

Doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.,
Ing. Jiří HUBKA,
ČVUT Praha, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí
Ing. David BOROVSÝ,
CityPlan spol. s r.o.

Analýza solární soustavy pro centralizované zásobování teplem



Ústav techniky prostředí

Analysis of Solar System for District Heating

Recenzent
Ing. Lubomír Zejda

Autoři popisují aplikaci solárních soustav do soustav CZT a úskalí, která mohou nastat při kombinaci provozu solárních soustav a soustav CZT. Dále je uvedeno několik možných kategorií solárních soustav s různým stupněm pokrytí potřeb tepla. Na příkladu je ukázáno technické řešení sídliště rodinných domů. Technické řešení je pak rozpracováno v simulačním prostředí a poté je řešení ekonomicky vyhodnoceno. Sluneční energie v soustavách CZT je využitelná, negativním faktorem je však cena tepla z tohoto zdroje.

Klíčová slova: solární soustavy, centralizované zásobování teplem, akumulace tepla

Authors describe the application of solar systems in district heating systems and problems that may appear at the solar systems and district heating systems combined operation. Further, there are specified several acceptable categories of solar systems with various levels of heat demand coverage, in their contribution. They show the technical solution of the suburban town at the example. The technical solution is elaborated in the simulation environment and economically evaluated afterwards. The solar energy in district heating systems is utilizable, however the price of heat from this source is a negative factor.

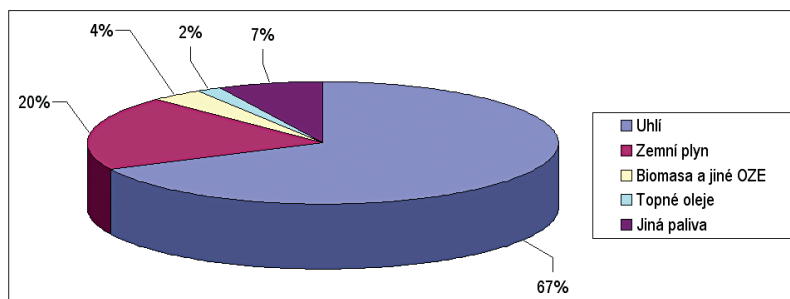
Key words: solar systems, district heating, heat storage

ÚVOD

V České republice je zhruba 35 % potřeby tepla zajišťováno dodávkami z centrálních zdrojů prostřednictvím soustav centralizovaného či dálkového zásobování teplem (CZT). Zdrojová základna soustav pro zásobování teplem je v ČR tradičně orientována především na fosilní paliva. Na obr. 1 je uveden podíl jednotlivých paliv na dodávce tepla v roce 2010 [1].

Zřejmě je závislost tuzemských výrobců tepla pro CZT na uhlí, jehož cena pravděpodobně významně stoupne po vypršení dlouhodobých smluv velkých tepláren v roce 2015 a v souvislosti s platnými ekologickými limity těžby v severních Čechách reálně hrozí i nedostatek tuzemského uhlí na trhu a nutnost jeho importu ze zahraničí. Menší soustavy CZT jsou orientovány převážně na dovážení zemní plyn. Tuzemský potenciál využití dřevní štěpky produkované při lesní těžbě je v podstatě vyčerpán. Podobně jako u fosilních paliv lze proto očekávat další růst cen biomasy a nutnost jejího dovozu či využití rychlerostoucích dřevin.

Myšlenka využití sluneční energie pro soustavy centralizovaného zásobování teplem je relativně stará. První velkoplošné solární soustavy dodávající teplo pro centralizované zásobování teplem byly zprovozněny ve Švédsku v letech 1979 a 1980. Následný vývoj solárních soustav pro CZT probíhal v 90. letech zejména ve Švédsku, Dánsku, Německu a Rakousku, kde je v současné době zaznamenán největší počet instalací. Ve výše uvedených zemích jsou provozovány různé varianty soustav ve formě jak demonstračních, tak komerčních projektů. Více než dvacetileté zkušenosti s projektováním, výstavbou a provozem takových zdrojů tepla přinesly celou řadu technických, ekonomických a legislativních poznatků, které aplikovány do praxe mohou umožnit jejich podstatnější rozšíření. Zatímco zprvu šlo především o solární soustavy s malými podíly na krytí potřeby tepla, v dnešní době se stále více objevují solární soustavy pro CZT, které dosahují solárního pokrytí potřeby tepla na vytápění, přípravu teplé vody a krytí tepelných ztrát rozvodů až do 50 %. V České republice, která má poměrně rozvinutou soustavu CZT se v poslední době využití sluneční energie pro CZT dostává také do centra pozornosti. Diskuze se však prozatím bohužel soustředila okolo možnosti 100% nahrazení paliva [2, 3] s instalovanými plochami desítek tisíc m² solárních kolektorů a objemu stovek tisíc m³ vodních akumulátorů. To je velmi extrémní případ i pro



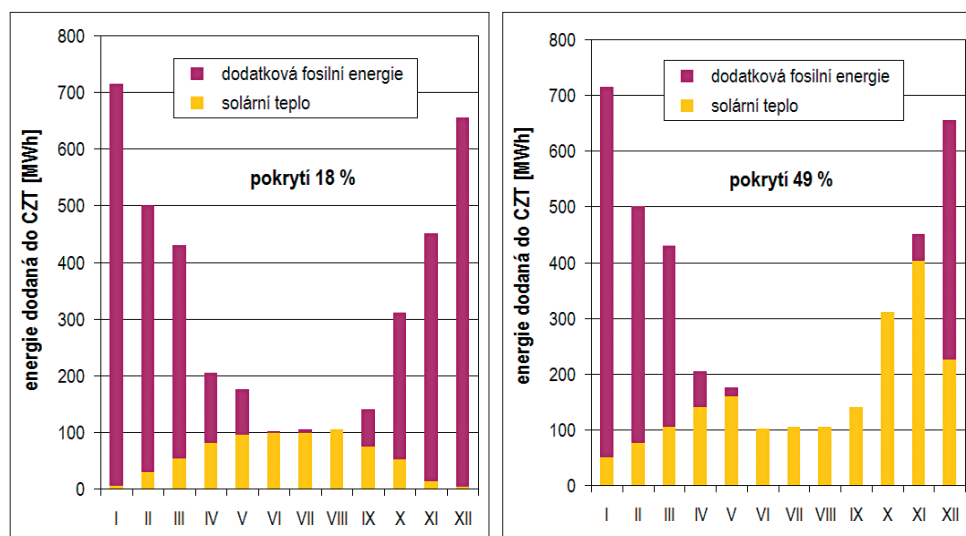
Obr. 1 Podíl paliv na celkové dodané tepelné energii v ČR [1]

země s dlouhodobou tradicí solárních CZT, natož pro Českou republiku, kde v CZT pracuje pouze několik malých soustav v řádu desítek m² kolektorové plochy [4]. Hodnota solárního pokrytí významně ovlivňuje výslednou cenu solárního tepla takové soustavy a je nutné tuto skutečnost zohlednit při plánování a návrhu soustavy. Souvislost návrhových, provozních a ekonomických parametrů je zřejmá z případové studie představené v následujícím textu.

Tento příspěvek se věnuje integraci solárních soustav do vytápěcích provozů. U teplárenských soustav, tzn. s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla (KVET), je integrace solární soustavy mnohem komplikovanější, protože **nesmí** snižovat účinnost vlastního systému KVET (problém využití tepla z KVET v letním období při maximální produkci tepla solární soustavou). Nicméně, i zde lze uvažovat s možností využití sluneční energie, např. pro předehřev napájecí vody před vstupem do parního kotle, spojení s centralizovanou výrobou chladu v absorpčních jednotkách (trigenerace) v letním období, apod. Jde však již o aplikace s odlišnými typy solárních kolektorů (vysokoteplotní) a také odlišnými investičními náklady.

ZÁKLADNÍ KONCEPCE SOUSTAV

Solární soustavy pro centralizované zásobování teplem pracují na obecně známém principu. Teplo získané ze solárních kolektorů je primárním okruhem přivedeno k centrálnímu zdroji vybavenému zpravidla alespoň minimální akumulací tepla, odkud je předáváno dále do sítě CZT, nebo přímo



Obr. 2 Rozdíly v pokrytí potřeby tepla soustav s krátkodobou a dlouhodobou akumulací

do rozvodu CZT. Teplo rozváděné distribuční sítí CZT je v domovních předávacích stanicích využito pro přípravu teplé vody a vytápění budov. Pokud tepelné zisky ze solárních kolektorů nestačí pro krytí potřeby tepla, zapíná se centrální zdroj tepla, například plynový kotel.

Solární soustavy pro CZT lze rozdělit do několika kategorií s různým stupněm pokrytí celkové potřeby tepla na přípravu teplé vody a vytápění:

□ Bez akumulace tepla

Solární tepelné zisky se akumulují v objemu rozvodů celé sítě. Plocha solárních kolektorů je navržena na trvalou potřebu tepla sítě CZT. Solární pokrytí potřeby tepla se pohybuje zhruba do 5 %.

□ S krátkodobou (denní) akumulací

Nárazníkový akumulátor slouží pro akumulaci nejvýše několikadenních zisků. Plocha solárních kolektorů se navrhuje na krytí letní potřeby tepla na přípravu teplé vody. Návrhové solární pokrytí se pohybuje od 10 do 20 %.

□ S dlouhodobou (sezónní) akumulací

Velkoobjemové sezónní zásobníky slouží pro akumulaci letních nadbytečných zisků a jejich přenesení do zimního období pro krytí potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody. Využívá se čtyř základních typů sezónních zásobníků tepla (vodní, šterkovodní, sondy v zemském polomasivu, aquifery), které se liší hustotou akumulace a cenou. Návrhové solární pokrytí se pohybuje zhruba do 50 %.

Na obr. 2 jsou uvedeny roční průběhy potřeby tepla a energie dodané solární soustavou pro různé návrhové hodnoty solárního pokrytí. Sezónní zásobník umožňuje výrazné zvýšení pokrytí v měsících první části otopného období.

Při návrhu nových solárních soustav pro CZT v sídlištních celcích je naprosto klíčové použít integrovaný přístup, který řeší energetiku uvažovaného sídelního celku komplexně. V první řadě je nutné maximálně snížit potřebu tepla budov pro vytápění na minimálně nízkoenergetický, lépe však pasivní standard s nízkoteplotními otopnými soustavami a udržet zejména potřebu tepla na přípravu teplé vody na nízké úrovni. Výrazným omezením celkové potřeby tepla se značně sníží požadavky na velikost soustavy a riziko neekonomického provozu v případě provedení úsporných opatření v budoucnosti.

V případě stávajících soustav CZT je nezbytné alespoň využít dostupných prostředků ke snížení teploty vratné vody, která výrazně ovlivňuje efektivitu provozu (účinnost kolektoru, akumuláční schopnost zásobníku) a ekonomiku vlastní solární soustavy. To se nabízí v souvislosti se snižováním energetické náročnosti budov a nastavením nových regulačních parametrů otopných soustav.

PŘÍPADOVÁ STUDIE

Pro bližší pochopení souvislosti mezi návrhovými a provozními parametry solární soustavy pro CZT byla vypracována studie [5] pro fiktivní sídliště rodinných domů ve třech různých kategoriích energetické náročnosti (pasivní domy, nízkoenergetické domy, běžný standard). Sídliště je tvořeno celkem 54 řadovými rodinnými domy rozmístěnými do šesti řad ve třech ulicích. Každý dům má podlahovou plochu 150 m², objem 390 m³ a stojí na pozemku o ploše 350 m². Hrubá plocha jižně orientované střechy každého domu je 53 m², celková využitelná plocha střech pro instalaci solárních kolektorů je cca 2900 m².

Průměrné návrhové parametry rodinných domů v uvažovaných kategoriích jsou uvedeny v tab. 1. V každé kategorii energetické náročnosti jsou uvažovány jiné teplotní parametry otopné soustavy, odlišné velikosti výměňkových stanic (různé výkony, teploty) a z toho vyplývající i odlišné dimenze rozvodů CZT. Příprava teplé vody byla uvažována pro všechny kategorie domů shodně. Pro jeden rodinný dům se 3 osobami byla uvažována ekvivalentní potřeba teplé vody (se zahrnutím tepelných ztrát) 150 l/den při ohřevu z teploty 10 °C na požadovanou teplotu 55 °C při definovaném odběrovém profilu během dne a během roku [5].

Pro vyhodnocení a analýzu provozního chování solární soustavy pro CZT byl vytvořen matematický model v simulačním prostředí TRNSYS. Pro kolektorové pole byly uvažovány ploché solární kolektory s parametry účinnosti: $\eta_0 = 0,75$, $a_1 = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $a_2 = 0,015 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$, $K_{50} = 0,93$. Sklon kolektorů je stejný jako sklon střech domů 45°. Kolektorové pole je provozováno v režimu s nízkým průtokem a je napojeno na centrální vodní zásobník tepla přes deskový výměňník s vysokou účinností sdílení tepla 85 %. V kolektorovém poli je uvažována nemrzoucí kapalina s teplotou tuhnutí -32 °C. Pro simulaci je zásobník uvažován nadzemní o výšce 10 m (ve všech variantách) s tepelnou izolací tloušťky 30 cm a tepelnou vodivostí 0,06 W/(m.K).

Zásobník je uvažován s ideálním teplotním vrstvením vodního objemu. Maximální teplota v zásobníku byla omezena na 85 °C. Rozvod CZT je od zásobníku oddělen deskovým výměňníkem (účinnost sdílení tepla 85 %) a napájí tři předávací stanice pro každou ulici sídliště. Výkony a průtoky předávacích stanic jsou stanoveny podle projekčních zvyklostí [6].

Rozvody kolektorového okruhu a rozvody vlastní distribuční soustavy jsou zjednodušeně řešeny pouze do určitého stupně detailu (páteřní rozvod), nicméně pro různé návrhové parametry (plocha kolektorů pro zvolené pokrytí, výkon výměňkových stanic pro různé úrovně energetické náročnosti domů) jsou uvažovány odpovídající světlosti rozvodů potrubí. Tepelná izolace předizolovaného bezkanálově uloženého potrubí (kolektorové pole, rozvod CZT) byla zvolena ve vyšším izolačním standardu. Dodatkový zdroj byl uvažován samostatně v každé výměňkové stanici, v rámci simulace sloužil pouze k poskytnutí informace o potřebné dodatkové energii a stanovení pokrytí potřeby tepla solární soustavou CZT.

Cílem studie bylo zjistit potřebné návrhové parametry solární soustavy pro definované pokrytí potřeby tepla soustavy CZT solárními zisky (25, 50, 75 a 100 %). Vzhledem k využití sezónní akumulace u soustav s vyšším solárním pokrytím bylo nutné výpočet provést pro několik roků následujících po sobě. Pro všechny případy bylo zvoleno 5 let, aby bylo dosaženo ustáleného provozního stavu. Výsledky pro srovnávací analýzu byly převzaty vždy z posledního 5. roku.

Tab. 1 Parametry rodinných domů sídelního celku v různém stupni energetické náročnosti

Energetická náročnost domů	Běžný standard	Nízkoenergetický standard	Pasivní standard
tepelná ztráta domu [W]	4000	2700	1400
měrná potřeba tepla na vytápění [kWh/m ²]	80	50	20
potřeba tepla na vytápění [kWh/rok]	12000	7500	3000
potřeba tepla na přípravu TV [kWh/rok]	2900	2900	2900
teplotní parametry otopné soustavy [°C/°C]	55/45	45/37,5	35/30

Návrhové parametry solární soustavy pro CZT, tj. objem solárního akumulčního zásobníku a plocha solárních kolektorů byly stanovovány iteračním postupem pro splnění tří podmínek:

- solární soustava dodává požadované množství tepla pro zajištění definovaného ročního pokrytí celkové potřeby tepla;
- solární zásobník tepla pracuje v ustáleném provozu, teploty v zásobníku na konci každého ročního cyklu jsou stejné (v zásobníku se trvale meziročně nesnižuje nebo nezvyšuje teplota);
- zásobník je optimálně využit, solární soustava nestagňuje a tím se nesnižují potenciálně dosažitelné zisky.

Tab. 2 Výsledky simulace solární soustavy pro sídliště s domy v běžném standardu

	Běžný standard			
	25	50	75	100
solární pokrytí [%]	25	50	75	100
plocha kolektorů [m ²]	460	1000	1620	4000
objem zásobníku [m ³]	1300	4500	8000	40000
měrné solární zisky [kWh/(m ² .rok)]	450	423	386	209
průměrná teplota zásobníku [°C]	37	43	50	64
podíl tepelných ztrát solární soustavy [%]	21	23	26	56

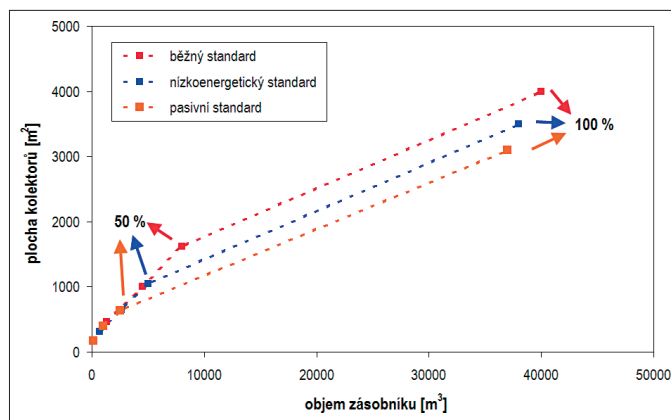
Tab. 3 Výsledky simulace solární soustavy pro sídliště s domy v nízkooenergetickém standardu

	Nízkoenergetický standard			
	25	50	75	100
solární pokrytí [%]	25	50	75	100
plocha kolektorů [m ²]	310	650	1050	3500
objem zásobníku [m ³]	700	2600	5000	38000
měrné solární zisky [kWh/(m ² .rok)]	486	453	420	169
průměrná teplota zásobníku [°C]	34	40	45	66
podíl tepelných ztrát solární soustavy [%]	16	20	23	63

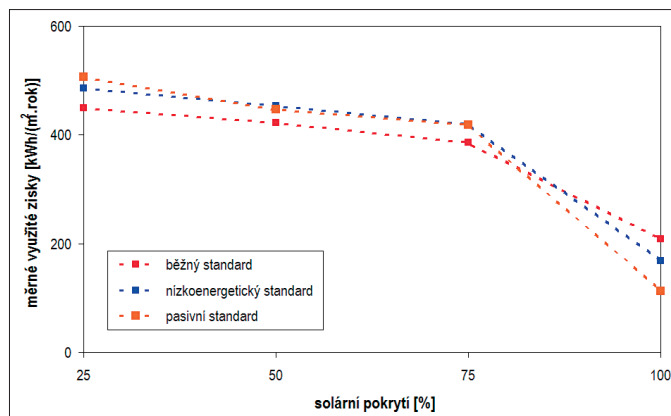
Tab. 4 Výsledky simulace solární soustavy pro sídliště s domy v pasivním standardu

	Pasivní standard			
	25	50	75	100
solární pokrytí [%]	25	50	75	100
plocha kolektorů [m ²]	175	400	635	3100
objem zásobníku [m ³]	110	1000	2500	37000
měrné solární zisky [kWh/(m ² .rok)]	507	447	418	113
průměrná teplota zásobníku [°C]	31	39	43	67
podíl tepelných ztrát solární soustavy [%]	14	19	24	75

Výsledky analýzy jsou uvedeny v tab. 2 až 4 a v grafech na obr. 3 až 5. Z výsledků je zcela zřejmá skutečnost, že snaha o dosažení vysokého pokrytí blížíícího se 100 % naráží na extrémní navýšení potřebné plochy solárních kolektorů a objemu solárního zásobníku. Důvodem je nutnost přípravy teplé vody čistě solárními zisky na definovanou teplotu 55 °C i v nejnepříznivějším období na jaře, kdy se v solárním zásobníku dosahuje nejnižších teplot v celém roce. Pro 100% solární pokrytí musí nej-



Obr. 3 Souvislost návrhových parametrů (objem zásobníku, plocha kolektorů) solární soustavy pro CZT



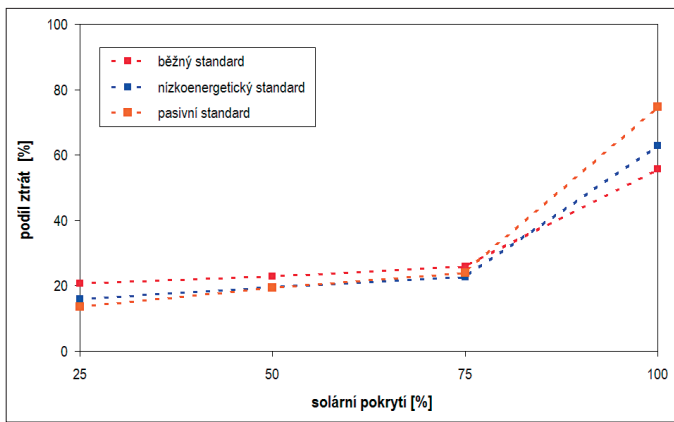
Obr. 4 Měrné zisky solární soustavy pro CZT v závislosti na solárním pokrytí

nižší teploty v zásobníku dosahovat hodnot nad 65 °C, aby byl zaručen požadovaný komfort přípravy a dodávky teplé vody. Solární zásobník tak celoročně pracuje pouze v malém rozmezí teplot (65 až 85 °C) a vykazuje velmi nízkou akumulční schopnost. To se odráží na potřebě velkých objemů solárního zásobníku. S vysokou provozní teplotou v zásobníku pak souvisí vysoký podíl tepelných ztrát, nízká roční provozní účinnost soustavy (10 až 20 % pro 100% pokrytí) a potřeba velkých ploch solárních kolektorů, přesahujících ve všech případech možnosti střech připojených domů. Návrhové parametry pro nižší solární pokrytí naopak umožňují vhodnou integraci solární soustavy do sídliště. Kromě menšího objemu zásobníku, který lze případně zabudovat pod terén v blízkosti či v centru zástavby, se jedná především o možnost umístění kolektorového pole na střechy domů.

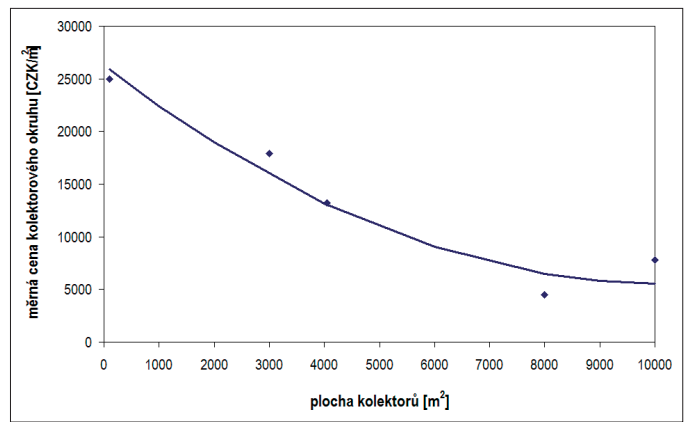
Z tabulky provozních parametrů lze také upozornit na poměrně zajímavý trend znázorněný také na obr. 4. Pro vysoké hodnoty solárního pokrytí potřeby tepla u pasivních domů klesají měrné zisky a tedy i účinnost soustavy pod hodnoty dosahované u domů v nízkooenergetickém či běžném standardu. Zatímco pro nižší solární pokrytí se v pasivních domech do určité míry projevuje vliv nižší teploty vratné otopné vody na celkové bilanci solární soustavy, s rostoucím solárním pokrytím je bilance více a více ovlivněna rostoucím podílem potřeby tepla na přípravu teplé vody s požadavkem na celoročně vysokou provozní teplotu a souvisejícími tepelnými ztrátami (viz obr. 5). To je příčinou, že měrné solární zisky u pasivních domů dosahují nižších hodnot než u variant s vyšší energetickou náročností.

EKONOMICKÉ OTÁZKY

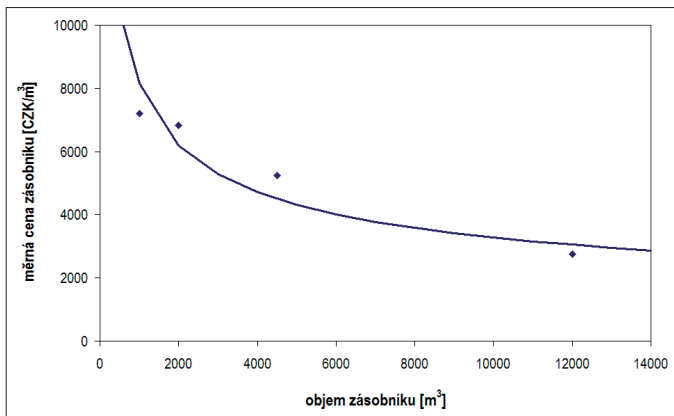
Realizované instalace v zahraničí umožňují získat představu o ekonomických parametrech solárních soustav pro CZT. V grafech na obr. 6 a 7 jsou



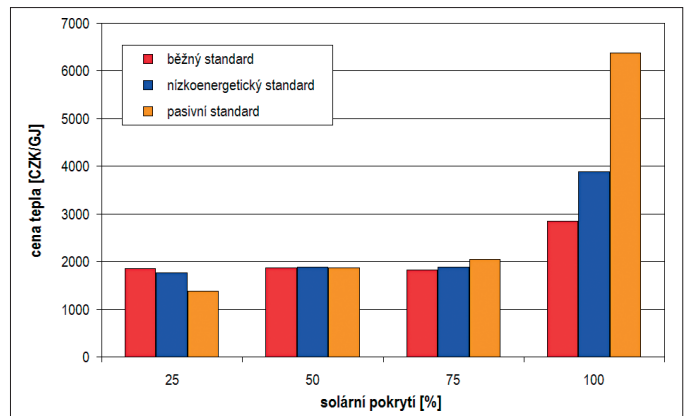
Obr. 5 Podíl tepelných ztrát solární soustavy pro CZT



Obr. 7 Měrná cena okruhů solárních kolektorů



Obr. 6 Měrná cena velkoobjemových solárních zásobníků a související technologie



Obr. 8 Cena tepla pro jednotlivé varianty

uvedeny měrné investiční náklady na zásobníky (včetně zabudování do terénu, izolací, apod.) a kolektorové okruhy (včetně konstrukcí, rozvodů, předávacích stanic, apod.) získané z dostupných informací o vybraných solárních soustavách pro CZT realizovaných v letech 2000 až 2010 [7] s konfigurací (ploché kolektory, vodní zásobník) obdobnou analyzovanému příkladu.

S využitím uvedených závislostí, kdy s rostoucí velikostí zařízení (objem zásobníku, plocha kolektorů) klesá měrný investiční náklad, byly odvozeny investiční náklady jednotlivých variant uvedených v tab. 2 až 4 pro jednotlivá solární pokrytí a druh energetické náročnosti rodinných domů v sídlišti. Obecně platí, že solární soustava se 100% pokrytím je i přes příznivé měrné náklady na komponenty celkově investičně výrazně náročnější než soustava s nízkým pokrytím, což vyplývá zejména z požadavku na extrémní plochy kolektorů a objemy zásobníku pro zajištění krytí definované potřeby tepla připojených domů.

Pro získání náhledu na celkovou ekonomiku uvažovaných variant byla stanovena prostá výrobní cena tepla, uvažující dobu odpisu (návratnosti) 15 let, za kterou se investice musí zaplatit. Související provozní náklady, reinvestice v průběhu uvažované doby, růst cen komponent, apod. nebyly ve výpočtu uvažovány a budou předmětem dalších analýz. Výsledky ekonomického zhodnocení jsou uvedeny v grafu na obr. 8.

Výsledky ekonomického porovnání ukazují, že cena „solárního tepla“ ze soustavy pro CZT s pokrytím do 75 % není výrazně závislá na standardu energetické náročnosti připojených budov a pohybuje se mezi 1800 a 2000 CZK/GJ. Pouze v případě pasivních domů s 25% pokrytím cena solárního tepla klesá až k hodnotám 1400 CZK/GJ. Naopak v případě 100% solárního pokrytí potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody se cena solárního tepla dramaticky zvyšuje, u pasivního standardu dokonce až na hodnoty vyšší než 6000 CZK/GJ.

ZÁVĚR

V zemích aktivně hledajících cesty ke zvýšení podílu OZE na celkové produkci energie je využití solárního tepla v CZT jedním ze zásadních nástrojů k dosažení cílů snižování spotřeby fosilních paliv pro budovy v příštích desetiletích. Využití sluneční energie v soustavách CZT má velký potenciál úspor a nahrazení tradičních fosilních paliv v podobě doplňkového zdroje tepla jako „spořiče paliva“. To vyplývá i z uvedené simulační energetické analýzy s navazujícími ekonomickými výpočty. Snahy o docílení 100% pokrytí potřeby tepla na přípravu teplé vody a vytápění v soustavách CZT sluneční energií naráží na ekonomické problémy s dramatickým nárůstem ceny tepla. Rozvoj solárních soustav v rámci CZT se tak v zahraničí (Dánsko, Rakousko, Německo) orientuje především na projekty s relativně nízkým pokrytím nepřekračujícím 50 %, za účelem udržení výhodných ekonomických parametrů.

Kontakt na autory: tomas.matuska@fs.cvut.cz, jiri.hubka@email.cz, david.borovsky@cityplan.cz

Použité zdroje:

- [1] ERÚ: Vyhodnocení cen tepelné energie k 1. lednu 2011, listopad 2011
- [2] Zelenka, R., Němec, J., Slunce roztopí radiátory, Časopis Ekonom č. 9 ze 3. 3. 2011
- [3] Tramba, D., Zajistí slunce levnější vytápění? Lidové noviny z 5. 8. 2011
- [4] Borovský, D., Matuška, T., Možnosti využití sluneční energie v systémech CZT, Sborník konference Vytápění Třeboň 2011, str. 135–142. Společnost pro techniku prostředí 2011
- [5] Hubka, J., Solární soustava pro CZT. Diplomová práce, ČVUT v Praze, 2011
- [6] Brož, K., Zásobování teplem. Vydavatelství ČVUT, Praha 2001. ISBN 80–01–01587–4
- [7] Dalenback, J. O., Succes Factors in Solar District Heating – Micro Analyses Report, SDH takeoff project, 2010. ■