

Studija slučaja daljinskog grijanja na bazi solarne energije sa sezonskim skladištem toplote u Marstalu, Danska



Fotografija: Solarna elektrana Marstal sa skladištima toplote (Izvor: Marstal Fjevarme Amdb)

Uvod

| Opšte informacije ¹ | |
|---------------------------------------|--|
| Područje solarnog termalnog kolektora | 33.365 m ² solarnih kolektora |
| Skladištenje toplotne energije | Podzemno sezonsko skladište u jami 75.000 m ³ i pilot skladište 10.000 m ² |

¹ Franz Mauthner i Martin Joly, [Analiza primjera najbolje prakse i konceptualne studije izvodljivosti solarnih termalnih sistema u urbanim sredinama](#), IEA SHC, 9, 31 avgust 2017.

For more information

Nataša Kovačević

District heating campaigner

CEE Bankwatch Network

natasa.kovacevic@bankwatch.org

Learn more: bankwatch.org



| | |
|---|--|
| Rezervoar za skladištenje toplotne energije (čelični rezervoar, balansiranje opterećenja) | 2,100 m ³ |
| Ostali izvori energije u sistemu daljinskog grijanja | Kotao za biomasu od 4 MW sa 750 kW organskim Rankineovim ciklusom (ORC) jedinica |
| | Električna toplotna pumpa od 1,5 MWth |
| | Kotlovi na bioulje |
| Godišnji prinos solarne energije | 28.000 MWh |
| Solarna frakcija | 41 odsto (zasnovano na konačnoj toplotnoj snazi respiracije izazvane toplotom) |
| Specifični godišnji prinos sunčeve energije | 440 kWh/(m ² bruto·a) / 448 kWh/(m ² otvora·a), 2013/2014 |
| Dužina mreže | 19,5 km razvodnih i 17,7 km servisnih cijevi |
| Broj potrošača | 1,481 |

Solarna toplana Marstal nalazi se na Aeroeu, ostrvu obnovljive energije na jugu Danske. Predstavlja jednu od najvećih solarnih elektrana na svijetu i jedan od pionirskih pilot projekata te vrste. Iako je Marstal svjetski poznat po svojim sezonskim skladišnim sistema u jamama, prepoznata je takođe i lokalna zajednica po svojoj posvećenosti razvoju daljinskog grijanja zasnovanog na obnovljivim izvorima energije, koja je pokazala veliku otvorenost i prihvatanje novih čistih tehnologija.

Od 1994. godine Marstal daljinsko grijanje (Marstal Fjernvarme) postepeno prelazi na sistem obnovljivih izvora energije. Danas ovo preduzeće grije naselje Marstal iz 100 odsto obnovljivih izvora energije. Pedeset odsto njegove toplote dolazi direktno iz solarnih kolektora, 40 odsto iz ostataka drvne građe i dva do tri odsto iz toplotne pumpe.

Marstal daljinsko grijanje je 2001. godine dobilo grant od Danske agencije za energiju i Petog okvirnog programa EU koji je omogućio da solarna toplota pokrije 13 odsto ukupne potražnje za grijanjem (projekat SUNSTORE 2), a 2010. godine dobila je finansiranje od Sedmog okvirnog programa EU za solarnu toplotu za pokrivanje do polovine svojih potreba za grijanjem (projekat SUNSTORE 4). Ukupan budžet za projekat iznosio je 15,1 milion eura, od čega je 6,1 milion eura grantova obezbijedila EU. Partneri koji su učestvovali dali su doprinos projektu u iznosu od 0,4 miliona eura.

Zašto je odabrano sezonsko skladištenje u jamama kao podrška radu solarnoj termoelektrani

Godišnje sunčevo zračenje u Danskoj je otprilike 200 puta više od količine energije koju zemlja godišnje koristi za grijanje, električnu energiju, transport, itd. Marstal je odlučio iskoristiti ovo i postane mjesto za demonstraciju i testiranje nacionalnih i globalnih čistih rješenja za grijanje.

Svrha koncepta SUNSTORE™ implementiranog u Marstalu bila je da se pokaže da se daljinsko grijanje može proizvoditi sa 100 odsto obnovljivih izvora energije, od kojih solarna toplota može pokriti 50 odsto ili više. Ovo je postignuto implementacijom velikog sistema za skladištenje toplote u proizvodnom sistemu. Koncept, zasnovan na skladištenju toplotne energije u jamama (PTES), omogućio je:

- korišćenje svih vrsta obnovljivih izvora toplote, otpadne toplote i tehnologije toplotnih pumpi (solarna termalna, geotermalna, biomasa, višak toplote iz industrije);
- obezbjeđivanje daljinskog grijanja iz obnovljivih izvora energije za potrošače bez upotrebe biomase i otpadnih ulja;
- potrošnju i proizvodnju električnu energiju kada je to potrebno u elektroenergetskom sistemu i na taj način integraciju promjenljive proizvodnje električne energije iz vjetra i sunca;
- obezbjeđivanje tople vode za gotovo svih 2.200 stanovnika ostrvskog grada Marstal;
- obezbjeđivanje koncepta grijanja koji se može postepeno razvijati.

Procjenjuje se da će projekat SUNSTORE 4 obezbjeđivati grijanje po cijeni od 50 do 60 eura/MWh. U poređenju sa cijenama proizvodnje toplotne energije u 2010. godini, koje su bile više od 70 EUR/MWh i koja je bila proizvedena od biouglja, ovo je mnogo isplativije rješenje.

Tehnologija i investicioni troškovi

Solarna toplana Marstal godinama se kontinuirano razvija, najviše zbog povećanja broja potrošača, korisnika grijanja iz postrojenja. U SUNSTORE 4 ugrađeno je 15.064 kvadratnih metara (m²) solarnih kolektora i izgrađen je PTES od 75.000 kubnih metara (m³), čime je postignut cilj povećanja solarne frakcije postrojenja na 55 odsto proizvodnje toplotne energije, uz fokusiranje na održivost, povećanu efikasnost i niske troškove. 2021. godine ugrađena je nova toplotna pumpa od 2 MW koja je zamijenila staru koja je bila neefikasna. Pumpa je planirana za testiranje sredinom januara 2022. godine i udvostručiće efikasnost grijanja i hlađenja skladišta toplotne energije u poređenju sa prethodnom.²

² Dansk Fjernvarme, '[Nova toplotna pumpa povećava solarnu efikasnost u Marstalu](#)', Dansk Fjernvarme, 30 decembar 2021.

| Specifične informacije o solarnom termalnom sistemu | |
|--|--|
| SUNSTORE 1 (1996) | <ul style="list-style-type: none"> Polje od 9.045 m² koje se sastoji od nizova od 12.53 m² Arcon HT kolektora (kolektorsko polje 1) |
| SUNSTORE 2 (2001-2004) | <ul style="list-style-type: none"> Polje od 8.019 m² koje se sastoji od nizova od 12.53 m² Arcon HT kolektora (kolektorsko polje 2) <p>Test kolektori:</p> <ul style="list-style-type: none"> 103 m² Wagner krovni integrirani solarni kolektori - 881 m² GJ prizemljeni ravni pločasti solarni kolektori 108 m² Thermosol vakumski cijevni solarni kolektori – 211 m² IST koncentrirajući solarni kolektori |
| SUNSTORE 4 (2012-2014) | <ul style="list-style-type: none"> Polje od 15.064 m² koje se sastoji od nizova od 13.88 m² Sunmark solarnih kolektora (kolektorsko polje 3) |
| Ostali komunalni programi | <ul style="list-style-type: none"> 2.100 m³ skladišteni rezervoar (SUNSTORE 1 & 2) Termoakumulacija 75.000 m³ vodeno okno 1.500 kW (proizvedena toplota) CO₂ toplotna pumpa (promijenjena 2022. godine toplotnom pumpom na bazi amonijaka od 2 MW) Kotao na drva od 4,15 MW koji pokreće organski Rankineov ciklus za proizvodnju električne energije sa snagom od 750 kW |

Dugotrajno skladištenje u Marstalu obezbijedeno je izgradnjom podzemnog skladišta toplote u jami (PTES) sa vodom kao medijumom za skladištenje. Skladište izgleda kao naopako okrenuta piramida bez vrha, zapremine 75.000 m³. Otkopano tlo iz donjeg dijela skladišnog sistema koristi se kao nasip oko skladišta. Sistem za skladištenje je na mjestu prekriven zavarenim omotačem od polietilena visoke gustine (HDPE). Na vrhu skladišta voda je prekrivena plutajućim izolacionim poklopcem. Punjenje i pražnjenje skladišta vrši se kroz ulazno-izlazni sklop sa tri ulazno/izlazne cijevi do okna skladišta topline. Skladište se puni do 80 do 85 °C tokom ljeta, a prazni do 10 °C tokom zime. Skladište se koristi direktno i kao izvor toplote za toplotnu pumpu.³

³ PlanEnergi, [Sažeti tehnički opis postrojenja SUNSTORE 4 u Marstalu](#), PlanEnergi, 1-2, accessed 19 april 2022.



Fotografija: Sezonsko skladište u izgradnji i dopola ispunjeno vodom, snimak iz vazduha, izvor: PlanEnergi

Investicioni i operativni troškovi

Stanovnici Marstala finansirali su prvobitnu mrežu daljinskog grijanja 1960-ih godina. Nakon toga, kompanija je finansirala prelazak na solarnu energiju koristeći dostupne subvencije i programe finansiranja. Na kraju su ukupni investicioni troškovi za postrojenje iznosili 15.1 miliona eura, a od toga je 35 odsto bilo pokriveno subvencijama iz fonda EU, a ostatak je prikupljen preko Kommune Credit-a, danskog programa finansiranja koji omogućava pozajmljivanje novca po povoljnim kamatnim stopama.

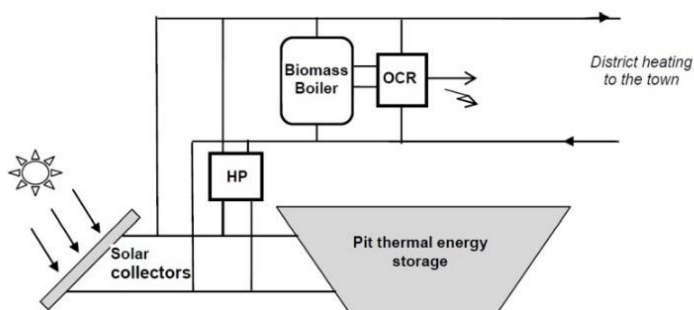
Kompanija za grijanje Marstal koristi neprofitni poslovni model, što znači da se sav potencijalni profit vraća članovima u vidu nižih cijena energije. Projekat je postigao ciljeve troškova između 30 i 60 EUR/MWh za različite izvore toplote, sa cijenama solarne toplote od oko 30 EUR/MWh.

Troškovi izgradnje Marstal sistema za skladištenje iznosili su 41 EUR/m³ vode (bez PDV-a), uključujući sve priključke cijevi na postrojenje, kontrolni sistem, geotehničku podršku, itd. Troškovi su konkurentni u odnosu na druge sisteme za skladištenje (npr. bušotine, rezervoari) i ako se izgradi danas, postoji potencijal da se troškovi još više smanje.

Kako elektrana koristi drvo za kogeneraciju, cijene su postale opterećenje posljednjih godina, pošto je glavni dobavljač elektrane povećao cijene.⁴ Novim danskim zakonom, kojim su upola smanjeni porezi na električnu energiju koja se dobija iz toplotnih pumpi, ukoliko bi se projekat Marstal grijanja na daljinu danas realizovao, imao bi povoljniju ekonomsku situaciju da se opredijeli za još veći kapacitet toplotnih pumpi.

⁴ Eva Augsten, 'Danska: 23 MWh pokriva 55% potražnje za toplotom za 1.500 domaćinstava', *Solarthermalworld*, 28 juli 2014.

Operativna iskustva i efikasnost

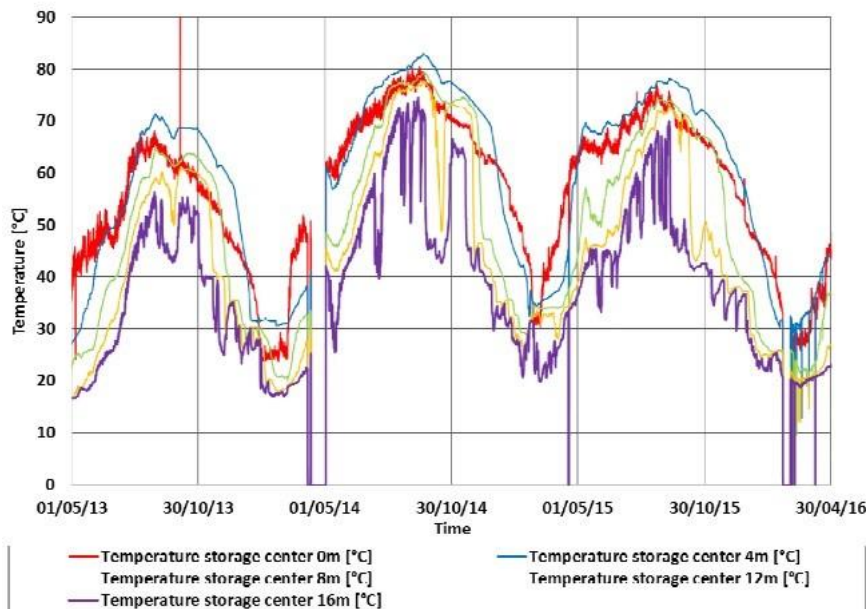


Slika 1: Konfiguracija sistema daljinskog grijanja u Marstalu (izvor: PlanEnergi)

Akumulacija i skladištenje toplote u Marstalu funkcioniše na jednostavan način:

- Ljeti solarni sistem puni skladište i obezbeđuje Marstal daljinsko grijanje.
- Počevši od kraja septembra, uskladištena toplota mora biti dopunjena toplotom iz kotla na drva ili iz toplotne pumpe. Kotao koji radi sa učinkom od približno 3,25 MW toplote i integrisanim organskim Rankineovim ciklusom proizvešće 750 kW električne energije. Toplotna pumpa za hlađenje skladišta radi kada su cijene električne energije niske i zagrijava povratnu temperaturu na 75°C.
- Zimi će rezervni kotlovi morati da snabdijevaju nekoliko sati, a toplotna pumpa mora raditi i kada je cijena struje veća.
- U februaru će solarni sistem ponovo početi da zagrijava skladište.
- Kotao na drva će raditi otprilike puno radno vrijeme do aprila.

Marstal za daljinsko grijanje koristi i sisteme za skladištenje (obično 110 ili 160 litara) u instalacijama potrošačkih podstanica. Ovo omogućava nizak protok za punjenje skladišta, niske povratne temperature i minimiziranje cijevi do kuća (a time i smanjenje gubitaka topline). Rezultat su povratne temperature od 33°C zimi i do 40°C ljeti. Prednje temperature su između 72°C (ljeti) i 76°C (zimi).



Slika 2: Trend temperature vode u centru sezonskog skladišta toplote tokom 3 godine praćenja, izvor: Sunstore 4: CHP postrojenje zasnovano na hibridnoj biomasi i rezultati velikog solarnog sistema nakon monitoringa, A. Hammerschmid, LKjaegaard, I. Obernberge.⁵

Praćenje procesa, koje se odvijalo od maja 2014. do aprila 2016. godine, pokazalo je da je maksimalna temperatura u sistemu skladištenja dostignuta početkom septembra (najviša je bila oko 82°C četiri metra ispod površine 2014. godine). Sve do kraja oktobra, slojevi u sredini akumulacionog sistema mogli su održavati temperature prilično konstantnim, kao što je prikazano na slici 2. Temperatura vode na vrhu opada brže zbog smanjenja temperature okoline i većih gubitaka toplote. Oko marta, skladište pokazuje najniže stanje punjenja, a temperature vode su minimalno između 20 i 45°C u svim slojevima.⁶

Postupak punjenja i pražnjenja okna skladišta toplote je vrlo dinamičan tokom ljetnjeg perioda, kada ne radi nijedan drugi proizvođač toplote, osim solarne elektrane. Sve specifikacije, kao što su 25-godišnji vijek trajanja, maksimalni gubitak toplote od 10 odsto i mogućnost recikliranja od 90 odsto, potvrđene su od strane Lloyd's Register-a.⁷

⁵ Alfred Hammerschmid, Lasse Kjaergaard Larsen, i Ingwald Obernberger, [SUNSTORE 4: CHP postrojenje zasnovano na hibridnoj biomasi i solarnom sistemu velikih razmjera - Rezultati nakon praćenja](#), EUBCE, 9 juni 2016.

⁶ Alfred Hammerschmid, Lasse Kjaergaard Larsen, i Ingwald Obernberger, [SUNSTORE 4: CHP postrojenje zasnovano na hibridnoj biomasi i solarnom sistemu velikih razmjera - Rezultati nakon praćenja](#).

⁷ Robin Whitlock, ['Aalborg CSP dobija sertifikat za svoju PTES tehnologiju od Lloyds Register'](#), Renewable Energy Magazine, 31 maj 2021.

Odluka, proces dizajna i primijenjeni pristupi

Kako je prelazak na solarno grijanje u Marstalu započeo prije skoro dvije decenije, s prvim pilot projektima na PTES-u, akteri su imali priliku da rano steknu razumijevanje o primijenjenim tehnologijama, što je olakšalo postizanje konsenzusa i donošenje odluka.

Marstal daljinsko grijanje je preduzeće u vlasništvu potrošača. Dnevne odluke donosi odbor, koji se bira na godišnjoj Generalnoj skupštini. O svim većim investicijama (postrojenje od 8.000 m², SUNSTORE 2 i SUNSTORE 4) raspravljalo se i odlučivalo na Generalnoj skupštini, na koju su pozivani svi potrošači. Na primjer, prvi projekat je usvojen sa 144 glasa za i bez glasova protiv. Tokom pripreme projekta, zajednica se informiše kroz članke u lokalnim novinama i kroz svakodnevne sastanke ili susrete sa članovima odbora ili zaposlenima u kompaniji daljinskog grijanja.

Sažetak i naučene lekcije

Marstal nije bio samo prvo mjesto koje je uspostavilo solarni sistem grijanja, već i možda prvi danski grad koji je stekao međunarodno priznanje za svoje aktivnosti. Marstalov sistem daljinskog grijanja transformirao se iz tradicionalne toplane u pionira solarnog grijanja i termoakumulacije, privlačeći danas više od 2.000 do 3.000 posjetilaca godišnje.

Osim što se 100 odsto zasniva na obnovljivim izvorima energije, Marstal je stekao priznanje za dvije decenije testiranja solarnog termalnog skladištenja toplote. Zbog toga se neke od najvrijednijih naučenih lekcija odnose na tehnička rješenja i njihovu efikasnost. Oni se mogu sažeti na sljedeći način:

- Povećanje veličine PTES-a može značajno smanjiti troškove. Prvi veliki danski (10.000 m³) demonstracioni sistem za skladištenje toplote u Marstalu bio je skoro tri puta skuplji od današnjeg najvećeg sezonskog skladišta koje je postavljeno 2015. godine u Vojensu i koje je koštalo samo 24 eura/m³. Preporučljivo je koristiti referentnu vrijednost od oko 30 EUR/m³ prilikom izračunavanja troškova skladišta toplote u jami kapaciteta 100.000 m³ ili više.
- Sezonsko skladištenje toplote je vrlo isplativ način da se iskoristi višak električne energije proizveden iz drugih obnovljivih izvora energije. Na primjer, energija vjetra je već prosječno doprinijela do 40 odsto u proizvodnji električne energije u godini u Danskoj⁸ i može imati višestruke koristi ako se ovaj bogati povremeni izvor energije kombinuje sa sezonskim skladištenjem putem toplotnih pumpi.
- Da bi se postigla veća efikasnost, bolje je povezati sezonsko skladište na mrežu daljinskog grijanja preko toplotne pumpe. To omogućava niže temperature skladištenja tokom cijele godine, što smanjuje gubitke toplote.
- Za proizvodnju iz solarne toplane, bitno je da temperatura povrata iz distributivne mreže bude niska. Rješenje bi mogli biti manji sistemi skladištenja u instalacijama potrošačkih trafostanica.

⁸ Postotak je u porastu, pa je u 2019. godini 47 posto finalne potrošnje činila proizvodnja električne energije iz vjetra.

- Da bi se minimizirali troškovi iskopavanja za pripremu sistema za skladištenje, tlo se mora sastojati od zemljišta koje se može iskopavati i moraju se upotrijebiti tradicionalne metode, bez značajnog uključivanja podzemnih voda.
- Da bi se smanjili gubici toplote u vazduh, okno mora biti pokriveno izolacijom sa zagarantovanom otpornošću na temperature do 90°C tokom vijeka trajanja skladišta. Gornja izolacija i donja membrana (u ovom slučaju HDPE obloga od 2,5 mm) su neki od najskupljih dijelova u PTES-u i stoga se površina izolacije mora svesti na minimum.
- Suva zemljišta su bolji izolator od vlažnih ili zasićenih zemljišta, a osim toga podzemna voda može dovesti do neželjenih gubitaka toplote ukoliko zagrijana podzemna voda teče preko lokacije. Stoga nivo podzemne vode mora biti na odgovarajućoj dubini ispod dna okna. Alternativno, toleriše se viši nivo podzemne vode, ali u tom slučaju nije dozvoljen značajan protok podzemne vode preko lokacije.
- Gubitak toplote je sveden na teoretski minimum u slučajevima kada okno ima sferni oblik. Širina mora biti minimizirana, zbog čega nagibi stranica piramide moraju biti strmi koliko god je to praktično moguće. Ovo, takođe, smanjuje površinu skupe gornje izolacije.
- U operativnoj fazi, temperatura u zemljištu pored sistema za skladištenje će se povećati, možda i do 90°C u blizini jame. Ovo zagrijavanje tla može uzrokovati efekat isušivanja tla iznad podzemnih voda ukoliko ne bude dodata voda iz npr. padavina. U konkretnom slučaju, glina je izgledala toliko konsolidovana da se smatralo da je prirodni sadržaj vode blizu granice skupljanja.⁹
- Uprkos upotrebi automatskih ventilacionih otvora, praktična upotreba pilot skladišta pokazuje da se ispod plutajuće krovne folije formiraju vazdušni džepovi koji sadrže do nekoliko kubnih metara vazduha, koji se oslobađa kada se skladište puni na relativno visokim temperaturama za ovaj proces. To negativno utiče za proizvodnju, pošto ne postoji mogućnost uklanjanja ovih vazdušnih džepova. Vakumski ventili i ventilaciona crijeva od HDPE materijala korišćeni su kao efikasnija rješenja za skladište SUNSTORE 4. Oni vode do deset kontrolnih bunara u kojima se vlaga u izolaciji može mjeriti i na kraju ispumpati i isušiti.

Ova publikacija je napravljena uz finansijsku pomoć Evropske klimatske fondacije, Evropske unije i Sida-e. Sadržaj ove publikacije je isključiva odgovornost CEE Bankwatch Network i ni pod kojim okolnostima se ne može smatrati da odražava stav donatora.



European
Climate
Foundation



⁹ Dannemand Andersen J., Bodker L., i Jensen M.V., [Veliko skladište toplotne energije u Marstal daljinskom grijanju](#), *GEO / PlanEnergi*, 3-4, 6 septembar 2013.