sistema, kao što

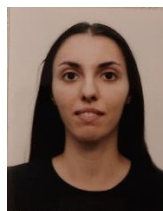
su kompresori i ekspanzioni uređaji. Nadalje, potrebno je ispitati i potencijal integracije sektora električne i toplotne energije i primjenu poligeneracije.

## 10. LITERATURA

- [1] Миловановић, Здравко, и др. „Поглавље 7 Складиштење енергије“, у: Одрживо планирање енергије: технологије и енергетска ефикасност, Бања Лука, 2018.
- [2] XUE, Naobai. A comparative analysis and optimisation of thermo-mechanical energy storage technologies. 2019. (докторска дисертација), Универзитет у Кембриџу, 2019. доступно на: <https://doi.org/10.17863/CAM.37776>
- [3] Koen A. et Antunez P. F., 2020. *Pumped Thermal Electricity Storage: grid-scale, cheap materials, known tech, compact, install anywhere*, доступно на: <https://energypost.eu/pumped-thermal-electricity-storage-grid-scale-cheap-materials-known-tech-compact-install-anywhere/>, [приступљено: 12.09.2023.]
- [4] European commission. Recommendations on energy storage, доступно на: [https://commission.europa.eu/index\\_en](https://commission.europa.eu/index_en), [приступљено: 9. 9. 2023.]
- [5] Guoquan Qiu, *Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC*, Renewable Energy, Volume 48, 2012, стране 565-570, ISSN 0960-1481, доступно на: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.006>
- [6] Qiu, G., Liu, H., et Riffat, S., 2011., *Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle*. Applied Thermal Engineering, 31(16), 3301–3307, доступно на: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.06.008>
- [7] Циримотић Д., 2021., *Термодинамички ОРЦ процес за искориштавање геотермалне енергије*, завршни рад, Загреб: Факултет кемијског инжењерства и технологије, Свеучилиште у Загребу
- [8] Staub, S., et al., 2018., *Reversible heat pump–organic Rankine cycle systems for the storage of renewable electricity*. Energies, 11.6: 1352., доступно на: <https://doi.org/10.3390/en11061352>

- [9] Frate, G. F., Antonelli, M., & Desideri, U., 2017., *A novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) system with thermal integration*. Applied Thermal Engineering, 121, 1051–1058. доступно на: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.127>
- [10] Stark, S., Bestenlehner, D., 2018., *CHESTER D4.9: Roadmap for future development of CHEST system*, доступно на: <https://www.chester-project.eu/>, [приступљено: 20.09.2023.]
- [11] Bauer, D., Gutierrez, A., Johnson, M. et Weller T., 2022., *D5.2: Installation and commissioning of components and whole CHEST prototype*, доступно на: <https://www.chester-project.eu/>, [приступљено: 22.09.2023.]
- [12] CHESTER, 2023., *Successful operation of the CHEST system!*, доступно на: <https://www.chester-project.eu/>, [приступљено: 1. 10. 2023.]

### Kratka biografija:



**Marija Njezić** rođena je u Banjaluci 1997. godine. Osnovne studije završila je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci, studijski program Energetsko i saobraćajno mašinstvo, 2021. godine.



**Borivoj Stepanov** rođen je 1976. godine u Novom Sadu, doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2014. godine, trenutno radi u zvanju vanrednog profesora, a oblast interesovanja su mu inovativni energetske sistemi.