

ПОТЕНЦИЈАЛ КОРИШЋЕЊА ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ**THE POTENTIAL OF USING WASTE HEAT**Тања Јеличић, Боривој Степанов, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ**

Кратак садржај – *Тема овог рада јесте потенцијал коришћења отпадне топлоте као алтернативни извор енергије. Проучавајући различите индустријске секторе и процесе, открили смо различите методе и технологије које омогућавају поврат и коришћење отпадне топлоте у корисне сврхе.*

Кључне речи: *Енергија, отпадна топлота, рекулперација отпадне топлоте, размењивач топлоте*

Abstract – *The subject of this work is the potential of using waste heat as the alternative source of energy. Studying different industrial sectors and processes, we have discovered various methods and technologies that enable the recovery and use of waste heat for useful purposes.*

Keywords: *Energy, waste heat, recovery of waste heat, heat exchanger,*

1. УВОД

У данашњем свету, где смо суочени са растућим захтевима за енергијом и све већим еколошким изазовима, ефикасно коришћење расположивих ресурса постаје од суштинског значаја за одрживи развој.

У том контексту, отпадна топлота настала у различитим индустријским процесима представља значајан, али често занемарен потенцијал који се може искористити за производњу додатне енергије и смањење негативног утицаја на животну средину.

Отпадна топлота представља топлотну енергију која би се иначе изгубила у процесима као што су индустријска производња, топлотна енергија из машина, система за хлађење или отпадних гасова.

Ови извори отпадне топлоте садрже значајну енергетску вредност која се може повратити и поново искористити, уместо да се расипа у животну средину. Циљ овог рада јесте да пружи дубље разумевање потенцијала коришћења отпадне топлоте као одрживог извора енергије, и да пружи вредне увиде у циљу остваривања енергетски ефикаснијих, одрживијих и економски исплативијих система.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био ванр. проф. Боривој Степанов.

2. ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗА РЕКУПЕРАЦИЈУ ТОПЛОТЕ**2.1. Органски Ренкинов циклус**

Технологија Органског Ренкиновог циклуса (ОРЦ) је систем који се најчешће користи у индустријским објектима за претварање отпадне топлоте ниске температуре у енергију. Основни циклус се састоји од бојлера (испаривача), пумпе, турбогенератора, кондензатора и радног флуида - органске течности као што су фреони, изобутан и изопентан. Енергија из отпадне топлоте се преноси на радни флуид у котлу, а затим радни флуид испарава и улази у фазу производње електричне енергије. Пара радног флуида покреће турбину која је повезана са генератором који производи електричну енергију. Радни флуид тада улази у кондензатор и струји до пумпе одакле се поново покреће циклус.

2.2. Наткритични циклус угљен-диоксида

Овај циклус користи CO_2 као радни флуид, који има релативно ниску критичну температуру и притисак у поређењу са радним флуидом у ОРЦ систему. Наткритични флуид заобилази изотермну промену фазе течност-пара, што омогућава бољу термичку усклађеност са извором топлоте чиме се повећава ефикасност система. Основни циклус састоји се од турбине, компресора, рекулператора, хладњака и расхладног флуида. Енергија из отпадне топлоте се преноси на радни флуид (CO_2), који испарава и улази у турбину. Комбинација турбогенератора затим претвара механичку енергију у електричну енергију. Рекулператор загрева радни флуид пре уласка у кондензатор.

2.3. Трилатерални циклус испаравања (*Trilateral flash cycle - TFC*)

Трилатерални циклус испаравања (*TFC*) користи исте компоненте као и ОРЦ - пумпу за напајање, грејач, експандер као и кондензатор. Разлика између ова два циклуса је у томе што експанзија код *TFC* почиње од засићене радне течности, а не од прегрејане паре као код ОРЦ система. Ово значи да је пренос топлоте са топлотног извора на радни флуид постигнут са скоро савршеним температурним подударом. Повећање притиска радног флуида се одвија адијабатски. Он се загрева до температуре засићења под високим притиском, након чега се шири као двофазни ток и на крају се кондензује при константном притиску. Радни флуиди који су пожељни за овај систем су лаки угљоводоници [1].

2.4. Рекуператори

Рекуператор је посебна класа размењивача топлоте гас-гас, који се користи за претходно загревање ваздуха коришћењем топлоте из издувних гасова. У рекуператору се одвија размена топлоте између димних гасова и ваздуха кроз металне или керамичке зидове. Метални рекуператори се користе за поврат топлоте на ниским и средњим температурама, док се керамички користе за поврат топлоте на високим температурама. Димни гасови из пећи пролазе кроз рекуператор, одвојени зидом од хладног ваздуха за сагоревање.

2.5. Регенератори

Регенератори се користе као алтернативна опција за загревање ваздуха помоћу рекулације отпадне топлоте из врућих гасова. Постоје два дизајна регенератора и то ротациони регенератор и статички регенератор. Ротациони регенератори користе се за поврат топлоте на ниским температурама, док статички регенератори се користе за високе температуре.

2.6. Економијери напојне воде

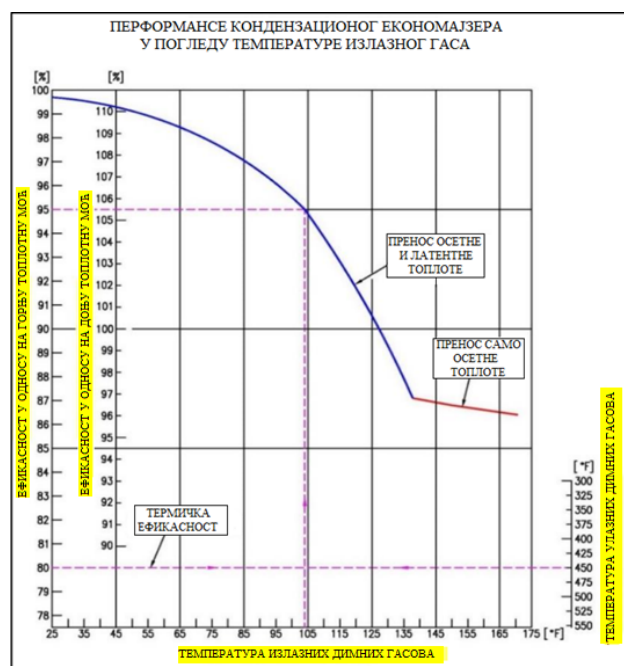
Економијери напојне воде, омогућавају рекулацију топлоте из димних гасова и користе је за загревање напојне воде котла. Кондензација водене паре у димним гасовима омогућава рекулацију и осетне и латентне топлоте, чиме се смањују потребе за горивом за 5 - 10 %. У економијеру напојне воде, димни гасови котла теку око цеви која садржи напојну воду за когао. Једни од главних разлога за разматрање примене ових економијера укључују садржај сумпора у гориву, температуру димних гасова, температуру напојне воде на улазу и излазу и укупну ефикасност економијера. Садржај сумпора је опасан јер може доћи до стварања сумпорне киселине која би могла оштетити или уништити цеви економијера. Тачна температура коју треба одржавати зависи од врсте горива које се користи (углавном садржаја сумпора) и вишка ваздуха који се користи за сагоревање. Одржавање температуре напојне воде и димних гасова изнад одређене минималне вредности ће помоћи у одржавању цеви и унутрашњих делова економијера и у избегавању киселинске кондензације унутар самог економијера.

2.7. Кондензациони економијери

Некондензациони економијери избегавају хлађење димних гасова до тачке росе водене паре, чиме задржавају само осетну топлоту садржану у димним гасовима. Кондензациони економијери су дизајнирани за хлађење димних гасова испод тачке росе, и самим тим могу да поврате и осетну и латентну топлоту из продуката димних гасова, и тиме повећају ефикасност парног система и до 10 %. Углавном се користе за повећање ефикасности котловских система. Котлови опремљени кондензационим економијерима могу достићи свеукупну ефикасност преко 90 %. Слика 1. илуструје повећан интензитет преноса топлоте и повећање ефикасности након што процес поврата топлоте стигне до дела поврата латентне топлоте када је у питању природни гас као гориво. Црвени део криве представља предају осетне топлоте у односу на

температуру излазног димног гаса, а плави део криве представља предају осетне и латентне топлоте. Предаја топлоте расте експоненцијално када пренос топлоте укључује рекулацију латентне топлотне енергије. Розе испрекидана линија илуструје потенцијално повећање ефикасности од смањења излазне температуре димних гасова до нормалних температура од 230 °C до 40 °C. Смањење излазне температуре омогућава радну ефикасност опреме (нпр. котлова) да се повећа са 80 % на 95 %.

Постоје две врсте кондензационих размењивача топлоте који се користе у индустрији: без мешања и размењивачи топлоте са мешањем. У дизајну без мешања, димне гасове раздвајају металне површине од напојне воде, док код дизајна са мешањем, димни гасови долазе у директан контакт са напојном водом или другом врстом воде за хлађење гасова.



Слика 2. Рекулација топлоте снижавањем температуре димних гасова коришћењем кондензационог размењивача топлоте [2].

3. УПОТРЕБА ОТПАДНЕ ТОПЛОТЕ

3.1. Коришћење отпадне топлоте из отпадних вода

У Немачкој постоји више пројеката поврата топлоте из канализационе воде, јер отпадна вода која тече у канализационим цевоводима често садржи неискоришћен потенцијал за грејање. Сходно томе, може се обезбедити грејање локалних станова. Енергија из канализационих цевовода се обично извлачи коришћењем топлотних пумпи на електрични погон. Температура воде обично је између 12 °C и 20 °C те се повећава на више температуре до 70 °C. Како би се обезбедила висока сигурност снабдевања, топлотне пумпе се често комбинују са котловима на природни гас или когенеративним постројењима. Размењивачи топлоте су интегрисани или на дну канализације или у одводу постројења за пречишћавање отпадних вода.

3.2. Коришћење отпадне топлоте из рачунарских центара

Mäntsälä, Финска - топао ваздух из рачунарског центра има огроман потенцијал за производњу енергије. Године 2015. је инсталирана топлотна пумпа од 4 MW која користи вишак топлоте из локалног рачунарског центра. Размењивачи топлоте извлаче топли ваздух из сервера рачунарског центра на температурама од приближно 40 °C и шаљу га у топлотну пумпу, где се температура повећава на приближно 85 °C и као таква, шаље се у локалну мрежу даљинског грејања. Коришћењем отпадне топлоте из рачунарског центра, 75 % првобитно коришћене енергије може бити поново коришћени. Вишак топлоте замењује грејање на природни гас и тиме смањује годишњу емисију угљен-диоксида за приближно 4.000 тона CO₂ у првим годинама, а касније и до 11.000 тона CO₂. Тренутно топлотна пумпа може да снабдева 1.500 домова грејањем преко мреже даљинског грејања. Касније, како се планира проширење мреже даљинског грејања, овај број може порастати на око 4.000 домова.

3.3. Коришћење отпадне топлоте из индустрије

Aalborg, Данска - пројекат је заснован у *Aalborg-u* и настао је услед нове регулативе која захтева пречишћавања димних гасова који се испуштају из пећи за кремацију. Да би се то могло остварити, потребно је прво да се димни гасови охладе. Димни гасови се хладе са отприлике 800 °C на 120-140 °C како би се век трајања система за филтрацију продужио. Овај процес хлађења садржи потенцијалан вишак енергије. Уместо да се топлота емитује у околину, она се употребљава у сврхе даљинског грејања. Ако гледамо да је годишњи просек кремација у *Aalborg-u* 2.340, онда се очекује да крематоријум произведе 585.000 kWh годишње, где је просечна количина произведене енергије по кремацији 250 kWh. За хлађење димних гасова користи се око 55.000 kWh док се остатак испоручује локалној мрежи даљинског грејања. Топлота из крематоријума може да загреје 20-25 редовних домаћинстава величине од 120 m² до 140 m².

3.4. Коришћење отпадне топлоте из поплављених рудника

У претходних десет година у Европи су предузете бројне истраживачке и комерцијалне иницијативе за развој и употребу напуштених рудника угља у виду искоришћавања њихове топлоте. Ради се на принципу коришћења великих топлотних пумпи које преузимају топлоту из подземне воде која се природним путем појавила у напуштеним рудницима. На геотермалан извор не утиче клима ни време што је погодно јер се онда може користити током целе године, дању или ноћу. Такође, инсталације не изазивају сметње у околини јер је већина техничке опреме смештена под земљом.

Један од најуспешнијих пројеката је *Minewater* (слика 2.) који се налази у општини *Heerlen*, Холандија. *Minewater 1.0* је термин који се користи за почетни део развоја овог пројекта и у оквиру њега је избушено

пет бунара за вађење топле и хладне воде која би се транспортовала путем троцевне мреже до потрошача. Ограничења овог пројекта су: ограничење у хидрауличком и термичком систему, лети снабдевање не може да буде само хладном, а зими само топлим водом и није могућа размена енергије између зграда. Према томе, у циљу побољшања претходног, развијен је нови систем, *Minewater 2.0*, који представља паметну, хибридну мрежу за даљинско грејање и хлађење, пете генерације. То значи да је сада могућа истовремена размена топлотне и расхладне енергије између потрошача. Овај нови пројекат омогућава размену и складиштење енергије, додавање полигенерације систему, као и потпуно аутоматизован систем (испорука топле или хладне воде у било ком тренутку у зависности од захтева). Рудници на тај начин представљају дугорочно складиште, а резултат тога је мрежа која никада неће остати без енергије. Према томе, она може да се прошири, али онда се јавља ограничење у смислу капацитета за транспорт у одређеном времену, као на пример када ујутру све канцеларије почињу са радом скоро у исто време. Тај проблем су решили следећом оптимизацијом пројекта који носи назив *Minewater 3.0*. Без утицаја на удобност боравка у згради, и даље се може остварити жељена потражња енергије за тачно одређено време. Топлота може да се складишти на неко време у самим зградама, али и у цевоводној мрежи, па би се на пример велике зграде могле почети спорије грејати, али да се то почне раније него што је намештено на термостату како би се избегла јутарња гужва. Сврха ове оптимизације је смањити максималну вршну потрошњу мрежне инфраструктуре. Ако се потражња рашири временски, онда се максимум може значајно смањити.



Слика 2. Илустровани приказ пројекта *Minewater* [3].

4. ПРОРАЧУН

У овом делу одрађен је прорачун преко *Waste heat recovery calculator-a*. Урађен је пример за примену издувних гасова: систем снабдевања топлотом помоћу централног размењивача топлоте. Прво смо унели

информације о извору отпадне топлоте: температура издувних гасова (T) у целзијусима и масени проток (m) у kg/s . Доступност издувних гасова треба да буде наведена према одређеном оперативном распореду, ми смо изабрали да је недељни оперативни распоред такав да се ради свим данима осим среде, у три смене у интервалима од 06.00-12.00 часова, од 12.00-18.00 часова и од 18.00-00.00 часова. Затим смо унели улазне податке система за рекулерирацију отпадне топлоте: температура топле воде за снабдевање (T_{sv}), температура повратне воде (T_{pv}), топлотна снага (Q) и дужина цевовода (L). Након одеђене снаге, потребно је одабрати план рада система за снабдевање топлотом, ми смо изабрали да систем за снабдевање топлотом ради током целе недеље у две смене у интервалу од 06.00-12.00 часова и од 12.00-18.00 часова. За очекивани број радних недеља у години изабрали смо 25. Као очекивано трајање кратког временског прекида одредили смо 1 h, а фактор потрошње топлоте ставили смо да буде 91 %. Потом смо унели параметре за економско вредновање: технички животни век изражен у годинама (y) износи 15; каматна стопа износи 4,5 %; цена лож уља изражена у EUR/l износи 0,95; трошкови рада и одржавања током целог животног века постројења, не укључујући трошкове горива, износе 20 %; стопа инфлације износи 1,5 %; Цена електричне енергије изражена у EUR/kWh износи 0,08.

$$T = 400 \text{ }^{\circ}C$$

$$m = 3 \frac{kg}{s}$$

$$T_{sv} = 130 \text{ }^{\circ}C$$

$$T_{pv} = 30 \text{ }^{\circ}C$$

$$Q = 1151 \text{ kW}$$

$$L = 2000 \text{ m}$$

Када ове податке унесемо у калкулатор, добијамо термоенергетске карактеристике за предложени систем које износе: топлотна снага система за снабдевање топлотом 1.151 kW; потребна запремина резервоара топлоте 301,32 m³; број радних сати годишње 2.100 h; фактор потрошње топлоте 91 %; расположива топлотна енергија 5.275,37 MWh/y; искоришћена топлота извора 2.199,56 MWh/y; произведена корисна топлота 2.199,56 MWh/y; испоручена и утрошена корисна топлота 2.010,40 MWh/y и потрошена електрична енергија 43,99 MWh/y. Поред тога добијамо и економску евалуацију за предложени систем чији су подаци: укупна капитална улагања 1.640.534 EUR; оперативни трошкови 22.897 EUR/y; трошкови производње топлотне енергије 79,53 EUR/MWh; нето садашња вредност 828.036 EUR као и период отплате 7,61 y. На основу овога можемо закључити да је топлотни капацитет извора отпадне топлоте довољан за предложени систем поврата топлоте.

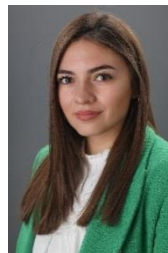
5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду причали смо о потенцијалу коришћења отпадне топлоте као о важном ресурсу за побољшање енергетске ефикасности и смањење негативних утицаја на животну средину. Анализирали смо и приметили да постоји значајан потенцијал за поврат отпадне топлоте у различитим секторима индустрије, као што су производња електричне енергије, хемијска индустрија, металургија и други, као и да имплементација система поврата отпадне топлоте омогућава преусмеравање и коришћење ове топлотне енергије у корисне сврхе, као што су загревање воде, производња паре или покретање других процеса који захтевају топлотну енергију. Поред енергетских користи, коришћење отпадне топлоте има и позитивне ефекте на животну средину. Смањење емисије штетних гасова и мања потрошња примарних извора енергије доприносе одрживости и заштити животне средине.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Energy Procedia - Trilateral Flash Cycle (TFC): a promising thermodynamic cycle for low grade heat to power generation, Преузето са Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021931224X> (приступљено 03.03.2023.);
- [2] Technology Assessment on Low-Temperature Waste Heat Recovery in Industry, Преузето са U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub164247.pdf> (приступљено 22.02.2023.);
- [3] Energy Procedia, Преузето са Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021400174X> (приступљено 20.6.2022.).

Кратка биографија:



Тања Јеличић рођена у Маглићу 1997. године. Факултет техничких наука у Новом Саду, смер Чисте енергетске технологије уписала 2016. године и по завршетку основних академских студија уписала мастер студије истог смера и запослила се у средњој електротехничкој школи „Михајло Пупин“. Мастер рад написала из мултидисциплинарне области – машинско инжењерство и заштита животне средине и заштита на раду.
контакт: jelicicmg@gmail.com