

Petr KRAMOLIŠ¹⁾
doc. Ing. Mojmír VRTEK, Ph.D.²⁾

¹⁾ Projekce OZE, Ostrava
²⁾ VŠB–TU Ostrava, Fakulta
strojní, Katedra energetiky

Recenzent
doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Specifika solární soustavy s vodou

Specifics of Solar Systems with Water

Článek se zabývá analýzou možného celoročního provozování velkoplošných solárních soustav s vodou jako teplotonosnou kapalinou. Aby nedocházelo v dobách možného zamrzání vody k tvorbě ledu, je nutné vodu v soustavě přehřívát. Příspěvek ukazuje, jaké lze očekávat množství potřebné energie a jaké jsou faktory, které mohou mít na tuto potřebu vliv.

Klíčová slova: solární soustava, teplotonosná kapalina, tepelná ztráta

The paper analyses the possible year-round operation of a large-area solar systems using water as a heat transfer fluid. In order to avoid the ice formation, it is necessary to heat the water in the system during the periods with possible water freezing. The paper shows what energy demand can be expected and what factors can influence the demand.

Keywords: solar system, heat transfer fluid, heat loss

ÚVOD

Aby bylo možné v našich klimatických podmínkách celoročně provozovat solární soustavy s vodou jako teplotonosnou kapalinou, je nutno zabezpečit, aby ve venkovních částech primárního okruhu nedocházelo k jejímu zamrznutí. Jedním z možných řešení je použití systému Drain Back, kdy je voda vypouštěna v době stagnace soustavy z venkovních částí primárního okruhu. Tento otevřený beztlaký systém má však oproti uzavřeným tlakovým systémům určité nevýhody, jako je např. styk vody s atmosférickým vzduchem, nutnost volby kolektorů a zapojení s vynikající vyprazdňovací schopností, navýšení čerpací práce při napouštění primárního okruhu. Z těchto důvodů není u nás u velkoplošných soustav používán. Při použití tlakového uzavřeného systému a požadavku použití vody jako teplotonosné kapaliny je nutné v době nebezpečí zamrznutí vodu přehřívát.

Použití vody jako teplotonosné kapaliny oproti použití nemrznoucí směsi přináší některé výhody, mezi které patří [1], [2]:

- ❑ snížení nákladů na teplotonosnou kapalinu,
- ❑ snížení čerpací práce díky větší tepelné kapacitě vody a nižší viskozitě,
- ❑ nehrozí degradace teplotonosné kapaliny při vysokoteplotní stagnaci,
- ❑ není potřeba výměník tepla na primárním okruhu, přičemž se snižuje střední teplota v kolektorech o 4 až 8 K,
- ❑ vzhledem k vyššímu výkonu kolektorů je možné zmenšit plochu kolektorů (zvýšení účinnosti vlivem nižší střední teploty kolektorů),
- ❑ lze zmenšit objem solárního zásobníku vzhledem k možnosti využít vyšší teplotu vody z kolektorů při stejné účinnosti,
- ❑ v primárním okruhu odpadá jedno čerpadlo, oproti běžné konfiguraci „čerpadlo primárního okruhu – externí výměník – čerpadlo okruhu akumulace vody“.

Pro ekonomii provozu v období s nebezpečím tvorby ledu jsou podstatné tepelné ztráty kolektorů a tepelné ztráty potrubních rozvodů primárního okruhu nacházejícího se ve venkovním prostředí v době podnulových teplot při stagnaci soustavy. Reálná potřeba tepla může být stanovena pouze při přesnějším posouzení a hlubší analýze fyzikálních faktorů ovlivňujících tepelné ztráty. Tyto faktory jsou v podstatě stejné jako při stanovování solárních zisků a patří sem jednak klimatické podmínky – teplota venkovního vzduchu, rychlost větru, sluneční ozáření, jednak projekční faktory, ke kterým patří volba typu kolektorů, velikost kolektorového pole, sklon kolektorů a nastavení regulačních teplot.

VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY A METODY ŘEŠENÍ

Definice referenční soustavy a provozních parametrů

Pro analýzu byla vybrána soustava s trubicovými vakuovými koncentračními (CPC) kolektory s účinnostními parametry vztahenými k ploše apertury $\eta_0 = 0,764$; $a_1 = 1,020 \text{ W/(m}^2\text{K)}$; $a_2 = 0,0053 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$. Tyto kvalitativní vakuové kolektory byly voleny s ohledem na minimalizaci tepelných ztrát. Použití plochých kolektorů, a to i ve vakuovém provedení, se při prvotních analýzách ukázalo jako prakticky nereálné [1]. Orientace kolektorů je směrem k jihu se sklonem 45° .

Jako základní srovnávací velikost soustavy byla zvolena plocha apertury 100 m^2 . Soustava je typu Low Flow s měrným průtokem $18 \text{ dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Venkovní potrubní rozvody sestávají z měděných trubek dimenzí od $22/1 \text{ mm}$ do $54/1,5 \text{ mm}$. Celková délka trubek byla u referenční soustavy 134 m . Tloušťky izolací byly zvoleny tak, aby mírně překračovaly hodnoty uváděné ve vyhlášce č. 193/2007 Sb. Jednalo se o běžná izolační pouzdra z minerální vlny.

Výchozí zeměpisnou polohou je Ostrava. Použité klimatické parametry referenčního roku byly namodelovány v SW METEONORM s četností 1 minuta. Hodnocené období je od 1. 10. do 30. 4. Část z tohoto období, kdy by mohlo docházet k zamrzání soustavy během stagnace (stav bez průtoku kapaliny okruhem solárních kolektorů), je označována dále v textu jako „kritická doba“.

Kromě klimatických podmínek jsou dalšími rozhodujícími parametry, které mají na konečnou potřebu energie během kritické doby vliv, mezni teplota venkovního vzduchu, pod kterou se bude systém zabezpečení spouštět, a výstupní teplota vody vystupující z venkovní části soustavy do nezámrzných prostorů (dále jen „výstupní teplota vody“). Na základě této úvahy byly specifikovány a analyzovány provozní režimy pro různé kombinace teplot označované dále ve formátu „mezni teplota venkovního vzduchu / teplota výstupní vody“. Za referenční režim byla vybrána kombinace teplot $1/3 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. přehřívání bude probíhat při teplotě venkovního vzduchu $1 \text{ }^\circ\text{C}$ a nižší a množství dodávaného tepla se bude regulovat tak, aby výstupní teplota vody odtékající z venkovní části soustavy byla $3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Metodika výpočtu

Potřebné množství energie pro zajištění přehřevu k dosažení nezámrzného stavu v kritické době je možno rozdělit na potřebu tepla venkovních částí soustavy a na potřebu elektřiny nutné pro pohon oběhového čerpadla primárního okruhu.

Potřeba tepla pro přehřívání vody ve venkovní části soustavy byla dále rozdělena na potřebu tepla pro kolektory a potřebu tepla pro potrubí.

Při určení tepelných ztrát kolektoru se vycházelo z rovnice pro stanovení měrného tepelného zisku kolektoru

$$q = \eta_0 G - a_1 (t_m - t_e) - a_2 (t_m - t_e)^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

kde je:

- η_0 optická účinnost kolektoru [-],
- a_1 lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,
- a_2 kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)]$,
- G sluneční ozáření $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- t_m střední teplota vody v kolektoru $[\text{°C}]$,
- t_e teplota venkovního vzduchu $[\text{°C}]$.

A dále z její modifikace pro stagnační stav, tedy pro $q = 0 \text{ W/m}^2$:

$$0 = \eta_0 G - a_1 (t_m - t_e) - a_2 (t_m - t_e)^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2)$$

a pro stav při nulovém oslunění, tedy pro $G = 0 \text{ W/m}^2$:

$$q = -a_1 (t_m - t_e) - a_2 (t_m - t_e)^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Pro výpočet tepelných ztrát potrubí byla použita běžná metodika výpočtu součinitele prostupu tepla pro složenou válcovou stěnu.

Filozofie výpočtu vycházela ze sestavení fyzikálního modelu tepelných ztrát venkovní části soustavy při uvažované konfiguraci zapojení „první polovina potrubního rozvodu – kolektorové pole – druhá polovina potrubního rozvodu“ v kritické době. Potřebná teplota vstupní vody byla zpětně iteračně vypočítávána na základě požadované výstupní teploty.

Stavy, ke kterým může docházet v kritické době, je možné popsat jako:

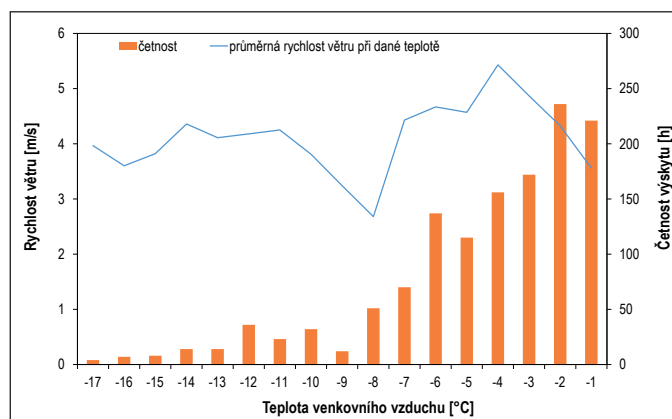
- ☐ stav během dne, kdy jsou kolektory schopny zabezpečit požadovanou teplotu na výstupu, teplo se nemusí dodávat, ale je potřeba jen čerpací práce na cirkulaci, a tedy distribuci tepla do potrubního rozvodu.
- ☐ stav během dne, kdy kolektory nejsou schopny zabezpečit požadovanou teplotu na výstupu a dodají pouze část potřebného tepla, cirkulující vodu je nutné přehřívát,
- ☐ stav během noci, kdy již není žádné sluneční záření, a potom je nutno soustavu plně ohřívát, aby bylo na výstupu dosaženo požadované teploty.

Vliv větru na tepelnou bilanci

Vzhledem k tomu, že rychlost větru má vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu kolektorů i trubek, byly pro hodnocené období analyzovány rychlosti větru vyskytující se v kritické době. Byly vytvořeny intervaly teplot venkovního vzduchu v dělení po 1 K. Pro každý teplotní interval byla stanovena průměrná rychlost větru a četnost výskytu větru v hodinách vyjadřující počet hodin, kdy byla rychlost větru větší než nula. Průběhy jsou znázorněny na obr. 1.

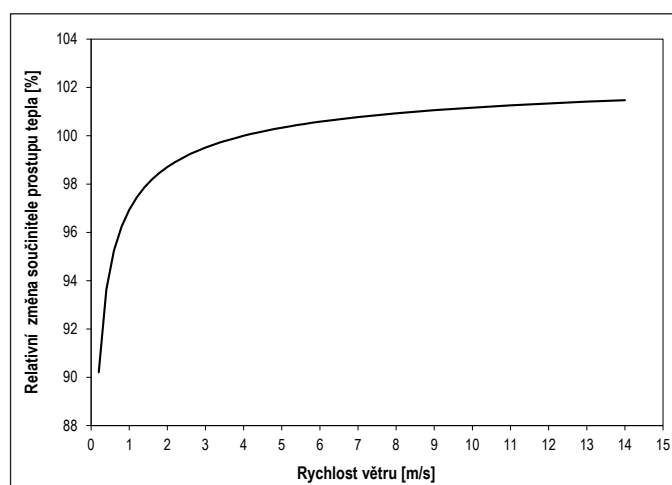
Zatímco se průměrná rychlost pohybuje v rozmezí cca od 3 do 5 m/s bez výrazné závislosti na teplotě venkovního vzduchu, četnost výskytu větru s klesající teplotou výrazně klesá.

V následné analýze bylo počítáno s rychlostí větru 4 m/s. Součinitel prostupu tepla pro izolované trubky v závislosti na zvyšující se rychlosti větru sice roste, avšak hlavní nárůst je v oblasti do cca 2 až 3 m/s, poté je již růst pozvolný (viz obr. 2). V grafu je naznačen průběh relativní změny hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na rychlosti vět-



Obr. 1 Hodinová průměrná rychlost větru a její četnost v hodinách při teplotách nižších než 0 °C

Fig. 1 Hourly average wind speed and its frequency in hours at temperatures below 0 °C



Obr. 2 Průběh relativní změny hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na rychlosti větru (100 % ~ 4 m/s)

Fig. 2 Relative change in the heat transfer coefficient in relation to the wind speed (100 % ~ 4 m/s)

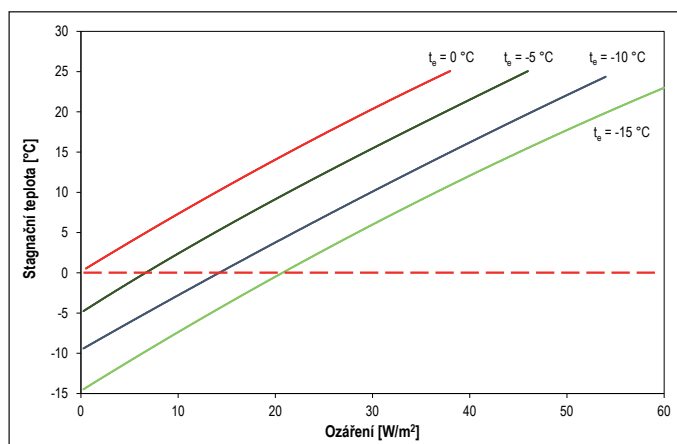
ru, přičemž za vztážnou hodnotu byla převzata hodnota součinitele pro rychlost 4 m/s.

Tato rychlost spadá do intervalu, jenž odpovídá požadavkům při měření tepelných parametrů kolektorů na zkušebně, kdy musí být rychlost proudění vzduchu $3 \pm 1 \text{ m/s}$, tedy v intervalu, za kterým se již tepelná ztráta vlivem zvyšující se rychlosti větru výrazně nemění.

Stagnační teploty v zimním období

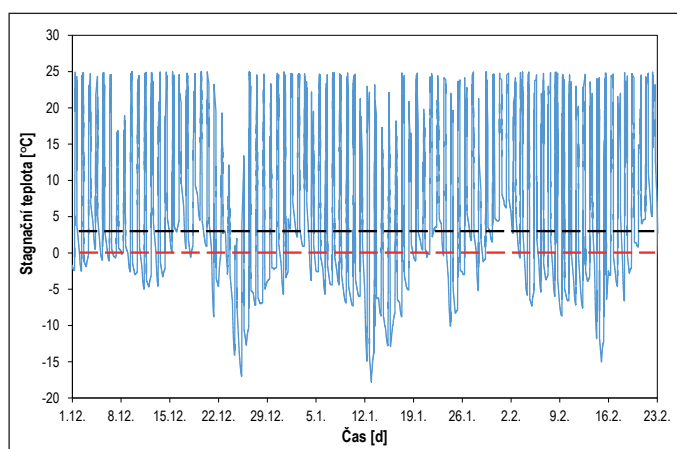
Během stagnačních stavů i při nízkém ozáření dochází ke zvyšování teploty kolektoru oproti teplotě venkovního vzduchu. Tím se snižuje požadavek na doplňkovou energii nutnou pro udržení nadnulových teplot v primární části soustavy v kritické době. Jelikož největší část tepelných ztrát připadá na kolektory, jsou i stagnační teploty $+3 \text{ °C}$ a mírně vyšší znatelným přínosem. Jedná se o teploty, které nemohou být využity pro ohřev vody či přitápění, nicméně nadnulová stagnační teplota udržuje soustavu mimo nebezpečí zamrznutí a nevyžaduje dodávku tepla, maximálně může spotřebovávat čerpací práci pro cirkulaci za účelem rozvedení ohřáté vody z kolektorů do potrubí ve venkovní části soustavy.

Závislost stagnačních teplot vybraného kolektoru na slunečním ozáření pro různé hodnoty teploty venkovního vzduchu je patrná na obr. 3. Průběhy ukazují, že i velmi nízké ozáření je schopno udržovat sou-



Obr. 3 Detail stagnačních teplot kolektoru v závislosti na ozáření od 0 do 60 W/m² pro různé teploty venkovního vzduchu

Fig. 3 Detail of collector stagnation temperatures depending on irradiance from 0 to 60 W/m² for various outdoor air temperatures



Obr. 4 Průběh stagnačních teplot nižších než 25 °C v nejméně příznivém období

Fig. 4 Time course of stagnation temperatures below 25 °C in the least favourable period

stavu v kritické době v nadnulových teplotách. Ukázka průběhu stagnačních teplot nižších než 25 °C během vybrané části hodnoceného období je znázorněna na obr. 4. Vodorovné čáry vyznačují teplotu 0 °C a teplotu +3 °C, pod kterou započne přehřívání při referenčním režimu 1/3 °C.

VYHODNOCENÍ A DISKUZE

Vliv volby provozního režimu

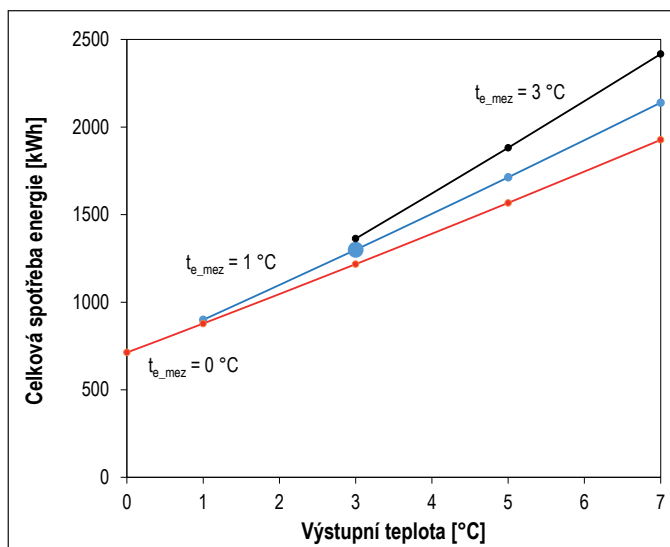
Pro referenční definovanou solární soustavu a hodnocené období byly analyzovány vybrané režimy vycházející z kombinace mezních teplot venkovního vzduchu 3 °C, 1 °C a 0 °C a výstupních teplot vody v rozmezí od 0 do 7 °C. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1. Doba provozu představuje celkový čas, po který bude nutné soustavu ohřívat. Dále jsou zde uvedeny tepelné ztráty a množství čerpací práce přepočtené na potřebu elektřiny a jejich součet. Poslední sloupec představuje poměrné srovnání celkových potřeb energie jednotlivých režimů vůči referenčnímu režimu 1/3 °C. Parametry odpovídající referenční soustavě a jejím provozním parametrům jsou v tabulkách vyznačeny tučným písmem.

Výsledky výpočtu pro režimy vycházející z mezní teploty venkovního vzduchu 0 °C nemají praktický význam a jsou zde uvedeny jako teoretické hraniční hodnoty s absolutním minimem pro režim 0/0 °C, což je

Tab. 1 Výsledky analýzy pro různé provozní režimy

Tab. 1 Results of analysis for various operating modes

mezní teploty venkovního vzduchu	výstupní teplota	doba provozu	tepelné ztráty	čerpací práce	energie celkem	poměrné srovnání
[°C]	[°C]	[h]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
1	7	1498	2102	37,5	2139	165
1	5	1480	1676	37,0	1713	132
1	3	1457	1263	36,4	1300	100
1	1	1429	864	35,7	900	69
0	7	1257	1895	31,4	1927	148
0	5	1243	1536	31,1	1567	121
0	3	1226	1187	30,7	1217	94
0	1	1206	848	30,2	878	68
0	0	1194	683	29,8	713	55
3	7	1902	2370	47,6	2417	186
3	5	1876	1835	46,9	1882	145
3	3	1842	1317	46,0	1363	105



Obr. 5 Průběhy celkové potřeby energie pro jednotlivé mezní teploty venkovního vzduchu v závislosti na výstupní teplotě

Fig. 5 Course of the total energy demand for individual outside air temperature limits, in dependence on the output temperature

patrné z průběhů na obr. 5, znázorňujícím průběhy celkové potřeby energie pro jednotlivé mezní teploty venkovního vzduchu ($t_{e,mez}$) v závislosti na výstupní teplotě.

Podíl tepelných ztrát potrubního vedení na celkové tepelné ztrátě byl pro všechny režimy velmi podobný a pohyboval se v rozmezí od 19,8 do 20,1 %. Vyjde-li se z předpokladu, že se celoroční měrný zisk ze solární soustavy bude pohybovat v rozmezí 500 až 600 kWh/m² apertury, bude spotřeba celkové energie pro referenční režim 1/3 °C v rozmezí 2,2 až 2,6 % celoročního zisku.

Vliv sklonu kolektorů

V této části jsou výsledky pro referenční režim 1/3 °C a referenční sklon 45° srovnány s výsledky výpočtů pro sklony 30° a 60°. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2 a je možno konstatovat, že rozdíly jsou zanedbatelné. Tento výsledek lze očekávat, neboť přihřívání bude probíhat především v noci, případně při zatažené obloze, kdy lze počítat s využitím pouze difuzního, resp. odraženého slunečního záření, na jejichž sumární hodnoty nemá sklon kolektorů v dané době zásadní vliv.

Tab. 2 Výsledky analýzy pro různé sklony kolektorů

Tab. 2 Results of analysis for various inclinations of the collectors

sklon	doba provozu	tepelné ztráty	čerpací práce	energie celkem	poměrné srovnání
[°]	[h]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
30	1458	1268	36,4	1304	100,4
45	1457	1263	36,4	1300	100,0
60	1472	1276	36,8	1312	101,0

Vliv velikosti soustavy

Pro porovnání výsledků referenční soustavy o ploše apertury 100 m² byly nadefinovány soustavy o velikosti 50, 250 a 400 m², pro které byly stanoveny délky a dimenze venkovních potrubí. Z důvodu, že množství čerpací práce pro rozdílně velké soustavy závisí na mnoha dalších faktorech (vzdálenostech, výšce budovy, zapojení aj.), je srovnání těchto soustav provedeno pouze pro tepelné ztráty. S rostoucí plochou apertury klesá zpravidla nejen měrná délka potrubí vztážená na tuto plochu, ale i měrná velikost povrchu potrubního vedení, kterým se ztrácí teplo. Měrné tepelné ztráty se tedy budou snižovat, což dokazují výsledky v tab. 3.

Vliv geografické polohy a klimatických extrémů

Výchozí polohou pro referenční soustavu je Ostrava. V rámci analýz byly provedeny výpočty pro režim 1/3 °C i pro jižněji situované lokality, a to

Tab. 3 Výsledky analýzy pro soustavy různých velikostí

Tab. 3 Results of analysis for systems with various sizes

plocha apertury	doba provozu	tepelné ztráty	měrné tepelné ztráty	poměrné srovnání měrných tepelných ztrát
[m ²]	[h]	[kWh]	[kWh/m ²]	[%]
50	1462	683	13,7	108,2
100	1457	1263	12,6	100,0
250	1453	2929	11,7	92,8
400	1451	4548	11,4	90,0

Tab. 4 Výsledky analýzy pro různé lokality a 10letý extrém

Tab. 4 Results of analysis for various locations and 10-year extreme

lokality	doba provozu	tepelné ztráty	čerpací práce	energie celkem	poměrné srovnání
	[h]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%]
Ostrava	1457	1263	36,4	1300	100,0
Kuchařovice	1419	1199	35,5	1234	95,0
Budapešť	1297	1066	32,4	1098	84,5
Ostrava – extrém	1471	1367	36,8	1403	108,0

pro Kuchařovice (okres Znojmo) a Budapešť. Kuchařovice byly zvoleny z důvodu, že zdejší meteorologická stanice, stejně jako v Ostravě, je součástí Národní radiační sítě, a tak lze namodelované klimatické parametry referenčního roku ze SW METEONORM považovat za velmi věrohodné a nezátžené interpolací. Tento SW umožňuje i simulaci desetiletého extrémního roku (horké léto, studená zima), proto byl pro porovnání proveden výpočet i pro tento extrémní rok. Výsledky jsou uvedeny v tab. 4 a ukazují očekávané snížení potřeby energie s posunem lokality k jihu (pro severní polokouli) a navýšení potřeby energie v extrémním klimatickém roce.

ZÁVĚR

Solární soustava s vodou jako teplonosnou látkou je přínosem z hlediska úspor investičních nákladů, provozních nákladů i bezpečnosti provozu v době vysokoteplotní stagnace. Voda snáší dosažitelná přehřátí bez změny fyzikálních vlastností a bez omezení životnosti. U větších soustav jsou to výrazná pozitiva. Nasazení solárních soustav s vodou bude výhodné především v oblastech, kde doba, kdy by mohlo docházet k zamrzání soustavy během stagnace, bude krátká a zároveň klimatické podmínky v době možné vysokoteplotní stagnace budou nepříznivé.

Na druhé straně je spolehlivý provoz solární soustavy s vodou podmíněn použitím kvalitní regulace, zajištěním kvalitního hydraulického vyvážení soustavy bez slepých ramen, vhodnou izolací venkovních částí rozvodu a v neposlední řadě i nouzovým zabezpečením při výpadku proudu.

Kontakt na autory: kramolis.petr@seznam.cz; mojmir.vrtek@vsb.cz

Použité zdroje:

- KRAMOLÍŠ, P., VRTEK, M. Solární soustava bez nemrznoucí směsi. *Topenářství instalace*. 2014, roč. 48, č. 8, s. 28–38. ISSN 1211-0906.
- MEISSNER, R., ABRECHT, S. The Key For Optimizing Large-Scale Solar-Thermal Systems is Combining Parabolic Mirrors, Evacuated Tube Collectors and H₂O [online]. [cit. 1. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.tepm.com/Key-technology.pdf>

Fototermická zařízení pro klimatizaci místností

Cílem výzkumného projektu „STARK – Solarthermische Anlage zur Raumklimatisierung“ je klimatizační systém pro vývoj regenerativního a simultánního zdroje tepla a chladu. Základem je propojení plastového slunečního kolektoru s termochemickým adsorpčním zařízením pro výrobu chladu. Pro chlazení pomocí solární energie se užívá termochemického adsorpčního zařízení s okruhem zeolit-voda, poháněného horkým vzduchem. Předností je užití špičkového solárního zařízení s horkým vzduchem ze slunečního kolektoru k výrobě chladu a v přechodném období k vytápění nebo ohřevu teplé vody. Adsorpční chladicí zařízení má lepší stupeň účinnosti (poměr chladicího výkonu ke zdroji tepla min. 0,3) než čistě elektricky poháněné chlazení s min. tvorbou emisí CO₂. Systém lze používat i v průmyslovém měřítku. V ústavu Fraunhofer-Institut ICT byla postavena jednotka o ploše kolektoru 100 m² dodávající teplo pro pohon adsorpční jednotky. Na projektu spolupracují mj. Nordluft GmbH a AL-KO Therm GmbH.

Pramen: CCI 03/2018, s. 4

(AB)

Kruhová odkuřovací klapka Lindab WXHU

Hodí se pro vertikální i horizontální instalace v odkuřovacích zařízeních a je koncipována pro systémy odtahů tepla a kouře (v jednotlivých oddílech). Je klasifikována podle EN 13501-4 s maximální výdrží 2 hodiny při 600 °C pro kouř a úniky třídy S při 1 500 Pa podtlaku. Těleso je provedeno z pozinkované oceli a má bezpečné připojení Lindab Safe, odpovídající třídě těsnosti C podle EN 1751. Nová verze WXHU je k dispozici ve verzích s automatickou a manuální aktivací podle požadovaného spouštění.

Pramen: CCI 02/2018, s. 25

(AB)