

## KOMBINACE TEPELNÝCH ČERPADEL A FOTOVOLTAICKO – TEPELNÝCH KOLEKTORŮ

Tomáš Matuška, Bořivoj Šourek

### ANOTACE

V příspěvku je představena energetická analýza kombinace využití sluneční energie v soustavě s tepelným čerpadlem při použití inovativních hybridních fotovoltaicko-tepelných (FVT) solárních kolektorů. Varianty kombinované solární soustavy s tepelným čerpadlem a FVT kolektory jsou porovnány se současnou úrovní obdobných soustav pouze s tepelnými kolektory, které jsou dostupné na evropském trhu. Zejména je sledováno využití elektřiny z fotovoltaické části kolektorů pro snížení spotřeby elektrické energie celé soustavy. Výsledky ukazují, že potenciál ke snížení spotřeby elektrické energie solární soustavou s tepelným čerpadlem při využití solárních FVT kolektorů má pouze technologie založená na nízkoemisivním FV absorberu.

### ÚVOD

Využití tepelných čerpadel s elektrickým pohonem je obecně považováno za opatření pro snížení spotřeby energie v budovách s významnou výhodou snadné integrace do „chytrých sítí“ v budoucnosti. Na druhé straně, současná produkce elektrické energie v konvenčních zdrojích je náročná na spotřebu primární energie a efektivní využití tepelných čerpadel předpokládá provoz s vysokým sezónním topným faktorem *SPF* (seasonal performance factor). Přestože evropská směrnice o podpoře využití obnovitelných zdrojů energie nastavila minimální hodnotu *SPF* na úrovni 2.9, pro snížení celkové produkce emisí a primární energie při srovnání s přímým spalováním fosilních paliv musí být dosaženo hodnot *SPF* vyšších než 4.0.

Zatímco tepelná čerpadla v oblasti nízko-teplotního vytápění dosahují hodnot *SPF* nad 4.0, dosáhnout *SPF* pro samotnou přípravu teplé vody v úrovni nad 3.0 je možné pouze při snížených teplotách připravované teplé vody pod 45 °C. Kombinace tepelných čerpadel se solárními tepelnými soustavami je jedním z přístupů, jak hodnoty *SPF* zvýšit eliminací přípravy teplé vody tepelným čerpadlem především v letním období.

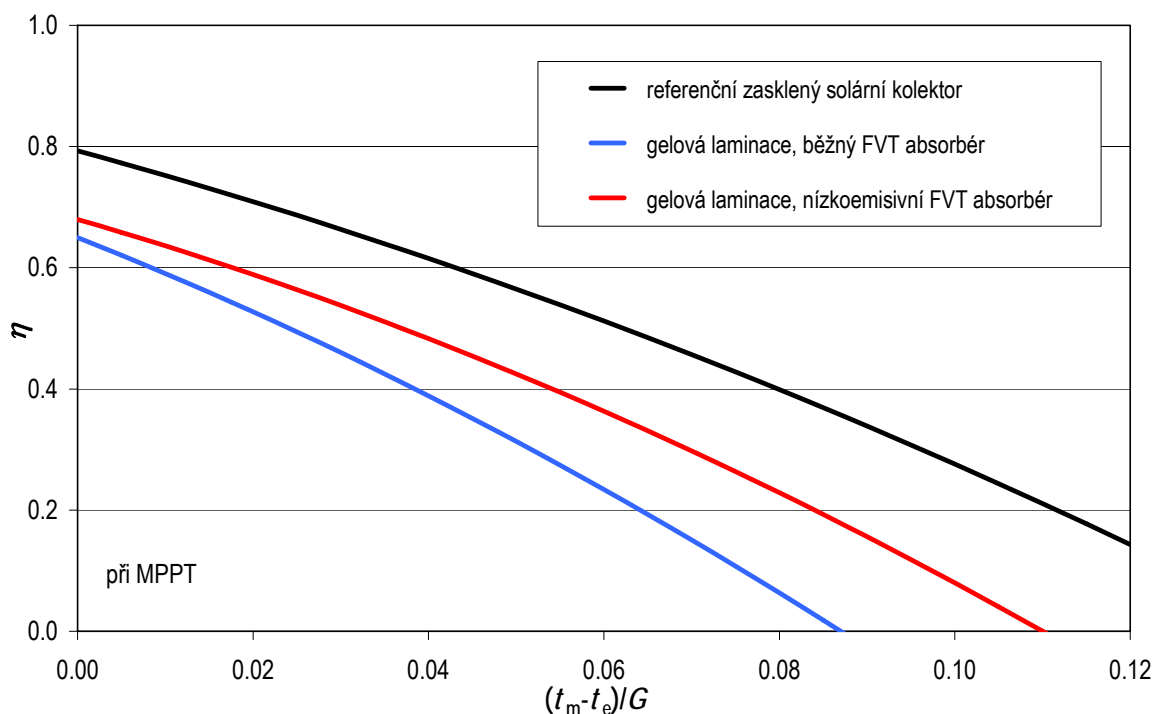
Dnešní solární soustavy kombinované s tepelnými čerpadly využívají v naprosté většině instalací paralelního přístupu, tzn. solární kolektory a tepelné čerpadlo dodávají teplo do společných zásobníků na odběrové straně. Tepelné čerpadlo je v podstatě dodatkovým (záložním) zdrojem solární tepelné soustavy. Druhým možným přístupem je kombinovat tepelné čerpadlo s fotovoltaickým systémem. Aktuální potřeba elektřiny tepelné soustavy s tepelným čerpadlem z externí sítě je snižována přímým využitím elektřiny produkované FV systémem.

Hybridní solární fotovoltaicko-tepelné (FVT) kolektory představují další stupeň. Kombinace fotovoltaického a tepelného solárního kolektoru v jediném zařízení má potenciál zvýšit produkci energie (elektřiny a tepla) z definované plochy pláště budovy a zajistit vyšší úroveň soběstačnosti budov v místních sítích. Využití FVT kolektorů v pokročilých solárních soustavách s tepelným čerpadlem je v příspěvku analyzován z hlediska dosažitelných energetických úspor (úspor elektřiny, zvýšení *SPF*).

## HYBRIDNÍ FVT KOLEKTORY

Hybridní solární fotovoltaicko-tepelné kolektory poskytují současně teplo a elektřinu, nicméně produkce tepla je ze stejné plochy několikanásobně vyšší než elektřiny. Díky společné výrobě solárního tepla a elektřiny je celkový výkon na jednotku plochy FVT kolektoru vyšší než při oddělené výrobě běžným FV panelem a tepelným kolektorem.

Solární kapalinové FVT kolektory nabízejí větší potenciál aplikací než vzduchové díky lepší využitelnosti tepla (tepelná čerpadla, teplá voda, bazény, vytápění, atd.). Trh se solárními hybridními FVT kolektory je v současné době omezen pouze na nezasklené kolektory kvůli problémům s běžně používanou EVA laminací FV modulů. Ta se při vysokých teplotách nad 80 °C rozkládá na acetáty (delaminace, zabarvení, degradace kontaktů koroze) [1] a dlouhodobě není schopna odolávat teplotám 140 až 160 °C vyskytujícím se při stagnaci v zasklených kolektorech. Použití nezasklených FVT kolektorů s tepelnou účinností, výrazně závislou na okolních podmínkách (vítr, teplota), je navíc omezeno pouze na nízkoteplotní aplikace (předehřev vody, primární okruhy tepelných čerpadel).



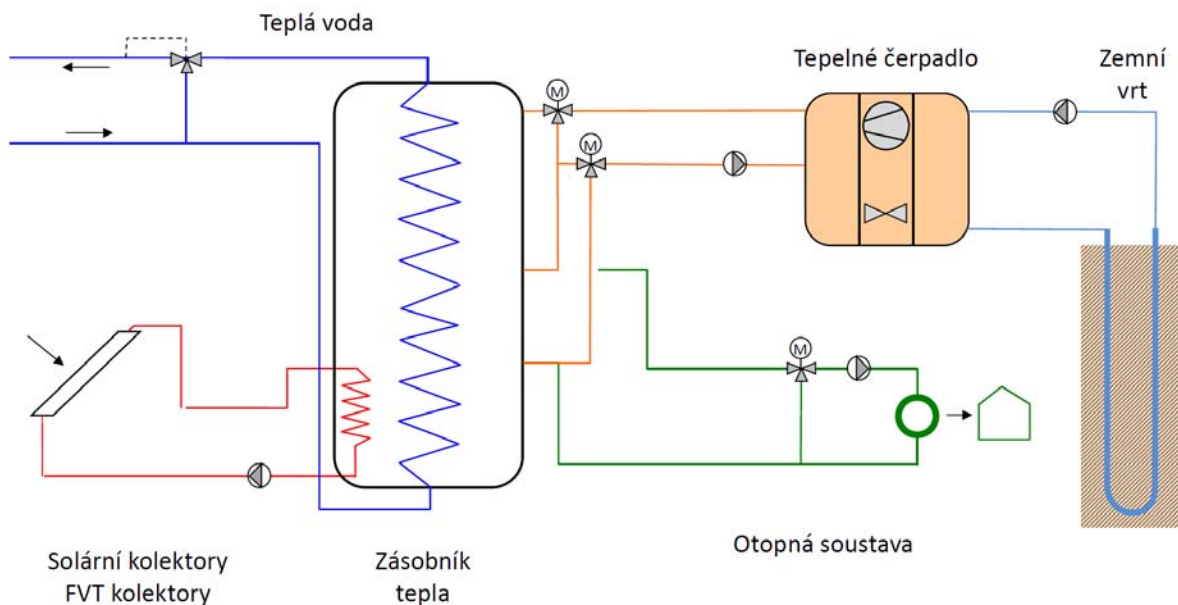
**Obr. 1** Účinnostní charakteristiky pro různé koncepty FVT kolektorů porovnané s běžným solárním tepelným kolektorem (referenční).

Použitím nové silikonové laminace, vysoce transparentního a pružného materiálu, teplotně odolného až do 250 °C se otevírá aplikační oblast pro zasklené FVT kolektory, zejména v solární přípravě teplé vody a vytápění [2]. Navíc, spojení PV absorberu laminovaného k zasklení vysoce transparentnímu v oblasti viditelného záření (pro zachování dobré FV účinnosti) avšak s nízce emisivním povlakem může významně snížit tepelnou ztrátu FVT kolektoru.

## ANALÝZA KOMBINOVANÉ SOLÁRNÍ SOUSTAVY S TEPELNÝM ČERPADLEM

Možnosti zlepšení výkonnosti dnešních solárních soustav kombinovaných s tepelnými čerpadly jsou zkoumány v rámci evropského projektu MacSheep [3]. Hlavním cílem projektu je vyvinout konkurenceschopnou tepelnou soustavu kombinující solární kolektory a tepelné

čerpadlo tak, aby spotřebovávala o 25 % elektrické energie méně než je tomu u současných soustav, při stejném komfortu a obdobných investičních nákladech. Takového ambiciózního cíle má být dosaženo použitím nových materiálů a technologií v oblasti solárních kolektorů, tepelných čerpadel, akumulace tepla a regulace. Jednou ze zkoumaných novinek využitelných v takové soustavě je právě nahrazení konvenčních solárních tepelných kolektorů zasklenými FVT kolektory, které budou kromě tepla do zásobníku a odběru dodávat také elektřinu pro tepelné čerpadlo. Dopad kombinace FVT kolektorů s tepelným čerpadlem na snížení spotřeby elektrické energie byl zkoumán počítačovou simulací celé soustavy.



**Obr. 2** Schéma referenční solární soustavy s tepelným čerpadlem.

Simulační analýza byla provedena pro budovu definovanou již dříve v rámci projektu T44A38 [4] jako rodinný dům SFH45. Budova má roční potřebu tepla na vytápění  $60 \text{ kWh/m}^2$  v klimatu města Zurich (Švýcarsko). Roční odběr teplé vody v domě je  $73 \text{ m}^3$  při  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro vytápění byla uvažována nízkoteplotní otopná soustava s teplotním spádem  $35/30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vyhodnocovaná spotřeba elektřiny zkoumané soustavy zahrnuje elektřinu pro tepelné čerpadlo, záložní ohřívač, oběhová čerpadla a regulaci, včetně vyhodnocení tzv. penaltové spotřeby elektřiny v případě, že není dosaženo tepelného komfortu, buď pro vytápění, nebo pro přípravu teplé vody.

Pro analýzu přínosu nových technologií pro kombinovanou solární soustavu s tepelným čerpadlem byla definována referenční varianta (REF) reprezentující současný stav trhu. Referenční soustava obsahuje hlavní zásobník tepla ( $800 \text{ l}$ ), ploché solární kolektory ( $10 \text{ m}^2$ ) a tepelné čerpadlo země-voda se zemním vrtem hlubokým  $75 \text{ m}$  (viz Obr. 2). Zásobník tepla má vestavěný vnitřní výměník pro přípravu teplé vody. Výměník solárního okruhu je umístěn ve spodní části zásobníku tepla. Tepelné čerpadlo bylo navrženo jako monovalentní zdroj tepla se jmenovitým tepelným výkonem  $5 \text{ kW}$  (při B0/W35). Celková potřeba elektrické energie referenční solární soustavy s tepelným čerpadlem je  $2.63 \text{ MWh}$  při sezónním topném faktoru  $4.17$  (v klimatu města Zurich).

Zkoumáno a porovnáno bylo několik variant soustavy s využitím FVT kolektorů (viz Tab. 1). Referenční solární kolektory jsou nahrazeny FVT kolektory ve dvou různých konstrukcích: neselektivní zasklené FVT kolektory s gelovou laminací odolnou teplotám nad  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  (FVT/NZ) a nově navržená konstrukce s nízkoeemisivním povlakem na FV absorbéru jako

zasklený selektivní FVT kolektor (FVT/SZ). Varianty hybridního FVT kolektoru s gelovou laminací jsou v současnosti ve vývoji za účelem zvýšení výkonnosti a snížení ceny. Na Obr. 1 jsou porovnány účinnostní charakteristiky pro oba koncepty solárních zasklených FVT kolektorů společně se zaskleným čistě tepelným kolektorem (referenční / nahrazovaný kolektor). Tepelné charakteristiky FVT kolektorů jsou uvedeny pro případ odběru elektrické energie v maximálním výkonovém bodě (MPPT). Pro srovnání byla modelována i varianta referenční soustavy kombinované pouze s FV systémem (REF/FV) s polykrystalickými moduly o ploše 10 m<sup>2</sup> (2.25 kW<sub>p</sub>).

**Tab. 1** Zkoumané varianty solární soustavy kombinované s tepelným čerpadlem.

Varianta	Popis
REF	referenční solární soustava s tepelným čerpadlem s 10 m <sup>2</sup> běžných solárních tepelných kolektorů
REF/FV	referenční soustava kombinovaná s FV systémem (10 m <sup>2</sup> polykrystalických modulů)
FVT/NZ	soustava se zasklenými neselektivními FVT kolektory namísto referenčních
FVT/SZ	soustava se zasklenými selektivními FVT kolektory namísto referenčních

## VÝSLEDKY A DISKUSE

Použití FVT kolektorů pro dodávku tepla a elektřiny v rámci solární soustavy s tepelným čerpadlem bylo hodnoceno zatím pouze z energetického hlediska pro určení možné úspory. Energetická analýza popsaných variant soustavy byla provedena v simulačním prostředí TRNSYS. Vyhodnoceny byly úspory elektrické energie oproti referenční soustavě  $\Delta W_{el}$  (v procentech), celková produkce fotovoltaické elektřiny  $E_{PV}$  a její podíl využitý pro krytí spotřeby soustavy  $f_{PV}$ . Elektrická energie vyrobená FV částí kolektorů je uvažována pro snížení celkové potřeby elektřiny soustavy pouze pokud lze aktuální výrobou FV elektřiny pokrýt elektrickou potřebu soustavy (přímé využití FV elektřiny). Pro srovnání jsou uvedeny i tepelné zisky  $Q_{ss,u}$  využití ze solárních kolektorů.

Tab. 2 ukazuje výsledky analýzy výkonnosti variant, které ukazují několik důležitých čísel. Soustava s neselektivními FVT kolektory nemůže konkurovat referenční soustavě (REF) s běžnými solárními kolektory při stejné instalované ploše. Nižší tepelný výkon FVT kolektorů není vyvážen využitím FV elektřiny v soustavě.

Solární FVT kolektory se selektivním FV absorberem dosahují cca 3 % úspory elektrické energie v dané solární soustavě s tepelným čerpadlem ve srovnání s referenční variantou (nahrazení běžných kolektorů stejnou plochou 10 m<sup>2</sup>).

Kombinace referenční soustavy s FV systémem (varianta REF/FV) dosahuje relativně vysoké úspory elektřiny 8 % díky vysokému tepelnému výkonu běžných solárních kolektorů společně s vysokou produkcí FV elektřiny pro přímé využití v soustavě.

Při použití stejné celkové plochy obou druhů kolektorů (20 m<sup>2</sup>) vykazuje solární soustava s tepelným čerpadlem se zasklenými FVT kolektory vyšší výkonnost než varianta REF/FV. Selektivní FVT kolektory dosahují vyšších úspor elektrické energie (13 %) než neselektivní (9 %).

**Tab. 2** Výsledky simulací pro uvažované varianty (s definovanou plochou FVT kolektorů).

Varianta	$\Delta W_{el}$	SPF	$E_{PV}$	$f_{PV}$	$Q_{ss,u}$
	[%]	[ - ]	[MWh/rok]	[ % ]	[ MWh/rok ]
REF	-	4.17	-	-	3.56
REF/FV	-8.0	4.53	1.38	15.2	3.56
FVT/NZ5	11.4	3.75	0.56	26.3	1.73
FVT/NZ10	1.5	4.12	1.10	19.0	2.52
FVT/NZ15	-4.2	4.36	1.62	16.1	2.97
FVT/NZ20	-9.1	4.59	2.13	14.2	3.29
FVT/SZ5	8.0	3.87	0.53	27.1	2.03
FVT/SZ10	-2.7	4.30	1.01	19.8	3.01
FVT/SZ15	-8.7	4.58	1.46	16.9	3.54
FVT/SZ20	-13.3	4.81	1.89	15.2	3.92

Je patrné, že cíle projektu MacSheep – celkových úspor elektřiny 25 % – nelze dosáhnout pouze jedním opatřením na straně solárních kolektorů (zde použitím zasklených FVT kolektorů). Navíc je nezbytné zároveň provést nákladovou analýzu, aby byla prokázána konkurenceschopnost integrace FVT kolektorů do solární soustavy s tepelným čerpadlem. Reálné náklady na zasklené FVT kolektory nejsou zatím dostatečně známe díky probíhajícímu vývoji. Uvedená analýza výkonnosti soustav byla provedena pro stanovení potenciálu FVT kolektorů pro dosažení cílů ve zkoumané soustavě. Výsledky ukázaly, že zasklené FVT kolektory s nízkoemisním povlakem FV absorbéru jsou jedinou možnou cestou pro další vývoj. Neselektivní FVT kolektory v solární soustavě kombinované s tepelným čerpadlem nepřinášejí významnou výhodu ve srovnání s referenční soustavou s nebo bez FV systému.

## ZÁVĚR

Energetická analýza solární soustavy kombinované s tepelným čerpadlem se zasklenými FVT kolektory byla provedena pro stanovení možných úspor elektrické energie. Výsledky ukázaly, že nahrazení konvenčních solárních tepelných kolektorů FVT kolektory může přinést úspory elektrické energie, pouze pokud jsou použity inovativní FVT kolektory s nízkoemisivním povlakem FV absorbéru. Potřeba elektrické energie kombinované solární soustavy se zasklenými FVT kolektory se pohybuje o 3 až 5 % níže než pro referenční případy (REF, REF/FV) při produkci elektrické energie o 40 až 50 % vyšší.

## LITERATURA

- [1] Zondag, H.A. & van Helden, W.G.J., 2002. Stagnation temperature in PVT collectors. Uvedeno na konferenci PV in Europe – From PV Technology to Energy Solutions Conference and Exhibition, Rome, Italy.
- [2] Poulek Solar Company, dostupné na [www.solar-trackers.com](http://www.solar-trackers.com).

- [3] MacSheep - New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance, European Union's Seventh Framework Programme project, 2012-2015, informace dostupné na <http://macsheep.spf.ch>.
- [4] R. Dott, M. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs and J. Bony. IEA-SHC Task 44 Subtask C technical report: The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38: Part B: Buildings and Space Heat Load, IEA-SHC, Paris 2012, informace dostupné na <http://www.iea-shc.org/task44>.

*Výzkum, který vedl k těmto výsledkům, získal finanční prostředky ze sedmého rámcového programu 7RP/2007-2011 Evropské unie na základě grantové dohody č. 282825 – acronym MacSheep.*