

**STRATEŠKI PLAN MJERA GRADSKE TOPLANE
ZA POVEĆANJE UČINKOVITOSTI I UVOĐENJE
OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U
CENTRALIZIRANI TOPLINSKI SUSTAV**



KARLOVAC, listopad 2025.

KLASA: 391-01/25-01/01
URBROJ: 2133-1-7/01-25-1

Karlovac, 30. listopada 2025. godine

Na temelju članka 24. Izjave o osnivanju Gradske toplane d.o.o., sukladno odredbama članka 4., stavka 8. Zakona o tržištu toplinske energije („Narodne novine“, broj 80/13, 14/14 i 67/25) te članka 55., st. 8. Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji („Narodne novine“, broj 138/21, 83/23 i 78/25), a uz prethodnu suglasnost Nadzornog odbora Gradske toplane d.o.o., direktor Gradske toplane d.o.o., donosi

O D L U K U
o
donošenju Strateškog plana mjera Gradske toplane d.o.o. Karlovac
za povećanje učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije
u centralni toplinski sustav

I. Donosi se Strateški plan mjera Gradske toplane d.o.o. Karlovac za povećanje učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije u centralni toplinski sustav.

II. Ova Odluka stupa na snagu danom donošenja.

O b r a z l o ž e n j e

Odredbom članka 4., stavka 8. Zakona o tržištu toplinske energije, propisano je: „(8) Proizvođač toplinske energije i distributer toplinske energije u centralnom toplinskom sustavu, odnosno proizvođač toplinske energije i opskrbljivač toplinskom energijom u zatvorenom toplinskom sustavu, s priključnom snagom većom od 5 MW, koji nije učinkovit toplinski sustav centraliziranog grijanja i hlađenja, dužni su izraditi plan za osiguravanje učinkovitije potrošnje primarne energije, za smanjenje distribucijskih gubitaka i povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora u opskrbi grijanjem i hlađenjem, do 31. prosinca 2025. i svakih pet godina nakon toga, koji dostavljaju Agenciji na odobrenje, a sadržava mjere i kriterije za postizanje učinkovitog toplinskog sustava centraliziranog grijanja i hlađenja sukladno stavku 6. točkama 2. do 5. ovoga članka.“

Odredbom članka 55., stavka 8. Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, određeno je: „(8) Distributeri i opskrbljivači toplinskom energijom dužni su izraditi svoje planove mjera za povećanje učinkovitosti i udjela obnovljivih izvora energije u svojim centraliziranim sustavima za grijanje i hlađenje.“

Odredbom istog članka Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, u stavku 13. i 14. istog, propisano je: „(13) Prijedlog plana iz stavka 8. ovoga članka distributeri i opskrbljivači toplinskom energijom dostavljaju Ministarstvu na odobrenje. (14) Ministarstvo odlukom, koja nije upravni akt odobrava planove iz stavka 8. ovoga članka u roku od 60 dana od dana zaprimanja plana ili zahtjeva od opskrbljivača toplinskom energijom za nadopunu plana.“

Slijedom navedenih obveza, Gradska toplana d.o.o. je, uz suradnju Izvršitelja usluge izrade prijedloga navedenog Plana, tvrtke EKONERG d.o.o., Koranska 5, Zagreb, za Naručitelja Gradska toplana d.o.o., izradila predmetni Strateški plan mjera Gradske toplane d.o.o. Karlovac za povećanje učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije u centralni toplinski sustav, koji plan obuhvaća ciljeve i mjere koji omogućuju smanjenje potrošnje primarne energije, smanjenje gubitaka u distribuciji te povećanje udjela

energije iz obnovljivih izvora u opskrbi toplinskom energijom, kako to zahtijevaju navedeni propisi. Priloženi Strateški plan izrađen je sukladno spomenutim odredbama zakona te odgovara mjerama energetske učinkovitosti i poticanja obnovljivih izvora energije propisanim nacionalnim i EU okvirom.

Temeljem svega navedenog, na temelju ovlasti Uprave, odnosno direktora Društva, određene Izjavom o osnivanju Društva, a uz prethodnu suglasnost Nadzornog odbora Gradske toplane d.o.o., dobivene na 54. sjednici Nadzornog odbora Društva, od 29. listopada 2025. godine, valjalo je donijeti Odluku, kao u izreci.

D I R E K T O R

Zdravko Eremić, dipl.oec.

SADRŽAJ

1. UVOD / SVRHA STRATEŠKOG PLANA	10
2. ANALIZA ZAKONODAVNOG OKVIRA I PRIPADNIH ENERGETSKIH POLITIKA	12
2.1. Europski zakonodavni okvir	12
2.2. Nacionalni zakonodavni i strateški okvir	15
2.3. Položaj i izazovi centralnog toplinskog sustava	18
2.3.1. Trenutni položaj	19
2.3.2. Izazovi za transformaciju	19
2.3.3. Prilike i pokretači promjena	20
3. PREGLED POSTOJEĆEG STANJA TOPLINSKE OPSKRBE U GRADU KARLOVCU	22
3.1. Postojeće proizvodne jedinice	22
3.1.1. Kotao VKLM-25	22
3.1.2. Kotao VKLM-50	23
3.2. Vrelvodna mreža	23
3.3. Toplinski konzum	24
4. DEFINIRANJE KRITERIJA I CILJEVA DEKARBONIZACIJE CTS-A GRADA KARLOVCA	28
4.1. Kriteriji dekarbonizacije	28
4.2. Ciljevi dekarbonizacije	29
5. PREGLED RASPOLOŽIVIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA DEKARBONIZACIJU PROIZVODNIH LOKACIJA	32
6. ANALIZA RASPOLOŽIVIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA DEKARBONIZACIJU PROIZVODNIH LOKACIJA	37
6.1. Korištenje biomase	37
6.1.1. Tehnološka rješenja za korištenje biomase	37
6.1.2. Analiza potencijala biomase	41
6.1.3. Sigurnosni aspekti	44
6.1.4. Prostorno planski aspekti	45
6.1.5. Procjena ulaganja	47
6.1.6. Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi	48
6.2. Sustavi za pohranu toplinske energije – akumulatori topline	50
6.2.1. Opis tehnologije	50
6.2.2. Analiza raspoloživog potencijala za skladištenje toplinske energije	52
6.2.3. Analiza veličine akumulatora topline	53
6.2.4. Prostorno planski aspekti	54
6.2.5. Procjena ulaganja	55
6.2.6. Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi	55
6.3. Korištenje geotermalne energije u CTS-u i kapaciteta distribuiranih spremnika toplinske energije	57
6.3.1. Strateški i zakonodavni okvir istraživanja i eksploatacije geotermalnih voda za energetske svrhe na razini EU i RH	57
6.3.2. Geotermalni potencijal i prostorni aspekti	58
6.3.3. Pregled tehnologija za iskorištavanje geotermalne energije	61

6.3.4.	Procjena ulaganja u korištenje geotermalne energije	66
6.3.5.	Status geotermalnih projekata	67
6.4.	Korištenje sunčeve energije za potrebe CTS-a i kapaciteta distribuiranih spremnika toplinske energije	71
6.4.1.	Analiza potencijalnog prostora za iskorištavanje sunčeve energije i prostorno planski aspekti.....	72
6.4.2.	Analiza dostupnih tehnologija za iskorištavanje sunčeve energije	73
6.4.3.	Preliminarna procjena veličine izgradnje	83
6.4.4.	Procjena ulaganja	84
6.4.5.	Izvedeni sustavi	85
6.5.	Korištenje tehnologija koje električnu energiju koriste za proizvodnju toplinske energije (tzv. Power-to-Heat tehnologije)	87
6.5.1.	Vrelvodni električni kotao	87
6.5.2.	Dizalice topline.....	94
6.6.	Hibridna postrojenja	103
6.6.1.	Fotonaponska elektrana	103
6.7.	Kogeneracijska postrojenja	111
6.7.1.	Raspoložive tehnologije za proizvodnju toplinske i električne energije	111
6.7.2.	Analiza mogućnosti sudjelovanja na tržištu električne energije	115
6.7.3.	Analiza priključne snage i priključka na elektroenergetsku mrežu	116
6.7.4.	Procjena ulaganja	117
6.7.5.	Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi	118
6.8.	Rekapitulacija predloženih tehnoloških rješenja	120
7.	MJERE ZA POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI I ENERGETSKIH UŠTEDA	121
7.1.	Modernizacija plinskih kotlova	121
7.2.	Izolacija cjevovoda i objekata	122
7.3.	Priprema mreže za niskotemperaturni rad	123
7.4.	Regulacija, automatizacija i optimizacija rada	123
7.5.	Napredni sustavi upravljanja energijom	124
7.6.	Poticanje povećanja energetske učinkovitosti krajnjih potrošača	125
7.7.	Uvođenje naprednih tarifnih sustava	126
7.7.1.	Preduvjeti za uvođenje naprednog tarifnog sustava	127
7.7.2.	Tarifni modeli i upravljanje krajnjom potrošnjom	128
7.7.3.	Izvedeni sustavi	130
7.8.	Zaključna razmatranja	131
8.	ANALIZA PROIZVODNJE TOPLINSKE ENERGIJE NA PODRUČJU GRADA KARLOVCA DO 2050. GODINE	134
8.1.	Metodologija izrade projekcija	134
8.2.	Ključni utjecaji na buduću proizvodnju toplinske energije	135
8.2.1.	Demografski trendovi	135
8.2.2.	Novi priključci i širenje mreže	136
8.2.3.	Energetska obnova i povećanje učinkovitosti	138
8.2.4.	Klimatske promjene i smanjenje potreba za grijanjem	139
8.3.	Scenariji proizvodnje toplinske energije	141
8.3.1.	Referentni scenarij (Business as Usual)	141
8.3.2.	Umjereni razvoj uz mjere energetske učinkovitosti	143
8.3.3.	Dekarbonizacijski scenarij s visokim priključenjem i obnovom	144
8.4.	Zaključak	145

9. METODOLOGIJA ODABIRA OPTIMALNE KOMBINACIJE TEHNOLOGIJA	147
9.1. Parametri simulacije i ograničenja	147
9.2. Projekcija budućih cijena energije i goriva	148
9.2.1. Projekcije cijena (godišnji prosjek)	148
9.2.2. Korelacija cijena prirodnog plina i električne energije	149
9.2.3. Buduće cijene električne energije (satna rezolucije)	150
9.2.4. Projekcija cijena biomase	151
9.2.5. Kupovna cijena toplinske energije	151
9.2.6. Prodajna cijena toplinske energije	152
10. ODREĐIVANJE OPTIMALNE KOMBINACIJE TEHNOLOGIJA I MJERA ZA OSTVARIVANJE CILJA DEKARBONIZACIJE PROIZVODNIH LOKACIJA	153
10.1. Rezultati u 2028. godini	153
10.1.1. Financijska analiza	154
10.1.2. Uklapanje kotla na biomasu i akumulatora topline u postojeći sustav	158
10.1.3. Usporedba opcije kotla na biomasu i geotermalnog postrojenja	159
10.1.4. Zaključak	163
10.2. Rezultati u 2050. godini	163
10.2.1. Scenarij A	164
10.2.2. Scenarij B	165
10.2.3. Scenarij C	167
10.2.4. Zaključak	169
11. EKONOMSKO-FINANCIJSKA ANALIZA	170
11.1. Procjena investicijskih ulaganja	170
11.2. Izvor financiranja investicije i vremenski plan investiranja	170
11.3. Uvjeti financiranja	171
11.3.1. Prinos na vlastita sredstva	171
11.3.2. Kreditni uvjeti	171
11.3.3. Obrtna sredstva	172
11.4. Planirani operativni prihodi	172
11.5. Planirani operativni troškovi (OPEX)	173
11.5.1. Troškovi održavanja	173
11.5.2. Troškovi osiguranja	173
11.5.3. Troškovi proizvodnje toplinske energije	173
11.5.4. Troškovi zbrinjavanja pepela	174
11.5.5. Ostali troškovi	174
11.6. Ekonomski pokazatelji	175
11.6.1. Kriteriji opravdanosti investicije	175
11.6.2. Period promatranja	176
11.6.3. Ekonomski tok projekta	176
11.7. Osvrt na stanje u 2050. godini	177
12. ANALIZA OSJETLJIVOSTI	179
12.1. Investicijski troškovi	179
12.2. Cijena biomase	180
13. MOGUĆNOSTI SUFINANCIRANJA	181
13.1. Modernizacijski fond	181
13.2. Inovacijski fond	182
13.3. Mehanizam za oporavak i otpornost	182
13.4. InvestEU	183

13.5. Europski fond za regionalni razvoj	184
14. OCJENA ODRŽIVOSTI PROJEKTA PREMA KRITERIJIMA EU TAKSONOMIJE	185
15. HODOGRAM AKTIVNOSTI NUŽNIH ZA REALIZACIJU PROJEKTA	188
15.1. Kratkoročne aktivnosti do 2028. godine.....	188
15.2. Dugoročne aktivnosti do 2050. godine.....	190
16. ZAKLJUČAK.....	191

POPIS SLIKA

Sl. 3–1 Trasa vrelovodne mreže	24
Sl. 3–2 Pokazatelji sustava sustava	25
Sl. 3–3 Proizvedena toplinska energija na pragu toplane – satna rezolucija	26
Sl. 3–4 Proizvedena toplinska energija na pragu toplane	27
Sl. 3–5 Proizvodnja i potrošnja toplinske energije u jednom tjednu	27
Sl. 4–1 Kriteriji dekarbonizacije	28
Sl. 4–2 Ciljevi dekarbonizacije prema točki 1. članka 26 (EU) 2023/1791	30
Sl. 4–3 Ciljevi dekarbonizacije prema točki 2. članka 26 (EU) 2023/1791	31
Sl. 6–1 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini u ovisnosti o instaliranoj snazi kotla na biomasu	40
Sl. 6–2 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini ovisnosti o snazi kotla na biomasu s ugrađenim akumulatorom topline	41
Sl. 6–3 Bijeli i crni peleti	43
Sl. 6–4 Silos za pelete	45
Sl. 6–5 Predloženi smještaj skladišta peleta	46
Sl. 6–6 Procjena ulaganja u novi kotao na biomasu	47
Sl. 6–7 Toplovodna kotlovnica, kotao i spremnik biomase u Pokupskom	48
Sl. 6–8 Pojednostavljena shema akumulatora topline	51
Sl. 6–9 Shema spajanja akumulatora topline na postojeći sustav	52
Sl. 6–10 Lokacija spremnika mazuta i budućeg akumulatora topline	54
Sl. 6–11 Investicijski troškovi izgradnje akumulatora topline	55
Sl. 6–12 Akumulator topline na lokaciji Pogona TE-TO Zagreb	55
Sl. 6–13 Akumulator topline na lokaciji EL-TE Zagreb	56
Sl. 6–14 Karta geotermalnog potencijala	58
Sl. 6–15 Istražni prostor geotermalnih voda Karlovac 1	59
Sl. 6–16 Varijante dobave toplinske energije s geotermalnog izvora	61
Sl. 6–17 p-h dijagram organskog Rankineovog ciklusa	64
Sl. 6–18 Linije zasićenja	66
Sl. 6–19 Karta bušotina, eksploatacijskih polja i istražnih prostora u RH	68
Sl. 6–20 Karta glavnih geotermalnih ležišta za upotrebu u centralnim toplinskim sustavima	69
Sl. 6–21 Srednje dnevno/godišnje globalno Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi	71
Sl. 6–22 Srednje mjesečne vrijednosti globalnog Sunčevog zračenja na vodoravnu plohu na području grada Karlovca za razdoblje 2005-2023	72
Sl. 6–23 Pločasti kolektor	74
Sl. 6–24 Vakuumski cijevni kolektor	75
Sl. 6–25 Krivulje efikasnosti različitih konstrukcija kolektora	75
Sl. 6–26 Vakuumski pločasti solarni kolektor	76
Sl. 6–27 Spot-Check sustav provjere vakuumu	77
Sl. 6–28 Solarni kolektor MT-Power v4.3	77
Sl. 6–29 Shema daljinskog grijanja sa solarnim kolektorima i toplinskim spremnikom	78
Sl. 6–30 Tipovi podzemnih spremnika topline	80
Sl. 6–31 Proizvodnja toplinske energije iz solarnih kolektora u ovisnosti o njihovoj snazi	84
Sl. 6–32 Procjena ulaganja ovisno o površini i toplinskom učinku solarnih kolektora	84
Sl. 6–33 Solarna toplana planiranog ukupnog toplinskog učina 900 kW	85
Sl. 6–34 Solarne toplane u Europi	86
Sl. 6–35 Vrelovodni električni kotao - Varijanta 1	89
Sl. 6–36 Vrelovodni električni kotao - Varijanta 2	90
Sl. 6–37 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini u ovisnosti o instaliranoj snazi kotla na biomasu	92
Sl. 6–38 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini ovisnosti o snazi kotla na biomasu s ugrađenim akumulatorom topline	92
Sl. 6–39 Procjena ulaganja u električni kotao	93
Sl. 6–40 Djelotvornost i raspoloživost toplinskih izvora za dizalicu topline	94

Sl. 6–41 Shematski prikaz kompresijske dizalice topline	95
Sl. 6–42 p-h dijagram rada dizalice topline	96
Sl. 6–43 Načini rada dizalice topline	97
Sl. 6–44 Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Karlovac (Gornje Mekuše)	98
Sl. 6–45 Specifični troškovi podzemnog polaganja toplovoda	101
Sl. 6–46 Principijelna shema fotonaponskog sustava	104
Sl. 6–47 Monokristalni silicijevi paneli	105
Sl. 6–48 Polikristalni silicijevi paneli	106
Sl. 6–49 CdTe (lijevo) i CIGS (desno) tehnologija	106
Sl. 6–50 Bifacijalni paneli	107
Sl. 6–51 Varijanta smještaja FN modula u konfiguraciji istok-zapad	108
Sl. 6–52 Varijanta smještaja FN modula u konfiguraciji jug	109
Sl. 6–53 Mjesečni specifični prinos fotonaponskog sustava	109
Sl. 6–54 Nepodudarnost fotonaponske proizvodnje i električnih potreba odabranog električnog kotla	110
Sl. 6–55 Plinska turbina	112
Sl. 6–56 Plinski motor	113
Sl. 6–57 Parna turbina s kotlom na biomasu	114
Sl. 6–58 Kogeneracijski postrojenje Värtaverket u Stockholmu	119
Sl. 6–59 Kogeneracijsko postrojenje Güssing	119
Sl. 6–60 Rekapitulacija predloženih tehnoloških rješenja	120
Sl. 7–1 Dijagram vožnje vrelovodne mreže	123
Sl. 8–1 Scenariji kretanja broja stanovnika u gradu Karlovcu	136
Sl. 8–2 Scenariji promjene broja priključenih korisnika	137
Sl. 8–3 Scenariji stope renovacije u zgradarstvu do 2050. godine	139
Sl. 8–4 Scenariji broja stupanj dana grijanja za Hrvatsku od 1950. do 2100. godine	141
Sl. 8–5 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema referentnom scenariju	142
Sl. 8–6 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema scenariju umjerenog razvoja	143
Sl. 8–7 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema dekarbonizacijskom scenariju	144
Sl. 8–8 Usporedba scenarija proizvodnje toplinske energije do 2050. godine	146
Sl. 9–1 Cijene prirodnog plina od 2017 godine	149
Sl. 9–2 Cijene električne energije od 2017 godine	150
Sl. 9–3: Usporedba cijena električne energije između 2023. i predviđenih cijena za 2027. godinu (Karakteristični isječak: 16.01.2023. - 23.01.2023.)	151
Sl. 10–1 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2028. godini	158
Sl. 10–2 Analiza isplativosti izgradnje geotermalnog postrojenja	160
Sl. 10–3 Faktor povećanja cijene toplinske energije za različite periode isplativosti i razine sufinanciranja	161
Sl. 10–4 Neto sadašnja vrijednost projekta Gradske toplane (kupnja geotermalne toplinske energije i akumulator topline) pri različitim razinama sufinanciranja u usporedbi s opcijom kotla na biomasu	162
Sl. 10–5 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij A	165
Sl. 10–6 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij B	167
Sl. 10–7 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij C	168

POPIS TABLICA

Tab. 3-1 Nazivne tehničke značajke vrelovodnog kotla VKLM-50.....	23
Tab. 3-2 Pokazatelji sustava	25
Tab. 3-3 Prosječni pokazatelji sustava po korisniku	26
Tab. 5-1 SWOT analiza korištenja biomase za potrebe CTS-a grada Karlovca.....	32
Tab. 5-2 SWOT analiza korištenja akumulatora topline za potrebe CTS-a grada Karlovca.....	33
Tab. 5-3 SWOT analiza korištenja geotermalne energije za potrebe CTS-a grada Karlovca.....	33
Tab. 5-4 SWOT analiza korištenja sunčeve energije za potrebe CTS-a grada Karlovca.....	34
Tab. 5-5 SWOT analiza korištenja potencijalnih hibridnih postrojenja (fotonaponska elektrana + električni kotao / dizalica topline) za potrebe CTS-a grada Karlovca.....	34
Tab. 5-6 SWOT analiza korištenja plinskog kogeneracijskog postrojenja za potrebe CTS- a grada Karlovca	35
Tab. 5-7 SWOT analiza modernizacije postojeće infrastrukture i opreme.....	35
Tab. 5-8 SWOT analiza za uvođenje naprednih tarifnih sustava u CTS grada Karlovca	36
Tab. 6-1 Tehničke karakteristike prenamijenjenog kotla.....	38
Tab. 6-2 Granične vrijednosti emisija (GVE) za nove srednje uređaje za loženje na krutu biomasu	40
Tab. 6-3 Tehničke karakteristike novog kotla na biomasu	41
Tab. 6-4 Teorijski potencijal drvene biomase na području Karlovačke i susjednih županija	42
Tab. 6-5 Svojstva bijelih i crnih peleta.....	43
Tab. 6-6 Karakteristike silosa za pelete	45
Tab. 6-7 Tehničke karakteristike geotermalnog izvora (proizvodnja toplinske energije)	62
Tab. 6-8 Karakteristike toplinskih spremnika	80
Tab. 6-9 Karakteristike polja solarnih kolektora	83
Tab. 6-10 Tehničke karakteristike električnih kotlova	91
Tab. 6-11 Tehničke karakteristike dizalice topline	99
Tab. 6-12 Usporedba tehnologija fotonaponskih panela	107
Tab. 6-13 Tehničke karakteristike odabranog kogeneracijskog postrojenja	117
Tab. 6-14 Usporedba procjena ulaganja u kogeneracijske sustave	117
Tab. 6-15 Tehničke karakteristike BE-TO Osijek i BE-TO Sisak	118
Tab. 7-1 Cjenik toplinske energije za CTS, kotlovnica na adresi T. Ujevića 7.....	126
Tab. 7-2 Cjenik toplinske energije za ZTS, kotlovnica na adresi Baščinska cesta 41	127
Tab. 7-3 Prijedlog vremenski diferencirane tarife	129
Tab. 7-4 Prijedlog penaliziranja neučinkovitih unutarnjih instalacija	130
Tab. 7-5 Rangiranje mjera modernizacije prema omjeru koristi i troška.....	131
Tab. 8-1 Kretanje broja stanovnika u gradu Karlovcu u periodu od 2011. do 2023. godine.....	135
Tab. 8-2 Broj stanovnika u gradu Karlovcu prema tri scenarija	136
Tab. 8-3 Scenariji promjene broja priključenih korisnika po kategoriji korisnika.....	137
Tab. 8-4 Usporedba potrošnje toplinske energije u toplinskim stanicama prije i poslije energetske obnove	138
Tab. 8-5 Projekcija stupanj dana grijanja za Hrvatsku	140
Tab. 8-6 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema referentnom scenariju.....	142
Tab. 8-7 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema scenariju umjerenog razvoja	143
Tab. 8-8 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema dekarbonizacijskom scenariju	144
Tab. 8-9 Značajke analiziranih scenarija.....	145
Tab. 9-1 Projekcije cijena prirodnog plina, električne energije i CO ₂	148
Tab. 10-1 Usporedba opcija prema proizvodnji toplinske energije, udjelu OIE i uštedi emisija u 2028. godini.....	153
Tab. 10-2 Emisijski faktori	154
Tab. 10-3 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za akumulator topline kapaciteta 150 MWh	155

Tab. 10-4 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za kotao na biomasu snage 9 MW	155
Tab. 10-5 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za geotermalno postrojenje - Faza 1	156
Tab. 10-6 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za električni kotao snage 6 MW	156
Tab. 10-7 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za dizalicu topline snage 7,4 MW	156
Tab. 10-8 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za kogeneraciju na biomasu snage 1,5 MW _e i 6 MW _t	157
Tab. 10-9 Neto sadašnja vrijednost projekta	157
Tab. 10-10 Energetska bilanca sustava s kotlom na biomasu i akumulatorom topline	158
Tab. 10-11 Energetska bilanca sustava u scenariju A	164
Tab. 10-12 Energetska bilanca sustava Scenarija B	165
Tab. 10-13 Energetska bilanca sustava Scenarija C	167
Tab. 11-1 Investicijska ulaganja (izvor sredstava)	170
Tab. 11-2 Uvjeti investicijskog kreditiranja	171
Tab. 11-3 Iznos glavnice	171
Tab. 11-4 Iznos anuiteta tijekom otplate kredita	171
Tab. 11-5 Planirani operativni prihodi	172
Tab. 11-6 Troškovi održavanja	173
Tab. 11-7 Troškovi osiguranja	173
Tab. 11-8 Trošak proizvodnje toplinske energije	173
Tab. 11-9 Troškovi zbrinjavanja pepela	174
Tab. 11-10 Ostali troškovi	174
Tab. 11-11 Diskontna stopa	175
Tab. 11-12 Ekonomski tok projekta	176
Tab. 11-13 Rezultati ekonomske analize za period promatranja od 15 godina	177
Tab. 11-14 Investicijska ulaganja za ostvarenje ciljeva u 2050. godini	177
Tab. 12-1 Analiza osjetljivosti na investicijske troškove	180
Tab. 12-2 Analiza osjetljivosti na cijenu biomase	180
Tab. 14-1 Ocjena usklađenosti projekta s kriterijima EU taksonomije	186
Tab. 15-1 Hodogram aktivnosti za ostvarivanje ciljeva u 2028. godini	188

1. UVOD / SVRHA STRATEŠKOG PLANA

Klimatska politika posljednjih je godina snažno oblikovala razvoj energetskeg sektora, kako na razini Europske unije, tako i unutar nacionalnih okvira zemalja članica. Usvajanjem Europskog zelenog plana, postavljen je strateški cilj klimatske neutralnosti do 2050. godine. Zakonodavni paket „Fit for 55“ donosi operativne ciljeve do 2030. godine među kojima se ističe obavezujući cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% u odnosu na 1990. godinu na razini EU. Republika Hrvatska, kao članica Europske unije, u cijelosti je uskladila svoje zakonodavne i strateške okvire s europskom klimatskom i energetskeg politikom. U skladu s tim, u domaće zakonodavstvo prenesene su obveze proizašle iz Pariškog sporazuma kao i mjere definirane novom generacijom europskih direktiva.

Na nacionalnoj razini, Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 138/21, 83/23 i 78/25) dodatno razrađuje propisane ciljeve, osobito u članku 55., stavku 8., koji propisuje obvezu operatora i opskrbljivača toplinskeg energijom da izrađuju planove mjera za povećanje energetskeg učinkovitosti i udjela obnovljivih izvora u svojim centraliziranim sustavima grijanja i hlađenja. U tom širem zakonodavno-političkom okviru nastaje i ova studija, koja predstavlja strateški plan Gradske toplane Karlovac za povećanje učinkovitosti i dekarbonizaciju centraliziranog toplinskog sustava grada Karlovca. Ovaj dokument predstavlja instrument za definiranje dugoročnih smjernica razvoja toplinskeg infrastrukture, u skladu s lokalnim razvojnim potrebama, prostornim mogućnostima postojećih i budućih proizvodnih lokacija te dostupnim tehnološkim rješenjima.

S obzirom na kompleksnost planiranja energetskeg tranzicije u urbanim sredinama, studija uzima u obzir širok raspon međusobno povezanih čimbenika koji izravno ili neizravno utječu na dinamiku, veličinu i strukturu budućih energetskeg ulaganja, a to su:

- razvoj zakonodavnog i strateškog okvira na razini EU i RH,
- stanje i projekcije potrošnje toplinskeg energije u zgradarstvu i industriji,
- razvoj i dostupnost elektroenergetske i plinskeg infrastrukture,
- tehničke i prostorne mogućnosti postojećih i novih proizvodnih lokacija,
- mogućnosti uvođenja sustava za pohranu energije i fleksibilno vođenje sustava,
- analiza potencijala korištenja biomase, sunčeve, geotermalne i električne energije,
- uloga naprednih tehnologija, hibridnih sustava i digitalnih alata za upravljanje energijom,
- dostupni izvori financiranja na lokalnoj, nacionalnoj i EU razini.

Svrha ovog strateškog plana je jasno odrediti tehnološki, regulatorni i investicijski okvir koji će omogućiti postupnu, ali učinkovitu dekarbonizaciju proizvodnje toplinskeg energije u CTS-u grada Karlovca. U tom procesu, studija je imala zadatak identificirati one mjere i rješenja koja su tehnički izvediva u lokalnim uvjetima, ekonomski opravdana iz perspektive investicija i operativnih troškova, regulatorno i okolišno prihvatljiva te kompatibilna s razvojnim planovima grada Karlovca i nacionalnim ciljevima.

Konačan cilj ovog strateškog plana je omogućiti Gradskoj toplani Karlovac da na temelju jasno definiranih analiza, simulacija i stručnih preporuka ima dugoročni plan razvoja proizvodnih i skladišnih kapaciteta te na temelju toga donese investicijske odluke usmjerene prema postupnoj dekarbonizaciji CTS-a, pravovremeno pokrene postupke ishođenja potrebnih dozvola te osigura pristup sredstvima iz europskih fondova. Time se stvaraju preduvjeti za sustavnu implementaciju mjera koje će rezultirati povećanjem energetske učinkovitosti, smanjenjem emisija stakleničkih plinova te značajnim povećanjem udjela obnovljivih izvora energije u energetsom miksu CTS-a.

Posebno je važno naglasiti da je krajnji cilj izrade ovog strateškog plana dobivanje formalnog odobrenja strateškog plana od strane Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske, što predstavlja uvjet za institucionalnu validaciju plana, osiguranje financijske potpore te operativnu provedbu svih predloženih razvojnih aktivnosti.

Na taj način, ovaj plan predstavlja temeljni strateški dokument kojim se pokreće proces transformacije CTS-a grada Karlovca u suvremen, održiv i okolišno prihvatljiv sustav grijanja koji je u potpunosti usklađen s ciljevima europske energetske tranzicije i načelima održivog urbanog razvoja.

2. ANALIZA ZAKONODAVNOG OKVIRA I PRIPADNIH ENERGETSKIH POLITIKA

Razvoj i transformacija centraliziranih toplinskih sustava s ciljem njihove dekarbonizacije u značajnoj su mjeri oblikovani zakonodavnim i strateškim smjernicama koje proizlaze iz europskog i nacionalnog pravnog okvira. U kontekstu klimatske politike, energetske učinkovitosti i uvođenja obnovljivih izvora energije, posljednjih godina došlo je do ubrzanog usklađivanja nacionalnih propisa s europskim direktivama i planovima što stvara temelje, ali i konkretne obveze za operatora centralnog toplinskog sustava, u ovom slučaju Gradsku toplanu d.o.o. Karlovac.

U cilju definiranja optimalnih tehnoloških i investicijskih rješenja za razvoj i dekarbonizaciju CTS-a grada Karlovca, neophodno je analizirati pravni i regulatorni okvir koji oblikuje mogućnosti, ograničenja i obveze lokalnih i nacionalnih dionika. Analiza obuhvaća europske i nacionalne politike, zakone, direktive i regulatorne instrumente koji se odnose na energetski sektor, obnovljive izvore energije, učinkovitost korištenja energije te zaštitu klime i okoliša.

2.1. Europski zakonodavni okvir

Europska unija je u okviru Europskog zelenog plana (eng. European Green Deal) postavila ambiciozne ciljeve za tranziciju prema klimatski neutralnom društvu. Osnovni cilj je postizanje neto-nultih emisija stakleničkih plinova do 2050. godine uz istodobno povećanje otpornosti energetskog sustava, smanjenje ovisnosti o uvozu fosilnih goriva te poticanje gospodarskog rasta temeljenog na čistim tehnologijama.

Za sektor grijanja i hlađenja, koji je odgovoran za približno 50% ukupne potrošnje energije u EU i znatan udio emisija CO₂, Zeleni plan predviđa provedbu kroz nekoliko zakonodavnih instrumenata navedenih u nastavku.

Zakonodavni paket „Fit for 55“

„Fit for 55“ zakonodavni je paket EU donesen u srpnju 2021., a predstavlja sveobuhvatan skup mjera i zakonodavnih prijedloga. Cilj paketa je uskladiti klimatski i energetski zakonodavni okvir EU s ciljevima postizanja klimatske neutralnosti do 2050. i smanjenja neto emisija stakleničkih plinova za najmanje 55 % do 2030. u odnosu na razine iz 1990. Tim paketom se održava poštena i socijalno pravedna tranzicija, održavaju i jačaju se inovacije i konkurentnosti industrije, a EU se pozicionira kao predvodnik u globalnoj borbi protiv klimatskih promjena. Iako paket „Fit for 55“ svojim aktima obuhvaća svaki dio industrije i svakodnevnog života, u nastavku su navedeni relevantni dokumenti u kontekstu grijanja i CTS-a.

Direktiva o obnovljivim izvorima energije (EU) 2023/2413 - RED III

RED III je treća verzija Direktive o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora i glavni je zakonodavni instrument EU za ubrzavanje energetske tranzicije i smanjenje emisija stakleničkih plinova. U skladu s RED III direktivom, države članice obvezne su osigurati mjerljivo povećanje udjela obnovljivih izvora energije u sektoru grijanja i hlađenja,

uključujući i CTS. Direktiva propisuje da svaka država članica mora osigurati minimalni godišnji porast udjela energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji za grijanje i hlađenje u visini od:

- najmanje 0,8 % godišnje u razdoblju od 2021. do 2025. na razini države,
- najmanje 1,1 % godišnje od 2026. nadalje na razini države.

Ova obveza primjenjuje se na sve oblike grijanja i hlađenja, bez obzira na tehničku izvedbu, a može se ispuniti korištenjem biomase, bioplina, geotermalne i solarne energije, otpadne topline i visokoučinkovite kogeneracije.

Kako bi se ojačala uloga centraliziranog grijanja u energetskej tranziciji, RED III naglašava potrebu za većom transparentnošću prema potrošačima u pogledu udjela obnovljivih izvora i energetske učinkovitosti sustava. Moderni CTS-ovi temeljeni na obnovljivim izvorima pokazali su se kao isplativo rješenje za integraciju čiste energije i smanjenje emisija. U skladu s tim, predviđeno je povećanje godišnjeg indikativnog cilja za udio obnovljivih izvora s prijašnjih 1 % na 2,2 %.

U cilju promicanja proizvodnje i uporabe energije iz obnovljivih izvora u sektoru zgrada, Direktiva RED III predviđa okvirni europski cilj prema kojem bi do 2030. godine najmanje 49 % konačne potrošnje energije u zgradama trebalo dolaziti iz obnovljivih izvora. Taj udio uključuje i energiju proizvedenu na samoj lokaciji ili u njezinoj neposrednoj blizini kao i obnovljivu energiju preuzetu iz mreže. Iako ovaj cilj nije pravno obvezujući za svaku državu članicu pojedinačno, države su dužne utvrditi vlastite nacionalne udjele i prilagoditi svoje strategije kako bi zajednički doprinosile ostvarenju tog cilja.

Revidirana Direktiva o energetskej učinkovitosti EED – EU/2023/1791

Revidirana Direktiva o energetskej učinkovitosti (EU) 2023/1791 donosi nove obveze za države članice kako bi se do 2030. značajno smanjila potrošnja energije u cijeloj EU. Direktivom se prvi put uvodi pravno obvezujući cilj na razini EU kojim se predviđa smanjenje krajnje potrošnje energije za najmanje 11,7 % do 2030. godine u odnosu na projekcije iz 2020. Osim što naglašava ulogu energetske učinkovitosti kao temeljnog načela europske klimatske politike, Direktiva postavlja strože zahtjeve za države članice i značajno širi obuhvat mjera koje je potrebno provoditi na nacionalnoj i lokalnoj razini.

Poseban se naglasak stavlja na javni sektor koji je obavezan godišnje smanjivati vlastitu potrošnju energije za 1,9 %, uz mogućnost izuzeća javnog prijevoza i obrambenog sektora. Dodatno, države članice dužne su svake godine obnoviti najmanje 3 % ukupne podne površine zgrada u vlasništvu javnih tijela i to u skladu sa standardom gotovo nulte energije (nZEB), čime se osigurava povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova u zgradarskom sektoru.

Revidirana ETS direktiva

Revidirana Direktiva 2003/87/EZ, poznata kao ETS direktiva, predstavlja jednu od temeljnih zakonodavnih okosnica Europske unije u borbi protiv klimatskih promjena. Njezina najnovija revizija, donesena 2023. godine kao dio paketa „Fit for 55“, ima za cilj povećati učinkovitost sustava trgovanja emisijama i proširiti njegovu primjenu.

Revidirana direktiva propisuje da sektori obuhvaćeni sustavom ETS (prije svega energetika, industrija i zrakoplovstvo) moraju do 2030. godine smanjiti emisije za 62 % u odnosu na razine iz 2005. godine. Taj je cilj znatno ambiciozniji od prethodnog koji je predviđao smanjenje od 43 %, a postiže se ubrzanim godišnjim smanjenjem ukupnog broja dostupnih emisijskih jedinica (tzv. linearnim faktorom smanjenja) koji se povećava na 4,3 % godišnje od 2024., a potom na 4,4 % od 2028. godine.

Jedna od najvažnijih promjena odnosi se na postupno ukidanje besplatnih emisijskih jedinica koje su do sada bile dodjeljivane industrijskim sektorima kako bi se očuvala njihova konkurentnost. Od 2026. godine započinje smanjenje besplatnih kvota koje će u potpunosti biti ukinute do 2034. godine. Ova mjera ima snažan poticajni učinak na industriju jer ih usmjerava prema bržem ulaganju u dekarbonizaciju i prelazak na tehnologije s nižim emisijama. Istovremeno, ukidanje besplatnih kvota povećava troškovni pritisak, osobito za energetske intenzivne sektore, što zahtijeva dodatne investicije i tehničku pomoć.

Važna novost revidirane direktive je uvođenje paralelnog sustava trgovanja emisijama, poznatog kao ETS II, koji se počinje primjenjivati od 2027. godine (ili eventualno od 2028. ako cijene energije budu visoke). ETS II obuhvaća emisije stakleničkih plinova iz zgradarstva i cestovnog prometa, a cilj mu je dodatno internalizirati ugljične troškove u sektorima koji dosad nisu bili obuhvaćeni ETS-om. Obveze plaćanja u okviru ETS-a II odnose se na dobavljače goriva, ali se troškovni učinci prenose na krajnje korisnike – kućanstva, poduzeća i javne ustanove, putem cijena goriva za grijanje i prijevoz. U svrhu ublažavanja socijalnih posljedica uvođenja ETS-a II, predviđena je uspostava posebnog Socijalnog fonda za klimatsku tranziciju iz kojeg će se financirati mjere potpore najranjivijim građanima i poduzećima.

Usporedno s ukidanjem besplatnih emisijskih kvota, Europska unija uvodi Mehanizam za ugljično prilagođavanje na granicama (CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism), koji se primjenjuje na uvoz određenih proizvoda (cement, čelik, aluminij, gnojiva, vodik i električna energija) iz trećih zemalja koje nemaju usporedive klimatske politike. Ovaj mehanizam ima dvostruku funkciju, spriječiti tzv. „curenje ugljika“, odnosno prebacivanje proizvodnje u zemlje s manje strogim klimatskim propisima te zaštititi europske proizvođače od nelojalne konkurencije. CBAM će se postupno uvoditi od 2026. godine i pratit će tempo ukidanja besplatnih kvota u obuhvaćenim sektorima.

S obzirom na povećane zahtjeve za dekarbonizaciju, revidirana ETS direktiva određuje da se prihodi od aukcija emisijskih jedinica moraju koristiti namjenski za financiranje klimatske i energetske tranzicije. Dva temeljna instrumenta za to su Fond za modernizaciju (Modernization Fund) i Fond za inovacije (Innovation Fund). Države članice s nižim BDP-om, među kojima je i Hrvatska, imaju pravo na sredstva iz Fonda za modernizaciju, koja se mogu usmjeriti u modernizaciju energetskog sektora, uključujući toplinske sustave, elektroenergetsku mrežu i obnovljive izvore energije. Fond za inovacije, s druge strane, podupire pilot projekte naprednih tehnologija za smanjenje emisija, uključujući projekte korištenja vodika, hvatanja i skladištenja ugljika te industrijske dekarbonizacije.

Za Republiku Hrvatsku, revidirana ETS direktiva ima dalekosežne posljedice. Povećanje cijene emisija ugljičnog dioksida u ETS i ETS II sustavima povećat će operativne troškove termoelektrana, toplana i centraliziranih sustava grijanja koji se temelje na fosilnim gorivima,

osobito prirodnom plinu. Istodobno, hrvatskim operaterima toplinskih sustava i industriji otvara se mogućnost korištenja europskih fondova za modernizaciju infrastrukture, zamjenu kotlova visoko učinkovitim tehnologijama i integraciju obnovljivih izvora energije. U tom smislu, revidirana direktiva predstavlja i regulatorni poticaj i investicijski izazov jer projekti koji ne doprinose dekarbonizaciji postaju sve manje održivi, dok oni koji su usklađeni s klimatskim ciljevima EU dobivaju stratešku i financijsku prednost.

Uredba o raspodjeli napora (ESR - Effort Sharing Regulation)

Uredba definira nacionalne ciljeve smanjenja emisija u sektorima izvan ETS-a (uključujući CTS ako ne podliježe ETS-u). Uredbom o raspodjeli napora postavljeni su obvezujući ciljevi za smanjenje emisija stakleničkih plinova za svaku zemlju EU u sektorima koji nisu pokriveni sustavom trgovanja emisijama (promet, poljoprivreda, zgrade i gospodarenje otpadom). Europski parlament je u ožujku 2023. podržao revidiranu ESR (Regulation (EU) 2023/857), koja je postavila ambicioznije ciljeve smanjenja emisija do 2030. u iznosu od 40% u usporedbi s 2005. godinom. Nacionalni ciljevi za svaku državu članicu uzimaju u obzir BDP po stanovniku i kriterij troškovne učinkovitosti. Prethodni cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova za Hrvatsku do 2030. u odnosu na 2005. godinu iznosio je -7 %, dok novi cilj, prema revidiranoj Uredbi o raspodjeli napora, iznosi -16,7 %.

Direktiva o energetske svojstvima zgrada – Direktiva (EU) 2024/1275

Direktiva je temeljito revidirana u okviru paketa „Fit for 55“ te je navedena ovdje jer ima snažan indirektni utjecaj na CTS. Naime, direktiva određuje da sve nove zgrade od 2030. godine moraju biti zgrade nulte emisije, dok se energetske najneučinkovitije zgrade moraju obnoviti do 2030. (javne zgrade) ili 2033. godine (stambene zgrade). Također se uvodi obveza digitalnih energetske certifikata što omogućava preciznije planiranje potrošnje i priključenja u mrežu daljinskog grijanja.

2.2. Nacionalni zakonodavni i strateški okvir

Kao članica Europske unije, Hrvatska je obvezna prenijeti europsku energetske i klimatske regulativu u nacionalni pravni sustav te razviti dugoročne planove koji će omogućiti postizanje zajedničkih ciljeva klimatske neutralnosti. U tom kontekstu, nekoliko zakona i strateških dokumenata čini osnovu za planiranje i provedbu dekarbonizacije centraliziranih toplinskih sustava, uključujući povećanje energetske učinkovitosti, korištenje obnovljivih izvora energije, digitalizaciju i modernizaciju infrastrukture.

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 138/21, 83/23 i 78/25) uređuje okvir za promicanje i poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i visokoučinkovite kogeneracije kroz sustav poticaja, registraciju projekata, status povlaštenog proizvođača i jamstva podrijetla energenata. Također propisuje provedbu upravnih postupaka, informiranja, obrazovanja te kriterije održivosti i smanjenja emisija stakleničkih plinova u skladu s nacionalnim i EU ciljevima dekarbonizacije.

Prema članku 55., stavku 8., distributeri i opskrbljivači toplinskom energijom dužni su izraditi svoje planove mjera za povećanje učinkovitosti i udjela obnovljivih izvora energije u svojim

centraliziranim sustavima za grijanje. Planovi mjera ključni su za dugoročnu modernizaciju sustava i usklađivanje s nacionalnim i europskim ciljevima dekarbonizacije.

Ova studija izrađena je u svrhu ispunjavanja navedenog zakonskog zahtjeva i kao doprinos učinkovitijem razvoju CTS-a u urbanim sredinama.

Zakon o tržištu toplinske energije

Zakon o tržištu toplinske energije (NN 80/13, 14/14, 86/19 i 67/25) uređuje proizvodnju, distribuciju i opskrbu toplinskom energijom u Republici Hrvatskoj, s ciljem osiguranja pouzdane, učinkovite i pravedne opskrbe korisnicima. Poseban naglasak stavlja se na obračun prema stvarnoj potrošnji, zaštitu potrošača i poticanje energetske učinkovitosti.

Zakon u članku 18. definira obveze operatora distribucijskog sustava prema kojem je operater distribucijskog sustava, u ovom slučaju Gradska toplana, dužna osigurati kvalitetno obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije na načelima održivog razvitka, osigurati održavanje distribucijske mreže u stanju funkcionalne sposobnosti i osigurati transparentan način rada.

Strategija energetskeg razvoja RH do 2030. s pogledom na 2050. godinu

Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu prepoznaje dekarbonizaciju sustava toplinarstva kao jedan od prioriteta s naglaskom na centralizirane toplinske sustave zbog njihove značajne energetske, infrastrukturne i klimatske uloge u urbanim sredinama. Strategija predviđa postupno smanjenje ovisnosti CTS-a o fosilnim gorivima, poticanje korištenja obnovljivih izvora, industrijske otpadne topline te visokoučinkovite kogeneracije.

Naglašena je potreba za modernizacijom i rekonstrukcijom toplinskih mreža, povećanjem energetske učinkovitosti i integracijom obnovljivih tehnologija u sustav. Iako Strategija ne propisuje specifične ciljne vrijednosti isključivo za CTS, kroz razvojne scenarije energetske tranzicije implicira se potreba za transformacijom toplinarstva u skladu s nacionalnim i EU ciljevima dekarbonizacije do 2050. godine.

Nacionalni energetski i klimatski plan (NECP RH 2021.–2030.)

Nacionalni energetski i klimatski plan Republike Hrvatske (NECP) strateški je dokument kojim se definiraju ciljevi i smjerovi razvoja hrvatske energetske i klimatske politike za razdoblje od 2021. do 2030. godine. Njegov je osnovni cilj omogućiti plansku tranziciju prema održivom, energetski učinkovitom i niskougljičnom društvu, u skladu s europskim Zelenim planom i ciljevima EU o klimatskoj neutralnosti do sredine stoljeća. NECP obuhvaća pet međusobno povezanih područja: dekarbonizaciju, energetske učinkovitost, sigurnost opskrbe energijom, razvoj unutarnjeg tržišta energije te istraživanje, inovacije i konkurentnost.

Prvotna verzija hrvatskog NECP-a izrađena je 2019. godine, no u međuvremenu su se europski klimatski ciljevi znatno pooštrili. Posebno je to došlo do izražaja nakon usvajanja zakonodavnog paketa „Fit for 55“, kojim se do 2030. godine planira smanjiti emisije stakleničkih plinova na razini EU-a za najmanje 55 % u odnosu na 1990. godinu. Kao

odgovor na to, Hrvatska je revidirala svoj NECP te je nova, ažurirana verzija službeno usvojena 26. ožujka 2025. godine. Revizijom su uključeni ambiciozniji klimatsko-energetski ciljevi, usklađeni s novim zakonodavnim okvirom Europske unije.

Posebnu pažnju revidirani NECP posvećuje sektoru grijanja i hlađenja koji predstavlja značajan udio u ukupnoj potrošnji energije u Hrvatskoj. Kako bi se osigurala tranzicija prema održivijim oblicima grijanja, plan predviđa sustavan rast udjela obnovljivih izvora energije u ovom sektoru. Prema revidiranom planu, udio OIE u grijanju i hlađenju treba rasti prosječno za 1,1% godišnje, odnosno za 1,5% godišnje ako se uključi i korištenje otpadne topline. Na toj osnovi, očekuje se da će udio obnovljivih izvora energije u bruto neposrednoj potrošnji energije u sektoru grijanja i hlađenja doseći približno 47,1 % do 2030. godine, što je znatno više u odnosu na polaznih 36,8 % iz 2020. godine.

Zakon o koncesijama i ostali povezani zakoni

U kontekstu planiranja novih proizvodnih jedinica i ulaganja u obnovljive izvore energije za potrebe CTS-a, potrebno je uzeti u obzir pravne i financijske aspekte vezane uz korištenje prostora, prirodnih resursa i infrastrukture, a koje uređuje Zakon o koncesijama (NN 69/17 i 107/20). Koncesija je definirana kao pravo koje javno tijelo dodjeljuje pravnoj ili fizičkoj osobi za gospodarsko korištenje javnog dobra, obavljanje djelatnosti od interesa za RH ili korištenje prirodnih resursa. Ovo pravo se dodjeljuje na razdoblje dulje od jedne godine, uz obvezu plaćanja naknade koju određuje nadležno tijelo. U kontekstu projekata koji se odnose na CTS, institut koncesije osobito je relevantan u više specifičnih slučajeva koji se odnose na korištenje prirodnih resursa i javne imovine.

Uvjeti dobivanja koncesije za distribuciju toplinske energije, odnosno koncesije za izgradnju distributivne mreže, pravila i mjere za sigurno i pouzdanu djelatnost proizvodnje, distribucije u opskrbe toplinskom energijom propisani su ranije spomenutim Zakon o tržištu toplinske energije (NN 80/13, 14/14, 86/19 i 67/25).

Što se tiče korištenja prirodnih resursa i javne imovine, u nastavku su navedeni relevantni zakoni za pojedine resurse. Tako je za korištenje geotermalne energije potrebno ishoditi koncesiju za istraživanje i/ili eksploataciju geotermalnih izvora, sukladno odredbama Zakona o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19 i 30/21). U slučaju kada se za potrebe CTS-a planira uporaba biomase iz šumskog fonda, potrebno je ishoditi koncesiju za korištenje drvene mase iz državnih šuma, na temelju Zakona o šumama (NN 68/18, 115/18, 98/19, 145/20, 101/23 i 36/24). Nadalje, za projekte koji uključuju korištenje vodnih resursa, poput zahvata vode, korištenja toplinske energije otpadnih voda ili ispuštanja pročišćenih voda, potrebno je pribaviti odgovarajuću koncesiju u skladu sa Zakonom o vodama (NN 66/19, 84/21 i 47/23). Uz prirodne resurse, u okviru razvoja i modernizacije CTS sustava mogu biti potrebne i koncesije odnosno druge naknade za korištenje javnih površina, primjerice za postavljanje infrastrukture na zemljištima u vlasništvu Republike Hrvatske, županija ili gradova. U tom slučaju primjenjuju se odredbe Zakona o komunalnom gospodarstvu (NN 68/18, 110/18, 32/20 i 145/24) koji regulira pravo građenja, pravo služnosti te obračun i plaćanje naknada za korištenje javnih površina.

U situacijama kada se infrastruktura planira graditi ili rekonstruirati na zemljištima u privatnom vlasništvu, primjenjuje se Zakon o rješavanju imovinskopravnih odnosa u svrhu

izgradnje infrastrukturnih građevina (NN 80/11). Ovim zakonom uređuju se postupci izvlaštenja, osnivanja prava građenja i prava služnosti u svrhu realizacije infrastrukturnih projekata od interesa za Republiku Hrvatsku što uključuje toplovode te drugu toplinsku infrastrukturu.

Koncesijske i druge naknade povezane s korištenjem prostora i resursa za potrebe CTS-a mogu se razlikovati prema dinamici plaćanja, načinu obračuna i postupku njihovog određivanja. U pravilu, naknade mogu biti jednokratne, periodične ili promjenjive, ovisno o vrsti prava koje se dodjeljuje i prirodi resursa koji se koristi.

- Jednokratne naknade – primjenjuju se u situacijama kada se korisniku odobrava pravo na istraživanje određenog prirodnog resursa ili kada se plaća naknada za priključenje na postojeću mrežnu infrastrukturu. Takve naknade se uplaćuju jednokratno, prilikom ostvarivanja prava i ne podliježu redovitim obračunima.
- Periodične naknade - plaćaju se redovito, najčešće na godišnjoj razini, te se odnose na korištenje prirodnih resursa kao što su geotermalni izvori, biomasa ili zemljište.
- Promjenjive naknade - definiraju se u odnosu na količinu proizvedene ili prodane energije, odnosno ostvarene prihode korisnika koncesije. Najčešće se obračunavaju kao iznos po proizvedenom MWh ili kao postotak ukupnog godišnjeg prihoda u slučajevima gdje se koristi javno dobro ili resurs visoke tržišne vrijednosti.

Visina i struktura koncesijskih naknada definiraju se na više načina, ovisno o pravnoj osnovi i složenosti konkretnog slučaja. U jednostavnijim slučajevima, naknada se određuje odlukom nadležnog tijela, poput Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja, Hrvatskih voda, Hrvatskih šuma ili jedinica lokalne samouprave. U slučajevima kada se koncesija dodjeljuje na dulje vremensko razdoblje i za veće projekte, iznos i uvjeti naknade određuju se putem javnog natječaja. U složenijim slučajevima, osobito kada se koncesija dodjeljuje temeljem inicijative privatnog subjekta ili uz specifične uvjete korištenja, visina naknade može se definirati putem pregovora u sklopu samog postupka dodjele koncesije.

U određenim slučajevima moguće je ostvariti izuzeća ili olakšice pri plaćanju koncesijskih naknada, osobito za projekte od posebnog interesa, one sufinancirane iz EU fondova ili koje provode lokalna javna poduzeća. Također, određeni izvori toplinske energije, poput otpadne topline, mogu se koristiti temeljem ugovornih odnosa bez potrebe za formalnim koncesijama. Prilikom rekonstrukcije ili nadogradnje CTS-a, nužno je pravovremeno urediti vlasničke i infrastrukturne odnose te uspostaviti suradnju s nadležnim tijelima kako bi se projekti mogli provesti zakonito i bez prepreka.

2.3. Položaj i izazovi centralnog toplinskog sustava

CTS grada Karlovca, kao i slični sustavi u ostalim hrvatskim gradovima, suočava se s izazovima energetske tranzicije prema održivom i niskougljičnom modelu. Tranzicija je prije svega uvjetovana kombinacijom regulatornih okvira na nacionalnoj i europskoj razini, tehničkim i tehnološkim ograničenjima postojećih infrastruktura, tržišnim promjenama te rastućim zahtjevima krajnjih korisnika za sigurnom, pristupačnom i ekološki prihvatljivom opskrbom toplinskom energijom.

2.3.1. Trenutni položaj

Specifičnosti postojećeg sustava koje utječu na planiranje njegove modernizacije odnose se na nekoliko međusobno povezanih tehničkih, energetske i financijske ograničenja. Detaljniji opis postojećeg stanja toplinske opskrbe dan je u poglavlju 3.

Infrastruktura toplovodne mreže u većini centraliziranih toplinskih sustava (CTS) u Hrvatskoj, uključujući i sustav u Karlovcu, izgrađena je prije nekoliko desetljeća. Unatoč tomu što je tijekom posljednje tri godine obnovljeno tri četvrtine cijevne mreže, daljnja ulaganja su i dalje nužna, osobito u segmentu priključaka i instalacija na strani potrošača. Zastarjela infrastruktura značajno smanjuje energetske učinkovitost sustava te pridonosi povećanju ukupnih operativnih troškova.

Drugi važan izazov odnosi se na visoku ovisnost CTS-a o fosilnim gorivima. U većini hrvatskih sustava glavni energent je prirodni plin čija je cijena podložna značajnim tržišnim oscilacijama, a njegova uporaba sve je više ograničena sve strožim regulatornim zahtjevima, osobito u okviru europskog sustava trgovanja emisijskim jedinicama (EU ETS). Takva energetska ovisnost povećava financijsku neizvjesnost i dodatno narušava dugoročnu održivost sustava.

Osim toga, tehnička nefleksibilnost sustava predstavlja dodatnu prepreku tranziciji. CTS u pravilu nije modularno projektiran niti infrastrukturno prilagođen za integraciju različitih izvora energije, uključujući obnovljive izvore poput biomase i solarne topline kao i otpadnu toplinu iz industrijskih procesa. Zbog toga je njegova prilagodba prema niskougličnim i održivim modelima otežana i tehnički zahtjevnija.

Konačno, većina gradskih toplana posluje u uvjetima strogo reguliranih cijena toplinske energije za krajnje korisnike što znatno ograničava njihovu sposobnost samostalnog financiranja modernizacije. Zbog ograničenih vlastitih financijskih kapaciteta, sustavi su u velikoj mjeri upućeni na vanjske izvore sredstava, bilo kroz nacionalne poticajne programe, bilo putem dostupnih fondova Europske unije, a kako bi se provele potrebne tehničke i energetske prilagodbe.

2.3.2. Izazovi za transformaciju

Transformacija centraliziranih toplinskih sustava u niskouglične, tehnološki učinkovite i tržišno održive sustave suočava se s nizom međusobno povezanih izazova, a koji će biti objašnjeni u nastavku.

Na tehničkoj razini, jedan od izazova odnosi se na potrebu dovršetka obnove dotrajale distribucijske mreže. To uključuje zamjenu preostalih zastarjelih cjevovoda, smanjenje toplinskih gubitaka te implementaciju suvremenih sustava za nadzor i upravljanje. Dodatno, integracija obnovljivih i alternativnih izvora energije, poput biomase, geotermalne energije i otpadne topline, zahtijeva značajne tehničke prilagodbe i u proizvodnim postrojenjima i u distribucijskoj infrastrukturi. Zamjena postojećih kotlova i pripadajuće opreme često je povezana s paralelnim građevinskim zahvatima što uključuje prenamjenu prostora kotlovnica te prilagodbu sustava za novu vrstu goriva, osobito pri prijelazu s fosilnih goriva na obnovljive izvore.

S regulatornog aspekta, CTS-ovi su sve više pod pritiskom europskih zakonodavnih okvira, ponajprije revidiranih direktiva RED III i EED koje predviđaju mjerljivo povećanje udjela obnovljivih izvora energije i smanjenje emisija stakleničkih plinova. Uvođenje i širenje europskog sustava trgovanja emisijama (EU ETS) na sektor grijanja dodatno opterećuje toplane koje koriste fosilna goriva čime se povećava rizik po njihovu financijsku održivost. Ujedno domaći regulatorni okvir još uvijek nedovoljno prepoznaje sektor centraliziranog grijanja kao prioritetan za strateške investicije, posebice u kontekstu dostupnosti nacionalnih i europskih potpora te institucionalne tehničke pomoći.

S tržišnog gledišta, CTS-ovi su suočeni s negativnom percepcijom dijela korisnika, posebice u stambenom sektoru, gdje su često doživljeni kao manje konkurentni u odnosu na individualne sustave grijanja. Ova percepcija dodatno je pojačana prisutnošću dizalica toplina i drugih decentraliziranih rješenja koja nude veću energetske autonomiju. Istovremeno, cijene toplinske energije podliježu strogom regulatornom nadzoru što ograničava mogućnost operatora da reagiraju na tržišne uvjete i alociraju dio prihoda u investicije i modernizaciju sustava.

Na organizacijskoj i institucionalnoj razini, modernizacija sustava često nailazi na nedostatak odgovarajućih kapaciteta unutar samih toplana i nadležnih upravljačkih tijela. To se odražava u ograničenim mogućnostima pripreme, financiranja i provedbe tehnički složenih projekata. Mnoge lokalne sredine i dalje nemaju usklađene strateške dokumente koji bi integrirali energetske planiranje s prostornim razvojem i ciljevima zaštite okoliša što dodatno otežava dugoročno i koordinirano planiranje CTS-a. Usto, iskustvo u uspostavi javno-privatnih partnerstava u području toplinarstva u Hrvatskoj je ograničeno čime se dodatno sužava spektar dostupnih financijskih i upravljačkih modela.

2.3.3. Prilike i pokretači promjena

Modernizacija i dekarbonizacija CTS-a mogu se ostvariti kroz korištenje dostupnih financijskih instrumenata, a očekuje se da će se u programskom razdoblju 2021.–2027., ali i narednim razdobljima, otvoriti EU fondovi i nacionalni mehanizmi potpore, uključujući instrumente poput Mehanizma za oporavak i otpornost (RRF) koji izravno podupiru ulaganja u obnovljive izvore energije, rekonstrukciju i proširenje toplovodne mreže te uvođenje digitalnih rješenja i povećanje energetske učinkovitosti unutar sektora toplinarstva.

Dodatni poticaj ovoj transformaciji daje ubrzani tehnološki razvoj, osobito u području primjene manjih i modularnih kogeneracijskih postrojenja, integracije solarnih toplinskih sustava te primjene naprednih dizalica topline koje se mogu ugraditi u postojeće infrastrukturne sustave. Pritom se sve izraženije prepoznaje uloga sektorske integracije gdje se otvaraju nove mogućnosti korištenja viškova topline iz različitih komunalnih i industrijskih procesa, primjerice iz pročištača otpadnih voda, rashladnih sustava ili energetske objekata koji proizvode višak toplinske energije.

U tom kontekstu, lokalna samouprava, odnosno u ovom slučaju Grad Karlovac kao vlasnik Gradske toplane, predstavlja temeljnu institucionalnu razinu za poticanje održive energetske tranzicije. Uz obvezu usklađivanja prostornih i razvojnih dokumenata, poput akcijskih planova održivog energetske razvoja i prilagodbe klimatskim promjenama

(SEAP/SECAP), od Grada se očekuje aktivna koordinacija između javnog i privatnog sektora, krajnjih korisnika i nadležnih institucija. Takav pristup omogućuje učinkovitije planiranje i upravljanje razvojem cjelokupnog toplinskog sustava u skladu s načelima održivog urbanog razvoja.

3. PREGLED POSTOJEĆEG STANJA TOPLINSKE OPSKRBE U GRADU KARLOVCU

Na području grada Karlovca postoji nekoliko vrsta grijanja koje građani mogu odabrati za svoje objekte, odnosno prostore, a to su:

- grijanje na centralni toplinski sustav Gradske toplane,
- grijanje na prirodni plin,
- grijanje na tekući plin,
- grijanje na kruta biogoriva,
- grijanje na električnu energiju.

Povijesni razvoj toplinarstva u gradu Karlovcu posjeduje više od 50 godina dugu tradiciju, a započeo je 1968. godine s tvrtkom pod imenom Toplana d.o.o.

Današnja tvrtka Gradska toplana d.o.o. osnovana je 29. svibnja 2012. godine, a grad Karlovac je jedini osnivač i vlasnik. Prije osnivanja ovog društva, usluge grijanja pružala je već spomenuta Toplana d.o.o., koja je zbog financijskih poteškoća i neodrživog poslovanja otišla u stečaj te je prestala s radom u travnju 2012. godine. Nakon toga, Grad Karlovac je preuzeo odgovornost za opskrbu toplinskom energijom osnivanjem nove tvrtke, Gradske toplane d.o.o., koja od tada kontinuirano pruža usluge grijanja građanima Karlovca.

3.1. Postojeće proizvodne jedinice

Proizvodnja toplinske energije u gradu Karlovcu odvija se na dvije lokacije. Glavna kotlovnica ukupnog toplinskog učina od 87 MW ima dva ugrađena vrelovodna kotla:

- kotao tipa VKLM-25 toplinskog učina 29 MW,
- kotao tipa VKLM-50 toplinskog učina 58 MW.

Izdvojena kotlovnica toplinskog učina 1,6 MW smještena je u stambenom objektu na adresi Baščinska cesta 41 i služi za grijanje stambenog bloka na navedenoj adresi.

3.1.1. Kotao VKLM-25

Vrelovodni kotao VKLM-25 koji se trenutno vodi kao tehnički funkcionalan u stvarnosti je neupotrebljiv. Naime, ovaj kotao koristi srednje teško loživo ulje kao pogonsko gorivo, no zbog nefunkcionalnih spremnika goriva i prateće pumpne stanice trenutačno ga nije moguće koristiti. U skladu s budućim planovima, predviđa se njegova rekonstrukcija i konverzija na prirodni plin. Međutim, konkretni planovi i rokovi za provedbu te rekonstrukcije još nisu definirani.

3.1.2. Kotao VKLM-50

Kotao tipa VKLM-50 proizveden je 1986. godine te se prvotno kao gorivo koristilo srednje teško loživo ulje. Zamjenom plamenika 2006. godine omogućeno je loženje na prirodni plin koji se i danas koristi kao gorivo.

Posljednja rekonstrukcija predmetnog kotla obavljena je 2022. godine, a uključivala je zamjenu ekonomajzera u dimovodnom kanalu kako bi se postigla bolja izmjena topline između dimnih plinova i napojne vode.

Tehničke značajke vrelovodnog kotla nakon zadnje rekonstrukcije koja je uključivala zamjenu dva eko paketa navedene su u sljedećoj tablici.

Tab. 3-1 Nazivne tehničke značajke vrelovodnog kotla VKLM-50

Stavka	Jedinica	Karakteristike
Proizvođač	-	TPK
Vrsta/tip postrojenja	-	Vrelovodni VKLM
Godina proizvodnje	god	1986.
Godina instaliranja	god	1987.
Medij	-	Voda
Tlak medija	MPa	1,1
Temperatura medija	°C	160/120
Toplinska snaga postrojenja	MW	58,0 (50,0)
Plamenik		
Proizvođač i tip	-	SAACKE SVG 300
Godina ugradnje	god	2006.
Gorivo (osnovno i rezervno)	-	zemni plin / loživo ulje – srednje (LUS II)
Potrošnja goriva	kg/s	1,45
Snaga plamenika	MW	58,00

3.2. Vrelovodna mreža

Vrelovodna mreža grada Karlovca predstavlja tipičan sustav za manje gradove (oko 50.000 stanovnika) te je izvedena kao jedinstvena mreža zvjezdaste konfiguracije, ukupne duljine od približno 21,8 km. Toplinska energija se predaje putem 181 toplinskih stanica indirektnog tipa, smještenih u objektima krajnjih potrošača (oko 8.000 korisnika), pri čemu se u njima obavlja i djelatnost kupca toplinske energije. Ukupno zakupljena snaga vrelovodne mreže iznosi oko 65 MW.

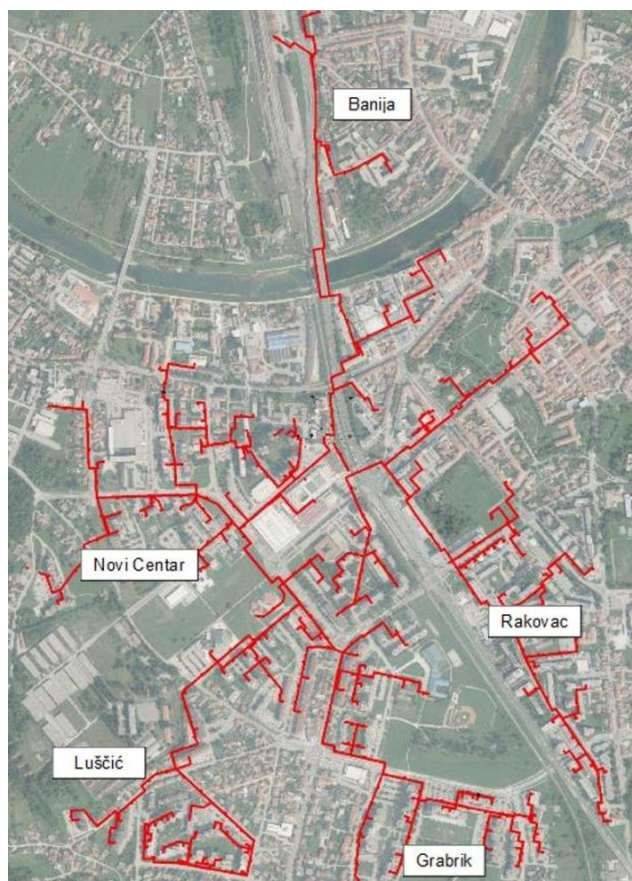
Distribucija toplinske energije odvija se putem tri glavna ogranka, kojima se toplina isporučuje različitim dijelovima grada Karlovca. Sama mreža sastoji se od vrelovodnih cijevi promjera od DN40 do DN600. Glavne vrelovodne magistrale imaju nazivni promjer od DN150 do DN600, dok se vrelovodni priključci kreću u rasponu od DN 40 do DN 150. Donedavno je tri četvrtine ukupne duljine mreže bilo starije od 25 godina, dok su pojedini dijelovi premašivali 40 godina starosti. Takva dotrajalost cjevovoda uzrokovala je značajne financijske i materijalne gubitke, smanjenje učinkovitosti sustava daljinskog grijanja te negativan utjecaj na okoliš. Ukupni stvarni gubici toplinske energije iznosili su približno 15 % pri čemu je znatan dio tih gubitaka bio posljedica curenja u mreži.

Kako bi se unaprijedio sustav grijanja, pokrenut je projekt "Revitalizacija vrelovodne mreže u gradu Karlovcu". U sklopu ovog projekta:

- zamijenjeno je 15,7 km trase cjevovoda,
- revitalizirana je oprema toplinskih podstanica,
- modernizirane su crpke pogona distribucije i sustava za kemijsku pripremu vode,
- uveden je centralni upravljački sustav za vođenje i nadzor mreže.

Ovi zahvati rezultirali su smanjenjem gubitaka toplinske energije u distribuciji s 15% na 8%, čime je značajno povećana učinkovitost sustava.

Projekt revitalizacije sufinanciran je sredstvima Europske unije, s ukupnom vrijednošću od približno 17,8 milijuna eura, od čega je 13,75 milijuna eura osigurano bespovratnim sredstvima iz EU fondova.



Sl. 3–1 Trasa vrelovodne mreže

3.3. Toplinski konzum

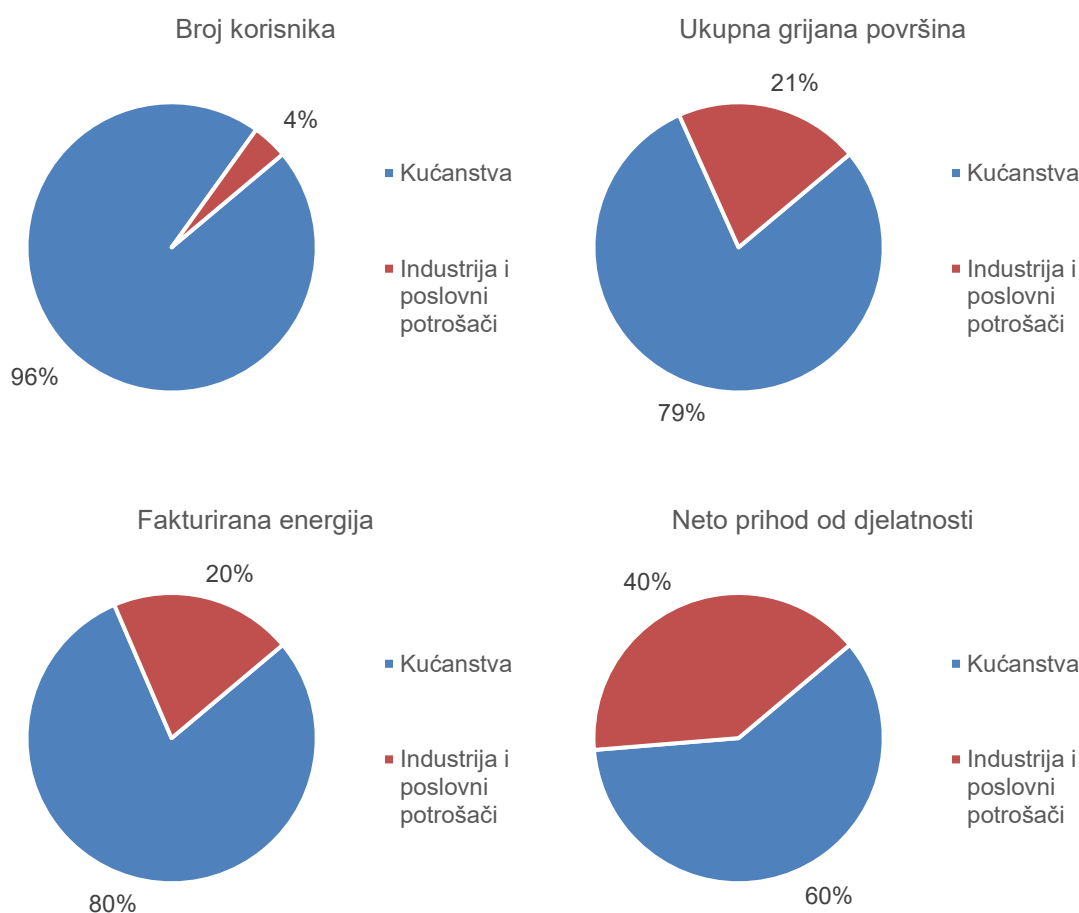
Analiza toplinskog konzuma uzima u obzir samo grijanje centralnim toplinskim sustavom. Kao referentno razdoblje za utvrđivanje postojećeg stanja toplinskog konzuma odabrana je ogrjevna sezona 2023./2024. Ona predstavlja prvi cjeloviti pogonski ciklus sustava nakon provedene revitalizacije vrelovodne mreže, modernizacije toplinskih podstanica i implementacije SCADA sustava.

Toplinska energija se isporučuje krajnjim kupcima kojih je, prema Izvješću o poslovanju za 2023. godinu, bilo ukupno 7.734. Iz tog podatka dolazi se do informacije da 38,31 % kućanstava u gradu Karlovcu za pokrivanje potreba za toplinskom energijom koristi usluge centralnog toplinskog sustava.

Ukupna površina koja se grije pomoću CTS-a iznosi 501.864 m². Opće značajke za cjelokupni sustav prikazan je nastavku.

Tab. 3-2 Pokazatelji sustava

	Broj korisnika	Ukupna grijana površina	Fakturirana energija	Prihod od djelatnosti
	-	m ²	MWh	%
Kućanstva	7.427	398.445	35.573	2.154.910,07
Industrija i poslovni potrošači	307	103.419	9.092	1.447.751,35
Ukupno	7.734	501.864	44.665	3.602.661,42



Sl. 3–2 Pokazatelji sustava sustava

Kao što je vidljivo iz prethodnih pokazatelja, 96% korisnika usluga centralnog toplinskog sustava u Karlovcu pripada kategoriji kućanstva. Međutim, isti omjer se ne zadržava kod iznosa ukupnih grijanih površina i fakturirane energije u kojima na poslovne prostore otpada otprilike petina ukupnog iznosa. S obzirom na različite tarife naplate toplinske energije za kućanstva i poslovne korisnike, iako kućanstava troše 80% energije, njihov udio u neto

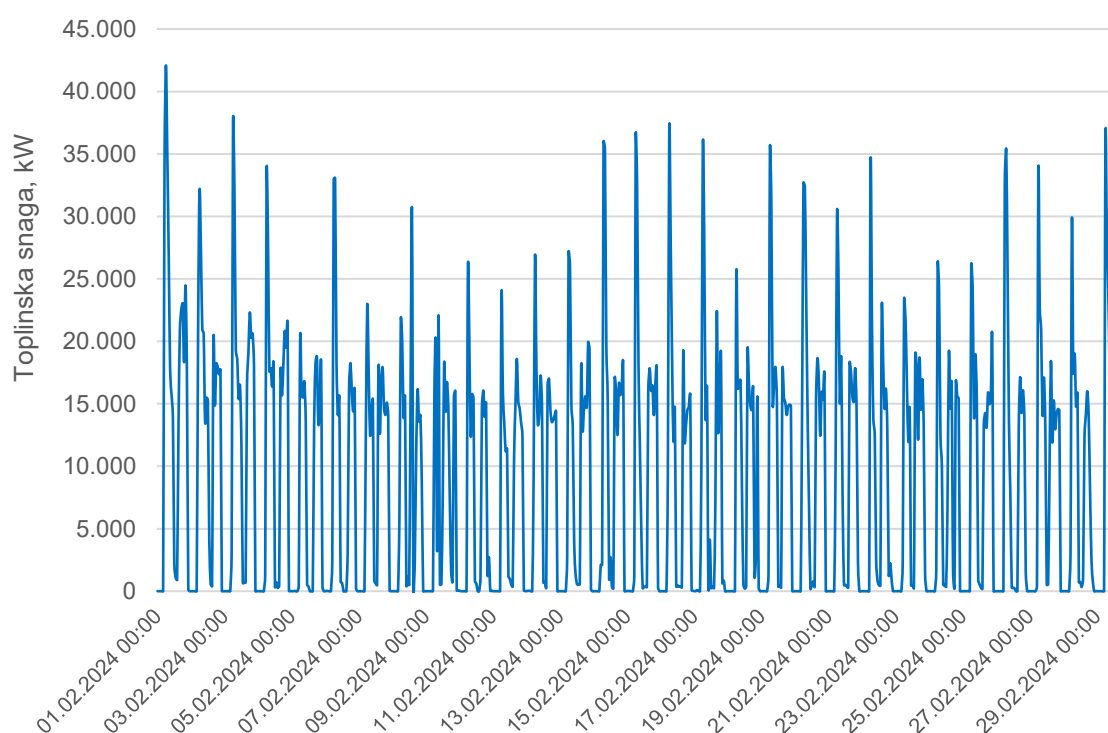
dobiti iznosi 60%. Ta činjenica ukazuje na značaj poslovnih korisnika za financijsku održivost sustava. Prosječni pokazatelji po korisniku prikazani su u nastavku.

Tab. 3-3 Prosječni pokazatelji sustava po korisniku

	Prosječna grijana površina po korisniku	Prosječna fakturirana energija po korisniku
	m ² /korisnik	MWh/korisnik
Kućanstva	53,6	4,79
Industrija i poslovni potrošači	336,87	29,62

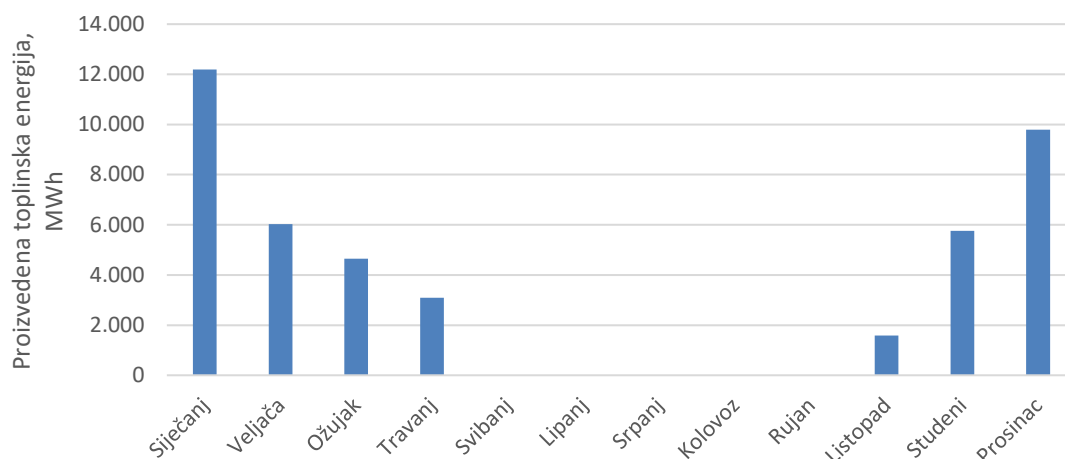
Iz prikazanih podataka proizlazi da se u prosječnom poslovnom prostoru troši 6,3 puta više energije po jedinici površine, a konačna fakturirana energija je 6,2 puta veća od one u prosječnom kućanstvu.

Ogrjevna sezona u gradu Karlovcu počinje 15. rujna te završava 15. svibnja. U nastavku su prikazana satna ostvarenja iz promatrane sezone, točnije iz veljače 2024. godine.



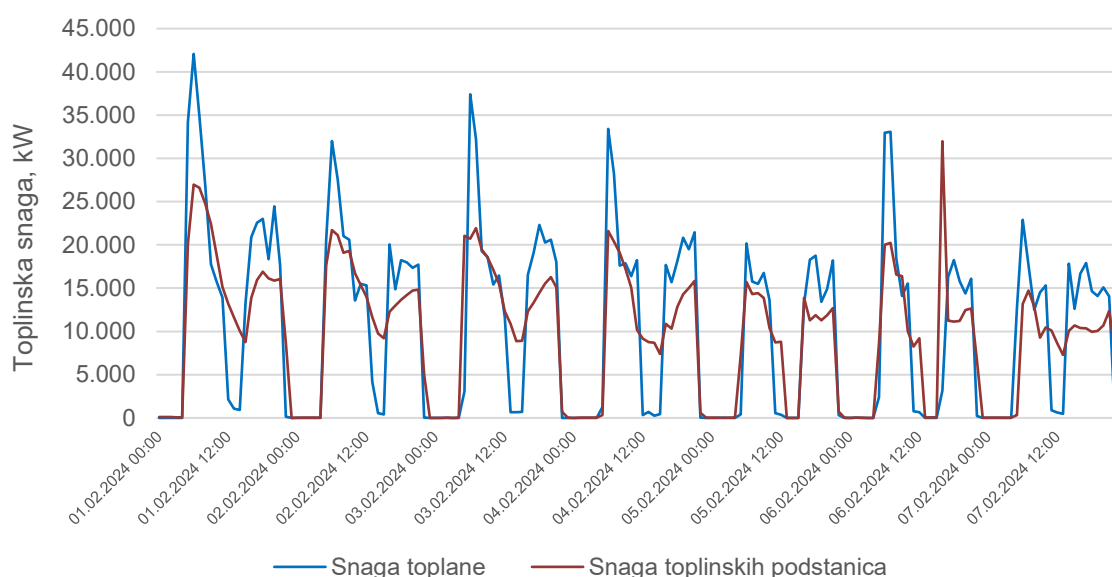
Sl. 3–3 Proizvedena toplinska energija na pragu toplane – satna rezolucija

Također, za bolje razumijevanje prikazana su sumarna mjesečna ostvarenja proizvodnje toplinske energije za sezonu 2023./2024. u kojima je jasno vidljivo da tijekom ljetnih mjeseci nema opskrbe. Očekivano, najveća proizvodnja toplinske energije ostvaruje se u siječnju i prosincu.



Sl. 3–4 Proizvedena toplinska energija na pragu toplane

Kako proizvedena, odnosno isporučena toplinska energija na pragu postrojenja nije jednaka konzumu topline u toplinskim stanicama samih potrošača, u nastavku je prikazana usporedba na satnoj razini u odabranom tjednu u veljači.



Sl. 3–5 Proizvodnja i potrošnja toplinske energije u jednom tjednu

Na Sl. 3–5 vidljivo je kako se profil proizvodnje toplinske energije (plavo) razlikuje od profila potrošnje u toplinskim stanicama (crveno). Potrošnja toplinske energije odražava klimatološke karakteristike, ponajprije vanjsku temperaturu zraka. Vidljivo je da je ujutro, kada je vanjska temperatura zraka najmanja, konzum najveći. Kako temperatura raste, konzum se smanjuje, a predvečer opet raste zbog pada temperature. Noću dolazi do prekida isporuke toplinske energije pa nema ni potrošnje, a što odgovara zahtjevima krajnjih korisnika koji u pravilu ne žele grijanje tijekom noćnih sati. Profil proizvodnje toplinske energije razlikuje se od potrošnje ponajprije u jutarnjim satima kada proizvodnja premašuje konzum te dolazi do pregrijavanja mreže. Tako akumulirana energija se koristi tijekom dana za pokrivanje potrošnje kada je ona veća od proizvodnje.

4. DEFINIRANJE KRITERIJA I CILJEVA DEKARBONIZACIJE CTS-A GRADA KARLOVCA

Dekarbonizacija centraliziranog toplinskog sustava Grada Karlovca nužan je korak u modernizaciji i prilagodbi sustava novim energetske i klimatskim zahtjevima. Cilj ovog procesa je smanjiti korištenje fosilnih goriva, smanjiti emisije štetnih plinova, povećati udio obnovljivih izvora energije i osigurati pouzdanu opskrbu toplinskom energijom za građane i gospodarstvo.

Ovaj proces nije izolirana mjera već je dio šireg plana grada Karlovca da svoj toplinski sustav učini čistim, učinkovitijim i otpornijim. Sve planirane mjere i ulaganja provode se u skladu sa zakonima i planovima Republike Hrvatske te Europske unije koji jasno traže smanjenje emisija i prelazak na čišće izvore energije.

Svrha ovog poglavlja je jednostavno i jasno definirati kriterije na temelju kojih će se birati tehnologije, ulaganja i projekti za dekarbonizaciju sustava. Također, ovdje se određuju glavni ciljevi koje Grad Karlovac želi postići na tom putu do 2050. godine.

4.1. Kriteriji dekarbonizacije

Pri planiranju dekarbonizacije centraliziranog toplinskog sustava Grada Karlovca nužno je definirati skup kriterija koji će voditi sve buduće odluke o izboru tehnologija, načinu ulaganja i provedbi mjera. Ti kriteriji osiguravaju da rješenja budu primjenjiva u praksi, financijski održiva i u potpunosti usklađena s propisima i stvarnim potrebama zajednice.



Sl. 4–1 Kriteriji dekarbonizacije

4.2. Ciljevi dekarbonizacije

Postavljanje jasnih i mjerljivih ciljeva dekarbonizacije omogućuje strukturirano planiranje, tehničko-ekonomsku analizu i donošenje informiranih investicijskih odluka, uz poštivanje vremenskog okvira do 2050. godine.

Prilikom definiranja ciljeva dekarbonizacije, u obzir su uzeti:

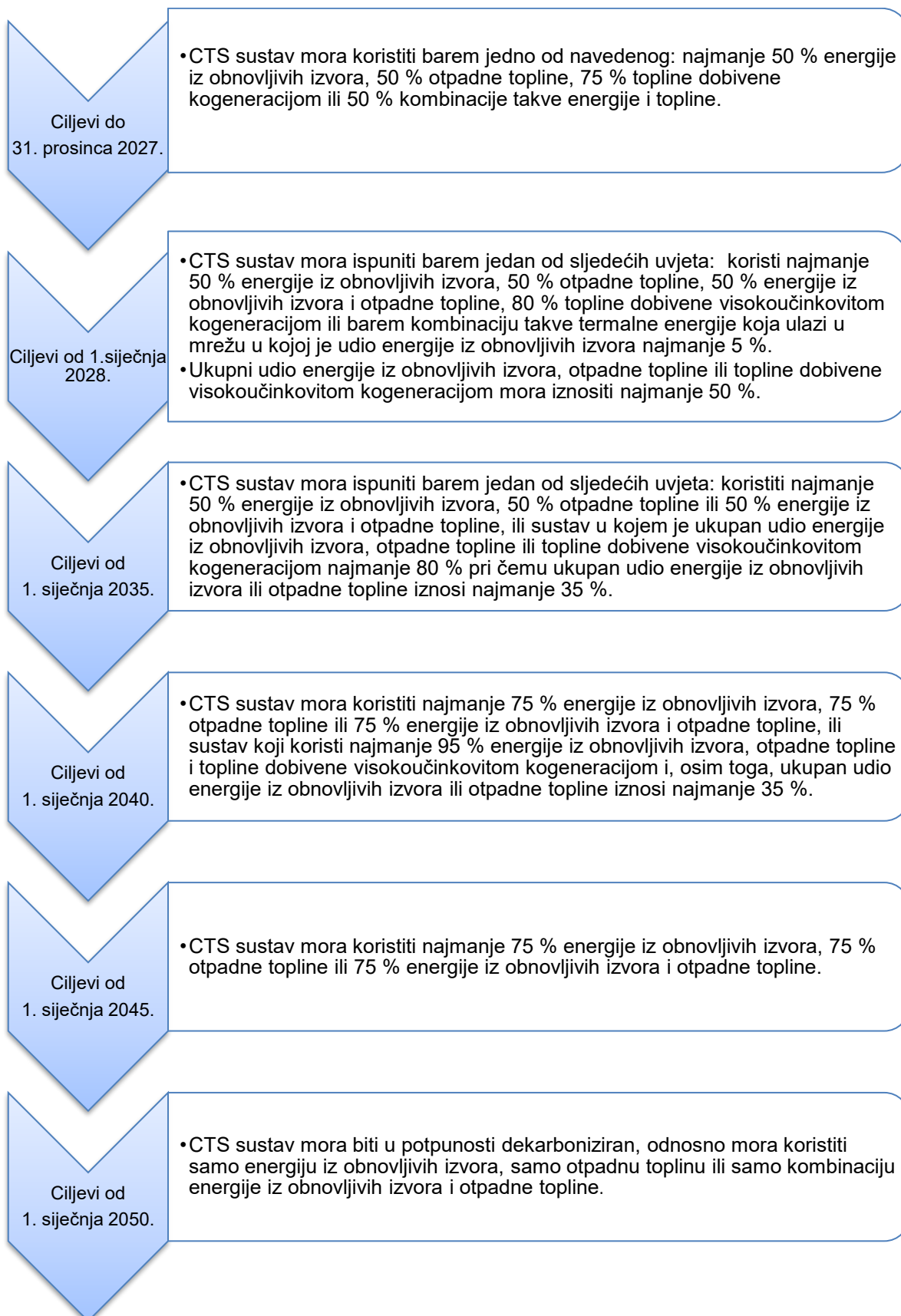
- tehnička izvedivost i vremenska dinamika zamjene tehnologija,
- ekonomska isplativost i dostupni izvori financiranja,
- opterećenja i kapaciteti postojeće toplinske i elektroenergetske infrastrukture,
- mogućnost integracije distribuiranih izvora energije i sustava za pohranu topline,
- dugoročna sigurnost i otpornost opskrbe toplinskom energijom.

Uspostava ovih ciljeva omogućit će razvoj robusne i fleksibilne strategije modernizacije CTS-a Grada Karlovca, usklađene s najvišim standardima održivosti i energetske učinkovitosti. Ciljevi su usvojeni prema Direktivi Europskog Parlamenta i Vijeća o energetske učinkovitosti EU 2023/1791. Ciljevi dekarbonizacije, raspoređeni prema vremenskim razdobljima, prikazani su grafikama u nastavku.

U kontekstu definiranja učinkovitih sustava grijanja i hlađenja, članak 26. Direktive EU 2023/1791 predviđa dvije opcije koje države članice mogu uzeti u obzir pri oblikovanju nacionalnih politika. Prema prvoj opciji, a koja je detaljno prikazana na Sl. 4–2, sustav se smatra učinkovitim ako koristi najmanje 50 % energije iz obnovljivih izvora, 50 % otpadne topline, 75 % topline dobivene visokoučinkovitom kogeneracijom ili 50 % kombinacije tih izvora energije i topline, odnosno ako zadovoljava jedan od zahtijevanih kriterija. Ova definicija polazi od energetske udjela i osigurava jasan tehnički kriterij za klasifikaciju sustava kao učinkovitog.

Druga opcija, koju su države članice mogle primijeniti kao alternativu, a prikazana je na Sl. 4–3, temelji se na emisijama stakleničkih plinova po jedinici isporučene topline ili hlađenja. Ovim pristupom omogućuje se fleksibilnije vrednovanje učinkovitosti sustava, posebno u slučajevima gdje se, iako nisu ispunjeni minimalni energetske udjeli iz prve opcije, ostvaruju niske emisije CO₂ zahvaljujući naprednim tehničkim rješenjima ili integraciji čistih tehnologija. Time se državama članicama otvara prostor za usklađivanje nacionalnih ciljeva s lokalnim okolnostima i tehnološkim kapacitetima, uz istodobno poštivanje ukupnih ciljeva dekarbonizacije i energetske učinkovitosti na razini Europske unije.

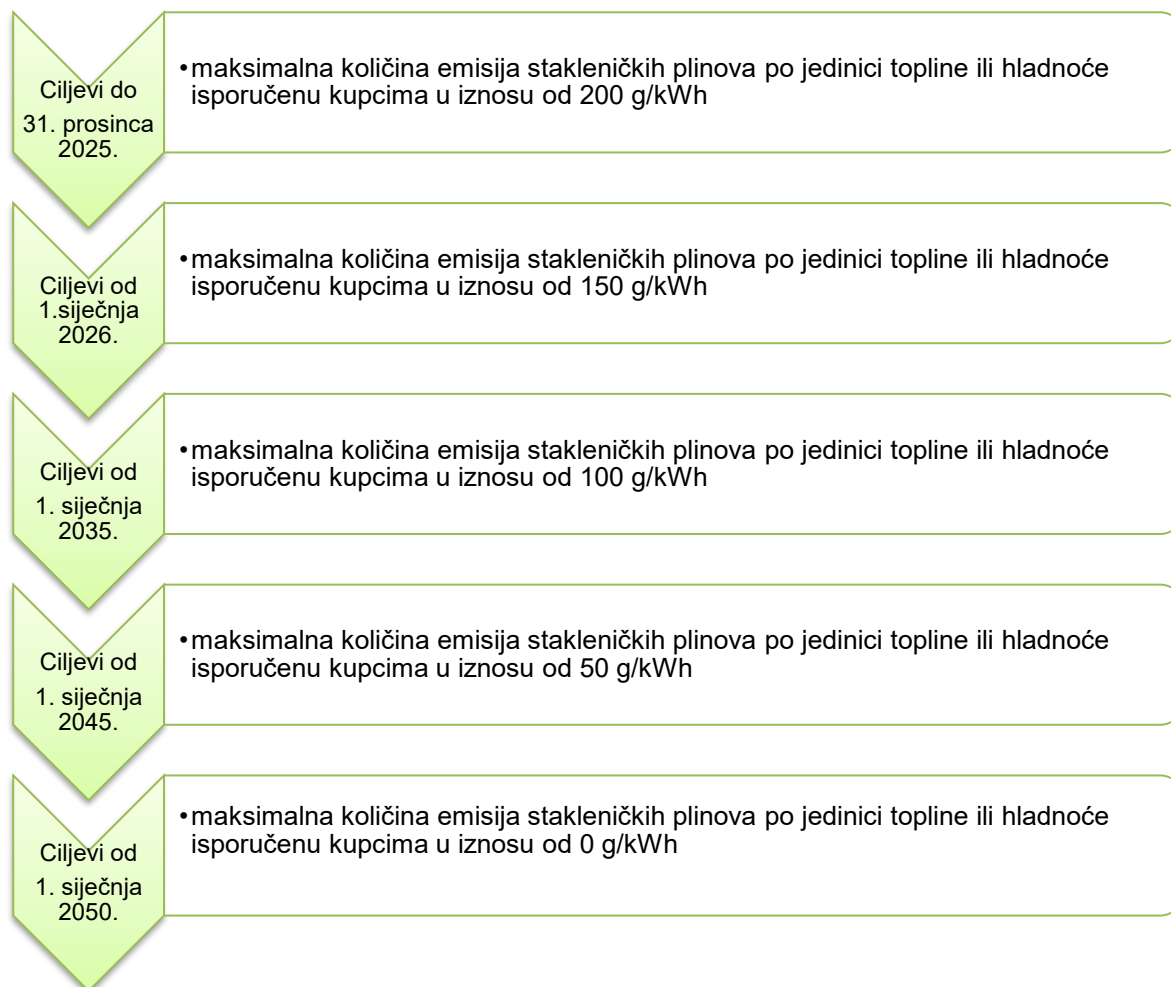
Prema stavku 3. istog članka, države članice koje su namjeravale primijeniti alternativu trebale su o tome obavijestiti Europsku komisiju do 11. siječnja 2024. S obzirom na to da je navedeni rok prošao, a da Hrvatska nije dostavila takvu obavijest, u nacionalnom zakonodavstvu primjenjuju se kriteriji iz stavka 1. članka 26. U skladu s tim, ciljevi iz točke 1. su temelj za definiranje načina i dinamike dekarbonizacije CTS-a grada Karlovca.



Sl. 4–2 Ciljevi dekarbonizacije prema točki 1. članka 26 (EU) 2023/1791

Iz prikazanih kriterija vidljivo je da se zahtjevi za učinkovitost centraliziranih toplinskih sustava postupno zaoštavaju do 2050. godine. U početnom razdoblju dovoljno je ispuniti prag od 50 %, dok se nakon 2035. uvode dodatni kombinirani uvjeti, a od 2040. zahtijeva se minimalno 75 %. Do 2050. sustavi daljinskog grijanja i hlađenja moraju biti u potpunosti dekarbonizirani, oslanjajući se isključivo na obnovljive izvore i otpadnu toplinu.

Alternativni pristup definiranju ciljeva dekarbonizacije temeljen na emisijama stakleničkih plinova po jedinici isporučene topline prema točki 2. članka 26 (EU) 2023/1791, prikazan je sljedećom slikom.



Sl. 4–3 Ciljevi dekarbonizacije prema točki 2. članka 26 (EU) 2023/1791

5. PREGLED RASPOLOŽIVIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA DEKARBONIZACIJU PROIZVODNIH LOKACIJA

U ovom poglavlju preliminarno su obrađena raspoloživa tehnološka rješenja za dekarbonizaciju proizvodnih lokacija i to pomoću SWOT analize.

SWOT analiza je analitički alat koji se koristi za sustavno sagledavanje unutarnjih i vanjskih čimbenika koji utječu na određeni projekt, organizaciju ili stratešku odluku. Naziv SWOT dolazi od akronima engleskih pojmova:

- *Strengths* - snage,
- *Weaknesses* - slabosti,
- *Opportunities* - prilike i
- *Threats* - prijetnje.

Snage i slabosti odnose se na unutarnje karakteristike sustava dok se prilike i prijetnje odnose na vanjsko okruženje. SWOT analiza omogućuje donošenje informiranih odluka identificiranjem područja u kojima projekt ima konkurentsku prednost kao i potencijalnih rizika koji bi mogli ugroziti njegovu uspješnost.

U nastavku su prikazane SWOT analize za svaku razmatranu opciju, a detaljnija analiza svake opcije prikazana je u poglavlju 6.

Tab. 5-1 SWOT analiza korištenja biomase za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ lokalna dostupnost sirovine ▪ mogućnost prenamjene postojećeg kotla VKLM-25 ▪ smanjenje emisija CO₂ ▪ usklađenost s EU zakonodavstvom i taksonomijom	▪ visoki kapitalni i operativni troškovi ▪ sigurnosni rizici (eksplozivnost, požari) ▪ tehnička ograničenja kod suspaljivanja s plinom ▪ kompleksna ATEX oprema i nadzorni sustavi potrebni za rad
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ iskorištavanje EU fondova i nacionalnih poticaja za OIE ▪ daljnji tehnološki razvoj tržišta crnih peleta	▪ volatilnost cijene i dostupnosti biomase ▪ ograničenje GUP-a i moguće protivljenje zajednice ▪ neizvjesnost u tehničkoj funkcionalnosti postojećeg kotla ▪ buduća regulatorna ograničenja za biomasu s obzirom na okolišne standarde

Tab. 5-2 SWOT analiza korištenja akumulatora topline za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
- dokazana i jednostavna tehnologija - omogućuje ravnomjerniju isporuku toplinske energije - smanjuje vršna opterećenja - povećava fleksibilnost sustava - omogućava povećanje postotka korištenja OIE - uspješno implementirano (npr. TE-TO Zagreb)	- ovisnost o ostalim izvorima za punjenje - potreban prostorni kapacitet
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
- moгуćnost sufinanciranja kroz EU projekte energetske učinkovitosti - tehnološka kompatibilnost s geotermalnim izvorima i solarnim sustavima	- potencijalni problemi sa statikom, tlakom i sigurnošću - neefikasnost ako se sustav ne dimenzionira optimalno - ograničen doprinos dekarbonizaciji bez paralelnog ulaganja u ostale OIE

Tab. 5-3 SWOT analiza korištenja geotermalne energije za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
- povoljan geotermalni potencijal promatranog područja - identificirano ležište u neposrednoj blizini grada (Rečica) - gotovo nulte emisije stakleničkih plinova - moгуćnost kontinuirane proizvodnje topline 24/7	- vrlo visoki troškovi istraživanja i bušenja - višegodišnji proces istraživanja - zahtjevno upravljanje projektom zbog koordinacije više struka
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
- izrađena Studija izvedivosti u sklopu projekta GEO4KA - potencijal za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije - dugoročna neovisnost o fosilnim gorivima	- zastoj projekta zbog nedostatka financiranja - investicijski rizik u fazi bušenja - nepovoljan kemijski sastav geotermalne vode - potencijalni otpor u lokalnoj zajednici - imovinsko-pravni problemi na lokaciji

Tab. 5-4 SWOT analiza korištenja sunčeve energije za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ obnovljiv i dostupan izvor energije ▪ zrela tehnologija ▪ nema emisija tijekom rada sustava ▪ niska cijena energije nakon ulaganja ▪ učinkovito u kombinaciji sa spremnicima topline	▪ CTS grada Karlovca ne isporučuje potrošnu toplu vodu ▪ sezonska neuravnoteženost – najveća proizvodnja ljeti, a potrošnja zimi ▪ ograničena iskoristivost bez integracije sa skladištenjem ▪ nema predviđenih lokacija u GUP-u ▪ visoki specifični investicijski troškovi
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ integracija s akumulatorom topline, odnosno sezonskim spremnikom ▪ rastući broj referentnih sustava u EU	▪ rizik neisplativosti bez potpore fondova ▪ potencijalni otpor zajednice zbog vizualnog utjecaja ▪ nedostatak prostorne koordinacije za novu infrastrukturu

Tab. 5-5 SWOT analiza korištenja potencijalnih hibridnih postrojenja (fotonaponska elektrana + električni kotao / dizalica topline) za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ mogućnost potpunog odvajanja od fosilnih goriva ▪ korištenje zelene električne energije kao pogonske energije za električni kotao/dizalicu topline ▪ modularni sustav i lako prilagodljiv postojećoj infrastrukturi	▪ sezonska neuravnoteženost između proizvodnje električne energije i potrebe za grijanjem ▪ potreban novi elektroenergetski priključak ▪ ekonomska neisplativost kotla bez upotrebe zelene električne energije
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ EU fondovi za elektrifikaciju grijanja i korištenje OIE ▪ ugradnja u kombinaciji s akumulatorom topline povećava fleksibilnost sustava	▪ visoka tržišna cijena električne energije iz mreže tijekom zime ako nema povlaštenih tarifa ▪ nedostatak prostora za fotonaponsku elektranu na gradskim parcelama

Tab. 5-6 SWOT analiza korištenja plinskog kogeneracijskog postrojenja za potrebe CTS-a grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ istodobna proizvodnja električne i toplinske energije ▪ stabilan i predvidiv izvor energije ▪ mogućnost sudjelovanja na tržištu električne energije ▪ fleksibilan sustav i jednostavna regulacija snage	▪ ovisnost o fosilnom gorivu ▪ ne doprinosi dekarbonizaciji ▪ ograničena prihvatljivost za financiranje nakon 2030., a iz perspektive EU taksonomije
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ može se koristiti kao prijelazna tehnologija do potpune dekarbonizacije ▪ tehnička kompatibilnost s postojećom vrelvodnom mrežom	▪ rizik porasta cijene plina i nesigurnosti opskrbe ▪ smanjena javna prihvatljivost plinskih postrojenja ▪ dugoročna regulatorna ograničenja zbog emisija

Tab. 5-7 SWOT analiza modernizacije postojeće infrastrukture i opreme

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ postojeća infrastruktura je većim dijelom poznata i tehnički dokumentirana ▪ uspješno je provedena realizacija 3/4 mreže ▪ manja potreba za građevinskim zahvatima u usporedbi s novim sustavima	▪ preostali dijelovi mreže su zastarjeli ▪ ograničen životni vijek postojećih kotlova i opreme ▪ visoki troškovi i dugi rokovi realizacije ▪ moguće nesukladnosti s budućim zahtjevima za OIE i emisije
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ korištenje EU fondova za digitalizaciju i uvođenje pametnih sustava ▪ smanjenje gubitaka i operativnih troškova ▪ uvođenje pametnog mjerenja	▪ rizik zastoja tijekom radova ▪ tehnička ograničenja zbog različite starosti opreme ▪ nedostatak kvalificiranih izvođača ▪ neučinkovitost modernizacije ako se ne provodi zajedno s dekarbonizacijom samih izvora

Tab. 5-8 SWOT analiza za uvođenje naprednih tarifnih sustava u CTS grada Karlovca

Snage (Strengths)	Slabosti (Weaknesses)
▪ poticanje energetske odgovornosti potrošača ▪ mogućnost ravnomjernijeg opterećenja mreže kroz vremensku modulaciju cijena ▪ veći prihodi kroz pravedniji obračun ▪ povećanje transparentnosti i kontrole potrošnje za korisnike	▪ potrebna potpuna zamjena ili modernizacija sustava mjerenja – uvođenje pametnih brojlara ▪ visoki početni troškovi implementacije tarifnih modula i IT sustava ▪ moguće nerazumijevanje ili otpor krajnjih korisnika
Prilike (Opportunities)	Prijetnje (Threats)
▪ financijska potpora iz EU fondova za digitalizaciju energetske sustava ▪ usklađivanje s praksama naprednih toplinskih mreža u EU ▪ uvođenje fleksibilnih tarifa pogoduje integraciji OIE ▪ mogućnost personalizirane ponude prema potrošačkim profilima	▪ rizik socijalne nejednakosti ▪ pravna ograničenja u primjeni varijabilnih tarifa bez izmjena nacionalnih propisa ▪ potencijalni problemi s privatnošću i zaštitom podataka potrošača ▪ neučinkovitost sustava ako se ne osiguraju komunikacija i edukacija korisnika

6. ANALIZA RASPOLOŽIVIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA DEKARBONIZACIJU PROIZVODNIH LOKACIJA

6.1. Korištenje biomase

Biomasa je jedan od obnovljivih izvora energije koji se koristi u toplinarstvu, osobito u kontekstu energetske tranzicije i dekarbonizacije postojećih sustava. Riječ je o energentu koji potječe iz bioloških materijala, uključujući drvenu masu, poljoprivredne ostatke i druge organske resurse. Zbog mogućnosti lokalnog prikupljanja i relativno stabilnih opskrbnih lanaca, biomasa se u brojnim sredinama koristi kao alternativa fosilnim gorivima u proizvodnji toplinske energije. Njezina primjena u centraliziranim sustavima ovisi o nizu čimbenika koji se analiziraju u skladu s lokalnim specifičnostima i širim energetskim ciljevima.

6.1.1. Tehnološka rješenja za korištenje biomase

Korištenje biomase se za potrebe CTS-a u Karlovcu razmatra sa stajališta prenamjene postojećih proizvodnih jedinica te sa stajališta izgradnje potpuno novih proizvodnih jedinica.

Prenamjena postojećih proizvodnih jedinica

Jedna od mogućih opcija dekarbonizacije postojećeg sustava je prenamjena postojećih proizvodnih jedinica, odnosno prenamjena kotla VKLM-25 koji trenutno nije u funkciji.

Rješenje prenamjene obuhvaća ugradnju sustava za suspaljivanje praha peleta i prirodnog plina. Suspaljivanje biomase i prirodnog plina je relativno novi koncept jer uključuje izgaranje krutog i plinovitog goriva zajedno. Prema istraživanjima¹² u kojima se u laboratorijskim uvjetima proučavalo izgaranje usitnjene biomase s prirodnim plinom, javljaju se tehnički problemi pri povećanju udjela biomase iznad 20% na energetskoj razini. Neki od problema koji se javljaju odnose se na taljenje pepela, povećane stope korozije u dijelovima izloženim visokim temperaturama, lebdeći pepeo, stvaranje nepravilnog toka plinova i slično.

Uzimajući sve u obzir, tehnički izazovi zahtijevaju dodatna istraživanja i optimizaciju sustava te pažljivo projektiranje procesa izgaranja. Za uvođenje takvog sustava potrebno je rekonstruirati postojeći kotao VKLM-25 i to na način da se uz njega:

- integrira sustav za fino mljevenje peleta, uključujući pred bunker, pužni transporter, separator i čekićni mlin s kapacitetom mljevenja koji osigurava čestice pogodne za suspenzijsko izgaranje (većina <1 mm),

¹ Costa M, Casaca C. Co-combustion of biomass in a natural gas fired furnace. *Combustion Science and Technology* 2003

² Golec T, Bocian P. Low Emission Pulverized Biomass Fuel Combustion Systems. ERA-NET Bioenergy – Project FutureBioTec Technologies for clean biomass combustion, Austria, Graz, September 20, 2012.

- ugrade dvije komore za izgaranje (plamenici) višegorivnog tipa, montirane na prednjem zidu ložišta koje omogućuju paralelno ili alternativno izgaranje prirodnog plina i drvenog praha,
- instalira sustav za doziranje i pneumatski transport drvenog praha koji uključuje rotacijske dozirne ventile, injektore i ventilatore za transport zraka s pripadajućom regulacijom,
- uspostavi sustav upravljanja plamenicima koji osigurava automatsku kontrolu izgaranja, paljenja, ventilacije i sigurnosnog nadzora, s mogućnošću povezivanja na nadređeni distribuirani kontrolni sustav postrojenja,
- omogući sigurno rukovanje eksplozivnim frakcijama biomase kroz implementaciju ATEX-kompatibilnih rješenja za zaštitu od prašinskih eksplozija (eksplozijski ventili, sustavi detekcije i suzbijanja),
- rekonstruiraju priključci za zrak i gorivo, uključujući ugradnju ventilatora za zrak za izgaranje, sustav za dovod prirodnog plina i sustav za napajanje plamenika.

Nakon provedbe tih zahvata, kotao će biti sposoban za rad u režimu s dva goriva, s fleksibilnim izborom goriva, optimiziranim izgaranjem, nižim emisijama stakleničkih plinova i većom održivošću u odnosu na konvencionalni rad s isključivo fosilnim gorivima. Sustav će biti koncipiran tako da će omogućiti modularnu nadogradnju i prilagodbu prema dostupnosti goriva i energetske potrebe. U sljedećoj su tablici prikazane tehničke karakteristike prenamijenjenog kotla.

Tab. 6-1 Tehničke karakteristike prenamijenjenog kotla

Stavka	Jedinica	Iznos
Maksimalna snaga kotla	MW	20
Plamenici	-	2
Maksimalna snaga iz praha peleta	MW / plameniku	7
Maksimalna snaga iz prirodnog plina	MW / plameniku	10
Dimenzije	m	3,5 x 4,2 x 9
Maksimalni / minimalni protok praha peleta	kg/h	1.530 / 500
Maksimalni / minimalni protok prirodnog plina	m ³ _n /h	1.000 / 700

Suspeljivanje praha peleta i prirodnog plina je prvi korak prema smanjenju stakleničkih emisija. Iako je proces mljevenja peleta energetski intenzivan proces, i dalje emitira manje CO₂ emisija nego spaljivanje čistog prirodnog plina. Prema istraživanju³, emisija stakleničkih plinova iz drvene biomase veličine 0,5 mm iznosi 16,89 kg CO₂/MWh, a veličine 0,1 mm 93,43 kg CO₂/MWh. Za usporedbu, faktor emisije stakleničkih plinova za toplinu proizvedenu u javnim kotlovnica za prirodni plin⁴ iznosi 259,97 kg CO₂ ekv/MWh što dovodi do zaključka da korištenje drvenih peleta, osobito većeg promjera, može značajno doprinijeti smanjenju ukupnih emisija.

³ Valters Kazulis, Haralds Vigants: Biomass and natural gas co-firing – evaluation of GHG emissions, Energy Procedia, Volume 147, 2018.

⁴ MINGOR: Vodič o metodologiji izračuna faktora emisija i Uklanjanja stakleničkih plinova, Zagreb, 2022.

Izgradnja novih proizvodnih jedinica

Druga od mogućih opcija dekarbonizacije postojećeg sustava je ugradnja novog kotla na biomasu. Kotao koristi toplinsku energiju oslobođenu izgaranjem biomase za zagrijavanje vode. Voda ne prolazi faznu promjenu u tijelu kotla, odnosno ne stvara se para.

Kotlovsko postrojenje na biomasu sastoji se od nekoliko podsustava:

- dovoda goriva do kotla – čine ga lančani transporter, protupožarna brana i dozirni sustav s pužem. Osiguranje od povratnog plamena izvedeno je zasunom u obliku hidrauličkog cilindra koji se otvara samo u periodu dodavanja goriva. Dozirna naprava je dvostruke izvedbe (dva puža), sadrži sustav za sprečavanje povratnog plamena prskanjem vodom.
- ložišta - izvedeno je s vibracijskom kosom rešetkom kako bi se osiguralo jednoliko gibanje ubačenog goriva kroz sve zone procesa izgaranja. Gorivo se u ložište dovodi pužnim prijenosom i jednoliko se raspoređuje po rešetki u prvoj zoni u kojoj se gorivo zagrijava i suši. Nakon toga nastupa zona isplinjavanja i zapaljenja te zadnja zona dogorijevanja nehlapivog dijela goriva.
- tlačni dijelovi kotla - sastoji se od tri prolaza dimnih plinova, pri čemu su dva prolaza obuhvaćena ekranskim cijevnim stijenama (lijevim i desnim bočnim ekranima) te poprečnim ekranima koji formiraju prolaze dimnih plinova u kotlu. Prednji ekran kotla projektira se tako da u donjem dijelu formira prednji strop ložišta, a zatim prelazi u ravnu vertikalnu prednju stijenu prvog prolaza, da bi u gornjem dijelu formirao zakretnu komoru na prijelazu iz 1. u 2. prolaz. Drugi prolaz predstavlja dimovodni kanal formiran od ekranskih površina sa strujanjem dimnih plinova prema dolje u kojem su smješteni pregrijači pare. Na dnu ovog prolaza dimni plinovi se zakreću prolazeći kroz cijevnu mrežu te ulaze u 3. prolaz i struje prema gore. Dimni plinovi u 3. prolazu struje prema dolje te prolaze kroz ekonomajzer. Bubanj kotla smješten je poprečno na kotao. Kotao je samostojeće izvedbe, opremljen svom potrebnom grubom armaturom (nadgledni i ulazni otvori i dr.) i uređajima za čišćenje kotlovskih površina te je izoliran. Za potrebe manipulacije, nadzora rada i održavanja oko kotla izvedene su sve potrebne radne (pristupne) platforme i stepenice
- sustav dovoda zraka za izgaranje - dovodi se kao primarni pod rešetku i kao sekundarni u zonama iznad rešetke čime se osigurava potpuno izgaranje goriva
- sustav odvoda pepela iz kotla - ostaci izgaranja (pepeo i šljaka) skupljaju se ispod ložišta ispod svake zone i na kraju ložišta, te odvede pužnim transporterima u posebne spremnike koji su smješteni izvan zgrade kotlovnice.
- dimni kanali i oprema za filtriranje dimnih plinova - dimni se plinovi, po izlasku iz kotla, dimovodnim kanalima odvede do elektrostatskog filtera, a potom do ventilatora dimnih plinova koji je smješten izvan zgrade postrojenja. Dimni plinovi izlaze kroz dimnjak samostojeće konstrukcije. Vrijednosti emisija NO_x , SO_2 i krutih čestica koje se moraju postići na izlazu iz dimnjaka definirane su *Uredbom o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 42/21)*, i navedenu su u Tab. 6-2.

Tab. 6-2 Granične vrijednosti emisija (GVE) za nove srednje uređaje za loženje na krutu biomasu

Onečišćujuća tvar	GVE (mg/m ³)*
SO ₂	200**
NO _x	300
Krute čestice	30***

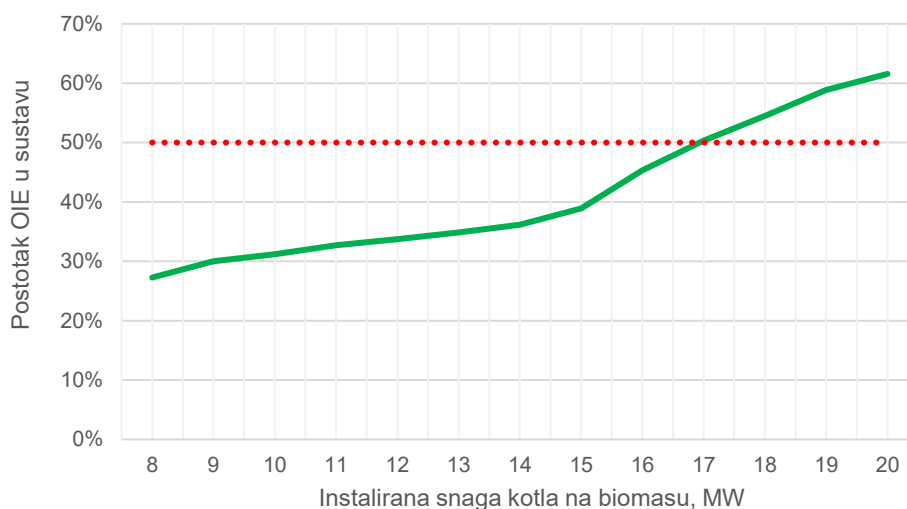
* GVE se izračunavaju pri temperaturi od 273,15 K, tlaku 101,3 kPa i nakon korekcije za sadržaj vodene pare u otpadnim plinovima i pri standardiziranom sadržaju O₂ od 6 % za kruta goriva

** Vrijednost se ne primjenjuje na uređaje u kojima se upotrebljava isključivo drvena kruta biomasa.

*** Za uređaje ukupne ulazne toplinske snage veće od 5 MW i manje od ili jednake 20 MW. Ukoliko je ulazna toplinska snaga veća od 20 MW GVE iznosi 20 mg/m³. Do 1. siječnja 2030. 150 mg/m³ za uređaje kojima je kruta biomasa glavno gorivo u zonama u kojima je kvaliteta zraka I. kategorije

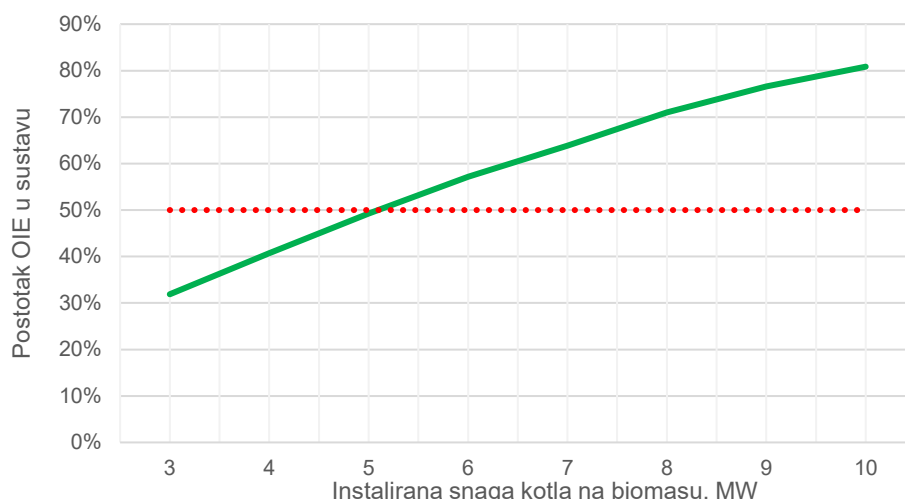
U nastavku su napravljene preliminarne analize prema metodologiji koja je detaljno opisana u poglavlju 9. Određena je potrebna instalirana snaga kotla na biomasu u kombinaciji s postojećim plinskim kotlom VKLM-50 s ciljem postizanja udjela od 50 % obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji toplinske energije u 2028. godini. Ista analiza napravljena je i za scenarij u kojem se u sustav uvodi akumulator topline kapaciteta 150 MWh čime se razmatra dodatna fleksibilnost u radu sustava.

Važno je naglasiti da u ovom izračunu nisu uzimani u obzir odnos cijena plina i biomase niti optimizacija pogona prema troškovima. Analiza je temeljena na forsiranju maksimalnog rada kotla na biomasu, uz uvjet da se istovremeno osigura pokrivanje ukupnog toplinskog konzuma te je na taj način dobiven orijentacijski pokazatelj o potrebnoj veličini postrojenja.



Sl. 6–1 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini u ovisnosti o instaliranoj snazi kotla na biomasu

Iz prethodnog je grafa vidljivo da se instalacijom kotla na biomasu od 17 MW postiže više od 50% OIE u cjelokupnom sustavu (50,34%). Navedena instalirana snaga se smanjuje ako se uz kotao na biomasu investira u akumulator topline kapaciteta 150 MWh, a kako je prikazano sljedećom slikom.



Sl. 6–2 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini ovisnosti o snazi kotla na biomasu s ugrađenim akumulatorom topline

Iz slike je vidljivo da se instaliranjem akumulatora topline i kotla na biomasu snage veće od 5 MW zadovoljava uvjet od 50% OIE u cjelokupnom sustavu (prva cjelobrojna veća snaga iznosi 6 MW te daje 57,15 % OIE).

Trenutno je u izradi studijska dokumentacija za kotao na biomasu snage 9 MW te će sve daljnje analize biti provedene u skladu s tim podatkom. Kombinacija takvog kotla i akumulatora topline daje 76,53 % OIE u cjelokupnom sustavu.

Tab. 6-3 Tehničke karakteristike novog kotla na biomasu

Stavka	Jedinica	Iznos
Maksimalna snaga kotla	MW	9
Dimenzije	m	4 x 5 x 9
Maksimalni / minimalni protok peleta	kg/h	1.845 / 738

6.1.2. Analiza potencijala biomase

Dostupnost i održivost resursa

Republika Hrvatska raspolaže opsežnim i održivim šumskim resursima koji čine osnovu za razvoj i širenje proizvodnje biomase. Šume prekrivaju 49 % ukupne kopnene površine što odgovara površini od približno 2,8 milijuna hektara. Zaliha drvene mase procijenjena je na 252 milijuna tona apsolutno suhe mase (kratica odt - eng. *oven-dry tonne*).

Prema važećim šumarskim planovima, godišnji dozvoljeni etat, odnosno dozvoljena količina drvene mase koja se smije posjeći u određenom razdoblju, iznosi 10,3 milijuna odt. Stvarna godišnja sječa u Hrvatskoj trenutno iznosi oko 7,7 milijuna odt, što znači da postoji neiskorišteni potencijal od približno 2,6 milijuna odt godišnje. Taj višak predstavlja priliku za dodatno korištenje sirovine bez ugrožavanja održivosti šumskih ekosustava.

Što se tiče područja Karlovca, za konkretan projekt analiziran je potencijal Karlovačke i ostalih susjednih županija te je potencijal prikazan sljedećom tablicom:

Tab. 6-4 Teorijski potencijal drvne biomase na području Karlovačke i susjednih županija

Županija	Godišnji etat prostornog drva		
	Planirana sječa, m ³	Ostvarena sječa, m ³	Potencijal, m ³
Karlovačka	302.434	186.416	116.018
Zagrebačka	185.445	122.772	62.673
Sisačko-moslavačka	381.538	256.092	125.446
Ličko-senjska	348.746	223.089	125.657
Primorsko-goranska	230.648	180.084	50.564
Ukupno	1.448.811	968.453	480.358

Iz tablice je vidljivo da potencijal prostornog drva za Karlovačku županiju iznosi 116.018 m³. Uz konzervativnu pretpostavku da se iz 1 m³ prostornog drva dobije 270 kg peleta, raspoloživ potencijal osigurava približno 31,3 tisuća tona peleta godišnje.

Za odabrani kotao od 9 MW i njegovu maseno energetske bilancu (godišnja proizvodnja toplinske energije u iznosu od približno 34 GWh - Tab. 10-10) taj je iznos dostatan za 5,8 godišnjih potrošnji. Dobiveni rezultati potvrđuju da područje Karlovačke, ali i okolnih županija, ima značajan potencijal za korištenje drvne biomase kao održivog i obnovljivog izvora energije.

Biomasa u okviru Sustava trgovanja emisijama (EU ETS)

Sustav trgovanja emisijama Europske unije (EU ETS) određuje cijenu emisija ugljikovog dioksida kroz sustav emisijskih jedinica. Industrije moraju kupovati i predavati te jedinice za svaku tonu emitiranog CO₂, a ukupan broj dostupnih emisijskih jedinica smanjuje se iz godine u godinu, čime se trošak korištenja fosilnih goriva stalno povećava.

S druge strane, emisije koje potječu iz biogenih izvora ugljika, kao što je biomasa, nisu obuhvaćene EU ETS-om, odnosno certificirana biomasa može biti korištena bez dodatnih troškova povezanih s emisijama ugljika. Kako bi biomasa ostvarila taj povlaštenu status, mora zadovoljiti kriterije održivosti i uštede emisija stakleničkih plinova definirane u Direktivi o obnovljivim izvorima energije (RED III). Prema Uredbi o praćenju i izvješćivanju unutar EU ETS-a, biomasa koja ispunjava te kriterije smatra se gorivom s nultom stopom emisija, odnosno ona ne povećava ugljični otisak industrije koja ju koristi.

Takav sustav stvara snažan financijski poticaj za industrije da prijeđu s korištenja fosilnih goriva na goriva na bazi biomase budući da takva goriva omogućuju istu razinu energetske učinkovitosti uz istovremeno uklanjanje troškova povezanih s emisijama.

Usporedba predloženih goriva

Kao novo gorivo za kotlove u obje varijante predviđaju se klasični peleti i crni peleti. Dva goriva predviđaju se sa stajališta sigurnosti opskrbe, a proces proizvodnje i usporedba svojstava dani su u nastavku.

Proces proizvodnje klasičnih peleta (tzv. bijeli peleti) uključuje faze skidanja kore i usitnjavanja trupaca, sušenja drvenih sječki toplim zrakom, mljevenja u mlinu i prešanja piljevine u cilindrične pelete pomoću visokotlačne preše. Peleti se nakon prešanja hlade, prosijavaju radi uklanjanja prašine te skladište do automatskog pakiranja u vreće. Crni peleti

se razlikuju od klasičnih bijelih peleta po tehnološkom procesu proizvodnje, fizikalno-kemijskim svojstvima i energetskej učinkovitosti.



Sl. 6–3 Bijeli i crni peleti

Osnovna značajka crnih peleta je proizvodnja putem procesa eksplozije pare. Eksplozija pare je hidrotermička metoda obrade koja razbija lignoceluloznu strukturu biomase i time je čini pogodnijom za mljevenje i izgaranje. Proces eksplozije pare poboljšava vlačnu čvrstoću, trajnost i otpornost biomase na vlagu što smanjuje troškove transporta i ublažava rizike od degradacije i požara tijekom skladištenja goriva. Također, crni peleti imaju značajno veću energetske gustoću što ih svrstava bliže energetskim karakteristikama ugljena. Dodatna prednost očituje se u nižim emisijama štetnih tvari tijekom izgaranja, uključujući sumporove spojeve, dušikove okside i lebdeće čestice, čime se u konačnici doprinosi smanjenju ukupnog ugljičnog otiska, osobito ako se koristi biomasa iz održivih izvora.

Trošak proizvodnje crnih peleta je znatno viši u usporedbi s klasičnim peletima, prvenstveno zbog energetske intenzivnog procesa eksplozije pare i trenutno ograničene komercijalne dostupnosti. Infrastruktura za njihovu proizvodnju, skladištenje i distribuciju još uvijek je u fazi razvoja, a dodatni izazov predstavlja i nedostatak široko prihvaćenih međunarodnih standarda što otežava njihovu integraciju u globalne opskrbe lance biogoriva. Usporedna svojstva crnih i bijelih peleta prikazani su u tablici u nastavku. Svojstva crnih peleta dostupni su od strane norveške tvrtke GEIA AS te su vrijednosti prosjek ispitivanja više uzoraka.

Tab. 6-5 Svojstva bijelih i crnih peleta

Stavka	Jedinica	Bijeli peleti	Crni peleti
Kemijski sastav	Ugljik	% s.t.	50,0
	Vodik	% s.t.	6,2
	Dušik	% s.t.	0,15
	Kisik	% s.t.	43
	Sumpor	% s.t.	0,04
	Klor	% s.t.	0,02
	Vlaga	%	8,0
	Pepeo	% s.t.	0,7
Nasipna gustoća	kg/m ³	600 - 750	786
Donja ogrjevna vrijednost	MJ/kg	16,5	19,95

6.1.3. Sigurnosni aspekti

Uvođenje biomase kao goriva u postojećim ili novim proizvodnim jedinicama zahtijeva pozornost s aspekta tehničke sigurnosti. Za razliku od konvencionalnih fosilnih goriva poput prirodnog plina pri čijoj uporabi Gradska toplana već zadovoljava sve važeće sigurnosne standarde, biomasa donosi nove i specifične rizike. Ti rizici uključuju eksplozivnost prašine, požarne i mehaničke opasnosti, a posebno se javljaju tijekom procesa mljevenja, doziranja, skladištenja i pneumatskog transporta.

Fino mljeveni drveni prah pri određenim koncentracijama u zraku i prisutnosti izvora paljenja može uzrokovati brzu i razorno izgaranje. Eksplozivnost drvenog praha definirana je brzinom porasta tlaka i maksimalnim tlakom eksplozije, a vrijednosti uobičajene za ovu vrstu goriva zahtijevaju obaveznu primjenu ATEX direktive (2014/34/EU) u dizajnu opreme i procesa.

Zbog toga se u sustavima za mljevenje i transport biomase primjenjuju sljedeće sigurnosne mjere:

- sustavi za detekciju i suzbijanje eksplozije koji prepoznaju rani nastanak izgaranja i automatski ispuštaju ili neutraliziraju tlak prije nego što dosegne destruktivne razine;
- ugradnja eksplozijskih rasteretnih panela na ključnim točkama procesa, poput separatora, spremnika i filtarskih jedinica, u svrhu kontroliranog ispuštanja tlaka;
- korištenje antistatičkih materijala i komponenti čime se smanjuje mogućnost nakupljanja elektrostatskog naboja koji bi mogao poslužiti kao inicijator paljenja;
- nadzor temperature i vibracija rotacijskih dijelova pomoću senzora u stvarnom vremenu čime se omogućuje pravovremena intervencija u slučaju preopterećenja, blokade ili greške u radu;
- implementacija rotacijskih ventila s ATEX-certifikatom koji djeluju kao pasivne barijere i sprječavaju prijenos plamena između različitih zona postrojenja;
- obavezna ugradnja sustava za detekciju iskrica i sustava za vodeno gašenje na izlazima iz mlina i u usisnim linijama.

Uz eksplozijski rizik, dodatna sigurnosna razmatranja uključuju požarnu opasnost uslijed samozapaljenja biomase tijekom skladištenja, posebice kod materijala veće vlažnosti ili dužeg vremena zadržavanja. Zbog toga skladišni prostori i silosi moraju biti opremljeni sustavima za praćenje temperature, CO sensorima i ventilacijom. Također, preporučuje se minimizirati zastoj materijala u opremi i održavati unutrašnjost sustava čistom od naslaga.

Sustavi za izgaranje, kao krajnji dio linije, moraju imati sigurnosne automatizirane sustave (BMS) koji nadziru plamen, tlakove, protoke i parametre izgaranja, te u slučaju odstupanja pokreću kontrolirano zaustavljanje pogona.

Na razini osoblja, potrebno je provesti stručno osposobljavanje operatera za prepoznavanje potencijalnih opasnosti, postupanje u izvanrednim situacijama i rad s opremom u ATEX zonama. Redovito održavanje, provođenje testova ispravnosti zaštitne opreme i provođenje analiza rizika ključni su preduvjeti za siguran rad s biomasom u svakom proizvodnom kontekstu.

Iako se sadašnji rad na plin odvija u skladu sa svim propisanim sigurnosnim zahtjevima, prelazak na biomasu zahtijevat će dodatne mjere zaštite i nadzora. Njihovim uvođenjem može se osigurati jednaka razina pouzdanosti sustava i sigurnosti rada kao i u postojećem režimu korištenja plina.

6.1.4. Prostorno planski aspekti

Smještaj bilo prenamijenjenog ili novog kotla na biomasu predviđen je unutar postojećih prostorija u kojima se trenutno nalazi stari kotao VKLM-25. Time se iskorištava postojeća građevinska i tehnička infrastruktura uključujući temelje, priključke na toplovodnu mrežu, električne instalacije i transportne pristupe.

Kao što je već ranije istaknuto, crne prelete karakteriziraju hidrofobna svojstva te se zbog toga mogu skladištiti na otvorenom, kao i ugljen. Međutim, zbog prostornog ograničenja i smještaja proizvodne lokacije u gradskoj sredini, gorivo je potrebno skladištiti u skladištu. Skladište je potrebno izgraditi u neposrednoj blizini kotlovnice te osigurati adekvatan prostor za prihvat i automatski transport goriva do kotla. Najveća udaljenost skladišta od pristupnog puta po kojem može doći dostavno vozilo iskustveno iznosi 30 metara što predstavlja najveću duljinu savitljive cijevi za dovođenje peleta iz cisterne. Skladište je potrebno smjestiti čim bliže kotlu, a poseban naglasak se stavlja na potrebu da bude suho i zaštićen, posebno ako se upotrebljavaju bijeli peleti.



Sl. 6–4 Silos za pelete

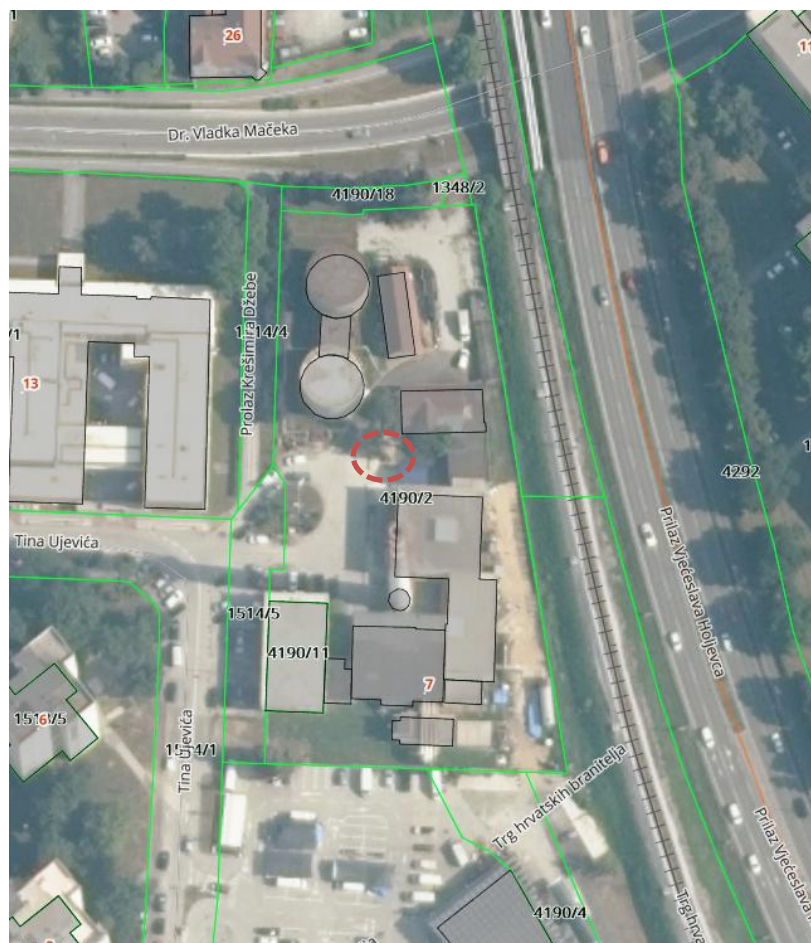
Veličina silosa određena je na način da se osigura minimalno jedan dan autonomnog rada kotla od 9 MW pod maksimalnim opterećenjem, a bez potrebe za dodatnim dopunama.

Tab. 6-6 Karakteristike silosa za pelete

Odabrani spremnik		
Promjer	m	6,0
Visina	m	7,2
Dostupan volumen	m ³	160,0

Karakteristika	Jedinica	Bijeli peleti	Crni peleti
Nasipna gustoća	kg/m ³	675,0	786,0
Dostupna masa goriva	t	108,0	125,8
Snaga postrojenja	MW	9,0	9,0
Donja ogrjevna vrijednost	MJ/kg	16,5	19,95
Vrijeme rada postrojenja	h	6 – 22	
Broj dana autonomnog rada pod maksimalnim opterećenjem	dan	3,0	4,3

Iz prethodne tablice vidljivo je da zbog različitih vrijednosti nasipne gustoće i donje ogrjevne vrijednosti za bijele i crne pelete korištenje bijelih peleta daje 43 % veći broj dana autonomnog rada cijelog postrojenja. Silos je potrebno smjestiti u neposrednu blizinu kotlovnice radi sigurnog i učinkovitog transporta goriva pri čemu treba osigurati dovoljan razmak od objekata i pristup za dostavna vozila. Potencijalna lokacija smještaja prikazana je na sljedećoj slici.

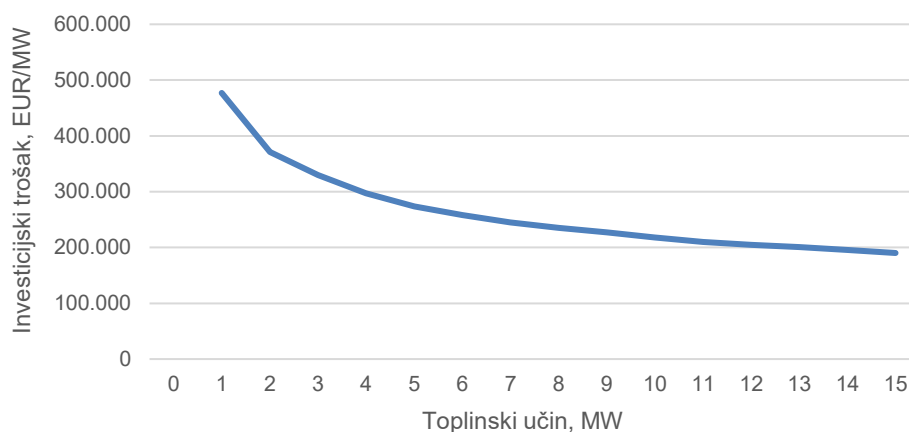


Sl. 6–5 Predloženi smještaj skladišta peleta

6.1.5. Procjena ulaganja

Oprema

Procjena ulaganja u novi kotao na biomasu u ovisnosti o instaliranoj snazi prikazana je sljedećom slikom. Ona je temeljena na iskustvenim podacima prema sličnim ostvarenim projektima. Prikazana je ukupna cijena investicijskog troška po MW instalirane snage koja uključuje opremu, odnosno kotao i pripadajuću opremu te troškove transporta, montaže opreme i puštanja u rad.



Sl. 6–6 Procjena ulaganja u novi kotao na biomasu

Uz navedenu investiciju ulaganja u kotao potrebno je napraviti silos za koji je dobivena ponuda od proizvođača koja uključuje nešto manji cilindrični spremnik kapaciteta 95 tona s galvaniziranom završnom obradom i pristupnim vratima te konusno dno s otvorom promjera 250 mm.

Detaljna procjena ulaganja prikazana je u poglavlju Investicijski troškovi, Tab. 10-4.

Cijena biomase

S obzirom da se crni pelet može koristiti kao direktna zamjena za ugljen na koji se plaća značajan iznos uslijed emisija CO₂, očekuje se daljnji razvoj tržišta crnog peleta i usklađivanje cijena s konkurentnim fosilnim gorivom – ugljenom.

Obzirom na trenutnu nerazvijenost tržišta crnog peleta u Hrvatskoj, uspostavljen je kontakt s potencijalnim dobavljačem takvog goriva te je iskazana spremnost isporuke crnog peleta po trenutnoj cijeni od navedenih 210 EUR/toni s transportom što daje trenutnu cijenu crnog peleta od oko 41,31 EUR/MWh.⁵ Proizvođač formira cijenu peleta na način da bude u paritetu s cijenom prirodnog plina pa će daljnje kretanje cijene crnog peleta pratiti kretanje cijene prirodnog plina.

⁵ Preuzeto iz Studije izvodljivosti proizvodnje toplinske energije iz peleta proizvedenog od šumskog i poljoprivrednog otpada, Enerkon d.o.o., listopad 2025.

6.1.6. Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi

Biomasa se za potrebe centraliziranih toplinskih sustava koristi u manjim lokalnim sredinama i to najčešće u obliku drvne sječke, dok sustavi koji koriste pelete još uvijek nisu zastupljeni. Toplovodna kotlovnica u Pokupskom ložena sječkom ukupne snage 1 MW namijenjena je proizvodnji tople vode za opskrbu javnih zgrada i kućanstava. U kotlovnici je ugrađen HERZ-ov kotao. Pored kotlovnice nalazi se dnevni spremnik biomase iz kojeg se putem pomičnog poda i pužnih transportera biomasa doprema u ložište kotla. U sklopu postrojenja izgrađen je i mjesečni natkriveni spremnik biomase u koji se dobavlja usitnjena biomasa.



Sl. 6–7 Toplovodna kotlovnica, kotao i spremnik biomase u Pokupskom

Kotlovnica na biomasu snage 3 MW izvedena je i u Lepoglavi, a toplinskom energijom opskrbljuju se zgrade javnog sektora. Uz toplovodni kotao na biomasu, izveden je i akumulator topline volumena 70 m³ te višednevni spremnik biomase volumena oko 250 m³.

U Europskoj uniji biomasa čini značajan udio kao gorivo u CTS sustavima. Prema podacima⁶ iz 2022. godine, otprilike 16% energije u europskim CTS sustavima dolazi iz biomase što je čini trećim najzastupljenijim gorivom nakon prirodnog plina (40%) i ugljena (29%). Iako biomasa kao gorivo ne dominira u sustavima, njezin udio raste, posebno u zemljama s razvijenim šumskim sektorom i politikama koje potiču obnovljive izvore energije. Tu se ističe Švedska u kojoj biomasa čini 63% goriva u CTS sustavima te Litva s udjelom od 85%. U nastavku su dani primjeri nekoliko europskih gradova koji za proizvodnju toplinske energije koriste biomasu:

- Växjö, Švedska - poznat je kao europski predvodnik u korištenju biomase u toplinarstvu. Cijeli sustav daljinskog grijanja temelji se na korištenju drvne sječke, pilanskog otpada i drugih šumskih ostataka. Instalirana toplinska snaga postrojenja iznosi oko 190 MW. Sustav uključuje akumulator topline kapaciteta 40.000 m³ koji omogućava uravnoteženje proizvodnje i potrošnje toplinske energije. Više od 90 % potreba za grijanjem grada pokriva se iz ovog sustava, čime je Växjö postigao gotovo potpunu dekarbonizaciju grijanja.
- Linköpingu, Švedska - centralizirani toplinski sustav koristi kombinaciju drvne biomase, bioplina i otpada iz industrijskih procesa. Instalirana toplinska snaga iznosi

⁶ JASPERS Team: JASPRES guide to decarbonization of district heating systems, 2024.

130 MW. Sustav uključuje kogeneraciju, a biomasa čini približno 70 % primarnog goriva.

- Kaunas, Litva - jedan od najmodernijih CTS-ova na biomasu u Baltičkim zemljama. Instalirana toplinska snaga iznosi 70 MW, uz dodatnu električnu snagu od 24 MW u kogeneraciji. Sustav koristi drvenu sječku i šumski ostatak kao gorivo. Akumulator topline kapaciteta 20.000 m³ osigurava stabilnost isporuke toplinske energije i omogućuje prilagodbu sustava sezonskim i dnevnim varijacijama potrošnje. Ovaj sustav pokriva više od 90 % potreba grada za toplinskom energijom.
- Tampere, Finska – grad je jedan od pionira u primjeni drvnih peleta u centraliziranom toplinskom sustavu. U sklopu mreže daljinskog grijanja izgrađena je toplana Lielähti s instaliranom toplinskom snagom od približno 33 MW, koja koristi drvene pelete kao glavno gorivo. Postrojenje služi prvenstveno kao vršni i dopunski izvor topline te omogućuje brzu prilagodbu promjenama potražnje u sustavu. Automatizirani sustav za doziranje i izgaranje peleta osigurava visoku učinkovitost rada i minimalnu potrebu za ljudskom intervencijom. Primjena peleta u ovom sustavu dio je šire strategije dekarbonizacije toplinarstva grada Tampere, kojom se fosilna goriva postupno zamjenjuju obnovljivim izvorima energije.

6.2. Sustavi za pohranu toplinske energije – akumulatori topline

Sustavi za pohranu toplinske energije, odnosno akumulatori topline, su uređaji koji se opisuju kao veliki spremnici tople vode koji se pune toplinskom energijom tijekom razdoblja nižih potreba za toplinskom energijom, a prazne se kod vršnih potreba za energijom.

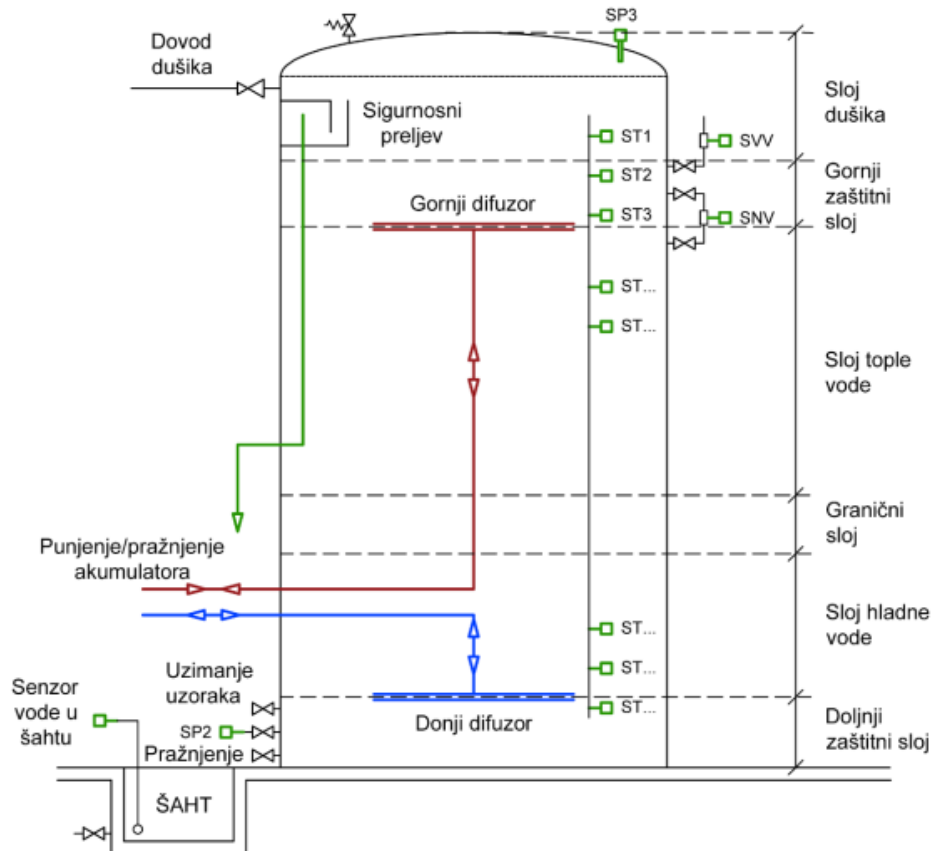
Za korištenje navedenog sustava u veljači 2025. godine napravljena je Studija izvodljivosti prenamjene spremnika mazuta i izgradnje akumulatora topline s pretpostavkom da postoje novi izvori topline koji pokrivaju toplinske potrebe sustava. Studija je pokazala da je sama izgradnja akumulatora topline za sustav Gradske toplane u Karlovcu opravdana i nužna kako bi se omogućilo povećanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnom konzumu.

6.2.1. Opis tehnologije

Akumulatori topline mogu biti atmosferskog tipa ili pod tlakom. Veliki akumulatori topline, a akumulator koji se razmatra za potrebe Gradske toplane Karlovac spada u velike akumulatore, gotovo se uvijek grade kao atmosferski akumulatori, a to znači da je tlak u spremniku iznad razine vode približno jednak atmosferskom tlaku. Ovaj tip akumulatora funkcionira na način da je sam spremnik uvijek pun vode, odnosno spremnik se nikada ne prazni, već se samo mijenja odnos količine tople i hladne vode. Zbog prirodne temperaturne stratifikacije u akumulatoru, topla voda zauzima gornji, a hladna voda donji dio spremnika, dok se između njih nalazi relativno tanki granični sloj tzv. termoklina. Pri punjenju akumulatora, topla voda ulazi u spremnik preko gornjeg difuzora, pri čemu istiskuje istu količinu hladne vode kroz donji difuzor. Pri tome se granični sloj između zona tople i hladne vode pomiče prema dolje. Kod pražnjenja akumulatora situacija je obrnuta. Hladna voda ulazi u spremnik kroz donji difuzor i potiskuje toplu vodu kroz gornji difuzor pri čemu se granični sloj između zona tople i hladne vode pomiče prema gore.

Analizom vertikalne distribucije temperature u samom akumulatoru topline, a koja je prikazana na Sl. 6–8, može se primijetiti šest jasno vidljivih slojeva:

- donji zaštitni sloj,
- sloj hladne vode,
- granični sloj
- sloj tople vode,
- gornji zaštitni sloj i
- sloj dušika.



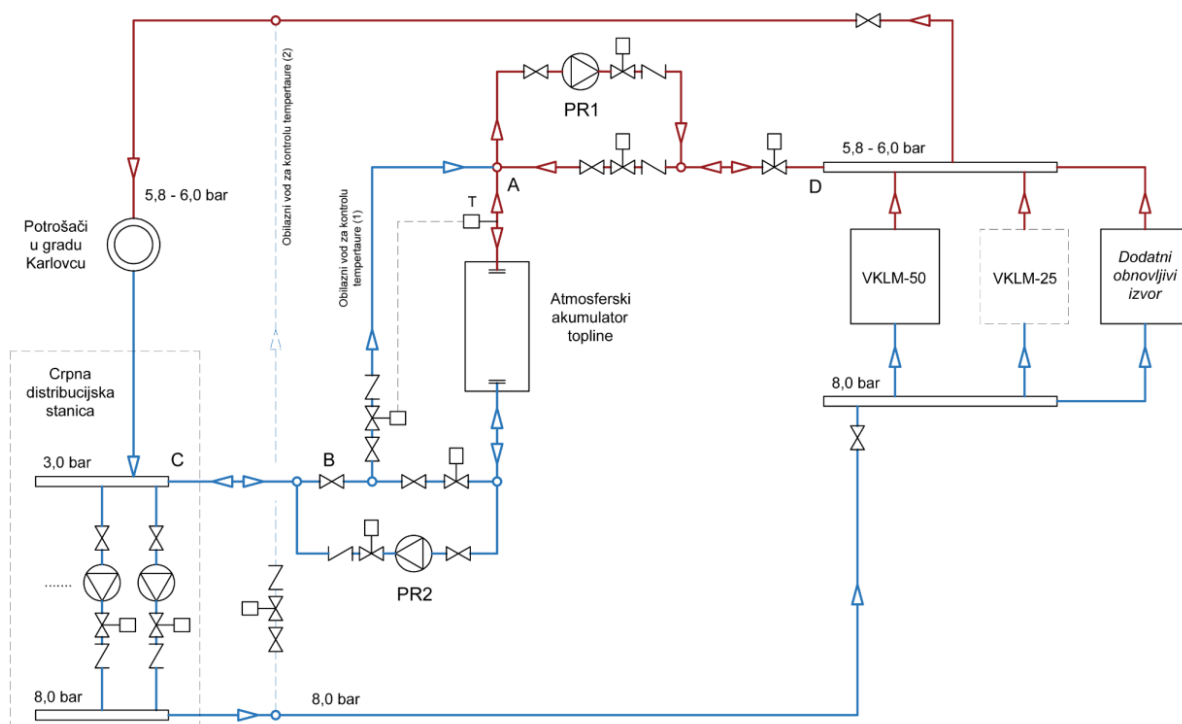
Sl. 6–8 Pojednostavljena shema akumulatora topline

Primarna funkcija donjeg zaštitnog sloja je sprječavanje prelaza topline konvekcijom prema dnu spremnika. Iznad zaštitnog sloja, smješten je donji difuzor koji omogućuje vodi da se ravnomjerno rasporedi unutar akumulatora topline bez prevelikog miješanja po vertikalnoj osi. Granični sloj dijeli sloj hladne vode i sloj tople vode. Između sloja tople vode i gornjeg zaštitnog sloja nalazi se gornji difuzor koji, kao i donji difuzor, omogućava ravnomjernu horizontalnu distribuciju vode unutar akumulatora topline bez prevelikog miješanja u vertikalnom smjeru. Gornji zaštitni sloj ima sličnu ulogu kao i donji zaštitni sloj, djelujući kao toplinski izolator prema sloju dušika na vrhu akumulatora topline. Funkcija sloja dušika je sprječavanje otapanja/prodiranja kisika iz okolnog zraka u vodu koja se nalazi u akumulatoru. Naime, prodor kisika u sustav grijanja ima izrazito nepovoljan utjecaj na cijeli sustav ponajviše zbog izazivanja korozije pa je uobičajeno kod ovakvih tipova akumulatora dodavati paru iznad gornje vodne linije i na taj način sprječavati prodor kisika.

Osnovni princip rada akumulatora

Princip rada akumulatora topline podrazumijeva dva potpuno odvojena režima rada. Prilikom punjenja, akumulator se ponaša kao potrošač toplinske energije zbog čega i postojeće i nove proizvodne jedinice u režimu punjenja akumulatora moraju proizvoditi povećanu količinu toplinske energije. S druge strane, u režimu pražnjenja akumulatora, isti se ponaša kao izvor topline (dodatna proizvodna jedinica u sistemu). Da bi se ovakav dvostruki režim rada akumulatora mogao sprovesti u praksi, akumulator topline obavezno mora biti povezan u sustav paralelno s proizvodnim jedinicama koje ga opskrbljuju toplinskom energijom, odnosno čiji rad u režimu pražnjenja supstituira.

U režimu punjenja akumulatora, mrežna voda se zagrijava u nekoj od novih proizvodnih jedinica te se jednim djelom šalje prema potrošačima (prema CTS-u), dok se dio odvaja (točka D) i vodi prema akumulatoru. Istovremeno, identična količina vode istiskuje se iz akumulatora te se miješa s povratnom mrežnom vodom iz CTS-a u usisnom kolektoru Crpne distribucijske stanice (točka C). Time se zatvara masena bilanca sustava pa potrošači spojeni na CTS neće osjetiti razliku u radu sustava sa ili bez akumulatora topline. Naime, protok mrežne vode prema potrošačima spojenim na CTS ne mijenja se u zavisnosti od angažmana akumulatora topline. Situacija je vrlo slična i kod režima pražnjenja akumulatora, odnosno u slučaju kada akumulator topline ima funkciju dodatnog izvora toplinske energije. U tom slučaju, povratna (hladna) mrežna voda iz CTS-a se na usisnom kolektoru Crpne distribucijske stanice dijeli pa se dio vodi preko pumpi prema proizvodnim jedinicama (npr. novi kotao), a dio prema akumulatoru topline. U akumulator topline dovedena hladna mrežna voda istiskuje toplu vodu iz akumulatora, a ona se miješa s vodom zagrijanom u proizvodnim jedinicama i kao takva se vodi prema krajnjim potrošačima, prema CTS-u. Na ovaj način se također zatvara masena bilanca pa je protok polazne vode prema CTS-u identičan protoku povratne vode iz CTS-a. Kao i u slučaju punjenja akumulatora krajnji korisnici neće osjetiti razliku u radu sustava sa ili bez akumulatora topline.



Sl. 6–9 Shema spajanja akumulatora topline na postojeći sustav

6.2.2. Analiza raspoloživog potencijala za skladištenje toplinske energije

Raspoloživ potencijal za skladištenje toplinske energije javlja se od viškova proizvedene toplinske energije iz obnovljivih izvora energije, odnosno u periodima kada je proizvodnja iz odabranih izvora veća od stvarnih potreba sustava. Ta razdoblja teoretski se javljaju u sljedećim slučajevima: kada kotao zbog tehničkih ograničenja nije moguće trenutno

isključiti; kada solarni kolektori proizvode toplinu tijekom intenzivnog sunčevog zračenja uz smanjene potrebe potrošača; kada geotermalni izvori kontinuirano proizvode toplinu neovisno o trenutnoj potražnji, kada električni kotao ili dizalice topline rade u razdobljima povoljne cijene električne energije, dok je toplinska potrošnja niska.

Pretpostavka kod analiziranja raspoloživog potencijala za skladištenje toplinske energije je da postoje izvori toplinske energije čija će se optimalna kombinacija utvrditi u poglavlju 10. Ti će izvori uvijek proizvoditi zadanu količinu toplinske energije, a zbog njihove ograničene fleksibilnosti u prilagodbi trenutnoj potrošnji, u pojedinim će se razdobljima javljati viškovi koje će biti potrebno skladištiti kako bi se toplinska energija maksimalno iskoristila, a sustav optimizirao s tehničkog i ekonomskog stajališta.

Za opravdanost ulaganja u akumulator topline, vrsta samih proizvodnih jedinica nije bitna, već je bitno da se usporednom analizom prikaže razlika u dobiti u radu sustava sa i bez akumulatora topline. To se prikazalo u ranije spomenutoj Studiji iz veljače 2025. godine, a rezultati analize pokazuju da se korištenjem akumulatora topline ostvaruje bolja iskoristivost izvora topline, smanjenje broja startova i oscilacija kotlova te preusmjeravanje proizvodnje toplinske energije u razdoblja povoljnijih tržišnih uvjeta.

U financijskom smislu, prosječna ušteda zbog korištenja akumulatora topline odnosi se na uštedu u trošku goriva za proizvodnju toplinske energije, a iznosi oko 500.000 EUR godišnje. Ekonomska analiza prikazala je da je ulaganje u akumulator topline apsolutno opravdano te će on biti uključen u optimalnu kombinaciju tehnologija, a detaljnije analize sustava sa i bez akumulatora bit će prikazane u poglavlju 10.

6.2.3. Analiza veličine akumulatora topline

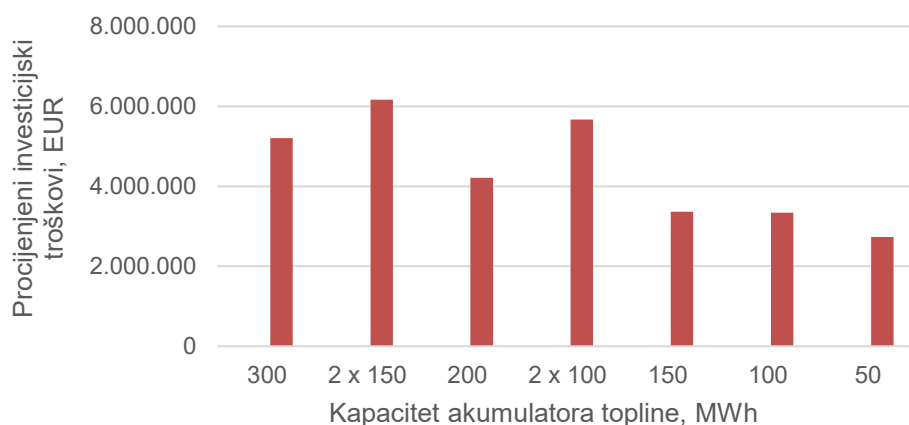
Veličina, odnosno kapacitet akumulatora, mora biti u skladu sa stvarnim potrebama sustava, odnosno treba težiti maksimalnoj iskoristivosti njegovih kapaciteta. Utvrđivanje optimalne veličine akumulatora topline temelji se na ekonomskoj optimizaciji. Akumulator topline većeg kapaciteta, sa stanovišta rada sustava, bolji od akumulatora topline manjeg kapaciteta te treba težiti ugradnji akumulatora topline što je moguće većeg kapaciteta, ali uz uvažavanje tehničkih ograničenja, odnosno uz uvažavanje ekonomske isplativosti njegove ugradnje.

Pitanje je da li povećane dimenzije (kapaciteta) akumulatora opravdavaju potrebna povećana investicijska ulaganja kako bi se takav veći akumulator topline i sagradio.

U ranije spomenutoj Studiji isplativosti, analizirane su različite varijante akumulatora od 50 do 300 MWh pri čemu se kao optimalni kompromis između tehničkih i ekonomskih zahtjeva sustava pokazala veličina akumulatora od 150 MWh. Dimenzije takvog spremnika su promjer 15 metara te visina 25 metara, a nazivna snaga, odnosno brzina punjenja/pražnjenja iznosi 30 MW (vrijednosti su bazirane na temperaturnom režimu 90/55°C).

6.2.5. Procjena ulaganja

Investicijski troškovi izgradnje akumulatora topline prikazani su grafički na Sl. 6–11. Sve analizirane varijante uključuju troškove uklanjanja postojećih spremnika za mazut (plašt, podnice, krov), demontaže tankvane te uklanjanja opreme mazutne stanice. Iz prikaza je vidljivo da je specifični trošak manjih akumulatora (izražen po jedinici kapaciteta) viši u usporedbi s većim akumulatorima, budući da veći sustavi omogućuju povoljnije omjere troškova po jedinici pohranjene energije.



Sl. 6–11 Investicijski troškovi izgradnje akumulatora topline

Detaljna procjena ulaganja prikazana je u poglavlju Investicijski troškovi, Tab. 10-3.

6.2.6. Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi

U Hrvatskoj postoji akumulator topline i to u sklopu Pogona TE-TO Zagreb. Pušten je u rad prosincu 2015. godine, a izveden je kao čelični spremnik promjera 24 m i visine plašta u rasponu od 47,5 do 50,12 m. Kapacitet akumulatora iznosi 750 MWh, a nazivna snaga punjenja/pražnjenja iznosi 150 MW pri razlici temperature ulazne i izlazne vode do 40 °C.



Sl. 6–12 Akumulator topline na lokaciji Pogona TE-TO Zagreb

U sklopu EL-TO Zagreb izgrađen je akumulator topline kapaciteta 1.000 MWh i toplinske snage 150 MW, promjera 30 m i visine 45 m.



Sl. 6–13 Akumulator topline na lokaciji EL-TE Zagreb

Jedan od najvećih primjera akumulatora topline u Europi nalazi se u Berlinu pod nazivom Vattenfall Heat Storage Reuter West. Riječ je o atmosferskom akumulatoru topline cilindričnog oblika, kapaciteta oko 2.000 MWh, s nazivnom snagom punjenja i pražnjenja od 200 MW. Spremnik je visok 45 metara, promjera 43 metra, a njegova je primarna namjena pohrana toplinske energije proizvedene u kogeneracijskim postrojenjima koja koriste biomasu i otpad, kao i skladištenje energije nastale kao višak tijekom proizvodnje iz obnovljivih izvora električne energije.

U sklopu elektrane Simmering u Beču napravljen je prvi visokotlačni akumulator topline kapaciteta 850 MWh i snage pražnjenja 150 MW. Toplinska energija pohranjuje se u dva cilindrična čelična spremnika, svaki visine 45 m. Temperaturni režim u sustavu iznosi 150/70°C.

Akumulator topline Avedøreværket u Kopenhagenu atmosferskog je tipa s kapacitetom od 900 MWh i snagom punjenja/pražnjenja od 330 MW. Spremnik visine 44 metra i promjera 26 metara služi za integraciju kogeneracijskog postrojenja na biomasu, omogućava iskorištavanje viškova topline te pruža podršku stabilnosti gradske mreže daljinskog grijanja.

Ovi primjeri odnose se na vanjske spremnike topline, dok će veliki sezonski spremnici topline biti opisani u potpoglavlju Toplinski spremnici kao dio poglavlja 6.4.

6.3. Korištenje geotermalne energije u CTS-u i kapaciteta distribuiranih spremnika toplinske energije

Geotermalna energija predstavlja obnovljiv, pouzdan i ugljično neutralan izvor energije s velikim potencijalom za dekarbonizaciju energetskeg sektora. Procjenjuje se da bi se korištenjem geotermalne energije moglo zadovoljiti do 25% potreba za grijanjem i hlađenjem te do 10% ukupne potrošnje električne energije u Europi.

6.3.1. Strateški i zakonodavni okvir istraživanja i eksploatacije geotermalnih voda za energetske svrhe na razini EU i RH

Razvoj geotermalne energije u EU snažno je potaknut nizom zakonodavnih instrumenata. U okviru Europskog zelenog plana (COM/2019/640), temeljnog dokumenta na razini EU za definiranje učinkovitog načina korištenja prirodnih resursa, geotermalna energija je prepoznata kao jedan od važnijih elemenata za ostvarenje klimatske neutralnosti do 2050. godine.

U Direktivi 2018/2001 o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora energije definiran je pojam geotermalne energije i osnovni uvjeti njezinog korištenja. Naglasak se stavlja na korištenje geotermalne energije koja stvara gotovo nultu emisiju štetnih plinova. Naime, korištenjem nekih oblika geotermalne energije može doći do ispuštanja stakleničkih plinova iz podzemnih tekućina i drugih geoloških formacija te EU ne podržava korištenje istih.

Krajem 2023. godine usvojen je Izvještaj o geotermalnoj energiji čija je uloga usmjeriti buduće zakonodavne inicijative Europske komisije i državama članicama pružiti politički okvir za razvoj geotermalne energije. Naglašava se da upotreba geotermalne energije doprinosi strateškim ciljevima EU smanjenjem energetske ovisnosti i uvoza fosilnih goriva. Europska komisija pozvana je da izradi sveobuhvatnu strategiju za dekarbonizaciju grijanja i hlađenja popraćenu namjenskim europskim akcijskim planom za geotermalnu energiju s mjerama za olakšavanje provedbe geotermalnih projekata i ubrzavanje uvođenja geotermalne energije.

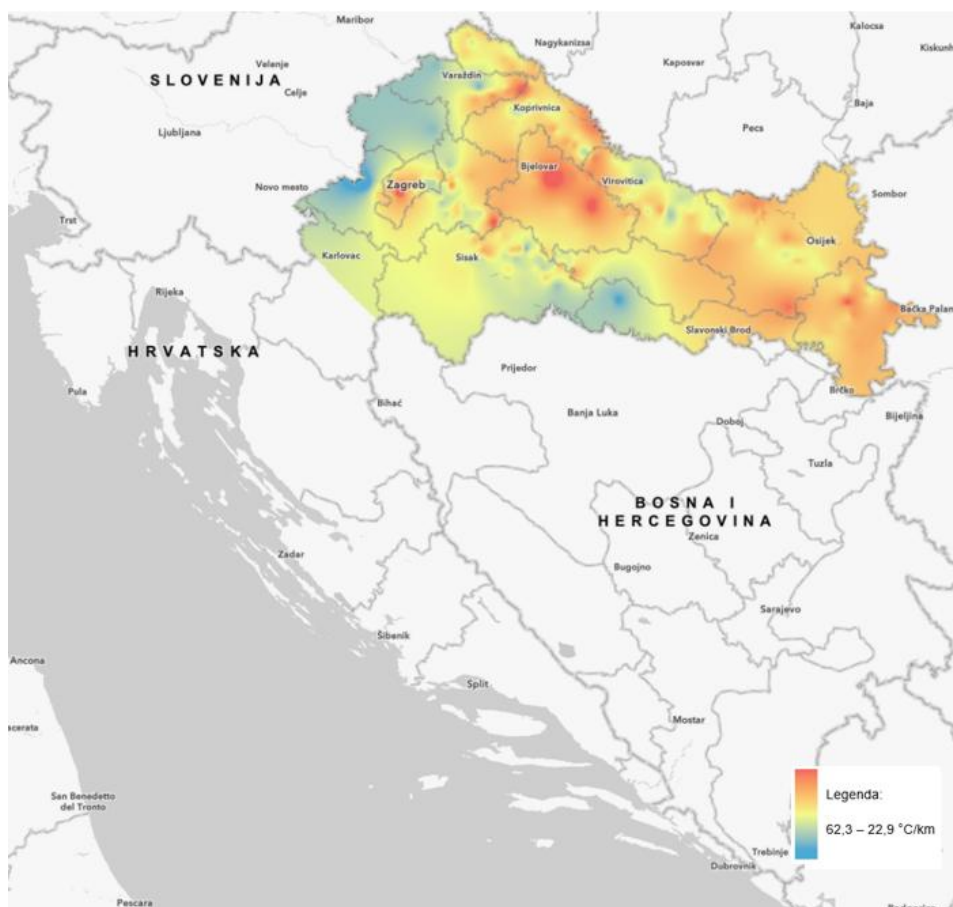
Kako bi se osigurao daljnji razvoj i korištenje geotermalne energije, Republika Hrvatska je donijela Plan razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske do 2030. godine. Navedeni plan je usklađen sa Strategijom energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu. Planom je definirano način istraživanja, razvoja i eksploatacije geotermalnog potencijala kao i tehnike i tehnologije, načini upotrebe od strane krajnjeg korisnika te usmjeravanje energetskeg razvoja RH u smjeru korištenja obnovljivih izvora energije.

Sukladno Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu (NN 25/20) te Strategiji prostornog razvoja Republike Hrvatske (NN 106/17), potrebno je poticati proizvodnju električne energije kod višenamjenskog korištenja geotermalne energije te iskorištavanje geotermalne energije za grijanje prostora, pripremu potrošne tople vode, poljoprivrednu proizvodnju, turističko-rekreacijske sadržaje i sl.

Sve aktivnosti koje se izvode za potrebe istraživanja i eksploatacije geotermalnih voda u energetske svrhe potrebno je provoditi temeljem Zakona o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN 52/18, 52/19 i 30/21). Prema navedenom zakonu, radovi na istraživanju geotermalnih voda radi utvrđivanja rezervi geotermalnih voda mogu se izvoditi isključivo na temelju dozvole za istraživanje geotermalnih voda koja traje maksimalno pet godina. Radovi na eksploataciji geotermalnih voda mogu se izvoditi isključivo na temelju dozvole za pridobivanje geotermalnih voda i ugovora o eksploataciji geotermalnih voda s najdužim trajanjem od 25 godina.

6.3.2. Geotermalni potencijal i prostorni aspekti

Geotermalni potencijal RH ispitivan je u drugoj polovici 20. stoljeća, a za potrebe istraživanja i eksploatacije nafte i plina. Kontinentalna dio Hrvatske, koji pripada panonskom bazenu, promatra se kao geotermalna regija budući da prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta iznosi $49\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ što je oko 60% više od prosječnog europskog geotermalnog gradijenta. Primorska Hrvatska ima značajno manji geotermalni gradijent čija prosječna vrijednost iznosi $18\text{ }^{\circ}\text{C/km}$. U nastavku je prikazana karta geotermalnog gradijenta za područje kontinentalne Hrvatske.⁸



Sl. 6–14 Karta geotermalnog potencijala

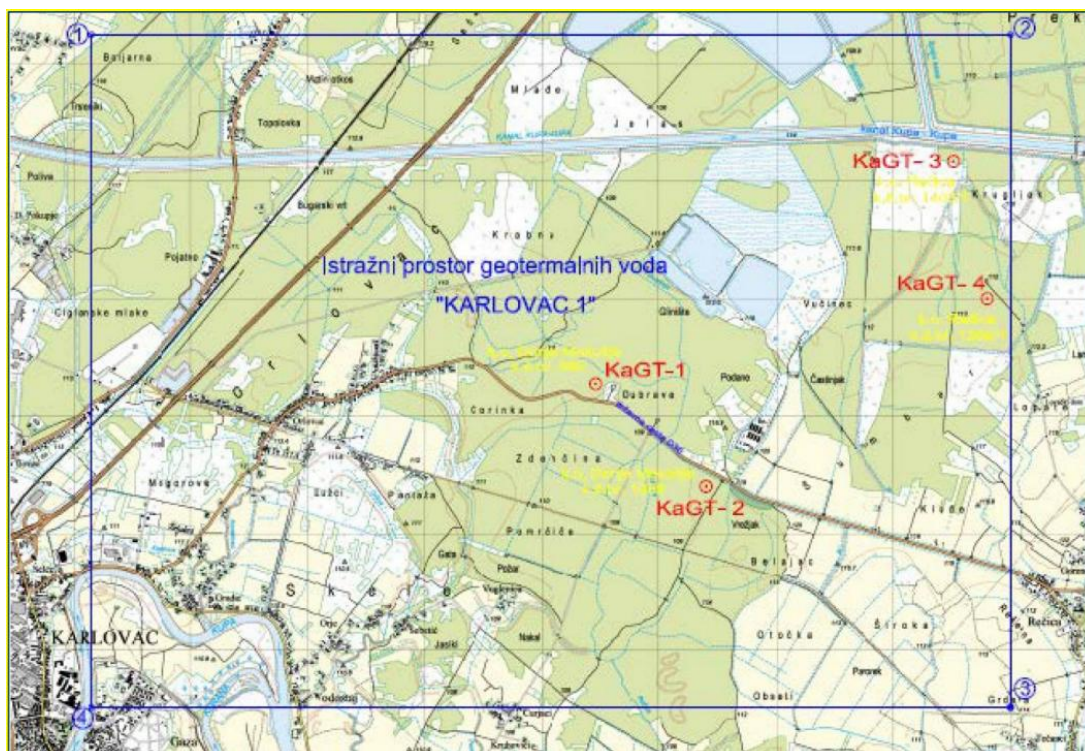
⁸<https://gis.azu.hr/portal/apps/experiencebuilder/experience/?draft=true&id=a96dcbc6ea1047d2bf63c0af5b1af84d>

Geotermalni potencijal na području grada Karlovca

Na području grada Karlovca nalazi se potvrđeni geotermalni vodonosnik u karbonatnom kompleksu Rečica otkriven istražnim bušotinama Ka-2 i Ka-3 još 1983. i 1988. godine, a s temperaturom vode u bušotinama do 120 °C.

Geotermalno polje Karlovac prostire se na ukupnoj površini od 45 km², obuhvaća sjeveroistočni dio grada Karlovca te općinu Draganić, a prikazano je na Sl. 6–15. Ovlaštenik za istraživanje navedenog područja je tvrtka GeotermiKA d.o.o. koja je dozvolu za istraživanje geotermalnih voda ishodila u prosincu 2019. godine, a ista vrijedi do prosinca 2025. godine.

S geološkog aspekta, za istraživanje i eksploataciju najbolji je istočni rub područja. Na tom području karbonatni kompleks, koji unutar sebe sadrži toplu vodu, zaliježe duž dubokog progiba ispod pokrovnih klastičnih naslaga. Također, zbog tektonike područja, stijene su jako raspucane što bi trebalo omogućiti dovoljne količine tople vode za proizvodnju toplinske energije.



Sl. 6–15 Istražni prostor geotermalnih voda Karlovac 1

Geotermalna energija se kao potencijalni novi izvor toplinske energije spominje u projektu GEO4KA. Projekt je u okviru programa Horizon 2020 iz inicijative European City Facility (EUCF) te ga provodi Grad Karlovac. Za projekt je trenutno izrađena *Studija izvedivosti s analizom troškova i koristi*. Važno je naglasiti da projekt razvoja vodi Grad Karlovac u suradnji s tvrtkom Geotermika d.o.o., dok Gradska toplana nije nositelj ovog projekta pa daljnja realizacija ovisi o drugim sudionicima i njihovim investicijskim odlukama.

Projekt je podijeljen u dvije faze:

- FAZA 1 – obuhvaća izgradnju geotermalnih bušotina 1 (istraživačko-eksploatacijske i utisne bušotine, odnosno KaGT1 i KaGT2 prikazane na Sl. 6–15), izgradnju spojnog vrelovoda, geotermalne elektrane snage 10 MW i kontejnerske elektrane snage 2 MW,
- FAZA 2 – obuhvaća izgradnju geotermalnih bušotina 2 (istraživačko-eksploatacijskih i utisne bušotine, odnosno KaGT3 i KaGT4 prikazane na Sl. 6–15) i izgradnju geotermalne elektrane snage 10 MW.

Pretpostavljena proizvodnost geotermalne bušotine u fazi 1 procjenjuje se na kapacitet proizvodnje geotermalne vode do 6.000 m³ dnevno, a temperature 120 °C. Navedena količina geotermalne vode trebala bi omogućiti proizvodnju 40 GWh toplinske i 8 GWh električne energije.

Predviđeno je da se Faza 2 provodi u dijelu istražnog prostora na kojem se ležišta stijena nalaze na većim dubinama s vodom temperature od 160 do 180 °C. Pretpostavljena proizvodnost geotermalne bušotine u fazi 2 procjenjuje se na kapacitet proizvodnje geotermalne vode do 6.000 m³ dnevno, a isti će biti dovoljan za proizvodnju 80 GWh električne energije.

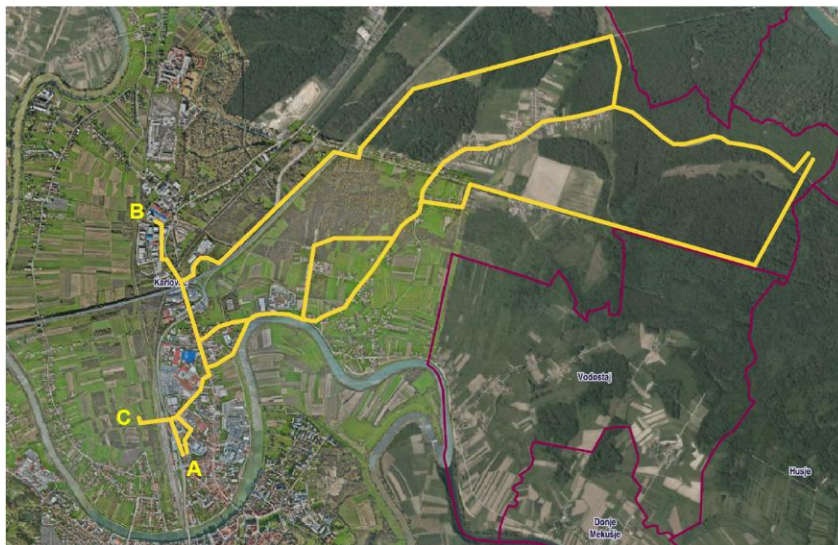
Prostorni aspekti

Smještaj geotermalne elektrane za proizvodnju toplinske energije te elektrane na organski Rankineov ciklus (ORC) za proizvodnju električne energije predviđen je na lokaciji bušotine.

Sukladno 22. članku važećeg Generalnog urbanističkog plana (GUP⁹, listopad 2024.), istražni prostor geotermalnih voda Karlovac-1 te površina planirana za istraživanje i eksploataciju geotermalne vode u energetske svrhe na području cijelog Grada (E2) smatra se prostorom od važnosti za državu i županiju.

U GUP-u su ucrtane varijante dobave toplinske energije s geotermalnih izvora do priključne stanice na trgu Petra Svačića (A), do lokacije BE-TO Karlovac (B) te do lokacije nove planirane toplane (C), a prikazane su na Sl. 6–16. Ukupna duljina prikazanih varijanti cjevovoda iznosi 21.165 metara, a stvarno potrebna duljina spojnog cjevovoda iznosi oko 10 km.

⁹ „Glasnik“ Grada Karlovca br. 17/07,06/11, 08/14, 15/19, 17/24 i 21/24



Sl. 6–16 Varijante dobave toplinske energije s geotermalnog izvora

Trenutni status projekta

Za potrebe projekta izrađena je *Studija izvedivosti s analizom troškova i koristi*, kojom su procijenjeni tehnički i ekonomski aspekti realizacije. U okviru pripremnih radova uređen je teren i pripremljen bušotinski radni prostor, uključujući osnovne infrastrukturne zahvate i osiguranje prostora za buduće postrojenje.

Unatoč dovršenim pripremama, **projekt se trenutno nalazi u fazi zastoja zbog nedostatka financijskih sredstava** što onemogućuje nastavak radova i prelazak u fazu izgradnje.

6.3.3. Pregled tehnologija za iskorištavanje geotermalne energije

Eksploatacija geotermalne vode u energetske svrhe moguća je nakon istražnog razdoblja, a na temelju dozvole za pridobivanje geotermalnih voda i ugovora o eksploataciji geotermalnih voda.

Glavne aktivnosti u eksploatacijskom razdoblju općenito ovise o načinu korištenja geotermalnog potencijala te o procjeni energije akumulirane u ležištima. Aktivnosti obuhvaćaju izradu eksploatacijskih geotermalnih bušotina (od kojih je jedna eksploatacijsko/utisna), izgradnju nadzemnih energetskih objekata i postrojenja te izradu potrebne površinske infrastrukture.

Energija sadržana u geotermalnom fluidu može se iskoristiti u svrhu proizvodnje samo toplinske energije ili za kombiniranu proizvodnju toplinske i električne energije. Način na koji će se energija koristiti ovisi o kapacitetu geotermalnog ležišta, odnosno o temperaturi i protoku geotermalnog fluida.

Prema podacima dobivenim od Naručitelja, temperatura u ležištu procijenjena je na 126 °C te spada u grupu srednje temperaturnih ležišta.

Uzimajući u obzir temperaturu ležišta, temperaturu koju zahtjeva centralni toplinski sustav te činjenicu da je prioritet osigurati toplinsku energiju za grijanje grada Karlovca, ova studija fokusira se na rješenje namijenjeno proizvodnji samo toplinske energije. U nastavku su dani tehnički opisi obje varijante sustava.

Proizvodnja toplinske energije

Geotermalni sustav za proizvodnju toplinske energije temelji se na korištenju toplinske energije pohranjene u unutrašnjosti Zemlje, a njegova osnovna infrastruktura obuhvaća geotermalne bušotine, izmjenjivače topline i distribucijski sustav. Geotermalne bušotine dijele se na:

- Eksploatacijske - crpe geotermalni fluid iz podzemnih ležišta;
- Utisne - omogućuju povrat ohlađenog fluida natrag u rezervoar kako bi se očuvao tlak i dugoročna održivost ležišta.

Eksplloatirani geotermalni fluid može biti voda ili mješavina vode i pare. Obično sadrži otopljene plinove poput CO₂, H₂S i NH₃ koji mogu uzrokovati brzu koroziju metalnih materijala. Također, količina otopljenih minerala Ca²⁺ i Mg²⁺ u geotermalnoj vodi može dovesti do ubrzanog taloženja kamenca te smanjenja protoka, odnosno začepjenja cjevovoda. S obzirom na kemijski sastav geotermalnog fluida, moguće su dvije izvedbe sustava:

- Direktna - ako geotermalni fluid nije visoko korozivan te nema visok sadržaj otopljenih minerala, može se transportirati spojnim vrelovodom do prijemne toplinske stanice.
- Indirektna - ako se pokaže da je geotermalni fluid visoko korozivan te postoji visoka koncentracija minerala, potrebno je optimizirati duljinu prijenosa fluida do površinskog pločastog izmjenjivača topline. On bi se nalazio na lokaciji bušotine te bi se pomoću njega toplina s geotermalnog fluida prenosila na sekundarni radni fluid koji cirkulira spojnim vrelovodom do prijemne toplinske stanice.

Kako bi toplinska energija dobivena ovim načinom bila priznata kao obnovljivi izvor energije, osnovni uvjet njenog korištenja je stvaranje gotovo nulte emisije štetnih plinova. S obzirom da se prilikom eksploatacije geotermalnog fluida iz njega kao plinska faza izdvaja CO₂, a zbog manjeg tlaka nego što je to u ležištu bušotine gdje je CO₂ otopljen u fluidu, potrebno je izgraditi postrojenje za utiskivanje CO₂.

Tehničke karakteristike

Tehničke karakteristike potencijalnog geotermalnog izvora topline definirani su na bazi dostupne dokumentacije, a prikazane su tablicom u nastavku.

Tab. 6-7 Tehničke karakteristike geotermalnog izvora (proizvodnja toplinske energije)

Stavka	Iznos
Nominalna toplinska snaga	10 MW
Raspon snaga	0 – 100 %
Maksimalna temperatura	115 °C

Stavka		Iznos
Stupanj djelovanja		> 95 %
Udio OIE u 2028. godini	Geotermalni izvor	35,53 %
	Geotermalni izvor + akumulator topline (150 MWh)	80,51 %

NAPOMENA: predmetne tehničke karakteristike odnose se na izmjenjivač voda/voda

Iz prethodne tablice vidljivo je da se izgradnjom geotermalnog postrojenja snage 10 MW može postići udio od 35,53% obnovljivih izvora energije u ukupnom sustavu u 2028. godini. Dodavanjem akumulatora topline kapaciteta 150 MWh udio raste na 80,51 % te se zadovoljava uvjet od 50 % obnovljivih izvora energije. Razlog tome leži u činjenici da geotermalno postrojenje radi i kad nema potrebe za toplinskom energijom, tada se ta energija sprema u akumulator topline. U provedenom proračunu tržišna cijena geotermalne energije nije uzeta u obzir, već je naglasak stavljen isključivo na procjenu potencijalnog doprinosa geotermalnog postrojenja povećanju udjela obnovljivih izvora energije. Određivanje konkurentne cijene te razmatranje mogućnosti sufinanciranja projekta detaljno će biti obrađeno u poglavlju 10.

Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije

Kombinirana proizvodnja toplinske i električne energije korištenjem geotermalnog fluida temelji se na istodobnom radu dvaju termodinamički odvojenih sustava, toplinskog i električnog, pri čemu se izvedivost ovog koncepta određuje dostupnim kapacitetom geotermalnog ležišta, odnosno njegovim protokom i temperaturnim potencijalom.

U ovoj varijanti proizvodnja toplinske energije istovjetna je prethodnom opisanom poglavlju.

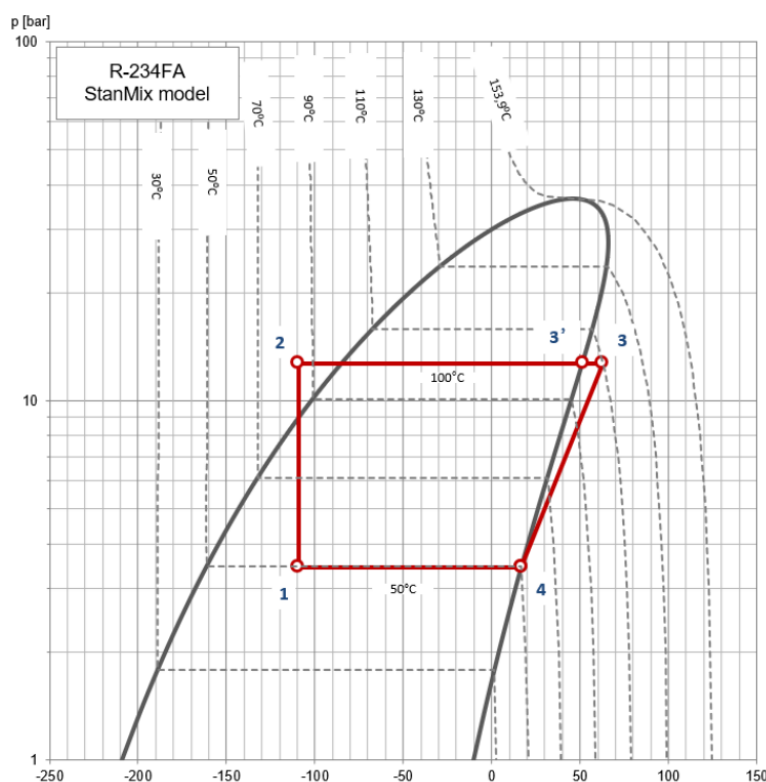
Za proizvodnju električne energije iz geotermalne energije moguće je koristiti jedan od navedenih procesa, ovisno o temperaturi u ležištu:

- **Direktan proces** – pogodan za visoko temperaturna ležišta ($> 220\text{ }^{\circ}\text{C}$). Za pogon lopatica turbine u procesu proizvodnje električne energije koristi se suha para iz geotermalnog izvora. Nakon prolaska kroz turbinu, para se hladi i direktno vraća u geotermalni izvor putem injekcijskih bušotina.
- **Flash proces** – pogodan za visoko temperaturna ležišta ($> 180\text{ }^{\circ}\text{C}$). Koristi se geotermalni fluid temperature više od $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ koji se iz dubokih ležišta izvlači na površinu. Zbog naglog pada tlaka prilikom izlaska iz ležišta, dio fluida trenutno isparava (tzv. flash isparavanje). Nastala para se odvaja u separatoru i koristi za pokretanje lopatica turbine koje pogone generator čime se proizvodi električna energija. Nakon prolaska kroz turbinu, para se hladi u kondenzatoru, prelazi u tekuće agregatno stanje te se injekcijskim bušotinama vraća u geotermalni izvor.
- **Binarni proces** ($100 - 200^{\circ}\text{C}$) – pogodan za srednje temperaturna ležišta. Zbog niže temperature geotermalnog fluida, on ne može biti radni medij u procesu proizvodnje električne energije već pomoću izmjenjivača topline (isparivača) predaje toplinsku energiju sekundarnom mediju. Kao sekundarni medij koriste se organski spojevi s nižim temperaturama vrelišta. Taj proces proizvodnje električne energije naziva se Organski Rankineov ciklus i predstavlja varijaciju Rankineovog ciklusa.

Ukoliko raspoloživi protok i temperaturni režim fluida omogućuju opskrbu centralnog toplinskog sustava uz zadržavanje dovoljne količine korisne toplinske energije za ORC sustav, tada se može implementirati kombinirani sustav. Međutim, u slučaju ograničenog kapaciteta ležišta, prioritet se daje toplinskoj opskrbi, dok se mogućnost proizvodnje električne energije razmatra tek nakon zadovoljenja toplinskih potreba.

Organski Rankineov ciklus

S obzirom da je procjena temperature u ležištu 126 °C, što spada u srednje temperaturno ležište, u ovom slučaju za proizvodnju električne energije moguće je koristiti organski Rankineov ciklus (ORC). On je varijacija Rankineovog ciklusa koji predstavlja termodinamički proces koji koristi organske radne fluide umjesto vode kako bi omogućio iskorištavanje toplinskih izvora niskih temperatura za proizvodnju električne energije. Ovo svojstvo čini ga iznimno pogodnim za primjene u sustavima baziranim na geotermalnoj energiji, energiji iz otpadne topline iz industrijskih procesa te energiji iz solarnih sustava niske temperature.



Sl. 6–17 p-h dijagram organskog Rankineovog ciklusa

Standardni i organski Rankineov ciklus načelno funkcioniraju na istom principu pri čemu se svaki radni ciklus odvija kroz četiri osnovne faze:

- Prva faza – radni fluid se komprimira pomoću pumpe na tlak koji odgovara tlaku isparivača. Teorijski, ova faza se opisuje kao izentropska kompresija, no u stvarnim uvjetima dolazi do neravnotežnog procesa, što uzrokuje porast entropije. U praksi to znači da je potrebna dodatna energija kako bi se nadoknadili gubici uzrokovani neučinkovitostima sustava. U ovoj fazi radni fluid, koji se obično nalazi u obliku

pothlađene kapljevine, dobiva tlak potreban za ulazak u isparivač, čime se osigurava kontinuirani rad ciklusa.

- Druga faza - odvija se u isparivaču gdje se radni fluid zagrijava od stanja pothlađene kapljevine do stanja suhozasićene pare. Ovaj prijelaz se odvija izobarno, odnosno pri konstantnoj vrijednosti tlaka. Toplinska energija potrebna za isparavanje dolazi od geotermalnog fluida, odnosno prijemne toplinske stanice. Ova faza omogućuje pretvorbu toplinske energije u oblik prikladan za proizvodnju mehaničkog rada.
- Treća faza - para organskog fluida ekspandira kroz turbinu pri čemu se oslobađa mehanički rad koji se koristi za pokretanje generatora električne energije. Ekspanzija se u teoriji opisuje kao izentropska, no u praksi je to neravnotežan proces koji rezultira prirastom entropije.
- Četvrta faza - para organskog fluida se hladi i kondenzira pri konstantnom tlaku do stanja vrele kapljevine. Povrat radnog fluida u tekuće stanje omogućuje zatvaranje ciklusa, nakon čega je kapljevina spremna za ponovni ulazak u pumpu. U ovoj se fazi oslobađa toplina, ali u nedovoljnoj količini i u preniskom temperaturnom režimu za upotrebu u centralnom toplinskom sustavu. Najčešće se ta toplina predaje okolišu.

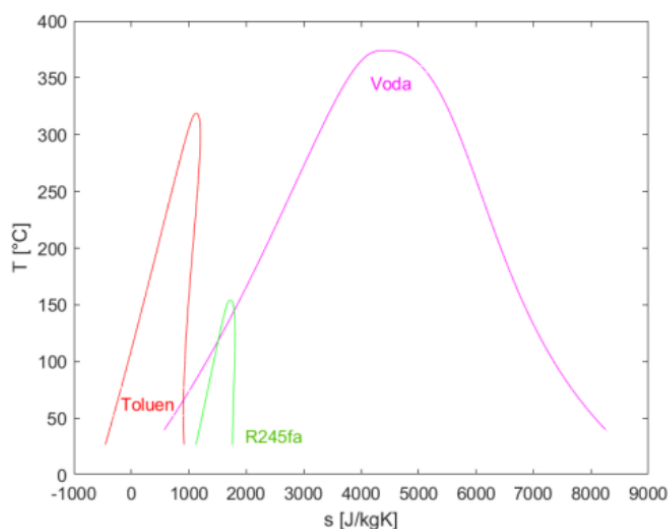
Radni fluid u organskom Rankineovom ciklusu

Odabir radnog fluida u ORC utječe na termodinamičke performanse sustava te na dizajn pojedinih komponenti. Radne fluide po njihovim termodinamičkim svojstvima možemo klasificirati u tri skupine:

- Mokri fluidi, poput vode i propana, imaju krivulju zasićenja s negativnim nagibom u T-s dijagramu. To znači da nakon ekspanzije u turbini mogu prijeći u dvofazno stanje, formirajući smjesu pare i tekućine. Međutim, ako se prije ekspanzije fluid dovoljno pregrije iznad zasićenja, može ostati u plinovitoj fazi tijekom cijelog procesa ekspanzije, čime se izbjegava kondenzacija i smanjuje rizik od erozije turbinskih lopatica.
- Izentropski fluidi su karakterizirani gotovo okomitom krivuljom zasićenja u T-s dijagramu. Tijekom ekspanzije u turbini zadržavaju približno konstantnu entropiju te isto agregatno stanje s kojim su ušli u turbinu.
- Suhi fluidi, poput izobutana, R245fa, R236fa i toluena, karakterizirani su krivuljom zasićenja s pozitivnim nagibom u T-s dijagramu što znači da tijekom ekspanzije u turbini ostaju u pregrijanom plinovitom stanju.

Krivulje zasićenja vode te dva organska fluida koji pripadaju u skupinu suhih fluida prikazane su na Sl. 6–18. Na slici je vidljiva razlika u promjeni entropije između krivulje zasićenja tekućine i krivulje zasićenja pare za vodu i organske radne fluide. U usporedbi s vodom, organski radni fluidi imaju znatno manju promjenu entropije u odnosu na vodu. To znači da je za prelazak organskog fluida iz tekuće u parnu fazu potrebno znatno manja količina toplinske energije u odnosu na vodu. Iz toga proizlazi da zbog nižih vrijednosti entalpije isparavanja, organski fluidi mogu isparavati pri znatno nižim temperaturama toplinskog izvora u odnosu na vodu, što ih čini pogodnima za sustave koji koriste niskotemperaturne izvore topline, poput geotermalne energije ili industrijskog otpadnog toplinskog toka. Prilikom konačnog izbora radnog fluida potrebno je uzeti u obzir ne samo

prirodu izvora topline, termodinamička svojstva te investicijske i operativne troškove, već i njegov utjecaj na okoliš. Posebno je važno odabrati fluide s niskim potencijalom globalnog zatopljenja (GWP – eng. Global Warming Potential) i bez štetnog utjecaja na ozonski omotač (ODP – eng. Ozone Depletion Potential). Time se osigurava usklađenost s ekološkim standardima i regulativom te se smanjuju negativni učinci na klimu i okoliš.



Sl. 6–18 Linije zasićenja

S obzirom da je priroda izvora topline u ovom slučaju takva da je pretpostavljena temperatura geotermalnog fluida 126 °C, izbor radnog fluida za ORC sustav ograničen je na one organske fluide koji imaju nisku temperaturu isparavanja. Osim toga, temperatura isparavanja radnog fluida pri potrebnom radnom tlaku mora biti niža od temperature geotermalnog fluida kako bi se omogućio prijenos topline. Tim uvjetima odgovaraju i najčešće se koriste radni fluide poput R245fa, R134a i n-pentana.

6.3.4. Procjena ulaganja u korištenje geotermalne energije

Vrsta i struktura troškova

Korištenje geotermalne energije u energetske svrhe zahtijeva značajna početna ulaganja, pri čemu su kapitalni troškovi (CAPEX) izrazito visoki u usporedbi s većinom drugih obnovljivih izvora energije, a osobitu težinu u ukupnoj investiciji imaju aktivnosti u ranim fazama projekta. Specifičnost ovakvih projekata je značajan investicijski rizik prilikom provođenja istraživanja zbog neizvjesnosti u pogledu kvalitete i kapaciteta samog ležišta.

Prema izvješću Međunarodne agencije za energiju¹⁰, ukupni investicijski troškovi mogu se podijeliti u tri glavne kategorije prema njihovoj ulozi u razvoju sustava:

- Troškovi povezani s bušenjem bušotina - najčešće iznose od 50 do 70% ukupne vrijednosti projekta, a obuhvaćaju izvođenje istražnih, proizvodnih i utisnih bušotina. Istražne bušotine, koje služe za karakterizaciju geotermalnog ležišta, nose najveći investicijski rizik jer postoji mogućnost nepovoljnih rezultata. Proizvodne bušotine

¹⁰ IEA: *The Future of Geothermal Energy - Analysis*, 2024.

osiguravaju crpljenje toplinske energije, dok utisne vraćaju iskorištenu tekućinu natrag u ležište radi očuvanja tlaka i dugoročne stabilnosti sustava.

- Izgradnja površinske infrastrukture – iznosi od 20 do 30% ukupne vrijednosti projekta, a obuhvaća sustave za pretvorbu energije, sustave izmjenjivača topline, pumpe i cjevovode. Dizajn i opremljenost površinskih postrojenja ovise o tehnološkoj opciji (proizvodnja električne energije, grijanje prostora, kombinirani sustavi) te o zahtjevima za regulaciju, sigurnost i učinkovitost.
- Pomoćni sustavi i usluge - čine preostalih 10 % do 20 % troškova, obuhvaćaju projektantske i konzultantske usluge, pribavljanje dozvola, priključke na električnu i/ili toplinsku mrežu kao i sustavi nadzora i upravljanja te pristupna infrastruktura.

Procjena ulaganja u konkretan projekt na geotermalnom polju Karlovac preuzeta je iz *Studije izvedivosti s analizom troškova i koristi*. U predmetnoj Studiji su cijene bazirane na 2020. godini te će današnje cijene u nedostatku bolje procjene biti prikazane sukladno službenoj stopi inflacije Državnog zavoda za statistiku. Službena stopa inflacije u ožujku 2025. godine u odnosu na siječanj 2020. godine iznosila je 28,9%.

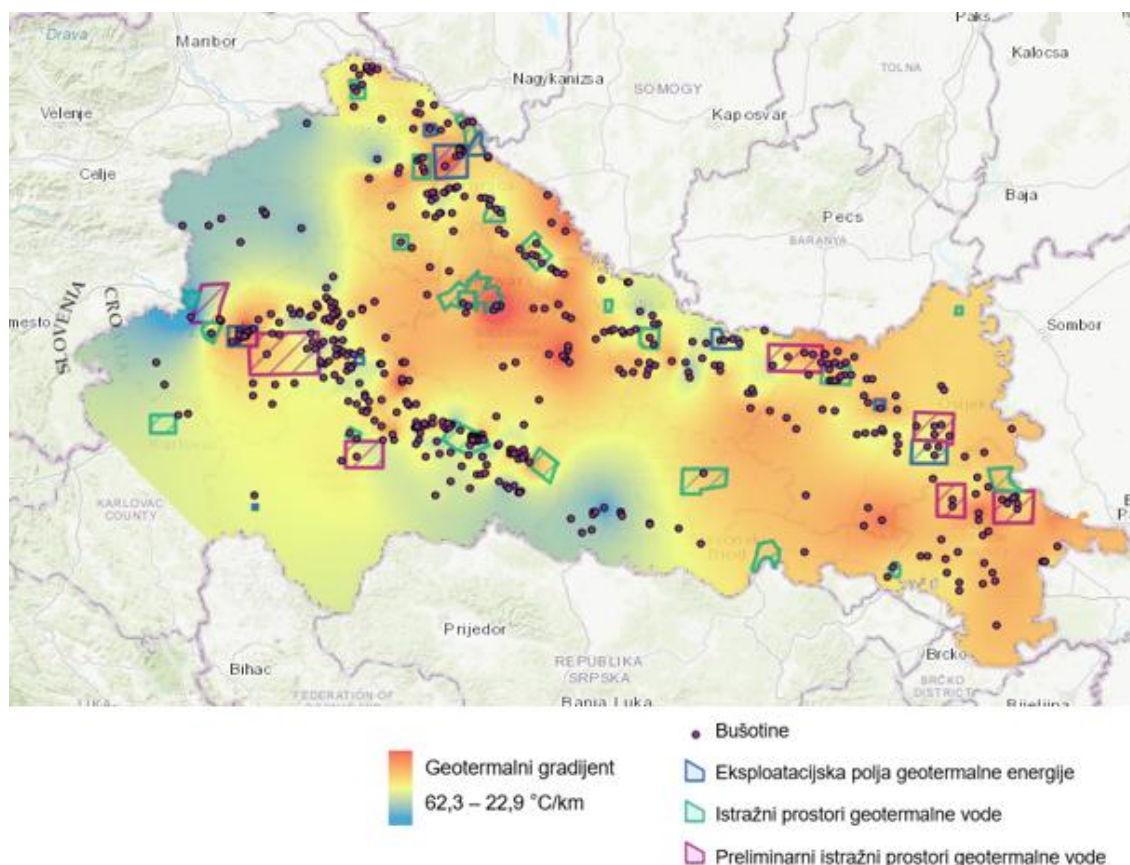
S obzirom da je naglasak ovog Plana na opskrbi toplinskom energijom, u daljnjim će se analizama gledati samo investicija za Fazi 1 koja je detaljno prikazana u poglavlju Investicijski troškovi, Tab. 10-5. Visina investicije za fazu 1 iznosi 37.737.129,32 EUR. Za fazu 2 predviđeni su troškovi u ukupnom iznosu od 46.678.069,68 EUR.

6.3.5. Status geotermalnih projekata

Status geotermalnih projekata u Hrvatskoj

Posljednjih godina, uz podršku Ministarstva gospodarstva i Agencije za ugljikovodike, intenziviraju se aktivnosti na istraživanju i korištenju geotermalnih izvora. Razvijaju se projekti kako u segmentu toplinarstva tako i za potrebe proizvodnje električne energije.

Trenutno u Hrvatskoj postoji 20 eksploatacijskih polja geotermalne energije. Od navedenog broja, šest polja nalazi se u fazi razvoja s ciljem proizvodnje električne energije, dok su preostala polja orijentirana primjenu u toplinarskom sektoru. Dodijeljene su 24 dozvole za istraživanje geotermalne energije, a projekti se nalaze u različitim fazama provedbe, od početnih istražnih aktivnosti do razvoja projektne dokumentacije i pripreme za eksploataciju.



Sl. 6–19 Karta bušotina, eksploatacijskih polja i istražnih prostora u RH

Upotreba geotermalne energije za grijanje cijelih gradova još uvijek nije zaživjela. Jedini primjer djelomične primjene u praksi je grad Topusko koji geotermalnom energijom, koju dobiva iz tri aktivne bušotine, grije lječilišne objekte, bazene i dio naselja, a u planu je daljnje proširenje i optimizacija sustava.

U okviru Nacionalnog plana oporavka i otpornosti (NPOO) predviđeno je ulaganje u iznosu od 50 milijuna EUR za istraživanje geotermalnih izvora u urbanim područjima u kontekstu centraliziranog grijanja. Geofizička snimanja terena i istražna bušenja predviđena su na lokacijama u šest gradova: Zaprešiću, Velikoj Gorici, Sisku, Osijeku, Vinkovcima i Vukovaru. Dobiveni rezultati bit će podloga za tehničku i ekonomsku procjenu isplativosti uvođenja geotermalne energije u sustave centraliziranog grijanja te će se time stvoriti preduvjeti za daljnji razvoj energetske učinkovitih i niskougličnih toplinskih rješenja u urbanim sredinama.

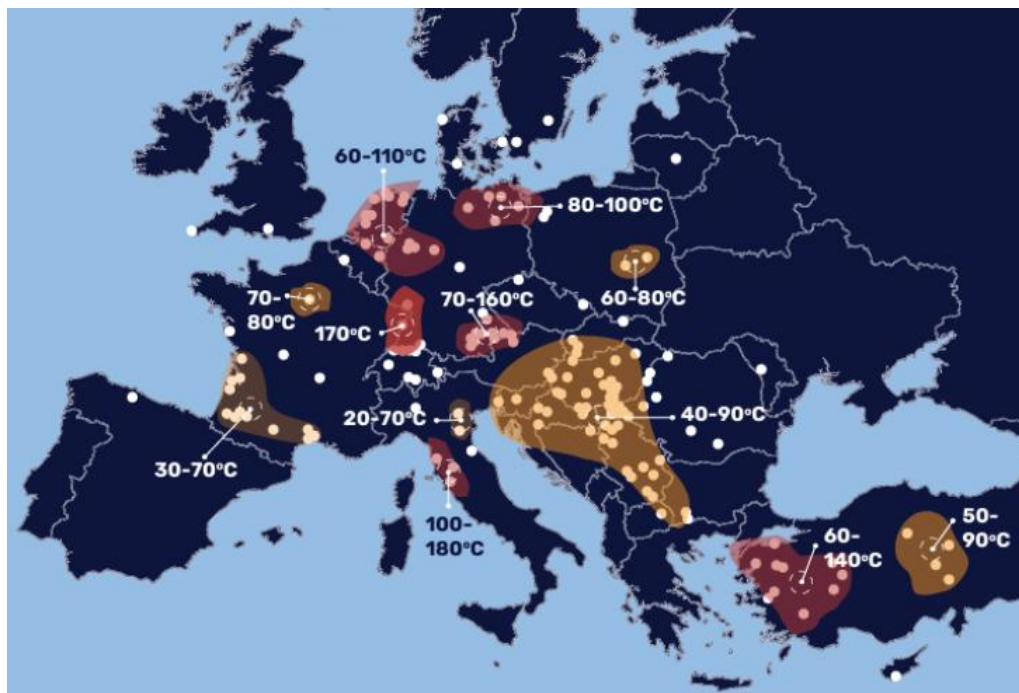
U kontekstu proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora, u Hrvatskoj je trenutačno izgrađeno samo jedno postrojenje - geotermalna elektrana Velika 1 u Cigleni kraj Bjelovara. Riječ je o kogeneracijskom ORC postrojenju ukupne instalirane električne snage 19 MW. Postrojenje je započelo s radom 2019. godine, a od veljače 2022. je izvan pogona zbog pravnih i vlasničkih sporova.

Od ostalih projekata, u najvišoj fazi razvoja je geotermalna elektrana Zagocha nedaleko Slatine. Planirana snaga buduće elektrane iznosi 20 MW, a početak njezinog rada najavljen

je najranije u 2028. godini. Također, u visokoj fazi razvoja su projekti GTE Babina Greda (15 MW) i GTE Legrad (19,9 MW).

Status geotermalnih projekata u Europi i svijetu

Sve veći broj gradova unutar Europe implementira geotermalne izvore u sustave centraliziranog grijanja, koristeći pritom različite tehničke koncepte i dubine eksploatacije, ovisno o geološkim uvjetima. Krajem 2023. godine u Europi je postojao 401 geotermalni sustav centralnog grijanja, odnosno 6 GW ukupno instaliranog geotermalnog kapaciteta u 29 zemalja.¹¹



Sl. 6–20 Karta glavnih geotermalnih ležišta za upotrebu u centralnim toplinskim sustavima¹²

U nastavku su navedeni neki primjeri europskih gradova koji su uspješno integrirali ili su u procesu integriranja geotermalne energije u svoje sustave centraliziranog grijanja.

- Island – globalni predvodnik u korištenju geotermalne energije kojom pokriva preko 90 % potreba za grijanjem kućanstava te 25 % ukupne proizvodnje električne energije. Sustavi uglavnom direktno koriste toplu podzemnu vodu iz bušotina na dubini do 500 do 2.000 metara. U 2022. godini instalirani kapacitet geotermalnih sustava centralnog grijanja iznosio je približno 2.500 MW.
- Pariz, Francuska - geotermalni sustav pariške regije je najnapredniji primjer integrirane upotrebe dubinskih podzemnih voda za grijanje u urbanom okruženju u Europi. Prostor leži na dva duboka vodonosnika smještena na dubini između 1.500 i 2.000 metara s temperaturama između 60 i 80 °C. Postoji pedesetak toplinskih mreža koje opskrbljuju više od 250.000 kućanstava. Zbog opasnosti od prekomjerne

¹¹ <https://www.thinkgeoenergy.com/egec-2023-geothermal-market-report-highlights-active-project-pipeline-in-europe/>

¹² Izvor: EGEN 2023 Geothermal Market Report

eksploatacije i hlađenja izvora, krenulo se s eksploatacijom geotermalnog fluida iz slojeva dubljih od 2.100 metara.

- Thisted, Danska – geotermalni sustav daljinskog grijanja u pogonu od 1984. godine, a sastoji se od jedne proizvodne i dvije utisne bušotine. Dubina ležišta, koje se sastoji od pješčenjaka, iznosi 1.150 - 1.250 metara, a temperatura ležišta iznosi otprilike 45 °C. Toplina iz geotermalnog fluida prenosi se na mrežu daljinskog grijanja pomoću dviju apsorpcijskih dizalica topline. Kao pogonski izvori za rad dizalica, osim geotermalne topline, koriste se i toplina iz postrojenja za spaljivanje otpada te iz kotla na biomasu (slamu).
- Szeged, Mađarska – geotermalni sustav grijanja je u pogonu od 2023. godine te je najveći geotermalni sustav za grijanje u EU. Opskrbljuje toplinskom energijom 28.000 kućanstava i preko 400 javnih zgrada. Voda temperature oko 90 °C nalazi se na dubini od 1.700 do 2.000 metara, a izgrađeno je 14 proizvodnih i 13 utisnih bušotina.

Dok Europa prednjači u primjeni geotermalne energije za grijanje urbanih područja, u većem dijelu svijeta geotermalni potencijal se koristi za proizvodnju električne energije.

U apsolutnim brojkama, Kina prednjači u korištenju geotermalne energije za potrebe grijanja. Tom energijom opskrbljuje preko 1,2 milijuna kućanstava u više od 70 gradova i 11 pokrajina.

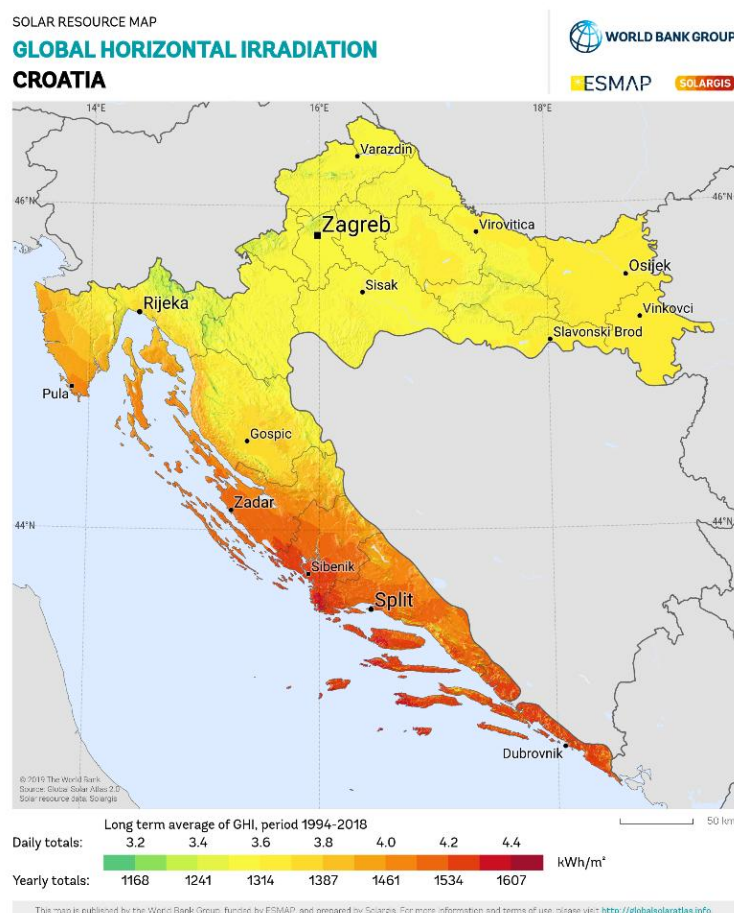
Prema dostupnim podacima za 2023. godinu, najveći proizvođači električne energije iz geotermalnih izvora na globalnoj razini su:

- Sjedinjene Američke Države - ukupno 3,7 GW instaliranog geotermalnog kapaciteta koji je raspoređen u zapadnim saveznm državama, s naglaskom na Kaliforniju i Nevadu.
- Indonezija - instalirani kapacitet od približno 2,8 GW,
- Filipini - instalirani geotermalni kapacitet od oko 1,9 GW.

6.4. Korištenje sunčeve energije za potrebe CTS-a i kapaciteta distribuiranih spremnika toplinske energije

Solarni toplinski sustavi predstavljaju održivo rješenje za zadovoljenje energetske potrebe u području grijanja i pripreme tople vode. Njihova raširenost neprekidno raste zbog niza prednosti koje pružaju, uključujući smanjenje emisija stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i dugoročne financijske uštede. Također, prilagodljive su različitim potrebama i uvjetima okoline te se zbog toga primjenjuju u širokom rasponu sektora, uključujući stambene, komercijalne i industrijske objekte, nudeći fleksibilnost u pogledu veličine i funkcionalnosti sustava. Njihova glavna uloga je iskoristiti besplatnu i obnovljivu energiju Sunca kako bi se proizvela toplinska energija potrebna za grijanje prostora ili zagrijavanje vode.

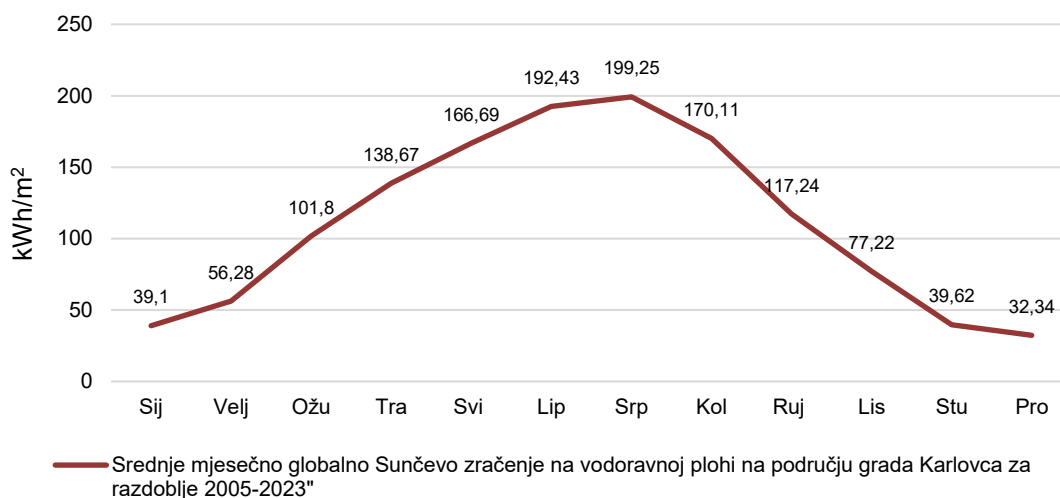
Prema podacima za razdoblje od 1994. do 2018. godine, srednje godišnje globalno Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi na području Karlovca i okolice iznosi 1.300 kWh/m². Takva vrijednost svrstava to područje u skupinu srednje povoljnih do povoljnih lokacija za korištenje Sunčeve energije u europskim okvirima.



Sl. 6–21 Srednje dnevno/godišnje globalno Sunčevo zračenje na vodoravnoj plohi¹³

¹³ Izvor: Global Solar Atlas

Mjesečne vrijednosti globalnog Sunčevog zračenja na vodoravnu plohu na području grada Karlovca prikazane su u nastavku.



Sl. 6–22 Srednje mjesečne vrijednosti globalnog Sunčevog zračenja na vodoravnu plohu na području grada Karlovca za razdoblje 2005-2023¹⁴

Najveće vrijednosti globalnog Sunčevog zračenja na vodoravnu plohu javljaju se u ljetnim mjesecima, dok se najveća potreba za toplinskom energijom javlja u zimskim mjesecima.

U nastavku će biti prikazane dostupne tehnologije za iskorištavanje sunčeve energije s tim da je naglasak potrebno staviti na činjenicu da **Gradska toplana proizvodi toplinsku energiju namijenjenu samo za grijanje, ne i za pripremu potrošne tople vode te u daljnjim planovima razvoja je nema namjeru vršiti**. Iz tog je razloga nužno promatrati sezonsku neuravnoteženost između proizvodnje i potražnje toplinske energije, a upotreba sunčeve energije za potrebe grijanja moguća je jedino uz korištenje sezonskog spremnika topline.

6.4.1. Analiza potencijalnog prostora za iskorištavanje sunčeve energije i prostorno planski aspekti

U važećem Generalnom urbanističkom planu (GUP¹⁵, listopad 2024.) nema predviđenog prostora za izgradnju polja solarnih kolektora te će daljnja analiza biti napravljena na način da će biti određena površina kolektora za određenu snagu, a točna lokacija solarnog polja razmatrat će se u daljnjim fazama projekta.

Ako dođe do realizacije projekta izgradnje solarne elektrane, pri odabiru lokacije glavni kriteriji bit će predviđena namjena zemljišta, ukupna površina, udaljenost od najbližeg mogućeg priključka na toplovodnu mrežu te vlasništvo, ali i cijena samog zemljišta. Također, ne smije se zanemariti utjecaj na okoliš, uključujući zaštitu prirodnih staništa, očuvanje bioraznolikosti kao i poštivanje svih važećih ekoloških propisa i standarda.

¹⁴ Izvor: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP

¹⁵ „Glasnik“ Grada Karlovca br. 17/07, 06/11, 08/14, 15/19, 17/24 i 21/24

6.4.2. Analiza dostupnih tehnologija za iskorištavanje sunčeve energije

Solarne toplane u sustavima daljinskog grijanja ne razlikuju se znatno od manjih solarnih toplinskih sustava koji se koriste u kućanstvima i industriji, no karakteriziraju ih viši temperaturni režimi te veći toplinski učin zbog čega se može javiti potreba za skladištenjem toplinske energije u toplinskim spremnicima.

Podjela solarnih toplinskih sustava vrši se na nekoliko kategorija, a temelji se na varijacijama osnovnih komponenti sustava kao što su njihova dimenzija, način proizvodnje toplinske energije, karakteristike toplinskog spremnika te pozicioniranje solarnih kolektora unutar mreže daljinskog grijanja.

Veličina postrojenja i priključenje na mrežu

U kontekstu korištenja solarnog toplinskog sustava, odnosno solarnog daljinskog grijanja, sustav je velik ako njegova toplinska snaga premašuje 350 kW što odgovara približno površini kolektora od 500 m².

Prema načinu spajanja solarnih kolektora na mrežu, sustavi mogu biti centralizirani i decentralizirani. Kod centraliziranih sustava solarni kolektori postavljaju se najčešće na tlu, a smještaju se u blizini postojeće toplovodne mreže te se proizvedena toplinska energija predaje korisnicima ili se skladišti u spremnicima. Kod decentraliziranih sustava solarni kolektori se postavljaju na više lokacija, a najčešće se radi o krovovima objekata. Proizvedena toplinska energija se u većoj koristi lokalno, a višak se može plasirati u mrežu.

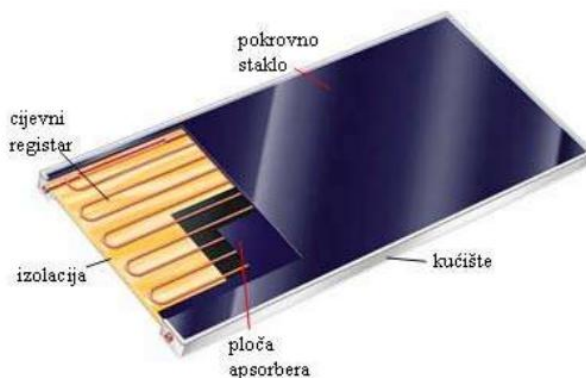
Solarni kolektori

Solarni kolektori su glavna komponenta solarnih toplinskih sustava. Oni primaju Sunčevo zračenje te ga pretvaraju u toplinsku energiju. Apsorbirano zračenje moguće je koristiti izravno ili pohraniti u toplinske spremnike. Učinkovitost kolektora ovisna je o kutu pod kojim se postavljaju te o samoj konstrukciji kolektora.

U nastavku će biti prikazane najvažnije karakteristike pločastih i vakumskih solarnih kolektora.

Pločasti solarni kolektori

Pločasti kolektori su najzastupljeniji tip kolektora, a osnovni dijelovi kolektora su apsorberska ploča, cijevni registar, pokrovno staklo, izolacija i kućište. Apsorberska ploča je premazana posebnim premazom koji apsorbira sunčevo zračenje. Tako prikupljena toplina se dalje provodi kroz materijal apsorberske ploče (debljine cca 0,3 - 0,5 mm) prema cijevnom registru i u konačnici predaje radnom fluidu koji protječe kroz cijevni registar.



Sl. 6–23 Pločasti kolektor

Cijevi su pričvršćene za apsorber bilo lemljenjem, laserskim ili ultrazvučnim zavarivanjem i ponekad lijepljenjem. Najviše se koriste tzv. selektivni premazi apsorbera koje karakterizira:

- visoki koeficijent apsorpcije za kratkovalno sunčevo zračenje ($\alpha = 0,9 - 0,96$) i
- niski koeficijent apsorpcije tj. emisije za dugovalno IC zračenje ($\alpha = \varepsilon = 0,06 - 0,2$) koje predstavlja toplinske gubitke kolektora.

Takva svojstva osiguravaju istovremeno značajnu apsorpciju sunčevog zračenja i bitno smanjenje toplinskih gubitaka zagrijane ploče apsorbera dugovalnim zračenjem u odnosu na premaze koji nisu selektivni (poput npr. obične crne boje).

Slične karakteristike i ulogu ima pokrovno staklo čiji je koeficijent propusnosti za kratkovalno sunčevo zračenje visok ($\tau = 0,9 - 0,95$), a za dugovalno vrlo nizak ($\tau < 0,02$). Osim smanjenja toplinskih gubitaka, staklo ima i važnu ulogu zaštiti kolektor od atmosferskih utjecaja. Radi dodatnog smanjenja toplinskih gubitaka, kolektor je izoliran sa stražnje i bočne strane. Za izolaciju se obično koriste mineralna vuna ili PU pjena debljine 30-70 mm pri čemu gubici kroz izolaciju iznose oko 5-10 % ukupnih gubitaka kolektora. Namijenjeni su za zagrijavanje tople vode temperature do 85 °C.

Vakuumske cijevni solarni kolektori

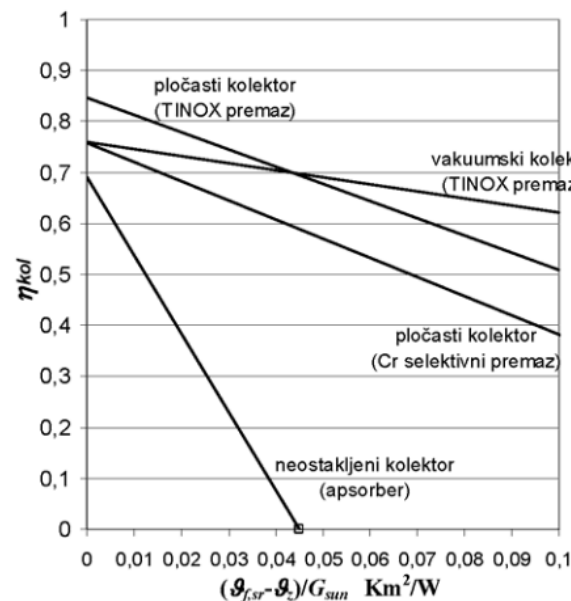
Vakuumske cijevni kolektori (engl. Evacuated Tube Collector - ETC) su danas, poslije pločastih, najviše korišteni tip kolektora. Razvijeni su kako bi se smanjili konvektivni gubici s apsorbera na okolinu, što je učinjeno na način da je iz prostora između apsorbera i stakla izvučen zrak ($\sim 10^{-5}$ mbar).

Kod standardne konstrukcije pločastih kolektora tako nastali vakuum bi doveo do pucanja pokrovnog stakla, pa se kod vakuumskih kolektora apsorber smješta u vakuumirane staklene cijevi (koje zbog kružnog oblika stjenke imaju pri istom vakuumu znatno manja naprezanja u materijalu). Kod jednog tipa kolektora fluid struji u dva smjera kroz niz paralelno spojenih koaksijalnih cijevi, pri čemu je unutrašnja povratna iz sustava (hladni fluid) a vanjska polazna (zagrijani fluid). Apsorber je kao kod pločastih kolektora pričvršćen za cijev (a) ili pak ulogu apsorbera ima vanjska površina koaksijalnih cijevi na koju je nanesen premaz (b).



Sl. 6–24 Vakuumski cijevni kolektor

Vakuumski cijevni kolektori imaju manje toplinske gubitke u odnosu na pločaste pri istim uvjetima rada. No zbog nužnosti korištenja staklenih cijevi manja je korisna površina apsorbera u odnosu na ukupnu projiciranu površinu kolektora (odnos je oko 0,6) u usporedbi s pločastima (odnos je oko 0,9). Efikasnost (i cijena) vakuumskih, kao i pločastih kolektora, se određuje prema ukupnoj projiciranoj površini apsorbera ili kolektora. Zbog toga, na taj način izračunata efikasnost vakuumskih kolektora može biti i niža od one kod pločastih kolektora identičnih karakteristika apsorbera i stakla. To je čest slučaj u dijelu radne krivulje koja odgovara pretežito ljetnom režimu rada tj. pri $(\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z) / G_{sun} = 0 - 0,05 \text{ Km}^2 / \text{W}$ (Sl. 6–25).



Sl. 6–25 Krivulje efikasnosti različitih konstrukcija kolektora

Drugim riječima, ukoliko se u toplijoj polovici godine želi prikupiti jednaka količina sunčeve energije kao i s pločastim kolektorima, vakuumski kolektori će zauzeti veću površinu na krovu.

Obrnuto vrijedi u zimskim mjesecima, pri oblačnom vremenu ili izuzetno visokim temperaturama fluida ($> 70 \text{ }^\circ\text{C}$) tj. pri $(\vartheta_{f,sr} - \vartheta_z) / G_{sun} = 0,05 - 0,15 \text{ Km}^2 / \text{W}$. Tada do većeg izražaja dolazi smanjenje toplinskih gubitaka u vakuumskim kolektorima nego kod pločastih,

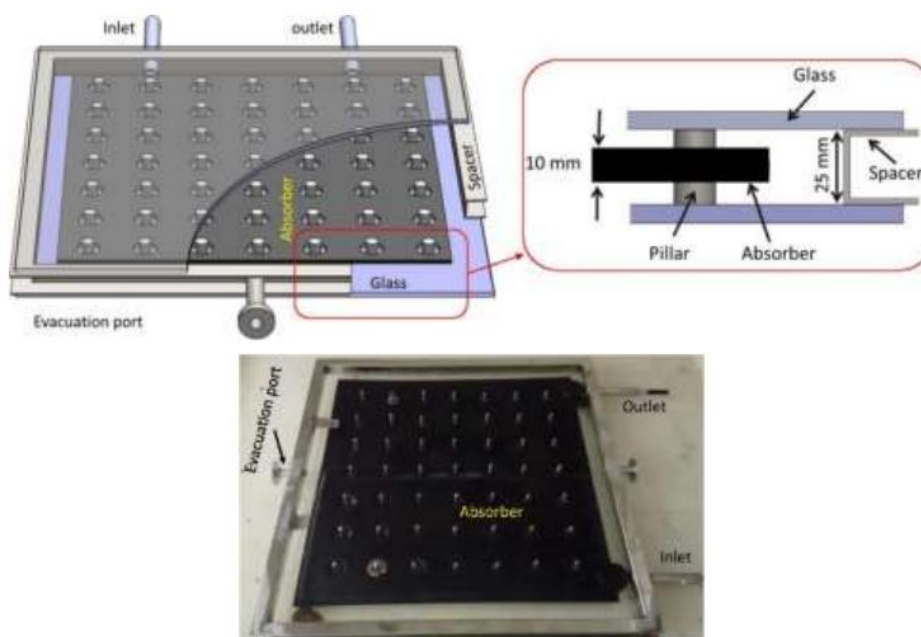
pa je i njihova efikasnost veća. To ih čini prikladnima za korištenje u hladnijim klimama s nižom sunčevom ozračenosti.

Zbog manjih toplinskih gubitaka, vakuumski kolektori omogućuju postizanje većih temperatura na izlazu (max. 100 °C). To ih čini prikladnima za korištenje u primjerice sunčanim rashladnim sustavima (apsorpcijsko hlađenje).

Kao nedostatak vakuumskih kolektora treba spomenuti mogućnost napuknuća stakla uslijed dilatacija izazvanih temperaturnim promjenama, pri čemu dolazi do gubitka vakuuma i značajnog pada efikasnosti.

Vakuumski pločasti solarni kolektori

Vakuumski pločasti solarni toplinski kolektori (engl. Vacuum Flat Plate Collector – VFPC) imaju vrlo dobre optičke i toplinske karakteristike zbog kombinacije velike ravne površine i dobre toplinske izolacije vakuumom, što omogućava visoku učinkovitost i prilagodljivost kolektora s različitim primjenama za industrijsko procesno grijanje i integraciju u građevine. Vakuumski pločasti solarni kolektor sastoji se od solarnog apsorbera u ravnom vakuumiranom kućištu sa rubno zabrtvljenim staklenim ili staklo-metalnim pokrovom te niza distancera koji sprječavaju deformaciju kućišta zbog utjecaja vanjskog atmosferskog tlaka (Sl. 6–26).



Sl. 6–26 Vakuumski pločasti solarni kolektor

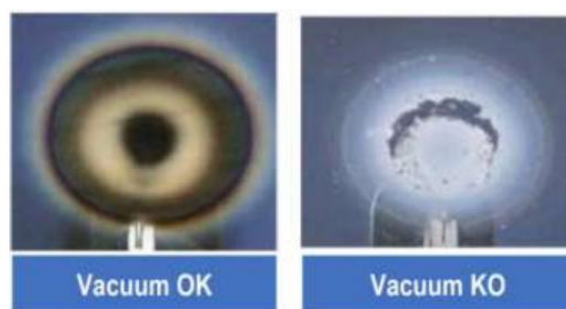
Brtvljenje mora biti mehanički čvrsto i zrakonepropusno kako bi se osigurala trajnost unutarnjeg vakuuma tijekom životnog vijeka kolektora te je to ujedno i osnovni izazov kod izrade vakuumskih pločastih solarnih kolektora.

Švicarski proizvođač solarnih kolektora, TVP Solar je razvio set tehnologija nazvan Thermal Vacuum Power Charged™. Ovaj naziv obuhvaća projektiranje, proizvodnju, održavanje i nadzor visokog vakuuma (10^{-9} mbar) za kolektore MT-Power v4.3. Razlog korištenja

vakuuma u ovim pločastim kolektorima je činjenica da je vakuum jedan od najboljih toplinskih izolatora s kojima se uklanjaju svi toplinski gubici uslijed konvekcije.

Korištenjem inovativnih materijala poput fleksibilne anorganske brtve staklo-metal i sorpcijskih (geterskih¹⁶) pumpi za održavanje vakuumu te poseban sustav proizvodnje omogućuje podnošenje velikih mehaničkih opterećenja s kojima se osigurava postojanost vakuumu u solarnim kolektorima u periodu od 25 godina.

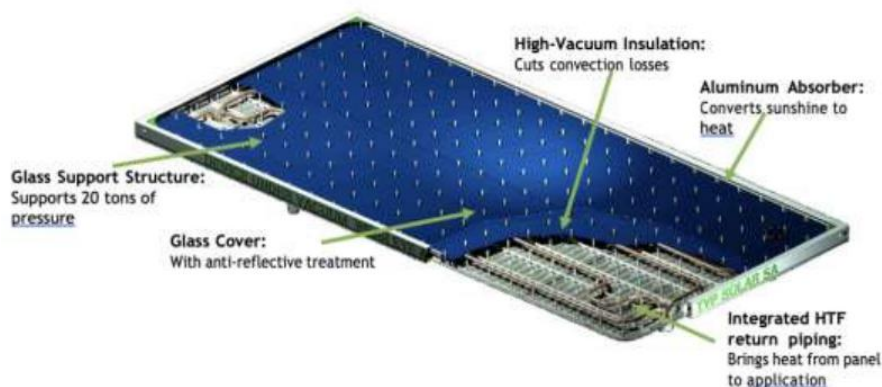
Uz to, patentirani sustav kontrole vakuumu (engl. Spot-Check) pruža informacije o kvaliteti vakuumu unutar solarnih kolektora kako bi se olakšalo održavanje i normalna funkcionalnost kroz cijeli životni vijek opreme.



Sl. 6–27 Spot-Check sustav provjere vakuumu

Vakuumski solarni pločasti kolektor (engl. High-Vacuum Flat Plate Collector – HVFPC) MT-Power v4.3 predstavlja zadnju generaciju ravnih pločastih solarnih kolektora s viskom vakuumom proizvedenih u kompaniji TVP Solar. Ova vrsta kolektora koristi prethodno opisanu tehnologiju Thermal Vacuum Power Charged te ima certifikat Solar Keymark1 do 200°C.

Svojim dizajnom i funkcionalnošću, ova vrsta kolektora je razvijena za proizvodnju obnovljive toplinske energije i primjenu u postrojenjima u kojima su potrebne temperature medija između 65°C i 180°C poput distribucijskih mreža CTS/ZTS, industrijskih procesa, poljoprivredni staklenici, postrojenja za desalinizaciju i sustavima za solarno hlađenje.



Sl. 6–28 Solarni kolektor MT-Power v4.3

¹⁶ Geter je naziv za tvar koja kemijskom reakcijom veže komponente plina i uklanja ih tako što se nastali spoj taloži na stijenkama pumpe

Glavne karakteristike kolektora:

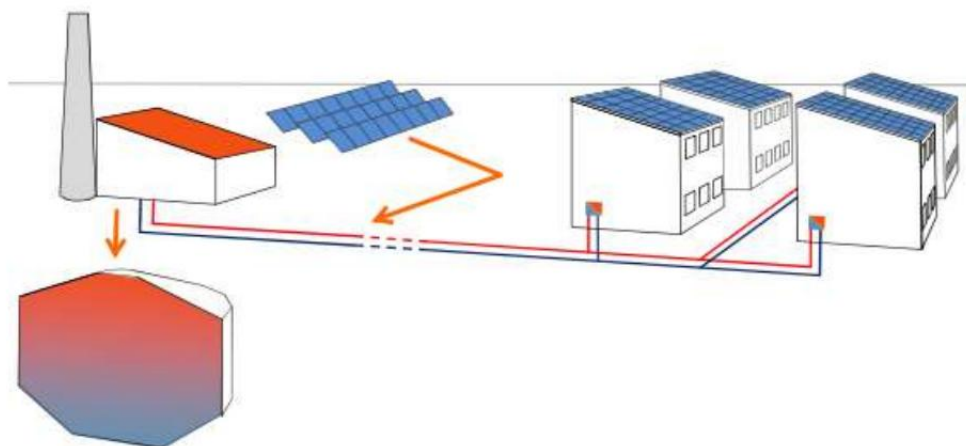
- Izbor ravnih pločastih dimenzija radi iskorištenja što veće aktivne površine
- Korištenje vakuuma za smanjenje toplinskih gubitaka i povećanje performansi
- Integrirana povratna petlja medija (nositelja toplinske energije) radi smanjenja toplinskih gubitaka i povećanja modularnosti tj. neovisnosti svakog solarnog kolektora
- Metalno kućište s antikorozivnom zaštitom za postojanost u svim vrstama okoliša
- Kolektori ne zahtijevaju precizno čišćenje niti dodatne dijelove
- Nema pada učinkovitosti proizvodnje solarne toplinske energije kroz radni vijek opreme
- Integracija Spot-Check sustava za jednostavnu provjeru kvalitete vakuuma
- Svi dijelovi solarnih kolektora mogu se reciklirati i ponovno iskoristiti.

Toplinski spremnici

Toplinski spremnike moguće je integrirati u mrežu toplinskog sustava kako bi se toplinska energija proizvedena tijekom sunčanih perioda mogla koristiti kada sunčeva energija nije dostupna, npr. noću, tijekom oblačnih dana ili kada postoji povećana potreba za toplinskom energijom. Shema sustava prikazana je na Sl. 6–29.

S obzirom na kapacitet spremnika spram potreba za toplinskom energijom, tri su moguća načina primjene skladištenja toplinske energije:

- Spremnik za kratkoročno pohranjivanje energije (engl. buffer)
- Spremnik toplinske energije većeg kapaciteta ($1.000 - 50.000 \text{ m}^3$) za dugoročnu / sezonsku pohranu toplinske energije
- Spremnik toplinske energije većeg kapaciteta za višestruku upotrebu (npr. solarna toplina i otpadna toplina).



Sl. 6–29 Shema daljinskog grijanja sa solarnim kolektorima i toplinskim spremnikom

Najmodernija i najnaprednija tehničko-tehnološka rješenja dostupna su za kratkoročno pohranjivanje topline u manjim sustavima. Spremnici većeg kapaciteta, s obzirom na smještaj, mogu biti vanjski ili podzemni.

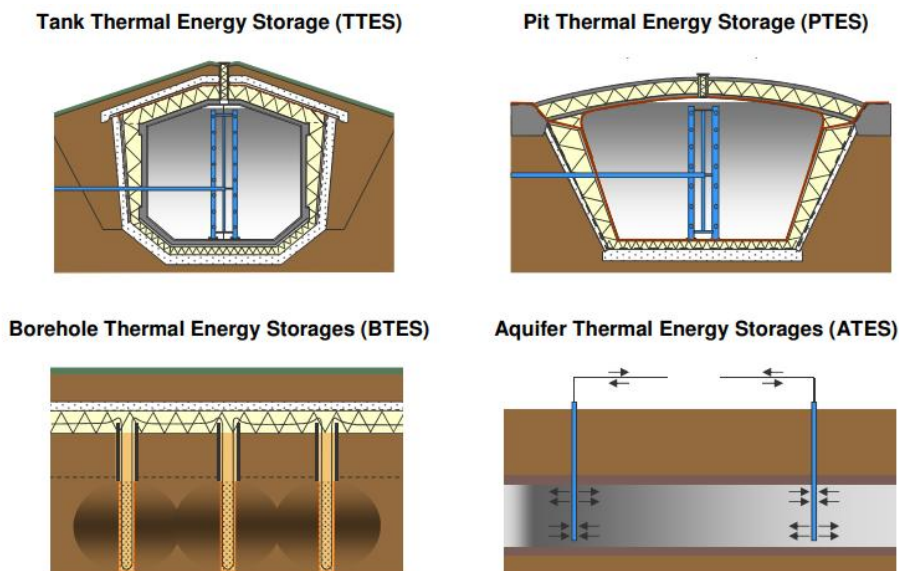
Vanjski spremnik topline zapravo je akumulator topline te je zasebno opisan i objašnjen u poglavlju 6.2. Podzemni spremnici topline kratko su opisani u nastavku.

Podzemni spremnici topline

Podzemni spremnici topline koriste se za pohranu veće količine topline, odnosno sezonsku potrebu, a mogu biti:

- podzemni tankovi (engl. Tank Thermal Energy Storage – TTES) - imaju strukturu napravljenu od betona, čelika ili plastike ojačane staklenim vlaknima (sendvič elemenata). Betonski spremnici se grade izravno na licu mjesta ili s predgotovim betonskim elementima. Dodatna obloga od nehrđajućeg čelika obično se postavlja na unutarnju površinu betonskog spremnika kako bi osigurala vodonepropusnost. S vanjske strane se postavlja toplinska izolacija.
- jamski toplinski spremnici (engl. Pit Thermal Energy Storage – PTES) - izvode se bez posebne nosive konstrukcije, postavljanjem izolacije i obloge u iskopanu jamu. Izvedba pokrova ovisi o skladišnom mediju i geometriji, dok se kod mješavine šljunka i vode pokrov može izvesti identično zidovima. Izrada pokrova vodenog jamskog spremnika zahtijeva značajan napor i obično je najskuplji dio spremnika. Tipično se ne podupire konstrukcijom ispod, već pluta na površini vode. Zemlja od iskopa koristi se za izgradnju nasipa oko samog spremnika. Pokrov se može opremiti samo membranom za zaštitu od kiše i UV zračenja.
- bušotinski toplinski spremnici (engl. Borehole Thermal Energy Storage – BTES) - za pohranu toplinske energije koristi se tlo oko bušotine pri čemu ne postoji strogo definirana granica volumena za pohranu. Prikladne geološke formacije za ovu vrstu pohrane topline uključuju stijene ili vlažna tla bez prirodnih tokova podzemnih voda. Spremnik se puni ili prazni putem vertikalnih sondi, koje se obično postavljaju na dubinu od 30 do 100 metara ispod površine tla. Sonde mogu biti izvedene kao jednostruke ili dvostruke U-cijevi ili koncentrične cijevi, uglavnom izrađene od sintetičkih materijala. Na gornjoj površini spremnika, sloj toplinske izolacije smanjuje gubitke topline prema okolini. Bočne stijenske i dno obično nisu izolirani zbog nedostupnosti. i
- toplinski spremnici s vodonosnikom (engl. Aquifer Thermal Energy Storage – ATES)
 - podzemni, široko rasprostranjeni, vodom ispunjeni i propusni slojevi pijeska, šljunka, pješčenjaka ili vapnenca s visokom hidrauličkom provodljivošću. Ako postoje nepropusni slojevi iznad i ispod vodonosnika te ako nema ili su veoma mali tokovi podzemnih voda, takvi se vodonosnici mogu koristiti za skladištenje toplinske energije. U tom slučaju, u/iz vodonosnika se buše dva bunara (ili grupe bunara) i služe za izuzimanje ili utiskivanje vode. Tijekom razdoblja punjenja, hladna podzemna voda se izvlači iz hladnog bunara, zagrijava se izvorom topline i ubrizgava u topao bunar. Tijekom razdoblja pražnjenja smjer protoka se okreće: topla voda se izvlači iz toplog bunara, hladi se izvorom topline i ubrizgava u hladni bunar. Zbog različitih smjerova protoka, oba bunara opremljena su pumpama te

cijevima za izuzimanje i utiskivanje vode. Budući da se spremnik s vodonosnikom ne može toplinski izolirati od okoline, skladištenje topline pri visokim temperaturama (iznad 50 °C) obično je učinkovito samo za velike volumene spremnika (s volumenom tla iznad 20 000 m³) te s povoljnim omjerom površine prema volumenu.



Sl. 6–30 Tipovi podzemnih spremnika topline

Tab. 6-8 Karakteristike toplinskih spremnika

Tip toplinskog spremnika	Podzemni tankovi (TTES)	Jamski podzemni spremnici (PTES)		Bušotinski toplinski spremnici (BTES)	Podzemni spremnici s vodonosnikom (ATES)
Medij	voda	voda	šljunčana voda	zemlja oko bušotine	podzemna voda u vodonosniku
Specifični kapacitet, kWh/m ³	60 - 80	60 - 80	30 - 50	15 - 30	30 - 40
Ekvivalentna količina vode	1 m ³ spremnika = 1m ³ vode	1 m ³ spremnika = 1m ³ vode		3 - 5 m ³ spremnika = 1m ³ vode	2 - 5 m ³ spremnika = 1m ³ vode
Geološki zahtjevi	Čvrsto tlo, bez podzemnih voda , dubina 5 – 15m	Čvrsto tlo, bez podzemnih voda , dubina 5 – 15m		Tlo pogodno za bušenje, poželjno s nalazištima podzemnih voda, visoka toplinska vodljivost, brzina strujanja podzemne vode manja od 1 l/s , dubina 30 – 100m	Debljina vodonosnog sloja 20 – 50m s niskim ili bez prirodnog protoka , granični slojevi iznad i ispod
Korištenje	Kratkotrajni, odnosno dnevni toplinski spremnik	Sezonski spremnik za solarnu proizvodnju veću od 10.000 MWh		Sezonski spremnik za postrojenja proizvodnje veće od 15.000 MWh	Sezonski toplinski/rashladni spremnik
Temperatura spremnika	5 – 95	5 – 95		5 – 90	7 – 18
Specifični investicijski troškovi, EUR/m ³	110 - 200 EUR/m ³ (za TTES iznad 2.000 m ³)	20 - 40 EUR/m ³ (za PTES iznad 50.000 m ³)		20 - 40 EUR/m ³ (za PTES iznad 50.000 m ³ ekvivalentne količine vode)	50 - 60 EUR/m ³ (za ATES iznad 10.000 m ³ ekvivalentne količine vode)

Napomene: 1) Voda je povoljnija s termodinamičkog stajališta. Mješavina šljunka i vode se često koristi ako se površina skladišta planira koristiti za daljnju uporabu (npr. za ulice, parkirališta itd.).

Osnovni princip integracije

Solarna toplana funkcionira kao zasebna stvorena petlja koja je indirektno, putem izmjenjivača topline, vezana na sustav kojem isporučuje toplinsku energiju, u ovom slučaju centralnom toplinskom sustavu grada Karlovca te ne postoji izravna veza između ogrjevnog medija koji struji unutar solarnog polja i medija u sustavu kojem se predaje toplinska energija. Po pitanju proizvodnje toplinske energije, sustav solarnih kolektora osigurava toplinu konstantne temperature kroz sustav kontrole i nadzora koji upravlja pumpama promjenjivog (varijabilnog) protoka. Ogrjevni medij u solarnim toplinskim sustavima može biti demineralizirana voda, smjesa vode i glikola (zbog zaštite od smrzavanja) ili termalno (vrelo) ulje. Solarna toplana opremljena je sigurnosnim sustavima koji uključuju hladnjake, ventile i ekspanzijske posude kako bi se izbjeglo pregrijavanje medija unutar zatvorene petlje u bilo kojoj situaciji.

U fazi projektiranja, a uz tehničku podršku proizvođača opreme i u dogovoru s distributerom toplinske energije definiraju se projektni i radni parametri solarne toplane na pragu isporuke toplinske energije u CTS, odnosno na sekundarnoj strani izmjenjivača topline koji razdvaja solarnu toplanu od CTS-a. Bez obzira na to tko investira u izgradnju solarne toplane, njeno priključenje na CTS u domeni je distributera toplinske energije.

Osnovni princip rada

U svom radu, solarni će toplinski sustav (solarna toplana) prolaziti kroz sljedeća redovna ili izvanredna pogonska stanja (faze rada):

- pokretanje i predgrijavanje,
- redovan rad (bez hladnjaka),
- redovan rad (s hladnjakom),
- prekid rada (noć, naoblaka),
- stagnacija (prestanak cirkulacije medija solarnog kruga),
- pokretanje nakon stagnacije,
- zaštita od smrzavanja uspostavom cirkulacije medija solarnog kruga i
- zaštita od smrzavanja uspostavom zagrijavanjem medija solarnog kruga.

Sustav će automatski započeti s radom kada Sunčevo zračenje premaši unaprijed određenu graničnu vrijednost (prag) tijekom razdoblja između izlaska i zalaska Sunca. Tijekom ove faze rada, osigurava da se postigne dovoljno visoka temperatura ogrjevnog medija solarnog kruga prije nego što se usmjeri prema izmjenjivaču topline.

Granična vrijednost Sunčevog zračenja iznad koje sustav započinje s radom određena je značajkama solarnog sustava i centralnog toplinskog sustava kojem predaje toplinsku energiju. Naime, u trenutku pokretanja, solarna toplana mora postići dovoljan toplinski učin za predaju toplinske energije u centralni toplinski sustav ili spremnik toplinske energije. Pumpa solarnog kruga će pritom održavati minimalni protok ogrjevnog medija kako bi se što prije ostvarila dovoljno visoka temperatura za zagrijavanje tople vode u CTS-u ili u spremniku toplinske energije.

Redovan rad započinje odmah nakon završetka faze predgrijavanja. Prijelaz na redovan rad uključuje zatvaranje recirkulacijskog kruga i umjesto toga aktiviranje cirkulacije prema izmjenjivaču topline mreže CTS-a ili grijanja spremnika toplinske energije. Temperatura se održava na unaprijed određenoj zadanoj vrijednosti uspostavljenoj unutar sustava.

Da bi se postigla temperatura CTS, pumpe solarnog kruga i CTS-a (ili međukruga grijanja spremnika toplinske energije) dinamički prilagođavaju svoje protoke kao odgovor na promjene Sunčevog zračenja. Brzina vrtnje pumpe raste s porastom Sunčevog zračenja i smanjuje se s opadanjem Sunčevog zračenja.

Zračni hladnjak (bilo u primarnom ili sekundarnom krugu) služi kako bi se višak proizvedene topline (iz kolektora ili iz spremnika) odveo u okolinu, sprječavajući pregrijavanje tokom nadolazećeg dana. Ovaj način rada treba izbjegavati osim ako nije apsolutno potrebno za sprječavanje pregrijavanja.

Sustav prestaje s radom po zalasku Sunca ili kada postane vrlo oblačno. Cirkulacija medija solarnog kruga ne obustavlja se sve dok se iz solarnog toplinskog sustava ne preuzme akumulirana toplinska energija, odnosno sve dok je temperatura ogrjevnog medija u solarnom krugu viša od one u mreži CTS-a ili u spremniku toplinske energije. Kad se iscrpi raspoloživa toplinska energija akumulirana u solarnom toplinskom sustavu, toplinska energija se dalje uzima iz spremnika toplinske energije.

Stagnacija nastupa kad prestane cirkulacija ogrjevnog medija solarnog kruga, npr. uslijed kvara pumpe solarnog kruga ili nestanka napajanja električnom energijom. U tom slučaju ili kad zbog nekog drugog razloga naglo porastu temperatura ili tlak, ventili solarnog kruga se brzo zatvaraju, štiteći instalacije unutar strojarnice. Sa zatvorenim ventilima te nakon što tlakom u solarnom krugu dosegne određenu razinu, solenoidni ventil se aktivira, preusmjeravajući vodu u spremnik dopune. Nakon tako, ako tlak nastavi rasti i dosegne razinu otvaranja sigurnosnog ventila, sigurnosni ventil će se otvoriti kako bi ispustio višak u spremnik dopune.

Sustav mora ostati u stanju mirovanja dok se kvar ne otkloni, a obično se ponovno puni tijekom noći. U procesu ponovnog punjenja treba povisiti tlak sustava znatno iznad tlaka zasićenja kako bi se spriječilo vrenje kada ogrjevni medij ponovno uđe u solarne kolektore. Prije ponovnog pokretanja, preporučljivo je temeljito pregledati spojeve unutar solarnog polja.

Kako bi se spriječilo smrzavanje ogrjevnog medija solarnog kruga za hladnih noći ili hladnih dana s veoma slabim Sunčevim zračenjem, moraju se implementirati automatski protokoli protiv smrzavanja (kada je ogrjevni medij solarnog kruga voda). Kada vanjska temperatura padne ispod određenog praga, pumpa solarnog kruga treba se aktivirati, cirkulirajući ogrjevni medij uz unaprijed postavljeni minimalni protok kako bi se spriječilo smrzavanje vode unutar kruga. Kada vanjska temperatura značajno padne, mala količina topline će se uzeti s vrha spremnika toplinske energije i njome će se zagrijati ogrjevni medij u solarnom krugu (proces obrnut redovnom režimu rada). U ovom režimu, i pumpa tople vode kojom se grije solarni krug i pumpa solarnog kruga će raditi na minimalnoj frekvenciji. Ako temperatura ogrjevnog medija u solarnom krugu padne ispod 4 °C, toplina će se uzeti iz mreže CTS-a kako bi se održala temperatura ogrjevnog medija solarnog kruga iznad ovog

praga. Ova minimalna toplina je dovoljna da spriječi smrzavanje. Operativna logika temelji se na temperaturi i vremenu, s redovitim provjerama temperature u određenim intervalima, osiguravajući minimalnu potrošnju topline iz mreže CTS-a.

6.4.3. Preliminarna procjena veličine izgradnje

U nastavku je prikazana tablica parametara u ovisnosti o instaliranoj snazi vakumskih solarnih kolektora koji su u ovom slučaju odabrani radi veće efikasnosti (50 – 55% u odnosu na pločaste čija je efikasnost 35 – 40%).

Tab. 6-9 Karakteristike polja solarnih kolektora

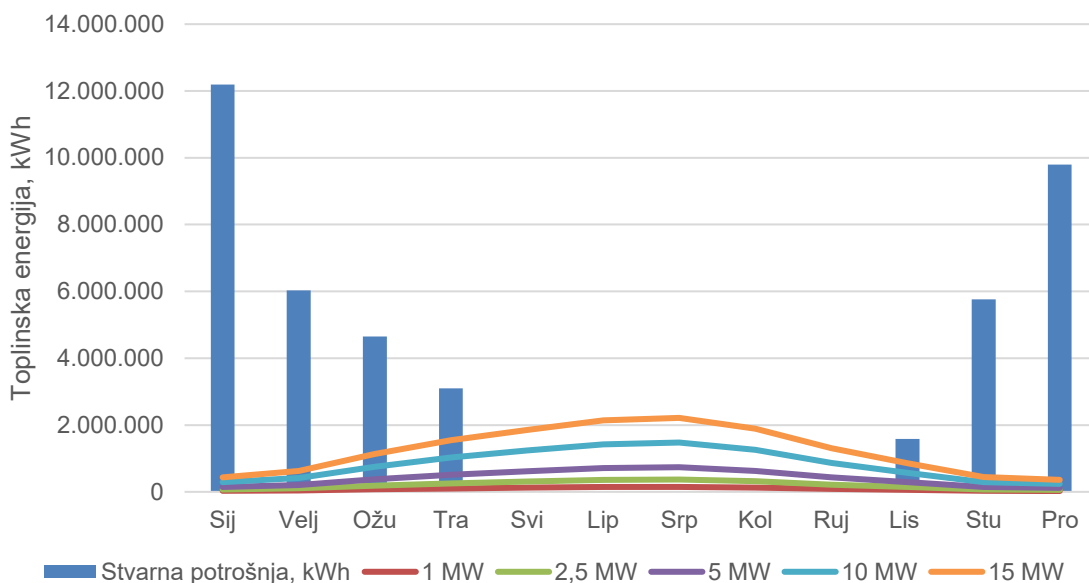
Instalirana snaga	Površina kolektora	Proizvedena korisna toplinska energija	Toplinska energija za pohranu u spremnik topline	Udio korisne toplinske energije u ukupnoj potrošnji	Udio ukupno proizvedene toplinske energije u ukupnoj potrošnji	Veličina toplinskog spremnika
MW	m ²	kWh	kWh	-	-	m ³
1	1.411	359.408	626.680	0,83%	2,29%	8.000 - 10.000
2,5	3.592	898.521	1.566.701	2,08%	5,72%	20.000 - 26.000
5	7.057	1.797.041,3	3.133.402	4,17%	11,44%	39.000 - 52.000
10	14.114	3.594.082,6	6.266.803,1	8,34%	22,87%	78.000 - 104.000
15	21.171	5.391.123,9	9.400.204,7	12,51%	34,31%	118.000 - 157.000

Površina iskazana u Tab. 6-9 odnosi se samo na površinu koju zauzimaju solarni kolektori. Toj je površini potrebno dodati površinu za razmak između kolektora, ali i prostor namijenjen za spremnik topline, prostor koji je nužno ostaviti praznim između građevinskih čestica te oko infrastrukturnih koridora, ako oni postoje na razmatranoj lokaciji, a što je definirano u GUP-u. Uz sve navedene uvjere, potrebno je ispoštovati ograničenje u području izgrađenosti čestice maksimalno može iznositi 0,6.

Sustav će u svakom slučaju biti predimenzioniran jer nema realne potrebe za toplinskom energijom u ljetnim mjesecima kada je sustav najviše proizvodi. Iz grafa na Sl. 6–22 te prethodne tablice, vidljivo je da se 36,45 % proizvedene toplinske energije može direktno koristiti za pokrivanje toplinskih potreba, a ostatak koji nastaje u periodu od svibnja do listopada je potrebno pohranjivati u sezonski spremnik topline.

Za toplinski kapacitet spremnika topline uzete su teorijske vrijednosti za jamski podzemni spremnik, a prema Tab. 6-8. Izračunata vrijednost veličine spremnika je orijentacijska vrijednost koja ne uzima u obzir specifičnosti sustava, a točna veličina spremnika bit će određena u daljnjim fazama projekta, ako solarni kolektori budu odabrani u optimalnoj kombinaciji tehnologija.

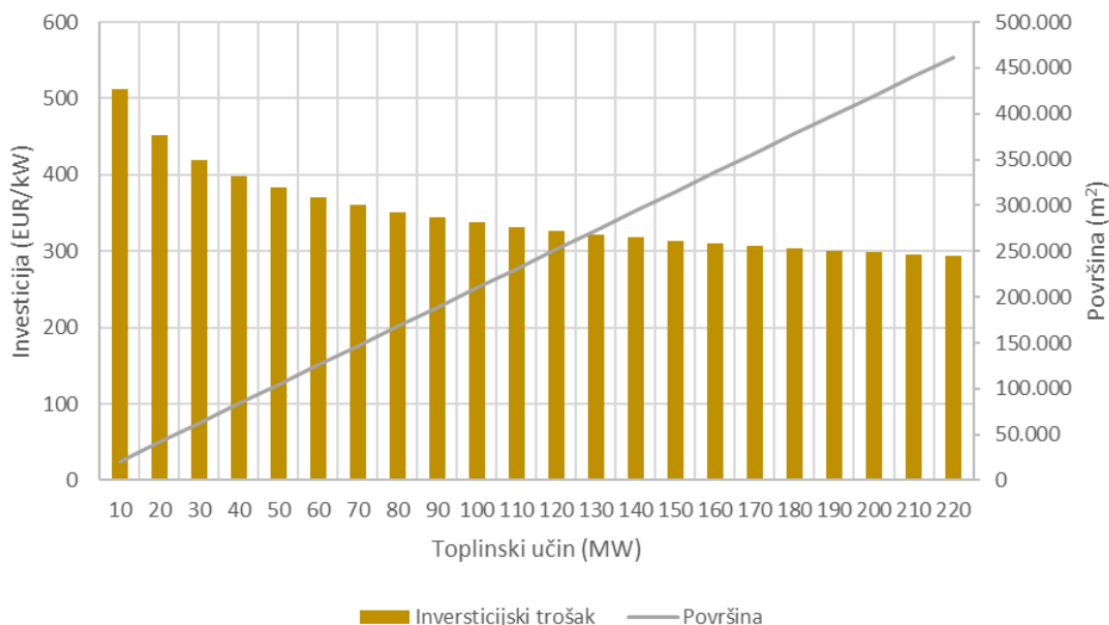
Grafički prikaz proizvodnje toplinske energije iz solarnih kolektora u ovisnosti o njihovoj snazi, a u usporedbi sa stvarnom potrošnjom toplinske energije, prikazan je na sljedećoj slici.



Sl. 6–31 Proizvodnja toplinske energije iz solarnih kolektora u ovisnosti o njihovoj snazi

6.4.4. Procjena ulaganja

Investicijski trošak za solarne kolektore ovisan je o instaliranoj snazi i kreće se od preko 500 EUR/kW za snage od 10 MW do ispod 300 EUR/kW za snage preko 220 MW, a kako je prikazano na sljedećem grafičkom prikazu.



Sl. 6–32 Procjena ulaganja ovisno o površini i toplinskom učinku solarnih kolektora

Što se tiče ulaganja u sezonske spremnike topline, ističu se visoki investicijski troškovi tako da su spremnici više iznimka nego pravilo. Za jamske podzemne spremnike, a koji su u ovom slučaju uzimani u obzir, specifični investicijski troškovi kreću se od 20 do 40 EUR/m³.

6.4.5. Izvedeni sustavi

Izvedeni sustavi u Hrvatskoj

U vukovarskoj gradskoj četvrti Borovo naselje, tvrtka Tehnoston je pored postojeće plinske kotlovnice izgradila solarnu toplanu ukupnog toplinskog učina 900 kW, a za opskrbu 2.000 stanova ovog dijela Vukovara toplinskom energijom za grijanje i pripremu PTV.

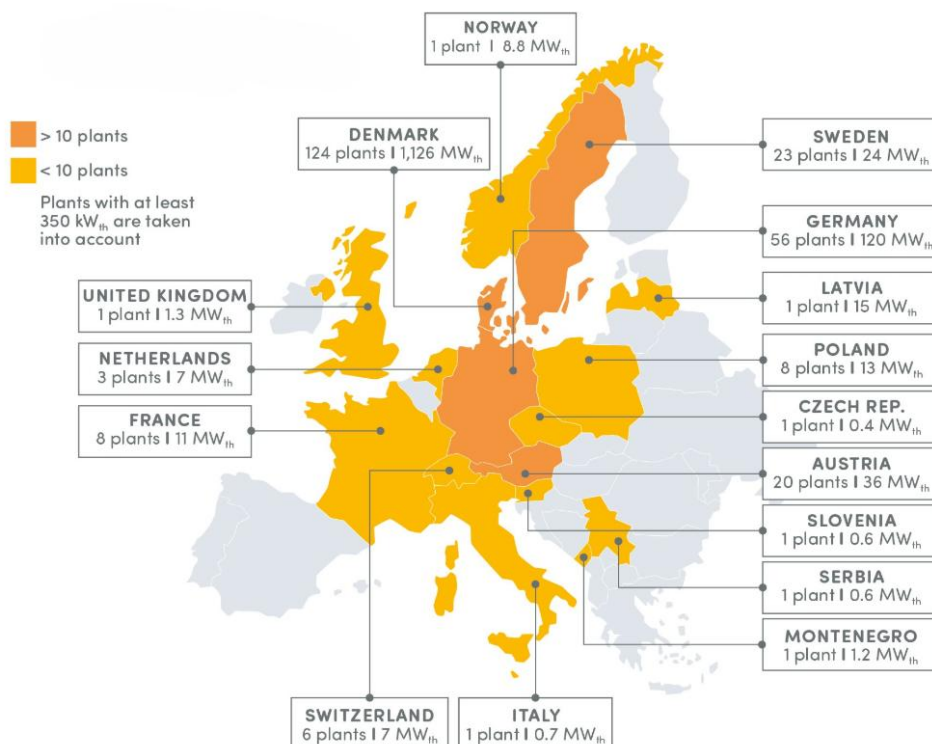


Sl. 6–33 Solarna toplana planiranog ukupnog toplinskog učina 900 kW

Realizacija je započela početkom 2019. godine, sukladno izrađenom glavnom projektu, preinakama u kotlovnici postavljanjem pločastog izmjenjivača topline i izvođenjem radova na unutrašnjim instalacijama te gradnjom prve faze polja. Tada je ugrađeno ukupno 160 pločastih solarnih kolektora Weishaupt WTS-F2, čime je završena prva faza izgradnje solarnog polja od ukupno 556 kolektora. Početkom lipnja dovršena je i druga faza gradnje polja s dodatnih 160 ploča. Po završetku projekta i postavljanja svih solarnih kolektora, pri punoj osunčanosti očekuje se 900 kW toplinskog učina. Investicija ima i pozitivan učinak na okoliš jer se smanjuju emisije CO₂ za 210 tona godišnje. Sustav je izveden bez dodatnih spremnika toplinske energije.

Izvedeni sustavi u Europi i svijetu

Prema podacima od kraja 2023. godine, ukupno 336 europskih naselja i gradova koristi danas sunčevu energiju za proizvodnju toplinske energije u centralnim toplinskim sustavima. Površina koju zauzimaju solarni kolektori iznosi 2,73 milijuna m², a ukupna instalirana snaga 1.908 MW. Najviše ih je u Švedskoj, Danskoj, Njemačkoj i Austriji, pri čemu Danska prednjači u korištenju ove tehnologije sa instaliranih 1.126 MW.



Sl. 6–34 Solarne toplane u Europi¹⁷

Najveća solarna toplana u Europi, ali i u svijetu, izgrađena je 2016. godine u Silkeborgu, danskom gradu s oko 44.000 stanovnika i sastoji se od 12.436 velikih solarnih kolektora postavljenih na poljoprivrednim površinama pored grada. Ukupni instalirani toplinski učin iznosi 110 MW, a godišnja proizvodnja toplinske energije iznosi 80.000 MWh. Toplinska energija proizvedena u solarnom sustavu dopunjuje klasične plinske kogeneracijske elektrane u centralnom toplinskom sustavu i pokriva oko 20 % toplinskih potreba za grijanje te u potpunosti potrebe pripreme PTV ljeti. Postrojenje ne uključuje sezonsko skladištenje toplinske energije već je prilagođeno potrebama grada.

Danska prednjači po broju i instaliranoj snazi solarnih elektrana, a odmah iza nje nalazi se Kina. Druga najveća solarna elektrana nalazi se u kineskoj autonomnoj regiji Unutarnja Mongolija, površinom zauzima 95.000 m², a njezina instalirana snaga iznosi 65 MW.

Do kraja 2024. godine, neovisno o veličini, procjenjuje se da je u svijetu u pogonu bilo 126 milijuna solarnih toplinskih sustava, ukupnog instaliranog kapaciteta 544 GW. Prema podacima, te je godine proizvedeno 443 TWh toplinske energije iz solarnih sustava čime je spriječena emisija 153,3 milijuna tona CO₂

¹⁷ Izvor: IEA SHC Solar Heat Worldwide Report 2024

6.5. Korištenje tehnologija koje električnu energiju koriste za proizvodnju toplinske energije (tzv. Power-to-Heat tehnologije)

Power-to-Heat tehnologije obuhvaćaju tehnička rješenja u kojima se električna energija koristi kao primarni izvor za proizvodnju toplinske energije. U tu skupinu spadaju električni kotlovi i dizalice topline, a primjenjuju se ovisno o zahtjevima sustava, dostupnoj infrastrukturi i prostorno-planskim uvjetima. Iako su objedinjeni pod zajedničkim nazivom, navedeni sustavi predstavljaju zasebne tehnološke koncepte s različitim načinima rada i mogućnostima primjene te će kao takvi biti prikazani u nastavku.

Zajednička značajka Power-to-Heat tehnologija jest mogućnost prilagodbe sustava grijanja promjenama u elektroenergetskom sustavu i iskorištavanje dostupne električne energije u trenucima povoljnijih tržišnih uvjeta ili povećane proizvodnje, osobito iz obnovljivih izvora. Takva rješenja omogućuju povećanje fleksibilnosti toplinskog sustava, a ujedno i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima u proizvodnji toplinske energije.

Stvarni doprinos navedenih tehnologija ciljevima dekarbonizacije uvjetovan je udjelom obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije koja se koristi za njihov rad. Iz tog je razloga njihova primjena osobito pogodna u uvjetima razvijene elektroenergetske mreže s visokim udjelom obnovljivih izvora energije.

6.5.1. Vrelovodni električni kotao

Ekonomska smislenost izgradnje električnih kotlova bazira se na mogućnosti električnih kotlova da iskorištavaju dnevne fluktuacije cijena električne energije (dnevna promjenjivost cijene električne energije značajno je veća od dnevne promjenjivosti cijena fosilnih goriva). Drugim riječima, osnovna namjena električnih niskotlačnih vrelovodnih kotlova je proizvodnja toplinske energije u trenucima kada je cijena električne energije na tržištu izrazito niska uslijed velike količine električne energije iz obnovljivih izvora

Osnovni princip rada

Električni kotlovi su uređaji koji električnu energiju pretvaraju u toplinsku iskorištavajući otpor prolaska električne energije. Postoje dvije koncepcije:

- konvencijalna koncepcija kod koje se iskorištava električni otpor otpornog elementa (zagrijača) uronjenog u vodu pri čemu voda preuzima toplinu (hladi otporni element). Ovakva koncepcija vrlo je raširena kod manjih sustava, do 1-2 MW, često i za kućnu upotrebu
- koncepcija s elektrodama kod koje je voda otporni element. Sustav se sastoji od trofaznih elektroda i nulte elektrode, a voda se zagrijava uslijed prolaska električne energije kroz nju. Ova koncepcija dominantno se primjenjuje kod većih snaga u sustavu složenijih termoenergetskih postrojenja (max. do 60 MW).

Osim iskorištavanja dnevne fluktuacije cijena električne energije, električni kotlovi imaju i druge tehničke prednosti u odnosu na značajke standardnih vrelovodnih kotlova koji se koriste fosilnim gorivima:

- iskoristivost električnih kotlova je iznimno visoka (99 %)
- tehnički minimum praktički ne postoji (minimalna snaga je 0,5 % maksimalne snage)
- ne zahtijevaju skladište i sustav ubacivanja goriva niti izgradnju dimnjaka (emisija štetnih plinova na lokaciji je gotovo nepostojeća)
- kotlovi su iznimno pouzdani te ih karakterizira visoka raspoloživost jer su sami kotlovi takvog konstrukcijskog rješenja da sadrže vrlo malo pokretnih dijelova
- nema opasnosti od suhog pogona jer se nestankom vode prekida strujni krug
- tijekom rada kotlovi produciraju iznimno nizak nivo buke
- ne zahtijevaju gotovo nikakvo održavanje
- start im je iznimno brz, a regulacija jednostavna (brzina regulacije 0-100% kapaciteta je oko 240 s).

Tehnički opis kotla

Generalno postoje dvije varijante izvedbe električnih vrelovodnih kotlova. Kod obje varijante električna energija se vodi direktno u vodu između faznih elektroda i nulte elektrode, a snaga ovisi o četiri parametra: aktivnom području elektrode, udaljenosti između fazne elektrode i nulte elektrode, naponu i vodljivosti.

Udaljenost između faznih elektroda i nulte elektrode određuje se izvedbom kotla, a napon je konstantan. Kvaliteta vode u kotlu mora biti odgovarajuća jer voda mora predstavljati otporni element, ali mora imati dovoljnu vodljivost kako bi omogućila postojanje električnog toka između elektrode i nulte elektrode. Trenutno je od najvećeg interesa aktivno područje elektrode, odnosno regulacija istog, jer upravo to predstavlja suštinsku razliku između dviju spomenutih varijanti izvedbe električnih vrelovodnih kotlova.

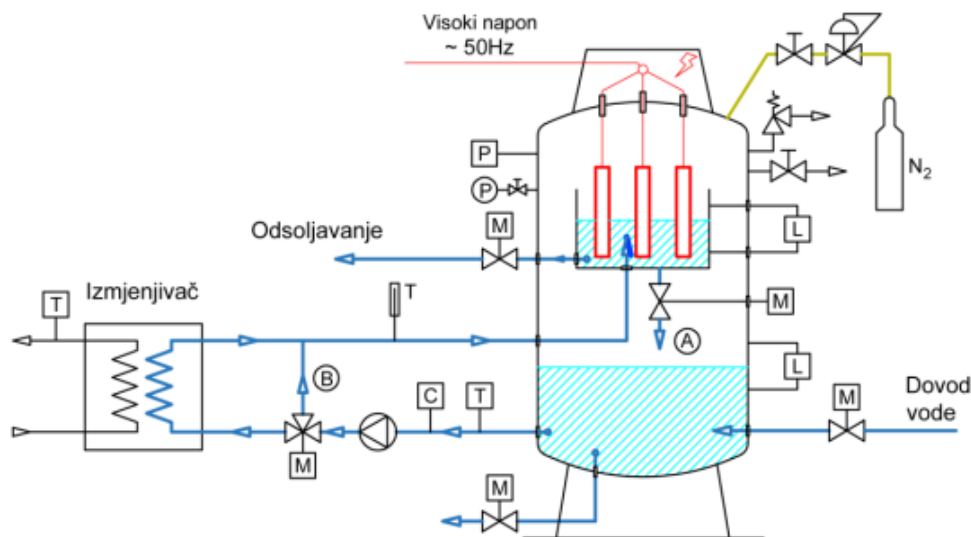
Kod prve varijante, prikazane na Sl. 6–35, kotao se sastoji od tlačne posude (vanjska ovojnica) u koju je ugrađena unutrašnja cilindrična posuda koja ima ulogu nulte elektrode. Vanjski spremnik kotla je uzemljen, a unutarnji spremnik je izoliran. Kako bi se to postiglo, svi cjevovodi između spremnika su izrađeni od izolacijskog materijala (visokoomsko uzemljenje). Oslonac unutarnjeg spremnika također je izveden s električnim izolatorima, a kako bi se posuda pod tlakom izolirala od poda, posuda pod tlakom stoji na izolatorima. Iz sigurnosnih razloga se otvor zaštitnog kaveza ne može otvoriti sve dok je isključen prekidač, a sabirnica na vrhu kotla mora biti uzemljena. Fazne elektrode su uronjene u unutarnju posudu, a ugrađuju se na način da vise na izolatorima na vrhu vanjskog spremnika. Elektrode su spojene na trofazno električno napajanje pri čemu je snaga toplinskog toka direktno proporcionalna uronjenosti aktivnog djela elektroda u vodu.

Promjenom količine vode u unutrašnjoj posudi na jednostavan i pouzdan način regulira se snaga kotla. Maksimalna razina u unutarnjem spremniku daje maksimalnu snagu. Količina vode u unutrašnjoj posudi kotla smanjuje se otvorenjem ventila (A) pri čemu se voda ispušta u donji dio spremnika. S druge strane, količina vode u unutrašnjoj posudi povećava se

prepumpavanjem vode iz donjeg djela spremnika kroz mimovod (eng. by pass) izmjenjivača (B). Ovakva regulacija omogućuje vrlo širok raspon snaga od 100 % pa do minimalnih 0 %.

Bitno je napomenuti da ventil A ima još jednu ulogu. Naime, protok kroz ventil A osim regulacije omogućava ispuštanje zagrijane vode iz unutrašnje posude u donji dio spremnika od kuda se takva zagrijana voda vodi prema izmjenjivaču gdje svoju toplinsku energiju predaje mrežnoj vodi (korisnicima). U ovom slučaju protoci moraju biti potpuno usklađeni te pumpa upravo tu istu količinu vode koja se preko ventila A ispusti u donji dio spremnika prepumpava preko izmjenjivača natrag u unutrašnju posudu.

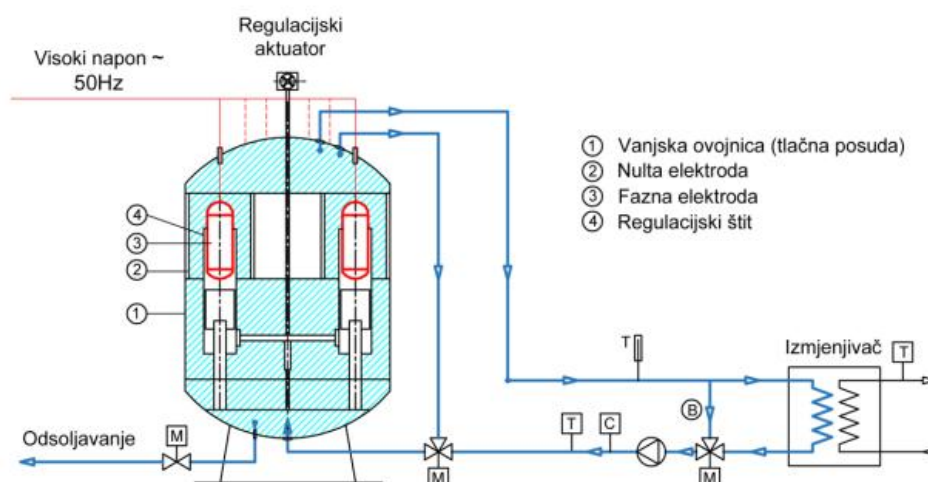
U principu se ovaj tip kotla koristi kada je potreban jako niski tehnički minimum proizvodne jedinice i brzi regulacijski odaziv. Raspon regulacije je od 0 do 100 %, a brzina odaziva od 0-100% je oko 240 s.



Sl. 6–35 Vrelvodni električni kotao - Varijanta 1

Kod druge varijante izvedbe električnih niskotlačnih vrelvodnih kotlova, prikazane na slici Sl. 6–36, elektrode se također ugrađuju na način da vise na izolatorima na vrhu vanjskog spremnika. Spojene su na trofazno električno napajanje, ali preko Y-konektora svaka faza je spojena na jedan par elektroda. Kod ove varijante nulta elektroda nije izvedena u obliku unutarnje posude već se sastoji od 6 cijevi, po jedna oko svake elektrode. Voda prolazi uz elektrode pri čemu se zagrijava. Regulacija snage je omogućena ugradnjom regulacijskih oklopa od izolirajućeg materijala. Regulacijski oklopi se pomiču gore i dolje uz elektrode, zaklanjajući veći ili manji dio faznih elektroda te time reguliraju snagu kotla. Kako je već napomenuto, snaga ovisi o aktivnoj površini koja može voditi električnu energiju između faze i nule. Kada su elektrode maksimalno zaklonjene snaga kotla je minimalna.

Zbog činjenice da krajeve elektroda nije moguće zakloniti, čak i pri maksimalnom spuštanju regulacijskih oklopa nije moguće sasvim smanjiti tok električne energije. Uobičajeno minimalno opterećenje iznosi oko 10-12 % nominalne snage. Brzina odaziva od 10-100 % je oko 180 s.



Sl. 6–36 Vrelvodni električni kotao - Varijanta 2

Predaja toplinske energije mrežnoj vodi

Voda u samom električnom kotlu mora biti odgovarajuće vodljivosti te kao takva nije odgovarajuća za direktno spajanje na toplinski sustav CTS-a. Iz tog razloga postrojenje treba izvesti kao sustav s dva grijača strujna kruga. Primarna strana je s kotlom, dok je sekundarna strana s centraliziranim toplinskim sustavom.

U primarnom krugu se voda zagrijava u kotlu, a pumpa cirkulira vodu između kotla i izmjenjivača topline. Voda iz CTS-a na sekundarnoj strani izmjenjivača topline apsorbira toplinsku energiju proizvedenu u kotlu te je distribuira dalje u centralizirani toplinski sustav. Kod odabrane (prve) varijante izvedbe, kotao ima ulogu ekspanzijske posude koja regulira promjenu volumena vode u primarnom krugu, ovisno o razlici između vrućeg i hladnog stanja.

Kvaliteta vode u kotlu

Kvaliteta vode je od velike važnosti za sigurnost rada i dužinu vijeka trajanja kotlovskih postrojenja općenito, a kod električnih kotlova s elektrodama dobiva dodatnu važnost iz razloga što u tom slučaju dobiva ulogu otpornog elementa te utječe na snagu kotla. To znači da voda u električnom kotlu mora imati nisku, ali dovoljnu vodljivost kako bi postojao strujni tok između elektrode i nulte elektrode. Dakle, kotlovska voda mora biti bez kisika, ugljične kiseline i nečistoća te mora sadržavati kontrolirane količine pozitivno nabijenih iona koji ne uzrokuju koroziju, a vodi daju određenu vodljivost kako bi mogla provoditi električnu energiju.

Iz svega je vidljivo da voda unutar samog kotla zahtjeva specifične karakteristike (sadržaj odgovarajućih iona) čemu projektanti sustava moraju posvetiti posebnu pažnju. Uz sam kotao, potrebno je predvidjeti i sustav mjerenja kao i sustav za pripremu kotlovske vode. Kvalitetu vode definira sam proizvođač kotla.

Tlak u sustavu

Kako se radi o vrelovodnom kotlu predviđene radne temperature od 180 °C nužno je tlak u sustavu održavati na povišenom nivou kako bi se izbjeglo stvaranje vodene pare u samom kotlu (>10 bar). To se postiže ugrađenim tlačnim regulacijskim sustavom na bazi dušika ili nekog drugog inertnog plina. Pored održavanja tlaka ovaj sustav ima također ulogu omogućiti djelovanje kotla kao ekspanzijske posude.

Sigurnost

Sam kotao opremljen je cijelim nizom sigurnosnih i mjernih uređaja što mu daje visok stupanj sigurnosti u radu. Ipak, ono što je posebna specifičnost ovakvih kotlova je činjenica da sama koncepcija kotla predstavlja sigurnosni element. Naime, ukoliko zbog nekog havarijskog stanja kotao ostane bez vode (bez obzira na razlog takvog stanja) snaga kotla će pasti na 0 MW bez obzira da li su elektrode pod naponom ili nisu. Kako je voda osnovni otporni element/vodič, nestankom vode prestaje i svaki toplinski tok.

Tehničke karakteristike

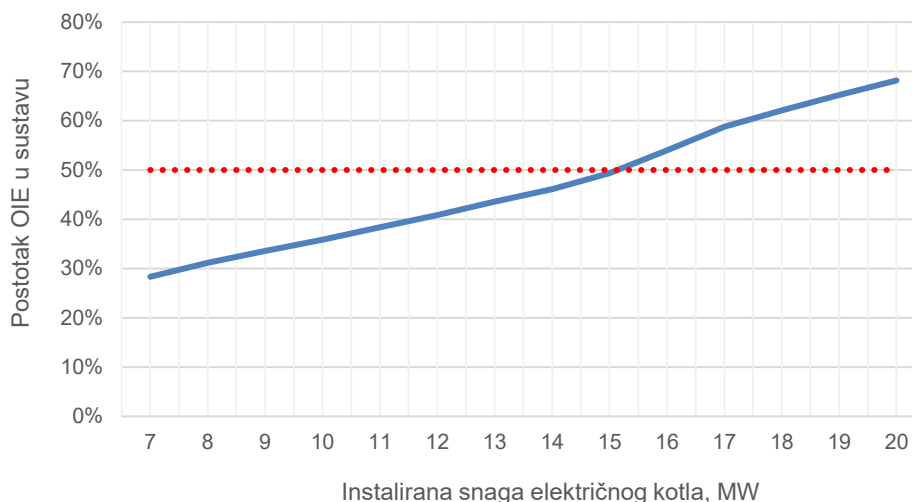
Tehničke karakteristike potencijalnih niskotlačnih električnih kotlova definirane su na bazi dostupne dokumentacije proizvođača kotlova, a prikazane su tablicom u nastavku

Tab. 6-10 Tehničke karakteristike električnih kotlova

Stavke	Iznos
Raspon snaga	8 – 100 %
Maksimalna temperatura	180 °C
Stupanj djelovanja	> 99 %

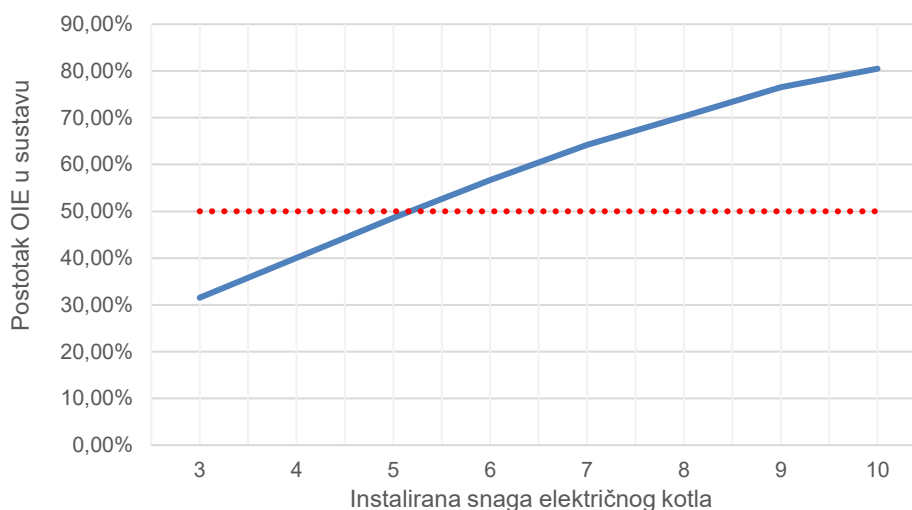
U nastavku su napravljene preliminarne analize prema metodologiji koja je detaljno opisana u poglavlju 9, a cilj analize bio je odrediti potrebnu instaliranu snagu električnog kotla u kombinaciji s postojećim plinskim kotlom VKLM-50 s ciljem postizanja udjela od 50 % obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji toplinske energije u 2028. godini. Analiza je ponovljena i za scenarij u kojem se u sustav uvodi akumulator topline kapaciteta 150 MWh čime se razmatra dodatna fleksibilnost u radu sustava.

Važno je naglasiti da u ovom izračunu nisu uzimani u obzir odnos cijena plina i električnog kotla niti optimizacija pogona prema troškovima. Analiza je temeljena na forsiranju maksimalnog rada električnog kotla uz uvjet da se istovremeno osigura pokrivanje ukupnog toplinskog konzuma. Na taj je način dobiven orijentacijski pokazatelj o potrebnoj veličini postrojenja.



Sl. 6–37 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini u ovisnosti o instaliranoj snazi kotla na biomasu

Iz prethodnog je grafa vidljivo da se instalacijom kotla na biomasu od 16 MW postiže više od 50% OIE u cjelokupnom sustavu (53,95 %). Navedena instalirana snaga se smanjuje ako se uz kotao na biomasu investira u akumulator topline kapaciteta 150 MWh, a kako je prikazano sljedećom slikom.



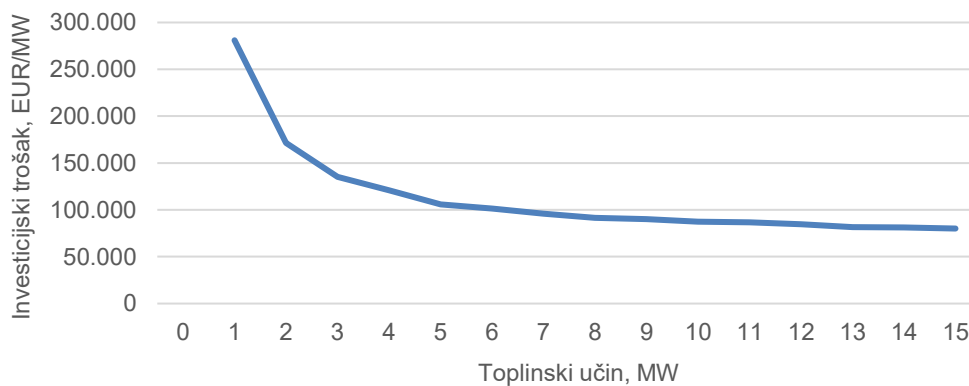
Sl. 6–38 Udio obnovljivih izvora energije u 2028. godini ovisnosti o snazi kotla na biomasu s ugrađenim akumulatorom topline

Iz slike je vidljivo da se instaliranjem akumulatora topline i električnog kotla snage veće od 5 MW zadovoljava uvjet od 50% OIE u cjelokupnom sustavu (prva cjelobrojna veća snaga iznosi 6 MW te daje 57,16 % OIE).

Analizom je potvrđeno da kombinacija električnog kotla i akumulatora topline osigurava veću fleksibilnost sustava, smanjuje potrebnu snagu novog kotla te olakšava integraciju obnovljivih izvora u CTS grada Karlovca ako se koristi zelena električna energija.

Investicijski troškovi

Procjena ulaganja u električni vrelovodni kotao u ovisnosti o instaliranoj snazi prikazana je sljedećom slikom. Ona je temeljena na iskustvenim podacima prema sličnim ostvarenim projektima. Prikazana je ukupna cijena investicijskog troška po MW instalirane snage koja uključuje opremu, odnosno kotao i pripadajuću armaturu te troškove transporta, montaže opreme i puštanja u rad.



Sl. 6–39 Procjena ulaganja u električni kotao

Investicijskom trošku potrebno je dodati i trošak priključenja na elektroenergetsku mrežu koja uključuje projektiranje i izvođenje priključka te standardne troškove izgradnje ili rekonstrukcije mreže. Sam postupak priključenja na mrežu obuhvaća izradu tehničkog rješenja (EOTRP), ugovaranje i dobivanje elektroenergetske suglasnosti (EES), potvrdu projekta i uplatu naknade, izgradnju i puštanje priključka pod napon te sklapanje ugovora o korištenju uz eventualni pokusni rad prije trajnog pogona. Trošak priključenja iznosi otprilike 200 EUR/kW instalirane snage.

Detaljna procjena ulaganja prikaza je u poglavlju Investicijski troškovi, Tab. 10-6. Kao gorivo u ovakvom sustavu koristi se električna energija. S obzirom da je u ovom Strateškom planu naglasak na obnovljivim izvorima energije, električna energija koja bi se koristila za pogon kotla treba biti zelena. To se može ostvariti kroz korištenje zELeN programa HEP-Opskrbe kojim se osigurava da sva potrošena energija potječe isključivo iz obnovljivih izvora. Na taj način sustav osigurava potpunu usklađenost s načelima održivog razvoja i klimatske politike te doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova.

Izvedeni sustavi Hrvatskoj i Europi

U Hrvatskoj zasad nema većih komercijalnih električnih kotlova instaliranih u okviru CTS-a. Međutim, posljednjih godina raste interes za njihovu integraciju, ponajviše zbog sve većeg udjela obnovljivih izvora električne energije u energetsom miks u te mogućnosti fleksibilnijeg upravljanja sustavom grijanja.

U europskim zemljama s velikim udjelom obnovljivih izvora energije, električni kotlovi postaju sve češće korišteno rješenje za centralizirane toplinske sustave. Primjerice, u Danskoj, koja prednjači u primjeni ove tehnologije, nekoliko gradova već intenzivno koristi električne kotlove u svojim sustavima grijanja. Grad Aarhus raspolaže električnim kotlom snage 80 MW koji se aktivira kad su cijene električne energije povoljne, pružajući

fleksibilnost toplinskom sustavu. U Hillerødu je nedavno instaliran električni kotao snage 50 MW čime se ubrzava potpuni prelazak na održivo grijanje bez fosilnih goriva. U Aalborgu su instalirana tri električna kotla ukupne snage 150 MW koji prvenstveno koriste višak električne energije iz obnovljivih izvora, posebice vjetroelektrana, čime se dodatno podržava integracija obnovljivih izvora energije u energetske sustav. Također, u Švedskoj i Njemačkoj se intenzivno integriraju električni kotlovi u toplinske mreže s ciljem iskorištavanja viškova proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih sustava.

6.5.2. Dizalice topline

U okviru Power-to-Heat tehnologija razmatraju se i dizalice topline. To su uređaji koji svojim radom izmjenjuju energiju između dva toplinska spremnika više i niže temperature. Toplinski izvor za dizalicu topline može biti izravno sunčevo zračenje, zrak, tlo, voda te otpadna toplina iz industrijskih procesa. Općenito vrijedi pravilo da je dostupnost toplinskog izvora obrnuto proporcionalna njegovoj djelotvornosti, kao što je prikazano na Sl. 6–40.



Sl. 6–40 Djelotvornost i raspoloživost toplinskih izvora za dizalicu topline

Na toplinski izvor postavlja se niz zahtjeva među kojima su najvažniji da toplinski izvor treba osigurati potrebnu količinu topline u svako doba i na što višoj temperaturi, troškovi za priključenje toplinskog izvora trebaju biti što manji te energija za transport topline od izvora do isparivača dizalice topline treba biti što manja.

U ovom poglavlju analizira se dizalica topline kojoj je izvor topline otpadna toplina s pročištača otpadnih voda grada Karlovca. Taj je novi potencijalni izvor topline obrađen u sklopu idejnog rješenja IRGTK-0325¹⁸.

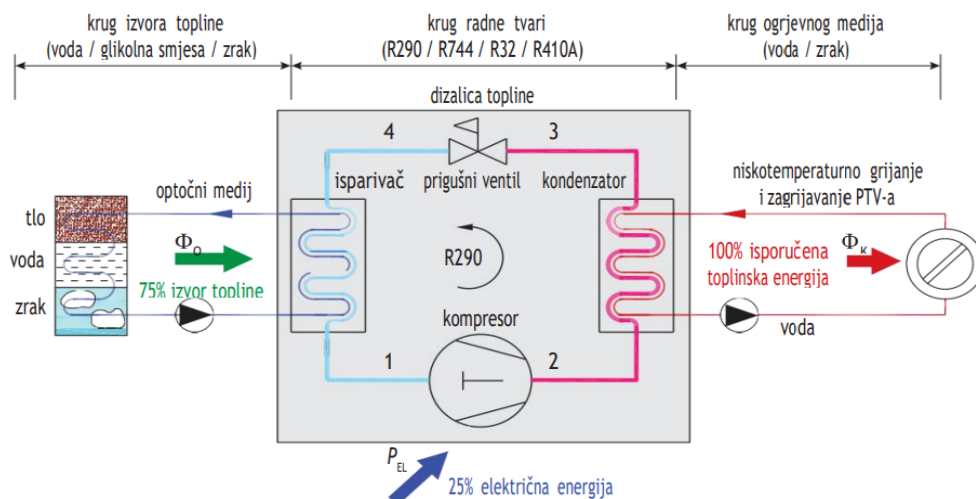
Princip rada

Princip rada svih dizalica topline, neovisno o izvoru topline, temelji se na ljevokretnom kružnom procesu koji je, u idealiziranom obliku, opisan Carnotovim ciklusom. Sastoji se od dviju izotermnih faza (prijenos topline odvija pri stalnoj temperaturi) te dviju adijabatnih faza (nema izmjene topline između radnog medija i okoline, dok se mijenja tlak i temperatura). Iako Carnotov ciklus predstavlja teorijski najpovoljniji slučaj s maksimalnim stupnjem djelovanja, njegova primjena u stvarnim sustavima nije izvediva zbog brojnih praktičnih ograničenja koja uključuju gubitke.

¹⁸ Projekt je izrađen u studenom 2024 od strane tvrtke Smart Termotechnical Solutions d.o.o.

Osnovna shema sustava dizalice topline prikazana je na Sl. 6–41, a uključuje krug izvora topline, krug radne tvari i krug ogrjevnog medija. U konkretnom slučaju, krug izvora topline odnosi se na pročišćene otpadne vode s uređaja, a krug ogrjevnog medija odnosi se na mrežu CTS-a.

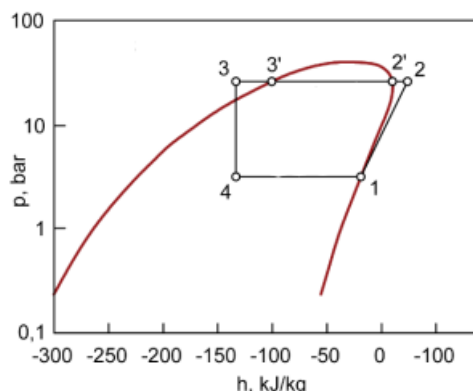
Osnovne komponente dizalice topline sadrže kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač.



Sl. 6–41 Shematski prikaz kompresijske dizalice topline¹⁹

Princip rada dizalice topline kompresorskog tipa relativno je jednostavan, a prikazan je p-h dijagramom na Sl. 6–42. Radni medij, najčešće amonijak, CO₂, R134a i sl., u plinovitom stanju (točka 1) i na relativno niskom tlaku se komprimira na viši tlak pri čemu mu se znatno podiže temperatura (točka 2). S tako povišenom temperaturom radni medij se odvodi u kondenzator gdje mu se oduzima toplota (hladi se) pri čemu mijenja agregatno stanje u kapljevito (radni medij kondenzira – točka 3). Navedeno hlađenje radnog medija izvodi se mrežnom vodom CTS-a koja se pri tome zagrijava. Nužan je uvjet da je temperatura kondenzacije radnog medija viša od temperature mrežne vode što se osigurava dovoljno visokim tlakom kompresije. Nakon kondenzatora, radni medij, sada u kapljevitom stanju, prolazi kroz ekspanzijski ventil gdje mu se smanjuje tlak i temperatura te na ulazu u isparivač (točka 4) dolazi kao smjesa kapljevite i plinovite faze. Nakon toga, dodavanjem toplinske energije (grijanjem) u kondenzatoru radni medij prelazi u potpuno plinovito stanje (točka 1). Za grijanje radnog medija koristi se toplinska energija sadržana u otpadnoj vodi pročišćivača. Trošak prelaska toplinske energije s hladnijeg na topliji spremnik jednak je energiji potrebnoj da se izvede kompresija.

¹⁹ Soldo V., Boban L.: *Podloge za predavanja dizalice topline s obnovljivim izvorima energije*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.



Sl. 6–42 p-h dijagram rada dizalice topline

Radni medij

Odabir radnog medija ovisi o svojstvima koja su bitna za projektiranje komponenti i određivanje parametara sustava poput protočne količine radne tvari, dimenzijama izmjenjivača, veličini kompresora itd. Prilikom izbora radnog medija, sve se više gledaju okolišni aspekti te se kao relevantne mjere uzimaju veličine potencijala razgradnje ozona (eng. Ozone Depletion Potential – ODP) te potencijal globalnog zagrijavanja (eng. Global Warming Potential - GWP)

Kada se govori o radnom mediju, u zadnje vrijeme najčešće se spominju dvije opcije R-134a ili R-1234ze.

R134a ili 1,1,1,2-Tetrafluoroetan (CH_2FCF_3) relativno je neopasan plin, smatra se netoksičnim i nezapaljivim, a počeo se upotrebljavati kao zamjena za R124 (CCL_2F_2) čije je ODP i GWP potencijal postao neprihvatljiv. Kod R134a, ODP je gotovo zanemariv dok je GWP nešto povoljniji (1430) u odnosu na R12, no za današnje kriterije i dalje vrlo visok i kao takav samo uvjetno prihvatljiv u Europskoj Uniji.

Sukladno tome, 2006. godine donesena je prva Uredba o tzv. f-plinovima (EK 842/20065) koja je predviđala smanjenje emisije ovih plinova isključivo kroz smanjenje curenja (nenamjernog ispuštanja u okoliš), odnosno kroz uvođenje procedura za prikupljanje i u konačnici uništenje tih plinova na kraju njihova životnog vijeka. Naknadno je donesena uredba 517/20146 čime je počeo mnogo ozbiljniji proces izbacivanja iz upotrebe HFC spojeva, pa tako i R134a. Uredba generalno ne predviđa zabranu HFC spojeva pa tako ni R134a već uvodi odgovarajuća ograničenja za njihovu upotrebu. Tako vozila i hladnjaci u kućnoj upotrebi, zbog veće sklonosti propuštanjima (curenju) plina, ne smiju koristiti HFC spojeve s GWP većim od 150. Stacionarni uređaji ne smiju koristiti HCF spojeve s GWP potencijalom većim od 2500 (dakle R134a se u Toplani Karlovac može koristiti).

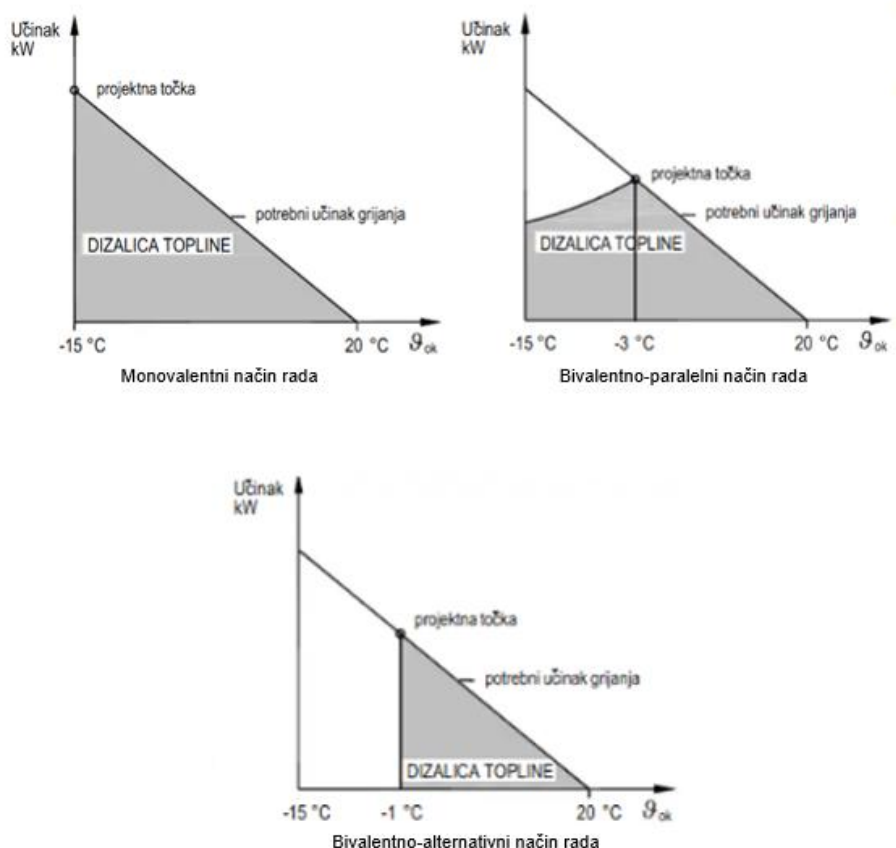
Ipak, problem je nešto složeniji. Godine 2016. 197 zemalja je prihvatilo amandman na Montrealski Protokol, koji predviđa postepeno smanjenje upotrebe HFC spojeva za gotovo 80% u idućih 30 godina. Vezano uz to, Uredba 517/2014 članak 15 i aneks V definiraju maksimalne količine HFC spojeva koje će se do 2030. godine moći staviti na tržište unutar EU. Na taj način ne zabranjuje se niti jedan konkretan HFC spoj, već se samo nameće količinska restrikcija.

Za razliku od R-134a, R-1234ze mnogo je ekološki prihvatljiviji radni medij jer mu GWP iznosi samo 7, što je više redova veličine manja vrijednost u podnosu na GWP koji pokazuje R-134a. Također, R-1234ze nameće se kao prikladna zamjena za R-134a u postojećim uređajima jer mu je COP kod dizalica topline bez međuhladnjaka (intercooler) gotovo identičan.

Načini rada dizalice topline

Dizalice topline mogu raditi u različitim režimima ovisno o konfiguraciji sustava i vanjskim uvjetima. U monovalentnom načinu rada dizalica topline samostalno pokriva sve toplinske potrebe sustava tijekom cijele godine. Međutim, u uvjetima vrlo niskih vanjskih temperatura, kada učinkovitost dizalice opada, često je potrebno uključiti dodatni izvor topline. U takvom slučaju primjenjuje se bivalentni – paralelni način rada pri kojemu dizalica topline i pomoćni sustav (npr. plinski ili električni kotao) istodobno sudjeluju u osiguravanju potrebne toplinske energije. Treći način rada je bivalentno-alternativni kod kojeg je dizalica topline do određene temperature jedini izvor topline, a kada temperatura izvora padne ispod minimalne potrebne, uključuje se drugi izvor topline (npr. plinski ili električni kotao), a dizalica topline prestaje s radom. Grafički je to prikazano sljedećom slikom.

Mogući načini rada relevantni za grad Karlovac je bivalentno-paralelni način rada, a upravo zbog velikog toplinskog konzuma koji je potrebno zadovoljiti.



Sl. 6–43 Načini rada dizalice topline

Tehničke karakteristike

Izvor topline za pogon dizalice topline u ovom će slučaju biti otpadna voda s Uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u Karlovcu (UPOV). UPOV Karlovac izgrađen je 2011. godine kao prvi infrastrukturni projekt u Hrvatskoj financiran europskim sredstvima (ISPA). Njegova osnovna funkcija je pročišćavanje otpadnih voda grada Karlovca i grada Duge Rese, s kapacitetom od 98.500 ekvivalent stanovnika (ES). Otpadne vode dolaze preko dva kolektora, a pročišćavanje se provodi kroz mehaničko-biološki sustav s tercijskim stupnjem radi učinkovitog uklanjanja fosfora i dušika.

Postrojenje uključuje mehaničku obradu (rešetke, mastolov, pjeskolov, primarni taložnik), biološku obradu (anaerobni i bioaeracijski bazeni s denitrifikacijom) te sekundarne taložnike. Mulj se stabilizira aerobno i anaerobno pri čemu nastaje bioplin. Od 2023. godine provodi se dodatno solarno sušenje mulja do 90% suhe tvari.

Pročišćene otpadne vode sa uređaja se ispuštaju u rijeku Kupu. Uprosječni protok otpadne vode u pročišćivaču varira od 200 do 250 l/s, odnosno od 720 do 900 m³/h, prosječne temperature od 13°C – 16°C. Upravo ova pročišćena otpadna voda s relativno visokom temperaturom (pogotovo ako ju se promatra tijekom zimskih mjeseci) osnova je za ugradnju dizalice topline voda/voda kako bi se iskoristila ta vrsta toplinske energije te kako bi ju se uključilo u opskrbu grada Karlovca.

S obzirom na protok pročišćene vode, predviđa se ugradnja dvije dizalice topline kompresorskog tipa, pojedinačne maksimalne toplinske snage 3,7 MW.



Sl. 6–44 Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Karlovac (Gornje Mekuše)

U nastavku je dana tablica sa tehničkim karakteristikama odabrane dizalice topline te udjelu proizvedene toplinske energije i OIE u 2030. godini.

Tab. 6-11 Tehničke karakteristike dizalice topline

Stavka		Iznos
Nominalna toplinska snaga		2 x 3,7 MW
Radni medij		R-134a ili R-1234ze
COP		3,023
Dizalica topline	Udio proizvedene toplinske energije 2028. godini	29,74 %
	Udio OIE u 2028. godini*	19,89 %
Dizalica topline + akumulator topline	Udio proizvedene toplinske energije 2028. godini	60,11 %
	Udio OIE u 2028. godini*	40,21 %

U ovoj analizi naglasak nije na ekonomskoj isplativosti, već na maksimalnom tehničkom angažmanu dizalice topline bez obzira na troškove. Prema provedenoj analizi, sama dizalica topline može osigurati najviše 29,74 % ukupno potrebne toplinske energije u 2028. godini. Jasno je da korištenjem dizalice topline u kombinaciji s akumulatorom topline, kapaciteta 150 MWh, udio proizvedene toplinske energije raste, u ovom slučaju na 60,11 % ukupno potrebne toplinske energije u 2028. godini.

Međutim, iako je ukupni udio proizvedene toplinske energije iz dizalice topline i akumulatora topline iznad 50%, važno je istaknuti da se ukupna proizvedena toplinska energija po stajalištima sadašnje regulative ne može u potpunosti klasificirati kao obnovljiva, već samo njezin određeni udio (66,9 %), a kako je objašnjeno u nastavku.

Naime, sukladno Direktivi (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (preinaka), dizalica topline smatra se obnovljivim izvorom pod uvjetom da konačno proizvedena energija značajno premašuje primarni unos energije potrebne za pogon dizalice topline (čl. 7 st. 2). Konkretno, to znači da faktor sezonske učinkovitosti SPF (eng. Seasonal Performance Factor) sukladno Prilogu VII dio A Direktive (EU) 2018/2001 mora zadovoljavati slijedeći uvjet:

$$SPF > 1,15 \cdot \frac{1}{\eta}$$

gdje je :

SPF - faktor sezonske učinkovitosti

η - učinkovitost pretvorbe, odnosno omjer između ukupne bruto proizvodnje električne energije i potrošnje primarne energije u proizvodnji električne energije (prosjeak EU).

S obzirom da predložena dizalica topline cijele godine radi u jedinstvenom nepromjenjivom režimu, SPF analizirane dizalice topline identičan je COP-u i iznosi 3,0. Naime, izlazna temperatura mrežne vode iz dizalice topline uvijek je 75°C, zbog čega je i kondenzacija radnog medija uvijek na 78°C. Također, temperatura toplinskog izvora (otpadne vode) uvijek je 13°C, što rezultira konstantnom i nepromjenjivom temperaturom kondenzacije radnog medija od 6°C.

Što se tiče faktora učinkovitosti pretvorbe, on je za 2024. godinu na razini EU iznosio približno 0,669.²⁰ Konačno, treba naglasiti da se sukladno Direktivi 2018/2001 (prilog VII) kao obnovljiva energija proizvedena iz dizalice topline, priznaje samo energija preuzeta iz okoline. Dakle, ukupno proizvedena energija umanjena je za potrošnju električne energije, a što je definirano slijedećim izrazom:

$$E_{RES} = Q \cdot \left(1 - \frac{1}{SPF}\right)$$

gdje je :

SPF - faktor sezonske učinkovitosti

Q - ukupna uporabljiva topline iz dizalice topline

E_{RES} - ukupna topline iz dizalice topline priznata kao obnovljiva.

U konkretnom slučaju odabrane dizalice topline, kao obnovljiva energija priznaje se 66,9% od ukupno proizvedene toplinske energije te se instalacijom same dizalice topline, odnosno dizalice topline i akumulatora topline, ne postiže uvjet od 50 % OIE u 2028. godini.

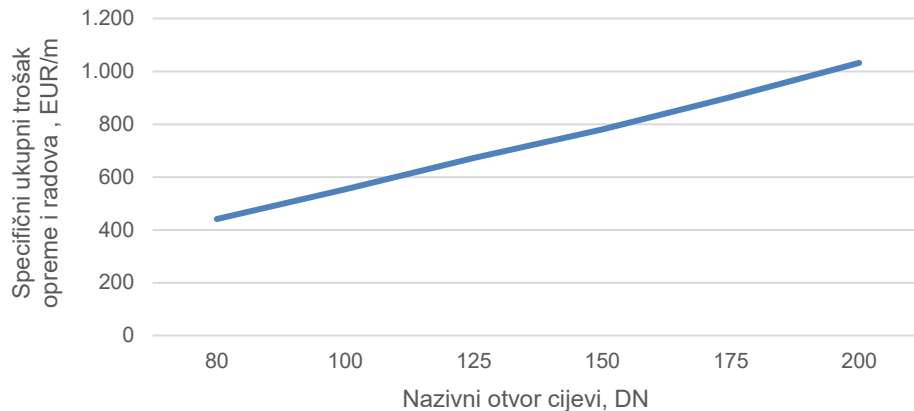
Napomena: mogućnost da se ukupno proizvedena toplinska energija prizna kao obnovljiva korištenjem obnovljive, „zelene“ električne energije nije prepoznata u Direktivi 2018/2001 te se dizalica topline s tog stajališta trenutno može promatrati samo kao prijelazno rješenje u postizanju 100 % obnovljivih izvora energije u sustavu. Nakon usklađivanja nacionalnih propisa s Direktivom (EU) 2023/2413 (RED III) topline iz dizalice topline bit će u cijelosti priznata kao obnovljiva ukoliko se za njihov pogon koristi električna energija iz obnovljivih izvora, potvrđena jamstvima podrijetla (GoO - Guarantees of Origin) ili vlastitom proizvodnjom.

Investicijski troškovi

Za velike industrijske dizalice topline očekivana visina investicije za strojarski dio kreće se u rasponu od 600 do 1200 EUR/kW_t. Za konkretan slučaj dizalice topline na otpadnu vodu sa zadanim parametrima dobivena je ponuda proizvođača koja iznosi 105.000 EUR/MW, a odnosi se na kaskadno spojene dizalice topline i kaskadni upravljač. Detaljna procjena ulaganja prikaza je u poglavlju Investicijski troškovi, Tab. 10-7.

Uz investicijske troškove za samu dizalicu topline, potrebno je sagraditi spojni vrelovod od lokacije UPOV-a u Gornjem Mekušju do priključne stanice na lokaciji Gradske toplane. Ukupna zračna udaljenost tih lokacija iznosi 3 km. U nastavku je prikazan graf specifičnih troškova podzemnog polaganja toplovoda koji je čelična cijev izolirana mineralnom vunom.

²⁰ EMBER (<https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2025/2024-at-a-glance/>)



Sl. 6–45 Specifični troškovi podzemnog polaganja toplovoda

Izvedeni sustavi

U Hrvatskoj ne postoje razvijeni CTS-ovi većeg kapaciteta koji koriste dizalice topline, iako postoji značajan tehnički i energetski potencijal za njihovu primjenu. HEP je za lokaciju pogona TE-TO Zagreb razmatrao i analizirao potencijalne primjenjive koncepte dizalica topline tipa voda-voda za proizvodnju toplinske i rashladne energije, međutim to je ostalo samo na razmatranjima i izradi studije varijanti.

Za razliku od Hrvatske, u Europi postoje konkretni primjeri centraliziranih toplinskih sustava koji koriste dizalice topline na pročišćene otpadne vode za opskrbu daljinskim toplinskim mrežama.

Wien Energie je 2023. godine u Beču pokrenula jedan od najvećih europskih projekata dizalica topline na otpadne vode. Prva faza obuhvaća tri jedinice snage 55 MW, a do 2027. godine planira se proširenje na ukupno 110 MW. Sistem koristi otpadnu vodu s izlaznom temperaturom od 11 - 12 °C zimi i do 24 - 25 °C ljeti. Toplinska energija iz pročišćene otpadne vode, koja se hladi za oko 6 °C, koristi se putem dizalice topline za zagrijavanje vode u sustavu daljinskog grijanja na približno 90 °C. Projekt je vrijedan oko 70 milijuna EUR i pridonosi značajnim uštedama CO₂ emisija.

Njemačke tvrtke Hamburg Wasser i Hamburg Energie 2022. godine krenule su razvijati sustav sa četiri dizalice topline od po 15 MW (ukupno 60 MW) za opskrbu Hamburga. Sustav će se nalaziti u postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda Dradenau. Oprema se planira integrirati u daljinsku toplinsku mrežu grada, s projektom puštanja u pogon tijekom 2025. godine. Sustav će opskrbljivati toplinom više od 39.000 kućanstava i smanjiti emisije CO₂ za otprilike 66.000 tona godišnje, a vrijednost samog projekta iznosi 60 milijuna eura. Planirani početak rada postrojenja je tijekom 2026. godine.

Energetski operater E.ON u švedskoj luci Malmö postavio je četiri dizalice topline, svaka po 10 MW. Toplinski izvor za rad dizalice topline je otpadna voda, prosječne temperature 14 °C koja se hladi na 8 °C te preko postrojenja dizalice topline zagrijava vodu u CTS sustavu do 66 °C. Kao radni medij u dizalici topline koristi se amonijak, a godišnja proizvodnja topline pomoću dizalice topline iznosi 200 GWh. U slučajevima kada dizalica topline ne može

osigurati potrebnu temperaturu mrežne vode, a uslijed povećanog konzuma, mrežna voda se propušta kroz izmjenjivače topline u spalionici otpada. Cijeli sustav pušten je u rad krajem 2017. godine te opskrbljuje oko 10 000 domaćinstava.

Najveće postrojenje dizalice topline na otpadne vode u svijetu nalazi se u Stockholmu, a počelo je s radom 1986. godine s naknadnim proširenjima. Postrojenje se sastoji od sedam dizalica ukupnog kapaciteta 225 MW, a koristi otpadnu vodu iz postrojenja Henriksdal kako bi zagrijavala oko 95.000 stanova tijekom zime i pružala hlađenje ljeti. Godišnja proizvodnja toplinske energije iznosi 1.235 GWh.

6.6. Hibridna postrojenja

Jedan od pristupa koji se može razmatrati u kontekstu dekarbonizacije CTS-a u Karlovcu je primjena hibridnih postrojenja. Riječ je o sustavima koji kombiniraju najmanje dvije različite tehnologije za proizvodnju toplinske, a po potrebi i električne energije pri čemu se posebno ističe spoj fotonaponskih sustava i tehnologija koje koriste električnu energiju za proizvodnju topline, poput električnih kotlova ili toplinskih pumpi.

Cilj ovakvih rješenja je povećanje fleksibilnosti rada sustava, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima te bolje iskorištavanje lokalno dostupnih izvora energije. Hibridna postrojenja također mogu doprinijeti optimizaciji troškova i učinkovitijem usklađivanju proizvodnje s promjenama potražnje, osobito u razdobljima kada su dostupni viškovi električne energije iz obnovljivih izvora.

U ovom poglavlju naglasak se stavlja na tehnologije fotonaponskih panela, dok su električni kotlovi i dizalice topline detaljnije opisani u prethodnom poglavlju 6.5.

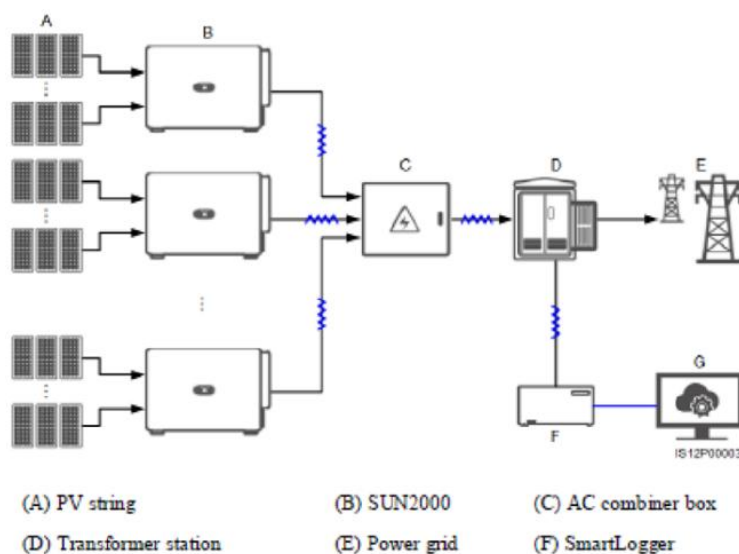
6.6.1. Fotonaponska elektrana

Sunčevo zračenje se može iskoristiti za proizvodnju električne energije u fotonaponskom postrojenju – sunčanoj elektrani. Osnova za pretvorbu energije zračenja u električnu energiju je fotonaponski modul. Fotonaponski moduli se sastoje od niza sunčanih ćelija električki spojenih u voodopornom kućištu. Odlika fotonaponskog modula je da u osvijetljenom stanju proizvodi istosmjerni napon. Ako je na modul spojeno trošilo, poteći će istosmjerna struja.

Fotonaponsko polje se sastoji od više sunčanih fotonaponskih modula međusobno serijski ili paralelno spojenih u nizove (stringove). Dakle, veći broj modula povezuje se serijski u niz tzv. string, te se takvi nizovi povezuju paralelno što je potrebno radi dobivanja optimalnih uvjeta za rad sklopa izmjenjivača (invertera) koji pretvaraju istosmjerni napon u mrežni, izmjenični napon 400 V i frekvencije 50 Hz. U izmjenjivačima se sinkronizira napon i frekvencija s mrežnim naponom i frekvencijom elektroenergetskog sustava. Izmjenjivači imaju veliku ulogu za siguran i pouzdan rad same elektrane.

Sunčana elektrana se sastoji od osnovnih dijelova koji se mogu podijeliti na sljedeće grupe:

- fotonaponski moduli
- izmjenjivači (inverteri)
- kabelski razvod
- razvodni ormari
- transformatorske stanice
- nadzorno-upravljački sustav elektrane
- konstrukcija i ostale građevine.



Sl. 6–46 Principijelna shema fotonaponskog sustava

Sunčana elektrana predstavlja sustav sastavljen od:

- fotonaponskog polja, koje je sastavljeno od određenog broja FN modula koji su električki spojeni na odgovarajući način te postavljeni na metalnu konstrukciju za montažu panela
- instalacije priključnih vodova fotonaponskog polja s razvodnim ormarima u kojima je smještena oprema zaštite i nadzora
- izmjenjivača (fotonaponskih pretvarača) koji pretvaraju istosmjernu (DC) struju u trofaznu izmjeničnu (AC) struju sinkroniziranu s elektroenergetskom mrežom
- priključnog voda za spoj na elektroenergetsku mrežu
- pristupnog puta do fotonaponskog polja
- odgovarajuće sigurnosne opreme.

Fotonaponski moduli

Fotonaponski generator sastavljen je od međusobno povezanih fotonaponskih modula koji svjetlosnu energiju sunčevog zračenja, pomoću fotoelektričnog efekta, neposredno pretvaraju u istosmjernu električnu energiju.

Današnje tržište fotonaponskih modula nudi širok raspon tehnologija koje se međusobno razlikuju po učinkovitosti, cijeni, mehaničkoj izvedbi i primjeni. Odabir odgovarajuće tehnologije ovisi o prostornim, ekonomskim i energetske zahtjevima projekta, a u kontekstu hibridnih postrojenja posebno se vrednuje energetska gustoća (izražena u W/m^2), stabilnost proizvodnje i dugotrajna pouzdanost. U nastavku je dan detaljniji pregled najčešćih tehnologija koje se primjenjuju na europskom tržištu.

Fotonaponski moduli se montiraju na mehaničku konstrukciju koja mora biti propisno temeljena prema statičkom proračunu. Uz elektranu predviđena je ugradnja mjernih i komunikacijskih uređaja koji omogućuju daljinski nadzor rada elektrane te praćenje proizvodnje električne energije.

Monokristalni silicij (mono-Si)

Monokristalni moduli izrađeni su od silicija jedinstvene kristalne strukture što im omogućuje visoku razinu električne vodljivosti i učinkovitosti. Tipična učinkovitost komercijalno dostupnih modula iznosi 20–22 %, s laboratorijskim vrijednostima iznad 25 %. Prednosti uključuju visoku energetska gustoću što ih čini osobito pogodnima za instalaciju na krovovima i drugim prostorima ograničene površine. Također se odlikuju dugim vijekom trajanja (više od 25 godina) i stabilnom proizvodnjom u različitim klimatskim uvjetima.

Zahvaljujući naprednim proizvodnim tehnikama ova tehnologija kontinuirano poboljšava otpornost na temperaturne fluktuacije i degradaciju, što dodatno pridonosi njenoj dominaciji na tržištu. Glavni nedostatak je nešto viša cijena po kW, no ona se kompenzira većom proizvodnjom po m².



Sl. 6–47 Monokristalni silicijevi paneli

Polikristalni silicij (poly-Si)

Polikristalni PV moduli izrađeni su od višekristalne strukture silicija, što rezultira nižom učinkovitošću u rasponu od 16–18 %. Prednosti su im povoljnija cijena i veća tolerancija na više temperature, ali zbog veće površine potrebne za istu snagu te smanjenih performansi pri niskom intenzitetu svjetlosti i djelomičnom zasjenjenju, ova tehnologija je u silaznom trendu. Danas se polikristalni moduli primjenjuju uglavnom u velikim, otvorenim elektranama s dostupnim prostorom i manjim investicijskim ograničenjima. U kontekstu hibridnih toplinskih sustava, polikristalna tehnologija ima ograničenu primjenjivost zbog niže energetske gustoće.



Sl. 6–48 Polikristalni silicijevi paneli

Tanki film

Tankoslojna PV tehnologija koristi različite poluvodičke materijale kao što su kadmij telur (CdTe) i bakar-indij-galij-selenid (CIGS), nanasene u tankim slojevima na podlogu od stakla ili polimera. Tipična učinkovitost tankoslojnih modula iznosi 10–14 %, što je niže u usporedbi s kristalnim silicijem, ali ih karakterizira niža cijena po m², fleksibilna izvedba, manja težina i dobro ponašanje pri difuznoj svjetlosti i visokim temperaturama.

Zbog specifičnih svojstava, koriste se u nišnim aplikacijama: fasadnim integracijama, pokretnim objektima i montaži na zakrivljenim površinama. U projektima dekarbonizacije toplinarstva njihova primjena je ograničena, osim u slučaju arhitektonskih ograničenja ili kada je potrebna integracija u građevne elemente.



Sl. 6–49 CdTe (lijevo) i CIGS (desno) tehnologija

CdTe (lijevo) i CIGS (desno) tehnologija

Bifacijalni PV moduli omogućuju proizvodnju električne energije s obje strane modula – prednje (klasična apsorpcija izravne sunčeve svjetlosti) i stražnje strane (reflektirano zračenje od podloge). U optimalnim uvjetima (reflektirajuća površina, npr. bijeli šljunak ili beton), bifacijalni moduli mogu ostvariti dodatnih 10–15 % proizvodnje u odnosu na standardne monofacijalne module.

Ova tehnologija sve je češća u većim elektranama postavljenim na tlu, ali se može razmatrati i za infrastrukturne objekte toplinskih sustava, osobito ako postoji mogućnost montaže nad svjetlom ili reflektirajućom podlogom. Dodatna prednost je povećana proizvodnja u jutarnjim i poslijepodnevnim satima, što bolje odgovara dnevnim krivuljama toplinske potrošnje u prijelaznim razdobljima.



Sl. 6–50 Bifacijalni paneli

U nastavku je tablica u kojoj je dana usporedba analiziranih tehnologija fotonaponskih panela.

Tab. 6-12 Usporedba tehnologija fotonaponskih panela

Tehnologija	Učinkovitost [%]	Prednosti	Ograničenja
Monokristalni Si	20 – 22	Visoka učinkovitost, pouzdanost, energetska gustoća	Viša cijena po kW
Polikristalni Si	16 – 18	Niža cijena, poznata tehnologija	Veća površina, niža učinkovitost
Tanki film	10 – 14	Fleksibilnost, niža masa, otpornost na visoke temperature	Niža učinkovitost, ograničena dostupnost
Bifacijalni	+10 – 15% dodatka	Povećana proizvodnja osobito u otvorenim instalacijama	Ovisnost o podlozi, zahtjevnija montaža

Fotonaponski izmjenjivač

Izmjenjivači za fotonaponske elektrane se mogu podijeliti na dvije osnovne podskupine:

- decentralizirano rješenje (engl. String inverter)
- centralizirano rješenje (engl. Centralized inverter)

Decentralizirano rješenje predstavlja rješenje kod kojeg se ugrađuje veći broj manjih izmjenjivača za svaki pojedini niz (distribuirani po cijelom polju). Centralizirano rješenje predstavlja rješenje u kojem se koristi manji broj frekvencijskih pretvarača velike snage.

DC/AC izmjenjivač treba imati ugrađenu zaštitu od otočnog rada fotonaponske elektrane, uređaj sam treba detektirati ispad mrežnog napajanja i u tom slučaju ne smije više plasirati energiju u mrežu. Otočni rad pojedine elektrane u sustavu opasan je za ljude i radnike koji rade na mreži (uvjereni su da nema napona) te za opremu koja bi mogla biti oštećena nestandardnim naponima i frekvencijama mogućim uslijed otočnog rada jedne elektrane.

Izmjenjivači trebaju imati ugrađen MPP 'tracking' sustav, zaštitu od otočnog rada i sve ostale propisane zaštite. Također, DC/AC izmjenjivači trebaju zadovoljiti i sve ostale tehničke parametre koji su propisani elektroenergetskom suglasnošću od strane HEP-ODS.

Uz samu elektranu ugrađuju se i mjerni i komunikacijski uređaj koji omogućuje daljinsko praćenje proizvodnje elektrane.

Montaža fotonaponskih modula na konstrukciju

Nosive konstrukcije fotonaponskih modula odabiru se ovisno o vrsti podloge na koju se postavljaju. Fotonaponski moduli pričvršćuju se za nosače koji su odignuti od podloge i postavljeni pod određenim nagibom. Postoje dva načina postavljanja modula, a to su konfiguracija istok-zapad i konfiguracija jug.

Za konstrukciju orijentacije istok-zapad FN moduli u konfiguraciji mogu biti jedan ili više panela u stupcu po vertikali sa svake strane, odnosno FN moduli istočne i FN moduli zapadne orijentacije. Nagib FN modula definiran je odabirom konstrukcije. Razmak između redova nosivih konstrukcija FN modula treba biti dovoljan da služi za pristup, odnosno redovno održavanje.



Sl. 6–51 Varijanta smještaja FN modula u konfiguraciji istok-zapad

Konstrukcija FN modula južne orijentacije također može koristiti jedan ili više modula položenih u stupcu po vertikali. Sukladno optimalnom razmještaju definira se i azimut ovisno o obuhvatu zahvata.

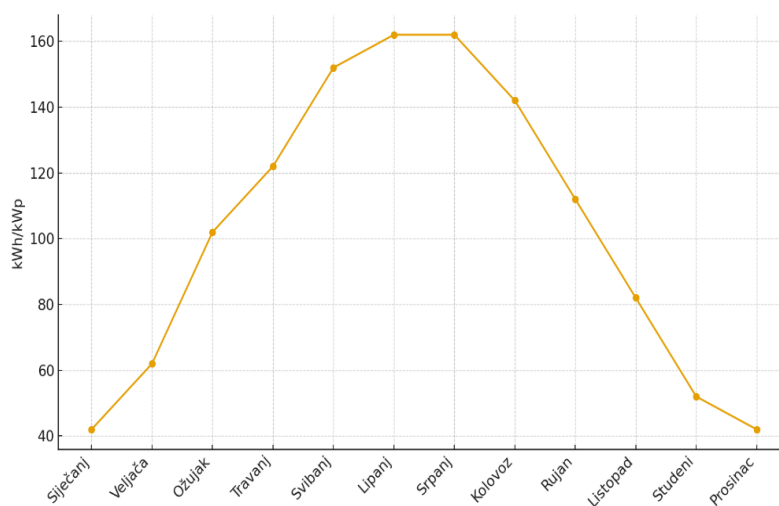


Sl. 6–52 Varijanta smještaja FN modula u konfiguraciji jug

Nosiva konstrukcija mora biti izrađena od trajnih materijala otpornih na koroziju te odgovarajuće nosivosti. Uglavnom se koriste elementi izrađeni od nehrđajućeg čelika (Inox) i legura aluminija. Primarni nosači kao npr. kuke, potpore, vijci, predviđeni za veća naprezanja izrađuju se od inoksa, a profili - šine, na koje se postavljaju nizovi modula su u pravilu od vučenih aluminijevskih profila. Pri odmjerkavanju i planiranju postavljanja potpora i konstrukcije treba se prilagoditi stanju na terenu. Svakako se moraju poštivati dozvoljeni razmaci potpora i nosivih šina, uz odgovarajući broj potpora, čime se smanjuju i točkasta opterećenja nosive konstrukcije.

Procjena potencijala

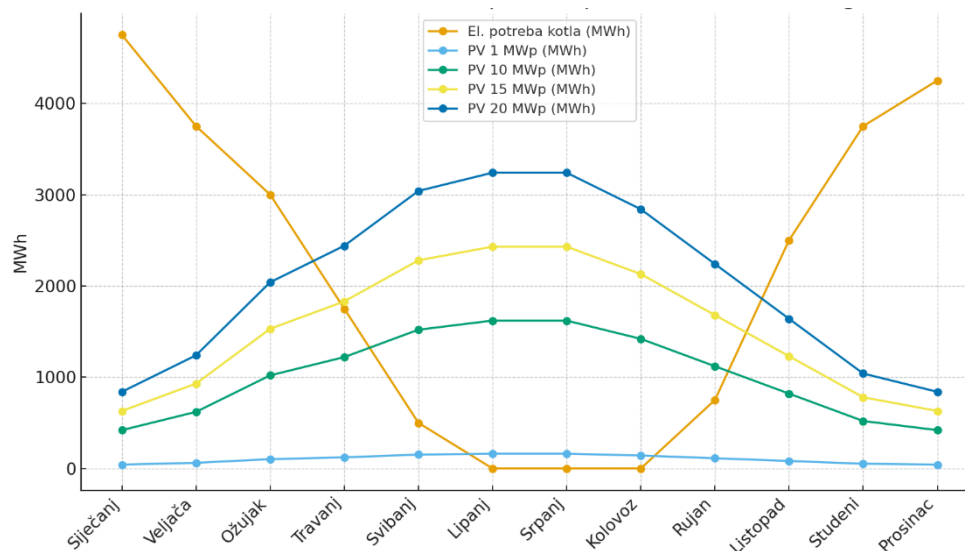
Tipičan godišnji specifični prinos fotonaponske elektrane u Karlovcu iznosi približno 1.234 kWh/kWp, a njegova mjesečna raspodjela prikazana je na sljedećoj slici.



Sl. 6–53 Mjesečni specifični prinos fotonaponskog sustava

Oko 38 % godišnje proizvodnje ostvari u mjesecima lipnju, srpnju i kolovozu, a svega oko 12 % u prosincu, siječnju i veljači. Nasuprot tome, mjesečni profil toplinskih potreba pokazuje da se približno 51 % ukupne godišnje toplinske energije traži upravo u zimskom tromjesečju prosinac–veljača, dok su potrebe tijekom ljeta zanemarive. Posljedica takve

raspodjele jest jasno sezonsko nepodudaranje, u mjesecima s najvećim toplinskim opterećenjem fotonaponska proizvodnja je na minimumu, dok u ljetnim mjesecima, kada je Proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane na vrhuncu, toplinska potražnja ne postoji. To je najbolje vidljivo na sljedećoj slici gdje je prikazan vremenski nesrazmjer proizvodnje i potrošnje električne energije. Za potrošača je odabran ranije izabran kotao snage 6 MW (iz poglavlja 6.5.1) kojem je na godišnjoj razni potrebno 25 GWh električne energije. Ona se proizvodi iz fotonaponskog postrojenja u četiri varijante instalirane snage.



Sl. 6–54 Nepodudarnost fotonaponske proizvodnje i električnih potreba odabranog električnog kotla

Iz prikaza je vidljivo da proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava ne prati vremenski raspored potreba postrojenja. Tijekom ljetnih mjeseci ostvaruju se znatni viškovi proizvodnje, dok su zimi potrebe za električnom energijom veće od dostupne fotonaponske snage. Povećanje instalirane snage povećava ukupnu godišnju proizvodnju, ali ne i stupanj istovremenog pokrivanja potrošnje jer ljetni viškovi ostaju neiskorišteni bez sustava za pohranu električne energije. Potpuno pokrivanje zimskih potreba zahtijevalo bi višestruko veće instalirane snage i velike površine, što nije tehnički ni prostorno opravdano. Usporedbe radi, kada bi se ciljalo na pokrivanje potreba u siječnju, potrebna instalirana snaga fotonapona bi trebala biti oko 120 MWp, što bi zauzelo i do 150 ha zemljišta.

Procjena ulaganja u fotonaponsku elektranu

Ukupna procjena ulaganja u neintegriranu veliku fotonaponsku elektranu (snage do 10 MW) je u rasponu od 500 do 700 EUR/MW_p. U to je uključen trošak ishođenja dokumentacije, opreme, priključka na elektroenergetsku mrežu, građevinskih radovi i ostalih troškovi. Ulaganju je potrebno dodati cijenu zemljišta ako ono nije u vlasništvu.

6.7. Kogeneracijska postrojenja

Kogeneracijsko postrojenje, odnosno postrojenje koje istovremeno proizvodi toplinsku i električnu energiju, predstavlja jedno od najučinkovitijih rješenja za opskrbu energijom u urbanim sredinama. Za razliku od odvojene proizvodnje električne energije u elektranama i topline u kotlovnica, kogeneracijska postrojenja koriste gorivo na način da istodobno proizvode oba oblika energije. Na taj način moguće je iskoristiti i do 90 % sadržane energije goriva, dok se u klasičnoj proizvodnji električne energije bez korištenja toplinskog dijela iskoristi tek 35 do 40 %.

Za pogon kogeneracijskih postrojenja mogu se koristiti različiti izvori energije: prirodni plin, biomasa (peleti i drvena sječka), bioplina iz poljoprivrednih ili komunalnih izvora, vodik te otpad u modernim postrojenjima. Prirodni plin danas još uvijek ima važnu ulogu, osobito zbog razvijene infrastrukture i stabilnosti opskrbe, ali njegova buduća upotreba je vremenski i regulatorno ograničena zbog europskih i nacionalnih ciljeva dekarbonizacije. Zbog toga će dugoročno prioritet imati obnovljivi izvori i rješenja s niskim emisijama ugljika.

Uz potencijalnu izgradnju novog kogeneracijskog postrojenja, dodatno je razmotrena i opcija korištenja otpadne topline iz postojećeg postrojenja BE-TO Karlovac. Riječ je o kogeneracijskom postrojenju na biomasu u vlasništvu tvrtke Šerif d.o.o., s instaliranom električnom snagom od 5,7 MW i toplinskom snagom do 20 MW. Proizvedena toplinska energija koristi se za sušenje sječke u proizvodnji briketa, a višak toplinske energije tehnički bi bilo moguće predavati u toplinsku mrežu grada Karlovca. Iako je tehnički moguće isporučivati višak topline u CTS, takva integracija trenutačno nije moguća zbog ugovornih ograničenja tvrtke Šerif d.o.o. s državom. Višak proizvedene električne energije otkupljuje operator tržišta energije prema tarifi koja je definirana u *Pravilniku o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije* u razdoblju od 14 godina.

6.7.1. Raspoložive tehnologije za proizvodnju toplinske i električne energije

U nastavku se prikazane raspoložive tehnologije pri čemu su plinske turbine i plinski motori tehnologije koje se promatraju u teorijskom smislu radi usporedbe tehničkih značajki, a naglasak se stavlja na kogeneraciju na biomasu i organski Rankineov ciklus uz mogućnost integracije poljoprivrednih ostataka i komunalnog otpada.

Plinske turbine

Plinske turbine u kogeneracijskim postrojenjima rade na principu miješanja prirodnog plina s komprimiranim zrakom i izgaranja u komori izgaranja. Plinovi izgaranja pokreću lopatice turbine, a mehanička energija prenosi se preko zajedničke osovine na generator električne energije. Ispušni plinovi visoke temperature koriste se u kotlovima za oporabu topline za proizvodnju tehnološke pare ili vrelovodne vode, čime se ostvaruje istovremena proizvodnja toplinske i električne energije. Plinske turbine dijele se u dvije osnovne skupine:

- aeroderivativne turbine - temelje se na tehnologiji zrakoplovnih motora, a karakterizira ih manja masa, modularna izvedba, visoka učinkovitost (oko 41 %) te brzo pokretanje i prilagodba opterećenju
- teške industrijske turbine - razvijene su isključivo za stacionarnu primjenu, robusne su konstrukcije s duljim vremenom pokretanja, ali osiguravaju stabilan rad pri stalnim opterećenjima i visoku pouzdanost.

U kombiniranom ciklusu plinske turbine povezuju se s kotlom za oporabu topline i parnom turbinom, čime se postiže viša učinkovitost i mogućnost opskrbe toplinskom energijom centraliziranih toplinskih sustava. Ukupna učinkovitost u takvim sustavima može dosegnuti 85 do 90 %, dok se jednostavni ciklus plinske turbine kreće na razini 38 do 41 %. U praksi su u europskim toplinskim mrežama najčešće primjenjive jedinice snage do 50 MW_e jer se veći kapaciteti teško uklapaju u lokalne centralne toplinske sustave.



Sl. 6–55 Plinska turbina

Strateški gledano, prednost plinskih turbina leži u fleksibilnosti jer mogu relativno brzo reagirati na promjene u opterećenju i cijeni električne energije čime mogu služiti kao balansirajući izvori u sustavima s visokim udjelom obnovljivih izvora. Njihova glavna ograničenja proizlaze iz ovisnosti o prirodnom plinu i emisija CO₂ što nosi rizike unutar ETS sustava. Dugoročno se predviđa veća uloga alternativnih goriva poput biometana i vodika. Već danas postoje modeli turbina koje mogu koristiti mješavine prirodnog plina i vodika, a razvoj tehnologije usmjeren je na povećanje dopuštenog udjela vodika do 100 %.

Plinski motori

Plinski motori koriste ciklus unutarnjeg izgaranja u kojem se mješavina goriva i zraka izgaranjem pretvara u mehaničku energiju koja pokreće generator električne energije. Nastala toplota odvodi se putem rashladne vode, uljnog sustava i ispušnih plinova, a može se iskoristiti za proizvodnju tople vode ili pare. Na taj se način ostvaruje istovremena

proizvodnja električne i toplinske energije s ukupnim stupnjem korisnosti koji u optimalnim uvjetima doseže 85 do 90 %.

Plinski motori obično se koriste u rasponu snaga od nekoliko stotina kW do par MW. Zbog modularne izvedbe moguće je paralelno spajanje većeg broja motora čime se postiže ukupna snaga koja odgovara potrebama toplinskog sustava. Električna učinkovitost plinskih motora kreće se u rasponu od 40 do 45 %, dok omjer toplinske i električne snage tipično iznosi 0,9 - 1,1.



Sl. 6–56 Plinski motor

Prednost plinskih motora je visoka učinkovitost u djelomičnom opterećenju, brza prilagodba promjenama u radu te relativno niska investicijska cijena u usporedbi s plinskim turbinama. Uz to, omogućuju visok stupanj raspoloživosti zahvaljujući modularnosti što znači da u slučaju kvara jedne jedinice, ostale mogu nastaviti rad.

S druge strane, plinski motori imaju određena ograničenja. Održavanje je zahtjevnije i učestalije nego kod plinskih turbina, zbog većeg broja pokretnih dijelova i mehaničkog trošenja. Karakterizira ih i veća razina buke i vibracija što zahtijeva dodatne mjere zaštite. U pogledu emisija, plinski motori imaju višu razinu NO_x i CO emisija u usporedbi s turbinama pa je za veća postrojenja često potrebna dodatna oprema za pročišćavanje ispuha.

Zaključak je da iako plinski motori nude fleksibilnost i mogućnost rada na bioplin ili biometan, u praksi se uglavnom oslanjaju na prirodni plin te time ne pridonose dekarbonizaciji, a dostupnost obnovljivih plinova je ograničena. Iz tog razloga nova ulaganja u tu tehnologiju nemaju strateško opravdanje.

Kogeneracija na biomasu

Kogeneracijska postrojenja na biomasu istodobno proizvode toplinsku i električnu energiju iz goriva poput drvne sječke, peleta, briketa, poljoprivrednih ostataka (slama, kukuruzovina, ljuške) te biorazgradivog komunalnog otpada. Uvođenjem poljoprivrednih ostataka i biorazgradivog otpada u gorivni miks smanjuje se pritisak na šumske resurse i količina otpada koja završava na odlagalištima. Međutim, zbog varijabilnog sastava i kvalitete takvih goriva nužna je primjena kotlova prilagođene konstrukcije i naprednih sustava pročišćavanja dimnih plinova.

Osnovni princip rada temelji se na pretvorbi kemijske energije goriva u toplinu i električnu energiju kroz dva osnovna procesa:

- izravno izgaranje - biomasa sagorijeva u kotlu, toplina se koristi za proizvodnju pare, a para pokreće turbogenerator. Toplina iz kondenzatora i dimnih plinova prenosi se u toplinski sustav.
- plinifikaciju - biomasa se pretvara u sintetski plin koji se nakon pročišćavanja koristi u motorima s unutarnjim izgaranjem ili manjim plinskim turbinama. Na taj se način ostvaruje veća fleksibilnost i mogućnost rada u postrojenjima manjih snaga.



Sl. 6–57 Parna turbina s kotlom na biomasu

Tehničke značajke ovih sustava uključuju električnu učinkovitost u rasponu od 20 do 30 % te ukupnu učinkovitost u kogeneracijskom radu od 75 do 85 %. Struktura proizvodnje toplinski je orijentirana što znači da na svaku proizvedenu jedinicu električne energije dolaze dvije do četiri jedinice toplinske energije.

Osim drvne sječke i peleta, u postrojenjima se mogu koristiti i poljoprivredni ostaci te biorazgradivi dio komunalnog otpada što doprinosi smanjenju količine otpada i potiče kružno gospodarstvo. Potrebno je naglasiti da biomasa zahtijeva pouzdanu opskrbu, značajne troškove transporta i velike skladišne prostore. Budući da zauzima veliku volumen

i ima promjenjivu kvalitetu, osobito po udjelu vlage, pouzdan rad cjelokupnog sustava uvelike ovisi o organizaciji logistike i predobradi goriva.

Organski Rankineov ciklus

ORC tehnologija koristi organsko radno sredstvo s nižom temperaturom isparavanja od vode što omogućuje proizvodnju električne energije i topline iz izvora niskih i srednjih temperatura. To je osobito korisno kod primjene biomase, geotermalne energije ili otpadne topline iz industrijskih procesa (detaljnije opisano u poglavlju 6.3.3).

ORC sustavi imaju prednost u tome što mogu učinkovito iskoristiti izvore topline koji su preniski za klasične parne turbine. Tipični raspon snaga kreće se od nekoliko stotina kWe do nekoliko MWe što ih čini pogodnima za kombiniranje s drugim tehnologijama.

U sustavima se mogu koristiti kao dopuna baznim kotlovima pri čemu osiguravaju dodatnu električnu energiju bez povećanja potrošnje goriva. Njihovo ograničenje je niži stupanj električne učinkovitosti (10–20 %), no ukupna učinkovitost raste kada se toplina iz kondenzatora koristi u toplinskoj mreži.

6.7.2. Analiza mogućnosti sudjelovanja na tržištu električne energije

Regulatorni okvir i poticajni mehanizmi

Regulatorni okvir za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u Hrvatskoj definiran je Zakonom o obnovljivim izvorima energije i visokoj učinkovitosti kogeneracije (NN 138/21, 83/23 i 78/25) te pripadajućim podzakonskim aktima. Sustav poticanja proizvodnje razvijao se kroz dva osnovna modela:

- zajamčeni otkup električne energije (feed-in tarife) - primjenjivao se u prvim fazama razvoja, osiguravajući proizvođačima unaprijed definiranu otkupnu cijenu i stabilne prihode čime je omogućeno pokretanje prvih projekata.
- tržišne premije (feed-in premium) – uvedene su 2022. godine, a temelje se na konceptu da proizvođač prodaje električnu energiju na tržištu, a HROTE isplaćuje premiju kojom se pokriva razlika između tržišne cijene i referentne vrijednosti određene natječajem. Time se osigurava određena stabilnost prihoda, iako dio tržišnog rizika preuzima sam proizvođač

Za postojeća postrojenja koja su ušla u sustav feed-in tarifa poticaji vrijede do isteka ugovora, dok novi projekti mogu ostvariti potporu isključivo kroz tržišne premije. Bez uključivanja u sustav potpora, većina kogeneracijskih projekata teško može biti financijski održiva zbog visokih investicijskih i operativnih troškova, kao i sezonskih oscilacija u potrošnji toplinske energije.

Kogeneracijska postrojenja, da bi ostvarila pravo na poticaje, moraju steći status povlaštenog proizvođača. To uključuje ispunjavanje tehničkih i regulatornih uvjeta poput energetske učinkovitosti, mjerenja isporučene energije i priključenja na mrežu. Kvote za poticanje definirane su kroz programe državnih potpora, a u natječajima se za svaku tehnologiju određuju maksimalne referentne vrijednosti.

U dosadašnjim natjecajima naglasak je bio na solarnim elektranama i vjetroelektranama zbog nižih investicijskih troškova i brže realizacije, dok su kogeneracije na biomasu i bioplin obuhvaćene u manjim kvotama te uz veću konkurenciju. To znači da projekti kogeneracije moraju zadovoljiti stroge kriterije visokoučinkovite kogeneracije, dokazati održivost goriva i imati osigurane stalne korisnike toplinske energije kako bi ostali konkurentni.

Operativne mogućnosti na tržištu

Ekonomski potencijal kogeneracijskog postrojenja ne proizlazi samo iz ušteda visoke učinkovitosti, već i iz mogućnosti aktivnog sudjelovanja na tržištu električne energije. Proizvedena električna energija može se plasirati na dva načina te tako postrojenje može optimizirati prihode ovisno o kretanju cijena u različitim satima i razdobljima godine, a to su:

- dan-unaprijed tržištu (day-ahead) - prodaja se temelji na prognozama potrošnje i proizvodnje,
- unutar-dnevnom tržištu (intraday) - omogućuje prilagodbu ponude u kraćim vremenskim intervalima u slučaju odstupanja od prognoza.

Dodatnu vrijednost donosi sudjelovanje na tržištu uravnoteženja, gdje kogeneracijska postrojenja, zahvaljujući brzom odzivu, mogu pružati sekundarnu i tercijarnu regulaciju frekvencije. Operator prijenosnog sustava (u ovom slučaju HOPS) ih u tom slučaju angažira kako bi u kratkom roku povećali ili smanjili proizvodnju čime se održava ravnoteža u elektroenergetskom sustavu. Za pružanje ovih usluga postrojenja ostvaruju naknadu što predstavlja dodatan prihod neovisan o klasičnoj prodaji električne energije.

Da bi kogeneracijsko postrojenje postalo pružatelj usluge uravnoteženja u elektroenergetskom sustavu, potrebno je proći postupak pretkvalifikacije koji provodi HOPS. Tijekom tog postupka dokazuje se tehnička sposobnost postrojenja ili agregiranih jedinica za pružanje sekundarne i tercijarne regulacije frekvencije. Nakon uspješne pretkvalifikacije izdaje se Potvrda o osposobljenosti te se sklapa Ugovor o pružanju usluge uravnoteženja čime postrojenje stječe pravo sudjelovanja na tržištu uravnoteženja. Sam ugovor temelji se na relevantnim mrežnim pravilima, pravilima o organiziranju tržišta električne energije i pravilima uravnoteženja sustava. Njime se definiraju obveze pružatelja, tehnički zahtjevi, način obračuna i financijska jamstva potrebna za osiguranje pouzdanosti pružanja usluge. Financijsko jamstvo u pravilu se daje u obliku depozita ili bankarske garancije, a njegovo trajanje i visina propisani su uvjetima nadmetanja i ugovornim odredbama.

Nakon sklapanja ugovora, postrojenje može sudjelovati u javnim natjecajima koje HOPS redovito raspisuje za nabavu rezervi snage i energije uravnoteženja. Natjecaji se provode u dnevnim, tjednim ili unutar-dnevnim intervalima, a uvjeti uključuju minimalnu veličinu ponude, zahtijevano vrijeme aktivacije i tehničku pouzdanost jedinice.

6.7.3. Analiza priključne snage i priključka na elektroenergetsku mrežu

Toplana je trenutačno priključena na mrežu HEP-ODS-a putem razine napona 10 kV i raspolaže odobrenom priključnom snagom od 2,5 MW. Postojeći transformatori i rasklopna

postrojenja koriste se isključivo za napajanje vlastite potrošnje toplane (pumpe, ventilatori, automatika).

Za potrebe buduće kogeneracije, procijenjene snage 1,5 MW električne i 6 MW toplinske, pri čemu toplinska snaga proizlazi iz koncepta korištenja akumulatora topline s ciljem postizanja 50% udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji toplinske energije u 2028. godini, potrebno je provjeriti može li postojeći priključak prihvatiti dodatno opterećenje, tj. istovremeno napajanje vlastite potrošnje i predaju električne energije u mrežu. Preliminarnu procjenu izrađuje projektant usporedbom snage postojećih transformatora i odobrene priključne snage s planiranom snagom kogeneracije dok konačne uvjete priključenja utvrđuje HEP-ODS kroz postupak izrade Elaborata optimalnog tehničkog rješenja (EOTRP). Ako raspoloživi kapacitet nije dostatan, potrebno je planirati rekonstrukciju transformatorske stanice ili ugradnju dodatnog transformatora.

Tab. 6-13 Tehničke karakteristike odabranog kogeneracijskog postrojenja

Stavka	Jedinica	Novo postrojenje
Neto električna snaga	MW	1,5
Toplinska energija	MW	6
Proizvodnja električne energije u 2028. godini	MWh/god	8.187,55
Proizvodnja toplinske energije u 2028. godini	MWh/god	25.318,82

Budući da toplana trenutno nema zasebno mjerno mjesto za proizvodnju električne energije, za prodaju na tržištu nužna bi bila ugradnja certificiranog obračunskog mjernog mjesta. Time će se jasno razdvojiti potrošnja toplane i električna energija predana u mrežu. Sustav zaštite i daljinskog nadzora morat će se uskladiti s tehničkim uvjetima HEP-ODS-a (npr. nadnaponska i podnaponska zaštita, zaštita od otočnog rada, sinkronizacija), kako bi se osigurala sigurna integracija u distribucijsku mrežu.

6.7.4. Procjena ulaganja

Procjena ulaganja u kogeneracijsko postrojenje obuhvaća troškove nabave i ugradnje opreme, izvođenja građevinskih radova, priključenja na elektroenergetsku mrežu, građevinskih i okolišnih dozvola te troškove projektiranja, stručnog nadzora i puštanja u pogon.

U nastavku je prikazan objedinjeni pregled procjene ulaganja za tri tehnologije kogeneracije (plinski motor, parna turbina s kotlom na biomasu i ORC), za toplinske učine 5 MW i 10 MW te odgovarajuće instalirane električne snage izvedene iz tipičnih omjera topline i električne energije za svaku tehnologiju. Tablica prikazuje raščlambu ulaganja po standardnim stavkama (oprema, građevinski radovi, projektiranje/nadzor/puštanje u pogon, priključak na elektroenergetsku mrežu) te izračunate ukupne troškove. Uz svaku tehnologiju naveden je i referentni raspon tržišnih cijena po kWe. Za potrebe proračuna primijenjena je srednja vrijednost raspona.

Tab. 6-14 Usporedba procjena ulaganja u kogeneracijske sustave

Tehnologija	Jedini ca	Plinski motor (CHP)		Parna turbina + kotao na biomasu (CHP)		ORC (biomasa / otpadna toplina)	
Varijanta	-	5 MWt	10 MWt	5 MWt	10 MWt	5 MWt	10 MWt
Toplinski učin	MWt	5	10	5	10	5	10

Tehnologija	Jedini ca	Plinski motor (CHP)		Parna turbina + kotao na biomasu (CHP)		ORC (biomasa / otpadna toplina)	
Instalirana el. snaga	MWe	5	10	2,2	4,5	1,2	2,4
Raspon cijena	EUR/k We	1.000 – 1.600	1.000 – 1.600	2.700 – 4.500	2.700 – 4.500	3.000 – 5.000	3.000 – 5.000
Oprema	EUR	6.500.000	13.000.000	7.040.000	14.400.000	4.560.000	9.120.000
Građevinski radovi	EUR	975.000	1.950.000	1.056.000	2.160.000	684.000	1.368.000
Projektiranje/nadzor/ puštanje	EUR	650.000	1.300.000	704.000	1.440.000	456.000	912.000
Priključak na mrežu	EUR	1.000.000	2.000.000	440.000	900.000	240.000	480.000
UKUPNO	EUR	9.125.000	18.250.000	9.240.000	18.900.000	5.940.000	11.880.000

Procjene su orijentacijske i služe za preliminarno planiranje. Iznosi se temelje na sljedećim polazištima:

- instalirane električne snage odgovaraju ciljanim toplinskim učincima prema uobičajenim omjerima pojedine tehnologije,
- građevinski radovi uzeti su kao 15 % vrijednosti opreme,
- projektiranje, nadzor i puštanje u pogon kao 10 % vrijednosti opreme,
- priključak na elektroenergetsku mrežu uzet je orijentacijski kao 200 EUR/kWe,
- obuhvat opreme uključuje glavni strojarski i elektrotehnički dio s pomoćnim sustavima u tipičnom opsegu isporuke.

Detaljna procjena ulaganja prikazana je u poglavlju Investicijski troškovi,

Tab. 10-8. Troškovi mogu odstupati zbog konkretnih uvjeta lokacije (adaptacija postojećih objekata, zahtjevi temeljenja, dimovod i filtracija, rashladni sustav), stanja priključnog mjesta i potrebnih mrežnih zahvata, kao i zbog odabira proizvođača te širine isporuke.

6.7.5. Izvedeni sustavi u Hrvatskoj i Europi

U cilju osiguravanja pouzdane opskrbe toplinskom energijom u okviru centraliziranih toplinskih sustava, HEP je u Republici Hrvatskoj izgradio dva kogeneracijska postrojenja na biomasu – BE-TO Osijek i BE-TO Sisak. Osnovne tehničke karakteristike tih postrojenja prikazane su u sljedećoj tablici.

Tab. 6-15 Tehničke karakteristike BE-TO Osijek i BE-TO Sisak

Stavka	Jedinica	BE-TO Osijek	BE-TO Sisak
Korišteno gorivo	-	šumska biomasa	šumska biomasa
Neto električna snaga	MW	3	3
Ukupna učinkovitost	%	73	67
Toplinska energija	MW	10	10
Proizvodnja električne energije	MWh/god	18.367	19.375
Proizvodnja toplinske energije	MWh/god	65.862	63.908

Jedno od najvećih kogeneracijskih postrojenja na biomasu u Europi je Värtaverket u Stockholmu. Instalirana električna snaga iznosi približno 130 MW_e, a toplinska 280 MW_t.

Kao gorivo koristi se drvena sječka i šumski ostaci, a proizvedena energija dovoljna je za opskrbu 190.000 prosječnih kućanstava. Värtaverket se ubraja među najnaprednija postrojenja te vrste u Europi te ima važnu ulogu u dekarbonizaciji grijanja s prosječnom godišnjom uštedom u iznosu 126.000 tona CO₂.



Sl. 6–58 Kogeneracijski postrojenje Värtaverket u Stockholmu

Jedno od pionirskih postrojenja na biomasu u Europi je kogeneracija u austrijskom gradu Güssingu. Instalirana električna snaga iznosi 2 MW_e, a toplinska 4,5 MW_t. Kao gorivo koristi se drvena sječka lokalnog porijekla, a uz toplinsku i električnu energiju proizvodi se i sintetski plin koji pronalazi primjenu u kemijskoj industriji. Projekt je postao međunarodno poznat primjer energetske samodostatnosti na regionalnoj razini.

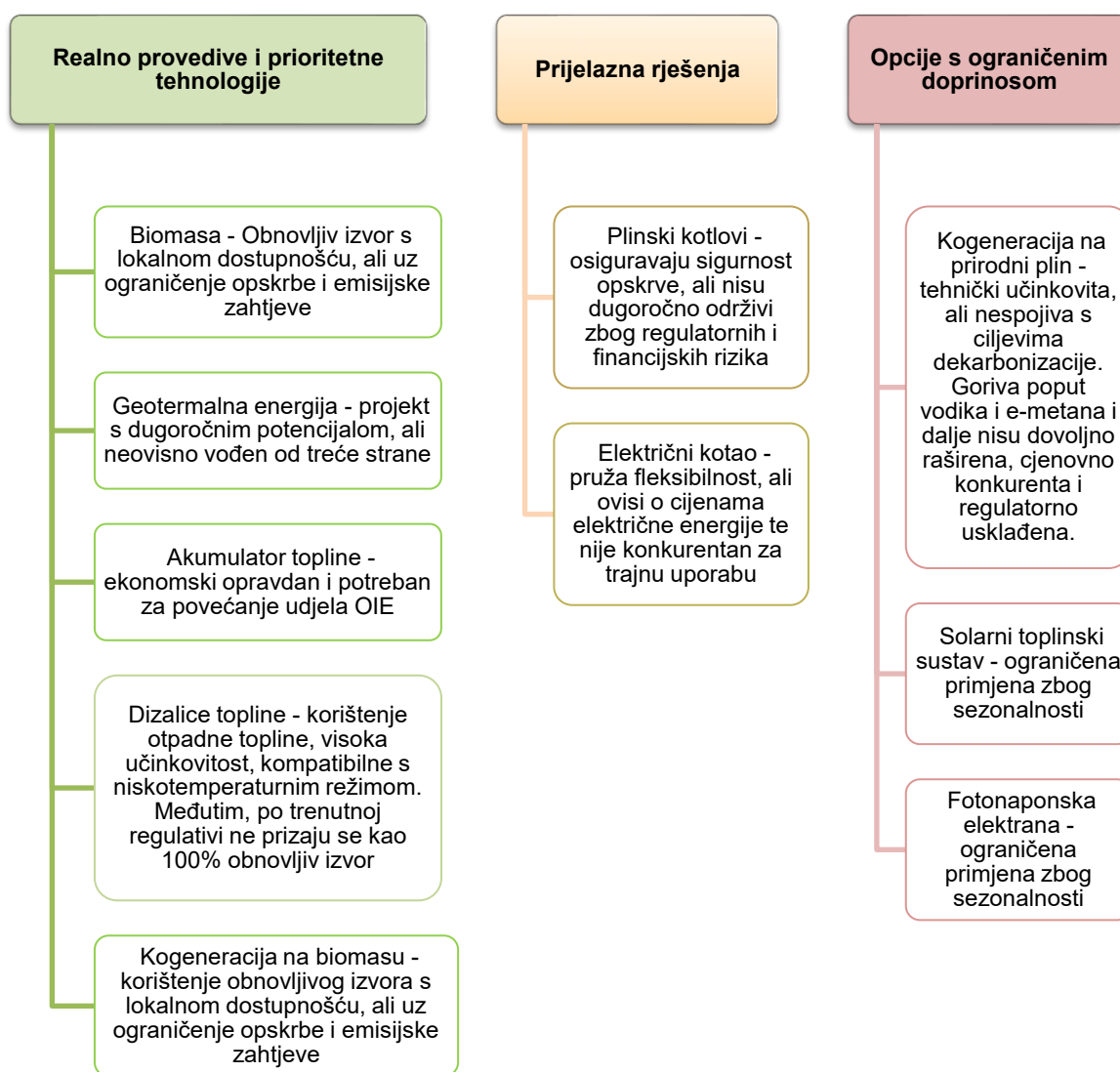


Sl. 6–59 Kogeneracijsko postrojenje Güssing

U njemačkom gradu Pfaffenhofenu izgrađeno je kogeneracijsko postrojenje na drvenu sječku s električnom snagom od 4,8 MW_e i toplinskom snagom od 12 MW_t. Toplinska energija predaje se u lokalni centralizirani toplinski sustav za opskrbu stambenih i industrijskih objekata, dok se dio topline koristi za sušenje drvene biomase. Njemačka raspolaže s više od 400 manjih i srednjih kogeneracijskih postrojenja na biomasu, koja imaju važnu ulogu u dekarbonizaciji toplinskog sektora.

6.8. Rekapitulacija predloženih tehnoloških rješenja

U cijelom poglavlju opisana su i analizirana različita tehnološka rješenja za dekarbonizaciju cjelokupnog sustava. Razlikuju se po razini tehničke izvedivosti, ekonomskoj opravdanosti i usklađenosti s ciljevima dekarbonizacije. Na temelju provedenih analiza rješenja se mogu grupirati na način prikazan na sljedećoj slici.



Sl. 6–60 Rekapitulacija predloženih tehnoloških rješenja

Zaključno, u poglavlju 10 analizirat će se kombinacija realno provedivih i prioritetnih tehnologija uz plinske i električne kotlove te dizalice topline kao prijelazna rješenja, dok se opcije s ograničenim doprinosom izostavljaju iz daljnje razrade.

7. MJERE ZA POVEĆANJE ENERGETSKE UČINKOVITOSTI I ENERGETSKIH UŠTEDA

Trenutno zadovoljavanje toplinskih potreba CTS grada Karlovca osigurano je radom plinskih kotlova i distribucijom kroz vrelovodnu mrežu koja je posljednjih godina u velikoj mjeri revitalizirana. Unatoč provedenim ulaganjima, modernizacija sustava i dalje predstavlja nužan preduvjet za povećanje ukupne učinkovitosti, smanjenje toplinskih i masenih gubitaka te osiguranje dugoročne pouzdanosti. Daljnja modernizacija je neizostavna i zbog sve strožih regulatornih zahtjeva vezanih uz dekarbonizaciju, a omogućit će lakšu integraciju obnovljivih izvora energije i naprednih tehnologija.

U ovom poglavlju razmatraju se prioritetne mjere modernizacije, a koje su podijeljene u iduće skupine:

- Tehničke mjere – u pravilu donose izravne i mjerljive uštede te obuhvaćaju:
 - modernizaciju plinskih kotlova,
 - izolaciju cjevovoda i objekata,
 - pripremu mreže za niskotemperaturni rad.
- Digitalne i upravljačke mjere – osiguravaju optimizaciju i fleksibilnost sustava, a uključuju:
 - Regulaciju, automatizaciju i optimizaciju rada,
 - Napredne sustavi upravljanja energijom (EMS),
- Mjere usmjerene na ponašanje korisnika i ekonomsko-regulatorne mjere - povećavaju učinkovitost s potrošačke strane i omogućuju trajne promjene u korištenju toplinske energije, a obuhvaćaju:
 - Poticanje povećanja energetske učinkovitosti krajnjih potrošača,
 - Uvođenje naprednih tarifnih sustava.

7.1. Modernizacija plinskih kotlova

Plinski kotlovi, kako je već ranije spomenuto, čine temelj postojeće proizvodnje toplinske energije u CTS-u grada Karlovca. Tijekom proteklih godina provedene su određene rekonstrukcije (zamjena plamenika i ekonomajzera) čime je djelomično povećana učinkovitost sustava i smanjena potrošnja goriva. Međutim, značajan dio opreme i dalje se oslanja na tehnologije starije generacije uz ograničen stupanj djelovanja i povećane operativne troškove.

U svrhu osiguranja pouzdane opskrbe toplinom u kratkoročnom razdoblju, opravdano je provesti samo nužnu modernizaciju postojećih plinskih kotlova. Takve mjere odnose se prvenstveno na optimizaciju rada i ugradnju naprednih regulacijskih uređaja radi sigurnosti i fleksibilnosti sustava, dok veća ulaganja u zamjenu kotlova nisu planirana jer prirodni plin nije dugoročno održiv energent. Ove mjere omogućile bi smanjenje specifične potrošnje prirodnog plina i emisija stakleničkih plinova u razdoblju do potpune transformacije sustava. U pogonskim uvjetima primjena napredne regulacije i optimizacije rada mogla bi povećati

sezonski stupanj djelovanja postojećih kotlova za nekoliko postotnih bodova što bi rezultiralo smanjenjem potrošnje plina i emisija CO₂ za približno 3-5 %.

Važno je naglasiti da prirodni plin u okviru europskih klimatskih i energetske politika nije prepoznat kao dugoročno održiv energent. Njegova uporaba nosi sve veće regulatorne i financijske rizike, prvenstveno zbog povećanih troškova emisijskih jedinica u ETS sustavu, volatilnosti tržišne cijene te ograničenog pristupa europskim fondovima za projekte koji uključuju fosilna goriva. Iz tog se razloga investicije u plinske kotlove moraju tretirati isključivo kao prijelazno rješenje uz osiguranje fleksibilnosti za kasniju integraciju obnovljivih izvora energije i alternativnih tehnologija. Na taj način cjelokupni sustav zadržava sigurnost opskrbe u srednjoročnom razdoblju, a istovremeno ostaje usklađen s dugoročnim ciljevima potpune dekarbonizacije do 2050. godine.

7.2. Izolacija cjevovoda i objekata

Toplinski i maseni gubici u mreži predstavljaju izazov u funkcioniranju cjelokupnog sustava. Osim što smanjuju učinkovitost i povećavaju troškove rada sustava, direktno povećavaju ukupnu potrošnju energenta i emisije CO₂. Premda je u proteklom godinama provedena značajna revitalizacija mreže, pri čemu je tri četvrtine vrelovoda zamijenjeno novom tehnologijom predizoliranih cijevi, dio sustava i dalje se oslanja na zastarjele dionice koje generiraju povišene gubitke i zahtijevaju učestalo održavanje. Dosadašnjom zamjenom cjevovoda gubici mreže smanjeni su s 15 % na 8 %. Daljnje smanjenje gubitaka može se postići kroz nekoliko komplementarnih mjera:

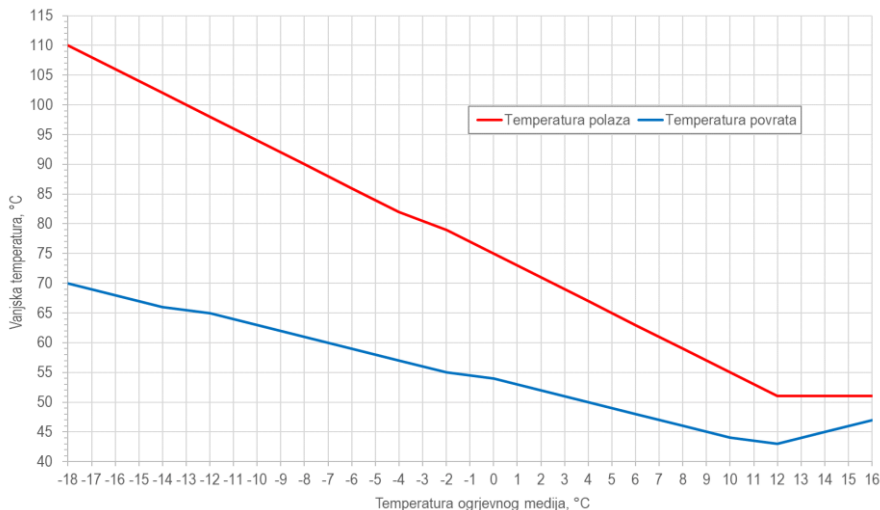
- dodatna izolacija i zamjena starijih dionica,
- sustavno praćenje stanja izolacije i preventivno održavanje umjesto sanacija nakon nastanka kvarova,
- uvođenje digitalnih sustava za detekciju gubitaka u realnom vremenu koji omogućuju brzu identifikaciju i smanjenje trajanja curenja,
- optimizacija temperature povratnog medija.

Optimizacija temperature povratnog medija predstavlja mjeru koja može donijeti mjerljive uštede uz relativno mala ulaganja. Aktivnosti se prije svega odnose na hidrauličko balansiranje mreže i podstanica te podešavanje regulacijskih krivulja grijanja i rada po vanjskoj temperaturi čime se smanjuju prekomjerni protoci i nepotrebno visoke povratne temperature. Kako Gradska toplana već raspolaže SCADA sustavom i mjernim mjestima, dodatna ulaganja u nadzor nisu nužna, već je potrebno sustavno koristiti postojeće podatke za praćenje i identifikaciju problematičnih dionica i podstanica. Procjenjuje se da bi snižavanje povratne temperature za 5 do 10 °C moglo smanjiti mrežne gubitke za 1 do 2 % te smanjiti potrošnju plina i emisije CO₂ za 3 do 5 %.

Ukupni učinak ovih mjera ne ogleda se samo u energetske uštedama i smanjenju emisija, već i u povećanoj pouzdanosti sustava, duljem vijeku trajanja opreme i boljoj usluzi za krajnje korisnike. Posebno je važno naglasiti da se svaka dodatna mjera izolacije i smanjenja gubitaka multiplicira kroz sustav, manje gubitaka u mreži znači manju potrošnju energenta, niže emisije i manji pritisak na buduće investicije u proizvodne kapacitete.

7.3. Priprema mreže za niskotemperaturni rad

Razvoj daljinskog grijanja u EU i Hrvatskoj usmjerava se prema sustavima četvrte generacije temeljenim na nižim radnim temperaturama u mreži. Analiza dijagrama vožnje pokazuje da sustav već danas radi u relativno niskotemperaturnim režimima u usporedbi s klasičnim toplinskim mrežama. Pri vanjskoj temperaturi od 0 °C polazna voda iznosi oko 75 °C, a povratna oko 54 °C dok se pri višim vanjskim temperaturama polazna spušta ispod 60 °C. Više temperature polaza (iznad 90 °C) javljaju se samo u razdobljima ekstremno niskih temperatura.



Sl. 7–1 Dijagram vožnje vrelovodne mreže

CTS grada Karlovca već je sada tehnički blizu niskotemperaturnom radu, ali za daljnji napredak potrebne su ciljane mjere prilagodbe. Na razini mreže to uključuje hidrauličko balansiranje i optimizaciju povratnog medija (vidi poglavlja 7.2 i 7.4), u podstanicama prilagodbu regulacijskih krivulja grijanja i modernizaciju izmjenjivača topline, a kod krajnjih korisnika balansiranje unutarnjih instalacija. Na razini sustava, snižavanje radnih temperatura dodatno će smanjiti toplinske gubitke i olakšati integraciju obnovljivih izvora.

7.4. Regulacija, automatizacija i optimizacija rada

Učinkovitost i pouzdanost cjelokupnog sustava u velikoj mjeri ovise o kvaliteti regulacije i mogućnosti optimizacije rada. Iako su prijašnjim ulaganjima unaprijeđeni pojedini segmenti sustava, razina automatizacije još uvijek je ograničena, a hidraulička neuravnoteženost mreže i zastarjela oprema u distribuciji dovode do neravnomjerne raspodjele topline, nepotrebne potrošnje energije i povećanih troškova održavanja.

Iako sustav već raspolaže implementiranim SCADA nadzorom, potrebno je dodatno razviti njegove funkcionalnosti i povezati ga s modernim alatima za optimizaciju i prediktivno upravljanje. Mjere koje je moguće provesti u polju regulacije, automatizacije i optimizacije uključuju sljedeće:

- Ugradnja energetski učinkovitih crpki s promjenjivom brzinom vrtnje – provodi se zamjenom postojećih crpki energetski učinkovitijim modelima s frekvencijskim pretvaračima čime se protok prilagođava stvarnim potrebama mreže. Mjera

omogućuje smanjenje potrošnje električne energije za otprilike 20 do 30 % što u ukupnom sustavu predstavlja uštedu od približno 2 do 3 % primarne energije. U sklopu Gradske toplane optimalno je ovu mjeru primijeniti u glavnim crpnim stanicama te u većim podstanicama gdje su crpke starije generacije i gdje je najveći potencijal za smanjenje potrošnje.

- Hidrauličko balansiranje sustava – temelji se na sustavnom podešavanju mreže i ugradnji balansnih ventila čime se postiže ravnomjernija raspodjela topline i smanjuje nepotrebna potrošnja energije. Provedbom ove mjere moguće je ostvariti uštedu toplinske energije od 5 do 7 % uz dodatnu korist u vidu povećanog komfora krajnjih korisnika. U konkretnom sustavu prioritetno je provesti balansiranje u podstanicama s najvećim povratnim temperaturama te u kritičnim dionicama mreže gdje dolazi do oscilacija u opskrbi. Time se postiže stabilniji rad cijelog CTS-a i oslobađa prostor za integraciju obnovljivih izvora.
- Nadogradnja SCADA sustava i širenje senzorske mreže – uključuje dodavanje dodatnih mjernih točaka za tlak, protok i temperature povrata u pojedinim zonama. Na taj se način osigurava preciznija analiza stanja mreže i pravovremeno otkrivanje anomalija u radu što donosi dodatne uštede od otprilike 2 do 3 % kroz smanjenje gubitaka i optimizaciju parametara rada. Kako Gradska toplana već raspolaže SCADA sustavom, optimalno je proširiti ga ciljanom ugradnjom senzora u zonama s povišenim povratnim temperaturama i većim gubicima te povezati podatke sa softverom za prediktivno održavanje i optimizaciju rada izvora.

Poboljšanjem regulacije, automatizacije i optimizacije rada moguće je smanjiti potrošnju primarne energije u sustavu za otprilike 7 do 10 %, uz istodobno povećanje pouzdanosti, smanjenje troškova i bolju kvalitetu opskrbe topline. Time se kao prioritetne aktivnosti izdvajaju zamjena zastarjelih crpki u glavnim čvorištima mreže te balansiranje podstanica s najvećim povratnim temperaturama, dok se nadogradnje SCADA sustava provode postupno, ciljano na problematične zone.

7.5. Napredni sustavi upravljanja energijom

Razvoj toplinarstva u narednom razdoblju zahtijeva prelazak s klasičnih metoda nadzora i regulacije na sustave koji omogućuju prediktivno i optimizirano upravljanje cijelim energetske lancem, od proizvodnje u kotlovnici, preko distribucije topline u mreži, do potrošnje u krajnjim objektima. Napredni sustavi upravljanja energijom (EMS) predstavljaju alat koji povezuje sve podsustave i koji koristi podatke u stvarnom vremenu za donošenje optimalnih odluka.

U praksi to znači da se postojeći SCADA nadzor nadograđuje algoritmima koji mogu predviđati potrebe za topline i prilagođavati rad kotlova i pumpi budućem opterećenju. Najčešće primjenjivani pristup u takvim sustavima jest model predictive control (MPC), metoda koja na temelju povijesnih podataka, trenutačnih mjerenja i vremenskih prognoza računa optimalne parametre rada. U sličnim toplinskim sustavima MPC je već dokazao sposobnost smanjenja potrošnje primarne energije za 5 do 10 % pri čemu se istodobno osigurava stabilna opskrba topline i bolja raspodjela snage u mreži.

Uz provjerene metode prediktivnog upravljanja poput MPC, u istraživanjima se razvijaju i hibridni modeli poput neuro fuzzy sustava. To je hibridni model koji spaja neuronske mreže i fuzzy (neizrazitu) logiku kako bi se istodobno postigla sposobnost učenja iz podataka i zadržala interpretabilnost u obliku pravila. Takvi se sustavi pokazuju korisnima ponajprije u preciznom predviđanju potrošnje topline, no njihova primjena u velikim toplinskim mrežama zasad je ograničena i može se razmatrati tek kao dopunski alat u budućnosti.

U akademskim i pilot projektima razvijaju se metode učenja potkrepljivanjem (reinforcement learning), koje omogućuju da sustav samostalno uči iz iskustva i prilagođava rad bez unaprijed definiranih pravila. Takvi pristupi pokazuju značajan potencijal, ali zbog sigurnosnih razloga i složenosti još nisu spremni za široku primjenu u sustavima poput ovog. Dugoročno mogu postati važan alat za integraciju većeg udjela obnovljivih izvora energije i povećanje fleksibilnosti mreže.

Za gradski sustav u Karlovcu to znači da je u prvoj fazi potrebno uvesti EMS temeljen na provjerenim prediktivnim algoritmima poput MPC uz mogućnost naknadnog proširenja s naprednijim metodama predikcije potrošnje. Takav sustav omogućit će smanjenje potrošnje goriva te optimizaciju rada cjelokupne mreže i smanjenje emisija CO₂, a ujedno stvara platformu za daljnju digitalizaciju i integraciju obnovljivih izvora energije.

7.6. Poticanje povećanja energetske učinkovitosti krajnjih potrošača

Energetska učinkovitost sustava uvelike ovisi o opremi i ponašanju krajnjih potrošača. Mjere na unutarnjim instalacijama i opremi zgrada mogu se provoditi isključivo uz suglasnost krajnjih korisnika te u suradnji s upraviteljima objekata. Analize provedene u sklopu energetskih obnova zgrada pokazuju da se značajan dio toplinske energije gubi zbog neadekvatne regulacije grijanja, zastarjele opreme u podstanicama te nedostatka informiranosti korisnika o racionalnom korištenju energije.

Prvi korak prema povećanju učinkovitosti odnosi se na ugradnju termostatskih ventila i sustava daljinskog upravljanja u zgradama priključenim na CTS. Termostatski ventili omogućuju precizno podešavanje temperature u svakoj prostoriji, dok daljinsko upravljanje (putem mobilnih aplikacija ili centralnih regulatora) daje korisnicima mogućnost da prilagode grijanje stvarnim potrebama, primjerice smanje potrošnju u razdobljima kada je stan prazan. Dosadašnja iskustva u Hrvatskoj i zemljama EU pokazuju da se na taj način potrošnja toplinske energije u stambenim zgradama može smanjiti za 10 do 20 % pri čemu se izbjegava prekomjerno zagrijavanje prostora koje je u mnogim zgradama i dalje česta pojava.

Drugo područje djelovanja jest zamjena starih izmjenjivača topline u podstanicama. U mnogim zgradama i dalje se koriste stariji tipovi izmjenjivača s niskim stupnjem učinkovitosti i povećanim rizikom od kvarova. Ugradnjom modernih pločastih izmjenjivača topline postiže se znatno bolji prijenos topline, niže povratne temperature i smanjenje gubitaka u podstancima. To ne samo da poboljšava učinkovitost samih zgrada, već doprinosi i optimizaciji cijelog sustava jer omogućuje povoljnije uvjete rada kotlova i smanjenje gubitaka u mreži.

Treći aspekt je edukacija potrošača. Praksa pokazuje da čak i kod tehnički moderniziranih zgrada, način korištenja sustava uvelike određuje konačnu potrošnju energije. Edukativne

aktivnosti poput radionica za predstavnike suvlasnika, distribucije jednostavnih priručnika o pravilnom korištenju grijanja ili interaktivnih online alata, mogu imati mjerljiv učinak. Prema dostupnim istraživanjima, informirani korisnici u prosjeku smanjuju potrošnju za dodatnih 5 do 10 % u odnosu na početno stanje.

7.7. Uvođenje naprednih tarifnih sustava

U okviru dekarbonizacije i povećanja učinkovitosti cjelokupnog sustava, mogući daljnji korak je transformacija postojećeg tarifnog sustava za obračun toplinske energije krajnjim korisnicima. Cilj je uvođenje naprednog tarifnog modela koji će preciznije odražavati stvarne troškove proizvodnje i distribucije, poticati energetske učinkovito ponašanje korisnika, omogućiti integraciju obnovljivih izvora i akumulacijskih sustava te usmjeravati potrošnju prema razdobljima nižeg opterećenja sustava.

Postojeći model, temeljen prvenstveno na zakupljenoj snazi i obračunu potrošnje po fiksnoj cijeni energije, nije dovoljno fleksibilan ni pravedan u kontekstu nove energetske paradigme u kojoj se sve više primjenjuju decentralizirani izvori, pametni sustavi upravljanja i tržišni signali za potrošnju.

Struktura cijene toplinske energije ovisi o kategoriji potrošnje i tipu toplinskog sustava. U nastavku su navedene trenutne cijene, tarife i naknade (bez PDV-a) koje su u primjeni od 01. listopada 2024. godine.

Tab. 7-1 Cjenik toplinske energije za CTS, kotlovnici na adresi T. Ujevića 7

Naziv djelatnosti	Tarifna grupa (Tg)	Tarifne stavke (Ts)	
		Energija (EUR/kWh)	Snaga (EUR/kW/mj)
Proizvodnja toplinske energije	Kućanstva	0,0532	1,82
Distribucija toplinske energije		0,0063	0,69
		Naknada (EUR/m ² /godišnje)	
Opskrba toplinskom energijom		0,2200	
Kupac toplinske energije		1,2570	
Naziv djelatnosti	Tarifna grupa (Tg)	Tarifne stavke (Ts)	
		Energija (EUR/kWh)	Snaga (EUR/kW/mj)
Proizvodnja toplinske energije	Industrija i poslovni potrošači	0,0685	1,98
Distribucija toplinske energije		0,0063	0,69
		Naknada (EUR/m ² /godišnje)	
Opskrba toplinskom energijom		0,2200	
Kupac toplinske energije		1,2570	

Napomena: * Naknada za djelatnost kupca toplinske energije naplaćuje se krajnjim kupcima spojenim na zajedničko mjerilo toplinske energije

Tab. 7-2 Cjenik toplinske energije za ZTS, kotlovnica na adresi Baščinska cesta 41

Naziv djelatnosti	Tarifna grupa (Tg)	Tarifne stavke (Ts)	
		Energija (EUR/kWh)	Snaga (EUR/kW/mj)
Proizvodnja toplinske energije	Kućanstva	0,0573	2,83
		Naknada (EUR/m ² /godišnje)	
Opskrba toplinskom energijom		0,2200	
Kupan toplinske energije		1,1791	

Napomena: * Naknada za djelatnost kupca toplinske energije naplaćuje se krajnjim kupcima spojenim na zajedničko mjerilo toplinske energije

7.7.1. Preduvjeti za uvođenje naprednog tarifnog sustava

Pravni i regulatorni okvir uvođenja naprednog tarifnog sustava

Uvođenje dinamičnog tarifnog modela predviđeno je i u zakonodavnom okviru Europske unije i Republike Hrvatske. Prema Direktivi o energetske učinkovitosti (EU) 2023/1791, operatori sustava grijanja obvezni su omogućiti transparentan, pravedan i potrošački orijentiran tarifni model koji potiče energetske učinkovito ponašanje i optimizira korištenje resursa. Osim toga, u RED III direktivi naglašena je važnost digitalizacije i upravljanja potrošnjom u realnom vremenu, što podrazumijeva uvođenje pametnih brojila i naprednih tarifnih algoritama.

U Republici Hrvatskoj sustav toplinarstva i dalje počiva na konvencionalnim tarifnim modelima koji se temelje na fiksnim i varijabilnim komponentama, a kako je prethodno opisano za slučaj Gradske toplane u Karlovcu. Iako postoje zakonski uvjeti za obračun prema stvarnim potrošnjama, trenutni regulatorni okvir ne omogućuje primjenu naprednih tarifnih sustava kakvi se sve češće uvode u modernim energetske sustavima.

Važeći Zakon o tržištu toplinske energije (NN 80/13, 14/14, 86/19, 67/25) propisuje obračun prema stvarnoj potrošnji gdje je to tehnički izvedivo, no ne definira koncept dinamičnih tarifa niti predviđa mogućnost fleksibilnog formiranja cijena temeljenih na vremenu korištenja, opterećenju sustava ili tržišnim uvjetima. Također, postojeći tarifni sustav za toplinsku energiju temelji se na statičkom dvokomponentnom modelu, dok Pravilnik o načinu raspodjele i obračunu troškova za isporučenu toplinsku energiju (NN 99/14, 27/15 i 24/15) predviđa korištenje osnovnih mjerila i razdjelnika, ali ne regulira primjenu pametnih brojila ni sustava daljinskog očitavanja.

Uvođenje naprednih, odnosno dinamičkih tarifnih sustava, zahtjeva cjelovit regulatorni i tehnički iskorak, a to znači prilagodbu zakona, pravilnika i tarifnih metodologija. U tom procesu glavnu ulogu ima HERA kao neovisno regulatorno tijelo zaduženo za nadzor i razvoj tržišta toplinske energije. Ona je odgovorna za odobravanje tarifnih sustava, izradu metodologija za određivanje cijena, nadzor nad radom energetske subjekata te joj je u interesu zaštita krajnjih potrošača.

Tehnički preduvjeti

Za uvođenje naprednih tarifnih sustava potrebno je ispuniti tehničke preduvjete koji omogućuju točno mjerenje potrošnje, pouzdano prikupljanje i obradu podataka, digitalizaciju obračuna te aktivno uključivanje krajnjih korisnika. Glavni tehnički preduvjeti obuhvaćaju sljedeće:

- instalaciju pametnih toplinskih brojila pomoću kojih se precizno i kontinuirano mjeri stvarna potrošnja na razini korisnika. Takva brojila moraju imati mogućnost daljinskog očitavanja i biti u skladu s važećim tehničkim standardima.
- postojanje komunikacijske mreže koja omogućuje daljinsko očitavanje podataka u realnom vremenu ili u unaprijed definiranim intervalima
- uspostavu sustava za upravljanje podacima o mjerenju koji omogućuje validaciju i pohranu podataka. Uz sustav za upravljanje podacima o mjerenju, potrebno je razviti sustav za obračun i naplatu koji podržava više tarifnih modela.
- pristup informacijama putem web portala ili mobilnih aplikacija kako bi sami korisnici pratili svoju potrošnju te time utjecali na nju

Kao dodatni tehnički preduvjet, a koji je u slučaju Gradske toplane Karlovac već ispunjen, ističe se implementacija SCADA sustava koji omogućuje nadzor i upravljanje distribucijskom mrežom u stvarnom vremenu.

Uz tehničke preduvjete, neizostavni su preduvjeti sigurnosti i interoperabilnosti, a to znači da svi tehnički sustavi moraju biti izvedeni u skladu s načelima kibernetičke sigurnosti i zaštite osobnih podataka (GDPR). Također, važno je koristiti standardizirane komunikacijske protokole kako bi sustavi različitih proizvođača bili međusobno kompatibilni i kako bi se izbjegla ovisnost o zatvorenim tehnološkim rješenjima.

7.7.2. Tarifni modeli i upravljanje krajnjom potrošnjom

Razvoj tarifnih modela usmjeren je na poticanje krajnjih korisnika na racionalno i energetski učinkovito ponašanje kroz prilagodbu potrošnje stvarnim uvjetima sustava. Time se omogućuje bolje upravljanje opterećenjem mreže, smanjenje ukupne potrošnje i podizanje učinkovitosti na razini krajnjeg korisnika.

U nastavku su prikazani primjeri novih pristupa tarifnoj politici među kojima su vremenski diferencirane cijene, uvođenje modela noćnog grijanja te mjere za povećanje energetske učinkovitosti.

Vremenski diferencirane tarife

Kao jedan od mogućih smjerova razvoja sustava naplate toplinske energije, moguće je uvođenje vremenski diferenciranih tarifa, odnosno modela u kojem bi cijena toplinske energije ovisila o dobu dana kada se energija troši. Takav pristup polazi od činjenice da je opterećenje sustava veće u određenim dijelovima dana, osobito ujutro i navečer, dok je tijekom dana ono znatno niže, a noću ga nema. Uvođenjem noćnog grijanja i različitih cijena za ta razdoblja korisnicima bi se omogućilo da, ukoliko to žele i mogu, prilagode obrasce

potrošnje i time ostvare određene financijske uštede, dok bi sustav u cjelini mogao učinkovitije funkcionirati.

U nastavku je dan primjer vrijednosti tarifnih koeficijenata uz napomenu da su predložene vrijednosti okvirne te se moraju definirati sukladno simulacijama sustava i ekonomskim pokazateljima.

Tab. 7-3 Prijedlog vremenski diferencirane tarife

Vrijeme dana	Razdoblje	Prijedlog tarifnog koeficijenta
Vršna tarifa (visoka)	06:00 – 10:00; 17:00 – 21:00	1,25 × osnovna cijena
Srednja tarifa (standardna)	10:00 – 17:00	1,00 × osnovna cijena
Izvanvršna tarifa (noćna)	21:00 – 06:00	0,80 × osnovna cijena

Uvođenjem takve tarife postiže se:

- ravnomjernije opterećenje sustava, a što smanjuje potrebu za vršnim kapacitetima,
- smanjenje operativnih troškova, osobito ako se uvedu električni kotlovi u noćnom režimu rada,
- povećanje udjela obnovljivih izvora putem njihovog učinkovitijeg uključivanja u niskotarifnim periodima.

Model noćnog grijanja i limitiranje zakupljene snage

Jedna od mjera koja se može paralelno uvesti s vremenski diferenciranom tarifom je model noćnog grijanja koji korisnicima omogućuje nižu cijenu toplinske energije ukoliko se odluče za grijanje u vremenu 21:00 – 06:00 sati. Ovaj model Gradska toplana može uvesti relativno brzo jer ne zahtijeva regulatorne izmjene, dok učinak u praksi ovisi o spremnosti korisnika da ga prihvate. Prihvaćanjem ovog modela korisnici bi doprinijeli ravnomjernijem opterećenju mreže, osobito u jutarnjim satima.

Paralelno s uvođenjem noćnog grijanja, predlaže se limitiranje zakupljene snage po korisniku. U postojećem modelu često dolazi do dimenzioniranja snage prema kraćim, ali intenzivnim razdobljima (npr. ekstremno hladno jutro), što opterećuje sustav i zahtijeva nepotrebno visoke rezerve. Uvođenjem varijabilne komponente za prekoračenje snage (tzv. *peak-shaving* tarifa), korisnici bi plaćali dodatak na cijenu samo u slučaju prekoračenja referentne snage.

Prednost takve tarife očituje se u:

- stabilnoj i predvidivoj potrošnji kod korisnika,
- poticanju korisnika da ravnomjerno rasporede potrošnju tijekom dana,
- izbjegavanju skupih infrastrukturnih ulaganja za vršna opterećenja,
- smanjenju gubitaka u mreži i povećanju stabilnosti.

Penalizacija neučinkovitih unutarnjih instalacija

Učinkovitost sustava daljinskog grijanja ne ovisi isključivo o toplani i mreži, već i o stanju unutarnjih instalacija kod krajnjih korisnika. U slučajevima kada su ti sustavi tehnički zapušteni, hidraulički neuravnoteženi ili se ne održavaju redovito, dolazi do nepotrebno

visoke potrošnje toplinske energije i smanjenja opće učinkovitosti mreže. Takve situacije često se prepoznaju kroz povišene povratne temperature (iznad 60 °C), malu temperaturnu razliku između polazne i povratne vode (ΔT ispod 20 K), kao i konstantnu potrošnju u razdobljima kada grijanje nije nužno.

Kako bi se ti problemi postupno rješavali, predlaže se uvođenje sustava tarifnih korekcija za korisnike čije instalacije ne ispunjavaju osnovne tehničke uvjete za racionalno korištenje toplinske energije, a prema sljedećoj tablici.

Tab. 7-4 Prijedlog penaliziranja neučinkovitih unutarnjih instalacija

ΔT (razlika polazna – povratna)	Stavka
≥ 25 K	0% dodatka
20 – 25 K	+5% na energiju
15 – 20 K	+10%
< 15 K	+15%

Ovakav model ne bi se uvodio naglo, već postupno, uz jasno definirane kriterije i razdoblje prilagodbe. Prije same primjene potrebno je osigurati ranije opisane tehničke preduvjete te je potrebno korisnicima osigurati pristup osnovnoj tehničkoj podršci kao i mogućnost sufinanciranja manjih zahvata na unutarnjim instalacijama, poput ugradnje termostatskih ventila, balansiranja sustava ili zamjene dotrajale opreme.

Cilj mjere nije kažnjavanje korisnika, već uvođenje transparentnijeg i pravednijeg sustava u kojem se razina plaćanja više oslanja na tehničko ponašanje pojedine zgrade u sustavu grijanja.

7.7.3. Izvedeni sustavi

U Hrvatskoj još ne postoji u potpunosti implementiran pametni tarifni sustav u toplinarstvu, no pojedini operatori poput HEP Toplinarstva, Energa Rijeka i sustava u razvoju u Vukovaru provode aktivnosti koje postavljaju tehničke temelje za njegovo uvođenje, uključujući digitalizaciju mreže, pametna brojila i napredno upravljanje potrošnjom. Iako tarifni modeli još uvijek nisu vremenski diferencirani niti povezani s učinkovitosti krajnjih korisnika, sve veći broj projekata i regulatornih poticaja ukazuje na to da će takvi sustavi uskoro postati standard čime Grad Karlovac ima priliku biti među prvim sredinama koje će ih strateški i operativno primijeniti.

U europskoj praksi napredni tarifni sustavi u toplinarstvu već su implementirani u nizu zemalja, posebno onima s razvijenim sustavima daljinskog grijanja poput Švedske, Danske, Njemačke i Nizozemske.

Danska predstavlja najrazvijeniji europski primjer primjene pametnih tarifnih sustava u toplinarstvu, gdje se cijena toplinske energije obračunava prema stvarnom profilu potrošnje krajnjih korisnika, uz snažan fokus na učinkovitost sustava i vremensku prilagodbu potrošnje. Ključna razlika u odnosu na većinu drugih europskih zemalja je u tome što su korisnici direktno financijski motivirani na optimizaciju svojih unutarnjih instalacija – osobito kroz sustav tarifiranja temeljen na temperaturnoj razlici između polazne i povratne vode (ΔT). Što je ta razlika veća, odnosno što je povratna voda hladnija, to je potrošnja energetski

učinkovitija, a konačni trošak za korisnika niži. U slučajevima kada korisnici vraćaju toplu vodu (npr. iznad 50 °C), što ukazuje na neučinkovitost njihovog sustava, primjenjuju se dodatne tarifne korekcije koje mogu povećati račun i do 15 posto.

Osim toga, danski operatori sustavno primjenjuju sezonske i dnevne varijacije cijena – cijena toplinske energije tijekom noći i ljetnih mjeseci značajno je niža nego u jutarnjim i večernjim satima zimskog razdoblja, čime se potrošnja ravnomjernije raspoređuje i smanjuje potreba za vršnim kapacitetima. U nekim slučajevima dodatni popusti se odobravaju korisnicima koji točno predviđaju svoju potrošnju u danim vremenskim okvirima, dok odstupanja od najavljene potrošnje u razdobljima visokog opterećenja rezultiraju penalima, jer otežavaju planiranje rada sustava.

Ovakav tarifni model moguć je zahvaljujući općoj digitalizaciji toplinskih mreža u Danskoj gdje svi korisnici imaju pametna brojala i pristup digitalnim platformama putem kojih u stvarnom vremenu prate potrošnju i temperaturne pokazatelje. Sve navedeno regulirano je zakonodavnim okvirom koji zahtijeva da operatori posluju na neprofitnoj osnovi, osiguravajući da se tarifna struktura temelji na pravednoj raspodjeli stvarnih troškova i poticanju energetske odgovornosti ponašanja.

7.8. Zaključna razmatranja

Provedbom mjera definiranih u okviru ovog poglavlja moguće je ostvariti značajno poboljšanje energetske učinkovitosti, pouzdanosti i fleksibilnosti toplinskog sustava na području Grada Karlovca. Kako je prikazano u prethodnim potpoglavljima, svaka od predloženih mjera analizirana je s tehničkog aspekta, dok se u ovom zaključnom dijelu daje njihova usporedna ekonomska ocjena i rangiranje prema omjeru koristi i troška. Takav pristup omogućuje da se tehnička i financijska perspektiva sagledaju u jedinstvenom okviru čime se olakšava donošenje odluka o prioritetima provedbe.

Mjere su međusobno komplementarne te obuhvaćaju tehničke, operativne i strateške aspekte modernizacije sustava s naglaskom na postupno smanjenje potrošnje prirodnog plina i pripremu sustava za integraciju obnovljivih izvora topline. S ekonomskog stajališta, sve mjere analizirane su prema veličini potrebne investicije, očekivanim godišnjim uštedama i vremenu povrata ulaganja. Na temelju tehničkih i ekonomskih pokazatelja izrađena je rang lista mjera prema omjeru postignutog učinka i potrebnog ulaganja. Rezultati su prikazani u Tab. 7-5 pri čemu su najpovoljnije one mjere koje uz umjerene investicijske troškove donose značajne energetske uštede i smanjenje emisija stakleničkih plinova.

Tab. 7-5 Rangiranje mjera modernizacije prema omjeru koristi i troška

Rang	Opis mjere	Procijenjeni investicijski trošak	Procijenjena godišnja ušteda (energija / OPEX)	Procijenjeni povrat investicije	Ekonomska ocjena / Napomena
1	Regulacija, automatizacija i optimizacija rada (SCADA sustav, crpke s promjenjivom brzinom, modernizacija podstanica)	490.000 – 1.440.000 EUR	7-10 % smanjenja potrošnje toplinske energije + 2-3 % električne energije	3 - 5 god.	Najviši omjer koristi i troška; značajno povećava učinkovitost, fleksibilnost i digitalizaciju sustava

Rang	Opis mjere	Procijenjeni investicijski trošak	Procijenjena godišnja ušteda (energija / OPEX)	Procijenjeni povrat investicije	Ekonomska ocjena / Napomena
2	Poboljšanje izolacije cjevovoda i objekata te digitalna detekcija gubitaka	500.000 - 1.470.000 EUR	3-5 % smanjenja potrošnje plina i 1-2 % smanjenja gubitaka topline	4 - 6 god.	Dugoročna mjera s trajnim učinkom; jednostavna provedba i visoka pouzdanost rezultata
3	Napredni sustavi upravljanja energijom (EMS, analitika, digitalni alati za praćenje potrošnje)	250.000 - 600.000 EUR	3-6 % smanjenja potrošnje topline i električne energije kroz optimizaciju	4 - 6 god.	Podržava digitalnu transformaciju i optimizaciju pogona; srednje ulaganje, visoki strateški značaj
4	Priprema mreže za niskotemperaturni rad (balansiranje, prilagodba regulacijskih krivulja, zamjena izmjenjivača)	220.000 - 560.000 EUR	3-4 % dodatne toplinske uštede + povećana integracija OIE	6 - 10 god.	Strateška mjera za 4. generaciju CTS-a; osigurava dugoročne koristi i fleksibilnost sustava
5	Modernizacija plinskih kotlova (ugradnja napredne regulacije, optimizacija izgaranja, sigurnosni i nadzorni sustavi)	60.000 - 120.000 EUR/kotlu	3-5 % smanjenja potrošnje plina i CO ₂ emisija	8 - 12 god.	Prijelazna mjera s ograničenim učinkom; koristi fosilni energent – kratkoročno rješenje
6	Uvođenje naprednih tarifnih sustava	1.700.000 – 2.900.000	5 – 10 % smanjenja potrošnje plina i CO ₂ emisija	6 – 9 god.	Ekonomski i regulatorni alat koji povećava učinkovitost i fleksibilnost sustava te motivira korisnike na racionalnu potrošnju
7	Poticanje povećanja energetske učinkovitosti krajnjih potrošača (informiranje, subvencije, lokalni programi)	100.000 - 300.000 EUR	2-3 % neizravne uštede na razini sustava	teško mjerljiv, dugoročni učinak	Neizravna, ali važna mjera za promjenu ponašanja korisnika i povećanje prihvaćenosti sustava
UKUPNO		1,6 - 4,5 miL.EUR	10-17 % ukupne energetske uštede sustava	5 - 7 god.	

Rangiranje mjera modernizacije toplinskog sustava omogućuje određivanje investicijskih prioriteta i planiranje njihove postupne provedbe u skladu s tehničkim, ekonomskim i regulatornim uvjetima.

Provedbom prioritetnih mjera regulacije i automatizacije rada sustava, poboljšanja izolacije te uvođenja naprednih sustava upravljanja energijom očekuje se povećanje energetske

učinkovitosti, smanjenje gubitaka i stvaranje tehničkih preuvjeta za daljnju integraciju obnovljivih izvora topline.

Napomena: *Kvantitativni pokazatelji prikazani u Tab. 7-5 predstavljaju orijentacijske vrijednosti temeljene na dostupnim tržišnim podacima, iskustvenim analizama i stručnim procjenama u trenutku izrade dokumenta. Iznosi i učinci imaju informativni karakter te će se detaljno potvrditi i prilagoditi u fazi izrade projektno-tehničke dokumentacije i pripreme provedbe pojedinih mjera.*

8. ANALIZA PROIZVODNJE TOPLINSKE ENERGIJE NA PODRUČJU GRADA KARLOVCA DO 2050. GODINE

Toplinski konzum značajno ovisi o meteorološkim uvjetima određenog područja što otežava precizno određivanje stvarne potrošnje toplinske energije. U kontekstu centraliziranih sustava daljinskog grijanja, moguće je analizirati instalirane kapacitete s aspekta proizvodnje ili potrošnje toplinske energije. Iako su zakupljeni kapaciteti često povezani s instaliranom snagom, ni oni ni sami instalirani kapaciteti ne pružaju jasan uvid u stvarne vršne potrebe sustava ili ukupnu potrošnju.

Planiranje dugoročnog razvoja toplinskog sustava zahtjeva analizu sadašnjih te procjenu budućih potreba za toplinskom energijom. Postojeće stanje toplinskog konzuma i glavne korisničke skupine analizirane su u poglavlju 3. Na temelju toga odredit će se nekoliko scenarija budućih potreba, a u skladu utjecajnim faktorima kao što su demografske promjene, energetska obnova zgrada, razvoj novih tehnologija i klimatske politike. Prema dinamici razvoja toplinskog sustava do 2050. godine kasnije će se definirati kapaciteti budućih izvora topline te njihova optimalna kombinacija (vidi poglavlje 10).

8.1. Metodologija izrade projekcija

Kako bi se utvrdile realne i održive potrebe za toplinskom energijom u budućem razdoblju, potrebno je sagledati sve relevantne čimbenike koji mogu utjecati na konzum toplinske energije do 2050. godine. U tom kontekstu, metodologija projekcije temelji se na pristupu koji uključuje analizu demografskih kretanja, širenja mreže, očekivane učinke energetske obnove te klimatske promjene.

Polazišna osnova analize je ogrjevna sezona 2023./2024. koja je uzeta kao referentna točka za prikaz postojećeg stanja. Prethodno je opisana u poglavlju 3.3. te predstavlja prvi cjeloviti pogonski ciklus sustava nakon provedene revitalizacije vrelovodne mreže, modernizacije toplinskih podstanica i implementacije SCADA sustava. Satni podaci o isporuci toplinske energije iz sustava Gradske toplane Karlovac dobiveni su od Naručitelja te su temelj za izradu dugoročnih projekcija.

Analiza budućih potreba provodi se u svrhu dimenzioniranja kapaciteta proizvodnih i distribucijskih jedinica te kasnije optimizacije tehnoloških rješenja i dugoročnog planiranja ulaganja. Kako bi se u obzir uzeo širok raspon mogućih okolnosti, korišten je scenarijski pristup kojim se predviđaju varijante proizvodnje toplinske energije pod različitim kombinacijama utjecajnih čimbenika.

Cjelokupan analitički pristup usklađen je s ciljevima definiranim u nacionalnim i europskim strateškim dokumentima, posebno onima koji se odnose na obnovu zgrada, korištenje obnovljivih izvora energije i dekarbonizaciju sustava grijanja. Metodološki okvir uključuje analizu demografskih kretanja, zatim podatke iz Generalnog urbanističkog plana koji određuje zone planiranog razvoja i prostornu identifikaciju mogućih novih priključaka. Analiza također uzima u obzir dugoročne klimatske trendove pri čemu se očekuje smanjenje broja grijanih stupanj-dana na području Karlovca što će imati izravan utjecaj na smanjenje ukupne potrebe za grijanjem.

U projekcijama se pretpostavlja postupna provedba energetske obnove zgrada u skladu s raspoloživim programima potpora i zakonskim obvezama, a s ciljem postizanja gotovo nulte potrošnje energije za velik dio zgradarskog fonda do 2050. godine. Također se računa na umjereno širenje mreže CTS-a, posebno u naseljima i poslovnim zonama koje su infrastrukturno dostupne. Struktura usluge se u narednom periodu neće mijenjati, odnosno CTS će i dalje opskrbljivati korisnike toplinskom energijom za potrebe grijanja, bez uključivanja potrošne tople vode.

8.2. Ključni utjecaji na buduću proizvodnju toplinske energije

8.2.1. Demografski trendovi

Prema provedenim popisima stanovništva i dostupnim statističkim procjenama za 2022. i 2023. godinu, grad Karlovac slijedi trendove karakteristične za većinu srednjih urbanih središta u Hrvatskoj, a to je blagi pad ukupnog broja stanovnika kako je prikazano u Tab. 8-1. Prema starijim verzijama Prostornih planova uređenja Grada i GUP-a, maksimalna moguća napučenost grada iznosila je 65.000 – 70.000 stanovnika. Međutim, novije verzije tih dokumenata ne daju takve informacije.

Tab. 8-1 Kretanje broja stanovnika u gradu Karlovcu u periodu od 2011. do 2023. godine

Godina	Broj stanovnika	Promjena u odnosu na prethodno razdoblje
2001.	59.395	-
2011.	55.705	-6,21 %
2021.	49.377	-11,36 %
2022.	48.643	-1,49 %
2023.	48.466	-0,36 %

Od 2001. do 2021. godine broj stanovnika smanjen je za gotovo 17 %, pri čemu je osobito izražen pad između 2011. i 2021. godine (-11,36 %). U razdoblju nakon 2021. godine trend se donekle usporava pa je procijenjeni broj stanovnika za 2023. godinu 48.466, što je tek blagi pad u odnosu na prethodnu godinu.

Iako je trend kretanja broja stanovnika na temelju prikazanih podataka negativan, za pretpostaviti je da će se trend smanjenja broja stanovnika u urbanim sredinama postupno zaustaviti te promijeniti trend u pozitivan. Razlog tome se može pronaći u konstantnoj migraciji stanovništva iz ruralnih područja u urbane sredine.

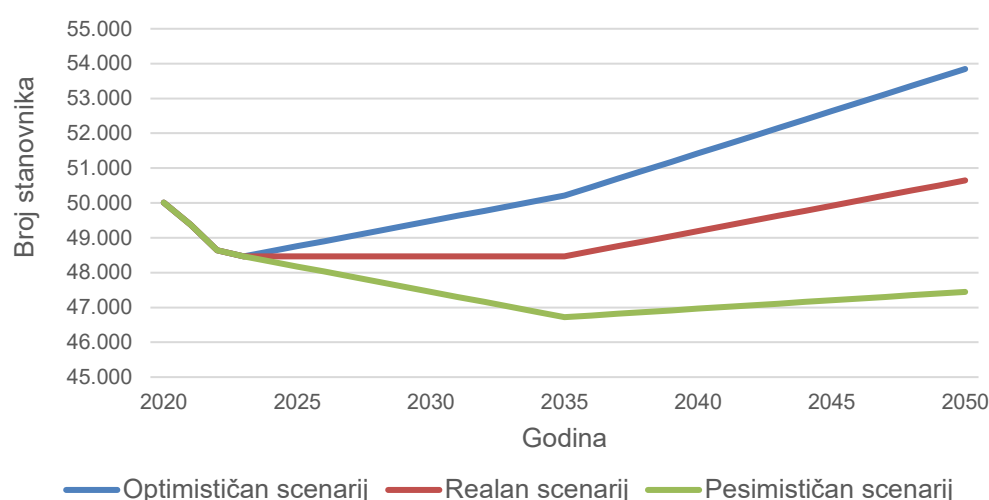
Predviđanja za buduće kretanje broja stanovnika prikazana su u tri scenarija koja se razlikuju u postotku porasta stanovništva kako je navedeno u nastavku:

- U pesimističnom scenariju predviđen je nastavak negativnog trenda kretanja broja stanovnika u iznosu od -0,3% godišnje tijekom sljedećih deset godina, a nakon toga oporavak i rast stanovnika niskom stopom od 0,1% godišnje do 2050. godine.
- U realnom scenariju, do 2035 godine predviđena je stagnacija broja stanovnika, a nakon toga rast stanovnika s godišnjom stopom od 0,3% do 2050. godine.
- Optimističan scenarij predviđa rast stanovništva do 2030. godine godišnjom stopom od 0,3%, a nakon toga rast stanovništva stopom od 0,5% do 2050. godine.

Sažeti rezultati predviđanja prirasta stanovništva prikazani su u Tab. 8-2 i grafički slikom Sl. 8–1.

Tab. 8-2 Broj stanovnika u gradu Karlovcu prema tri scenarija

Godina	Broj stanovnika		
	Optimističan scenarij	Realan scenarij	Pesimističan scenarij
2021.	49.377		
2023.	48.466		
2025.	48.757	48.466	48.175
2030.	49.484	48.466	47.448
2035.	50.211	48.466	46.721
2040.	51.422	49.193	46.964
2045.	52.634	49.920	47.206
2050.	53.846	50.647	47.448



Sl. 8–1 Scenariji kretanja broja stanovnika u gradu Karlovcu

Nužno je napomenuti da su prognoze porasta stanovništva plod pretpostavke temeljene na predviđenom porastu stanovništva u urbanim područjima te za sada nisu potvrđene od strane relevantne institucije, odnosno Državnog zavoda za statistiku. Ukoliko do porasta stanovništva ne bi došlo, već bi se nastavio trend smanjivanja broja stanovnika, tada bi dominantnu ulogu u smanjenju potrebne količine toplinske energije za potrebe grijanja, imala primjena mjera energetske obnove te utjecaj klimatskih promjena.

Sukladno podacima iz Tab. 3-3, prosječno kućanstvo koje se grije na CTS ima površinu 53,6 m² te na godišnjoj razini potroši 4,79 MWh toplinske energije. Prema Popisu stanovništva iz 2021. godine, prosječno kućanstvo sastoji se od 2,51 osobe te se iz tih podataka dolazi do potrošnje toplinske energije u kućanstvima do 2050. godine.

8.2.2. Novi priključci i širenje mreže

Prema financijskim izvješćima za 2022. i 2023. godinu, zabilježen je blagi pad broja korisnika CTS-a, prvenstveno kao posljedica isključivanja krajnjih korisnika s mreže. Navedeni negativni trend potrebno je zaustaviti te potaknuti korisnike na ponovno priključenje, osobito objekte javne namjene i novoizgrađene zgrade.

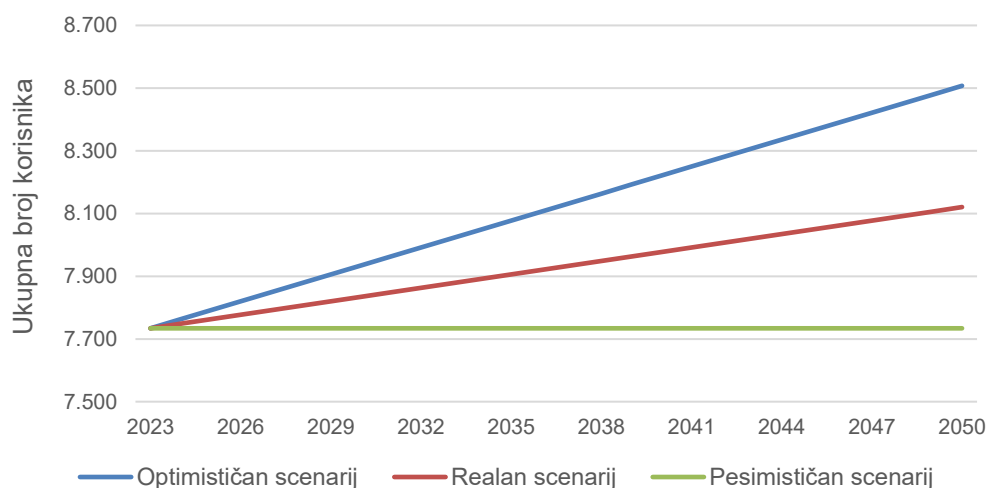
U Generalnom urbanističkom planu grada Karlovca iz listopada 2024. godine definirane su zone područja na kojima je predviđeno širenje postojeće mreže CTS-a, a obuhvaćaju područja:

- Z3-01 Gaza-Kupa
- Z3-02 Sjeverno od Kupe-Banija-Selce
- Z3-03 Ilovac, Z3- 04 Bolnica
- Z3-05 Švarča sjever
- Baščina jug
- Z3-06 Industrijska zona sjeverna obala Mrežnice.

U 2023. godini zabilježeno je ukupno 7.734 korisnika CTS-a, od toga 7.427 pripadaju sektoru kućanstava, a ostalih 307 su industrijski i poslovni potrošači. Prema dostupnim podacima, predviđa se vraćanje korisnika na mrežu te postepeno širenje mreže, a prema tri scenarija do 2050 godine:

- Pesimistični scenarij predviđa stagnaciju broja priključaka za kućanstva te industrijske i poslovne korisnike do 2050. godine.
- Realni scenarij predviđa povećanje ukupnog broja priključaka za ukupno 5% do 2050. godine.
- Optimistični scenarij predviđa najveći rast, s povećanjem ukupnog broja priključaka za ukupno 10% do 2050. godine

Kretanje broja priključenih korisnika prikazani su grafički na Sl. 8–2 te brojčano po kategorijama korisnika u Tab. 8-3.



Sl. 8–2 Scenariji promjene broja priključenih korisnika

Tab. 8-3 Scenariji promjene broja priključenih korisnika po kategoriji korisnika

Godina	Broj korisnika iz kategorije kućanstva		
	Optimističan scenarij	Realan scenarij	Pesimističan scenarij
2023.	7.427		
2025.	7.482	7.455	7.427
2030.	7.620	7.523	7.427

2035.	7.757	7.592	7.427
2040.	7.895	7.661	7.427
2045.	8.032	7.730	7.427
2050.	8.170	7.798	7.427
Godina	Broj korisnika iz kategorije industrijski i poslovni korisnici		
	Optimističan scenarij	Realan scenarij	Pesimističan scenarij
2023.	307		
2025.	309	308	307
2030.	315	311	307
2035.	321	314	307
2040.	326	317	307
2045.	332	320	307
2050.	338	322	307
Godina	Ukupan broj korisnika		
	Optimističan scenarij	Realan scenarij	Pesimističan scenarij
2023.	7.734		
2025.	7.791	7.763	7.734
2030.	7.935	7.834	7.734
2035.	8.078	7.906	7.734
2040.	8.221	7.977	7.734
2045.	8.364	8.049	7.734
2050.	8.507	8.121	7.734

8.2.3. Energetska obnova i povećanje učinkovitosti

Utjecaj energetske obnove, a koja se provodila u proteklom periodu, najbolje je vidljiv iz usporedbe potrošnje toplinske energije prije i nakon obnove. Usporedba je napravljena na temelju podataka o potrošnji iz šest toplinskih stanica, a kako je navedeno u tablici Tab. 8-4.

Tab. 8-4 Usporedba potrošnje toplinske energije u toplinskim stanicama prije i poslije energetske obnove

Toplinska stanica	Godina energetske obnove	Prosječna potrošnja prije energetske obnove, kWh	Prosječna potrošnja nakon energetske obnove, kWh	Postotak smanjenja potrošnje toplinske energije nakon energetske obnove
Smičiklasova 15	2021.	65.200	46.522	29%
I. Kršnjavog 10C	2022.	267.733	228.995	14%
Sarajevska 8B	2019.	282.800	265.330	6%
K. P. Krešimira IV 6A	2022.	252.400	210.260	17%
I. Meštrovića 6A	2019.	109.191	64.446	41%
V. Mačeka 15B	2022.	133.007	108.826	18%

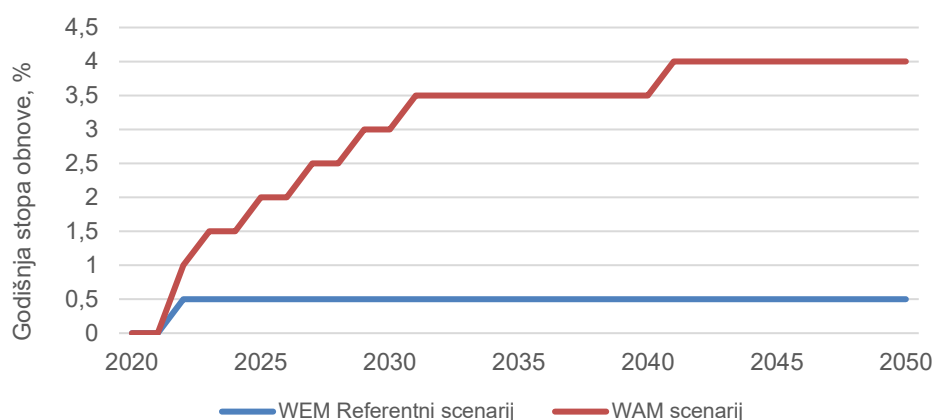
Za potrošnju toplinske energije prije energetske obnove analiziran je vremenski period od 2016. do 2018. godine, a za potrošnju nakon energetske obnove period 2023. i 2024. godine. Energetska obnova u konkretnim slučajevima sastojala se od poboljšanja svojstava vanjske ovojnice, nije uključivala zamjenu vanjske stolarije jer je u većini slučajeva već obavljena.

Zabilježeni postotci smanjenja potrošnje toplinske energije nakon provedene energetske obnove kreću se u rasponu od 6% do 41%. Ove razlike djelomično su rezultat činjenice da prilikom analize nije uziman u obzir stvarni broj nastanjenih stanova niti broj korisnika u njima prije i poslije obnove, već se potrošnja temeljila isključivo na isporučenoj količini energije prema toplinskoj stanici. Za potrebe daljnje analize koristi se prosječna vrijednost smanjenja potrošnje koja iznosi 21%.

Okvirne ciljane stope obnove stambenog fonda (prikazane na Sl. 8–3) preuzete su iz Dugoročne strategije obnove nacionalnog fonda zgrada do 2050. godine koja je izdana od strane Ministarstva prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine, a uvažava sve relevantne europske direktive.

Za renovaciju stambenog fonda predviđena su dva scenarija:

- WEM scenarij (With Existing Measures) - scenarij koji predviđa nastavak postojećih mjera obnove bez dodatnih investicija. Stopa obnove zgrada je niska, obnove su djelomične, obuhvaćaju zamjene stolarije i poboljšanje ovojnice zgrade bez sanacije sustava grijanja. Takva dinamika obnove ne vodi potpunoj dekarbonizaciji do 2050. godine.
- WAM scenarij (With Additional Measures) – scenarij koji intenzivira mjere obnove te postepeno povećava godišnje stope obnove kako bi sektor zgradarstva 2050. godine bio u potpunosti dekarboniziran.



Sl. 8–3 Scenariji stope renovacije u zgradarstvu do 2050. godine

8.2.4. Klimatske promjene i smanjenje potreba za grijanjem

U utjecaj na toplinski konzum grada Karlovca u budućnosti imat će klimatske promjene te posljedično smanjenje potreba za grijanjem. Prema meteorološkim prognozama ne postoji indikacija za pojavu znatno hladnijih zima u odnosu na recentne klimatološke podatke. Dugoročne analize klimatskih trendova dapače sugeriraju blagi porast prosječnih temperatura, što bi moglo rezultirati smanjenjem potrebnog toplinskog učinka tijekom zimskih mjeseci, a ne njegovo povećanje.

U nastavku su prikazane projekcije broja stupanj dana grijanja (Heating Degree Days – HDD) za područje Republike Hrvatske, izrađene na temelju podataka preuzetih s Climate Change Knowledge portala²¹ Svjetske banke. Broj stupanj dana grijanja predstavlja zbroj temperaturnih razlika između unutarnje projektne temperature i srednje dnevne vanjske temperature za sve dane sezone grijanja.

Analiza se temelji na klimatskom modelu koji uspoređuje povijesno referentno razdoblje (1995.–2014.) s očekivanim vrijednostima HDD-a prema različitim budućim scenarijima socioekonomskog razvoja i emisija stakleničkih plinova.

U analizi je za unutarnju projektanu temperaturu uzimana vrijednost od 18,33 °C (odnosno 65 °F). Prema Tehničkom propisu o racionalnoj upotrebi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN128/15, 70/18) unutarnja projektana temperatura za stambene prostore iznosi 20 °C. Budući da se u ovoj analizi promatra isključivo relativna promjena broja grijanih stupanj dana kroz vrijeme, a unutarnja projektana temperatura se ne mijenja kroz razdoblje, ona ne utječe na rezultat. Stoga je usporedba vremenskog trenda valjana bez obzira na korišteni standard.

Scenariji korišteni u ovoj analizi temelje se na tzv. SSP modelima (Shared Socioeconomic Pathways), koji opisuju moguće putanje razvoja društva i emisija, a to su:

- SSP1-2.6 – scenarij održivog razvoja i niskih emisija koji pretpostavlja ulaganje u obnovljive izvore energije i globalnu klimatsku suradnju.
- SSP2-4.5 – srednji scenarij, poznat i kao "business as usual", uključuje umjerene napore u dekarbonizaciji i zadržavanje sadašnjih trendova.
- SSP3-7.0 – scenarij visoke emisije i geopolitičke fragmentacije koji pretpostavlja slabu međunarodnu suradnju i visoku ovisnost o fosilnim gorivima.
- SSP5-8.5 – ekstremni scenarij ubrzanog ekonomskog rasta temeljenog na fosilnim gorivima i vrlo visokim emisijama stakleničkih plinova.

S obzirom na nedostatak specifičnih i pouzdanih projekcija HDD-a za grad Karlovac, u ovoj analizi su korišteni agregirani podaci za cijelu Hrvatsku. Iako takav pristup ne uvažava sve mikroklimatske osobitosti lokalne sredine, nacionalni prosjek se u ovom kontekstu smatra relevantnim pokazateljem trenda za područje kontinentalne Hrvatske kojem Karlovac pripada.

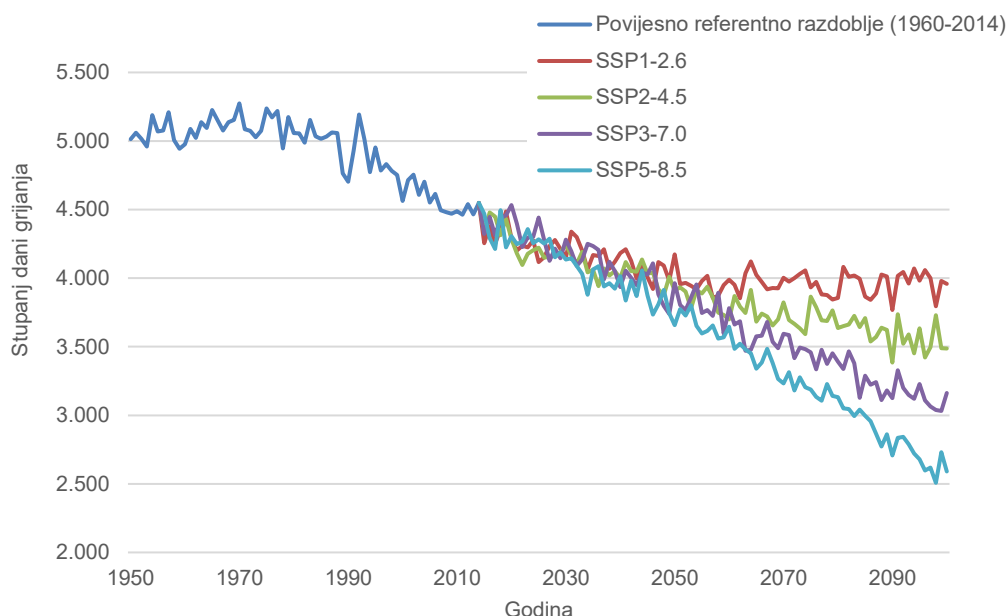
U nastavku su prikazani numerički i grafički rezultati projekcija broja stupanj dana grijanja prema navedenim SSP scenarijima.

Tab. 8-5 Projekcija stupanj dana grijanja za Hrvatsku

Godina	Broj stupanj dana grijanja			
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2023.	4.223,85	4.177,36	4.297,82	4.356,72
2025.	4.116,86	4.222,81	4.442,19	4.281,87
2030.	4.150,53	4.242,68	4.279,51	4.136,83
2035.	4.169,68	4.061,75	4.234,99	4.036,33

²¹ Izvor: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/croatia/climate-data-projections>

2040.	4.182,54	4.000,62	3.935,72	4.013,97
2045.	4.006,95	4.034,01	4.026,86	3.875,52
2050.	4.172,76	3.908,99	3.962,76	3.656,91
Smanjenje emisija 2050. godine u odnosu na 2023.	-1,21%	-6,42%	-7,8%	-16,1%



Sl. 8–4 Scenariji broja stupanj dana grijanja za Hrvatsku od 1950. do 2100. godine

Prema svim scenarijima, broj grijanih stupanj dana u Hrvatskoj se smanjuje što ukazuje na trend zatopljenja i smanjenja potrebe za grijanjem. Do 2050. godine očekuje se smanjenje HDD-a između 1,2% i 16,1%, ovisno o razini emisija i klimatskim politikama.

8.3. Scenariji proizvodnje toplinske energije

Od prethodno definiranih ključnih utjecaja na proizvodnju toplinske energije moguće je teorijski formirati 72 kombinacije scenarija. U cilju jasnoće, preglednosti i praktične primjene u strateškom planiranju, u nastavku su odabrana tri reprezentativna scenarija s opisanim pretpostavkama. Oni su temelj za daljnju analizu tehnoloških rješenja, dimenzioniranje proizvodnih kapaciteta i određivanje investicijskih potreba u procesu dekarbonizacije sustava.

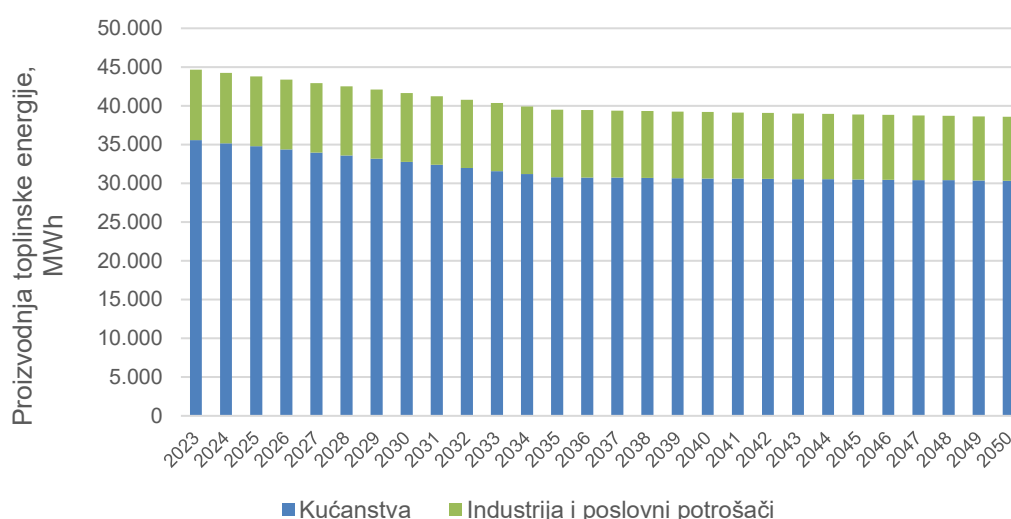
Za svaki od prikazanih scenarija bit će dane projekcije proizvodnje toplinske energije posebno za kućanstva te za industrijske i poslovne potrošače, za razdoblje do 2050. godine.

8.3.1. Referentni scenarij (Business as Usual)

Referentni scenarij temelji se na pretpostavci ograničenog razvoja, bez dodatnih poticajnih mjera u odnosu na postojeće stanje. U ovom scenariju predviđa se:

- Pesimističan kretanje broja stanovnika s godišnjim padom broja stanovnika u iznosu od -0,3 % do 2035., a zatim oporavak i rast od 0,1 % do 2050. godine što odražava minimalni porast stanovništva i nisku stopu migracijskog prirasta.
- Pesimistično kretanje broja priključaka, odnosno stagnacija njihovog broja do 2050. godine što odražava ograničeno širenje mreže i priključivanje novih korisnika uz paralelno isključivanje postojećih korisnika.
- Primjena WEM scenarija obnove zgrada pri čemu se provode samo osnovne mjere energetske učinkovitosti bez sustavnih dubinskih obnova (zamjena stolarije, osnovna sanacija ovojnice).
- Smanjenje potreba za grijanjem prema klimatskom scenariju SSP2-4.5, odnosno za 6,42% u 2050. godini.

Scenarij odražava zadržavanje postojećih trendova i ograničeno djelovanje u pogledu dekarbonizacije i modernizacije toplinskog sustava. U nastavku je grafički i tablično prikazan iznos potrebne proizvodnje toplinske energije za zadovoljavanje toplinskog konzuma posebno za kućanstva te industriju i poslovne potrošače.



Sl. 8-5 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema referentnom scenariju

Tab. 8-6 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema referentnom scenariju

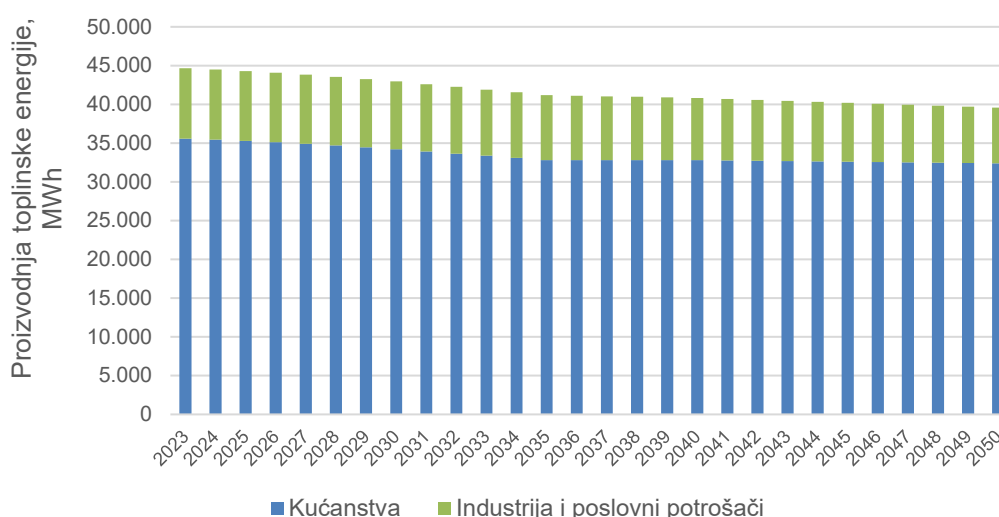
Proizvodnja toplinske energije, MWh							
Godina	2023.	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Kućanstva	35.573	34.774	32.777	30.780	30.633	30.486	30.338
Industrija i poslovni potrošači	9.092	9.030	8.873	8.717	8.561	8.405	8.249
Ukupno	44.665	43.804	41.651	39.497	39.194	38.891	38.587

8.3.2. Umjereni razvoj uz mjere energetske učinkovitosti

Scenarij umjerenog razvoja uz mjere energetske učinkovitosti temelji se na realističnoj projekciji rasta toplinskog konzuma uz primjenu ciljano usmjerenih mjera energetske obnove i širenja sustava. U ovom scenariju predviđa se:

- Realan rast broja stanovnika, odnosno stagnacija broja stanovnika do 2035. godine, a zatim godišnji rast od 0,3 % što odražava stabilizaciju i postupno povećanje broja stanovnika.
- Realan rast broja novih priključaka za ukupno 5% do 2050. godine.
- Primjena WAM scenarija obnove, uz sustavnije i dublje mjere energetske obnove zgrada koje uključuju sveobuhvatnu sanaciju ovojnice i sustava grijanja.
- Smanjenje potreba za grijanjem prema klimatskom scenariju SSP2-4.5, odnosno za 6,42% u 2050. godini.

U nastavku je grafički i tablično prikazan iznos potrebne proizvodnje toplinske energije za zadovoljavanje toplinskog konzuma posebno za kućanstva te industriju i poslovne potrošače.



Sl. 8–6 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema scenariju umjerenog razvoja

Tab. 8-7 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema scenariju umjerenog razvoja

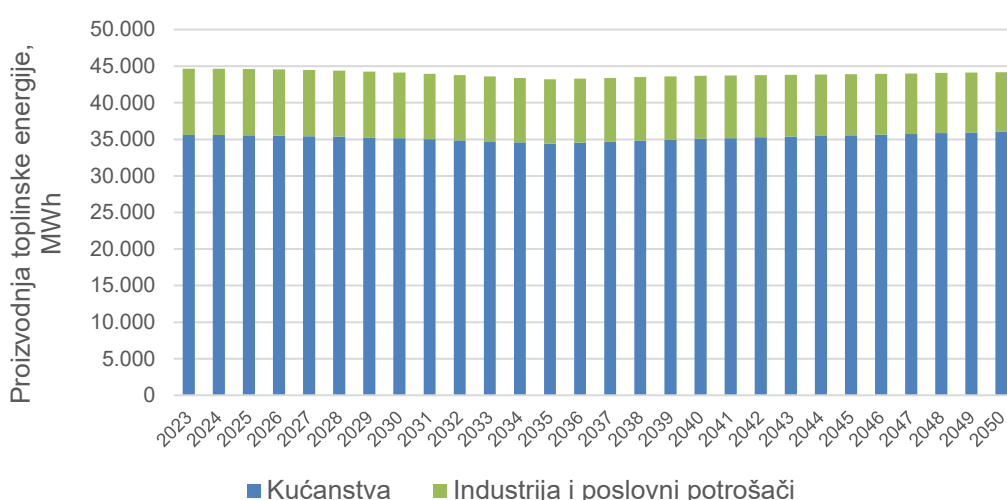
Proizvodnja toplinske energije, MWh							
Godina	2023.	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Kućanstva	35.573	35.274	34.209	32.808	32.795	32.594	32.394
Industrija i poslovni potrošači	9.092	9.015	8.741	8.381	8.021	7.613	7.204
Ukupno	44.665	44.289	42.951	41.190	40.816	40.207	39.598

8.3.3. Dekarbonizacijski scenarij s visokim priključenjem i obnovom

Dekarbonizacijski scenarij s visokim priključenjem i obnovom temelji se na pretpostavci intenzivne provedbe mjera dekarbonizacije centraliziranog toplinskog sustava uz istodobno širenje mreže i povećanje energetske učinkovitosti zgrada. U ovom scenariju predviđa se:

- Realan rast broja stanovnika, odnosno stagnacija broja stanovnika do 2035. godine, a zatim godišnji rast od 0,3 % što odražava stabilizaciju i postupno povećanje broja stanovnika.
- Značajan rast ukupnog broja priključaka za 10% do 2050. godine s naglaskom na širenje mreže na nova područja i priključenje ukupno
- Primjena WAM scenarija obnove, uz sveobuhvatne mjere dubinske energetske obnove zgrada i visok stupanj implementacije učinkovitih sustava grijanja.
- Smanjenje potreba za grijanjem prema klimatskom scenariju SSP1-2.6, odnosno za 1,21% u 2050. godini što označava usporeni utjecaj klimatskih promjena.

U nastavku je grafički i tablično prikazan iznos potrebne proizvodnje toplinske energije za zadovoljavanje toplinskog konzuma posebno za kućanstva te industriju i poslovne potrošače.



Sl. 8–7 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema dekarbonizacijskom scenariju

Tab. 8-8 Proizvodnja toplinske energije do 2050. godine prema dekarbonizacijskom scenariju

Proizvodnja toplinske energije, MWh							
Godina	2023.	2025.	2030.	2035.	2040.	2045.	2050.
Kućanstva	35.573	35.543	35.151	34.423	35.082	35.554	36.026
Industrija i poslovni potrošači	9.092	9.084	8.982	8.794	8.605	8.369	8.133
Ukupno	44.665	44.627	44.133	43.216	43.687	43.923	44.159

8.4. Zaključak

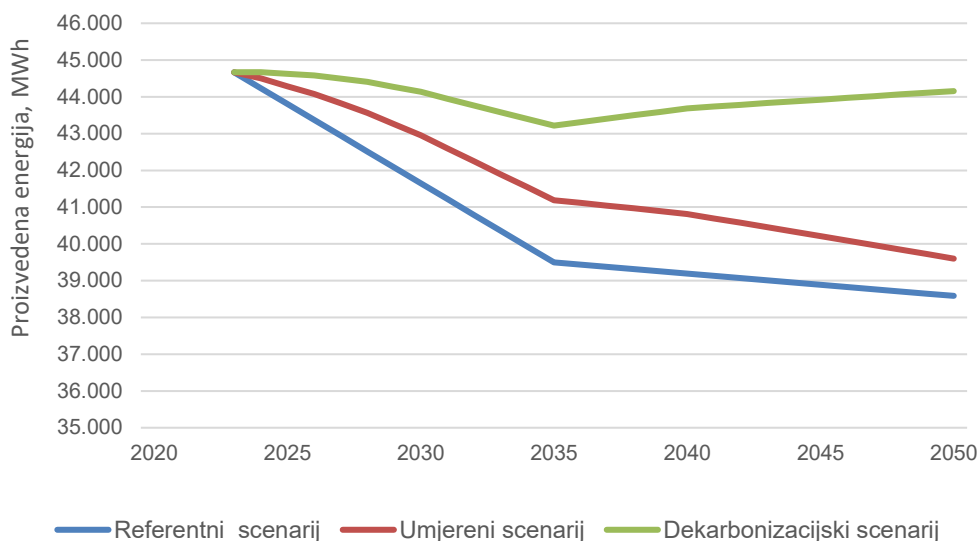
Analiza proizvodnje toplinske energije do 2050. godine, temeljena na tri scenarija – referentnom, umjerenom i dekarbonizacijskom – ukazuje na snažan utjecaj demografskih trendova, stope priključenja, mjera energetske obnove i klimatskih promjena na ukupnu potrošnju toplinske energije. Kombinacije ulaznih pretpostavki prikazane su u Tab. 8-9.

Tab. 8-9 Značajke analiziranih scenarija

	REFERENTNI SCENARIJ	UMJERENI SCENARIJ	DEKARBONIZACIJSKI SCENARIJ
Demografski trendovi	Pesimističan scenarij	Realan scenarij	Realan scenarij
Novi priključci i širenje mreže	Pesimističan scenarij	Realan scenarij	Optimističan scenarij
Energetska obnova i povećanje energetske učinkovitosti	WEM scenarij	WAM scenarij	WAM scenarij
Klimatske promjene i smanjenje potreba za grijanjem	Klimatski scenarij SSP2-4.5	Klimatski scenarij SSP2-4.5	Klimatski scenarij SSP1-2.6

Demografski trendovi te novi priključci i širenje mreže utječu na porast proizvodnje toplinske energije. Istovremeno, energetska obnova i povećanje energetske učinkovitosti te klimatske promjene doprinose istovremenom smanjenju proizvodnje toplinske energije. Prikazanom kombinacijom scenarija za različite utjecajne faktore dobiveni su sljedeći rezultati, a koji su grafički prikazani na Sl. 8–8 :

- Referentni scenarij – nagli pad proizvodnje toplinske energije do 2035. godine, a nakon toga blaži pad. Proizvodnja toplinske energije u 2050. godini ukupno je za 13,6% manji od početnog u 2023. godini.
- Umjereni scenarij - također pad proizvodnje toplinske energije do 2035. godine, a nakon čega slijedi blaži pad. Proizvodnja toplinske energije u 2050. godini ukupno je za 11,3% manji od početnog u 2023. godini.
- Dekarbonizacijski scenarij – blagi pad proizvodnje toplinske energije do 2035. godine, a nakon čega slijedi blagi rast do 2050. godine. Proizvodnja toplinske energije u 2050. godini ukupno je za 1,1% veći od početnog u 2023. godini što zapravo predstavlja stagnaciju.



Sl. 8–8 Usporedba scenarija proizvodnje toplinske energije do 2050. godine

Na temelju prethodno provedene analize, dekarbonizacijski scenarij pokazuje se kao racionalan izbor jer jedini omogućuje ostvarenje nacionalnih i europskih ciljeva klimatske neutralnosti do 2050. godine. Iako zahtjevniji u pogledu ulaganja i provedbenih kapaciteta, takav pristup omogućuje znatno smanjenje emisija, povećanje broja korisnika i bolju integraciju obnovljivih izvora energije. Također, pruža najširu osnovu za korištenje dostupnih izvora sufinanciranja, posebno iz europskih fondova koji prioritetno podupiru zelenu tranziciju.

S obzirom na navedeno, preporučuje se usmjerenje razvoja CTS-a Karlovac prema **dekarbonizacijskom scenariju** uz mogućnost fazne provedbe i prilagodbe dinamike ulaganja sukladno raspoloživim resursima. Time se osigurava ravnoteža između ambicioznih klimatskih ciljeva i realnih kapaciteta za njihovu provedbu.

Proizvodnja toplinske energije prema dekarbonizacijskom scenariju bit će osnova za određivanje optimalne kombinacije tehnologija za ostvarivanje cilja dekarbonizacije proizvodnih lokacija, a koja je prikazana u sljedećem poglavlju.

9. METODOLOGIJA ODABIRA OPTIMALNE KOMBINACIJE TEHNOLOGIJA

Metodologija odabira optimalne kombinacije tehnologija polazi od ciljeva dekarbonizacije definiranih u poglavlju 4.2, odnosno od zahtijevanih udjela obnovljivih izvora energije u pojedinim referentnim godinama.

Na temelju propisanih ciljeva model provjerava koje kombinacije tehnoloških rješenja i mjera omogućuju njihovo ispunjenje. U sljedećem koraku se između svih izvedivih kombinacijama odabire ona koja ostvaruje najpovoljnije ekonomske rezultate, odnosno minimizira troškove uz istodobno osiguravanje postavljenih ciljeva.

9.1. Parametri simulacije i ograničenja

Sve analize i simulacije provedene u sklopu ovog Strateškog plana vođene su s ciljem postizanja što većeg udjela obnovljivih izvora energije u sustavu uz istovremenu maksimizaciju profita. Dakle, funkcija cilja primijenjena u odgovarajućem MILP algoritmu je maksimizacija (max). Budući da bi zbog povoljnije tržišne cijene postojeći vrelovodni plinski kotao u takvom modelu imao tendenciju dominirati u proizvodnji, u simulacijama je njegova uporaba postavljena kao nepovoljnija opcija, odnosno forsira se njegov nerad. Na taj je način osigurano da se postojeći plinski kotao uključuje u pogon tek u slučajevima kada ostali izvori nisu dostatni čime se ujedno postiže veći udio obnovljivih izvora energije u ukupnom energetsom miksu.

Cijeli model, koji uključuje opis svih postojećih i budućih jedinica te svih dodatnih ograničenja sustava, definiran je linearnim jednadžbama. Pri tome su kod definiranja pojedinih jedinica uvažavana slijedeća ograničenja:

- maksimalna snaga pojedine jedinice,
- tehnički minimum pojedine jedinice,
- stupanj djelovanja,
- vrijeme (u satima) koje jedinica kada jednom uđe u pogon mora u pogonu i ostati - na taj način izbjegava se kratkotrajno paljenje jedinica što je u suprotnosti s dobrom praksom vođenja pogona,
- penalizirane su nepotrebne oscilacije u opterećenju pojedinih jedinica čime se osigurava kontinuiran i stabilan rad pojedinih jedinica,
- u obzir je uzimani trošak starta pojedine jedinice pri čemu algoritam razlikuje „hladni“ od „toplog“ starta. „Hladni“ start se definira vremenom koje je potrebno proći (u satima) nakon gašenja pojedine jedinice kada njeno ponovno paljenje zahtjeva veći broj sati predgrijavanja i kao takvo generira povećane troškove starta.

Uz navedena ograničenja vezana za pojedine jedinice, u model su unesena i neka općenita ograničenja:

- ukupna količina proizvedene toplinske energije (uključivo i količinu toplinske energije preuzete iz akumulatora) mora biti jednaka zadanoj/zahtijevanoj količini

toplinske energije sukladno podacima o očekivanom toplinskom konzumu Grada Karlovca koji je definiran u poglavlju 8.

- temperatura polazne mrežne vode mora odgovarati zahtjevima toplinskog konzuma, drugim riječima to znači da algoritam vodi računa o tome da kada je zahtijevana temperatura vode u akumulatoru topline manja od zahtjeva potrošača, ograniči korištenje topline iz akumulatora i u većoj mjeri angažira proizvodne jedinice koje mogu proizvesti toplinu viših parametara (npr. vrelovodni plinski kotao).

9.2. Projekcija budućih cijena energije i goriva

9.2.1. Projekcije cijena (godišnji prosjek)

Projekcije cijena prirodnog plina i CO₂ do 2050. godine temelje se na procjenama iz službenih dokumenata koje je objavila Europska komisija: „Preporučeni parametri za izvještavanje o projekcijama emisija stakleničkih plinova u 2023. godini”, verzija nakon konzultacija s Radnom skupinom 2 u okviru Odbora za klimatske promjene 10. ožujka 2022., podjela nacrtu preporuka 30. ožujka 2022. i konzultacije s nacionalnim stručnjacima imenovanim od strane članova Radne skupine 2, 26. travnja 2022.

Tab. 9-1 Projekcije cijena prirodnog plina, električne energije i CO₂

Godina	Cijena CO ₂		Prirodni plin			Električna energija	
	EUR/tCO ₂ (WEM)	EUR/tCO ₂ (WAM)	EUR/MWh _{NG}	EUR/MWh _{NG} (with CO ₂) (WEM)	EUR/MWh _{NG} (with CO ₂) (WAM)	EUR/MWh _{EE} (WEM)	EUR/MWh _{EE} (WAM)
2027	80,00	80,00	44,78	62,40	62,40	124,80	124,80
2028	80,00	80,00	43,42	61,03	61,03	122,06	122,06
2029	80,00	80,00	42,05	59,66	59,66	119,33	119,33
2030	80,00	80,00	40,68	58,30	58,30	116,59	116,59
2031	80,40	80,00	40,68	58,38	58,30	116,77	116,59
2032	80,80	80,00	40,68	58,47	58,30	116,94	116,59
2033	81,20	80,00	40,68	58,56	58,30	117,12	116,59
2034	81,60	80,00	40,68	58,65	58,30	117,30	116,59
2035	82,00	120,00	40,68	58,74	67,10	117,47	134,21
2036	82,60	146,00	40,68	58,87	72,83	117,74	145,66
2037	83,20	172,00	40,68	59,00	78,55	118,00	157,11
2038	83,80	198,00	40,68	59,13	84,28	118,27	168,56
2039	84,40	224,00	40,68	59,26	90,00	118,53	180,01
2040	85,00	250,00	40,68	59,40	95,73	118,79	191,46
2041	94,00	272,00	40,68	61,38	100,57	122,76	201,15
2042	103,00	294,00	40,68	63,36	105,42	126,72	210,84
2043	112,00	316,00	40,68	65,34	110,26	130,68	220,53
2044	121,00	338,00	40,68	67,32	115,11	134,65	230,22
2045	130,00	360,00	40,68	69,31	119,95	138,61	239,90
2046	136,00	370,00	41,04	70,99	122,51	141,97	245,03
2047	143,50	382,50	41,49	73,09	125,72	146,18	251,43
2048	153,50	399,17	42,09	75,89	129,99	151,78	259,97
2049	168,50	424,17	42,99	80,09	136,39	160,19	272,78
2050	160,00	410,00	42,48	77,71	132,76	155,42	265,52

Cijene CO₂ definirane su za dva različita scenarija: „WAM” i „WEM”.

„WAM” (With Additional Measures) i „WEM” (With Existing Measures) predstavljaju dva pristupa modeliranju emisija CO₂, često korištena u planiranju energetske projekata. WEM je osnovni scenarij koji se temelji na postojećim politikama, dok WAM uključuje kako postojeće, tako i dodatno planirane mjere za ambiciozniju putanju smanjenja emisija.

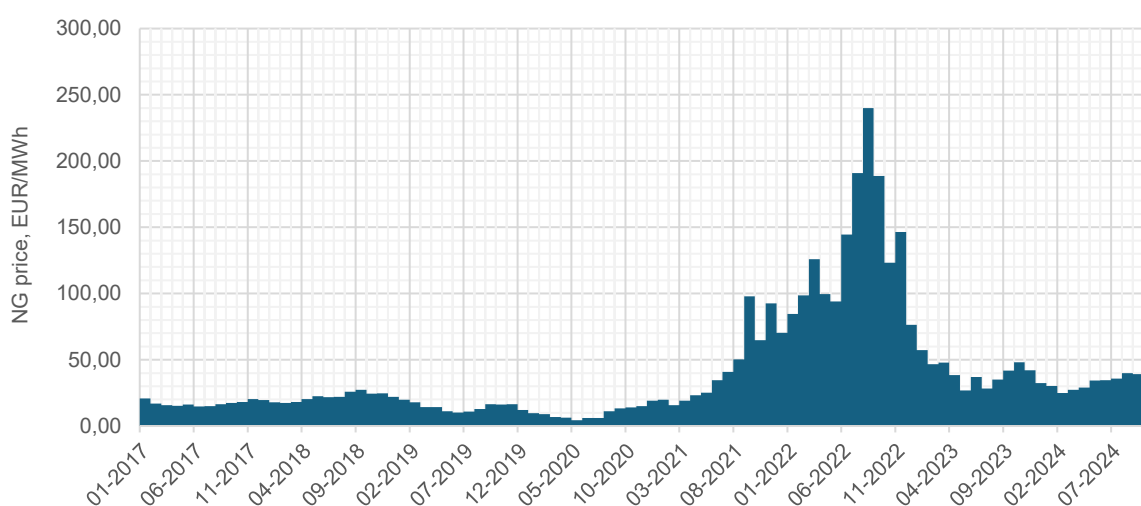
Tržišne cijene električne energije (Tab. 9-1) nisu specificirane u gore spomenutom dokumentu Europske komisije. Stoga su u modelu procijenjene kao dvostruko veće od cijene prirodnog plina. Ova pretpostavka temelji se na uobičajenoj tržišnoj učinkovitosti plinskih elektrana koje rade s približno 50% učinkovitosti, čime se relativni trošak električne energije udvostručuje u odnosu na prirodni plin.

Detaljno objašnjenje ove korelacije i njezine temeljne logike, prikazano je u nastavku.

9.2.2. Korelacija cijena prirodnog plina i električne energije

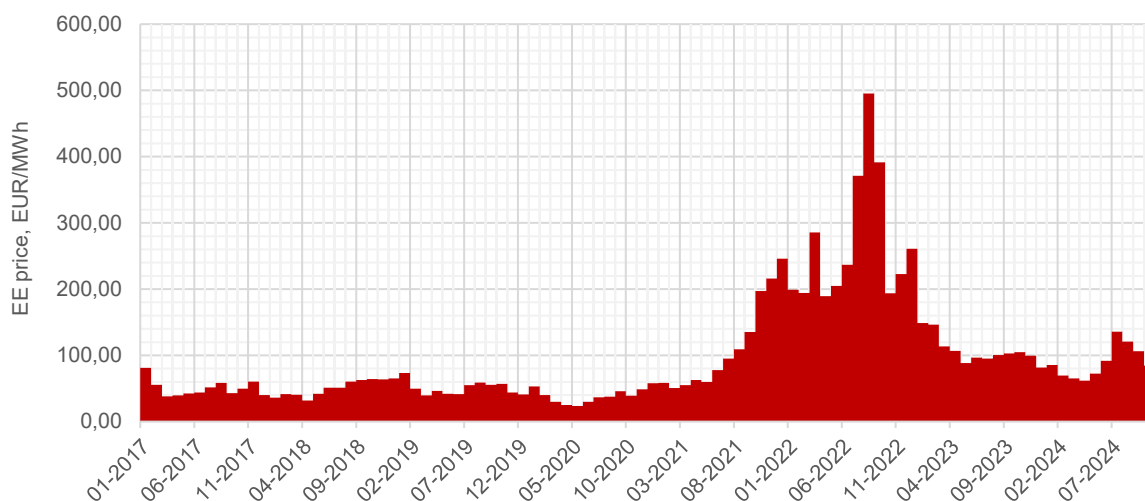
Porast cijena električne energije (kako prodajnih, tako i nabavnih) posljedica je tržišne organizacije, gdje se cijene određuju prema graničnom trošku posljednjeg proizvedenog MWh. Drugim riječima, najskuplja proizvodna jedinica koja je u pogonu u bilo kojem trenutku određuje cijenu električne energije, što je u većini slučajeva proizvodnja iz prirodnog plina.

Ovaj odnos jasno je prikazan na sljedećim dijagramima.



Sl. 9–1 Cijene prirodnog plina od 2017 godine²²

²² Source: HUPX Hungarian power Exchange (<https://hupx.hu/en/market-data/dam/historical-data>)



Sl. 9–2 Cijene električne energije od 2017 godine²³

Priloženi dijagrami jasno pokazuju da cijene električne energije i prirodnog plina usko prate jedna drugu (kada raste cijena prirodnog plina, raste i cijena električne energije). Ovo je snažan dokaz za tvrdnju da cijenu električne energije diktira cijena plina, bez obzira na sve veći udio obnovljivih izvora energije.

Očekuje se da će se ovaj trend nastaviti i u budućnosti, budući da je malo vjerojatno da će sve plinske proizvodne jedinice biti potpuno ugašene do kraja promatranog razdoblja. Stoga je razumno očekivati da će se cijene električne energije i prirodnog plina i dalje kretati zajedno pri čemu će cijene električne energije obično biti dvostruko veće od cijena prirodnog plina na bazi MWh.

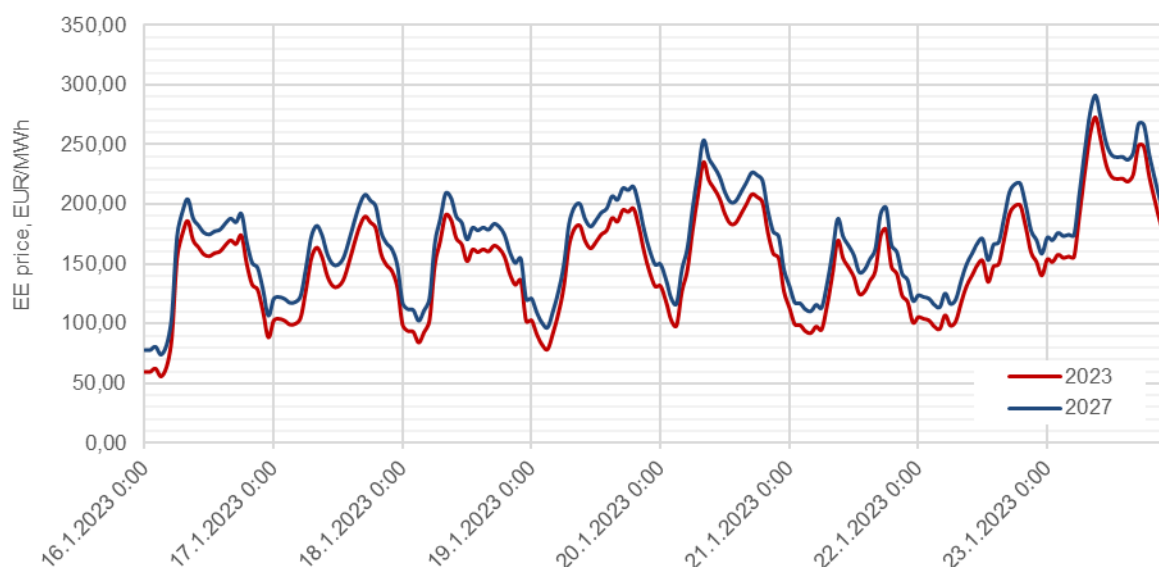
9.2.3. Buduće cijene električne energije (satna rezolucije)

Projekcije budućih cijena električne energije korištene se u satnoj rezoluciji te omogućuju detaljnu, vremenski osjetljivu analizu fluktuacija cijena električne energije kroz dulja razdoblja. Ova izrazito granulirana projekcija pruža uvid u dnevne i sezonske obrasce, pomažući u optimizaciji operativnih strategija za električne kotlove i dizalice topline.

S obzirom na nedostatak preciznih podataka za Hrvatsku zbog njenog ograničenog i nerazvijenog tržišta električne energije, model koristi podatke s Mađarske burze električne energije (HUPX) kao osnovu za predviđanje satnih cijena električne energije. Konkretno, korišteni su podaci HUPX-a iz 2023. godine, ne kao konkretne vrijednosti, već za uspostavu korelacije između cijena električne energije u različitim dijelovima dana. Ovaj pristup osigurava da projicirani niz satnih cijena električne energije odražava standardizirani i konzistentan obrazac promatran na usporedivom tržištu.

²³ Source: Investing.com Dutch TTF Natural Gas Futures Historical Data
(<https://www.investing.com/commodities/dutch-ttf-gas-c1-futures-historical-data>)

Posljedično, satne cijene korištene u modelu razvijene su dakle uz pomoću podataka s HUPX-a, koji služe isključivo za pružanje vremenske strukture, osiguravajući točne obrasce, a ne specifične vrijednosti cijena.



Sl. 9–3: Usporedba cijena električne energije između 2023. i predviđenih cijena za 2027. godinu (Karakteristični isječak: 16.01.2023. - 23.01.2023.)

9.2.4. Projekcija cijena biomase

Definiranje cijene biomase opisano je ranije u poglavlju 6.1.5 pri čemu je utvrđeno da će se cijena formirati u paritetu s projekcijama cijena prirodnog plina, uzimajući u obzir i pripadajuće troškove te mehanizme zaštite od tržišne nestabilnosti. Trenutna predviđanja cijene biomase je 41,31 EUR/MWh, a daljnja kretanja cijene biomase bit će uvjetovano kretanjem cijena prirodnog plina.

9.2.5. Kupovna cijena toplinske energije

Geotermalni izvor toplinske energije, sukladno informacijama Investitora i planovima Grada Karlovca, trebao bi biti razvijen i izgrađen od strane poslovnog subjekta (potencijalno u vlasništvu Grada) koji nije vlasnički vezan za tvrtku Gradska toplana d.o.o. Karlovac. Drugim riječima, tvrtka Gradska toplana d.o.o. ne bi bila vlasnik samog proizvodnog pogona, već bi od novoosnovane tvrtke samo otkupljivala toplinsku energiju.

Cijena takve energije predmet je poslovnih pregovora te u ovako ranoj fazi projekta nije poznata, no za potrebe ove analize konzervativno je pretpostavljeno da će cijena topline biti vezana uz tržišnu cijenu prirodnog plina te će biti analizirano kakav odnos cijena prirodnog plina i geotermalne energije treba biti kako bi geotermalna energija mogla konkurirati ostalim izvorima energije. (vidi poglavlje 10.1.3).

9.2.6. Prodajna cijena toplinske energije

U okviru analize, prihod od prodaje toplinske energije krajnjim kupcima modelira se kao ulazni parametar. Konzervativno je pretpostavljeno da će vrijednost prodajne cijene topline će ostati konstantna u periodu promatranja te da iznosi 80 EUR/MWh što odgovara prosjeku ostvarenome prema financijskom izvješću Gradske toplane Karlovac za 2023. godinu (vidi Tab. 3-2).

Budući da se ista vrijednost koristi u svim scenarijima i analizama, moguće odstupanje od stvarne buduće cijene ne utječe na usporedbu opcija niti na konačne zaključke analize.

10. ODREĐIVANJE OPTIMALNE KOMBINACIJE TEHNOLOGIJA I MJERA ZA OSTVARIVANJE CILJA DEKARBONIZACIJE PROIZVODNIH LOKACIJA

Nakon prikaza metodologije i pretpostavki u prethodnim poglavljima, u nastavku je prikazan pregled rezultata optimizacije za referentne godine, odnosno prikaz optimalnih kombinacija tehnologija koje omogućuju ispunjenje ciljeva definiranih u poglavlju 4.2.

Prije razmatranja novih tehnoloških rješenja, potrebno je uzeti u obzir provedbu mjera modernizacije postojećeg toplinskog sustava koje obuhvaćaju povećanje energetske učinkovitosti, smanjenje toplinskih gubitaka i optimizaciju rada mreže. Te mjere uključuju hidrauličko balansiranje, zamjenu zastarjelih crpki, dodatnu izolaciju cjevovoda, modernizaciju podstanica i nadogradnju SCADA sustava, a time se osigurava stabilna i učinkovita osnova za daljnju integraciju obnovljivih izvora energije.

10.1. Rezultati u 2028. godini

U poglavlju 6 provedeno je dimenzioniranje proizvodnih jedinica sustava pri čemu je osnovno polazište bilo osigurati ispunjenje zahtjeva od najmanje 50 % udjela OIE u 2028. godini. U tom kontekstu od iznimne se važnosti pokazao akumulator topline budući da njegova primjena značajno povećava ostvarivi udio OIE u ukupnoj proizvodnji.

Na temelju takvog pristupa određeni su kapaciteti novih proizvodnih jedinica, odnosno električnog vrelovodnog kotla. Snage kotla na biomasu, dizalice topline i geotermalnog postrojenja nisu proizvoljno dimenzionirane, već su uvjetovane projektima koji su već u fazi studijske razrade te se stoga preuzima kao zadana veličina. U nastavku je prikazana usporedba svih navedenih opcija.

Tab. 10-1 Usporedba opcija prema proizvodnji toplinske energije, udjelu OIE i uštedi emisija u 2028. godini

Opcija		Proizvodnja toplinske energije u 2028. godini		Udio OIE	Ušteda u emisiji CO ₂
		MWh	Udio u ukupnoj proizvodnji		t CO ₂
1	Kotao na biomasu (9 MW) + akumulator topline (150 MWh)	33.907	76,53 %	76,53 %	9.314
	Postojeći plinski kotao (58 MW)	10.399	23,47 %		
2	Geotermalno postrojenje (10 MW) + akumulator topline (150 MWh)	35.673	80,51 %	80,51 %	9.635
	Postojeći plinski kotao (58 MW)	8.633	19,49 %		
3	Električni kotao (6 MW) + akumulator topline (150 MWh)	25.327	57,16 %	57,16 %	3.224
	Postojeći plinski kotao (58 MW)	18.979	42,84 %		

Opcija	Proizvodnja toplinske energije u 2028. godini		Udio OIE	Ušteda u emisiji CO ₂
	MWh	Udio u ukupnoj proizvodnji		t CO ₂
4	Dizalica topline (2 * 3,7 MW) + akumulator topline (150 MWh)	26.631	60,11 %	6.213
	Postojeći plinski kotao (58 MW)	17.675	39,89 %	
5	Kogeneracija na biomasu (1,5 MW _{el} + 6 MW _t) + akumulator topline (150 MWh)	25.319	57,15 %	6.955
	Postojeći plinski kotao (58 MW)	18.987	42,85 %	

Uštede u emisiji CO₂ ostvarene uslijed prelaska na nove izvore proizvodnje toplinske energija izravna su posljedica smanjenog angažmana plinskog vrelovodnog kotla. Za proračun ušteda emisija stakleničkih plinova korišteni su emisijski faktori preuzeti iz Baze faktora emisija/uklanjanja za proračun ugljičnog otiska. U nedostatku emisijskog faktora definiranog za sustave javnog grijanja za korištenje drvnog peleta, korišten je podatak za drvenu sječku. Emisija CO₂ za dizalice topline definirana je temeljem emisijskog faktora definiranog u Pravilniku o sustavu za praćenje, mjerenje i verifikaciju ušteda (NN 98/21, 30/22 i 96/23).

Tab. 10-2 Emisijski faktori

Izvor	Jedinica	Emisijski faktor
Javna kotlovnica (Karlovac)	kg CO ₂ /kWh	286,3
Kotao na drvenu sječku	kg CO ₂ /kWh	11,6
Geotermalni toplinski sustav	kg CO ₂ /kWh	16,2
Električna energija	kg CO ₂ /kWh	159,0

Ušteda emisije CO₂ na godišnjoj razini računa se kao razlika između emisija koje bi nastale kada bi se cjelokupna toplinska energija proizvodila u vrelovodnom plinskom kotlu i emisija koje nastaju prema stvarnoj bilanci proizvodnje topline prikazanoj u Tab. 10-1. (za 2028. godinu).

Sada kada je definirano kojim opcijama je moguće postići cilj od 50 % OIE u 2028. godini, navedene je opcije potrebno ekonomski obraditi i odrediti koja je optimalna s tog stajališta. To je najjednostavnije postići promatrajući kolika bi trebala biti prodajna cijena toplinske energije krajnjim kupcima kako bi cijeli projekt ulaganja postao isplativ u proizvoljnom periodu.

10.1.1. Financijska analiza

Parametri financijske analize, ako i sam postupak izračuna ekonomske isplativosti, identični su za sve opcije te su detaljnije opisani u poglavlju 11. U ovoj analizi, usmjerenoj na definiranje optimalne opcije, period promatranja postavljen je na 15 godina.

Investicijski troškovi

Investicijski troškovi izgradnje akumulatora topline u kombinaciji s ostalim proizvodnim jedinicama prikazani su u sljedećim tablicama. Prikazani investicijski troškovi (CAPEX) temeljeni su na podacima iz prethodno izvedenih projekata, dostupnim podacima iz literature te analiziranim tržišnim ponudama. Pri procjeni su također uzeta u obzir recentna inflatorna kretanja koja su utjecala na ukupne investicijske troškove.

Tab. 10-3 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za akumulator topline kapaciteta 150 MWh

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Prethodni radovi, priprema gradilišta	EUR	56.700
2	Rušenje postojećih spremnika	EUR	215.000
3	Projektiranje i konzalting	EUR	265.300
4	Građenje objekta i infrastrukture	EUR	442.100
5	Oprema i montaža	EUR	2.299.100
5.1.	Spremnik (čelična konstrukcija i oplata akumulatora)	EUR	862.500
5.2.	Temelji akumulatora	EUR	301.100
5.3.	Pumpe, cjevovodi, armatura i ostalo	EUR	381.200
5.4.	Elektro oprema	EUR	134.200
5.5.	MRU	EUR	89.500
5.6.	Montaža	EUR	530.600
6	Ostali troškovi	EUR	30.000
7	Troškovi upravljanja projektom, troškovi promidžbe i vidljivosti	EUR	20.000
8	Nepredviđeni troškovi	EUR	60.000
	Ukupno	EUR	3.388.200

Tab. 10-4 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za kotao na biomasu snage 9 MW

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Projektiranje i konzalting	EUR	336.000
2	Oprema i montaža	EUR	2.800.000
2.1.	Kotao	EUR	1.394.000
2.2.	Oprema za prihvata, doziranje i fino usitnjavanje	EUR	800.000
2.3.	Ostala oprema, cjevovod, armatura, pumpe	EUR	254.000
2.4.	Trošak transporta, montaže i puštanja u rad	EUR	352.000
3	Trošak skladišta za biomasu	EUR	35.000
4	Ostali troškovi	EUR	79.275
5	Troškovi upravljanja projektom, troškovi promidžbe i vidljivosti	EUR	20.000
6	Nepredviđeni troškovi	EUR	158.550
	Ukupno	EUR	3.428.825

Tab. 10-5 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za geotermalno postrojenje - Faza 1

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Izrada geotermalne bušotine 1	EUR	9.438.647,05
1.1	Projektno-tehnička dokumentacija	EUR	1.004.237,84
1.2	Izrada prve istražne bušotine	EUR	4.841.555,51
1.3	Izrada druge istražne bušotine	EUR	3.593.673,70
2	Izgradnja spojnog vrelovoda	EUR	17.963.368,51
2.1	Projektno-tehnička dokumentacija	EUR	855.398,50
2.2	Spojni vrelovod (DN350, 10 km)	EUR	17.107.970,01
3	Izgradnja geotermalne energane i elektrane	EUR	5.936.465,59
3.1	Projektno-tehnička dokumentacija	EUR	461.915,19
3.2	Spremnici topline s popratnim postrojenjem toplinske stanice	EUR	2.052.956,40
3.3	Prijemna stanica za prihvata energije	EUR	855.398,50
3.4	Kontejnerska elektrana	EUR	2.566.195,50
4	Upravljanje projektom i administracija	EUR	1.026.478,20
5	Informiranje i vidljivost	EUR	38.321,85
6	Ostali troškovi	EUR	1.064.800,05
7	Nepredviđeni troškovi	EUR	3.333.848,12
	Ukupno	EUR	37.373.129,32

Tab. 10-6 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za električni kotao snage 6 MW

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Projektiranje i konzalting	EUR	72.960
2	Oprema i montaža	EUR	608.000
2.1.	Kotao	EUR	390.000
2.3.	Ostala oprema, cjevovod, armatura, pumpe	EUR	117.000
2.4.	Trošak transporta, montaže i puštanja u rad	EUR	101.000
3	Priključak na mrežu	EUR	1.200.000
4	Ostali troškovi	EUR	47.024
5	Troškovi upravljanja projektom, troškovi promidžbe i vidljivosti	EUR	20.000
6	Nepredviđeni troškovi	EUR	94.048
	Ukupno	EUR	2.042.032

Tab. 10-7 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za dizalicu topline snage 7,4 MW

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Projektiranje i konzalting	EUR	361.212
2	Oprema i montaža	EUR	3.010.100
2.1.	Dizalica topline	EUR	777.000
2.2.	Spojni vrelovod	EUR	2.500.000
2.3.	Ostala oprema, cjevovod, armatura, pumpe	EUR	155.400
2.4.	Trošak transporta, montaže i puštanja u rad	EUR	77.700
3	Priključak na mrežu	EUR	493.333
4	Ostali troškovi	EUR	96.616

	Stavka	Jedinica	Ukupno
5	Troškovi upravljanja projektom, troškovi promidžbe i vidljivosti	EUR	20.000
6	Nepredviđeni troškovi	EUR	193.232
	Ukupno	EUR	4.674.494

Tab. 10-8 Procjena investicijskih troškova (CAPEX) za kogeneraciju na biomasu snage 1,5 MW_e i 6 MW_t

	Stavka	Jedinica	Ukupno
1	Projektiranje i konzalting	EUR	804.000
2	Oprema i montaža	EUR	6.700.000
2.1.	Kotao	EUR	3.500.000
2.2.	Oprema za prihvata, doziranje i fino usitnjavanje	EUR	800.000
2.3.	Ostala oprema, cjevovod, armatura, pumpe, priprema vode itd.	EUR	1.200.000
2.4.	Trošak transporta, montaže i puštanja u rad	EUR	1.200.000
3	Trošak skladišta za biomasu	EUR	35.000
4	Priključak na mrežu	EUR	400.000
5	Ostali troškovi	EUR	197.600
6	Troškovi upravljanja projektom, troškovi promidžbe i vidljivosti	EUR	20.000
7	Nepredviđeni troškovi	EUR	395.200
	Ukupno	EUR	8.131.800

Rezultati analize

Osnovni ekonomski pokazatelji koji definiraju isplativost nekog poslovnog pothvata su Neto sadašnje vrijednost projekta (NPV - eng. Net present value) i interna stopa rentabilnosti (IRR - eng. Internal rate of return). Dodatna objašnjenja pokazatelja nalaze se u poglavlju 11.6.1.

Tab. 10-9 Neto sadašnja vrijednost projekta

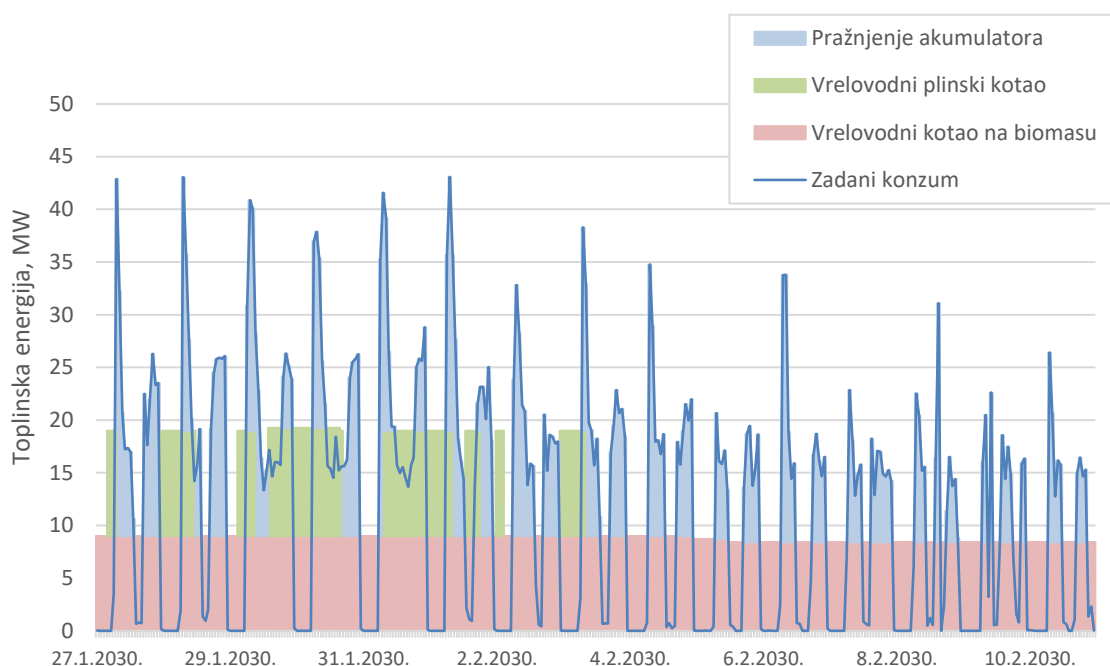
Opcija	NPV
Kotao na biomasu (9 MW) + akumulator topline (150 MWh)	3.358.388,90
Geotermalno postrojenje (10 MW) + akumulator topline (150 MWh)	-11.191.066,02
Električni kotao (6 MW) + akumulator topline (150 MWh)	-14.228.893,83
Dizalica topline (7,4 MW) + akumulator topline (150 MWh)	1.672.643,95
Kogeneracija na biomasu (1,5 MW _e + 6 MW _t) + akumulator topline (150 MWh)	1.445.620,32

Iz prethodne tablice može se zaključiti da su opcije kotla na biomasu, kogeneracije na biomasu te dizalice topline u kombinaciji s akumulatorom topline financijski isplative u promatranom periodu od 15 godina. Kao optimalna kombinacija tehnologija za ispunjenje ciljeva u 2028. godini odabire se ona opcija koja ima najveću vrijednost neto sadašnje

vrijednosti projekta, a to je kombinacija kotla na biomasu snage 9 MW i akumulator topline kapaciteta 150 MWh.

10.1.2. Uklapanje kotla na biomasu i akumulatora topline u postojeći sustav

U ovom poglavlju prikazana je analiza uklapanja kotla na biomasu odabrane snage 9 MW u kombinaciji s akumulatorom topline kapaciteta 150 MWh uz postojeći plinski vrelovodni kotao. U nastavku je prikazan graf popunjavanja zadanog konzuma s optimalnim jedinicama koje će biti na raspolaganju u 2028. godini.



Sl. 10–1 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2028. godini

Jasno je uočljivo da kotao na biomasu preuzima ulogu bazne proizvodne jedinice te kontinuirano pokriva najveći dio toplinskog opterećenja sustava. Razlog tome je povoljnija cijena biomase u odnosu na prirodni plin. Tijekom noćnih sati, kada je potrošnja minimalna, višak proizvedene toplinske energije usmjerava se u akumulator topline. Pohranjena energija zatim se koristi u jutarnjim satima kada dolazi do naglog porasta konzuma čime se značajno smanjuje potreba za angažmanom dodatnih izvora. U slučajevima kada kombinacija kotla na biomasu i akumulatora topline ne može u potpunosti zadovoljiti trenutne potrebe, u rad se uključuje postojeći plinski kotao. On se aktivira samo povremeno, i to u prosjeku 18,9 % vremena trajanja ogrjevnice sezone, što potvrđuje da instalirani kapacitet kotla na biomasu u kombinaciji s akumulatorom topline osigurava visoku razinu pokrivenosti ukupnog toplinskog konzuma te omogućuje minimalnu ovisnost o postojećem plinskom kotlu.

Na osnovu provedenih simulacija za svih 15 godina promatranja, moguće je utvrditi proizvodnju toplinske energije, potrošnju goriva svake od raspoloživih jedinica, a to sve skupa predstavlja temelj za određivanje udjela obnovljivih izvora energije kroz godine.

Tab. 10-10 Energetska bilanca sustava s kotlom na biomasu i akumulatorom topline

Godina	Proizvodnja toplinske energije			Udio OIE
	Kotao na biomasu	Postojeći plinski kotao	Ukupno	
	MWh	MWh	MWh	
2028.	33.906,91	10.398,89	44.305,80	76,53%
2029.	33.799,64	10.369,78	44.169,42	76,52%
2030.	33.788,97	10.244,08	44.033,04	76,74%
2031.	33.704,35	10.155,21	43.859,56	76,85%
2032.	33.690,36	9.976,00	43.666,36	77,15%
2033.	33.622,09	9.860,93	43.483,02	77,32%
2034.	33.546,18	9.753,50	43.299,68	77,47%
2035.	33.345,26	9.771,08	43.116,34	77,34%
2036.	33.507,36	9.703,11	43.210,47	77,54%
2037.	33.529,58	9.775,02	43.304,60	77,43%
2038.	33.557,92	9.840,82	43.398,74	77,32%
2039.	33.553,22	9.939,65	43.492,87	77,15%
2040.	33.617,71	9.969,29	43.587,00	77,13%
2041.	33.678,12	9.956,05	43.634,17	77,18%
2042.	33.618,96	10.062,37	43.681,33	76,96%

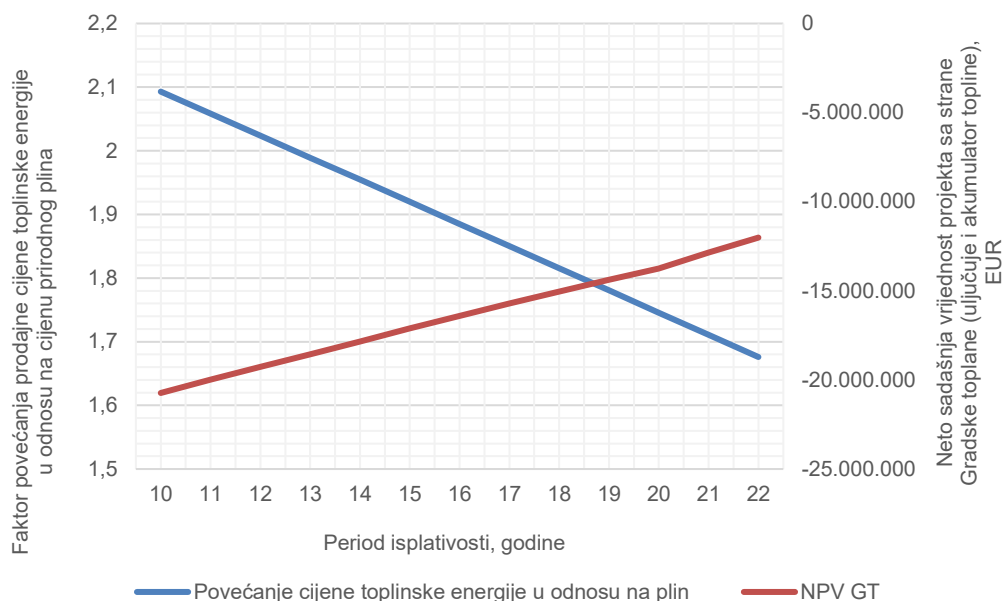
Iz tablice je vidljivo da predložena kombinacija novih proizvodnih jedinica osigurava udio obnovljivih izvora energije koji premašuje minimalne zahtjeve propisane za 2028. godinu. Štoviše, ostvareni udio obnovljivih izvora u sustavu zadovoljava i strože kriterije predviđene za 2045. godinu, kada se zahtijeva najmanje 75 % energije iz obnovljivih izvora. To znači da s regulatornog aspekta nije potrebno dodatno ulagati u proizvodne kapacitete sve do 2050. godine, kada će cilj biti potpuno dekarboniziran sustav.

10.1.3. Usporedba opcije kotla na biomasu i geotermalnog postrojenja

S obzirom da Gradska toplana nije investitor u projekt izgradnje geotermalnog postrojenja, ona će samo otkupljivati toplinsku energiju. Cijena te energije za sada nije poznata, predmet je poslovnih dogovora, ali će za potrebe ove analize biti vezana na cijenu plina.

Analiza u nastavku provodi se sa stajališta Investitora u geotermalno postrojenje. Investicija u sami projekt geotermalnog postrojenja prikazana je u Tab. 10-5.

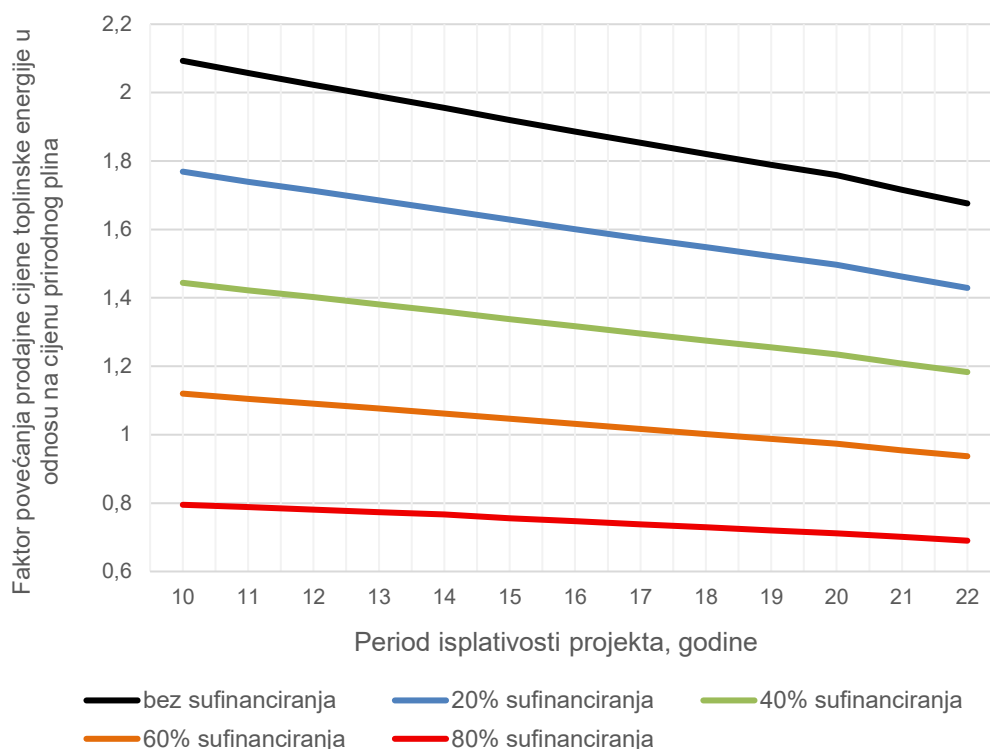
Ako se pretpostavi da će trend kretanja cijene toplinske energije iz geotermalnog postrojenja biti usko vezano uz kretanje cijena plina, u nastavku je prikazano po kojoj cijeni Investitor u geotermalno postrojenje treba prodavati toplinsku energiju Gradskoj toplani kako bi projekt u promatranom periodu postao isplativ za Investitora. Također, prikazano je što takva cijena otkupa toplinske energije znači za neto sadašnju vrijednost projekta same Gradske toplane (uključuje i ugradnju akumulatora topline). Jasno je da što je period isplativosti projekta dulji, to je i cijena toplinske energije niža, a neto sadašnja vrijednost projekta Gradske toplane viša.



Sl. 10–2 Analiza isplativosti izgradnje geotermalnog postrojenja

Analize provedene u poglavlju 10.1 išle su s polaznom pretpostavkom da će period isplativosti izgradnje geotermalnog postrojenja biti tek u 2050. godini, odnosno nakon 22 godine, te s tog stajališta prodajna cijena toplinske energije Gradskoj toplani treba iznositi 1,68 cijene plina. S tom pretpostavkom opcija kotla na biomasu i dalje ispada povoljnija opcija za Gradsku toplanu. Kotao na biomasu ispada povoljnija opcija sve dok je prodajna cijena toplinske energije od Investitora prema Gradskoj toplani viša od 23,4% prodajne cijene plina. Ako je ta cijena niža od 23,4 % cijene plina, korištenje energije iz geotermalnog postrojenja postaje isplativija od kotla na biomasu.

Iz ovih analiza jasno je da je za isplativost projekta izgradnje geotermalnog postrojenja potrebno sufinanciranje, a utjecaj sufinanciranja prikazan je grafom u nastavku.

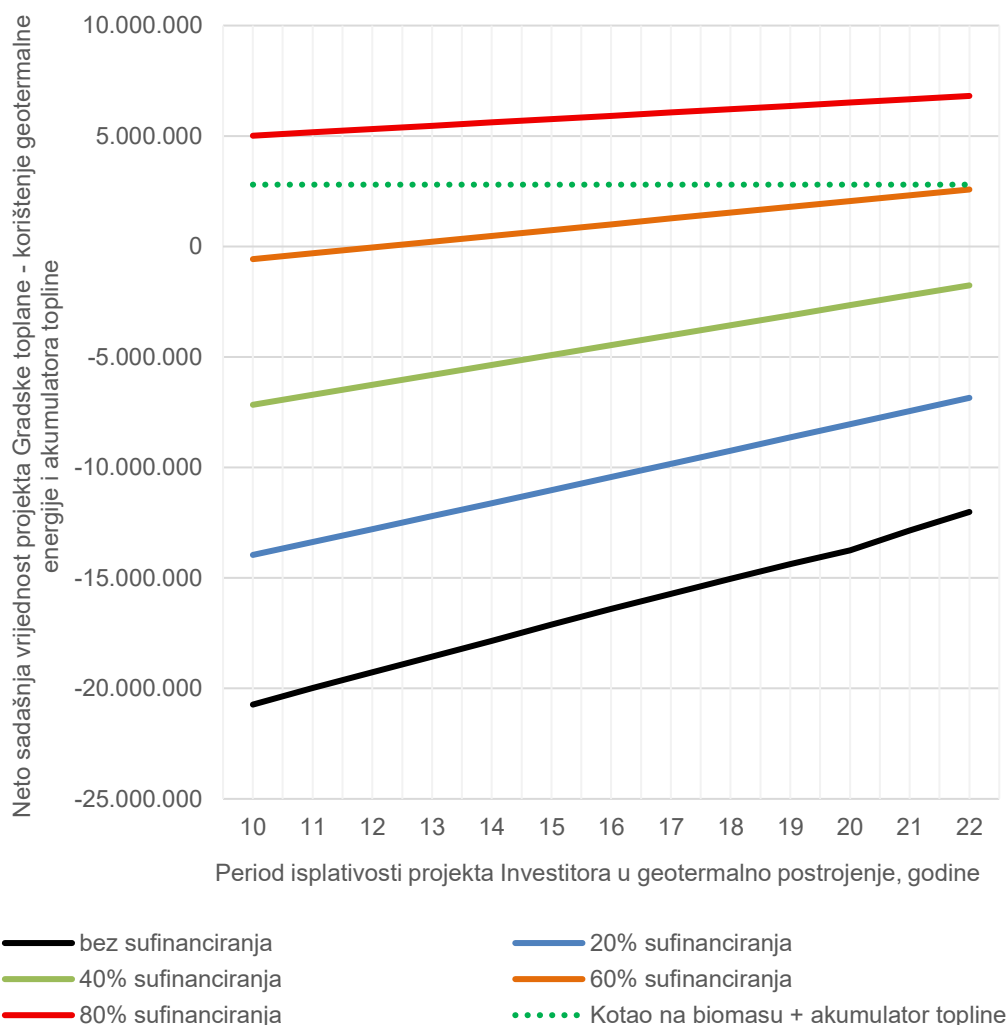


Sl. 10–3 Faktor povećanja cijene toplinske energije za različite periode isplativosti i razine sufinanciranja

Prethodna analiza provedena je iz perspektive Investitora u geotermalno postrojenje te prikazuje koliki mora biti faktor povećanja prodajne cijene toplinske energije u odnosu na cijenu prirodnog plina (prema Gradskoj toplani) pri različitim razinama sufinanciranja, kako bi projekt bio isplativ u odabranom vremenskom razdoblju.

Rezultati pokazuju da se s produljenjem promatranog perioda isplativosti projekta smanjuje potrebni faktor povećanja cijene, odnosno da dulji rokovi isplativosti omogućuju postizanje ekonomske opravdanosti projekta uz manju razliku u cijeni toplinske energije u odnosu na plin. Istodobno, povećanje razine sufinanciranja dodatno smanjuje taj potrebni faktor pa se uz više udjele potpore projekt može učiniti isplativim i u situacijama kada je prodajna cijena toplinske energije jednaka ili čak niža od cijene prirodnog plina. Time se potvrđuje da su upravo dulji rokovi isplativosti i veći udjeli sufinanciranja važni mehanizmi za ostvarivanje financijske održivosti samog geotermalnog postrojenja.

Dok je prethodna analiza bila usmjerena na Investitora u geotermalno postrojenje i prikazivala potrebne faktore povećanja prodajne cijene toplinske energije kako bi projekt za njega bio isplativ u određenom razdoblju, u nastavku se razmatra perspektiva Gradske toplane. Gradska toplana u ovom slučaju kupuje toplinsku energiju po tako definiranim cijenama i istodobno ulaže u akumulator topline, pri čemu se ekonomska održivost projekta Gradske toplane vrednuje kroz neto sadašnju vrijednost u fiksnom razdoblju od 15 godina.



Sl. 10–4 Neto sadašnja vrijednost projekta Gradske toplane (kupnja geotermalne toplinske energije i akumulator topline) pri različitim razinama sufinanciranja u usporedbi s opcijom kotla na biomasu

Graf prikazuje neto sadašnju vrijednost projekta Gradske toplane koja toplinsku energiju nabavlja od Investitora u geotermalno postrojenje po cijenama definiranim faktorima povećanja prodajne cijene toplinske energije u odnosu na cijenu prirodnog plina (Sl. 10–3). Vrijednosti na osi x odnose se na odabrani period isplativosti iz perspektive Investitora, dok je za Gradsku toplanu analiza provedena za fiksno razdoblje od 15 godina uz vlastito ulaganje u akumulator topline.

Rezultati pokazuju da je pri nižim razinama sufinanciranja (do 60%) neto sadašnja vrijednost projekta Gradske toplane negativna u svim promatranim slučajevima te nepovoljnija od referentnog scenarija kotla na biomasu čija je neto sadašnja vrijednost konstantna i iznosi 3,36 milijuna eura. Dodatno, ako je razina sufinanciranja veća od 73 %, projekt je za Investitora isplativ već nakon 10 godina, a istodobno je i za Gradsku toplanu povoljniji izbor od kotla na biomasu.

10.1.4. Zaključak

Analizom različitih scenarija provedbe mjera dekarbonizacije utvrđeno je da se u kratkoročnom razdoblju kao najpovoljnije rješenje nameće **ugradnja kotla na biomasu u kombinaciji s akumulatorom topline**. Takva kombinacija omogućuje ostvarenje udjela obnovljivih izvora energije iznad 75 % čime se ispunjavaju svi obvezujući ciljevi za 2028. godinu, ali i oni do 2050. godine. Preostaje jedino ostvarenje potpunog prelaska na 100 % obnovljive izvore u 2050. godini.

10.2. Rezultati u 2050. godini

Kako je prikazano u prethodnom poglavlju, odabirom opcije kotla na biomasu u kombinaciji s akumulatorom topline ostvareni su svi preduvjeti za postizanje ciljeva dekarbonizacije do 2050. godine. Za potpuno ostvarenje klimatske neutralnosti preostaje dekarbonizirati preostali dio proizvodnje toplinske energije, odnosno u potpunosti iz sustava isključiti postojeći vrelovodni kotao te ga zamijeniti obnovljivim izvorima topline.

Daljnji razvoj sustava ovisit će prvenstveno o dinamici realizacije geotermalnog postrojenja, kao i o regulativi povezanoj s korištenjem toplinske energije proizvedene pomoću dizalica topline. Naime, dok sve dok se regulativa ne promijeni, pomoću dizalice topline ne može se ostvariti potpuna dekarbonizacija proizvodnje toplinske energije (vidi poglavlje 6.5.2).

U tom kontekstu razrađena su tri moguća scenarija daljnjeg razvoja:

- **Scenarij A** – Geotermalno postrojenje snage 10 MW započinje s radom nakon 2032. godine, dok izgradnja druge faze postrojenja snage 10 MW slijedi nakon 2040. godine. U ovom slučaju, gašenje plinskog kotla moguće je već nakon puštanja u rad druge faze geotermalnog postrojenja.
- **Scenarij B** – geotermalno postrojenje snage 10 MW započinje s radom nakon 2032. godine kroz prvu fazu izgradnje. Druga faza geotermalnog postrojenja ne počinje s radom. Do 2050. godine dolazi do izmjene regulative te se cjelokupna energija dobivena pomoću dizalice topline klasificira kao obnovljiva, a vrelovodni plinski kotao se paralelno gasi. Gradi se i dodatni akumulator topline istog kapaciteta kao i postojeći.
- **Scenarij C** – Niti jedna faza geotermalnog postrojenja se neće izgraditi niti započeti s radom. Do 2050. godine dolazi do izmjene regulative te se cjelokupna energija dobivena pomoću dizalice topline klasificira kao obnovljiva, a ostatak proizvodnje toplinske energije osigurava se gradnjom dodatnog akumulatora topline i kotla na biomasu. Obje opcije uvode se u 2050. godini pri čemu se istovremeno gasi postojeći vrelovodni plinski kotao.

Napomena: Godine početka rada geotermalnog postrojenja (faza 1 i faza 2) određene su prema pretpostavkama Grada Karlovca i Investitora. U konačnici, dinamika realizacije geotermalnih kapaciteta neće bitno utjecati na ispunjavanje ciljeva budući da Gradska toplana ispunjava sve nametnute uvjete dekarbonizacije do 2050. godine. U slučaju da geotermalno postrojenje ne bude realizirano, energetska bilanca sustava do 2050. godine ostaje sukladna prikazanim rezultatima u tablici Tab. 10-10.

10.2.1. Scenarij A

U scenariju A pretpostavlja se realizacija obje faze geotermalnog postrojenja čime bi se omogućila potpuna dekarbonizacija sustava proizvodnje toplinske energije. Također se pretpostavlja da će cjelokupni projekt izgradnje biti uspješno sufinanciran. U nastavku je prikazana energetska bilanca sustava u takvoj konfiguraciji s pretpostavkom da će cijena biomase i dalje biti povoljnija od cijene geotermalne energije.

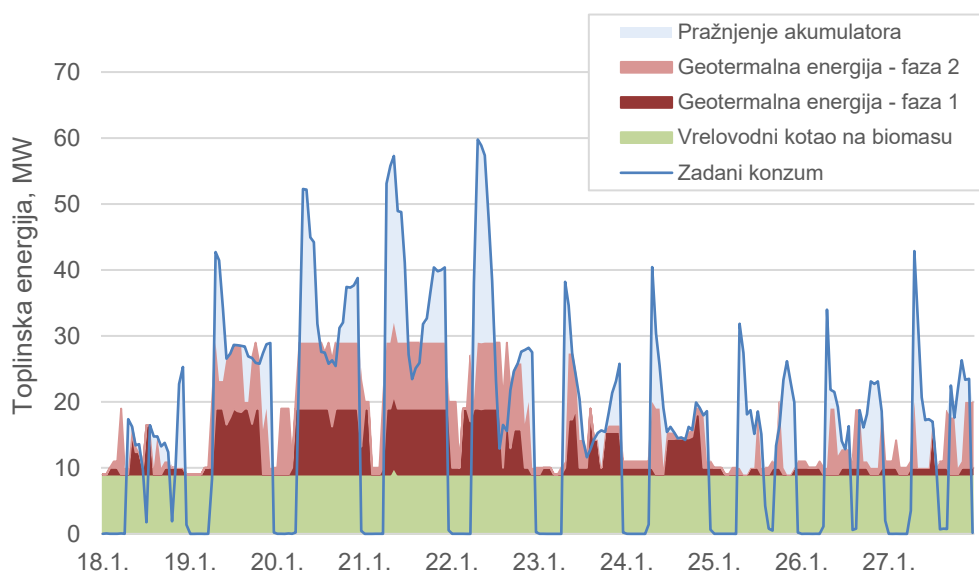
Tab. 10-11 Energetska bilanca sustava u scenariju A

Tab. 10. 11 Energetski bilanca sustava u sečenju A

Godina	Proizvodnja toplinske energije					Udio OIE
	Kotao na biomasu	Geotermalno postrojenje		Postojeći plinski kotao	Ukupno	
		Faza 1	Faza 2			
		MWh	MWh			
2028.	33.906,91	-	-	10.398,89	44.305,80	76,53%
2029.	33.799,64	-	-	10.369,78	44.169,42	76,52%
2030.	33.788,97	-	-	10.244,08	44.033,04	76,74%
2031.	33.704,35	-	-	10.155,21	43.849,70	76,85%
2032.	33.458,37	9.145,06	-	1.062,93	43.666,36	97,57%
2033.	33.290,12	9.183,13	-	1.009,77	43.483,02	97,67%
2034.	33.224,54	9.068,53	-	1.006,61	43.299,68	97,69%
2035.	33.272,74	8.880,45	-	963,49	43.116,34	97,76%
2036.	33.193,10	9.036,63	-	980,75	43.210,47	97,74%
2037.	33.346,68	8.970,69	-	987,23	43.304,60	97,64%
2038.	33.259,35	9.140,26	-	999,12	43.398,74	97,69%
2039.	33.306,69	9.175,16	-	1.011,02	43.492,87	97,68%
2040.	33.326,82	4.999,26	5.260,92	-	43.587,00	100,00 %
2041.	33.342,60	5.044,79	5.246,78	-	43.634,17	100,00 %
2042.	33.322,73	5.223,16	5.135,44	-	43.681,33	100,00 %
2043.	33.365,41	5.166,07	5.197,03	-	43.728,50	100,00 %
2044.	33.207,16	5.238,86	5.329,65	-	43.775,67	100,00 %
2045.	33.421,43	4.989,50	5.411,91	-	43.822,84	100,00 %
2046.	33.451,66	5.244,54	5.173,80	-	43.870,01	100,00 %
2047.	33.592,14	5.298,28	5.026,76	-	43.917,17	100,00 %
2048.	33.400,38	5.129,22	5.434,74	-	43.964,34	100,00 %
2049.	33.641,15	5.233,17	5.137,18	-	44.011,51	100,00 %
2050.	33.641,66	5.242,13	5.174,89	-	44.058,68	100,00 %

Iz tablice je vidljivo da puštanjem u rad prve faze geotermalnog postrojenja udio obnovljivih izvora energije raste na više od 97%. Puštanjem u rad druge faze geotermalnog postrojenja prestaje potreba za radom postojećeg plinskog kotla, on izlazi iz pogona te se ostvaruje potpuna dekarbonizacija proizvodnje toplinske energije

Geotermalna postrojenja obje faze rade podjednako, dok kotao na biomasu i dalje pokriva većinu proizvodnje toplinske energije zbog pretpostavke da je cijena biomase niža od cijene toplinske energije iz geotermalnog postrojenja. To je vidljivo na grafičkom prikazu u nastavku, a odabran je period u kojem je toplinsko opterećenje najveće u cijeloj ogrjevnoj sezoni.



Sl. 10–5 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij A

10.2.2. Scenarij B

U scenariju B pretpostavlja se realizacija prve faze geotermalnog postrojenja u 2032. godini. To se ostvaruje uz sufinanciranje, međutim pretpostavlja se da je cijena biomase i dalje povoljnija od cijene toplinske energije iz geotermalnog izvora. Iz tehničkih ili financijskih razloga ne ostvaruje se druga faza izgradnje geotermalnog postrojenja te se razvoj usmjerava prema alternativnim tehnologijama koje omogućuju nastavak procesa dekarbonizacije, ali uz prilagodbu raspoloživim resursima i financijskim okvirima.

Ostatak toplinskog konzuma pokrivat će se pomoću dizalice topline (2*3,7 MW) i novim akumulatorom topline istih karakteristika kao i postojeći (nazivni kapacitet 150 MWh)²⁴, a koji će biti pušteni u pogon do 2050. godine. U nastavku je prikazana energetska bilanca sustava u takvoj konfiguraciji.

Tab. 10-12 Energetska bilanca sustava Scenarija B

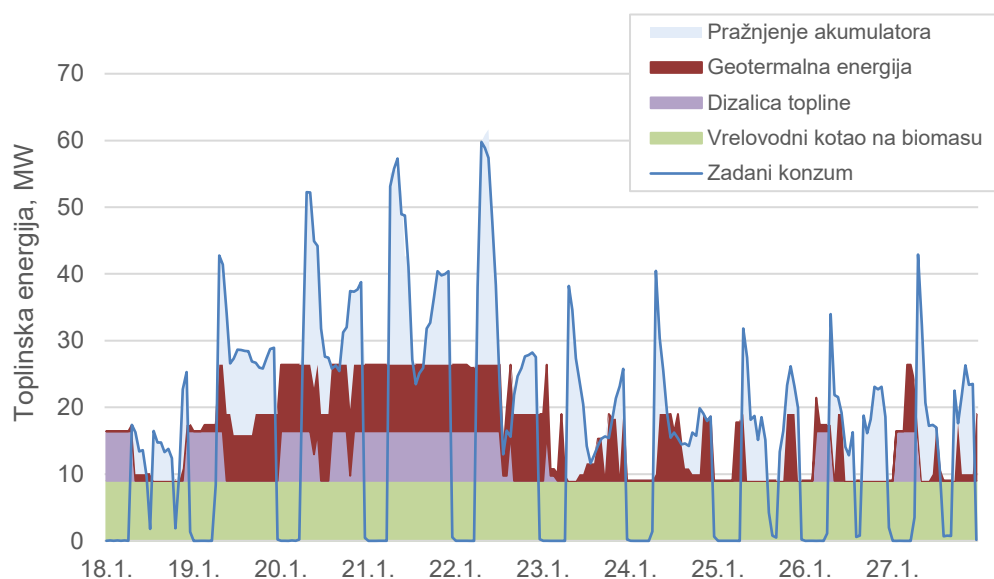
Godina	Proizvodnja toplinske energije					Udio OIE
	Kotao na biomasu	Geotermalno postrojenje – Faza 1	Postojeći plinski kotao	Dizalica topline	Ukupno	
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	
2028.	33.906,91	-	10.398,89	-	44.305,80	76,53%
2029.	33.799,64	-	10.369,78	-	44.169,42	76,52%
2030.	33.788,97	-	10.244,08	-	44.033,04	76,74%
2031.	33.704,35	-	10.155,21	-	43.849,70	76,86%
2032.	33.458,37	9.145,06	1.062,93	-	43.666,36	97,57%
2033.	33.290,12	9.183,13	1.009,77	-	43.483,02	97,68%

²⁴ Napomena: U navedenom slučaju se smanjuje ukupni nazivni kapacitet akumulatora jer se korištenjem dizalice topline on puni vodom niže temperature (maksimalno do 80 °C). Takva situacija nema značajan utjecaj na samu funkcionalnost akumulatora, akumulator će i dalje normalno funkcionirati, osim što će manja temperatura vode imati za posljedicu smanjeni kapacitet i smanjenu toplinsku snagu akumulatora.

Godina	Proizvodnja toplinske energije					Udio OIE
	Kotao na biomasu	Geotermalno postrojenje – Faza 1	Postojeći plinski kotao	Dizalica topline	Ukupno	
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	
2034.	33.224,54	9.068,53	1.006,61	-	43.299,68	97,68%
2035.	33.272,74	8.880,45	963,49	-	43.116,34	97,77%
2036.	33.193,10	9.036,63	980,75	-	43.210,47	97,73%
2037.	33.346,68	8.970,69	987,23	-	43.304,60	97,72%
2038.	33.259,35	9.140,26	999,12	-	43.398,74	97,70%
2039.	33.306,69	9.175,16	1.011,02	-	43.492,87	97,68%
2040.	33.316,08	9.218,02	1.052,91	-	43.587,00	97,58%
2041.	33.342,45	9.232,85	1.058,87	-	43.634,17	97,57%
2042.	33.339,70	9.276,81	1.064,82	-	43.681,33	97,56%
2043.	33.520,23	9.130,88	1.077,40	-	43.728,50	97,54%
2044.	33.392,33	9.276,60	1.106,74	-	43.775,67	97,47%
2045.	33.408,96	9.301,18	1.112,70	-	43.822,84	97,46%
2046.	33.429,57	9.321,78	1.118,66	-	43.870,01	97,45%
2047.	33.586,34	9.206,21	1.124,62	-	43.917,17	97,44%
2048.	33.606,76	9.224,06	1.133,52	-	43.964,34	97,42%
2049.	33.670,69	9.199,61	1.141,21	-	44.011,51	97,41%
2050.	21.618,51	3.813,67	-	18.626,50	44.058,68	100,00%

Iz prikazane energetske bilance vidljivo je da nakon 2032. godine, puštanjem u pogon geotermalne Faze 1, udio obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji prelazi 97 %, dok plinski kotao postupno prelazi u funkciju rezervnog izvora.

Budući da se druga faza geotermalnog projekta ne ostvaruje, u završnom razdoblju, odnosno u 2050. godini, potrebno je izgraditi dizalicu topline i još jedan akumulator topline istih karakteristika kao i postojeći. Pretpostavka je da će biomasa i dalje biti cjenovno najpovoljnija te će pokrivati najveći udio u proizvodnji toplinske energije, dok će se ostatak pokrivati iz dizalice topline i geotermalnog postrojenja kao što je prikazano u grafičkom prikazu u nastavku. Odabran je period u kojem je toplinsko opterećenje najveće u cijeloj ogrjevnoj sezoni.



Sl. 10–6 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij B

10.2.3. Scenarij C

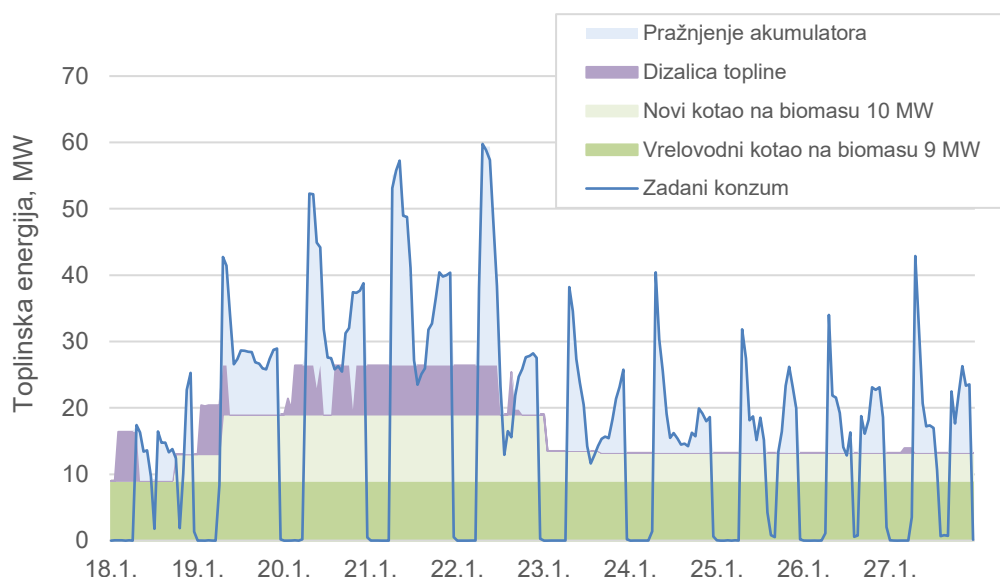
U scenariju C pretpostavlja se da ne dolazi do proizvodnje topline iz geotermalnog izvora te se pokrivanje ostatka toplinskog konzuma radi pomoću novih jedinica. Navedene jedinice ne trebaju nužno ulaziti u pogon prije 2050. godine kada postojeći plinski kotao treba prestati s radom. Za zadovoljenje toplinskog konzuma predviđaju se najpovoljnije opcije iz ekonomske analize, a to će biti dizalica topline (2*3,7 MW), izgradnja još jednog akumulatora topline (nazivnog kapaciteta 150 MWh) i novi kotao na biomasu (10 MW). U nastavku je prikazana energetska bilanca sustava u takvoj konfiguraciji.

Tab. 10-13 Energetska bilanca sustava Scenarija C

Godina	Proizvodnja toplinske energije					Udio OIE
	Kotao na biomasu	Postojeći plinski kotao	Dizalica topline	Novi kotao na biomasu	Ukupno	
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	
2028.	33.906,91	10.398,89	-	-	44.305,80	76,53%
2029.	33.799,64	10.369,78	-	-	44.169,42	76,52%
2030.	33.788,97	10.244,08	-	-	44.033,04	76,74%
2031.	33.704,35	10.155,21	-	-	43.849,70	76,85%
2032.	33.690,36	9.976,00	-	-	43.666,36	77,15%
2033.	33.622,09	9.860,93	-	-	43.483,02	77,32%
2034.	33.546,18	9.753,50	-	-	43.299,68	77,47%
2035.	33.345,26	9.771,08	-	-	43.116,34	77,34%
2036.	33.507,36	9.703,11	-	-	43.210,47	77,54%
2037.	33.529,58	9.775,02	-	-	43.304,60	77,43%
2038.	33.557,92	9.840,82	-	-	43.398,74	77,32%
2039.	33.553,22	9.939,65	-	-	43.492,87	77,15%

Godina	Proizvodnja toplinske energije					Udio OIE
	Kotao na biomasu	Postojeći plinski kotao	Dizalica topline	Novi kotao na biomasu	Ukupno	
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	
2040.	33.617,71	9.969,29	-	-	43.587,00	77,13%
2041.	33.678,12	9.956,04	-	-	43.634,17	77,18%
2042.	33.618,96	10.062,38	-	-	43.681,33	76,96%
2043.	33.716,27	10.012,23	-	-	43.728,50	77,10%
2044.	33.720,11	10.055,56	-	-	43.775,67	77,03%
2045.	33.570,92	10.251,92	-	-	43.822,84	76,61%
2046.	33.747,31	10.122,69	-	-	43.870,01	76,93%
2047.	33.787,42	10.129,75	-	-	43.917,17	76,93%
2048.	33.807,32	10.157,02	-	-	43.964,34	76,90%
2049.	33.791,91	10.219,60	-	-	44.011,51	76,78%
2050.	16.577,73	-	17.170,16	10.310,79	44.058,68	100,00 %

Iz prikazane energetske bilance vidljivo je da u razdoblju do 2049. godine sustav ovisi o postojećem kotlu na biomasu uz manji udio topline proizvedene iz prirodnog plina. U završnom razdoblju, odnosno u 2050. godini, sustav prelazi na kombinirani rad dizalice topline te kotlova na biomasu koji zajedno pokrivaju cjelokupni toplinski konzum te omogućuju postizanje 100 % udjela obnovljivih izvora energije. Većina toplinske proizvodnje ostvaruje se pomoću kotlova na biomasu, dok dizalica topline radi kada je cijena električne energije povoljnija od cijene biomase. To je prikazano slikom u nastavku, a odabran je period u kojem je toplinsko opterećenje najveće u cijeloj ogrjevnoj sezoni.



Sl. 10–7 Vremenski isječak popunjavanja zadanog konzuma u 2050. godini - Scenarij C

10.2.4. Zaključak

Daljnje investicijske odluke Gradske toplane prvenstveno će ovisiti o realizaciji geotermalnog postrojenja i rezultatima istražnih aktivnosti. U razdoblju nakon 2028. godine nije potrebno provoditi dodatne zahvate u proizvodnom dijelu sustava već pratiti razvoj projekta i regulatorni okvir koji se odnosi na obnovljive izvore topline.

Ukoliko dođe do uspješne realizacije geotermalnog postrojenja, sustav će se razvijati prema scenariju potpune geotermalne integracije, dok će se u suprotnom, uz nove analize i prilagodbu tržišnim uvjetima, primijeniti rješenja definirana u Scenariju C.

Na taj način Gradska toplana Karlovac zadržava mogućnost prilagodbe budućim okolnostima te osigurava stabilan i održiv razvoj sustava u skladu s ciljevima potpune dekarbonizacije.

11. EKONOMSKO-FINANCIJSKA ANALIZA

U prethodnom poglavlju identificirane su optimalne kombinacije tehnologija prema kriteriju financijske održivosti što čini osnovu za daljnju razradu u ovom poglavlju. Financijska analiza temelji se na mjerama i investicijama koje se planiraju do 2028. godine. Takav pristup omogućuje objektivnu i pouzdanu procjenu troškova i koristi budući da su sve analizirane tehnologije i mjere tehnički izvedive, financijski opravdane i ne ovise o vanjskim dionicima.

Realizacija geotermalnog postrojenja, kao potencijalnog dodatnog izvora toplinske energije, ovisi o rezultatima istražnih aktivnosti i investicijskim odlukama trećih strana. Stoga se u ovoj fazi ne uključuje u financijsku analizu, već se razmatra kao moguća buduća opcija čija će se opravdanost, način provedbe i model financiranja sagledati naknadno, u skladu s raspoloživim tehničkim podacima, tržišnim okolnostima i regulatornim okvirom.

11.1. Procjena investicijskih ulaganja

Investicijska ulaganja (CAPEX) za odabrano rješenje akumulatora topline kapaciteta 150 MWh i kotla na biomasu snage 9 MW definirana su ranije u Tab. 10-3 i Tab. 10-4.

11.2. Izvor financiranja investicije i vremenski plan investiranja

Za realizaciju investicijskog projekta nužno je osigurati odgovarajuće izvore financiranja. U okviru ove analize pretpostavljeno je da će projekt biti financiran kombinacijom vlastitih sredstava investitora i vanjskih izvora kapitala. Konkretno, predviđeno je da 20 % ukupne investicije bude pokriveno vlastitim kapitalom investitora, dok će preostalih 80 % biti financirano putem komercijalnog kredita.

Period investiranja za procijenjen je na dvije godine. Planirano je da se sve pripremne i administrativne aktivnosti provedu do kraja listopada 2026.godine. Period izgradnje predviđen je nakon pripremnih i administrativnih aktivnosti u periodu od jedne godine, a puštanje u puni pogon predviđeno je krajem studenog 2027. godine. Time bi postrojenje krenulo s radom prije početka 2028. godine te bi na taj način zadovoljili nametnuti uvjeti o postizanju 50 % obnovljivih izvora energije od 1. siječnja 2028. godine. Ovakav vremenski okvir omogućuje temeljitu pripremu projekta te njegovu postupnu realizaciju u skladu s tehničkim, financijskim i regulatornim zahtjevima.

Tab. 11-1 Investicijska ulaganja (izvor sredstava)

Izvor sredstava	Jedinica	Kotao na biomasu 9 MW + akumulator topline 150 MWh
Vlastita sredstva	EUR	1.363.405,00
Kreditna sredstva	EUR	5.453.620,00
Ukupno	EUR	6.817.025,00

11.3. Uvjeti financiranja

11.3.1. Prinos na vlastita sredstva

Kao što je ranije navedeno, u okviru ove analize pretpostavljeno je da će udio vlastitih sredstava iznositi 20 % ukupnog investicijskog ulaganja u osnovna sredstva. Također, očekivani prinos na vlastito uložena sredstva, koji se koristi kao jedan od ključnih parametara analize, procijenjen je na minimalno 10%. Ova pretpostavka omogućuje realističnu procjenu isplativosti ulaganja i osigurava da projekt generira adekvatne financijske povrate za investitora.

11.3.2. Kreditni uvjeti

Osim vlastito uloženi sredstava investitora, potrebno je osigurati i kreditna sredstva za financiranje izgradnje i nabavku opreme. Uvjeti financiranja su pretpostavljeni kako je prikazano u sljedećoj tablici.

Tab. 11-2 Uvjeti investicijskog kreditiranja

Stavka	Jedinica	Iznos
Interkalarna kamata	%	8,00
Redovna godišnja kamatna stopa na kreditna sredstva	%	4,00
Period otplate kredita	god	20

Na osnovu tih uvjeta i uz pretpostavku da se svi dodatni troškovi i naknade pridodaju glavnici, moguće je definirati krajnji iznos glavnice kako je to definirano tablicom Tab. 11-3.

Tab. 11-3 Iznos glavnice

Stavka	Jedinica	Iznos
Iznos potrebnih kreditnih sredstava	EUR	5.453.620,00
Interkalarna kamata	EUR	109.072,40
Ukupno	EUR	5.562.692,40

Za potrebe provedene analize pretpostavljeno je da se investicijski kredit otplaćuje u jednakim otplatnim kvotama. Pritom se podrazumijeva da će se tijekom trajanja kreditnog odnosa iznos godišnjih anuiteta postupno smanjivati kako se smanjuje ostatak duga jer se smanjuje iznos kamata. Imajući sve navedeno na umu iznosi anuiteta u slijedećih 15 godina otplate kredita bit će kako je to prikazano u tablici

Tab. 11-4 Iznos anuiteta tijekom otplate kredita

Godina	Jedinica	Anuitet	Otplata glavnice	Kamate	Ostatak duga
2027	EUR				5.562.692,40
2028	EUR	815.861,55	370.846,16	445.015,39	5.191.846,24
2029	EUR	786.193,86	370.846,16	415.347,70	4.821.000,08
2030	EUR	756.526,17	370.846,16	385.680,01	4.450.153,92
2031	EUR	726.858,47	370.846,16	356.012,31	4.079.307,76
2032	EUR	697.190,78	370.846,16	326.344,62	3.708.461,60
2033	EUR	667.523,09	370.846,16	296.676,93	3.337.615,44

2034	EUR	637.855,40	370.846,16	267.009,24	2.966.769,28
2035	EUR	608.187,70	370.846,16	237.341,54	2.595.923,12
2036	EUR	578.520,01	370.846,16	207.673,85	2.225.076,96
2037	EUR	548.852,32	370.846,16	178.006,16	1.854.230,80
2038	EUR	519.184,62	370.846,16	148.338,46	1.483.384,64
2039	EUR	489.516,93	370.846,16	118.670,77	1.112.538,48
2040	EUR	459.849,24	370.846,16	89.003,08	741.692,32
2041	EUR	430.181,55	370.846,16	59.335,39	370.846,16
2042	EUR	400.513,85	370.846,16	29.667,69	0,00

11.3.3. Obrtna sredstva

Obrtna sredstva su imovina (najčešće financijska) koja u svom osnovnom obliku traju manje od godinu dana, a služe kao podrška poslovnom procesu. Na kraju godišnjeg ciklusa obrtna sredstva se pojavljuju u prvotnom obliku te se može smatrati da se ne troše.

S obzirom da se u ovom slučaju radi o nadogradnji postojećeg objekta, može se s velikom dozom sigurnosti tvrditi da će se dodatna obrtna sredstva namiriti iz postojećih obrtnih sredstava Gradske toplane.

11.4. Planirani operativni prihodi

Planirani operativni prihod u okviru ove analize je prihod od prodaje toplinske energije krajnjim kupcima. On je modeliran kao ulazni parametar u iznosu od 80 EUR/MWh što odgovara prosjeku ostvarenome prema financijskom izvješću Gradske toplane Karlovac za 2023. godinu. Kroz promatrano razdoblje pretpostavljeno je da neće dolaziti do promjene cijene prema krajnjim kupcima.

Tab. 11-5 Planirani operativni prihodi

Godina	Prodaja toplinske energije	Cijena	Prihod
	MWh	EUR/MWh	EUR
2028	44.305,80	80,00	3.544.463,70
2029	44.169,42	80,00	3.533.553,60
2030	44.033,04	80,00	3.522.643,20
2031	43.849,70	80,00	3.507.976,00
2032	43.666,36	80,00	3.493.308,80
2033	43.483,02	80,00	3.478.641,60
2034	43.299,68	80,00	3.463.974,40
2035	43.116,34	80,00	3.449.307,20
2036	43.210,47	80,00	3.456.837,60
2037	43.304,60	80,00	3.464.368,00
2038	43.398,74	80,00	3.471.899,20
2039	43.492,87	80,00	3.479.429,60
2040	43.587,00	80,00	3.486.960,00
2041	43.634,17	80,00	3.490.733,60
2042	43.681,33	80,00	3.494.506,40

11.5. Planirani operativni troškovi (OPEX)

Operativni troškovi mogu se podijeliti u nekoliko skupina, a obuhvaćaju troškove održavanja i osiguranja postrojenja, troškove proizvodnje toplinske energije, troškove zbrinjavanja pepela i ostale troškove.

11.5.1. Troškovi održavanja

Za ocjenu isplativosti analizirani su troškovi održavanja nove jedinice te su oni konzervativno procijenjeni na 2 % nabavne vrijednosti osnovnog sredstva (CAPEX) godišnje.

Tab. 11-6 Troškovi održavanja

Proizvodna jedinica	Jedinica	Iznos
Kotao na biomasu 9 MW	EUR	68.576,50
Akumulator topline 150 MWh	EUR	67.764,00
Ukupno	EUR	163.340,50

11.5.2. Troškovi osiguranja

Troškovi osiguranja novo ugrađene opreme procijenjeni su na 0,25% nabavne vrijednosti osnovnog sredstva (CAPEX) godišnje.

Tab. 11-7 Troškovi osiguranja

Proizvodna jedinica	Jedinica	Iznos
Kotao na biomasu 9 MW	EUR	8.572,00
Akumulator topline 150 MWh	EUR	8.470,50
Ukupno	EUR	17.042,50

11.5.3. Troškovi proizvodnje toplinske energije

Troškovi proizvodnje energije odnose se na trošak prirodnog plina i biomase u promatranom periodu, a kako je prikazano u sljedećoj tablici.

Tab. 11-8 Trošak proizvodnje toplinske energije

Godina	Kotao na biomasu			Postojeći plinski kotao			Ukupan trošak
	Proizvedena energija	Jedinična cijena	Trošak	Proizvedena energija	Jedinična cijena	Trošak	
	MWh	EUR/MWh	EUR	MWh	EUR/MWh	EUR	
2028.	33.906,91	41,31	1.591.698,15	10.398,89	61,03	713.106,69	2.304.804,85
2029.	33.799,64	40,38	1.551.098,57	10.369,78	59,66	695.171,22	2.246.269,80
2030.	33.788,97	39,46	1.515.055,70	10.244,08	58,30	670.998,48	2.186.054,19
2031.	33.704,35	39,52	1.513.544,82	10.155,21	58,38	666.182,67	2.179.727,49
2032.	33.690,36	39,58	1.515.199,02	9.976,00	58,47	655.414,07	2.170.613,09
2033.	33.622,09	39,64	1.514.406,70	9.860,93	58,56	648.829,54	2.163.236,24
2034.	33.546,18	39,70	1.513.259,93	9.753,50	58,65	642.726,52	2.155.986,45
2035.	33.345,26	39,76	1.506.455,71	9.771,08	58,74	644.851,68	2.151.307,39
2036.	33.507,36	39,85	1.517.184,16	9.703,11	58,87	641.806,30	2.158.990,46

2037.	33.529,58	39,94	1.521.597,59	9.775,02	59,00	648.013,94	2.169.611,53
2038.	33.557,92	40,02	1.526.293,62	9.840,82	59,13	653.836,71	2.180.130,33
2039.	33.553,22	40,11	1.529.489,52	9.939,65	59,26	661.878,72	2.191.368,23
2040.	33.617,71	40,20	1.535.845,48	9.969,29	59,40	665.332,57	2.201.178,05
2041.	33.678,12	41,54	1.589.941,69	9.956,05	61,38	686.618,00	2.276.559,69
2042.	33.618,96	42,89	1.638.394,34	10.062,37	63,36	716.357,62	2.354.751,97

11.5.4. Troškovi zbrinjavanja pepela

Crni pelet sadrži 3,8 kg/t pepela što godišnje rezultira s približnom količinom pepela od 31 t koju je potrebno zbrinuti. Trenutna cijena zbrinjavanja pepela kreće se oko 120 EUR/t te bi godišnji trošak zbrinjavanja pepela iznosio sukladno tablici u nastavku.

Tab. 11-9 Troškovi zbrinjavanja pepela

Godina	Kotao na biomasu			
	Proizvedena energija	Količina peleta	Količina nastalog pepela	Trošak zbrinjavanja
	MWh	t	t	EUR
2028.	33.906,91	8.337,76	31,68	3802,021
2029.	33.799,64	8.311,39	31,58	3789,993
2030.	33.788,97	8.308,76	31,57	3788,796
2031.	33.704,35	8.287,95	31,49	3779,307
2032.	33.690,36	8.284,51	31,48	3777,738
2033.	33.622,09	8.267,73	31,42	3770,084
2034.	33.546,18	8.249,06	31,35	3761,571
2035.	33.345,26	8.199,65	31,16	3739,042
2036.	33.507,36	8.239,52	31,31	3757,219
2037.	33.529,58	8.244,98	31,33	3759,711
2038.	33.557,92	8.251,95	31,36	3762,888
2039.	33.553,22	8.250,79	31,35	3.762,36
2040.	33.617,71	8.266,65	31,41	3.769,59
2041.	33.678,12	8.281,51	31,47	3776,37
2042.	33.618,96	8.266,96	31,41	3769,732

11.5.5. Ostali troškovi

Uz sve navedene troškove u obzir su uzeti i tzv. ostali, u ovoj fazi projekta, nepredvidljivi troškovi. Procijenjeni su na 0,5 % nabavne vrijednosti osnovnog sredstva (CAPEX).

Tab. 11-10 Ostali troškovi

Proizvodna jedinica	Jedinica	Iznos
Kotao na biomasu 9 MW	EUR	17.144,00
Akumulator topline 150 MWh	EUR	16.941,00
Ukupno	EUR	34.085,13

11.6. Ekonomski pokazatelji

11.6.1. Kriteriji opravdanosti investicije

Uobičajena je praksa prilikom ocjene opravdanosti nekog projekta, pa tako i slučaju izgradnje novog kotla na biomasu snage 9 MW i akumulatora topline kapaciteta 150 MWh, koristiti dvije temeljne metode:

- metoda neto sadašnje vrijednosti,
- metoda interne stope profitabilnosti.

Neto sadašnja vrijednost (NPV)

Metoda neto sadašnje vrijednosti (eng. Net Present Value - NPV) temeljni je kriterij financijskog odlučivanja uopće. Neto vrijednost podrazumijeva razliku između kumulativa novčanih tokova, nastalih za vrijeme promatranja projekta i ukupnih investicijskih ulaganja.

Sadašnja vrijednost podrazumijeva svođenje svih novčanih tokova na sadašnju vrijednost primjenom tzv. diskontne stope, kako bi svi novčani tokovi bili vremenski usporedivi. Za potrebe provedene analize, diskontna stopa je određena kao ponderirani prosječni trošak kapitala (eng. Weighted Average Cost of Capital - WACC) definiran slijedećom formulom:

$$k(WACC) = w_k \cdot k_k + \sum_{i=1}^n w_d \cdot k_d \cdot (1 - s_p)$$

pri čemu su:

$k(WACC)$ - ponderirani prosječni trošak kapitala, %,

k_k - trošak vlastitih sredstava (očekivani prinos na vlastito uložena sredstva), %,

w_k - udio vlastito uloženi sredstva u ukupnoj pasivi trgovačkog društva tj. u ukupnim obvezama i vlastitim sredstvima, %,

k_d - trošak kreditnih sredstava (kamatna stopa na investicijski kredit), %,

w_d - udio kreditnih sredstva (investicijskog kredita) u ukupnoj pasivi trgovačkog društva tj. u ukupnim obvezama i vlastitim sredstvima, %,

n - broj ukupnih kreditnih obveza (investicijski kredit i kredit za obrtna sredstva),

s_p - stopa poreza na dobit, %.

Tab. 11-11 Diskontna stopa

Stavka	Jedinica	Iznos
Kamatna stopa na vlastita sredstva	%	15,0
Udio vlastitih sredstava	%	20,0
Kamatna stopa na kreditna sredstva	%	8,0
Udio kreditnih sredstava	%	80,0
$k(WACC)^{25}$ (ponderirana prosječna cijena kapitala)	%	8,25

²⁵ WACC (eng. Weighted average cost of capital)

Prema tome, neto sadašnja vrijednost se može definirati kao razlika između zbroja diskontiranih čistih novčanih tokova nastalih za cijelog vijeka promatranja projekta i iznosa ukupnih investicijskih ulaganja. Pri tome, pozitivna neto sadašnja vrijednost ukazuje na neto povećanje vrijednosti projekta, odnosno tvrtke, što je sa stanovišta investitora poželjno. Isto tako negativna neto sadašnja vrijednost ukazuje na neto smanjenje vrijednosti projekta/tvrtke te projekte s negativnom neto sadašnjom vrijednošću treba izbjegavati.

Interna stopa profitabilnosti (IRR)

Diskontna stopa uz koju se ostvaruje nulta neto sadašnja vrijednost u periodu promatranja projekta naziva se interna stopa profitabilnosti (eng. „Internal Rate of Return“ - IRR). Interna stopa profitabilnosti drugi je temeljni kriterij financijskog odlučivanja. To je ona diskontna stopa koja svodi kumulativ čistih novčanih tokova, nastalih za vrijeme promatranja projekta, na vrijednost ukupnih investicijskih ulaganja, odnosno kod koje je neto sadašnja vrijednost projekta jednaka nuli. Posljedično, projekt mora ostvariti barem toliku internu stopu profitabilnosti koliko iznosi ponderirani prosječni trošak kapitala jer je upravo na osnovu njega definirana neto sadašnja vrijednost projekta. Također posljedično, projekti za koje se očekuje pozitivna neto sadašnja vrijednost ujedno ostvaruju internu stopu profitabilnosti veću od troškova kapitala, dok projekti koji ostvaruju negativnu neto sadašnju vrijednost ostvaruju internu stopu profitabilnosti manju od troškova kapitala.

11.6.2. Period promatranja

S obzirom na vrstu opreme, ali i predviđene relativno visoke investicijske troškove kao i činjenicu da se radi o infrastrukturnom projektu, period promatranja definiran je s 15 godina.

11.6.3. Ekonomski tok projekta

Izračun interne stope profitabilnosti projekta (IRR) i neto sadašnje vrijednosti projekta (NPV) provodi se temeljem analize ekonomskog toka projekta kako je prikazano u Tab. 11-12.

Kao što se može vidjeti iz Tab. 11-13, neto sadašnja vrijednost (NPV) projekta je pozitivna te je projekt sam po sebi isplativ. Međutim, od svih analiziranih opcija koje zadovoljavaju uvjete nametnute za 2028. godinu (analizirano u poglavlju 10.1, Tab. 10-9), ova kombinacija pokazala se najmanje negativna. S obzirom na to da projekt ispunjava ključne strateške i regulatorne zahtjeve te doprinosi ostvarenju ciljeva definiranih za 2028. godinu, odabrana je navedena opcija kao optimalno rješenje unatoč negativnoj financijskoj vrijednosti.

Tab. 11-12 Ekonomski tok projekta

Stavka	-	1.god.	2.god.	3.god.	4.god.	5.god.	6.god.	7.god.
	2027.	2028.	2029.	2030.	2031.	2032.	2033.	2034.
Dobit prije amortizacije i poreza na dobit		1,031	1,079	1,128	1,120	1,114	1,107	1,100
Amortizacija		-0,519	-0,519	-0,519	-0,519	-0,519	-0,271	-0,271
Dobit nakon amortizacije prije poreza na dobi		0,512	0,560	0,609	0,601	0,595	0,836	0,829
Amortizacija		0,519	0,519	0,519	0,519	0,519	0,271	0,271
Čisti novčani tok		0,203	0,267	0,332	0,349	0,369	0,342	0,361

Stavka	-	1.god.	2.god.	3.god.	4.god.	5.god.	6.god.	7.god.
	2027.	2028.	2029.	2030.	2031.	2032.	2033.	2034.
Investicijska ulaganja u projekt	-6,706							
Investicijska ulaganja u trajna obrtna sredstva								
Preostala vrijednost projekta								
Oslobođena obrtna sredstva								
Novčani tokovi investicijskog projekta	-6,706							
Diskontni faktor	0,907	0,864	0,823	0,784	0,746	0,711	0,677	0,645
Diskontirani novčani tokovi investicijskog projekta	-6,272	0,811	0,805	0,798	0,755	0,716	0,647	0,613
Stavka	8.god.	9.god.	10.god.	11.god.	12.god.	13.god.	14.god.	15.god.
	2035.	2036.	2037.	2038.	2039.	2040.	2041.	2042.
Dobit prije amortizacije i poreza na dobit	1,090	1,090	1,086	1,083	1,080	1,078	1,006	0,931
Amortizacija	-0,271	-0,271	-0,271	-0,271	-0,271	-0,271	-0,271	-0,271
Dobit nakon amortizacije prije poreza na dobi	0,819	0,819	0,816	0,813	0,809	0,807	0,735	0,661
Amortizacija	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271
Čisti novčani tok	0,377	0,401	0,423	0,445	0,466	0,488	0,454	0,417
Investicijska ulaganja u projekt								
Investicijska ulaganja u trajna obrtna sredstva								
Preostala vrijednost projekta								1,513
Oslobođena obrtna sredstva								
Novčani tokovi investicijskog projekta								
Diskontni faktor	0,614	0,585	0,557	0,530	0,505	0,481	0,458	0,436
Diskontirani novčani tokovi investicijskog projekta	0,579	0,551	0,523	0,497	0,472	0,448	0,400	1,015

Tab. 11-13 Rezultati ekonomske analize za period promatranja od 15 godina

Proizvodne jedinice	NPV (EUR)	IRR (%)
Kotao na biomasu 9 MW + akumulator topline 150 MWh	3.358.388,90	11,11

11.7. Osvrt na stanje u 2050. godini

U poglavlju 10.2 prikazane su moguće opcije razvoja sustava do 2050. godine koje se razlikuju prema stupnju realizacije geotermalnog postrojenja i pripadajućim investicijskim zahtjevima.

Tab. 11-14 Investicijska ulaganja za ostvarenje ciljeva u 2050. godini

Proizvodna jedinica	Jedinica	Scenarij A	Scenarij B	Scenarij C
Geotermalno postrojenje – faza 1	EUR	-	-	-
Geotermalno postrojenje – faza 2	EUR	-	-	-
Dizalica topline	EUR	-	4.756.494	4.756.494
Akumulator topline	EUR	-	3.388.200	3.388.200
Novi kotao na biomasu	EUR	-	-	3.887.549
Ukupno	EUR	-	8.144.694	12.032.243

Sa stajališta Gradske toplane, po investicijskim ulaganjima najpovoljnijim se ocjenjuje Scenarij A, budući da ne zahtijeva dodatna kapitalna ulaganja jer bi se toplota u tom slučaju preuzimala od geotermalnog postrojenja po ugovorenoj cijeni čime se osigurava stabilan i troškovno učinkovit rad sustava. Najnepovoljnijim se smatra Scenarij C koji predviđa vlastita ulaganja u dizalicu topline, dodatni akumulator topline i novi kotao na biomasu što znatno povećava investicijske i operativne troškove sustava.

Važno je napomenuti da su prikazane vrijednosti iskazane prema današnjim tržišnim cijenama opreme i radova, dok se stvarna ulaganja odnose na razdoblje koje je vremenski znatno udaljeno. Stoga je potrebno očekivati promjene u troškovima, tehnološkim rješenjima i dostupnosti pojedinih izvora financiranja.

Iako su tehnička rješenja za postizanje potpune dekarbonizacije poznata, konačan model razvoja ovisit će o okolnostima koje se u ovom trenutku ne mogu pouzdano predvidjeti, prije svega o dostupnosti geotermalnog izvora, budućim cijenama energenata i regulatornim uvjetima.

12. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

Analiza osjetljivosti obavezan je element svakog plana ili studije jer omogućuje budućem investitoru jasnu procjenu utjecaja promjena ključnih varijabli na financijske pokazatelje na temelju kojih se donosi poslovna odluka. Ova analiza pruža uvid u otpornost projekta na različite ekonomske i tržišne promjene te identificira granice unutar kojih projekt ostaje financijski održiv.

U tom kontekstu, jedan od ključnih aspekata upravljanja rizicima je procjena osjetljivosti projekta na promjene investicijskog troška. Budući da su troškovi kapitalnih ulaganja podložni značajnim varijacijama uslijed tržišnih kretanja, fluktuacija cijena materijala, troškova rada i neočekivanih zahtjeva tijekom implementacije, nužno je evaluirati potencijalni utjecaj ovih faktora na financijsku održivost projekta. Ova potreba postaje još izraženija u svjetlu aktualnih gospodarskih kretanja u Europskoj uniji, obilježenih visokom inflacijom i značajnim rastom cijena sirovina, energije i građevinskih materijala.

Posebnu važnost u cjelokupnoj analizi ima i cijena biomase kao ključnog energenta budući da ona izravno utječe na operativne troškove postrojenja i time na ukupnu isplativost projekta. Ovaj aspekt postaje još značajniji kada se uzme u obzir činjenica da tržište crnog peleta u Republici Hrvatskoj još uvijek nije razvijeno. Time projekt postaje izložen fluktuacijama cijena na međunarodnim tržištima, promjenama u lancima opskrbe te potencijalnim geopolitičkim i regulatornim rizicima.

Razumijevanje osjetljivosti projekta na ove promjene važno je u trenutačnim tržišnim uvjetima gdje volatilnost cijena i financijski pritisci mogu značajno utjecati na očekivane performanse projekta. Pravovremena analiza i prilagodba financijske strategije omogućuju donošenje informiranih odluka te optimizaciju strukture ulaganja s ciljem ublažavanja potencijalnih rizika i osiguranja dugoročne održivosti investicije. Imajući na umu sve navedeno, ključne varijable za koju će se sprovesti analiza osjetljivosti su investicijski trošak i cijena biomase.

Napomena: Analiza osjetljivosti prikazana u nastavku napravljena je za prvu fazu projekta, odnosno za zadovoljenje ciljeva u 2028. godini. Temelji se na tehnici u kojoj se polazi od očekivanih vrijednosti ključnih varijabli definiranih u osnovnom scenariju. Tijekom analize, varira se samo jedna varijabla, dok se sve ostale ključne pretpostavke drže nepromijenjenima. Ovaj pristup omogućuje precizno utvrđivanje granica održivosti projekta te prepoznavanje kritičnih faktora koji mogu značajno utjecati na njegovu financijsku izvedivost.

12.1. Investicijski troškovi

Prvi cilj analize osjetljivosti jest kvantificirati do koje mjere projekt može podnijeti povećanje investicijskih troškova prije nego što postane financijski neodrživ. Konkretno, ispituje se prag rasta kapitalnih ulaganja koji bi rezultirao negativnim neto sadašnjim prihodom (NPV), odnosno kako promjene u investicijskom trošku utječu na ključne ekonomske pokazatelje projekta kao što je interna stopa rentabilnosti (IRR).

Rezultati analize pokazuju da je osjetljivost projekta na porast investicijskih troškova umjerena te da projekt zadržava relativnu otpornost na promjene ove varijable. To znači da unatoč određenim povećanjima investicijskih izdataka, projekt ostaje financijski održiv unutar realnih granica varijacija troškova.

Međutim, važno je istaknuti da, iako su početni investicijski troškovi postavljeni konzervativno, aktualni rast cijena u Europskoj uniji predstavlja značajan ekonomski izazov. Inflacijski pritisci, rast cijena sirovina i građevinskih materijala te povećanje troškova radne snage mogu dovesti do bržeg rasta kapitalnih ulaganja nego što je inicijalno predviđeno. Stoga je ključno kontinuirano pratiti tržišne uvjete i po potrebi prilagođavati financijsku strategiju projekta kako bi se osigurala njegova dugoročna održivost i isplativost.

Tab. 12-1 Analiza osjetljivosti na investicijske troškove

Stavka	Investicija ulaganja EUR	Pokazatelji	
		NPV	IRR
Osobna veličina (CAPEX)	6.817.025	3.358.388,90	11,11 %
Prijelomna veličina	10.295.750	0,00	5,00
Postotak promjene	51,03 %		

12.2. Cijena biomase

Drugi važan aspekt analize osjetljivosti odnosi se na utjecaj promjene cijene biomase na ekonomske pokazatelje projekta. Budući da biomasa predstavlja glavni energent i značajan udio ukupnih operativnih troškova, njezina cijena izravno utječe na profitabilnost i financijsku održivost projekta.

Rezultati analize pokazuju da projekt iskazuje umjerenu osjetljivost na rast cijene biomase. Povećanje cijene ovog energenta dovodi do smanjenja neto sadašnje vrijednosti (NPV) i interne stope rentabilnosti (IRR), no projekt zadržava pozitivne vrijednosti unutar realnih tržišnih varijacija. To znači da je projekt u stanju apsorbirati razumno povećanje troškova energenata i pritom ostati financijski isplativ.

Ipak, kontinuirani rast cijene biomase potaknut inflacijom, rastom potražnje i mogućim regulatornim promjenama može ugroziti dugoročnu profitabilnost. Stoga je preporučljivo aktivno praćenje tržišta i sklapanje dugoročnih ugovora o nabavi kako bi se smanjio rizik i povećala otpornost projekta na tržišne promjene.

Tab. 12-2 Analiza osjetljivosti na cijenu biomase

Stavka	Cijena EUR/toni	Pokazatelji	
		NPV	IRR
Cijena biomase	210,00	3.358.388,90	11,11 %
Prijelomna veličina	276,28	0,0	5,00
Postotak promjene	31,56 %		

13. MOGUĆNOSTI SUFINANCIRANJA

Za provedbu planiranog projekta izgradnje kotla na biomasu i akumulatora topline potrebno je osigurati odgovarajuće izvore financiranja koji podržavaju energetske učinkovit i održiv razvoj toplinskog sustava. Dostupni su različiti nacionalni i europski mehanizmi kojima se potiče ulaganje u obnovljive izvore energije, modernizaciju infrastrukture i smanjenje emisija stakleničkih plinova, a koji će biti analizirani u nastavku. Cilj je prepoznati optimalne izvore sredstava i modele financiranja koji mogu podržati realizaciju planiranih investicija.

13.1. Modernizacijski fond

Modernizacijski fond predstavlja instrument Europske unije kojim se financiraju ulaganja u modernizaciju energetske sustava i poboljšanje energetske učinkovitosti u državama članicama s nižim dohotkom. Sredstva fonda osiguravaju se iz prihoda od prodaje emisijskih jedinica stakleničkih plinova u okviru sustava trgovanja emisijama (EU ETS). U Republici Hrvatskoj Modernizacijski fond provode nadležna tijela državne uprave i Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, u skladu sa smjernicama Europske komisije.

Fond podupire projekte koji doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova, povećanju udjela obnovljivih izvora energije, poboljšanju energetske učinkovitosti te razvoju infrastrukture za fleksibilno i učinkovito grijanje i hlađenje. Prihvatljivi su projekti koji su u skladu s prioritetnim područjima definiranim Direktivom (EU) 2023/959 i nacionalnim strateškim dokumentima te koji poštuju pravila o državnim potporama.

U okviru planiranog projekta izgradnje kotla na biomasu i akumulatora topline, Modernizacijski fond predstavlja potencijalni izvor sufinanciranja iz nekoliko razloga. Projekt izravno doprinosi dekarbonizaciji toplinskog sustava kroz zamjenu fosilnog goriva obnovljivim izvorom (biomasa), dolazi do povećanja učinkovitosti proizvodnje topline te integraciju akumulacije koja omogućuje fleksibilnije upravljanje pogonom i smanjenje vršnih opterećenja.

Iako je projekt ekonomski isplativ i ostvaruje pozitivne financijske pokazatelje bez potpore, njegovo kandidiranje za sufinanciranje opravdano je s aspekta javnog interesa i načela poticajnog učinka potpore. Prema Smjernicama o državnim potporama za klimu, energiju i okoliš (CEEAG 2022) te Uredbi o skupnom izuzeću (GBER), potpora se može dodijeliti i tržišno održivim projektima ako se njome ubrzava provedba, povećava opseg ili okolišni učinak ulaganja, ili smanjuje rizik povezan s tržišnim uvjetima.

Dodjelom potpore omogućilo bi se ostvarivanje višeg stupnja učinkovitosti i otpornosti sustava čime se projekt dodatno usklađuje s ciljevima Nacionalnog energetskeg i klimatskog plana i doprinosi ispunjenju obveza Republike Hrvatske u pogledu udjela obnovljivih izvora u sektoru grijanja i hlađenja. U postupku prijave potrebno je dokazati poticajni učinak potpore te osigurati da ne dođe do dvostrukog financiranja istih troškova iz drugih izvora.

13.2. Inovacijski fond

Inovacijski fond jedan je od najvećih instrumenata Europske unije za potporu razvoju i primjeni inovativnih tehnologija s niskim udjelom ugljika. Financira se iz prihoda ostvarenih prodajom emisijskih jedinica u okviru sustava trgovanja emisijama (EU ETS) te je usmjeren na projekte koji doprinose dubokoj dekarbonizaciji energetske i industrijske sektora.

Fond prioritetno podupire projekte koji uključuju inovativne ili napredne tehnologije s visokim potencijalom smanjenja emisija stakleničkih plinova te mogućnošću šire primjene na tržištu. Kroz redovite pozive za velike i male projekte financiraju se rješenja koja demonstriraju nove pristupe u proizvodnji energije, industrijskim procesima, hvatanju i skladištenju ugljika ili upravljanju energijom.

U kontekstu planiranog projekta izgradnje kotla na biomasu i akumulatora topline, Inovacijski fond se ne smatra primarno prikladnim instrumentom sufinanciranja budući da se radi o komercijalno zreloj tehnologiji koja ne sadrži elemente tehnološke inovacije u smislu kriterija fonda. Iako projekt doprinosi smanjenju emisija i povećanju udjela obnovljivih izvora topline, njegov se koncept temelji na standardnim tehničkim rješenjima široko primijenjenima u sektoru daljinskog grijanja.

U skladu s time, prijava na Inovacijski fond mogla bi biti opravdana jedino ako projekt uključi napredne tehničke, digitalne ili upravljačke komponente koje predstavljaju novo rješenje u sektoru (npr. integraciju naprednih algoritama upravljanja akumulacijom topline ili inovativne sustave optimizacije pogona).

13.3. Mehanizam za oporavak i otpornost

Mehanizam za oporavak i otpornost (eng. Recovery and Resilience Facility – RRF) je financijski instrument Europske unije unutar programa NextGenerationEU, namijenjen provedbi reformi i investicija koje doprinose gospodarskom oporavku, održivom razvoju i tranziciji prema klimatski neutralnom gospodarstvu. U Republici Hrvatskoj RRF se provodi kroz Nacionalni plan oporavka i otpornosti (NPOO) 2021.–2026. koji definira reforme i investicije usmjerene na digitalnu i zelenu tranziciju, povećanje udjela obnovljivih izvora energije te smanjenje emisija stakleničkih plinova.

Jedan od strateških ciljeva NPOO-a odnosi se na dekarbonizaciju energetske sustava s posebnim naglaskom na povećanje učinkovitosti i integraciju obnovljivih izvora u sustave grijanja i hlađenja. U okviru Mehanizma financiraju se projekti koji doprinose smanjenju ovisnosti o fosilnim gorivima, povećanju udjela OIE, modernizaciji toplinskih postrojenja te razvoju naprednih sustava upravljanja energijom. U lipnju 2024. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja objavilo je poziv „Potpora poduzećima za tranziciju na energetske i resursno učinkovito gospodarstvo“ s ukupnim proračunom od 145 milijuna eura, financiranim iz RRF-a. Cilj poziva bio je poticanje ulaganja u energetske učinkovitost i korištenje obnovljivih izvora energije, s naglaskom na projekte koji dovode do mjerljivog smanjenja emisija stakleničkih plinova. Prihvatljive aktivnosti obuhvaćale su uvođenje i korištenje obnovljivih izvora energije, povećanje energetske učinkovitosti postojećih postrojenja, integraciju sustava za pohranu energije, modernizaciju proizvodnih procesa i infrastrukture, aktivnosti koje doprinose smanjenju emisija CO₂ i energetskej

samodostatnosti. Prihvatljivi prijavitelji bili su trgovačka društva registrirana u Republici Hrvatskoj, uključujući i društva u vlasništvu jedinica lokalne samouprave što znači da je Gradska toplana formalno ispunjavaju uvjet prihvatljivosti. Kako bi projekt bio prihvatljiv za sufinanciranje u okviru RRF-a, morao je zadovoljiti sljedeće kriterije:

- biti usklađen s ciljevima NPOO-a i REPowerEU dopune (smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima),
- dokazati mjerljivo smanjenje emisija u odnosu na početno stanje,
- poštovati pravila o državnim potporama (GBER ili CEEAG),
- i imati spremnu tehničku dokumentaciju te izrađenu analizu usklađenosti s načelom DNSH.

Iako je navedeni poziv iz 2024. godine u međuvremenu zaključen, njegova struktura i kriteriji odabira pokazuju da su projekti dekarbonizacije toplinarstva u potpunosti usklađeni s prioritetima NPOO-a i REPowerEU. U slučaju objave novih poziva u okviru Mehanizma za oporavak i otpornost ili njegove dopune (REPowerEU), projekt Gradske toplane bi mogao biti prijavljen za sufinanciranje.

13.4. InvestEU

InvestEU je financijski program Europske unije koji pruža podršku ulaganjima u održivi gospodarski razvoj, inovacije i zelenu tranziciju kroz kombinaciju jamstava EU-a, povoljnih kredita i savjetodavnih usluga. Program je nasljednik inicijativa EFSI (Europski fond za strateška ulaganja) i Connecting Europe Facility, a provodi se u suradnji s Europskom investicijskom bankom (EIB), Europskom bankom za obnovu i razvoj (EBRD) i drugim partnerskim financijskim institucijama.

Cilj programa je poticanje ulaganja koja doprinose strateškim ciljevima Europske unije, osobito u području klimatske neutralnosti, digitalne transformacije i energetske sigurnosti. Program se temelji na četiri tematska područja, a za potrebe projekta Gradske toplane Karlovac d.o.o. najvažniji je Prozor za održivu infrastrukturu (eng. Sustainable Infrastructure Window), koji podržava ulaganja u energiju, okoliš, promet i komunalnu infrastrukturu.

Kroz InvestEU mogu se osigurati:

- povoljni krediti i jamstva za projekte zelene tranzicije (putem EIB-a, EBRD-a ili komercijalnih banaka),
- dugoročni zajmovi s nižim kamatnim stopama i duljim rokom otplate,
- tehnička pomoć i savjetodavne usluge putem instrumenta ELENA (European Local Energy Assistance) kojim se financira izrada studija izvodljivosti, projektna dokumentacija i priprema javne nabave.

Za projekt kotla na biomasu i akumulatora topline, InvestEU se može primijeniti kao dopunski financijski instrument uz bespovratna sredstva iz drugih izvora (primjerice Modernizacijskog fonda, Mehanizma za oporavak i otpornost ili Europskog fonda za regionalni razvoj). Moguće opcije uključuju:

- kreditno financiranje putem EIB-a ili EBRD-a uz jamstvo InvestEU programa,
- korištenje ELENA tehničke pomoći za pripremu investicije,
- kombinirano financiranje u kojem se povezuju bespovratna sredstva i povoljni zajmovi.

Važno je napomenuti da program InvestEU nije bespovratni instrument, već predstavlja financijski mehanizam kojim se omogućuje lakši pristup kapitalu i povoljnijim uvjetima zaduživanja za projekte s dokazivom financijskom održivošću.

13.5. Europski fond za regionalni razvoj

Europski fond za regionalni razvoj (EFRR) jedan je od temeljnih instrumenata kohezijske politike Europske unije. Njegova je svrha smanjiti regionalne razlike i poticati gospodarsku, socijalnu i teritorijalnu koheziju kroz ulaganja u održivi razvoj, inovacije te zelenu i digitalnu tranziciju. U Republici Hrvatskoj sredstva EFRR-a provode se kroz Program Konkurentnost i kohezija 2021.–2027. (PKK) i Integrirani teritorijalni program 2021.–2027. (ITP), uz ukupnu alokaciju od 4,02 milijarde eura iz EFRR-a. Oba programa donijela je Vlada Republike Hrvatske, a njihovu provedbu koordinira Ministarstvo regionalnoga razvoja i fondova Europske unije.

EFRR u novom programskom razdoblju snažno je usmjeren na postizanje ciljeva Europskog zelenog plana. Posebna pozornost daje se ulaganjima koja doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova, povećanju udjela obnovljivih izvora energije, poboljšanju energetske učinkovitosti te razvoju pametnih i otpornijih energetske sustava. U okviru PKK-a, toplinarstvo se sadržajno prepoznaje unutar cilja politike „Zelenija Europa“, koji uključuje specifične ciljeve usmjerene na poticanje energetske učinkovitosti (SC 2.i), korištenje obnovljivih izvora energije (SC 2.ii) i razvoj pametnih mreža i sustava skladištenja energije (SC 2.iii). Ti ciljevi predstavljaju okvir u kojem se mogu razvijati i sufinancirati projekti modernizacije toplinskih sustava.

U kontekstu Gradske toplane Karlovac, planirana ulaganja sadržajno se uklapaju upravo u te prioritete. Korištenjem lokalno dostupne biomase smanjuje se ovisnost o fosilnim gorivima i emisije CO₂, dok akumulacija topline i digitalno upravljanje povećavaju fleksibilnost i učinkovitost sustava. Takav pristup u potpunosti slijedi usmjerenje EFRR-a prema održivim energetske rješenjima i lokalnim, niskouglijčnim modelima opskrbe toplinom.

Prema pravilima EFRR-a, projekti se sufinanciraju putem javnih poziva objavljenih u okviru PKK-a i ITP-a pri čemu se točan intenzitet sufinanciranja određuje za svaki poziv zasebno. Europska uredba predviđa mogućnost sufinanciranja do 85 % prihvatljivih troškova u manje razvijenim regijama, no konačan postotak i uvjeti prihvatljivosti ovise o samom tekstu poziva. Trenutačno su u okviru Programa Konkurentnost i kohezija 2021.–2027. aktivni pozivi koji se odnose na energetske obnovu zgrada i povećanje učinkovitosti u javnim sustavima. Pozivi koji bi obuhvaćali ulaganja u obnovljive izvore energije, sustave skladištenja i razvoj pametnih energetske mreža za sada nisu objavljeni, ali su takvi projekti predviđeni unutar programskih ciljeva EFRR-a te se njihova objava može očekivati u budućnosti, ovisno o prioritetima i raspoloživim sredstvima.

14. OCJENA ODRŽIVOSTI PROJEKTA PREMA KRITERIJIMA EU TAKSONOMIJE

Europska unija razvila je sustav taksonomije održivih ulaganja kako bi uspostavila jasne i jedinstvene kriterije za definiranje onoga što se smatra „zelenim” ili održivim projektom. Glavni cilj ove inicijative je spriječiti tzv. „greenwashing”, odnosno situacije u kojima se ulaganja pogrešno predstavljaju kao ekološki prihvatljiva, te usmjeriti javni i privatni kapital prema aktivnostima koje stvarno doprinose održivom razvoju. Budući da sama javna sredstva nisu dovoljna za postizanje klimatskih ciljeva, ovim se pristupom nastoji mobilizirati i privatni sektor te stvoriti pouzdano i transparentno tržište održivih financijskih proizvoda.

U lipnju 2020. godine zastupnici Europskog parlamenta odobrili su Uredbu (EU)2020/852 poznatiju kao Uredbu o taksonomiji koja predstavlja okvir za klasifikaciju gospodarskih djelatnosti na razini cijele Europske unije. Kako bi neka aktivnost bila prepoznata kao održiva, ona mora znatno doprinositi barem jednom od definiranih okolišnih ciljeva navedenih u nastavku:

- ublažavanje klimatskih promjena (izbjegavanje/smanjenje emisija stakleničkih plinova ili povećanje uklanjanja stakleničkih plinova),
- prilagodba klimatskim promjenama (smanjenje ili sprečavanje negativnog utjecaja na trenutačnu ili očekivanu buduću klimu ili rizika od takvog negativnog utjecaja),
- održivo korištenje i zaštita vodnih i morskih resursa,
- prelazak na kružno gospodarstvo (s naglaskom na ponovnu uporabu i recikliranje resursa),
- sprečavanje i kontrola onečišćenja,
- zaštita i obnova biološke raznolikosti i ekosustava.

Osim ispunjenja barem jednog od okolišnih ciljeva, ocjenjivana aktivnost također mora ispuniti još tri osnovna kriterija, a to su:

- ne nanositi značajnu štetu (DNSH – eng. *Do No Significant Harm*) ostalim okolišnim ciljevima,
- poštovati minimalne zaštitne mjere koje se odnose na ljudska prava, radnička prava i temeljne konvencije Međunarodne organizacije rada,
- biti usklađena s tehničkim kriterijima prikladnosti koje Europska komisija detaljno propisuje kroz delegirane akte.

Sama Uredba postavlja temeljne smjernice, dok Europska komisija razrađuje tehničke kriterije koji precizno određuju koje se djelatnosti mogu smatrati održivima. Prvi skup kriterija pod nazivom Delegirana uredba Komisije (EU) 2021/2139 stupio je na snagu krajem 2021. godine, a kasnije je okvir dodatno proširen kako bi pod određenim uvjetima uključio i nuklearnu energiju te prirodni plin.

Klasifikacija projekata prema taksonomiji omogućuje objektivno vrednovanje održivosti planiranih projekata te pruža osnovu za procjenu njihovog doprinosa europskim klimatskim

i okolišnim ciljevima. Usklađenost s kriterijima EU taksonomije preduvjet je za pristup većini europskih fondova i financijskih instrumenata što dodatno naglašava njezinu važnost u planiranju i provedbi ulaganja.

U nastavku je prikazana procjena usklađenosti planiranog projekta povećanje učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije u centralni toplinski sustav grada Karlovca s kriterijima EU taksonomije. Cilj procjene je pokazati u kojoj mjeri projekt doprinosi ostvarenju okolišnih ciljeva Europske unije i ispunjava relevantne zahtjeve održivosti.

Tab. 14-1 Ocjena usklađenosti projekta s kriterijima EU taksonomije

Kriterij EU taksonomije	Doprinos mjera iz projekta	Ocjena doprinosa
Značajan doprinos ublažavanju klimatskih promjena	Projekt značajno doprinosi cilju ublažavanja klimatskih promjena kroz povećanje udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji toplinske energije. Ugradnjom novog kotla na biomasu i akumulatora topline omogućit će zamjenu dijela fosilnih goriva održivim izvorima, čime se smanjuju emisije stakleničkih plinova i povećava energetska učinkovitost sustava. Konkretno, udio obnovljivih izvora energije u cjelokupnom sustavu u 2028. godini iznosit će 76,74%, a godišnja ušteda u emisiji stakleničkih plinova 9.314 tCO ₂ ekv. Primjenom rješenja potpune dekarbonizacije (Scenarij A, B ili C) dolazi do povećanja udjela obnovljivih izvora na 100 % te godišnjeg smanjenja emisija stakleničkih plinova od otprilike 11.300 tCO ₂ ekv u odnosu na referentno stanje.	Visok – mjere izravno smanjuju emisije CO ₂ i povećavaju udio OIE.
Načelo „ne nanosi značajnu štetu“ (DNSH)	Projekt je oblikovan tako da ne uzrokuje značajnu štetu ostalim okolišnim ciljevima. Primjenjuju se mjere zaštite okoliša koje uključuju sustave za kontrolu emisija u skladu s važećim propisima, održivo gospodarenje otpadom i zaštitu vodnih resursa. Korištena biomasa potječe iz certificiranih, održivo upravljanih šumskih resursa, čime se sprječava negativan utjecaj na bioraznolikost i degradacija ekosustava. Aktivnosti ne uključuju zahvate koji bi mogli ugroziti prirodna staništa ili vodne ekosustave, a svi građevinski radovi i eksploatacija sustava provodit će se u skladu s nacionalnim i europskim propisima o zaštiti okoliša i prirode.	Visok – nema značajnog negativnog utjecaja na okoliš.
Poštivanje minimalnih zaštitnih mjera	Projekt će se provoditi uz poštivanje svih relevantnih zakonskih okvira koji se odnose na radna i socijalna prava, zdravlje i sigurnost na radu, ravnopravnost spolova te zabranu diskriminacije. Time se osigurava usklađenost s temeljnim konvencijama Međunarodne organizacije rada i drugim međunarodnim standardima.	Srednje do visoko – mjere su u skladu s relevantnim propisima i standardima.
Usklađenost s tehničkim kriterijima prikladnosti	Projekt je usklađen s tehničkim kriterijima propisanim Delegiranom uredbom Komisije (EU) 2021/2139 za aktivnosti proizvodnje i distribucije toplinske energije iz obnovljivih izvora. Primijenjene tehnologije temelje se na visokoučinkovitim rješenjima i omogućuju buduću integraciju dodatnih obnovljivih izvora energije.	Visok – mjere su u skladu s tehničkim zahtjevima i dugoročnim ciljevima EU.

Na temelju provedene analize može se zaključiti da projekt povećanja učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije u centralni toplinski sustav grada Karlovca u potpunosti ispunjava kriterije propisane Uredbom (EU) 2020/852 i pripadajućim delegiranim aktima.

Projekt značajno doprinosi ublažavanju klimatskih promjena, ne nanosi značajnu štetu drugim okolišnim ciljevima, provodi se u skladu s minimalnim zaštitnim mjerama te zadovoljava tehničke kriterije prikladnosti. Kao takav, projekt se može klasificirati kao održiv u smislu EU taksonomije te predstavlja važan korak prema dekarbonizaciji toplinskog sustava, energetske tranziciji i ostvarenju strateških ciljeva Europske unije do 2050. godine.

15. HODOGRAM AKTIVNOSTI NUŽNIH ZA REALIZACIJU PROJEKTA

U ovom poglavlju prikazan je hodogram aktivnosti koji obuhvaća sve korake potrebne za pripremu, projektiranje, ishođenje dozvola, izgradnju i puštanje u pogon predmetnog postrojenja. Hodogram je izrađen prema logičkom slijedu aktivnosti, u skladu s važećim zakonodavnim okvirom i procedurama za provedbu energetske investicije u Republici Hrvatskoj te uzimajući u obzir tehničke i organizacijske zahtjeve projekta.

15.1. Kratkoročne aktivnosti do 2028. godine

Prikazani redoslijed aktivnosti u Tab. 15-1 omogućuje jasan pregled faza realizacije projekta, od idejnog rješenja i procjene utjecaja na okoliš, preko pripreme tehničke dokumentacije i nabave opreme, do gradnje, probnog rada i početka redovitog pogona.

Tab. 15-1 Hodogram aktivnosti za ostvarivanje ciljeva u 2028. godini

	Dokument / aktivnost	Opis aktivnosti
1. DOZVOLBENE AKTIVNOSTI	Idejno rješenje (IR)	- Definiranje osnovnog koncepta integriranog postrojenja (kotao na biomasu i akumulator topline). - Određivanje instalirane snage kotla, kapaciteta akumulatora, režima rada i načina integracije u postojeći toplinski sustav. - Izrada preliminarne nacrt, hidrauličkih shema i osnovnih tehničko-tehnoloških rješenja. - Analiza postojećeg toplinskog sustava i mogućnosti paralelnog rada s postojećim plinskim kotlovima. - Procjena potrebnih građevinskih zahvata i raspoloživog prostora unutar postrojenja. - Procjena utjecaja projekta na sigurnost, stabilnost i fleksibilnost rada sustava.
	Analiza opskrbe biomasom i ugovor o nabavi goriva	- Izrada analize dostupnosti biomase u radijusu opskrbe (npr. do 70 km), s naglaskom na lokalne izvore. - Izračun godišnje potrebne količine goriva prema planiranoj snazi i učinkovitosti kotla. - Identifikacija potencijalnih dobavljača biomase – lokalne šumarice, pilane, komunalna poduzeća i privatni proizvođači. - Uspostava mehanizama kontrole kvalitete goriva (vlažnost, granulacija, ogrjevnost vrijednost). - Priprema i potpisivanje dugoročnog ugovora o nabavi biomase kojim se definiraju količine, cijene, uvjeti isporuke i odgovornosti. - Ugovor služi kao mehanizam osiguranja stabilnosti opskrbe gorivom te je obavezni dio dokumentacije za sufinanciranje (u nekim slučajevima može i pismo namjere ili predugovor).
	Provedba postupka procjene utjecaja zahvata na okoliš (EZO / SUO)	- Izrada Elaborata zaštite okoliša (EZO). - Podnošenje zahtjeva za Ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš (OPUO) Ministarstvu zaštite okoliša i zelene tranzicije. - Nadležno tijelo odlučuje je li potrebna detaljna Studija utjecaja na okoliš (SUO). - Ako se utvrdi potreba za SUO: - Izrada Studije utjecaja na okoliš u skladu važećom zakonodavnom regulativom

	Dokument / aktivnost	Opis aktivnosti
2. FAZA IZGRADNJE	Idejni projekt (IP) i ishođenje lokacijske dozvole (LD)	- Izrada idejnog projekta za integrirano postrojenje (kotao + akumulator) s prikazom svih tehničkih, tehnoloških i sigurnosnih elemenata. - Ishođenje potvrde o usklađenosti zahvata s prostornim planom. - Predaja IP Ministarstvu prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine (MPUGDI) radi pribavljanja posebnih uvjeta (PU). - Usklađivanje IP s izdanim posebnim uvjetima i priprema dokumentacije za ishođenje lokacijske dozvole. - Podnošenje zahtjeva za lokacijsku dozvolu nadležnom tijelu.
	Glavni projekt (GP)	- Izrada glavnog projekta s građevinskim, strojarskim, elektroinstalacijskim i sigurnosnim dijelom. - Tehnički proračuni kotlovskog sustava, dimovoda, hidrauličkih krugova i spremnika topline. - Izrada elaborata zaštite od požara, zaštite na radu i zaštite okoliša. - Izrada troškovnika i tehničkih specifikacija za izvođenje radova.
	Ishođenje građevinske dozvole (GD)	- Predaja zahtjeva za građevinsku dozvolu uz priloženi glavni projekt. - Pribavljanje svih potrebnih suglasnosti (komunalne službe, zaštita okoliša, vatrogasci, elektrodistribucija). - Osiguranje pravomoćnosti građevinske dozvole prije početka izvođenja radova.
	Izrada Dokumentacije o nabavi (DoN)	- Izrada natječajne dokumentacije za javnu nabavu radova i opreme. - Definiranje tehničkih specifikacija, rokova, kriterija odabira i načina provedbe nabave. - Provedba postupka javne nabave u skladu sa zakonskim propisima - Potpis ugovora
2. FAZA IZGRADNJE	Nabava opreme i izvođenje radova	- Nabava ključne opreme: kotao na biomasu, sustav doziranja goriva, filteri, dimovodni sustav, akumulator topline, izmjenjivači, pumpe, ventili i pripadajuća oprema. - Izvođenje građevinskih i montažnih radova na lokaciji. - Ugradnja i povezivanje kotla i akumulatora topline u postojeći toplinski sustav. - Integracija sustava upravljanja i automatike s postojećim SCADA sustavom.
	Nabava opreme i izvođenje radova	- Nabava ključne opreme: kotao na biomasu, sustav doziranja goriva, filteri, dimovodni sustav, akumulator topline, izmjenjivači, pumpe, ventili i pripadajuća oprema. - Izvođenje građevinskih i montažnih radova na lokaciji. - Ugradnja i povezivanje kotla i akumulatora topline u postojeći toplinski sustav. - Integracija sustava upravljanja i automatike s postojećim SCADA sustavom.
	Testiranje, puštanje u pogon i probni rad	- Mehanička, hidraulička i funkcionalna ispitivanja sustava (tlak, nepropusnost, učinkovitost, sigurnost). - Puštanje postrojenja u pogon pod nadzorom projektanta i izvođača. - Probni rad postrojenja i optimizacija parametara rada. - Izrada završnog izvješća o testiranju i probnom radu.

	Dokument / aktivnost	Opis aktivnosti
3. NAKON ZAVRŠETKA GRADNJE	Tehnička primopredaja postrojenja i izrada zapisnika o izvedenom stanju.	- Izrada tehničke dokumentacije o izvedenom stanju i ugradnji opreme. - Obuka operatera i osoblja za rad s novim postrojenjem. - Podnošenje zahtjeva za uporabnu dozvolu nadležnom tijelu. - Izdavanje uporabne dozvole i službeni početak redovitog rada. - Kontinuirano praćenje rada, učinkovitosti i emisija te izvješćivanje nadležnih tijela.

Pojedine aktivnosti u provedbi projekta mogu se vremenski preklapati, osobito faze izrade projektne dokumentacije, postupci zaštite okoliša i priprema javne nabave. Takvo paralelno odvijanje preporučuje se radi skraćivanja ukupnog roka realizacije, uz osiguranje potrebnih suglasnosti i koordinaciju svih sudionika. Završetak radova na kotlu i akumulatoru topline potrebno je uskladiti kako bi se omogućilo istodobno puštanje u probni rad i optimalan početak redovitog rada sustava.

Paralelno s realizacijom investicije u kotao na biomasu i akumulator topline, potrebno je provesti i skup mjera modernizacije postojećeg distribucijskog sustava, definiranih u poglavlju 7. Ove aktivnosti obuhvaćaju tehničke, energetske i digitalne zahvate na razini distribucijske mreže te predstavljaju komplementarne mjere koje osiguravaju učinkovit rad novih proizvodnih kapaciteta i daljnje smanjenje toplinskih gubitaka. Provedba navedenih mjera planira se paralelno s građevinskim i instalacijskim radovima na novim proizvodnim jedinicama, a kako bi se postigla maksimalna sinergija ulaganja i osigurao koordiniran prijelaz na učinkovit i održiv centralizirani toplinski sustav.

15.2. Dugoročne aktivnosti do 2050. godine

Potpuna dekarbonizacija u razdoblju do 2050. godine ovisit će o statusu razvoja geotermalnog postrojenja na području Karlovca.

U slučaju da se geotermalni projekt ostvari (scenarij A), Gradska toplana neće imati potrebu za dodatnim investicijama u proizvodne kapacitete. Sustav će se u tom slučaju izravno spojiti na geotermalni izvor topline, čime će se osigurati gotovo potpuna dekarbonizacija i dugoročna stabilnost toplinskog sustava, uz minimalne operativne troškove i visoku sigurnost opskrbe.

Ako se geotermalno postrojenje ne realizira (scenarij B ili C), potrebno je planirati ponavljanje hodograma aktivnosti sukladno Tab. 15-1 i budućoj regulativi, odnosno novu fazu modernizacije sustava oko 2046. godine s ciljem dodatnog povećanja udjela obnovljivih izvora i smanjenja emisija. U tom bi se slučaju ponovno razmatrale tehničke opcije daljnje nadogradnje sustava temeljenog na biomasi, akumulaciji topline i mogućoj integraciji drugih obnovljivih tehnologija.

16. ZAKLJUČAK

Strateški plan mjera Gradske toplane za povećanje učinkovitosti i uvođenje obnovljivih izvora energije u centralni toplinski sustav grada Karlovca izrađen je kao polazni dokument koji definira okvir, ciljeve, mjere i tehnološke opcije za postupni prijelaz prema održivom, niskougljičnom i energetski učinkovitom sustavu grijanja do 2050. godine. Plan potvrđuje da je tranzicija toplinskog sustava tehnički ostvariva, ekonomski opravdana i ekološki prihvatljiva te da predstavlja važan korak u ispunjavanju europskih i nacionalnih ciljeva dekarbonizacije.

Analize provedene tijekom izrade Plana pokazuju da se do 2028. godine, kroz ugradnju novog kotla na biomasu snage 9 MW i akumulatora topline kapaciteta 150 MWh, može postići udio obnovljivih izvora energije od 76,53 %, uz godišnje smanjenje emisija stakleničkih plinova od 9.314 t CO₂ ekv. Uz ovu investiciju, predviđa se i provedba prioritarnih mjera modernizacije, uključujući regulaciju i automatizaciju rada sustava, poboljšanje toplinske izolacije te uvođenje naprednih sustava upravljanja energijom, čime će se povećati energetska učinkovitost te stvoriti tehnički preduvjeti za daljnju integraciju obnovljivih izvora energije.

Dugoročno, sustav može doseći potpunu dekarbonizaciju do 2050. godine pri čemu će konačne investicijske odluke u velikoj mjeri ovisiti o rezultatima istraživanja geotermalnog potencijala. Ako se geotermalni resursi potvrde i realiziraju, sustav će se razvijati u smjeru potpune geotermalne integracije. U suprotnom će se primijeniti alternativna rješenja, uključujući dizalicu topline, dodatni akumulator topline i novi kotao na biomasu.

Ekonomska analiza pokazuje da je projekt financijski samoodrživ ako se promatra isključivo s tržišnog aspekta. Opravdanost ulaganja proizlazi iz ne samo financijske održivosti već i njegovih učinaka na smanjenje emisija, povećanje udjela obnovljivih izvora energije, poboljšanje energetske sigurnosti te jačanja otpornosti sustava na buduće izazove.

Plan također potvrđuje tehničku i ekonomsku izvedivost dekarbonizacije uz poštivanje načela „ne nanosi značajnu štetu“ (DNSH), korištenje certificirane biomase iz održivih izvora i primjenu tehnologija koje zadovoljavaju tehničke kriterije propisane člankom 19. Uredbe (EU) 2020/852 i Delegiranom uredbom (EU) 2021/2139. Time se stvaraju uvjeti za realizaciju investicija koje će dugoročno omogućiti usklađivanje sustava grijanja s ciljevima klimatske neutralnosti.

Zaključno, Strateški plan predstavlja temelj za donošenje budućih odluka u području toplinske energetike te usmjerava razvoj toplinskog sustava u Karlovcu prema modelu koji će dugoročno osigurati stabilnu, održivu i niskougljičnu opskrbu toplinskom energijom. Na temelju ovog Plana, Gradska toplana može planirati daljnje aktivnosti i investicije, pokrenuti regulatorne i dozvolne postupke te pravodobno osigurati pristup dostupnim izvorima sufinanciranja čime se stvaraju preduvjeti za dugoročnu klimatsku neutralnost i održiv razvoj cjelokupnog sustava.

DIREKTOR

Zdravko Ereimić, dipl.oec.