

OBSAH

Praktické zkušenosti s vysokoteplotními tepelnými čerpadly EcoCute s chladičem oxidem uhličitým	5
Bláha Marek	
Velkoplošné solární soustavy v kontextu koncepčních změn dánské energetiky	9
Borovský David	
Prediktivní regulace MPC v kombinaci s aktivovaným betonovým jádrem a geotermálním zdrojem energie – GEOTABS	15
Ferkl Lukáš, Cigler Jiří, Helsen Lieve, Boydens Wim, Laverge Jelle	
Návratnost fototermických a fotovoltaických solárních systémů	23
Gottas Alfréd	
Tepelné vlastnosti hornin a jejich vliv na využití zemního tepla	31
Havlík Michal, Cihelka Pavel	
Vliv tepelných čerpadel a solárních systémů na provoz a účinnost teplotních sítí ...	39
Helebrant Václav	
Optimalizace kombinovaného zásobníku tepla pro provoz s tepelným čerpadlem	45
Kalina Jiří	
Akumulace tepla v supermarketu	55
Kny Martin, Sedlár Jan	
Inovativní řešení absorpčních vrstev termických kolektorů	63
Kolář Jan	
Tepelné čerpadlo země-voda jako zdroj tepla a chladu pro univerzitní budovu	71
Lain Miloš	
Využití tepla z kompresorového chlazení na zimním stadionu.....	77
Linhartová Vladimíra	
Možnosti zvýšení elektrické účinnosti mikrokogeneračního ORC zařízení na biomasu	85
Mašuch Jakub, Vodička Václav, Vykoukal Matěj	
Kombinace FV systému, tepelného čerpadla a dlouhodobé akumulace	93
Matuška Tomáš, Šourek Bořivoj, Sedlár Jan, Broum Michal	
Konstrukce termického solárního kolektoru s poduškovým absorberem a jeho varianty	101
Mrňa Libor, Řiháček Jan, Podaný Kamil, Peterková Eva	
Možnosti zlepšování energetických parametrů vertikálních horninových výměníků ve funkci nízkoteplotních zdrojů tepelných čerpadel	109
Neuberger Pavel, Adamovský Radomír	
Historie solárních termických kolektorů a soustav	117
Peterka Jaroslav	

Polní energetické plodiny	123
Petříková Vlasta	
Provozní analýza solární soustavy s hybridními FVT kolektory	133
Pokorný Nikola, Matuška Tomáš	
Experimentálne porovnanie výkonu solárneho vákuového trubicového kolektora s konstrukčným prvkom na báze penových kovov	141
Rybár Radim, Beer Martin	
Optimalizace tepelného čerpadla	149
Sedlář Jan	
Energeticko-ekonomická optimalizace konstrukce plochého solárního kolektoru	157
Shemelin Viacheslav, Matuška Tomáš	
Možnost akumulace energie ve formě tepla a chladu do akumulčních panelů	165
Skovajsa Jan, Koláček Martin, Zálešák Martin	
Chladiva pro tepelná čerpadla a nová legislativa	173
Stojanov Štěpán, Formánek Marian	
Národní pokyny pro skladování pelet a výstavbu peletových skladů	179
Stupavský Vladimír	
Návrh algoritmů pro získání předpovědi dopadajícího slunečního záření	185
Šulc Jan, Procházka Martin, Maška Marek, Včelák Jan	
Koncept administrativní budovy jako budovy s téměř nulovou spotřebou energie	193
Urban Miroslav, Bejček Michal, Wolf Petr, Vodička Aleš	
Dojde k renezanci elektrického akumulčního vytápění?	201
Vybíralík František	
Chytrá energetika pro administrativní budovu	205
Wolf Petr, Včelák Jan, Vodička Aleš, Maška Marek	
Biomasa jako zdroj pro výrobu elektrické energie a tepla v bytových domech	213
Zelený Zbyněk, Fořtová Anna, Slavík Marek	

PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI S VYSOKOTEPLOTNÍMI TEPELNÝMI ČERPADLY ECOCUTE S CHLADIVEM CO₂

Marek Bláha

GT Energy s.r.o.

blaha@ivtcentrum.cz

ANOTACE

Využití tepelných čerpadel s chladivem CO₂ zásadním způsobem rozšiřuje možnosti aplikace obnovitelných zdrojů energie pro přípravu teplé vody, která u dnešních kvalitně zateplených obytných budov tvoří nadpoloviční část celkové spotřeby tepla. Článek přináší praktické informace získané při instalaci a provozu těchto tepelných čerpadel a upozorňuje na specifika chladících okruhů s CO₂.

ÚVOD

EcoCute je označení tepelných čerpadel pro přípravu teplé vody s přírodním chladivem CO₂. Technologie byla vyvinuta v Japonsku a od roku 2001 se v této zemi instalovalo více než 5 milionů tepelných čerpadel EcoCute. Nadkritický chladicí oběh umožňuje i u tepelných čerpadel vzduch/voda ohřívat vodu na teplotu až 90 °C s vysokým topným faktorem a to v rozmezí teplot venkovních vzduchu -25 °C až +43 °C. Tato tepelná čerpadla tak mohou celoročně zajistit dodávku teplé vody bez potřeby instalace bivalentního zdroje tepla.

SPECIFIKA TEPELNÝCH ČERPADEL ECOCUTE

Chladicí oběhy s chladivem CO₂ se chovají velmi odlišně od tepelných čerpadel s HFC chladivy a při návrhu je nutné brát na tato specifika ohled.

Ohřívání medium

V tepelných čerpadlech EcoCute, se přímo průtokově ohřívá pitná voda. Není zde žádný meziokruh s otopnou vodou a zásobníky teplé vody nemají žádné výměníky. To znamená, že nastavená výstupní teplota vody z tepelného čerpadla je zároveň i teplotou teplé vody v zásobnících. U běžných tepelných čerpadel je teplota vody v zásobníku o 3 až 5 °C nižší než výstupní teplota otopné vody z tepelného čerpadla. Výměník v EcoCute tepelných čerpadel je dvouplášťový, aby v případě jeho poškození nedošlo ke kontaminaci teplé vody olejem z kompresoru.

Teplotní spád na kondenzátoru

Zásadním parametrem určujícím topný faktor je rozdíl vstupní a výstupní teploty teplé vody na výměníku (chladiči par) tepelného čerpadla. Na rozdíl od běžných tepelných čerpadel s HFC chladivy zde platí, že velký rozdíl teplot znamená vyšší topný faktor! Proto tepelné čerpadlo pracuje nejlépe při vstupní teplotě vody 5 až 10 °C. Pokud je již zásobník teplé vody nahřátý a do tepelného čerpadla se vrací teplejší voda (20 až 30 °C) topný faktor se zhoršuje.

Výstupní teplota teplé vody

Výstupní teplotu teplé vody lze obecně u tepelných čerpadel EcoCute nastavit v rozmezí 60 až 90 °C. Řídící jednotka upravuje průtok vody a vzduchu tepelným čerpadlem tak, aby byla

vždy zachována nastavená výstupní teplota. Prakticky to znamená, že bez ohledu na teplotu vstupní vody a teplotu venkovního vzduchu, je výstupní teplota vždy konstantní (například 70 °C). I když je zásobník teplé vody zcela vychlazený, dodává tepelné čerpadlo do jeho horní části vodu o vysoké teplotě a tu je možné okamžitě odebrat (bez čekání než se postupně ohřeje celý zásobník).

PROVEDENÍ A PARAMETRY

Tepelná čerpadla EcoCute jsou dodávána jak ve venkovním, tak i vnitřním provedení, ve výkonech od 3 až do stovek kW. Kompresor, ventilátor i oběhové čerpadlo jsou frekvenčně řízené. Výkon a dosahovaný topný faktor typického představitele EcoCute při různých teplotních podmínkách ukazuje tabulka 1.

Tab. 1 Topný faktor a výkon při výstupní teplotě vody 65 °C (MHI Q-ton ESA 30E-25)

Teplota vzduchu [°C]	Vstupní teplota vody [°C]	Výkon [kW]	Topný faktor [-]
20	10	30	4,8
7	10	30	3,9
7	30	30	3,5
-15	10	26	2,4

PŘÍKLAD VYUŽITÍ I

Náhrada plynového ohřevu teplé vody v kancelářské budově

Tepelné čerpadlo SANDEN Aquaeco₂ o výkonu 3,5 kW, odebírající teplo z VZT potrubí za rekuperátorem tepla, nahradilo při přípravě teplé vody kondenzační plynový kotel o výkonu 170 kW.



Obr. 1 Tepelné čerpadlo SANDEN Aquaeco₂ odebírající teplo z VZT potrubí.

Náklady na přípravu TV plynovým kotlem byly 55 700,- Kč (spotřeba plynu, spotřeba elektrické energie na větrání kotleny). Díky relativně nízké spotřebě teplé vody a nevhodnému

technickému řešení (celoročně je nutné provozovat velký zdroj tepla), pracoval systém s velmi nízkou účinností.

Po prvním roce provozu, dosáhl nový systém topného faktoru 3. V měřeném období byla spotřeba teplé vody výrazně podprůměrná a výsledný topný faktor je značně ovlivněn vysokými ztrátami v cirkulačním potrubí, které způsobují zvýšení vstupní teploty vody do tepelného čerpadla. Ve dnech s vyšší spotřebou teplé vody, kdy nebyl systém tolik ovlivněn ztrátami v cirkulaci, se topný faktor dostával k hodnotě 4,3. Výměnou a snížením příkonu cirkulačního čerpadla z 380 W na 50 W, došlo k dodatečné úspoře nákladů na elektřinu 3 900 Kč/rok.

Spotřeba energie se celkově snížila o 93 % a náklady na přípravu teplé vody klesly pod 9 000 Kč/rok.

PŘÍKLAD VYUŽITÍ II

Náhrada výměňkové stanice pro přípravu teplé vody v panelovém domě

V připravovaném projektu náhrady dodávky TV z externí výměňkové stanice, jsou použita tři tepelná čerpadla MHI Q ton o celkovém výkonu 90 kW, umístěná na střeše objektu. Tím je panelový dům s 13 nadzemními podlažími a 500 obyvateli. Denní spotřeba TV je 15 m³ a roční platba za ohřev vody 1,3 mil Kč. Instalací tepelných čerpadel dojde ke snížení plateb o 650 000 Kč, přičemž v provozních nákladech tepelných čerpadel jsou již obsaženy náklady na pravidelnou údržbu a repasi kompresorů. Investiční náklady za kompletní dodávku technologie jsou 3,1 mil. Kč.



Obr. 2 Tepelná čerpadla MITSUBISHI HEAVY Q ton. Výkon 60 kW.

ZÁVĚR

Tepelná čerpadla EcoCute je možné relativně snadno nasadit jako náhradu za elektrické, plynové, nebo centrální zdroje tepla pro přípravu teplé vody. Při jejich návrhu je ale nezbytné respektovat specifika této technologie a přizpůsobit jim schéma zapojení i způsob provozu zdroje tepla.

V rámci změny zdroje tepla je vhodné věnovat pozornost i kvalitě tepelných izolací rozvodu teplé vody i cirkulace a optimalizovat provoz cirkulačního čerpadla.

VELKOPLOŠNÉ SOLÁRNÍ SOUSTAVY V KONTEXTU KONCEPČNÍCH ZMĚN DÁNSKÉ ENERGETIKY

David Borovský

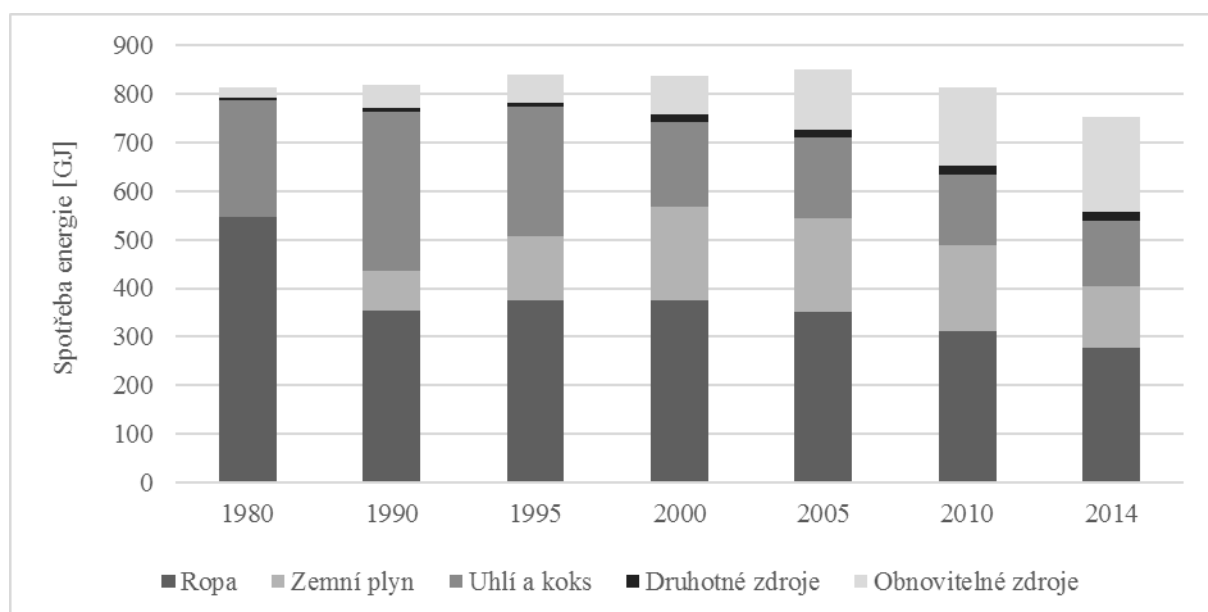
Energetický specialista a samostatný konzultant
d.borovsky@seznam.cz

ANOTACE

Článek shrnuje vývoj v oblasti velkoplošných solárních soustav dodávajících teplo do soustav centralizovaného zásobování v Dánsku. První projekty byly realizovány v roce 1988. Na pozadí koncepčních změn dánské energetiky je sledován postupný přechod od pilotních projektů k čistě komerčním realizacím, které jsou plnohodnotnou součástí energetických systémů.

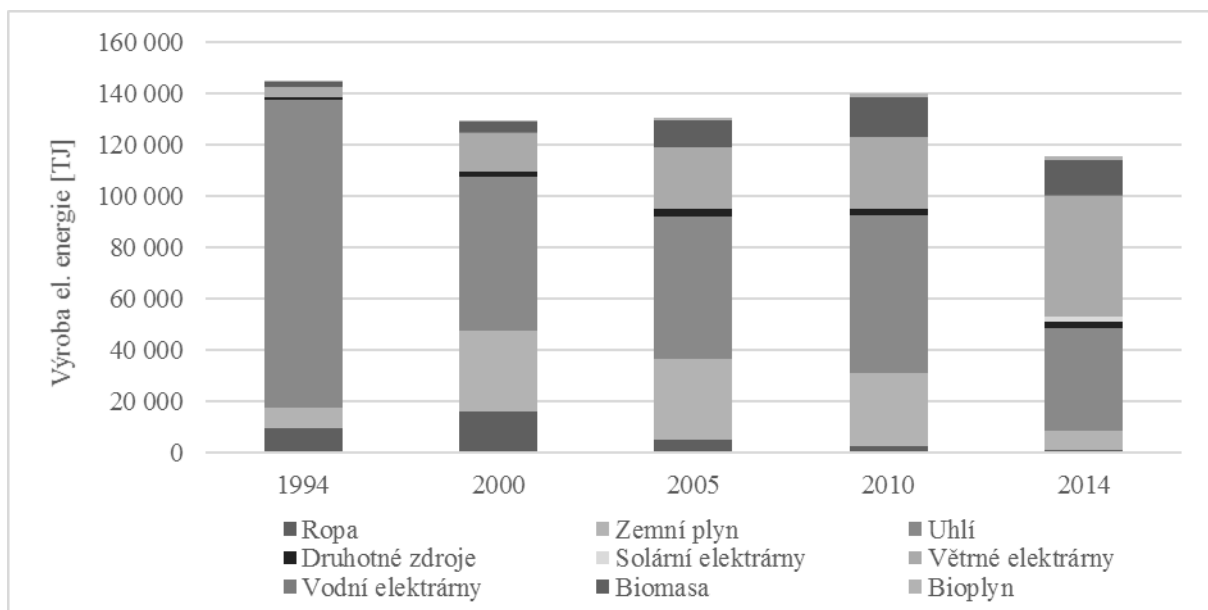
ÚVOD

Instalovaná plocha solárních kolektorů v dánských soustavách centralizovaného zásobování teplem překročila na konci roku 2015 hodnotu 750 000 m². Solární soustavy jako zdroj tepla však představují pouze část komplexního energetického systému, který se v posledních 40 letech v Dánsku vyvíjel. Jedním s určujících faktorů národního energetického konceptu je stabilní, či v posledních letech spíše klesající celková spotřeba energie.



Obr. 1 Vývoj hrubé spotřeby energie v Dánsku včetně podílu jednotlivých zdrojů

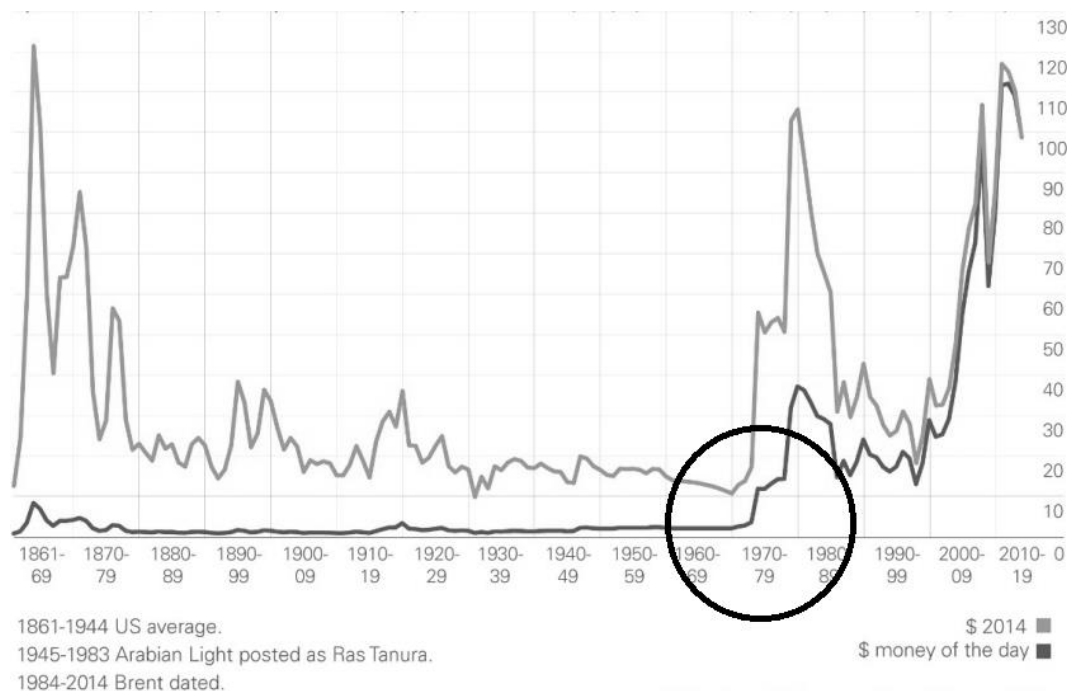
Dalším klíčovým prvkem přeměny dánské energetiky, byl postupný přechod z centralizované výroby elektrické energie, jejímž základem byly velké zdroje spalující uhlí k decentralizované výrobě, v níž je podíl uhelných zdrojů na úrovni 35 % a nadále se snižuje.



Obr. 2 Vývoj výroby elektrické energie dle zdrojů

PŘEROD DÁNSKÉ ENERGETIKY V RÁMCI ZAJIŠTĚNÍ DODÁVEK TEPLA

Zásadním impulsem pro přeměnu dánské energetického systému byla „první ropná krize“ v roce 1973. Dánská výroba tepla pro vytápění a přípravu teplé vody, v té době orientovaná především na ropné deriváty (topné oleje), utrpěla významný ekonomický zásah, který většina obyvatel pocítila téměř okamžitě. Součástí souvisejících opatření bylo například omezení provozu továren, veřejného osvětlení či zákaz provozu motorových vozidel ve vybraných dnech. Skoková a razantní změna ceny jednoho z hlavních paliv přivedla čelní politické představitele k rozhodnutí o změně koncepce dánské energetiky směrem k vyšší efektivitě a maximální možné míře soběstačnosti.

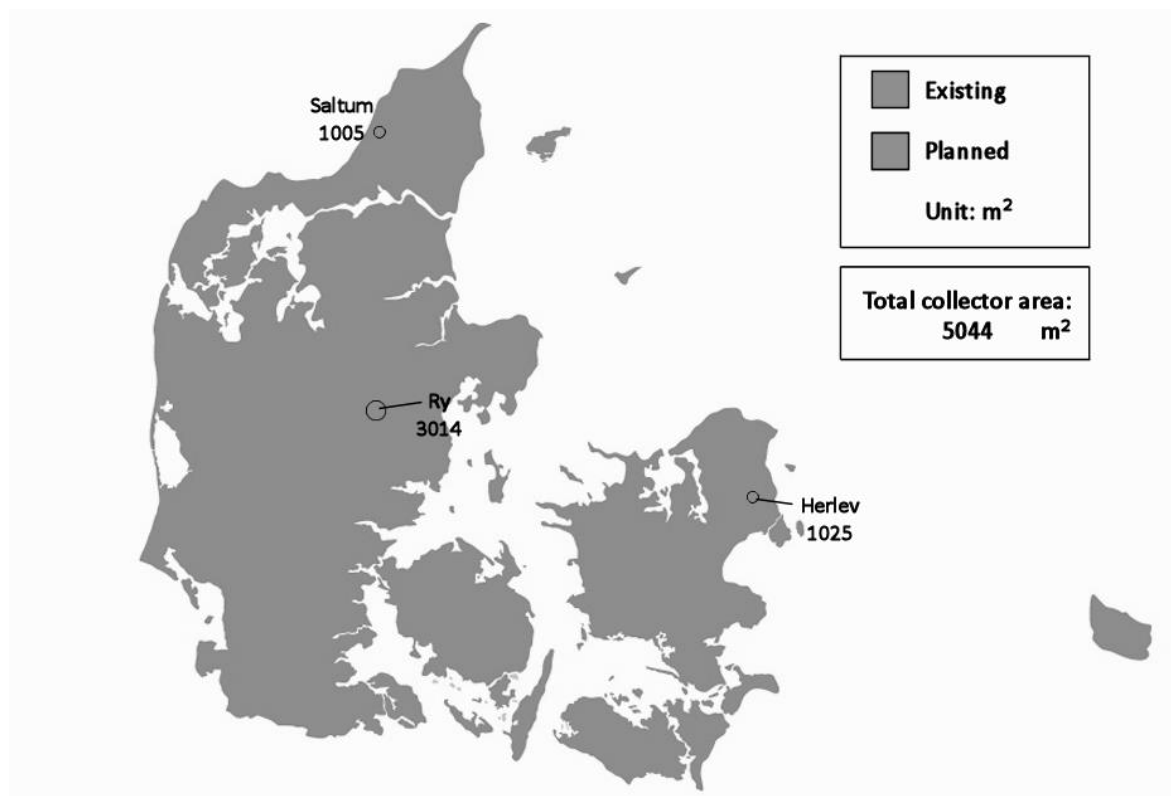


Obr. 3 Vývoj ceny ropy

Jedním z hlavních bodů nového energetického konceptu byla legislativní podpora soustav centralizovaného zásobování teplem jdoucí ruku v ruce s využíváním odpadního tepla a nasazováním kombinované výroby elektrické energie a tepla. Podíl dodávek tepla z CZT, tak v současnosti dosahuje 63 % z celkové spotřeby na vytápění a přípravu TV a nadále vznikají nové nízkoteplotní soustavy, jejichž hlavními vlastnostmi jsou minimální tepelné ztráty a maximální komfort (technický i ekonomický) pro jejich uživatele.

IMPLEMENTACE VELKOPLOŠNÝCH SOLÁRNÍCH SOUSTAV

První realizace solárních soustav dodávajících teplo v rámci systémů centralizovaného zásobování teplem byly uvedeny do provozu ve Švédsku na konci 70. let 20. století. V Dánsku byla převzata základní koncepce soustav včetně licencované výroby speciálních velkoplošných kolektorů (12,5 m²).

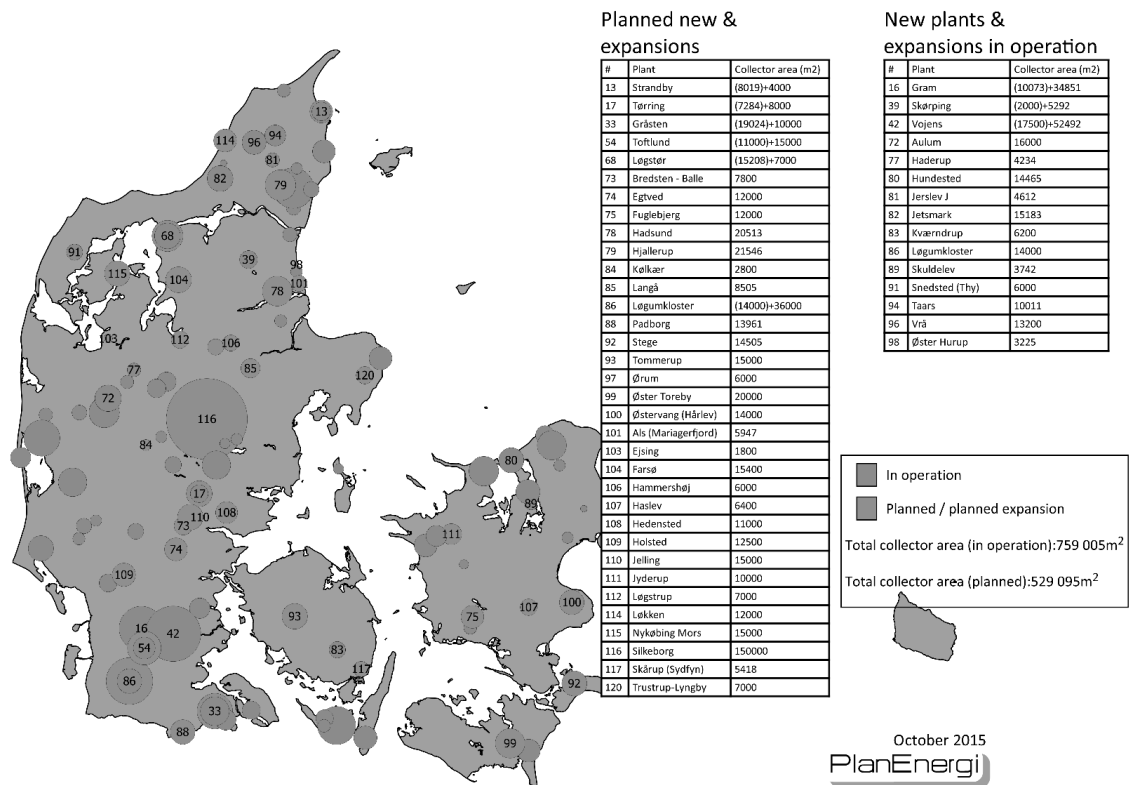


Obr. 4 Solární soustavy v CZT – rok 1990

Vliv na rozvoj solárních soustav v rámci CZT ale i na rozvoj CZT jako celku měly některé legislativní úpravy:

- Povinné úspory energie na straně dodavatele (obdobný model převzala evropská směrnice). V Dánsku jsou povinné roční úspory na úrovni 1,5 % dodávek. Odpovědný za úsporu je dodavatel tepla. Solární tepelné soustavy se v rámci systému zahrnovaly jako úspora primární energie, ale pouze do konce roku 2015.
- Zákaz lokálního využití zemního plynu pro vytápění nových budov v případě, že je technicky dostupná alternativa.
- V aktuálním konceptu je biomasa vedena jako přechodné palivo do roku 2035. Postupně má být nahrazena elektrickou energií z obnovitelných zdrojů či teplem z CZT, které obnovitelných zdrojů využívá.

- Dánské firmy provozující soustavy CZT fungují převážně jako „neziskové organizace“ / spolky / sdružení a nemohou vytvářet zisk, což má vliv na konečnou cenu produktu (tepla).
- Sluneční záření zatím není v Dánsku zdaněno



Obr. 5 Solární soustavy v CZT – rok 2015

VÍCEZDROJOVÁ SOUSTAVA CZT VYUŽÍVAJÍCÍ POHYBLIVÝCH CENOVÝCH TARIFŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jak je patrné z Obr. 2, vykazují po roce 2000 větrné elektrárny nejvýznamněji růst bilančního podílu výroby elektrické energie ze všech sledovaných zdrojů. Dánská elektrizační soustava se tak musí vypořádávat se všemi souvisejícími negativními vlivy.

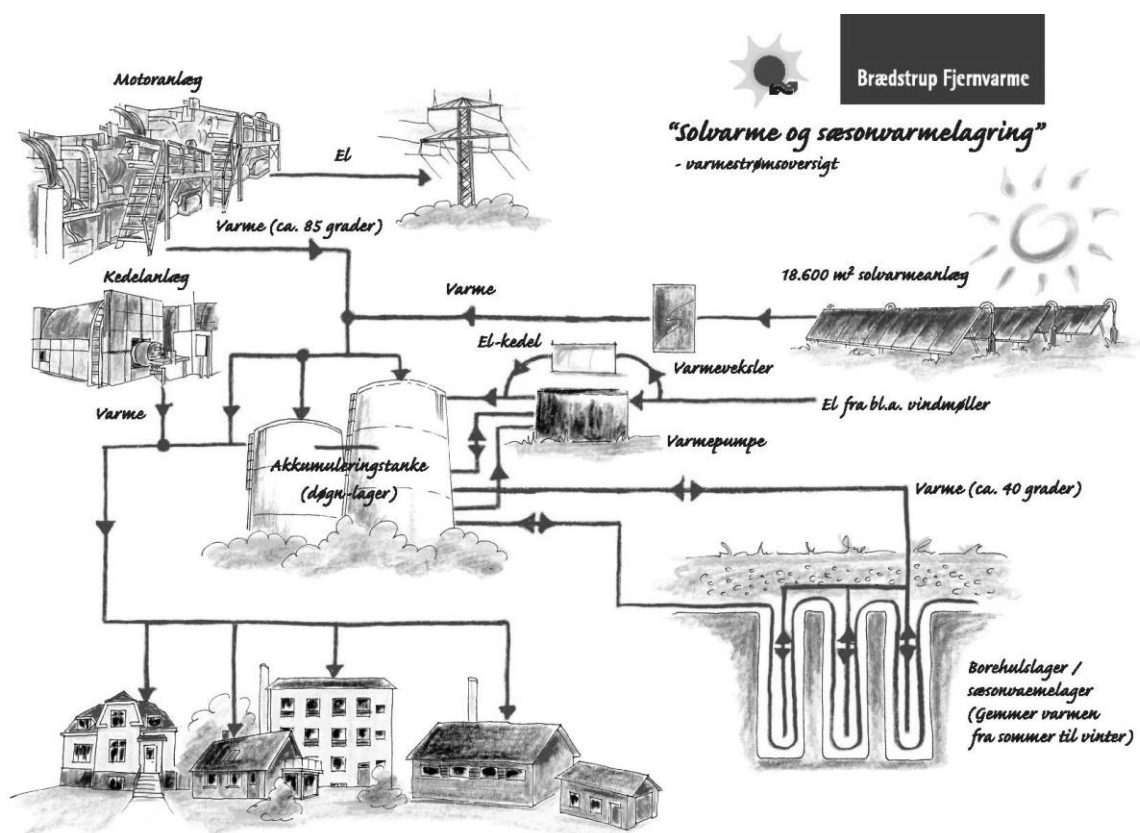
Jednou z možností jak čelit rozdílům mezi poptávkou a nabídkou elektrické energie v síti je model skladby zdrojové základny realizovaný ve městě Braedstrup. Původní soustava centralizovaného zásobování teplem doznala v posledních letech významných změn, které jejím uživatelům (vlastníkům) umožňují bezpečný odběr tepla za přijatelné ceny i při vysokém ročním bilančním podílu obnovitelných zdrojů energie.

Základním zdrojem tepla pro soustavu CZT byly kogenerační jednotky na zemní plyn v kombinaci s plynovými kotli. Prvním rozšířením zdrojové základny byla realizace solární tepelné soustavy s 8000 m² solárních kolektorů a nárazovým vodním zásobníkem o objemu 2000 m³. Tato solární soustava dodávala do CZT zhruba 10 % roční potřeby tepelné energie.

Po několika letech spolehlivého provozu a dalším růstu ceny zemního plynu, bylo rozhodnuto o dalších úpravách zdrojové základny soustavy CZT. Zde je nutné zmínit, že dánská politická reprezentace používá k prosazování národních cílů obvykle daňovou soustavu a ceny

komodit, tak zdaleka nejsou závislé pouze na tržní ceně, ale v mnoha případech jsou zásadními položkami období spotřební či ekologické daně. Uvedené rozšíření zdrojové základny pak spočívalo v realizaci další solární soustavy (10 600 m²), instalaci tepelného čerpadla a elektrokotle a zejména ve výstavbě sezónního zásobníku tepla se zemními vrty.

Nově koncipovaná soustava tak umožňuje odebírat elektrickou energii v době jejích přebytků v distribuční soustavě a vyrábět tak prostřednictvím tepelného čerpadla levnou tepelnou energii, která je buď rovnou spotřebovávána v soustavě CZT, nebo akumulována v zásobnících pro pozdější využití. Naopak v časových úsecích s vyšší poptávkou po elektrické energii je možné tuto vyrábět v KVET a za výhodných podmínek dodávat do sítě. Teplo pak může být využito/akumulováno stejně jako v předcházejícím případě. Dodávky tepla ze solární soustavy jsou pak užívány/akumulovány dle potřeby tepla v soustavě. Elektrokotel je pak spouštěn v případech s extrémně nízkou cenou elektrické energie a funguje jako regulační prvek distribuční soustavy elektrické energie (kompenzace kladné systémové odchylky).



Obr. 6 Schéma zdrojové základny – CZT Braedstrup

Nízká teplota zpětného potrubí soustavy CZT umožňuje snadnější implementaci obnovitelných zdrojů energie a také znamená nižší tepelné ztráty rozvodů. Provozovatel soustavy tak zavedl motivační tarif odběru tepla, který je závislý na teplotě vody ve zpětném potrubí každého konkrétního uživatele. Zjednodušeně řečeno, čím nižší teplota vratné vody, tím nižší jednotková cena tepelné energie.

Tab. 1 Vliv teploty zpátečky na cenu tepla

Průměrná teplota zpětného potrubí [°C]	Bonus/Malus k ceně tepla za každý K [€/MWh]
větší než 35 °C	0,55
30 až 35 °C	0,00
menší než 30°C	-0,55

ZÁVĚR

Velkoplošné solární tepelné soustavy jsou jedním z prvků stále probíhající komplexní přeměny dánské energetiky. Vývoj v oblasti centralizovaného zásobování teplem a jeho těsnější provázání se zdroji elektrické energie přineslo širší využití sezónním zásobníkům tepla, původně koncipovaným pouze pro přenesení letních přebytků solárního tepla do přechodného a zimního období. Interakce všech prvků systému s krátkou reakční dobou umožňuje ekonomicky efektivní provoz systému při zachování resp. zvýšení bezpečnosti dodávek tepla. Nedílnou součástí konceptu je i nízká energetická náročnost spotřebitelských (budov) a distribučních (rozvody) systémů, která umožňuje snadnější nasazení obnovitelných a alternativních zdrojů tepla.

LITERATURA

- [1] SØRENSEN P. A. More than 750,000 m² solar district heating collectors installed in Denmark – The Story. *Velkoplošné solární soustavy jako zdroje tepla pro SCZT v Dánsku*, 2015
- [2] Danish Energy Agency. Energy statistics 2012, 2013
- [3] BP Statistical Review of World Energy 2015, BP. *Domovská stránka společnosti*. Dostupné z: <<http://www.bp.com>>
- [4] Brædstrup Fjernvarme. Solvarme og Sæsonlagring. *Domovská stránka společnosti*. Dostupné z: <<http://www.braedstrup-fjernvarme.dk>>

PREDIKTIVNÍ REGULACE MPC V KOMBINACI S AKTIVOVANÝM BETONOVÝM JÁDREM A GEOTERMÁLNÍM ZDROJEM ENERGIE – – GEOTABS

Lukáš Ferkl^{1,6}, Jiří Cigler^{2,6}, Lieve Helsen³, Wim Boydens⁴, Jelle Laverge⁵

¹Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

²Feramat Cybernetics, s r.o.

³KU Leuven

⁴boydens engineering

⁵Universiteit Gent

⁶Energoklastr

lukas.ferkl@cvut.cz, cigler@feramat.com,

lieve.helsen@kuleuven.be, wimb@boydens.be, jelle.laverge@ugent.be

ANOTACE

Aktivované betonové jádro je dobrým systémem pro vytápění a chlazení budov, pokud chceme použít teplo s nízkým potenciálem, například z geotermálního zdroje (v literatuře se takový systém označuje jako GEOTABS). Nevýhodou je velmi pomalá dynamika systému, kterou však může úspěšně řešit regulace MPC (Model-based Predictive Control). Nejprve uvedeme přehled současného stavu, jak se řeší regulace systémů GEOTABS v teorii i v praxi, a přehled hlavních výzkumných projektů na toto téma. Stručně vysvětlíme princip regulace MPC a proč je výhodná právě ve spojení se systémy GEOTABS. Nakonec uvedeme praktické poznatky z provozování kombinace systémů GEOTABS a MPC, ve kterých se ukazuje, že úspory oproti ekvitermní regulaci nebo podmínkovému řízení (regulace typu „if-then-else“) dosahují více než 15 %, systém dobře sleduje referenční teplotu a snižuje amplitudu energetických špiček.

ÚVOD

Princip aktivovaného betonového jádra (TABS) je velmi starý, dalo by se říci, že již staří Římané používali sálavé vytápění (hypocaustum), ovšem nejstarší známý systém je doložen již v roce cca 2000 př. Kr. v Mohendžodaro (dnešní Pákistán), tradičně hojně je využíván v Koreji (ondol). Ovšem tyto tradiční metody nevyužívaly vytápění hmoty přímo, to se objevuje až v roce 1911 patentu autorů Richard Godfrey Crittall a Joseph Leslie Musgrave [1]. Kombinace systémů TABS, které umožňují nízkoteplotní vytápění a vysokoteplotní chlazení, a tepelného čerpadla s geotermálním zdrojem (které je považováno za obnovitelný zdroj energie), představuje eko-inovativní technologii, která může dle publikovaných odhadů i reálných měření uspořit 15–71 % energie ve srovnání s tradičními systémy vytápění [2,3,4].

Avšak současná řešení, která jsou na trhu dostupná, se teoretickým účinností zatím příliš nepřibližují. Navíc jsou často považována za příliš drahá a není příliš známý vliv GEOTABS systémů na zdraví, tepelnou pohodu a produktivitu obyvatel budovy. Hlavní problémy, které brání širšímu nasazování systémů GEOTABS, jsou hlavně následující.

- **Problém 1:** Řešení GEOTABS je často zavrženo, protože náklady na instalaci jsou typicky zhruba o 20 % vyšší, než pro jiné systémy vytápění a chlazení. Díky nesprávnému dimenzování (které je často způsobeno například tím, že se použijí normy na radiátory, které mají úplně jiné energetické špičky během 24h cyklu) vycházejí investice často i o 40 % vyšší. V klasickém investičním schématu nese investor veškeré investiční náklady a koncový uživatel veškeré provozní náklady, takže investor se snaží

budovu postavit co nejlevněji, aby ji mohl na trhu nabídnout za konkurenceschopnou cenu. Zlepšení lze částečně dosáhnout tím, že se pečlivě optimalizuje dimenzování systému. Stále však zůstává na investorovi, aby nižší provozní náklady proměnil na svoji obchodní výhodu.

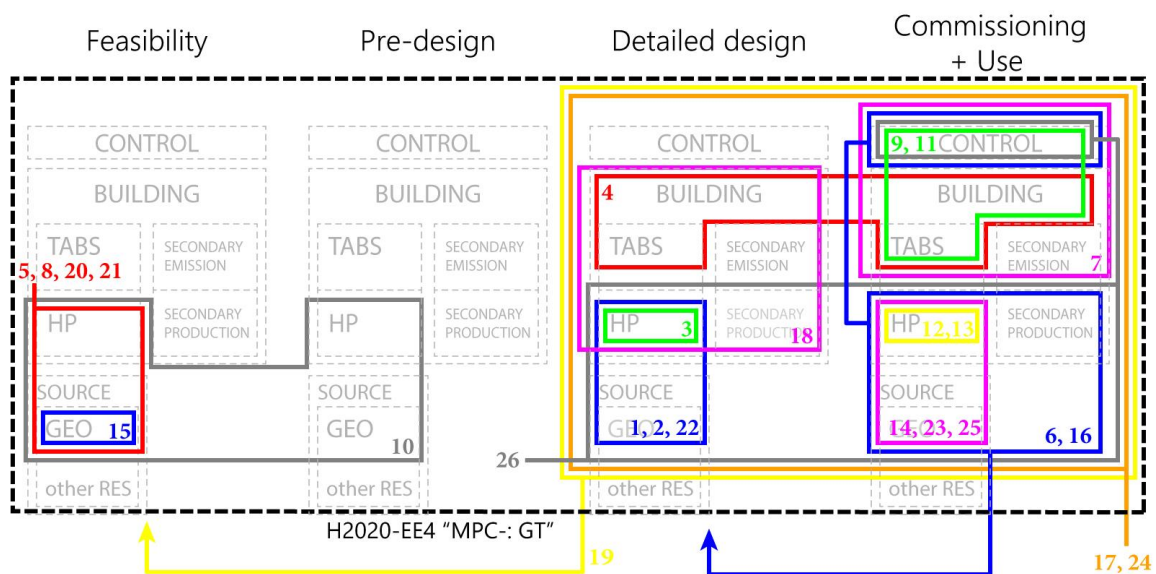
- **Problém 2:** Za hraničních podmínek nejsou schopny TABS systémy rychle reagovat, protože mají velmi dlouhé časové konstanty. Proto je potřeba TABS řešit jako hybridní, tzn. vyžadují sekundární systém (např. ventilaci, konvektory, ...) které reagují na náhlé výkyvy požadavků na topení či chlazení. Dimenzování sekundárních systémů je relativně složité a neexistují spolehlivá doporučení, která by řešila souběžný provoz TABS a sekundárního systému. Výpočty se musí provádět individuálně a to samozřejmě výrazně zvyšuje nároky na projekci. Výsledkem je často neúměrné předimenzování jak TABS, tak sekundárního systému, což opět zbytečně zvyšuje investiční náklady.
- **Problém 3:** Pro regulaci HVAC systémů se většinou používá podmínkové řízení (rule based control, RBC). To však neuvažuje dynamiku systémů a nevyužívá tak vysokého potenciálu, který TABS přinášejí. Pokud se snaží dynamiku nějak zohlednit, děje se tak na základě inženýrského odhadu, v lepším případě systémem pokus-omyl. Často se tak stává, že se jednotlivé regulační smyčky např. dostávají do rezonance a efektivita systému klesá. Zvláště u moderních řídicích systémů jsou RBC regulátory velmi komplexní a jejich správné odladění v prvních letech provozu budovy je vysoce nákladné, takže se většinou neprovádí. Přes použití adaptivních algoritmů v posledních letech u TABS budov k výraznému zlepšení regulace nedochází.
- **Problém 4:** Existuje řada studií, které se soustředí na vliv změny vnitřních teplot na tepelnou pohodu obyvatel a zpracovávají výsledky vlivu na tepelnou pohodu, zdraví a produktivitu obyvatel. To je důležité pro kancelářské budovy, protože mírný pokles produktivity zaměstnanců snadno vyváží energetické úspory sebelepšího systému. Pro obytné budovy je zase důležité studium vlivu na zdraví, zvláště u stárnoucí populace, protože staří lidé tráví v budově často téměř 100 % svého času. Pro TABS budovy takovéto validované studie zatím chybí.

SOUČASNÝ STAV REGULACE SYSTÉMŮ GEOTABS

GEOTABS systémy se používají posledních několik desetiletí a vykazují celou řadu provedení – různé lokality, typy budov, geometrie, systémy zdrojů energie a energetická náročnost na chlazení a vytápění (příklady lze nalézt například na stránkách projektu EraSME Geotabs: www.geotabs.eu/Database). Těmito systémy se zabývá nebo v minulosti zabývala celá řada projektů, která se soustředila na proveditelnost, optimální návrh nebo optimální řízení středně velkých až velkých budov. V současnosti jsou tedy tyto systémy velmi dobře prozkoumány a například projekt MPC-GT (z programu H2020) se zabývá celkovým, integrovaným návrhem (1) jednotlivých komponentů (geotermálních a ostatních obnovitelných zdrojů, tepelného čerpadla, sekundárních systémů, TABS a sekundárních emisních systémů, regulátorů) a (2) všemi fázemi procesu výstavby (stavební program, projekt, stavba, zprovoznění a provoz).

Na Obr. 1 jsou uvedeny hlavní projekty zabývající se GEOTABS systémy a jejich vzájemné souvislosti. Poznamenejme, že drtivá většina projektů se zabývá kancelářskými budovami, přestože např. nově postavená ZŠ Líbeznice je také postavena na principu GEOTABS a její regulaci zajišťuje MPC (implementace firmy Feramat Cybernetics). Klíčové projekty, které řešily nebo řeší systémy GEOTABS, se zabývaly nebo zabývají zejména následujícími tématy:

- Metody a nástroje pro zjištění geotermálního potenciálu pro budovy (GROUND-REACH, IWT-VIS SmartGeo-therm, EU-THERMOMAP, Repowermap),
- Kritické zhodnocení současné praxe (Interreg IVC GEO.POWER, EraSME GEOTABS, IWT-VIS SmartGeo-therm), „best practices“ (ReoGeoCities) a školení a certifikační programy pro zajištění vysoce kvalitních instalací (GEOTRAINET),
- Měření nebo výpočet energetické účinnosti ve stávajících budovách (EU-FP7-GROUNDMED, SEPEMO, EraSME GEOTABS, Wärmepumpen Monitor, EnOB, IWT-VIS SmartGeotherm),
- Optimalizace komponent a tepelných výměníků ve vrtných polích (EU-FP5-GEOCOOL, EU-FP6-GROUNDHIT, EU-FP7-NxtHPG, H2020 GEOTECH),
- Webový nástroj pro zjišťování komfortu „Comfortmeter“ (EraSME GEOTABS), REHVA Guidebook (EraSME GEOTABS),
- Posouzení důležitosti dlouhodobého chování geologického podloží pro MPC (FWO Black-box MPC, IWT-PhD MPC),
- První výsledky MPC aplikovaného na TABS budovy (KUL-PhD CCA, EraSME GEOTABS, OptiControl, EnergoKlastr MPC),
- Použití grey-box modelování pro MPC (IWT-PhD MPC, KUL-PhD CCA, EraSME GEOTABS, OptiControl, EnergoKlastr MPC, H2020 GEOTECH),
- Hardwarové a softwarové prostředky pro MPC (EnergoKlastr MPC).



- | | | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|--|
| 1. EU-FP5-EPICOOOL | 8. Interreg IVC GEO.POWER | 15. EU-THERMOMAP | 22. EU-FP7-NxtHPG |
| 2. EU-FP6-GROUNDHIT | 9. KUL-PhD CCA | 16. FWO Black-box MPC | 23. (GEO.POWER) LEGEND |
| 3. EU-FP6-SHERPA | 10. GEOTRAINET | 17. EraSME GEOTABS | 24. IWT-PhD Integrated optimal control & design with RES |
| 4. IWT-THERMAC | 11. EnergoKlastr MPC | 18. EnOB | |
| 5. GROUND-REACH | 12. SEPEMO | 19. IWT-VIS SmartGeotherm | 25. GEOPIMED |
| 6. IWT-PhD MPC | 13. WP Monitor | 20. Repowermap | 26. H2020-GEOTECH |
| 7. OptiControl | 14. EU-FP7-GROUNDMED | 21. ReGeoCities | |

Obr. 1 Grafický přehled projektů, které se zabývají GEOTABS systémy. © J. Laverge

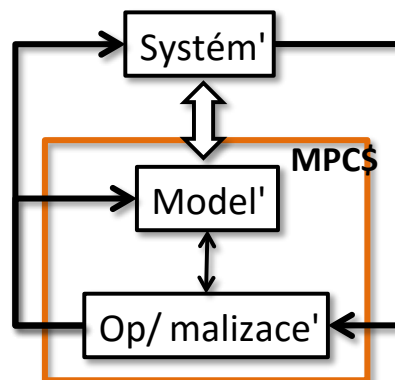
PRINCIP REGULACE MPC

Vytápění budov je velmi konzervativní oblastí, kde se novinky prosazují jen velmi zvolna. V současnosti mají stále drtivou převahu systémy založené na ekvitermních křivkách, podmínkovém řízení nebo klasických termostatech. Nevýhodou těchto systémů je ladění „ad hoc“, tj. bez hlubší znalosti fyzikálních souvislostí regulované budovy. Proto tyto systémy

nejsou schopny např. počítat s předpovědí počasí nebo akumulací schopností budovy. Použití systému regulace vytápění, který by měl znalost o budově jako takové (na základě matematicko-fyzikálního modelu), přinesou výrazné úspory. Ovšem tyto úspory nebudou úsporami v klasickém smyslu, jaké přináší například zateplení fasády – úspora dokonalejším řídicím systémem vlastně nespoří, ale doslova zabraňuje plýtvání, protože se snaží využít všech fyzikálních a stavebních vlastností budovy k tomu, aby se s energií nakládalo hospodárně a netopilo se zbytečně. Jednou z možností je použít regulaci typu MPC (Model-based Predictive Control).

Náš tým v nedávné době přišel s novým typem regulace budov, tzv. MPC (Model-based Predictive Control). MPC se v průmyslu běžně používá od šedesátých let 20. století, kdy tento regulátor vznikl na základě požadavků řízení ropných plošin. Dnes je rozšířený především v chemickém průmyslu, energetice, ale i v automobilech (např. systém ESP je založený na MPC regulaci). Jelikož je základem tohoto regulátoru model řízené soustavy, bylo v minulosti obtížné MPC nasadit na budovy, neboť jejich přesné, dynamické modely, které je zároveň možné v reálném čase počítat, se velmi špatně získávají.

MPC je ze své podstaty dynamický, vícerozměrný regulátor. Jeho regulace je založena na znalosti regulované soustavy, u které optimalizuje řídicí vstupy – nejedná se tedy o klasický regulátor, který by bylo možné reprezentovat např. elektrickým obvodem (jako lze např. PID regulátor postavit z odporů, kondenzátorů a operačních zesilovačů), ale spíše o algoritmus řízení, který ke své funkci potřebuje dostatečné výpočetní kapacity. Výpočetní náročnost MPC regulátoru je dosti vysoká, i když je v posledních letech stále oblíbenější jeho explicitní forma, která sice poskytuje suboptimální řízení, na druhou stranu je možné ji implementovat například do běžných průmyslových počítačů typu PLC.



Obr. 2 Základní princip MPC regulátoru. Podle systému (v našem případě budovy) se nalezne model, který pak slouží jako podklad pro optimalizaci, která hledá takové řízení, aby byla spotřeba budovy minimální a zároveň byl zachován tepelný komfort.

Mezi hlavními výhodami prediktivní regulace typu MPC je možné jmenovat schopnost řídit systém jako celek se všemi jeho vstupy a výstupy najednou (např. všechny měřené teploty a ovládané ventily), možnost principiálně zahrnout technologická omezení řízeného systému (např. dorazy ventilů nebo omezení výkonu kotle) a schopnost efektivně potlačovat náhodné signály, ať už šumy nebo poruchové signály (např. počasí je z hlediska regulace poruchovým signálem). Nevýhodou je pak vysoká výpočetní náročnost a hlavně časová náročnost syntézy regulátoru, která je daná zdlouhavým procesem hledání modelu regulovaného systému.

V roce 2009 použil náš tým pro vytvoření modelu budovy metody statistické identifikace, konkrétně tzv. subspace identifikace, kdy se model sestavuje na základě jednotlivých fyzikálních vlastností, ale komplexně na základě reálných měření. Tato procedura je

jednodušší než tvorba modelu od teoretických, fyzikálních základů, navíc získáme model, který dobře odpovídá reálné budově. Takto vytvoření statistický model jsme poté použili jako základ pro MPC regulátor, který jsme v zimě roku 2010 uvedli do provozu na testovací budově. Díky využití predikce počasí a znalosti dynamiky budovy jsme dosáhli energetických úspor cca 27 % oproti stávající ekvitermní regulaci. Výsledky projektu OptiControl ze stejné doby, prováděného ve spolupráci ETH Zürich a Siemens, předpovídají regulaci MPC dokonce 15 až 40 % úspory oproti klasickým regulacím, dnes se zdá, že dolní hranice úspor je reálně minimálně 20 %.

Díky své prediktivní povaze dokáže MPC velmi dobře regulovat TABS budovy a využít potenciálu jejich tepelné akumulace dlouhých časových konstant. Zajímavým problémem, který dokáže MPC řešit, je také předimenzování TABS instalací. TABS jsou typicky projektovány na RBC regulátory, ale post hoc testování a simulace ukazují, že vzhledem ke specifické schopnosti MPC využít tepelné akumulace budovy mohou být TABS projektovány s až 50% investiční úsporou, než v případě RBC regulátorů [9]. Nevýhodou dosavadních MPC instalací je jejich relativně vysoká investiční cena, avšak orientačně lze říci, že pro budovy s ročním účtem za energie větším než 1 mil. Kč jsou investice potřebné na MPC nižší, než investice do zbytečně předimenzovaného systému HVAC. V praxi je však velkým problémem, že se investiční náklady na MaR (kam rozpočtově MPC patří) jeví vyšší, než je obvyklé, zároveň si ale investor neuvědomuje úspory v ostatních rozpočtových kapitolách.

PRAKTICKÉ VÝSLEDKY Z PROVOZOVNÍ SYSTÉMŮ GEOTABS S REGULACÍ TYPU MPC

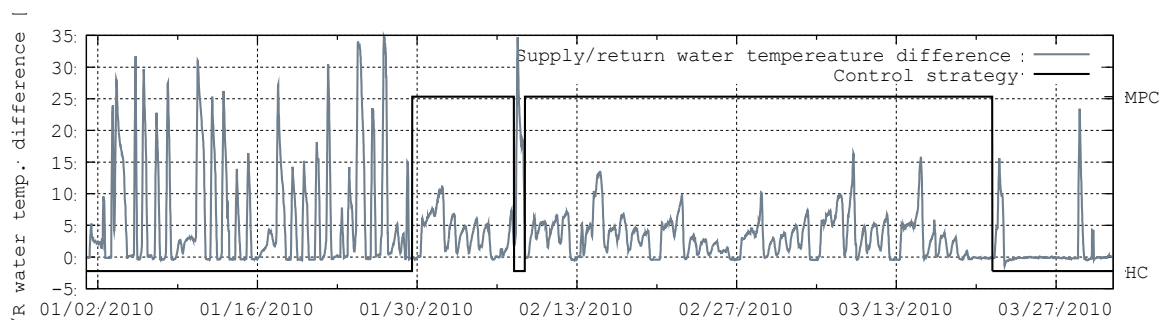
Tab. 1 ukazuje přehled MPC instalací na reálných budovách, které jsou v literatuře popsány. Kromě uvedených příkladů existují i další instalace, která však mají čistě experimentální charakter, a komerční instalace, které se z důvodu obchodního tajemství do literatury nedostaly. Autorům jsou známy minimálně tři další komerční instalace, které v přehledu uvedeny nejsou.

Z tabulky je zřejmé, že ve všech případech MPC regulace přináší provozní úspory, zároveň se potvrzuje teoretický závěr projektu OptiControl (ETH Zürich, [7]), že MPC dokáže v budovách ušetřit 15–40 % energie (ve spojení s tepelným čerpadlem a TABS dle některých zdrojů [2,3] dokonce až 71 %). Kromě úspory energií dochází k lepšímu sledování tepelného komfortu a v neposlední řadě plynulejší chod regulace šetří životnost technologií, například projekt GEOTABS ukázal na příkladu budovy v Hasseltu až řádové snížení regulačních zásahů do dvoucestných ventilů regulujících TABS. Do budoucna je zajímavá také možnost zohlednit různé ceny energií, například v souvislosti s použitím obnovitelných zdrojů energie – první takový příklad můžeme vidět na dostavbě ZŠ Líbeznice, kde MPC regulace bere v úvahu aktuální (dynamické) ceny energií a jejich predikci.

Příklad průběhu akční veličiny je vidět na Obr. 3, kde je zobrazen rozdíl mezi teplotou topné vody a zpátečky v topném okruhu budovy ČVUT v Praze – Dejvicích (odpovídá energii dodané do systému). Je zřetelně vidět, že RBC (v našem případě doplněné ekvitermní regulací) dává do systému daleko vyšší energetické špičky a prudké regulační zásahy, naopak MPC zdaleka nedosahuje takových špiček a průběh regulované veličiny je velmi pozvolný. Během tohoto komparativního experimentu zároveň v sousedním, stavebně identickém bloku budovy probíhala opačná regulace (vždy MPC proti RBC) a vzájemným porovnáním byla v tomto období spočítána úspora MPC proti RBC 23 % energií. Celkem očekávané je pozorování, že MPC šetří především v přechodových obdobích (podzim, jaro), kdy dokáže společně s TABS účinně vyrovnávat výkyvy vnitřních teplot, i když absence sekundárního systému v budově ČVUT neumožňuje vyrovnávat příspěvky přímého oslunění místností.

Tab. 1 Shrnutí implementace MPC regulací pro reálné budovy, stav dle veřejně dostupné literatury.

Místo, rok	Partneři projektu	Typ budovy	Systém	Výsledky	Reference
Praha, 2010	ČVUT, Energocentrum Plus, Energoklastr, Feramat Cybernetics	Univerzitní budova, 70 tis. m ²	Parovod, stropní sálavé topení a chlazení (TABS)	Testováno pouze na vytápění. Úspory 17- 24 % dle použité metodiky na základě celosezónních dat. Snížené energetické špičky, pozvolné pohyby ventilů (prodloužení životnosti). Proměnné ceny energií. Nejdéle fungující MPC v budově.	[4], [5]
Merced (USA), 2010	University of California	Univerzitní knihovna	Chladicí věže, FCU	Testováno pouze na chlazení. Na základě 5- denního provozu odhad vzrůstu COP o 19 %.	[6]
Allschvil (CH), 2012	OptiControl: ETH Zürich, Siemens, Gruner, MeteoSwiss, Energocentrum	Kanceláře, 6 000 m ²	Plynový kotel, chladicí věže, adiabatické chlazení, TABS, CAV	Experimentálně zpracována tepelná pohoda. Roční energetické úspory (na základě simulací) 20 %	[7]
Hasselt (BE), 2012	GEOTABS: KU Leuven, AirDeck, Energocentrum Plus, Feramat Cybernetics	Kanceláře, 7 500 m ²	Tepelné čerpadlo s geotermálním zdrojem, záložní plynový kotel, TABS	Úspory 17 %, výrazné zvýšení komfortu, řádové snížení akčních zásahů (prodloužení životnosti)	[8]
Brusel (BE), 2015	Performance Plus: KU Leuven, 3E	Kanceláře, 960 m ²	Tepelné čerpadlo vzduch-voda, FCU, radiátory	Na základě denních hodnot: úspory nákladů 34 až 40 % (podle metodiky), snížení spotřeby primární energie > 20 %	[9]
Líbeznice, 2016	Feramat Cybernetics, NanoEnergies	Škola, 1000 m ²	Tepelné čerpadlo, geotermální vrty, TABS	Objekt stavěn od začátku jako MPC GEOTABS, proměnné ceny energií, výsledky zatím nevyhodnoceny.	



Obř. 3 Záznam průběhu rozdílu teploty topné vody a zpátečky během komparativního experimentu na budově ČVUT (únor 2010) Od roku 2011 budova funguje výhradně s regulací MPC.

ZÁVĚR

Na základě vyhodnocení fungování MPC regulace, zejména v kombinaci s GEOTABS systémy, ukazuje jasné výhody ve smyslu úspor energií potřebných pro provoz budovy, navíc TABS systémy jsou díky nízkoteplotnímu vytápění a vysokoteplotnímu chlazení vhodné pro použití společně s tepelnými čerpadly, které pak dosahují vyšších COP, než u jiných systémů. Základním problémem tak zůstává přesvědčit investory, že instalace těchto systémů nejen že přináší provozní úspory, ale při správném nastavení parametrů ve fázi projektu nepředstavuje ani výrazně vyšší investiční náklady.

LITERATURA

- [1] CRITTALL R. & CO. LTD. a JOSEPH LESLIE MUSGRAVE. Improved Method or Installation for Heating and Cooling Buildings. Původci: Josef Leslie MUSGRAVE a Richard Godfrey CRITTALL. Velká Británie. United Kingdom Patent 191111396 (A). 9. 11. 1911
- [2] EC Directive 2009/28/EC on the promotion and use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- [3] HELSEN, Lieve, VERHELST, Clara, SOURBRON, Maarten. Grondgekoppelde warmtepompen als bron voor betonkernactivering, *Tijdschrift Veiligheid en Milieu*, 2008, **15**(10).
- [4] PRÍVARA, Samuel, ŠIROKÝ, Jan, FERKL, Lukáš, CIGLER, Jiří. Model Predictive Control of a Building Heating System: The First Experience. *Energy and Buildings*, 2011, **43**(2-3) s. 564–572. ISSN 0378-7788.
- [5] FERKL, Lukáš, ŠIROKÝ, Jan, Ceiling radiant cooling: Comparison of ARMAX and subspace identification modelling methods, *Building and Environment*, 2010, **45**(1), s. 205-212. ISSN 0360-1323.
- [6] MA, Yudong et al., Model Predictive Control for the Operation of Building Cooling Systems. In: *America Control Conference, Baltimore, MD, USA, June 30 - July 2, 2010*. IEEE, 2010, s. 5106–5111. ISBN 978-1-4244-7426-4.
- [7] STURZENEGGER, David et al., Model Predictive Control of a Swiss office building. In: *11th REHVA World Congress Clima*. REHVA, Praha, 2013, s. 3227–3236. ISBN 978-80-260-4001-9.
- [8] VÁŇA, Zdeněk, CIGLER, Jiří, ŠIROKÝ, Jan, ŽÁČEKOVÁ, Eva, FERKL, Lukáš, Model-based energy efficient control applied to an office building. *Journal of Process Control*. 2014, **24**(6), s. 790–797. ISSN 0959-1524.
- [9] DE CONINCK, Roel, HELSEN, Lieve, Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy and Buildings*, 2016, **111**, s. 290–298, ISSN 0378-7788.

NÁVRATNOST FOTOTERMICKÝCH A FOTOVOLTICKÝCH SOLÁRNÝCH SYSTÉMŮ

Alfréd Gottas

THERMO/SOLAR Žiar s.r.o.

gottas@thermosolar.sk

ANOTACE

V rámci dotačných programov na Slovensku (Zelená domácnostiam) i v Českej republike (Zelená úsporám, Kotlíkové dotace) patria medzi podporované technológie aj fototermické a fotovoltaické solárne systémy. Jedným zo zásadných argumentov pre ich predaj je ekonomická návratnosť týchto technológií. Pravidelne sa, či už v marketingových materiáloch, príspevkoch v médiách i na rôznych výstavách môžeme stretnúť s argumentáciou, pri ktorej sa zamieňa želanie za skutočnosť. Investori, resp. koneční zákazníci sú presviedčaní o tom, že návratnosť týchto technológií je násobne kratšia, než je reálne. S týmto javom sa stretávame predovšetkým v oblasti využitia fotovoltaických panelov, kde je ešte stále veľký priestor na zahmlievanie reality a uvádzanie zákazníka, či už vedome alebo z dôvodu neznalosti, do omylu. Cieľom tohto príspevku je jednoduchou formou vysvetliť, aké sú limity návratnosti uvedených technológií a aké argumenty a „argumenty“ sa v praxi používajú.

ÚVOD

K zostaveniu tohto príspevku nás motivoval článok uverejnený v slovenskom denníku Pravda dňa 12.1.2016 (viz Obr. 1), ktorý bol jedným z prvých obdobných materiálov, dostupných v médiách, na internete a bohužiaľ aj na rôznych konferenciách.

Investícia do fotovoltaického panela sa vráti už za štyri roky

#fotovoltaika

mar, Pravda | 12.01.2016 06:00

Za 25 rokov možno na 2,5 kW fotovoltaickej elektrárni so započítaním štátnej dotácie ušetriť až 9 000 eur, hovorí Peter Chochol, konzultant pre energetiku zo spoločnosti Atos.

Obr. 1 Unikátna návratnosť fotovoltaických systémov/panelov v slovenských podmienkach.

Z textu tohto príspevku nie je jasné, či autor hovorí o návratnosti celého systému, alebo iba fotovoltaických panelov, ktoré tvoria zvyčajne 35 – 50 % ceny on-grid systému, resp. 25 – 40 % ceny hybridného systému s batériami. V každom prípade tvrdenie o 4 ročnej návratnosti je skôr zavádzajúce, ako odvážne. V ďalšom sa budeme venovať jednoduchým schémam určenia návratnosti pri najpoužívanejších fotovoltaických a termických solárnych systémoch.

Ďalším dôležitým aspektom je znižovanie výkonu použitých technológií v čase, pretože predovšetkým pri fotovoltaických paneloch sa zvyčajne neuvažuje so stratou výkonu počas ich životnosti napriek tomu, že aj kvalitné fotovoltaické panely stratia počas 25 – 30 rokov aj viac ako 20 % výkonu. Pri fototermických paneloch je tento pokles výkonu výrazne menší.

Pre určenie návratnosti potrebujeme poznať predovšetkým ceny nadobúdanej technológie, jej **reálny** energetický zisk a v prípade termických systémov aj cenu energií, ktoré tento systém nahrádza. Podstatné je aj to, že sa musia porovnávať a vyhodnocovať technológie tak, ako sa predávajú, nie akési nereálne teoreticky zostaviteľné, avšak nepredávané resp. nepredateľné systémy.

NÁVRATNOSŤ FOTOVOLTICKÝCH SYSTÉMOV

V prípade fotovoltaických systémov je potrebné vziať do úvahy cenu predávaných systémov, reálnu výrobu elektriny systémom, stupeň vlastného využitia vyrobenej elektrickej energie a cenu nakupovanej elektrickej energie, ktorú systém nahrádza. Nie je dôležité, koľko energie vyrobí samotný panel, ale celý systém, pretože

- fotovoltaické panely sú zaťažené nasledovnými stratami: vplyvom teploty (cca 0,5 %/°C), vplyvom odrazu (do 3 % celkového výkonu panelu), vplyvom znečistenia (naklonené až 10 %, vodorovné do 25 %)
- kabeláž fotovoltaického systému medzi panelmi a strieďačom je zaťažená stratou do 3 % celkového výkonu poľa
- solárny regulátor má stratu 15 – 25 %, resp. MPPT menič do 5 % celkového výkonu poľa
- straty akumulátora sú na úrovni približne 10 % vyrobenej energie

Paušálne je možné uvažovať, že v prípade použitia solárneho regulátora sú straty fotovoltaického systému do 33 %, v prípade použitia MPPT meniča do 18 % vyrobenej energie. V prípade priameho pripojenia fotovoltaických panelov do ohrievača teplej vody môžu tieto straty za istých okolností dosiahnuť aj viac ako 40 %.

Návratnosť fotovoltaických systémov na výrobu elektriny – priame pripojenie do siete (on-grid)

Tieto systémy patria medzi najčastejšie v súčasnosti inštalované, prípade slovenského programu Zelená domácnostiam tvoria viac ako 90 % inštalácií. Počítajme spoločne:

Tab. 1 Nesprávne určené parametre návratnosti on-grid systému

Spotreba elektriny domu	5000 kWh
Inštalovaný systém	2,5 kW on-grid
Cena vrátane DPH:	4.980 EUR
Združená cena EE (EUR/kWh) ¹	0,118 EUR/kWh
Výroba elektriny (bez uváženia zníženia výkonu panelov)	2 750 kWh
Vlastná spotreba	100 %
Teoretická úspora	324,50 EUR
Teoretická minimálna návratnosť	15,35 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	2550,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	2490,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	7,67 roka

Údaje v Tab. 1 sú 2 - 4-násobkom hodnôt uvedených v spomínanom článku, sú však predovšetkým nerealistické a na rodinnom dome nedosiahnuteľné, pretože uvažujú s vlastnou spotrebou na úrovni 100 %. Práve v určení miery vlastnej spotreby objektu spočíva väčšina nepresností resp. zavádzajúcich tvrdení o skutočnej návratnosti tohto typu systémov. V Tab. 2 sú uvedené realistické dostupné údaje o skutočnej miere vlastného využitia vyrobenej energie a k nim prislúchajúcej návratnosti.

Tab. 2 Parametre návratnosti on-grid systému podľa údajov z rôznych internetových zdrojov

Vlastná spotreba	Zdroj	Návratnosť bez podpory (roky)	Návratnosť s podporou (roky)
20 %	www.viessmann.de	76,75	38,35
33 %	www.eon.de	46,52	23,24
40 %	www.sma.de	38,38	19,18
60 a viac %	bežne dostupný údaj na internete v SR a ČR	25,58	12,78

Pokiaľ neberieme do úvahy hodnoty okolo 20 %, ktoré sa vzťahujú na systémy bez akejkoľvek optimalizácie spotreby a zmeny návykov, najbližšie sa realite približujú údaje nemeckého koncernu E.ON, pochádzajúce z reálnych meraní výroby a spotreby elektrickej energie typových domov osadených fotovoltaickými systémami.

Je možné sa dostať aj k lepšej návratnosti on-grid systémov, pokiaľ dôjde k radikálnemu prispôsobeniu sa správania užívateľov výrobe elektriny, nielen inštaláciou spotrebičov s odloženým štartom, ale aj „žitím so slnkom“ t.j. aj neprogramovateľné energeticky náročné spotrebiče sa využívajú v čase prítomnosti obyvateľov v súlade s intenzitou slnečného žiarenia napr. pečenie a varenie vtedy, keď je dostatočné slnečné žiarenie. Ani takýmto spôsobom však nie je možné dostať sa s vlastným využitím výrazne cez 50 %.

Argument, že klimatizované domy „všetko vyriešia“, tiež nie je úplne správny – pomôžu, ale v prípade zvýšenia teploty panelov o 40 °C klesne ich výkon o približne 20 % a nie je isté, že v prípade potreby väčšieho príkonu pre klimatizačné zariadenie bude výkon systému postačujúci.

Z hľadiska využitia jednofázových on-grid systémov, čo je najväčšia skupina inštalovaných systémov, sú dve zásadné, niekedy veľmi málo zdôrazňované prekážky:

- členovia štandardnej rodiny sú minimálne počas piatich dní v týždni v práci resp. v škole a inštalovaný príkon spotrebičov s trvalou spotrebou resp. odloženým štartom nie je dostatočný na to, aby spotreboval vyrobenú energiu
- pri jednofázovom systéme často dôjde k situácii, že vo fáze, do ktorej systém vyrába, je prebytok, t.j. vyrobená energia preteká do siete a ďalšími fázami tečie do domu, t.j. nakupuje sa. Tomu sa dá vyhnúť, pokiaľ je nainštalovaný elektromer so započítavaním medzi fázami v reálnom čase, ale nie každá distribučná spoločnosť ich štandardne montuje. Alternatívnym, veľmi nepohodlným a obmedzujúcim riešením je zapojenie maximálneho množstva spotrebičov (podľa dimenzie ističa) pomocou predlžovacích

káblov na fázu, do ktorej fotovoltika vyrába elektrinu. Toto by však urobil naozaj iba málokto.

Z horeuvedených argumentov vyplýva, že reálna návratnosť on-grid systému v našich podmienkach je bez uváženia dotácie okolo 40 rokov a s uvážením dotácie približne 20 rokov, čo je približne 5 krát viac ako uvádza spomenutý článok.

Návratnosť fotovoltických systémov na výrobu elektriny – hybridné systémy (systémy s batériou)

Pokiaľ budeme postupovať analogicky ako v predchádzajúcej kapitole, dostaneme sa k číslam uvedeným v Tab. 3.

Tab. 3 Nesprávne určené parametre návratnosti hybridného systému

Spotreba elektriny domu	5000 kWh
Inštalovaný systém (Pb akumulátory)	2,5 kW /5 kWh
Cena vrátane DPH:	8.140 EUR
Združená cena EE (EUR/kWh) ¹	0,118 EUR/kWh
Výroba elektriny (bez uváženia zníženia výkonu panelov)	2 750 kWh
Vlastná spotreba	100 %
Teoretická úspora	324,50 EUR
Teoretická minimálna návratnosť	25,08 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	3450,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	4690,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	14,45 roka

Opäť je potrebné vziať do úvahy údaje o reálnej výške vlastnej spotreby, použité sú údaje z rovnakých zdrojov ako v prípade on-grid systému s nasledovnými výsledkami:

Tab. 4 Parametre návratnosti hybridného systému podľa údajov z rôznych internetových zdrojov

Vlastná spotreba	Zdroj	Návratnosť bez podpory (roky)	Návratnosť s podporou (roky)
50 %	www.viessmann.de	50,16	28,90
60 %	www.eon.de	41,80	24,08
75 a viac %	bežne dostupný údaj na internete v SR a ČR	33,44	19,27

Tu by bolo na mieste zhodnotiť, ako reálnu návratnosť systémov ovplyvní cena a životnosť akumulátorov. V Tab. 3 uvedený systém je osadený lacnejšími Pb akumulátormi, v prípade použitia LiFePO akumulátorov by sa výrazne zvýšila jeho cena i úžitkové vlastnosti, nezvýšila by sa však výška podpory. Skúsenosti bohužiaľ hovoria, že sa zvyčajne inštalujú systémy lacnejšie, bez ohľadu na ich skutočné úžitkové vlastnosti.

Návratnosť fotovoltických systémov na ohrev vody

Vzhľadom k tomu, že k najjednoduchšiemu zapojeniu týchto systémov nie sú dostupné nezávislé merania akreditovaných skúšobní, ale iba viac či menej relevantné merania resp. marketingové materiály výrobcov, posúdime ich analogicky s fotovoltickými systémami. Pre jednoduchosť bude uvažované so 100% účinnosťou premeny energie vstupujúcej do bojlera na teplo.

Tab. 5 Nesprávne určené parametre návratnosti systému ohrevu vody

Inštalovaný systém	2 kW / 120 l
Cena vrátane DPH:	4.200 EUR
Združená cena EE (EUR/kWh) ¹	0,118 EUR/kWh
Výroba elektriny (údaj výrobcu)	2400 kWh
Vlastná spotreba	100 %
Teoretická úspora	283,20 EUR
Teoretická minimálna návratnosť	14,83 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	2100,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	2100,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	7,41 roka

Na hore uvedenej kalkulácii je zjavné, že je precenená výroba elektrickej energie (1200 kWh z 1 kWp ročne) a vôbec nie sú uvažované straty v kabeláži a MPPT resp. solárnom regulátore. Tieto zanedbania zlepšili návratnosť teoreticky o 15 – 20 %. Problém je však v niečom inom, v tomto prípade je predovšetkým dôležité, koľko z vyrobenej energie je možné spotrebovať na ohrev vody. V letnom období bude vyrobené viac energie, ako vieme využiť, v zimnom období zas menej a hodnotiť ročný priemer je preto zavádzajúce a nepresné.

Tab. 6 Parametre návratnosti fotovoltického systému na ohrev vody podľa údajov z rôznych internetových zdrojov

Využitelná energia zo systému (kWh/rok) [1]	Spôsob zapojenia	Návratnosť bez podpory (roky)	Návratnosť s podporou (roky)
1325	s MPPT	26,86	13,43
803	bez MPPT	44,32	22,16
1000	s MPPT, predohrev zo siete	35,59	17,79
435	bez MPPT, predohrev zo siete	81,82	40,91

Z uvedeného vyplýva, že reálna návratnosť je minimálne 3 - 5 krát dlhšia ako sa uvádza v marketingových materiáloch. O tom, že to nie je nereálne, svedčia aj údaje uvedené na Obr. 2. Výroba energie systémom s 2 kWp panelmi je dimenzovaná na lokalitu Sliac (SR) s výsledkom 2209 kWh/ročne. Potreba na ohrev teplej vody je 2610 kWh/ročne. Pokiaľ by bola voda hriata iba fotovoltickým systémom, boli by prebytky energie vo výške 346 kWh a potreba na ohrev zo siete 616 kWh. Ak je však prioritným zdrojom sieť, voda sa zo siete nahrieva na 45 °C (o 30 K z 15 na 45 °C) a potom sa dohrieva energiou z fotovoltického

systemu (o 30 K z 45 °C na 75 °C), spotreba zo siete je 1305 kWh a prebytok výroby z fotovoltiky je 1007 kWh. Vlastná spotreba je potom iba 54,40 % a pokrytie potrieb tepla na ohrev na úrovni 46,04 %.

Výroba - reálne			Virtuálny stav - ide to podľa prospektu				Reálny stav - 15°->45° - 230, 45°->75°FV				
FVZ 2 kWp - Fronius			Potreba	Nedostatok	Prebytok	Použiteľné	Potreba sieť	Potreba PV	Nedostatok	Prebytok	Použiteľné
Jan	84	3.80%	217.50	-133.50		84.00	108.75	108.75	-24.75		84.00
Feb	122	5.52%	217.50	-95.50		122.00	108.75	108.75		13.25	108.75
Mär	194	8.78%	217.50	-23.50		194.00	108.75	108.75		85.25	108.75
Apr	249	11.27%	217.50		53.03	217.50	108.75	108.75		140.25	108.75
Mai	269	12.18%	217.50		74.76	217.50	108.75	108.75		160.25	108.75
Jun	279	12.63%	217.50		85.62	217.50	108.75	108.75		170.25	108.75
Jul	282	12.77%	217.50		88.88	217.50	108.75	108.75		173.25	108.75
Aug	237	10.73%	217.50		39.99	217.50	108.75	108.75		128.25	108.75
Sep	204	9.23%	217.50		4.14	217.50	108.75	108.75		95.25	108.75
Okt	150	6.79%	217.50	-67.50		150.00	108.75	108.75		41.25	108.75
Nov	71	3.21%	217.50	-146.50		71.00	108.75	108.75	-37.75		71.00
Dez	68	3.08%	217.50	-149.50		68.00	108.75	108.75	-40.75		68.00
	2209	100.00%	2 610.00	-616.00	346.43	1 994.00	1 305.00	1 305.00	-103.25	1 007.25	1 201.75
			Vlastná spotreba:			90.27%	Vlastná spotreba:				54.40%
			Pokrytie:			76.40%	Pokrytie:				46.04%

Obr. 2 Výroba a spotreba energie fotovoltického systému určená na ohrev teplej vody (PV-Sol, T-Sol)

Z hore uvedených čísiel sa prikláňame k názoru, že reálna návratnosť akýchto systémov po započítaní dotácie 18 - 22 rokov, čo je v súlade s údajmi uvedenými v Tab. 6.

NÁVRATNOSŤ SOLÁRNYCH TERMICKÝCH SYSTÉMOV

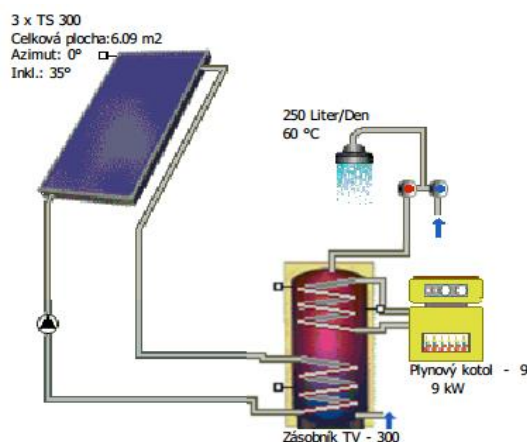
V prípade solárnych termických môžeme postupovať obdobne, s prihliadnutím na závislosť medzi spotrebou a výrobou tepla týmito systémami.

Tab. 7 Návratnosť solárneho termického systému (nahrádzaný zdroj elektrina)

Inštalovaný systém: 3 x TS300 + 300 l bojler	4050,00 EUR	4050,00 EUR
Energetický zisk:	3 200 kWh	2 740 kWh
Združená cena EE (EUR/kWh) ¹	0,118 EUR/kWh	0,118 EUR/kWh
Vlastná spotreba	100 %	100 %
Úspora	377,60 EUR	323,23 EUR
Návratnosť bez zarátania podpory	10,73 roka	12,53 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	1750,00 EUR	1750,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	2300,00 EUR	2300,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	6,09 roka	7,12 roka

V Tab. 7 je uvedené porovnanie návratnosti solárnych termických systémov s výrobou energie 3200 kWh/rok a 2740 kWh/rok t.j. 525 kWh a 450 kWh na m² kolektorovej plochy. Správne navrhnutý termický systém by sa mal bez problémov pohybovať medzi týmito dvoma hodnotami. Pokiaľ by sme však systém poddimenzovali a uvažovali s dennou spotrebou teplej vody o 100 litrov vyššou, dostali by sme sa k ročnej výrobe energie 3500 kWh a návratnosti 9,8 / 5,6 roka. Ani táto hodnota nie je v prípade viacpočetnej rodiny nedosiahnuteľná.

V prípade solárnych termických systémov je spotrebovaná všetka vyrobená energia, zásadnou otázkou je však, aký je rozdiel medzi vyrobenou a vyrobiteľnou energiou, t.j. či bol systém správne navrhnutý, či nie je zbytočne predimenzovaný (horšia návratnosť), alebo nie je nevedome poddimenzovaný (lepšia návratnosť, nižší celkový energetický zisk).



Výsledky ročnej simulácie

Výkon inštalovaných kolektorov:	4.26 kW	
Celková plocha inštalovaného kolektora:	6.09 m ²	
Plocha ožiarenia kolektora (absorpčná plocha):	7.34 MWh	1 373.61 kWh/m ²
Energia získaná z kolektorov:	3.43 MWh	642.40 kWh/m ²
Energia získaná z kolektorového okruhu:	3.20 MWh	599.99 kWh/m ²
Dodávka energie na prípravu TV:	5.49 MWh	
Energia zo solárneho systému na ohrev vody:	3.2 MWh	
Energia z prídavného vykurovania:	2821.73 kWh	
Úspora Zemný plyn H:		479.0 m³
Zamedzenie emisiám CO₂:		1 012.95 kg

Obr. 3 Výpočet výroby energie a úspory v programe T-Sol (Valentin Software GmbH)

V prípade solárneho termického systému, nahrádzajúceho plynový ohrev, je možné počítať návratnosť na základe úspory zemného plynu (Tab. 8) alebo cez ekvivalent vyrobenej energie v cene plynu (Tab. 9). V Nemecku sa bežne používa prvý spôsob, nám sa však javí ako korektnejší spôsob druhý, napriek tomu, že dáva horšie výsledky.

Tab. 8 Návratnosť solárneho termického systému (nahrádzaný zdroj plyn - m³)

Inštalovaný systém: 3 x TS300 + 300 l bojler	4050,00 EUR
Energetický zisk:	3 200 kWh
Združená cena plynu (EUR/kWh) ³	0,059 EUR/kWh
Úspora plynu	479,0 m ³
Priemerné spaľovacie teplo kWh/m ³	10,55
Vlastná spotreba	100 %
Úspora	298,15 EUR
Návratnosť bez zarátania podpory	13,58 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	1750,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	2300,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	7,71 roka

Tab. 9 Návravnosť solárneho termického systému (nahrádzaný zdroj plyn - kWh)

Inštalovaný systém: 3 x TS300 + 300 l boiler	4050,00 EUR
Energetický zisk:	3 200 kWh
Združená cena plynu (EUR/kWh) ³	0,059 EUR/kWh
Vlastná spotreba	100 %
Úspora	188,80 EUR
Návratnosť bez zarátania podpory	21,45 roka
Výška podpory (Zelená domácnostiam – max. 50 %)	1750,00 EUR
Cena systému po zarátaní podpory	2300,00 EUR
Návratnosť po zarátaní podpory	12,18 roka

ZÁVĚR

Fototermické a fotovoltické solárne systémy sú jednou z mála investícií, ktoré sa vrátia. V niektorých prípadoch aspoň časť, v iných, ako bolo ukázané, aj násobok vložených investícií. Stále však medzi nimi existujú zásadné rozdiely.

Ekonomika je jednoznačne na strane solárnych termických systémov, ktoré sú schopné v optimálnom prípade priniesť úsporu vo výške až 4 - 5 násobku vlozenej investície. Na druhej strane však produkujú „iba“ teplo. Pri fotovoltických systémoch je potrebné rátať s tým, že prinesú úsporu približne vo výške investovaných prostriedkov. Na druhej strane však produkujú čistú energiu vo forme elektriny a zabezpečujú väčšiu nezávislosť investorov na monopolných dodávateľoch energií. Najhoršie z porovnania návratnosti vychádzajú systémy na fotovoltický ohrev teplej vody, čo je do značnej miery logické – produkujú elektrinu s cca 5 násobne nižšou účinnosťou ako fototermické systémy a premieňajú ju opäť „iba“ na teplo. Tomuto rozumie nielen odborná, ale i laická verejnosť, čo je zrejme z podielov inštalácie jednotlivých technológií v rámci podporného programu Zelená domácnostiam, kde fotovoltická príprava teplej vody tvorí nepodstatný podiel realizácií.

Na druhej strane dochádza ešte stále k preceňovaniu relatívne mladej fotovoltickej technológie, čo môže byť v priebehu ďalších rokov problémom, predovšetkým v prípade vlastníkov on-grid systémov. Problém podľa nášho názoru vznikne v priebehu budúceho roka, keď obdržia vyúčtovacie faktúry za dodávku elektrickej energie a zistia, aká je naozaj reálna miera vlastnej spotreby, skutočná úspora a tým pádom aj návratnosť takejto investície. Bohužiaľ je vysoko pravdepodobné, že bude výrazne nižšia, než argumentovali predajcovia a inštalatéri, keď získavali týchto zákazníkov.

Myslíme si že kým nedôjde k ďalšiemu výraznému zníženiu cien fotovoltických panelov a predovšetkým akumulátorov, stále bude platiť rokmi overená rovnica:

Fotovoltika = Nezávislosť

Termika = Úspora

ODKAZY

- [1] MATUŠKA, T., ŠOUREK, B. Detailní analýza ohřevu vody fototermickými a fotovoltickými kolektory, In: iDB Journal. 2015, roč. V, č. 5, s. 34-37. ISSN 1338-3337.

TEPELNÉ VLASTNOSTI HORNIN A JEJICH VLIV NA VYUŽITÍ ZEMNÍHO TEPLA

Michal Havlík, Pavel Cihelka,

Stavební geologie – Geosan, s.r.o.

havlik@sggeosan.cz, cihelka@sggeosan.cz

ÚVOD

V oblasti primárních okruhů tepelných čerpadel typu země-voda se zemními vrty dochází ke zvýšenému zájmu ze strany investorů o využití těchto systémů obnovitelných zdrojů v rámci větších staveb. Jedná se zejména o přípravu projektové dokumentace ať již privátních developerských projektů, tak i veřejných budov, financovaných hlavně z evropských peněz v rámci operačních programů. Nejen v Praze vznikají záměry, které obsahují více než 100 hlubinných vrtů na jedné lokalitě. Tento trend jde v souladu s oživující se ekonomikou a zvyšující se stavební činností. Jde však o to, aby tento zvyšující se zájem nezůstal pouze na papíře ve formě nenaplněných studií, mnohdy z důvodu nedostatečně odborné přípravy projektu. Zájem o získávání tepla a chladu pomocí vrtů je možno podpořit zejména kvalitní projektovou přípravou a dostatečným geologickým průzkumem lokality již v rámci přípravy akce včetně měření tepelných vlastností hornin přímo na místě.

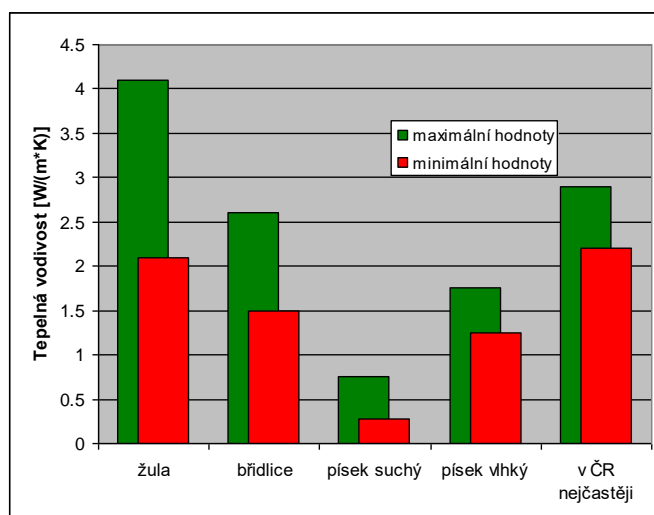
TEPELNÉ VLASTNOSTI HORNIN A VLIV NA VYUŽITÍ ZEMNÍHO TEPLA

Tepelná energie vyzařovaná sluncem a tepelná energie, která je předávána do atmosféry zemským povrchem, je rozhodující pro teploty do tzv. indiferentní hloubkové úrovně, tj. do hloubky cca 15 m pod povrchem terénu. Pod touto úrovní se již na teplotě neprojevuje vliv ročních období a rozhodující je zde přísun vnitřního tepla Země, přičemž platí, že minimálně pro kontinentální kůru je hlavním producentem tohoto tepla rozpad radioaktivních prvků. Zatímco v hloubce kolem 20 m pod terénem je teplota cca 10 °C, směrem do hloubky teplota každých 30 m stoupá o cca 1 °C. Mluvíme o tzv. geotermickém gradientu. Znamená to, že v hloubce kolem 100 m je teplota přibližně o 3 °C vyšší, než je střední roční teplota krajiny.

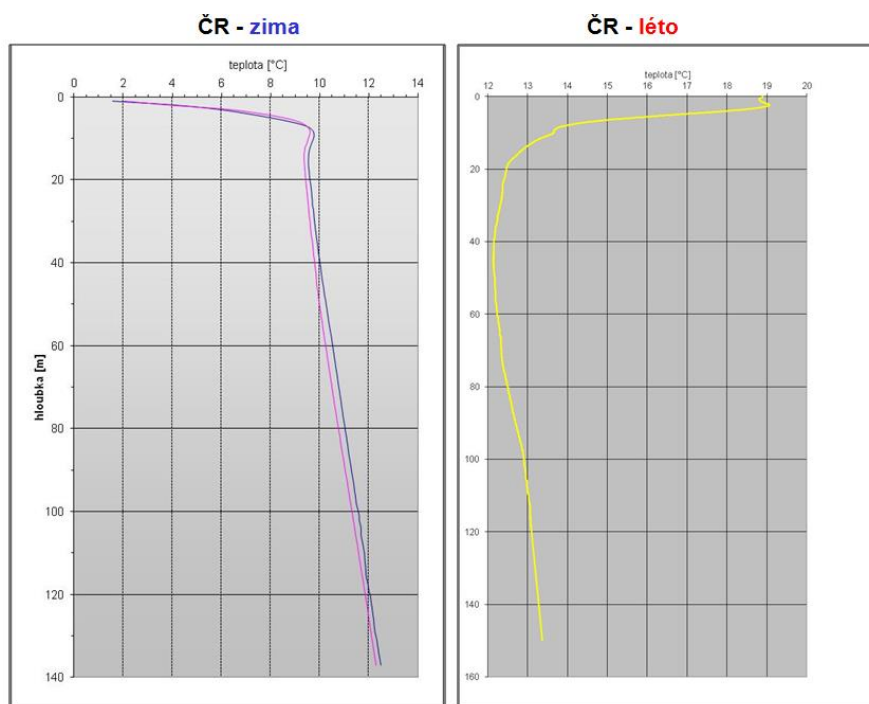
Hlavní parametry hornin důležité pro získávání zemního tepla uvádí tabulka 1 a rozsah hodnot vybraných parametrů podle měření prováděných firmou SG-Geosan ukazují Obr. 1 a Obr. 2

Tab. 1 Hlavní tepelné parametry horninového masivu

Parametr	Jednotky
Tepelná vodivost hornin λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Průměrná teplota horninového masivu	[°C]
Teplotní profil na lokalitě/gradient	[°C /100 m]
Tepelný odpor vrtů R_b	[m.K.W ⁻¹]



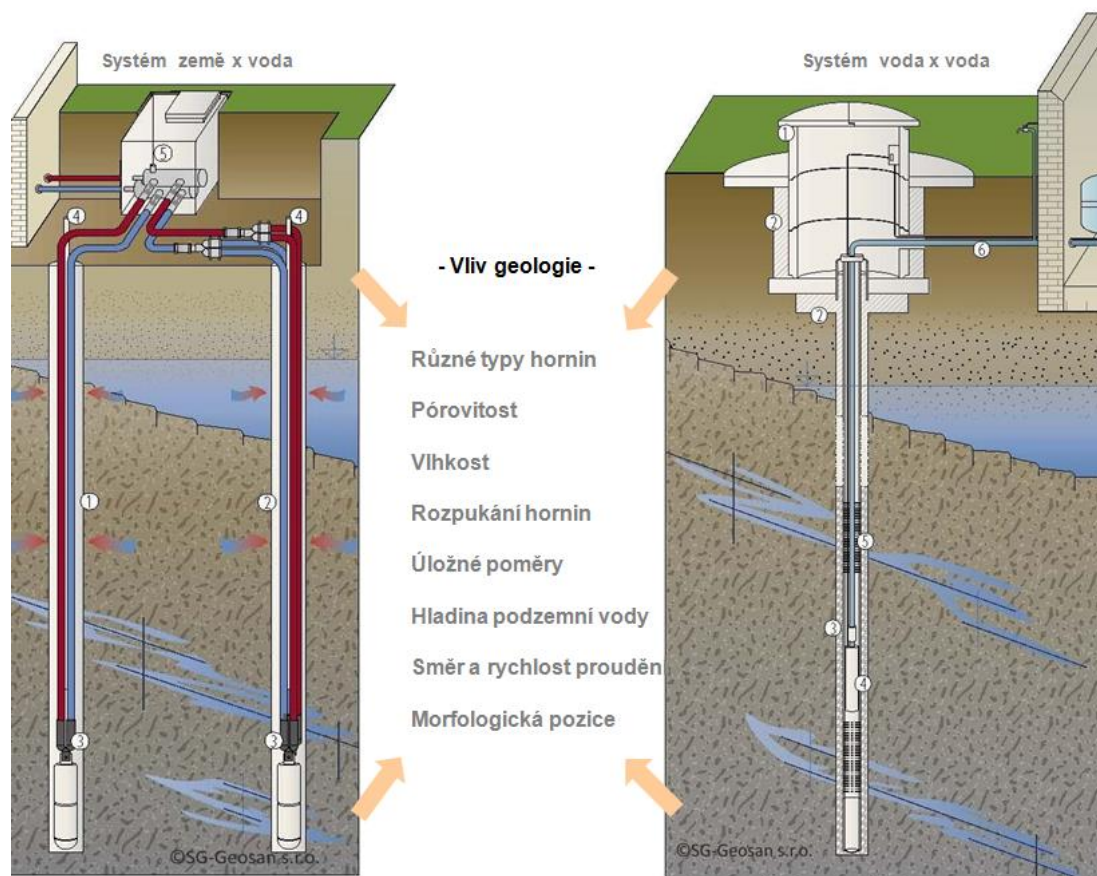
Obr. 1 Rozsah hodnot tepelné vodivosti různých hornin v ČR (zdroj: Stavební geologie-Geosan s.r.o.)



Obr. 2 Typické teplotní profily hornin z měření v ČR (zdroj: Stavební geologie - Geosan s.r.o.)

Nejčastěji používané systémy tepelných čerpadel k získávání zemského tepla jsou zemní tepelné sondy (s vestavenými vertikální kolektory). Zemní tepelné sondy mohou být používány k vytápění a chlazení budov, popř. k ukládání tepelné energie. Tyto sondy se instalují do vrtů o hloubkách převážně 50 – 150 m, výjimečně mohou být ukládány i v hloubkách menších nebo větších. Obvyklý průměr vrtů ve svrchní části horninového souboru v oboru nezpevněných sedimentů je cca 160 - 180 mm, v níže ležících skalních nebo podskalních horninách cca 120 až 140mm. Nejčastěji používaným typem sondy je dvojitá sonda „U“ skládající se ze spojené dvojice umělohmotných potrubních smyček ve tvaru „U“. Běžně jsou používány i jednoduché sondy „U“, které se skládají pouze z jedné smyčky umělohmotné trubky. Podmínkou dobrého přenosu tepla na jedné straně a potřebou oddělit od sebe jednotlivé zvodnělé polohy horninového souboru a stabilizovat stěny vrtu je úprava zaplášťového

prostoru, tj. výplň mezikruží mezi stěnou vrtu a vertikálním kolektorem vhodným materiálem. Obvykle se používá směs bentonitu a cementu, v závislosti na místních geologických podmínkách je na výplň mezikruží možné i použití jiných typů materiálů, zejména v kombinaci s případnou potřebou etážového vrstvení zaplášťových vrstev. Ojedinele jsou zatím používány a koaxiální sondy, které se skládají z vnitřní a vnější trubky či jiné typy kolektorů. Speciální případ vrtaných tepelných sond představují tzv. energetické piloty. Jedná se o základové piloty, které jsou vystrojeny uvnitř uloženými plastovými trubkami, které slouží jako tepelné výměníky.



Obr. 3 Vliv geologických podmínek na zemní vrty pro tepelná čerpadla

GEOLOGICKÉ PRŮZKUMY A MĚŘENÍ

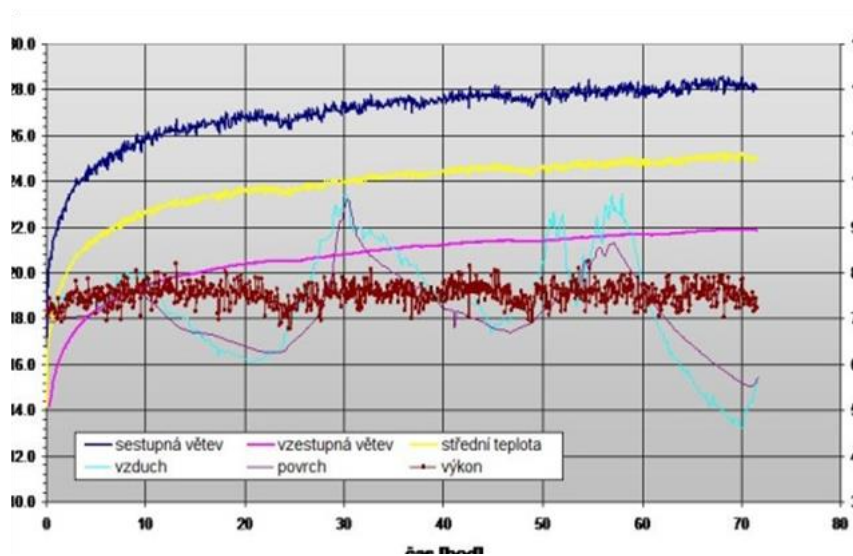
Ve vztahu k účelu vrtů je třeba v některých případech ověřit podmínky výtěžnosti zemského tepla formou teplotních testů, nebo vydatnosti odběrového objektu.

Nejsou-li dostatečně známy údaje o výskytu podzemní vody, vlivu vrtů na okolí nebo údaje o výtěžnosti zemského tepla dostatečně známy, je třeba před projekcí vrtů provést ve smyslu vyhlášky č. 501/2006 Sb. geologický průzkum. V daném případě představuje tento průzkum činnost prováděnou dle zákona č. 62/1988 Sb. a zahrnuje zpravidla vrtnou sondáž a soubor doprovodných prací jako jsou teplotní testy, čerpací zkoušky, režimní měření hladiny podzemní vody, apod. Při vrtné sondáži se budují průzkumné vrty, které jsou určeny pouze k účelu definovanému zákonem č. 62/1988 Sb., tj. pro geologický výzkum nebo geologický průzkum. Jejich projektování, provádění a vyhodnocování musí být plně v souladu s tímto zákonem a prováděcími vyhláškami uvedenými v úvodu tohoto doporučení. Po ukončení průzkumu se vrty odborně likvidují nebo zabezpečují, a to na základě projektu likvidačních nebo zajišťovacích prací.

Pouze v případě, že vrty provedené v rámci geologického průzkumu jsou příhodně umístěny, mají vyhovující technické parametry a výtěžnost zemského tepla se ukáže být dostatečná, je možno tyto průzkumné vrty zabezpečit a upravit k dalšímu využití. K dalšímu využití je nutné územním projednání, stavební povolení a povolení k nakládání s vodami. Tato možnost musí být uvedena již v projektu průzkumných prací.



Obr. 4 Měření tepelných parametrů hornin v terénu tzv. TRT test (zdroj: Stavební geologie - Geosan s.r.o.)



teplotní profil na lokalitě/gradient [°C / 100 m]	1,3
průměrná teplota horninového masivu [°C]	14,15 °C
tepelná vodivost hornin λ [W * m ⁻¹ * K ⁻¹]	2,6
tepelný odpor vrtu R_b [K * (W / m) ⁻¹]	0,075

Obr. 5 Výsledky terénních měření



Obr. 6 Kontrola injektáže vrtů pro tepelná čerpadla, měření tepelných odporů vrtů (zdroj: Stavební geologie - Geosan s.r.o.)

STANOVENÍ MĚRNÉHO VÝKONU JÍMÁNÍ

Pro návrhové parametry zemních tepelných sond pro tepelné čerpadlo systému země-voda je důležitou veličinou tzv. **měrný výkon jímání**. Ten udává kolik W výkonu lze získat z jednoho metru délky vrtu. Je významně závislý na charakteru prostředí, v němž jsou zemní sondy vybudovány a pohybuje se v širokém rozmezí od 30 do 100 W/m. Konkrétní hodnotu měrného výkonu jímání volí projektant podle výsledků geologického průzkumu.

Odhady měrného výkonu jímání je možné použít pouze pro jednoduché aplikace, tj. pro menší zařízení s topným výkonem do 30 kW bez chlazení. U větších aplikací se používají konkrétní hodnoty tepelné vodivosti hornin na pozemku zjištěné geologickým průzkumem a měřením popsáném v předchozích kapitolách.

Plošný kolektor

Podloží	možný odběr	
	pro 1.800 hodin provozu	pro 2.400 hodin provozu
suchá nesoudržná zemina	10 W/m ²	8 W/m ²
soudržné zeminy vlhké (stěrky a písky)	20 – 30 W/m ²	16 – 24 W/m ²
protékající spodní voda stěrky a písky	40 W/m ²	32 W/m ²

Směrné hodnoty pro návrh zemního plošného kolektoru dle německé směrnice VDI 4650

Vrt s geotermální vertikální sondou

podloží	možný odběr	
	pro 1.800 hodin provozu	pro 2.400 hodin provozu
<i>obecné směrné hodnoty:</i>		
horší podloží (suché sedimenty)($\lambda < 1.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
normální pevná hornina nebo vodou nasycená sediment ($\lambda = 1.5 - 3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
pevná hornina s vysokou tepelnou vodivostí ($\lambda > 1.5 - 3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{L)}$)	84 W/m	70 W/m
<i>horniny:</i>		
suché štěrky a písky	< 25 W/m	< 20 W/m
zvodnělé štěrky a písky	65 – 80 W/m	55 – 65 W/m
protékající spodní voda stěrky a písky	80 – 100 W/m	80 – 100 W/m
vlhký jíl	35 – 50 W/m	30 – 40 W/m
masivní vápenec	55 – 70 W/m	45 – 60 W/m
pískovec	65 – 80 W/m	55 – 65 W/m
kyselé vyvřeliny (Žula)	65 – 85 W/m	55 – 70 W/m
zásadité vyvřeliny (Čedič)	40 – 65 W/m	35 – 55 W/m
Rula	70 – 85 W/m	60 – 70 W/m

Směrné hodnoty pro návrh hlubinného dle německé směrnice VDI 4650

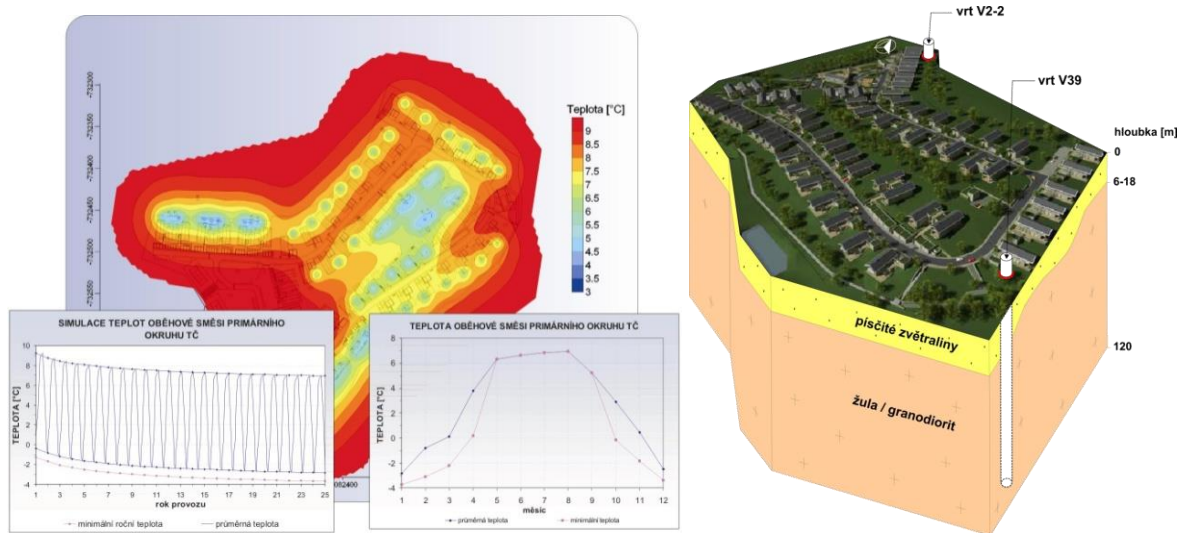
Hodnoty se mohou výrazně lišit na základě lokálního ztvárnění horniny jako pukliny a zvětrání.

Obr. 7 Orientační údaje měrného výkonu jímání jednotlivých litologických typů hornin v ČR

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PŘENOSU TEPLA V HORNINÁCH

Při projektování a zejména při legislativním procesu povolování zemních sond pro tepelná čerpadla často vyvstává nutnost posouzení a přesné kvantifikace změn proudění podzemních vod a šíření teplotních změn do širšího okolí. To je složitý úkol, který většinou není možné

řešit pouze odbornými odhady. K tomuto účelu se u větších aplikací používají komplexní 3D matematické modely proudění podzemních vod a přenosu tepla na vymezeném bloku zvodněných hornin. Výstupy těchto modelů má význam z hlediska řešení různých střetů zájmů a dopadu na životní prostředí a z hlediska dlouhodobého zajištění správné funkce zemních sond.



Obr. 14 Matematické modely proudění podzemních vod a přenosu tepla. Ukázky výstupů (zdroj: Stavební geologie - Geosan s.r.o.)

ZÁVĚR

Pestré geologické a hydrogeologické poměry ČR mají vliv na využití geotermálních zdrojů na našem území. Provádění geologických průzkumů a měření tepelných vlastností hornin přímo na lokalitě, ať již ve fázi návrhové nebo realizační, výrazně přispívá k eliminaci rizik při provádění a ke správné funkci primárního okruhu tepelných čerpadel. Výsledkem geologických průzkumů je podklad pro projektanta s doporučením vhodného typu a umístění zemních sond, jejich hloubkové omezení a nejvhodnější technické parametry s ohledem na místní podmínky. Součástí geologického posouzení je i vypořádání rizik spojených s prováděním zemních vrtů.

VLIV TEPELNÝCH ČERPADEL A SOLÁRNÍCH SYSTÉMŮ NA PROVOZ A ÚČINNOST TEPLÁRENSKÝCH SÍTÍ

Václav Helebrant

ANOTACE

V příspěvku se autor zamýšlí nad možnostmi spolupráce teplotních soustav a obnovitelných zdrojů energie. Může být energeticky i finančně prospěšná?

ÚVOD

Česká republika se prostřednictvím EU připojila k závěrečnému protokolu konference COP 21 a zavázala se snižovat produkci skleníkových plynů. Naše energetika je značně orientovaná na hnědé uhlí a proto naplnění závazků České republiky se musí opírat i o využívání OZE.

Zkusme tedy porovnat různé pohledy na OZE v těchto souvislostech.

VZTAHY V CZT A TEPELNÝCH SÍTÍCH.

V budovách vytápěných dálkovým teplem je obvykle solární systém využíván pro předehřev teplé vody (TV). Její dohřev na požadovanou teplotu je zajištěn buď stávající výměňkovou stanicí nebo, pokud se celý dům odpojí od CZT, jiným zdrojem tepla (např. plynový kotel, tepelné čerpadlo). Solární kolektory jsou pak obvykle dimenzovány podle přípravy TV tak, aby ani při oslunění, které umožní výkon 1000 W/m^2 nestagnovaly nebo stagnovaly co nejméně, tzn. jejich plocha je vzhledem k energetické potřebě budovy relativně malá.

Lákavé by tedy bylo spolupracovat s CZT a přebytky tepla ukládat do vratné vody v tepelné síti. Tím by se solární přebytky zprostředkovaně přes úspory v teplotně distribuovaly jiným odběratelům a zejména kryly tepelné ztráty sítě. Narazíme však obvykle na složitou vlastnickou strukturu a různé zájmy subjektů, připojených do soustavy CZT a teplovodů:

- odběratelé se snaží šetřit, proto instalují solární soustavy a tepelná čerpadla
- teplotna potřebuje i v létě minimální technologický odběr. Pokud navíc vyrábí elektřinu, potřebuje uplatnit, de facto odpadní, teplo za turbínou. V každém případě je její snahou vyrobit prodat co nejvíce elektřiny a tepla.
- tepelná síť může mít dalšího, nezávislého, majitele, například obec. Tento majitel/provozovatel tepelné sítě bude nepochybně také chtít podíl na solárních ziscích, které dopravuje zpět do teplotny. A bude je nepochybně vyjadřovat finančně.
- dodavatel primární formy energie (uhlí, plyn) usiluje o stabilní, nebo lépe rostoucí, dodávky co nejrovnoměrněji rozložené v průběhu roku. Takže v létě může být paliva relativní nadbytek, bonifikující však zimní cenu. Součástí každé úvahy tedy musí být i uzavřené smlouvy a vliv sníženého odběru na jednotkovou cenu paliva, aby úspora v GJ odebrané energie, tj. především uhlí nebo plynu, nezpůsobila roční zvýšení nákladů v Kč.

MOŽNOSTI AKUMULACE SOLÁRNÍCH ZISKŮ

Přesto se pokusme, i u vědomí těchto souvislostí, zamyslet nad možnostmi akumulace a dalšího využití solární energie. Jako základní uvažujme soustavu centrálního zdroje na klasická paliva, který je využíván k technologickým účelům a vytápění přílehlého sídliště.

Tab. 1 Vstupní údaje použité pro úvahu

veličina	velikost	rozměr
příprava teplé vody		
letní provoz pro TV	90/70	°C
počet zásobovaných bytů, jsou po revitalizaci	1500	bytů
počet domů, resp. předávacích stanic	60	stanic
průměrná velikost zásobníků TV u jedné stanice	1500	l
celkový objem zásobníků TV (60 ks x 1500 l)	90 000	l
tepelná ztráta – výkon pro vytápění na byt	2	kW/byt
tepelná ztráta – zbylá infrastruktura (školy, restaurace apod.)	2 000	kW
měrná potřeba teplé vody	50	l/byt/den
celková potřeba teplé vody (1500 ks x 50 l/den)	75 000	l/den
dodávka tepla pro TV, včetně ztrát v rozvodech TV, ohřev o 55 K	7 370	kWh/den
přepočtený výkon pro TV, ohřev za 4 hodiny	1 808	kW
průměrný měrný výkon kolektorů po dobu 12 hodin ve dni, kdy je dosaženo $G = 1000 \text{ W/m}^2$ (hrubý výpočet)	0,5	kW/m ²
z toho potřebný počet plochých kolektorů ploše 2,41 m ²	1 500	ks
objem sítě		
celková délka rozvodů tepelné sítě	5 200	m
průměr potrubí sítě	0,25	m
objem rozvodů	510	m ³
objem pro akumulaci celkem (včetně objemu zásobníků TV v předávacích stanicích)	600	m ³
ztráty v síti		
průměr potrubí s izolací ($D = 0.25 + 2 \times 0.1 \text{ m}$)	0,45	m
měrná ztráta potrubí - odhad	113	W/m
celková tepelná ztráta potrubí - odhad	588	kW
energetické ztráty v rozvodech tepelné sítě	14 107	kWh/den

Vidíme, že objem vody v potrubí je cca 510 m³ a ztrátu v rozvodech vezmeme na 590 kW, objem TV v zásobnících cca 90 m³, ztrátu ve vnitřních rozvodech TV uvažujme pro tento příklad 50 %.

Stanovení plochy solárních kolektorů

Nyní zkusme stanovit optimální plochu solárních kolektorů. Solární kolektory mají smysl především pro přípravu teplé vody a krytí ztrát. Přitom chceme, aby stagnace byla co nejmenší.

Použijeme-li například 1 500 kolektorů s celkovou plochou 3615 m² (1500 x 2.41 m²), které budou pracovat stálým průměrným výkonem 0,5 kW/m² po dobu 12 hodin, vyrobí za 12 hodin **22590 kWh**, tj. pak za 4 hodiny pokryjí potřebu tepla pro TV 7370 kWh/den a za dalších 8 hodin ztráty v rozvodech 14107 kWh/den, celkem 21477 kWh. Takto koncipovaná soustava kolektorů tedy téměř nebude stagnovat, resp. při sofistikovaném řízení nebude stagnovat vůbec.

CENTRÁLNÍ NEBO DECENTRÁLNÍ PŘIPOJENÍ SOLÁRNÍCH KOLEKTRŮ

Solární kolektory je třeba někde umístit. V úvahu připadají dvě základní uspořádání:

- centrálně v prostoru teplárny, s napojením na centrální přívod vratné vody
- na jednotlivých objektech, kde jsou předávací stanice

Centrální připojení

To má výhodu regulace velké soustavy, možnosti řízení průtoku solární kapaliny a tak udržování vysoké výstupní teploty i při nízkém výkonu (matched flow), resp. slabém oslunění. Jsou zde i jednodušší vlastnické vztahy a tedy i vyčíslení zisků. Dále je zde lákavá možnost využít tepelné čerpadlo pro vytěžení solární soustavy v nízkém výkonu.

Použití tepelného čerpadla

Předpokládejme využitelný výkon solárních kolektorů při nízké úrovni ozáření 150 W/m^2 a výstupní teplotu do $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Celkový výkon uvažované soustavy 1 500 kolektorů bude cca 540 kW. Při použití upraveného tepelného čerpadla o výstupní teplotě např. $90 \text{ }^\circ\text{C}$ můžeme i tuto energii převést do vratné vody. Předpokladem je provoz tepelné sítě s vratnou vodou max. $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (lépe $70 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tab. 2 Jaká vlastně může být prostá návratnost tepelného čerpadla?

1	A	B	C	D	E
2	"zimní výkon" plošného kolektoru	W/m ²		150	
3	plocha kolektoru	m ²		2,41	
4	počet kolektorů	ks		1 500	
5	výkon pole kolektorů	kW	D2*d3*d4	542	
6	teplota média	°C		35	
7	topný faktor při B+35/W90	-		3,1	
8	výkon tepelného čerpadla	kW	d5*d7/(d7-1)	800	
9	příkon	kW		258	
10	roční proběh	hod/ rok		300	1000
11	roční výroba tepla	kWh/ rok	d10*d8	240 139	800 464
12	cena tepla prodaného	Kč/ GJ		600	600
13	cena tepla prodaného	Kč/kWh		2,16	2,16
14	cena tepla prodaného celkem	Kč/ rok	d11*d13	518 701	1 729 003
15					
16	investice do vysokoteplotního tepelného čerpadla	Kč		4 806 000	4 806 000
17	cena elektřiny	Kč/ kWh		0,7	0,7
18	náklady na provoz tepelného čerpadla	Kč/ rok	d9*d10*d17	54 225	180 750
19	roční zisk	Kč/ rok	d14-d17	464 476	1 548 253
20	návratnost prostá	roků		10,3	3,1
21					
22	cena elektřiny	Kč/ kWh		2,1	2,1
23	náklady na provoz tepelného čerpadla	Kč/ rok	d9*d10*d22	162 675	542 250
24	roční zisk	Kč/ rok	d14-d23	356 026	1 186 753
25	návratnost prostá	roků		13,5	4,0

Odhadovaný proběh 300 hod/rok je velmi nízký. Je důležité si uvědomit, že zvýšit teplotu tepelným čerpadlem lze vždy, když je nižší, než teplota nutná pro provoz výměníku solární kapalina/ vratná voda, např. $70 - 75 \text{ }^\circ\text{C}$. Spotřebovat vyrobenou elektřinu tímto způsobem je vždy výhodnější, než ji prodat, tzn. proběh může být výrazně vyšší. Návratnost se tím

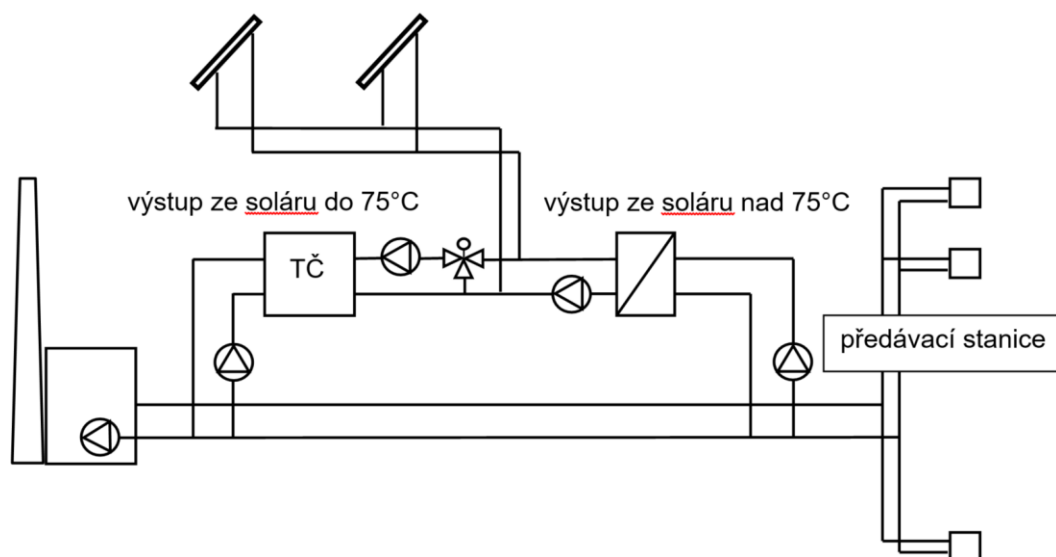
přiměřeně zkrátí – viz sloupec E pro proběh 1 000 hod/ rok. I v případě elektřiny nakupované, např. za 2,10 Kč/ kWh je návratnost více závislá na proběhu než na ceně elektřiny.

Tab. 3 Jaká je ekonomika provozu samotného pole solárních kolektorů?

	A	B	C	D
1	počet kolektorů		1 500	ks
2	plocha 1 kolektoru		2,41	m ²
3	cena 1 kolektoru, včetně podílu na montáži celého systému	odhad	20 000,--	Kč
4	investice celkem	C1*C2	30 000 000,--	
5	vyrobené teplo	výpočtem	1 738 390	kWh/ rok
6	vyrobené teplo	výpočtem	6 258	GJ/rok
7	příkon oběhových čerpadel, MaR a dalšího příslušenství	odhad	50	kW
8	proběh oběhových čerpadel, MaR a dalšího příslušenství	odhad	1 300	hod/ rok
9	vlastní spotřeba	c7*c8	65 000	kWh/ rok
10	cena elektřiny nakupované	odhad	2,10	Kč/ kWh
11	cena tepla se zahrnutím účinnosti výroby tepla v kotlích	viz Tab.	1,04	Kč/ kWh
12	cena tepla se zahrnutím účinnosti výroby tepla v kotlích		287,76	Kč/GJ
13	výhřevnost paliva - uhlí	viz Tab.	14,00	GJ/ tuna
14	cena tepla prodaného	předpoklad	600,--	Kč/GJ
15	cena tepla prodaného	c6*c15	3 754 922,--	Kč/ rok
16	úspora primárního paliva - hnědé uhlí	c5*c11	1 800 873,--	Kč/ rok
17	úspora primárního paliva - hnědé uhlí	c6/c13	447	tuna/ rok
18	úspora CO ₂	c17*2,76 t CO ₂ / t uhlí	1 234	tuna/ rok
19	cena vlastní potřeby	c9*c10	136 500,--	Kč/ rok
20	zisk celkem	c16-c19	1 664 373,--	Kč/ rok
21	prostá návratnost		18,0	roků
22	prostá návratnost při dotaci 50%		9,0	roku

Tento výsledek můžeme nazvat příjemně překvapivým.

Principiální schéma centrálního připojení:



Decentrální připojení

Solární kolektory jsou v tomto případě instalovány na objektech, ve kterých jsou předávací stanice. Předávací stanice a jejich MaR musí být uzpůsobeny pro předávání přebytků tepla

ze solárních kolektorů do vratné vody v tepelné síti. Výhodou je přímý ohřev TV v místě, třeba do stávajících zásobníků, nevýhod je více:

- složité smluvní vztahy;
- nemožnost využití tepelných čerpadel pro zvýšení solárních zisků; technicky to možné je, ale v našem příkladu by to znamenalo instalaci 60 malých tepelných čerpadel, tedy investici někde kolem 20 mil. Kč. Ta by byla těžko návratná;
- pokud by měla být celá soustava centrálně regulována také ve prospěch optimálního provozu CZT, složité MaR.

MOŽNÝ PŘÍNOS ZVĚTŠENÍ AKUMULACE

Zvolený příklad je vyvážená soustava solárních kolektorů a potřeby tepla pro TV a krytí ztrát. Můžeme ale uvažovat také o zvýšení akumulace. Základní úvaha je jednoduchá. Na ohřev množství vody 75 m³/den a krytí ztrát v síti potřebujeme celkem 21 477 kWh/den (7370 + 14107 kWh/den). Pak je třeba stanovit funkci, tj. zásobu tepla v akumulacím zásobníku. Možnosti jsou dvě:

- V letním období můžeme provozovat solární systém až do pracovní teploty 130 °C a teplo akumulovat do rozvodné sítě – ta je stavěna na zimní provoz až 130/90 °C. Můžeme tedy zvýšit teplotu v rozvodné síti oproti maximálně použitelné teplotě pro ohřev vody 80 °C celkem o 50 K. Tím lze získat $510 \times 1.163 \times 50 = 29\,656$ kWh/den, tj. více jak jednodenní potřebu tepla. Tím lze dobře pokrýt následující dny s nižším osluněním.
- Můžeme nainstalovat další akumulátor tlakový nebo netlakový. Zde ale je třeba si uvědomit, že v takovém případě musíme také rozšířit sestavu kolektorů a můžeme tedy očekávat, že ve vrcholném létě bude systém stagnovat. Vzhledem k nutným investicím a relativně nízkému využití je takový úmysl nutno propočítat podle konkrétních místních podmínek a kvalifikovaně diskutovat.

DALŠÍ MOŽNÉ SMĚRY ZKOUMÁNÍ PROBLEMATIKY

- Bude dobré zpřesnit bilanci kolektoru v reálném provozu vhodným modelem, zejména v zimě a lépe pak dimenzovat tepelné čerpadlo.
- Bude dobré zkoumat provozní podmínky a požadavky teploty sítí poté, co byly bytové domy zatepleny. Pokud by bylo možné je provozovat při nižších teplotách, mohla by se i změnit technologie potrubí ve výměňkových stanicích a přejít na plastová
- Lze zkoumat i vliv snížení teplot sítě na účinnost kotlů i účinnost přenosu tepla z OZE.

ZÁVĚR

Využití velkých solárních systémů a tepelných čerpadel u centrálních zdrojů tepla se ukazuje jako výhodné finančně i energeticky. Zakládá i možnost čerpaní evropských dotací pro zvýšení účinnosti zdrojů tepla vzhledem k využití primární formy energie, resp. snížení emise skleníkových plynů.

ČR má v tuto chvíli vůči EU, mimo jiné, jednu strategickou nevýhodu: jedním z aktuálních dotačních programů je nikoli nahrazování zdrojů na fosilní paliva OZE, ale nahrazování starých kotlů na fosilní paliva modernějšími kotli na fosilní paliva. Přináší to sice jistou malou úsporu skleníkových plynů, ale ne principiální změnu.

Ta by vyžadovala větší podporu OZE tak, aby i pro méně majetné vlastníky domů a bytů byla atraktivní. A právě rozšíření centrálních zdrojů o obnovitelnou část by mohla být zajímavou metodou pro všechny zúčastněné i naplňováním ASEK a NAP pro OZE

LITERATURA

- [1] BOROVSÝ, D., *Obchodní modely pro implementaci solárních tepelných soustav v SCZT*, Zdroj: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/13781-obchodni-modely-pro-implementaci-solarnich-tepelnych-soustav-v-sczt>. www.tzb-info.cz, 8.2.2016
- [2] SLÁMA, P. *Pravděpodobné budoucí směry v oboru teplerenských sítí*
Zdroj: <http://vytapani.tzb-info.cz/uspory-vytapani/6347-pravdepodobne-budouci-smery-v-oboru-teplarenskych-siti> www.tzb-info.cz, 29.3.2010
- [3] MATUŠKA, T. *Obnovitelná energie a úspory energie/ Solární kolektory*,
cyklus článků na www.tzb-info.cz
- [4] MATUŠKA, T. NZU-Bilance-solarnich-termickych-systemu_v1.0_BD
- [5] DVOŘÁK, L., BROŽ, K., *Teplárenství a potrubní sítě*. Skripta ČVUT 1993
- [6] HRDLIČKA, F., DLOUHÝ, T., KOLOVRATNÍK, M. *Průmyslová energetika*. Skripta ČVUT 2004
- [7] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*, Zdroj: skripta ČVUT 2011
- [8] MATUŠKA, T. *Solární zařízení v příkladech*, Grada Publishing a.s. 2013
- [9] KOLEKTIV, *Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung*,
International Journal of Energy Research 2015, 87, No. 1–2, 17–89

OPTIMALIZACE KOMBINOVANÉHO ZÁSOBNÍKU TEPLA PRO PROVOZ S TEPELNÝM ČERPADLEM

Jiří Kalina

Regulus spol. s r.o.
kalina@regulus.cz

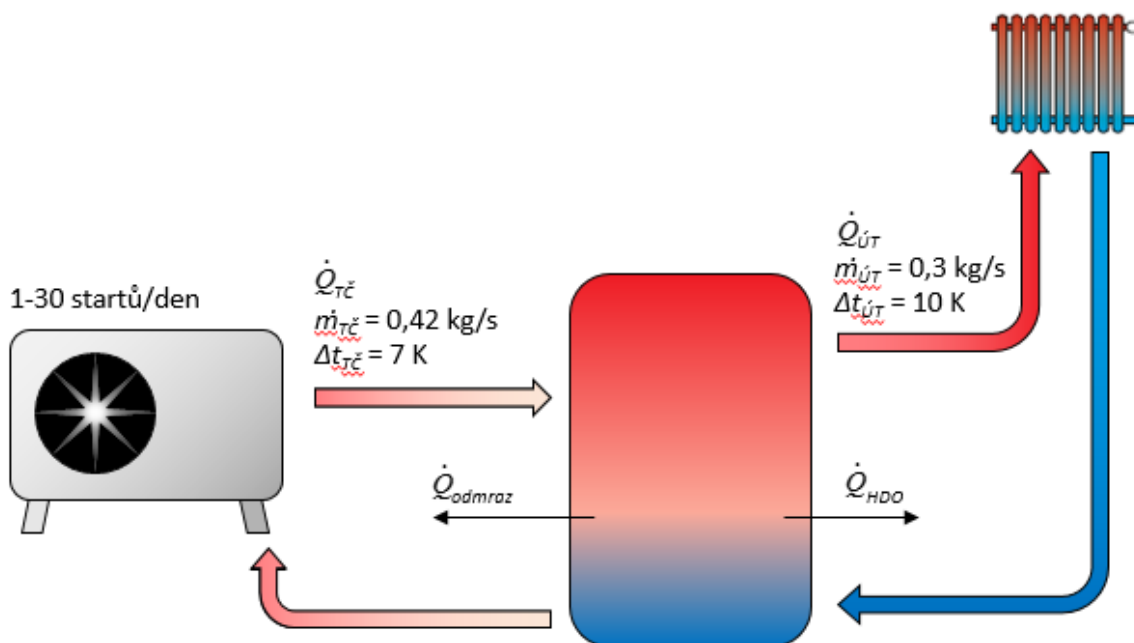
ANOTACE

Príspevek řeší problematiku zlepšení konstrukce kombinovaných zásobníků pro akumulaci tepla pro vytápění a přípravu teplé vody (dále jen TV) zapojených v soustavách s tepelným čerpadlem. Cílem je poukázat na nyní známé problémy stávajících a běžně používaných „akumulačních“ soustav s tepelnými čerpadly a předložit některá doporučení vedoucí k větší efektivitě hlavně přípravy TV pomocí tepelného čerpadla. Príspevek budiž průvodcem konstruováním konkrétního kombinovaného zásobníku tepla.

ÚVOD

Na začátku je potřeba položit si několik zásadních otázek a okamžitě tyto otázky konstruktivně zodpovědět. Zásadní otázkou je, zda vůbec potřebujeme zásobník tepla pro vytápění. U přípravy TV tepelným čerpadlem zpravidla uvažujeme zásobníkový ohřev z důvodu omezené maximální teploty výstupu tepelného čerpadla (max. 65 °C) a nedostatečným výkonům tepelného čerpadla v době odběrových špiček. Má však smysl akumulace pro vytápění ve chvíli, kdy jsou na trhu čím dál běžnější modely tepelných čerpadel s řízeným výkonem (invertor)? Odpovědí může být několik. V první odpovědi, která souvisí s aktuální situací na trhu, se domnívám, že tepelná čerpadla bez řízení výkonu (někdy nazývána „s konstantními otáčkami kompresoru“ nebo „tepelná čerpadla ON/OFF“) jsou stále dominantním produktem. „Doba invertorová“ zkrátka ještě nenastala. Pro použití akumulace s tepelným čerpadlem „ON/OFF“ hovoří několik dobrých důvodů uvedených v dalším odstavci. Druhou odpovědí na položenou otázku „Proč nádrž“ je i sílíci poptávka po kombinovaných soustavách, ve kterých je tepelné čerpadlo provozováno společně s dalším zdrojem tepla vyžadujícím akumulaci. Typicky krbová kamna (či vložka) s teplovodním výměníkem, ale také solární soustavy (termické i fotovoltaické). Třetím důvodem je obava z nové tarifní struktury. Návrh, který sice neprošel legislativou a bude Regulátorem (ERÚ) přepracován, počítal s dobou trvání nízkého tarifu (NT) pro tepelná čerpadla na úrovni 18 až 20 h. Požadavek na maximální spotřebu elektřiny ve vysokém tarifu (VT) na úrovni max. 9 % z celkové spotřeby velmi často povede k blokování tepelného čerpadla v době VT. Řešením tohoto 4-6 hodinového výpadku tepelného čerpadla může být buď určité „předimenzování“ výkonu invertorového tepelného čerpadla tak aby i po této nucené odstávce pracovalo s optimálními otáčkami kompresoru a tudíž i nejvyšším topným faktorem. U většiny kompresorů, které jsou nyní na trhu se „optimum“ nachází na úrovni 50 ot/s. V případě maximálních otáček (100-120 ot/s) klesá topný faktor (COP) za stejných teplotních podmínek na primárním okruhu a výstupu z tepelného čerpadla (známé hodnoty A/W, B/W, W/W podle druhu primárního zdroje) i o hodnotu 1 a je celkem jedno, zda se jedná o „klasický“ rotační kompresor, nebo rotační spirálový (scroll). Takže, pokud z důvodu ceny tepelného čerpadla nechceme zvyšovat navrhovaný výkon, není vhodnou alternativou nějaká „maličká“ akumulace i pro inventory?

Výhody použití akumulační nádrže s tepelným čerpadlem ON/OFF jsou uvedeny prakticky v jakémkoli odborném (např. [1]), i populárním článku o tepelných čerpadlech, takže je zmíníme pouze stručně a pro názornost si pomůžeme s vyobrazením na Obr. 1.



Obr. 1 Výhody (důvody) použití akumulční nádrže s tepelným čerpadlem.

Na obrázku jsou zmíněné některé veličiny charakterizující jednotlivé výhody (důvody) využití akumulční nádrže v kombinaci s tepelným čerpadlem. Asi nejzásadnějším důvodem je modulace možného nadbytku výkonu tepelného čerpadla oproti aktuální tepelné ztrátě objektu. Akumulace v tomto případě omezí hlavně počet startů tepelného čerpadla a zamezí tzv. cyklování, což se projevuje na delší životnosti tepelného čerpadla. Veličina \dot{Q}_{odmraz} reprezentuje hodnotu výkonu potřebného k odmrázování výparníku tepelného čerpadla vzduch/voda. O výkonu potřebném pro vykrytí odstávky tepelného čerpadla v době vysokého tarifu již byla řeč v předchozím textu. Na obrázku je uveden jako \dot{Q}_{HDO} . Hodnoty průtoků a rozdílů teplot poukazují na akumulční nádrž jako na hydraulický vyrovnávač. Lze tvrdit, že vlivem rozdílných teplotních spádů (a často i samotných výkonů \dot{Q}_{TC} a \dot{Q}_{UT}) budou průtoky většinu času rozdílné, navíc průtok otopnou soustavou bývá proměnný vlivem regulace (např. termostatické ventily). V případě vyššího rozdílu teplot na kondenzátoru tepelného čerpadla (nižšího průtoku) je zpravidla vyhlášena tepelným čerpadlem porucha vysokého tlaku chladiva.

STÁVAJÍCÍ PODOBA KOMBINOVANÝCH SOUSTAV PRO VYTÁPĚNÍ A PŘÍPRAVU TV TEPELNÝM ČERPADLEM

Důvody pro akumulční nádrž i pro zásobníkový ohřivač TV v kombinaci s tepelným čerpadlem máme. Nyní se pojdme podívat na dva nejstandardnější způsoby zapojení akumulace k tepelnému čerpadlu. Budou pro nás referenčními systémy při konstruování kombinovaného zásobníku. Cílem je samozřejmě v co nejvyšší míře využít výhody jednotlivých způsobů zapojení.

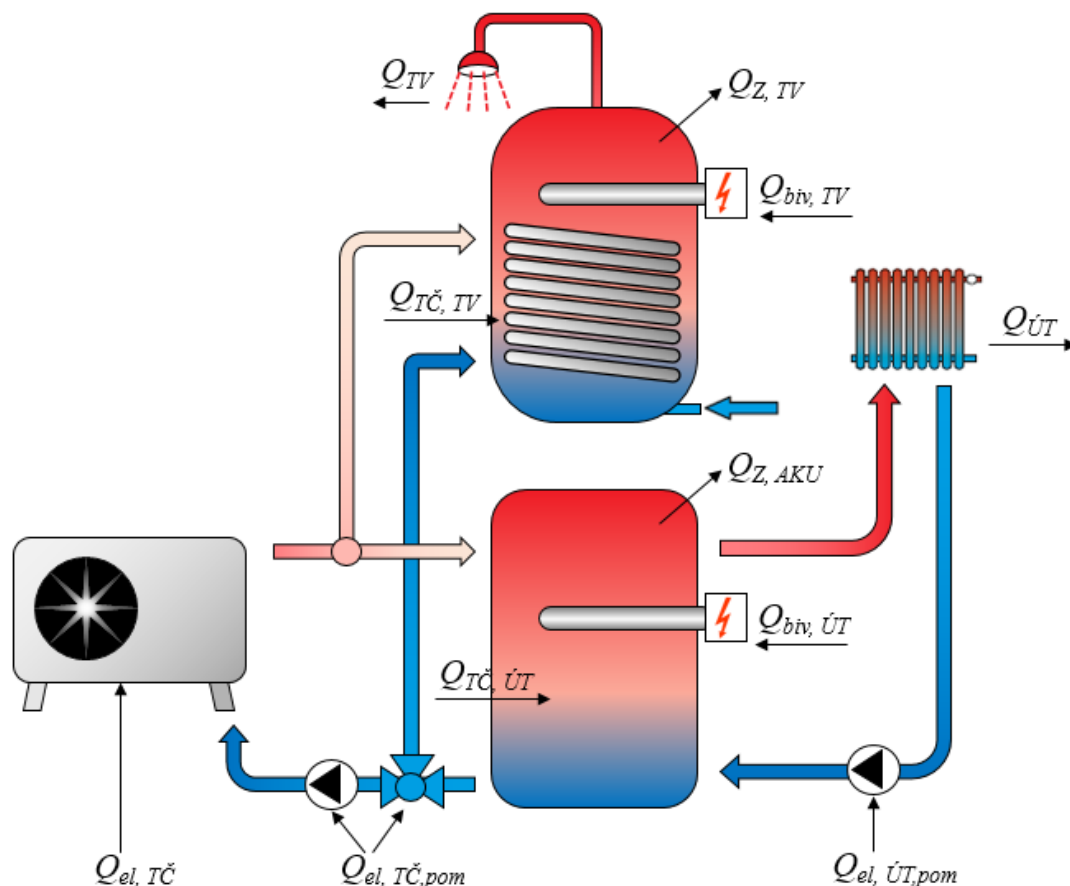
Při hodnocení výhod a nevýhod systémů budeme sledovat nejen poklesy a nárůsty jednotlivých dílčích energií dodávaných nebo naopak odebíraných soustavou, ale také hodnotu celkové efektivity soustav vyjádřenou pomocí tzv. *sezónního topného faktoru soustavy SPF* (seasonal performance factor). Jeho obecné matematické vyjádření můžeme zapsat takto:

$$SPF = \frac{\int (\dot{Q}_{\dot{U}T} + \dot{Q}_{TV}) \cdot d\tau}{\int P_{el} \cdot d\tau} \quad [-] \quad (1)$$

Z rovnice (1) je patrné, že se jedná o podíl celkových energií odebraných ze soustavy za určený čas (v našem případě sezonu, neboli jeden rok), reprezentovanými tepelnými výkony vytápění a přípravy teplé vody za daný čas, vůči celkové energii spotřebované na celkový provoz soustavy. Ta je v tomto případě reprezentována elektrickým příkonem (samozřejmě opět za daný čas, aby se jednalo o energii), avšak obsahuje i hodnotu příkonu bivalentního zdroje, kterým nemusí být vždy elektřina. My však pro názornost budeme v následujících soustavách uvažovat jako bivalentci elektrickou energii.

Zapojení referenční soustavy RS1: Samostatná akumulace pro vytápění, příprava TV v samostatném zásobníkovém ohřívači

Standardní soustava využívající samostatné akumulace pro vytápění a samostatný zásobníkový ohřívač TV je ukázána na Obr. 2 včetně uvedení jednotlivých energií.



Obr. 2 Soustava RS1: Samostatná akumulace a příprava TV.

Sezónní topný faktor SPF můžeme vyjádřit pomocí energií uvedených na obrázku:

$$SPF_{RS1} = \frac{Q_{TV} + Q_{ÚT}}{Q_{el, TČ} + Q_{el, TČ, pom} + Q_{biv, TV} + Q_{biv, ÚT}} \quad [-] \quad (2)$$

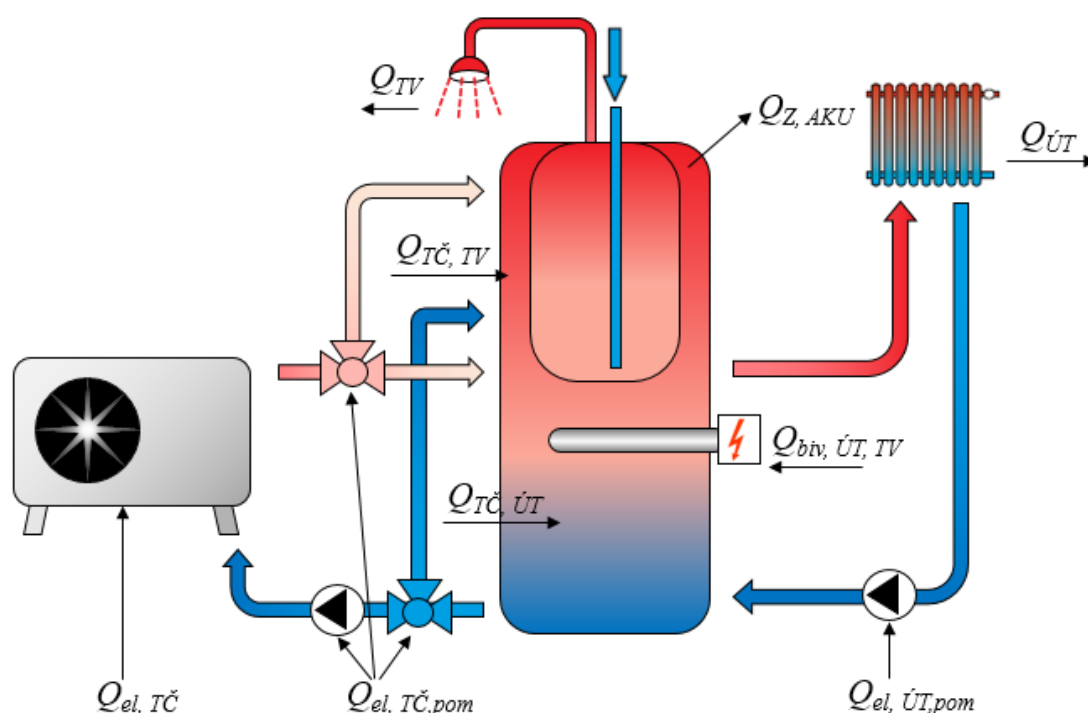
Pomocnou energii na pohon otopné soustavy, tedy jejího oběhového čerpadla, případně směšovacího ventilu $Q_{el, \dot{U}T, pom}$ záměrně v hodnocení SPF zanedbáváme. Pro teoretické porovnávání budeme uvažovat tuto hodnotu stejnou pro všechny soustavy. Srovnávacím předpokladem bude i stejné tepelné čerpadlo a stejné potřeby tepla, tedy hodnoty Q_{TV} a $Q_{\dot{U}T}$.

Hodnota $Q_{\dot{U}T}$ zahrnuje veškerou energii dodanou do otopné soustavy, tedy na systémové hranici výstupu z akumulční nádrže. V této hodnotě je obsažena jak účinnost distribuce, tak účinnost sdílení tepla. Předmětem posuzování tedy není kvalita otopné soustavy, či její regulace.

Hodnota Q_{TV} zahrnuje veškeré teplo nutné k udržení komfortu dodávky TV. Tedy i tepelné ztráty rozvodů TV a případné energetické nároky cirkulace TV. Případnou pomocnou elektrickou energii na pohon cirkulačního čerpadla TV zanedbáváme, resp. vůbec neřešíme.

Zapojení referenční soustavy RS2: Běžný kombinovaný zásobník tepla

Na Obr. 3 je opět zapojení s vyobrazením dílčích energií.



Obr. 3 Soustava RS2: Běžný kombinovaný zásobník tepla (tank-in-tank).

Hodnocení SPF je v tomto případě dáno rovnicí:

$$SPF_{RS2} = \frac{Q_{TV} + Q_{\dot{U}T}}{Q_{el, T\check{C}} + Q_{el, T\check{C}, pom} + Q_{biv, \dot{U}T, TV}} \quad [-] \quad (3)$$

Příprava TV na vyobrazeném zapojení je sice řešena pomocí vnořeného zásobníku TV (tank-in-tank), ale prozatím tuto problematiku nechme v obecné rovině. Způsobem přípravy TV se budeme zabývat v samostatné části.

Další předpoklady pro posuzování a použité komponenty

Uvažovat budeme kvalitní komponenty (stejnou kvalitu izolací u všech použitých nádrží). Dále uvažujeme podobně navržené objemy. Tvoříme kombinovaný zásobník pro tepelné čerpadlo do běžné aplikace v rodinném domě. Tzn. referenčně, by se mohlo jednat o dům

s tepelnou ztrátou 10 kW a čtyřčlennou rodinu se spotřebou TV na úrovni 160 l/den o teplotě 55 °C. Tepelné čerpadlo budeme uvažovat kvalitní (nejlépe opatřené známkou kvality Q-label) s výstupní teplotou až 65 °C a výkonem 8-10 kW při A2/W35, nebo B0/W35, tedy doporučené dimenzování výkonu dle [1] a [2]. Objem akumulční nádrže (RS1), nebo její části (RS2) pro vytápění uvažujeme 100 až 200 l. Objem zásobníkového ohřivače (RS1), nebo akumulční části pro TV (RS2) uvažujeme 200 až 300 l. Nelekejme se relativně velkého rozmezí uvažovaných objemů. Zatím pouze teoretizujeme v obecných hodnotách pro návrh optimalizovaného kombinovaného zásobníku a hledáme jeho přibližný celkový objem. Přesnou specifikaci použitých referenčních výrobků provedeme v budoucím měření, které by mělo definitivně ověřit v tomto příspěvku uvedené předpoklady. Přesné parametry (rozměry) optimalizovaného zásobníku vyplynou z dalších podmínek, které při vlastním konstruování budeme muset splnit (viz část Velikost a základní koncepce optimalizovaného zásobníku).

OPTIMALIZOVANÝ ZÁSObNÍK TEPLA

Jak jsme již zmínili, budeme se snažit vzít si z referenčních systémů ty dobré vlastnosti a pokusíme se vyhnout těm špatným, ale které to jsou?

Výhody a nevýhody referenčních systémů

V případě oddělené přípravy TV (RS1) je zjevnou provozní nevýhodou umístění dvou nádrží a to i pokud pomineme prostorovou náročnost. Tepelné ztráty $Q_{Z,TV}$ a $Q_{Z,AKU}$ budou v součtu výrazně vyšší než ztráty $Q_{Z,AKU}$ kombinované nádrže (RS2), byť bude celkový objem srovnatelný. Rozdílovým parametrem je samozřejmě povrch nádrží, čili teplosměnná plocha s okolím nádrží. Vyšší hodnota tepelných ztrát je logicky přímo navázána na dodávku tepla od zdrojů. Zvyšuje tedy hodnoty $Q_{el,TC}$ a Q_{biv} , které už přímo ovlivňují, snižují, efektivitu soustavy (jmenovatel výpočtu *SPF*).

Naopak výhodou odděleného systému je možnost samostatného ovládní ohřevu zásobníku TV, nebo vytápění a do značné míry ovlivnit výslednou spotřebu soustavy. Tato výhoda zvyšuje svou váhu hlavně při použití zásobníkového ohřivače s dostatečně velkou teplosměnnou plochou (doporučená měrná plocha 0,3 m²/kW jmenovitěho výkonu tepelného čerpadla). Použití takového zásobníku, v našem případě tedy s plochou alespoň 3 m² bereme jako předpoklad pro RS1, i když víme, že realita na trhu je jiná a stále bohužel existují dodavatelé nabízející tepelné čerpadlo pouze pro přehřev TV. Malá přestupní plocha výměníku samozřejmě znamená vysoký nárůst $Q_{biv,TV}$ a tedy razantní snížení výsledného *SPF*. To je nutno při obecně se zvyšujícím podílu TV na celkové energetické náročnosti budovy mít stále na zřeteli!

Největší bolestí současných kombinovaných zásobníků tepla je velmi špatná teplotní stratifikace. Vlivem průtoku okruhu tepelného čerpadla dochází k téměř dokonalému promíchání uvnitř zásobníku. Tento průtok, jak jsme již v úvodu popsali, je zpravidla větší než průtok samotnou otopnou soustavou. Z tohoto důvodu v našem konstruování vynecháme nesmyslné pokusy o uklidnění zpátečky otopného systému v nějakých stratifikačních válcích, nebo podobných „vychytávkách“. Ty se hodí do velkých, téměř sezónních, akumulací pro oblast solární termiky, což není naše nynější pole působnosti. Bohužel řada dostupných kombinovaných zásobníků ani nedovoluje zapojit tepelné čerpadlo do uvažovaných vrstev podle Obr. 3. Vstupů a výstupů do zásobníku je prostě málo. V tom případě prakticky mizí hodnota $Q_{TC,UT}$ a je nahrazena pouze celkovou dodávkou tepla od tepelného čerpadla (asi bychom ji označili Q_{TC}) na jedné teplotní úrovni (zpravidla 60 °C) v celém objemu zásobníku. Vysoké výstupní teploty rozhodně zvýší hodnotu $Q_{el,TC}$ a tím zhorší *SPF*. Význam stratifikace potvrzují i závěry nezávislého výzkumu [3], který dokonce přikládá větší význam teplotní stratifikaci než kvalitě izolace zásobníku. Dokládá to na experimentálním ověření toho, že

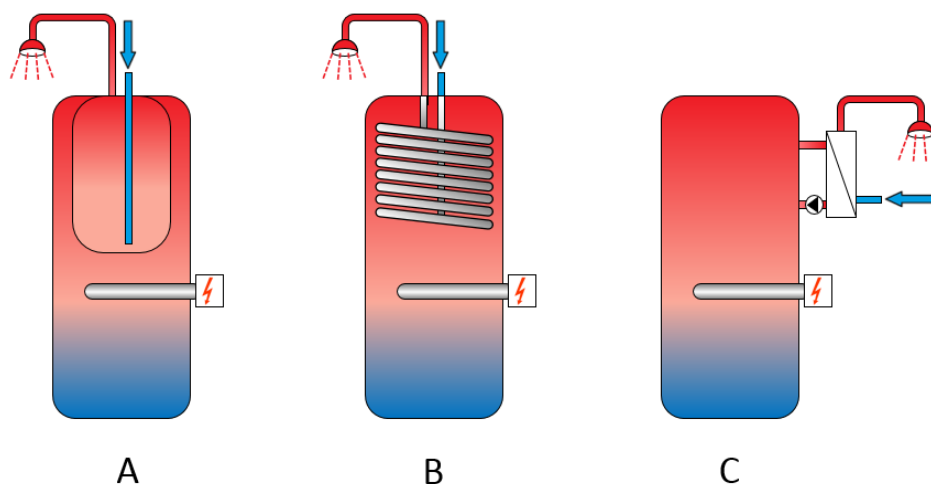
kvalita izolací (v našem případě hodnota Q_{ZAKU}) vzájemně nekoreluje s hodnotou spotřeby elektřiny tepelného čerpadla ($Q_{el,TC}$), kdežto teplotní stratifikace ano. Je to logické, neboť zamíchaný zásobník bude vyžadovat více dodaného tepla od zdrojů a to hlavně na teplotní úroveň potřebnou pro přípravu TV. Díky horšímu topnému faktoru (COP) tepelného čerpadla při vyšších výstupních teplotách se tak zvýší hodnota $Q_{el,TC}$.

Velikost a základní koncepce optimalizovaného zásobníku

Souhrnem předchozích myšlenek tedy tvoříme zásobník o objemu 300-500 litrů s dobrou teplotní stratifikací mezi částí určenou pro vytápění a částí přípravy TV. Zajištění komfortu TV musí být samozřejmostí. V této chvíli je konstruktér nucen volit z dostupných materiálů, tak aby sériová výroba zásobníku mohla být zahájena bez větších problémů v krátké době. Nádrž je tvořena horním a spodním dnem, které má zpravidla standardizované (vyráběné) průměry. Mezi nimi je pak stočený plech do válcového tvaru. Jeho výška by opět měla mít standardizovaný rozměr. Platí obecná rovnice „Více práce + více odpadu = výrazně dražší výrobek“. Zohledněním všech těchto aspektů docházíme k rozměrům zásobníku: Průměr (bez návarků a izolace) 550 mm a výška 1905 mm. To je vzhledem k rozměrům dveřních otvorů a světlé výšce místností v rodinném domě velmi přijatelné. Celkový objem při použití standardizovaných „dýnek“ a plechu bude na úrovni cca 400 litrů. Přesné číslo bude záviset na tom „kolik železa“ umístíme uvnitř. Největší dopad na konečný objem kapalin bude mít způsob přípravy TV.

Příprava teplé vody

U standardních kombinovaných zásobníků tepla rozlišujeme tři způsoby přípravy TV, uvedené na Obr. 4

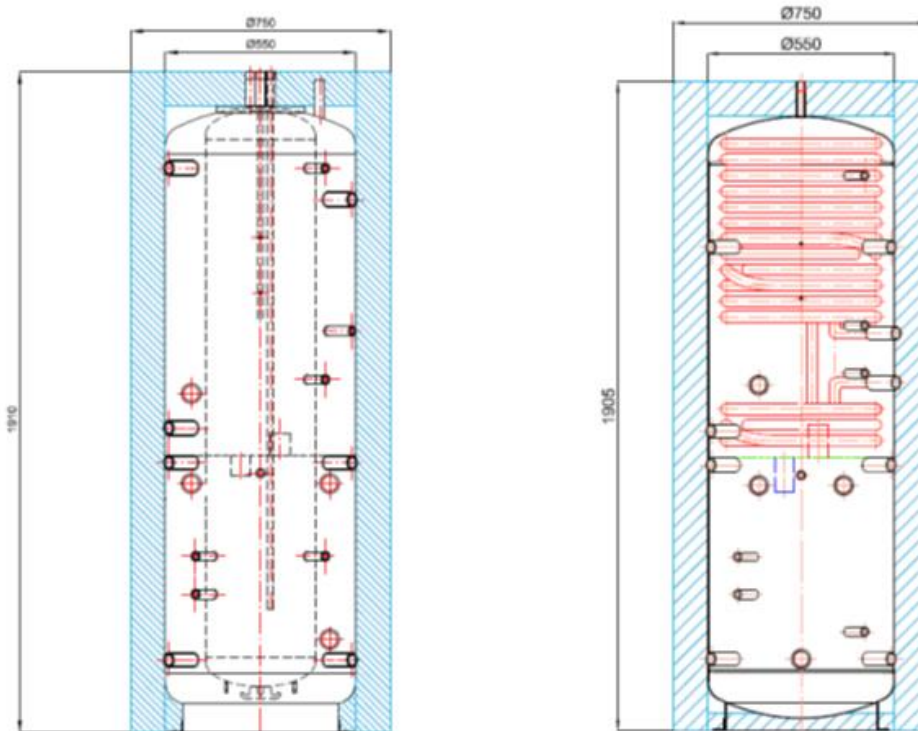


Obr. 4 Způsoby přípravy TV: A – integrovaný zásobníkový ohřev (tank-in-tank), B – průtokový ohřev v integrovaném výměníku, C – průtokový ohřev v externím deskovém výměníku.

Naším úkolem je optimalizovat, nikoli vymýšlet nové způsoby přípravy, takže logicky sáhneme po některém z uvedených typů. Využijeme zkušeností z předchozích měření [4]. Příprava TV v externím deskovém výměníku (na Obr. 4C) by byla při velikosti našeho objemu problematická hlavně z důvodů ceny výměníkové stanice s regulátorem, navíc tento způsob přípravy TV stále nemá na českém trhu tradici a zatím spíše budí nedůvěru. Zkusíme tedy připravovat TV způsobem A a B. Vyrobité prototypy a ... uvidíme!

Výsledná podoba zásobníku

Uvidíme hlavně na základním měření, při kterém budeme provádět ohřev zásobníku tepelným čerpadlem (a následně i kotlem). Pro co nejlepší teplotní stratifikaci využijeme poznatků z vývoje zásobníku pro evropský projekt MacSheep [5], který jsme jako průmyslový partner v loňském roce úspěšně ukončili. Výsledkem je instalace vodorovné, těsné dělicí přepážky, která nádrž rozděluje na dva objemy v poměru cca 60/40 % ve prospěch objemu pro přípravu TV.



Obr. 5 Výsledná podoba zásobníků. Vlevo akumulční nádrž s vnořeným zásobníkem – DUO 390/130 P [6], vpravo akumulční nádrž s integrovaným výměníkem HSK 390 P [7].

ZÁKLADNÍ MĚŘENÍ MNOŽSTVÍ DODANÉ TV A TEPLOTNÍ STRATIFIKACE

Provedeme několik základních měření pro zjištění množství dodané TV při různých průtocích odebrané TV, konkrétně 8, 12 a 20 l/min. Přitom zároveň ověříme teplotní stratifikaci v jednotlivých částech nádrže (průběhy teplot). Jelikož hodláme nádrže využít univerzálně, tedy nejen pro tepelné čerpadlo, provedeme čtyři měření simulující různé provozní stavy:

1. Měření dodané TV při nahřátí celého objemu na 60 °C s povoleným dohřevem horní části pomocí tepelného čerpadla 10 kW - maximální zimní provozní stav provozu s tepelným čerpadlem, nebo stav při provozu se solárním systémem s povoleným dohřevem.
2. Měření dodané TV při nahřátí celého objemu na 60 °C s blokovaným dohřevem horní části – čistý energetický obsah v této teplotní hladině, nebo stav při provozu se solárním systémem s blokovaným dohřevem!
3. Měření dodané TV při nahřátí celého objemu na 80 °C s blokovaným dohřevem horní části – provoz s kotlem na ruční příkládání (krbová kamna s výměníkem).

4. Měření dodané TV při nahřátí objemu nad dělicím plechem na 60 °C s povoleným dohřevem horní části pomocí tepelného čerpadla 10 kW – letní provoz s tepelným čerpadlem.

Výsledky, tedy hodnoty množství dodané TV jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tab. 1 Měření množství dodané teplé vody (10/40 °C) - nádrž HSK 390 P.

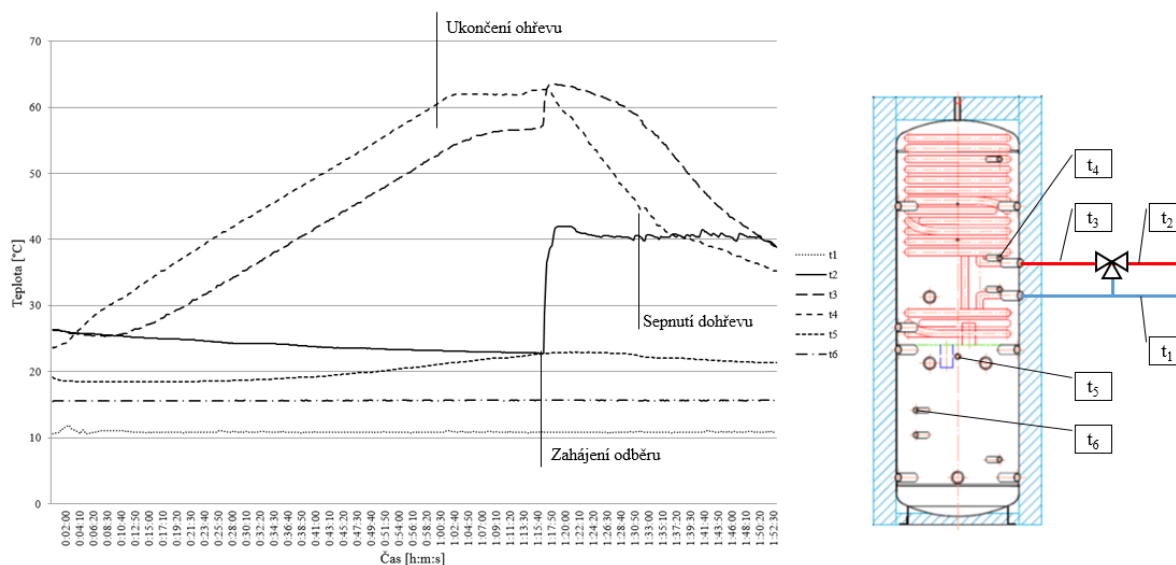
Ohřívání objem [l]	celý			celý			celý			nad dělicím plechem		
Teplota v nádrži [°C]	60			60			80			60		
Dohřev [-]	10 kW			bez dohřevu			bez dohřevu			10 kW		
Průtok [l/min]	8	12	20	8	12	20	8	12	20	8	12	20
Objem teplé vody [l]	534	359	268	321	290	266	567	528	516	253	235	208

Tab. 2 Měření množství dodané teplé vody (10/40 °C) - nádrž DUO 390/130 P.

Ohřívání objem [l]	celý			celý			celý			nad dělicím plechem		
Teplota v nádrži [°C]	60			60			80			60		
Dohřev [-]	10 kW			bez dohřevu			bez dohřevu			10 kW		
Průtok [l/min]	8	12	20	8	12	20	8	12	20	8	12	20
Objem teplé vody [l]	325	219	175	267	230	195	543	511	392	152	132	124

Z porovnání hodnot z měření 1-3 vůči měření 4 je patrné, že zásobníky dobře využívají pro dodávku TV i energii naakumulovanou ve spodní části, což můžeme brát jako přidanou hodnotu tohoto způsobu akumulace, neboť můžeme předpokládat v případě tepelného čerpadla práci s vyšším *COP* do spodní části během otopného období. Tím lze využít jakési dvojestupňové přípravy TV otopným obdobím, která nám výrazně sníží hodnotu $Q_{TC,TV}$ a dojde tím k úsporám na $Q_{el,TC}$. Pro problematiku řešenou v tomto příspěvku je však nejpodstatnější měření č. 4. Z něj je patrné, že nádrže HSK bez problémů zajišťuje vysoký komfort dodávky TV, výměník o velikosti 6 m² je opět odrazem zkušeností z projektu MacSheep [5]. Oproti tomu vnořené zásobníky mají obecně malou přístupnou plochu. U tohoto konkrétního typu (nádrž DUO) jsme naštěstí vyřešili věčnou bolest podobných nádrží a tou je nátok studené vody do zásobníku, který často vede k jeho zamíchání, rychlému snížení teploty a omezení dodávky TV na hodnotu nižší, než jaká tvoří samotný objem vnořené zásobníku. Z měření je patrné, že zásobník je schopen dodat dostačující množství vody, zvláště pokud bude odběr rozložen do několika cyklů, jak tomu v reálném provozu bývá. Výrazně polehčující okolností je rozhodně nižší cena kombinovaného zásobníku tank-in-tank, která se dokonce velmi blíží ceně samostatného zásobníkového ohříváče se zvětšenou plochou výměníku ze soustavy RS1!

Pro ověření dobré teplotní stratifikace, využijeme právě měření č. 4 a budeme sledovat průběh teplot při ohřevu pouze horní části zásobníku. Při vlastním měření jsme zásobníky a příslušenství vybavili jedenácti teplotními čidly. Pro názornost ukážeme v grafu na Obr. 6 pouze ty nejdůležitější hodnoty.



Obr. 6 Průběhy teplot při měření nádrže HSK 390 P (měření 4, průtok 8 l/min).

Na průběhu teplot je vidět, že ani ohřev ani odběr TV neovlivňuje spodní část nádrže. Teplota t_5 , která je těsně pod plechem je ovlivněna nepatrně; teplota t_6 není dokonce ovlivněná vůbec. Směšovací ventil na výstupu byl nastaven na 40 °C a představoval termostatickou vanovou baterii. Spínací bod dohřevu byl nastaven na 45 °C a řídicím čidlem pro spínání a vypínání ohřevu byla teplota t_4 . Snad je to z obrázku patrné, ale pro upřesnění: Teploty t_1 až t_3 jsou teploty studené a teplé vody, teploty t_4 až t_6 jsou teploty otopné vody v nádrži.

ZÁVĚR

Výsledkem optimalizace jsou dva modely nádrží, které mají velký potenciál pro využití s dalšími druhy OZE. Nádrže jsou díky dostatečné dodávce TV i při nízkých teplotách připraveny pro jakoukoli kombinaci zdrojů včetně solárního ohřevu. Pro solární termický ohřev je k dispozici model (označení PR) s výměníkem ve spodní části, pro ohřev fotovoltaikou hrdlo v nejnižším místě nádrže (představený model P). Představovaný objem 390 l pokládá základ celé řadě dalších objemů. Poslední maličkost, kterou v rámci optimalizace zbývá dodělat, je ověřovací sezónní měření, nebo alespoň simulace všech popsaných systémů, tedy RS1, RS2, HSK a DUO pro stanovení konkrétních hodnot *SPF* jednotlivých soustav. Pro tento počín nás čeká jedině – sehnat dostatečné množství času, peněz a entuziazmu.

LITERATURA

- [1] Asociace pro využití tepelných čerpadel. *Metodika pro návrh tepelného čerpadla vzduch-voda*, 28. 5. 2012.
Dostupné z: <http://www.avtc.cz/?download=/_dokum/metodika-pro-navrh-tepelneho-čerpadla-vzduch-voda_28-05-2012-pracovni-verze.pdf>.
- [2] Asociace pro využití tepelných čerpadel. *Metodika pro návrh tepelného čerpadla země-voda*, 28. 5. 2012.
Dostupné z: <http://www.avtc.cz/?download=/_dokum/metodika-pro-navrh-tepelneho-čerpadla-zeme---voda_28_5_2012-pracovni-verze.pdf>.
- [3] HALLER M. Y., HABER R., PERSDORF P. a REBER A., Institut für Solartechnik SPF. *StorEx, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern*, Schlussbericht 9.7.2015.

Dostupné z: <http://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/Forschung/Projekte/Aktuell/StorEx-Schlussbericht_15-07_09_Final.pdf>.

- [4] BROUM, M. *Porovnání výkonnosti integrovaných zásobníků tepla pro přípravu TV, Alternativní zdroje energie 2012: konference: Kroměříž, 2012: sborník přednášek*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, [2012] – ISBN 978-80-02-02393-7 ..
- [5] MacSheep - New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance. *Final report on storage developments in WP5*, 17. 2. 2015.
Dostupné z: <<http://macsheep.spf.ch/Reports-Deliverables.245.0.html>>.
- [6] REGULUS spol. s r.o. *Technický list: Akumulační nádrž se zásobníkem DUO 390/130 P*.: Regulus spol. s r.o., ©2015. Dostupné z: < <http://www.regulus.cz/cz/akumulacni-nadrz-se-zasobnikem-duo-390-130-p>>.
- [7] REGULUS spol. s r.o. *Technický list: HSK 390 P s izolací*.: Regulus spol. s r.o., ©2015. Dostupné z: <<http://www.regulus.cz/cz/akumulacni-nadrz-s-nerezovym-vymenikem-tv-hsk-390-p>>.

Vývoj kombinovaného zásobníku tepla probíhá s finanční podporou TA ČR v rámci projektu TA04021243 Udržitelný energetický zdroj pro téměř nulové budovy.

AKUMULACE TEPLA V SUPERMARKETU

Martin Kny, Jan Sedlář

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze
martin.kny@cvut.cz, jan.sedlar@cvut.cz

ANOTACE

Využití odpadního tepla z chladicích systémů je častým tématem mnoha diskuzí. Typickým příkladem nevyužívání odpadního tepla jsou technologie pro chlazení potravin v supermarketech, kde je celoročně relativně stálá potřeba chladu pro chladicí boxy, vitríny a pulty. Odpadní teplo z chladicího zařízení je odváděno do vzduchu většinou na střeše supermarketu. Možnosti jeho využití jsou totiž omezeny sezónním nesouladem mezi potřebou tepla na vytápění v zimním období a využitelnými teplotami odpadního tepla (při vysokých venkovních teplotách) v letním období. V příspěvku bude na příkladu celoroční simulace modelového supermarketu s teplovzdušným vytápěním a prodejem masných výrobků ukázána možnost použití sezónní akumulace tepla pro vytápění a přípravu teplé vody.

ÚVOD

Chladicí zařízení jsou nedílnou součástí každé prodejny potravin. Slouží k bezpečnému skladování potravin při požadované teplotě. Při jejich návrhu se bere v úvahu především bezpečnost a bezporuchovost provozu, cena skladovaného zboží totiž často i mnohonásobně převyšuje cenu zařízení. Z toho důvodu se nové technologie do oblasti chlazení v supermarketech dostávají jen obtížně. Ekonomie provozu je až na druhém místě. Přesto především z ekologických důvodů je možné najít provozovatele s vizí snižování provozních nákladů. Zřejmou možností úspory energie je využití odpadního tepla z chladicího zařízení.

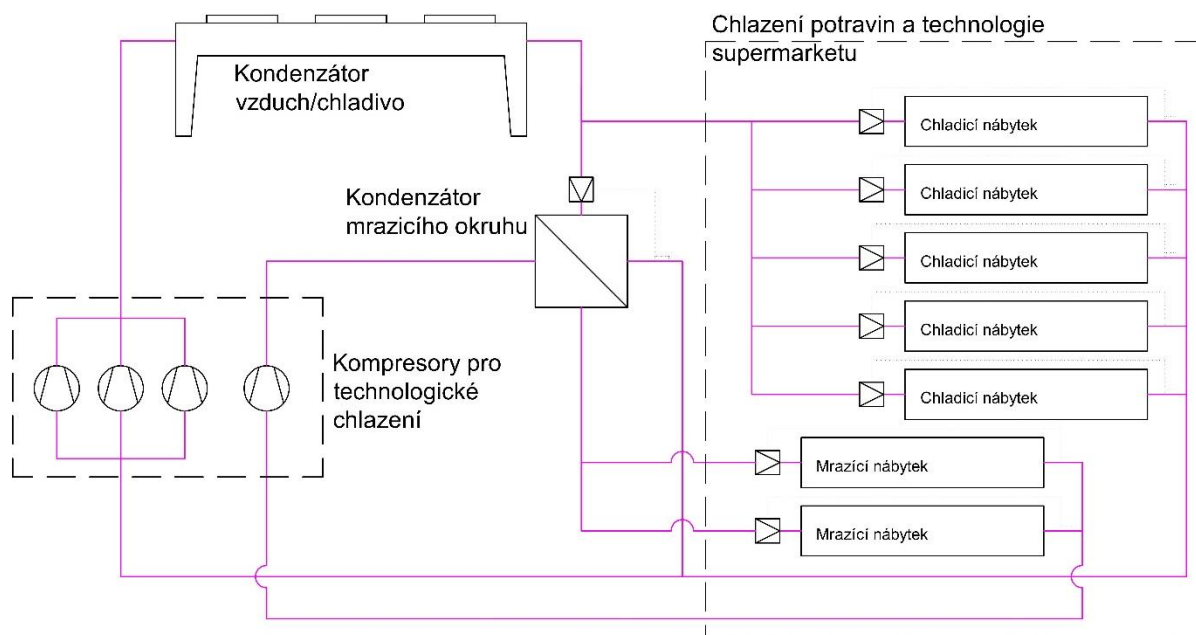
U běžně velkého samostatně stojícího supermarketu (Lidl, Billa, Penny apod.) se chladicí výkon pohybuje okolo 50 kW pro chlazení a 10 kW pro mražení potravin. Vlastní potřeba chladu může významně ovlivnit použitý chladicí nábytek. Použití nábytku opatřeného dveřmi (kryty) může potřebu chladu významně snížit.

Potřeba chladu je celoročně poměrně stálá hodnota, protože hrazené tepelné zisky zůstávají při neměnné teplotě uvnitř konstantní. Instalovaná zařízení odvádí tepelné zisky + příkon pro chlazení kompresorů bez užítku do venkovního prostředí. Nabízí se tak možnost využití tohoto odpadního tepla pro vytápění objektu a přípravu teplé vody (dále TV). Odpadní teplo je možné přímo využít pro předehřev teplé vody (TV). Jeho přímé využití pro vytápění by většinou vyžadovalo zvýšení kondenzační teploty, které by mělo za následek zvýšení spotřeby elektrické energie.

Jednou z možností, jak hospodárně využít odpadní teplo z chladicího zařízení, je jeho akumulace ve vyrovnávacím zásobníku tepla a následné využití tepelným čerpadlem pro vytápění a přípravu TV. V následujících pasážích budou pomocí simulačních modelů vyhodnoceny možnosti využití odpadního tepla v supermarketu.

CHLADICÍ ZAŘÍZENÍ V SUPERMARKETU

Chladicí zařízení musí obstarat dvě chladicí potřeby – pro chlazení a mražení – o rozdílném chladicím výkonu i požadované teplotní hladině. Existuje několik uspořádání chladicího zařízení – dvoustupňové zařízení, kaskádní, s chladičem CO₂, atd. Jako reference bylo použito běžně používané uspořádání technologie podle Obr. 1.



Obr. 1 Schéma chladicího technologického chlazení v supermarketu

Chladicí zařízení je rozděleno do dvou kaskádně uspořádaných okruhů – chladicí a mrazicí okruh. Chladivo v chladicím okruhu je nasáváno blokovou kompresorovou jednotkou, stlačeno na kondenzační tlak a odvedeno ze strojovny chladivovým potrubím do kondenzátoru vzduch chladivo ve venkovním prostředí (většinou na střeše objektu). V kondenzátoru odevzdá teplo a jako mírně podchladená kapalina pokračuje v prostoru supermarketu k chladicímu nábytku, pultům atd. Část chladiva je odvedena i ke kondenzátoru mrazicího okruhu. Každý spotřebič chladu má vlastní expanzní ventil řídicí průtok chladiva a chladicí výkon. Po odvedení tepelných zisků a vypaření chladiva ve výparnicích jednotlivých zařízení chladivo pokračuje v plynné fázi zpět do kompresorů. Mrazicí cyklus využívá jako kondenzátor deskový výměník mezi chladicím a mrazicím okruhem, pracuje tedy na nižších teplotách. Chladicí výkon chladicích kompresorů musí být dimenzován na celkovou potřebu chladu chlazení i mražení. Je uvažováno s chladivem R404a pro oba okruhy. V uvažovaném objektu bylo počítáno s celkovou potřebou chladu 40 kW, z toho 20 % tvořil mrazicí výkon a 80 % výkon chladicí. Mimo otevírací dobu obchodu bylo uvažováno s poklesem potřeby chladu na 28 kW. Vyšší potřeba chladu v otevírací době měla zohlednit častější přístup do chladicího a mrazicího nábytku i do skladů v zázemí, a s tím související vyšší tepelnou výměnu. Kompresory chladicího okruhu musí pokrýt nejen potřebu chladu chladicího nábytku, ale i kondenzační výkon mrazicí části. Pro mrazení není potřeba modelovat kompresor (kondenzační i vypařovací teplota se téměř nemění). V modelu bude uvažováno, že kompresor dodá potřebný mrazicí výkon s chladicím faktorem 3.5. Chladicí výkon pro dimenzování chladicích okruhů se určí jako:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{Q}_{ch,tech} + \frac{\dot{Q}_m}{3.5} \cdot (3.5 + 1) = 40 + \frac{8}{3.5} \cdot 4.5 = 50.3 \text{ kW} \quad (1)$$

kde je

\dot{Q}_{ch} návrhový chladicí výkon chladicího okruhu [kW];

$\dot{Q}_{ch,tech}$ chladicí výkon technologie [kW];

\dot{Q}_m chladicí výkon mrazicího okruhu [kW].

Pro kompresorovou blokovou jednotku byly vybrány pístové tříválcové kompresory 3DA-75X, které mají, při teplotě vypařovací -10 °C a teplotě kondenzační 45 °C , chladicí výkon 20 kW . V blokové jednotce budou pro bezpečné zajištění požadovaného chladicího výkonu 3 ks . Na zajištění potřeby chladu dohlíží regulace spínáním jednotlivých kompresorů. Pro model chladicího zařízení je třeba určit závislost chladicího faktoru na kondenzační teplotě, respektive teplotě venkovní. V rovnici (2) je popsána použitá rovnice (podmínky na straně výparníku se během roku nemění).

$$COP_{ch} = 9.578 - 0.381 \cdot t_{k1} + 7.05 \cdot 10^{-3} \cdot t_{k1}^2 - 5.1 \cdot 10^{-5} \cdot t_{k1}^3 \quad (2)$$

kde je

COP_{ch} chladicí faktor chladicího zařízení [-]

t_{k1} venkovní teplota nebo teplota vody na vstupu do kondenzátoru [$^{\circ}\text{C}$], (min. 10 °C).

Spotřeba elektrické energie pro pohon kompresorů P_{kom} (kW) pro chlazení technologie se stanoví podle vztahu (3). Topný výkon odvedený v kondenzátoru chladicího okruhu Q_t (kW) je popsán vztahem (4).

$$P_{kom} = \frac{\dot{Q}_{ch}}{COP_{ch}} + \frac{\dot{Q}_m}{3.5} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{ch} + \frac{\dot{Q}_{ch}}{COP_{ch}} \quad (4)$$

MODEL BUDOVY SUPERMARKETU

Pro potřeby této studie byl použit modelový objekt supermarketu. Jedná se o jednopodlažní objekt s prodejní plochou o velikosti 900 m^2 ($50 \times 18\text{ m}$, světlá výška 3.7 m) a plochou zázemí 600 m^2 . Tepelné parametry obvodových konstrukcí byly uvažovány v doporučených hodnotách dle ČSN 73 0540. Objekt je vytápěn teplovzdušným vytápěním. Větrání bylo uvažováno jako nucené s rekuperací. V objektu dochází ke zpracování a prodeji masa a také ke konečné tepelné úpravě vybraných druhů pečiva. Objekt spolu se systémem byl modelován v programu TRNSYS [1] za použití klimatických dat (TMY) pro Hradec Králové. Hlavní parametry budovy a provozu použité v modelu jsou následující:

- otevírací doba, PO až NE od 7:00 až 21:00,
- dvouzónový model budovy (prodejní plocha a zázemí), částečně prosklená pouze východní (40 m^2) a jižní fasáda (15 m^2), propustnost zasklení $g = 0.6$, bez stínících prvků,
- maximální počet zákazníků 140 (rozložení dle denní doby), max. počet zaměstnanců 12,
- množství čerstvého vzduchu na osobu $25\text{ m}^3/\text{hod.}$, výměna vzduchu netěsností obálky budovy $n = 0.1$,
- účinnost zpětného získávání tepla 70% , v provozu při teplotě exteriéru pod 13 °C ,
- teplota v interiéru při vytápění 21 °C (noční útlum 18 °C), max. teplota 25 °C ,
- teplotní rozdíl pro systém vytápění $38/34\text{ °C}$, bez účinností sdílení a distribuce ($\eta_H = 1$),
- vnitřní tepelné zisky, osvětlení 6 W/m^2 , ostatní 2 W/m^2 , dopékání pečiva 8 kW , veškerý chladicí výkon předán do interiéru objektu,
- denní spotřeba TV 4 m^3 (55 °C), uvažováno s křivkou odběru,
- celková roční potřeba tepla pro přípravu TV 79.1 MWh (včetně ztrát cirkulace),
- roční potřeba tepla na vytápění 253.9 MWh , max. potřeba tepla 71 kW ,

- roční potřeba technologického chladu 306.6 MWh.

POPIS HODNOCENÝCH VARIANT

Celkem byly v programu TRNSYS hodnoceny 3 varianty energetického systému. Sledovány byly celkové potřeby tepla, případně elektrické energie. Výpočtový čas simulace byl 2 min.

Varianta 1

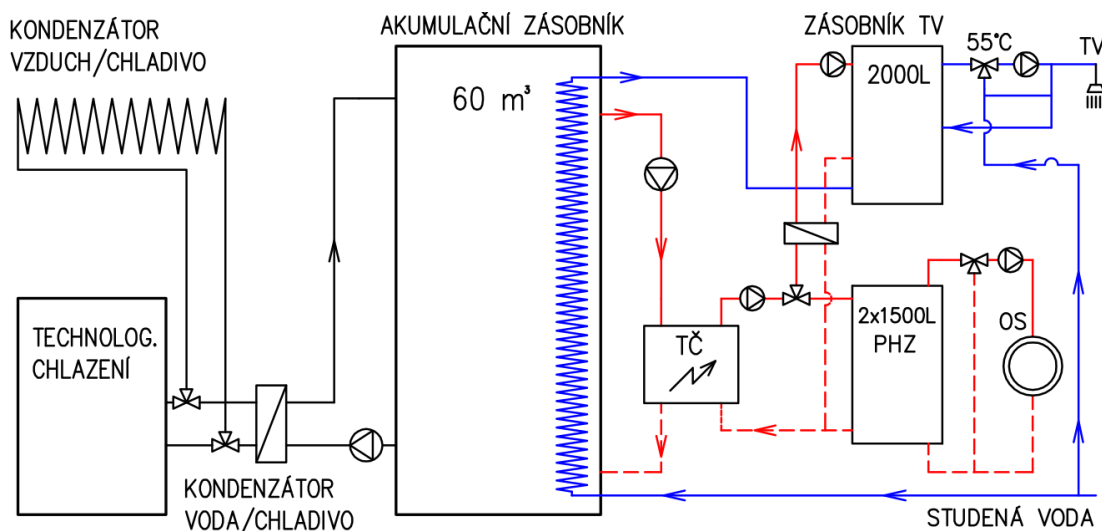
Jedná se o nejjednodušší variantu. Zdrojem tepla pro systém přípravy TV a vytápění je plynový kondenzační kotel (kaskáda). Pro systém chlazení bylo v modelu použito kompresorové chladicí jednotky podrobně popsané v předchozí části článku. Odpadní teplo z chlazení kondenzátoru bylo mařeno na střeše objektu. Systém zdroje tepla nebyl podrobně modelován, účinnost zdroje byla zjednodušeně uvažována jako 100 %. TV je stejně jako u následujících variant připravována v zásobníku TV o objemu 2 m³. Systém je vybaven cirkulací. Cirkulace byla modelována tak, aby její tepelné ztráty tvořily cca 20 % z vlastní potřeby tepla na přípravu TV. Spotřeby oběhových čerpadel byly u všech variant zanedbány.

Varianta 2

Oproti předchozí variantě tvoří zdroj tepla TČ (kaskáda) vzduch - voda. Pro potřeby simulace bylo použito TČ běžně dostupných parametrů [2] (topný faktor $COP = 3.0$ a výkon 110 kW při A2/W35, dimenzováno na max. potřebu tepla). TČ podle potřeby nabíjí pohotovostní zásobník vytápění (PHZ) o celkovém objemu 3 m² a zásobník TV o objemu 2 m³.

Varianta 3

Oproti předchozím variantám je umožněno využití odpadního tepla z chlazení. Kondenzační teplo je možné ukládat do teplovodního akumulačního zásobníku. Nízkoteplotní zásobník částečně zlepšuje chladicí faktor systému. Jeho hlavní přínos je však v tom, že umožňuje další využití odpadního tepla. V zásobníku dochází k průtočnému přehřevu TV. Dále je zásobník využit jako zdroj tepla pro TČ (voda - voda). Použito bylo TČ s $COP = 6.2$ a výkonu 85 kW při W10/W35 [2]. TČ, jako v případě předchozím, nabíjí PHZ vytápění a zásobník TV. Modelované schéma systému je patrné z Obr. 3. Zásobník o objemu 60 m³ je uvažován jako podzemní s železobetonovou konstrukcí. Součinitel prostupu tepla U jeho pláště dosahuje hodnoty 0.30 W/m².K (odpovídá cca 140 mm extrudovaného polystyrenu). Teploty zeminy v okolí zásobníku byly uvažovány pro jednotlivé měsíce proměnné s hodnotou 7 až 12 °C.



Obr. 2 Zjednodušené schéma systému pro variantu 3.

Vlastní řízení nabíjení zásobníku v průběhu roku probíhalo podle následujícího schématu. V zimních měsících (prosinec až únor) je odpadní teplo přednostně předáváno do zásobníku. Je zde u dna udržována nastavená teplota 13 °C. V případě vzestupu venkovní teploty nad tuto hodnotu je teplo mařeno v kondenzátoru na střeše objektu. V ostatních měsících je odpadní teplo odváděno do kondenzátoru s nižší (z hlediska chladicího faktoru výhodnější) teplotou.

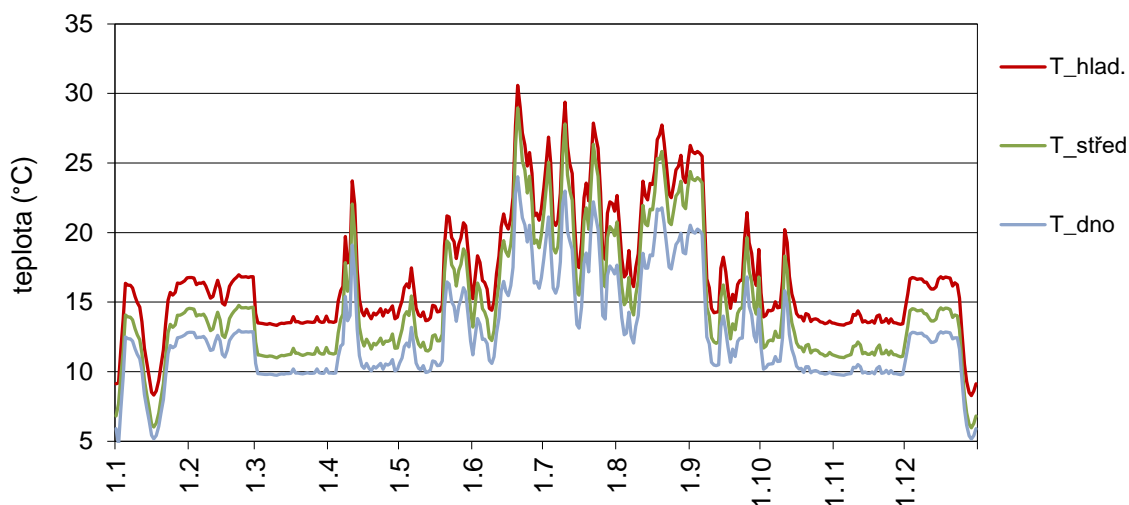
V nočních hodinách je tak teplo převážně mařeno na střeše objektu, přes den při vzestupu teplot vzduchu je ukládáno do zásobníku. Jediné omezení pro toto období je to, že teplota u dna zásobníku nesmí klesnout pod 10 °C. V tom případě je zásobník nabíjen i při vnější teplotě vzduchu pod 10 °C.

VÝSLEDKY

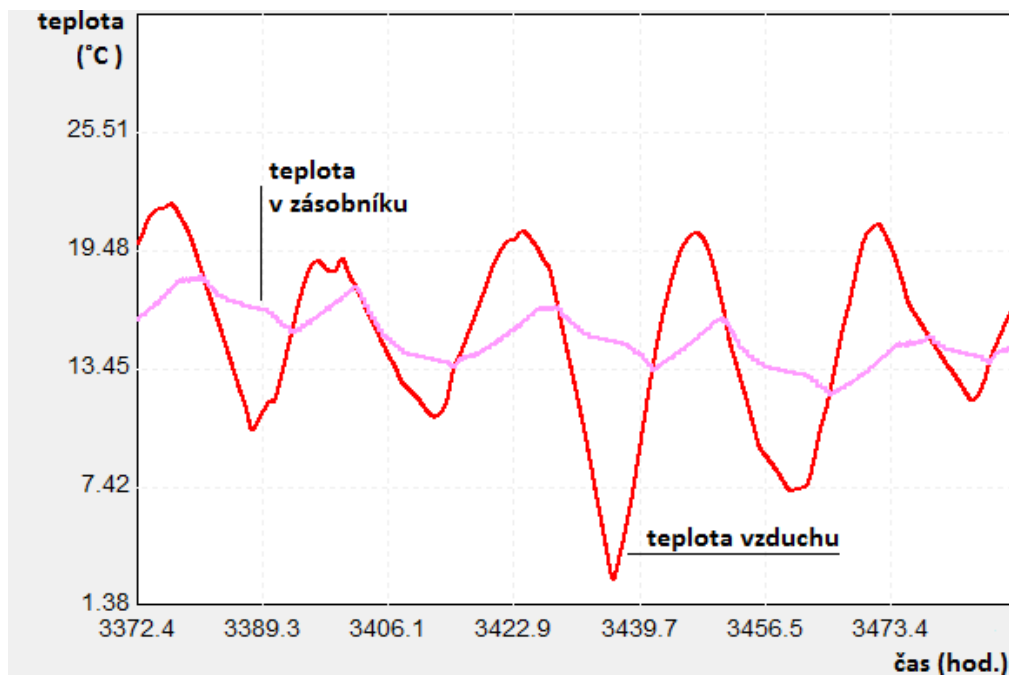
V následujících obrázcích a tabulkách jsou stručně shrnuty výsledky celoroční simulace pro jednotlivé varianty.

Tab. 1 Přehled výsledků pro řešené varianty (roční potřeby)

varianta	potřeba tepla (kWh)		potřeba elektrické energie (kWh)		
	vytápění	příprava TV	kompresory chlazení	TČ vytápění	TČ příprava TV
Varianta 1	253 046	79 061	79 018	-	-
Varianta 2	253 892	79 119	79 018	81 621	36 639
Varianta 3	253 887	79 017	77 769	40 085	18 382



Obr. 3 Roční průběh teplot v zásobníku



Obr. 4 Průběh teplot v zásobníku (dno) a teplot vzduchu koncem května

Tab. 2 Podrobné výsledky pro variantu 2

měs.	potřeba tepla na vytápění (kWh)	potřeba tepla na příp. TV (kWh)	potřeba chladu, tech. (kWh)	el. en. pro TČ vytáp. (kWh)	el. en. pro TČ příp. TV (kWh)	el. energ. kompres. chlaz. (kWh)	mařené odpadní teplo (kWh)	odpadní teplo do zásobníku (kWh)	tepelné ztráty zásobníku (kWh)	teplo pro předehřev TV (kWh)
led.	31 197	6 839	26 040	13 502	4 711	6 137	32 177	0	0	0
únor	26 342	6 219	23 520	10 546	3 934	5 545	29 065	0	0	0
břez.	25 324	6 885	26 040	8 622	3 674	6 154	32 194	0	0	0
dub.	18 702	6 685	25 200	4 915	2 619	6 401	31 601	0	0	0
kvě.	17 199	6 915	26 040	4 351	2 594	6 786	32 826	0	0	0
červ.	13 929	6 006	25 200	3 326	2 118	7 145	32 345	0	0	0
červe.	12 891	6 211	26 040	3 015	2 155	7 664	33 704	0	0	0
srpen	13 638	6 209	26 040	3 199	2 163	7 671	33 711	0	0	0
září	16 808	6 695	25 200	4 000	2 369	6 929	32 129	0	0	0
říjen	22 123	6 907	26 040	5 913	2 770	6 442	32 482	0	0	0
list.	24 815	6 670	25 200	7 497	3 072	6 008	31 208	0	0	0
pros.	30 922	6 878	26 040	12 735	4 461	6 137	32 177	0	0	0
celk.	253 892	79 119	306 600	81 621	36 639	79 018	385 618	0	0	0
celková potřeba elektrické energie (kWh):						197 277				

Tab. 3 Podrobné výsledky pro variantu 3 (s akumulací tepla)

měs.	potřeba tepla na vytápění (kWh)	potřeba tepla na příp. TV (kWh)	potřeba chlada, tech. (kWh)	el. en. pro TČ vytáp. (kWh)	el. en. pro TČ příp. TV (kWh)	el. energ. kompres. chlaz. (kWh)	mařené odpadní teplo (kWh)	odpadní teplo do zásobníku (kWh)	tepelné ztráty zásobníku (kWh)	teplo pro přehřev TV (kWh)
led.	31 199	6 854	26 040	5 309	1 798	6 355	643	31 796	12	407
únor	26 347	6 225	23 520	4 164	1 471	5 873	2 144	27 274	55	630
břez.	25 325	6 882	26 040	4 280	1 830	6 141	6 094	26 265	26	353
dub.	18 700	6 670	25 200	2 971	1 633	6 152	10 312	21 145	76	595
kvě.	17 195	6 894	26 040	2 633	1 594	6 486	12 316	20 304	85	787
červ.	13 926	6 003	25 200	1 939	1 173	6 850	14 382	17 715	161	1 127
červe.	12 887	6 199	26 040	1 660	1 089	7 404	16 793	16 812	192	1 408
srpen	13 637	6 197	26 040	1 782	1 120	7 307	15 760	17 533	163	1 342
září	16 807	6 667	25 200	2 466	1 423	6 560	12 323	19 417	88	1 002
říjen	22 123	6 885	26 040	3 583	1 741	6 260	8 764	23 643	25	509
list.	24 817	6 660	25 200	4 150	1 763	5 951	5 407	25 887	5	355
pros.	30 924	6 881	26 040	5 147	1 746	6 431	1 601	30 925	22	507
celk.	253 887	79 017	306 600	40 085	18 382	77 769	106 540	278 716	910	9 021
celková potřeba elektrické energie (kWh):						136 236				

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z výsledků vyplývá, že celkové roční množství odpadního tepla je vyšší (cca 386 MWh) než vlastní potřeba objektu (334 MWh). Pouze v zimních měsících potřeba tepla převyšuje dostupné množství odpadního tepla. Vzhledem ke konstrukci objektu a použitým okrajovým podmínkám (poměrně nízké vnitřní tepelné zisky) nebylo třeba objekt v letním období chladit. Nastavená max. teplota v objektu (25 °C) nebyla překročena.

Výsledky dále podle očekávání ukazují, že využití odpadního tepla může významně snížit potřebu energie. Varianta 3, u které je využíváno odpadního tepla, vykazuje potřebu elektrické energie pro pohon TČ pouze 58.5 MWh/rok. Varianta 2, využívající TČ vzduch voda má potřebu výrazně vyšší (118.3 MWh/rok). Hlavním důvodem nižší potřeby el. energie u varianty 3 jsou pro TČ příznivější teplotní podmínky v zásobníku tepla. I v zimním období se teploty v zásobníku pohybují okolo 15 °C. U přípravy TV má pozitivní vliv také využití přehřevu TV v zásobníku (přímo využito cca 9 MWh). U Varianty 2 je vysoká zejména potřeba el. energie pro přípravu TV v zimních měsících. Důvodem tohoto stavu je to, že TČ není schopno zajistit přípravu TV při nízkých venkovních teplotách. V těchto případech bylo použito elektrického dohřevu. Varianta 2 vykazuje celkový sezonní topný faktor soustavy (*SPF*) 2.82, u varianty 3 vzroste *SPF* na hodnotu 5.69.

Mnohem menší vliv má na pokles spotřeby el. energie pro technologické chlazení použitý systém akumulace tepla (pokles z cca 79 MWh na 77.8 MWh). Potřeba je u varianty 3 (s akumulací) nižší zejména v letním období, kdy se příznivě projeví nižší kondenzační teploty v zásobníku. Toto je dobře patrné z Obr. 4. Zde lze pozorovat, že odpadní teplo z kondenzátoru je do zásobníku odváděno přes den (vysoké teploty vzduchu), kdy je to

z hlediska chladicího faktoru výhodnější. Naopak, v noci je teplo mařeno. Spotřeba el. energie pro technologické chlazení u systému s akumulací je v zimních měsících vyšší a to vzhledem k vyšším kondenzačním teplotám v zásobníku oproti teplotám vzduchu.

Na Obr. 3 jsou znázorněny průběhy teplot v zásobníku. Teploty se v zimních měsících u dna zásobníku pohybují okolo nastavené hodnoty (13 °C). Pouze ve dvou krátkých obdobích (prosinec a leden) teploty u dna zásobníku klesají až k 5 °C. V tomto období potřeba tepla výrazně převyšuje množství odpadního tepla. Vyšší teplota v zásobníku byla použita právě s ohledem na tyto situace. V ostatních měsících, kdy se neočekává nenadálá velká spotřeba tepla, je minimální teplota v zásobníku nastavena na 10 °C a využívá se z hlediska chladicího faktoru vždy výhodnějších teplotních podmínek na kondenzátoru (maření tepla, ukládání do zásobníku).

Tepelné ztráty zásobníku jsou z důvodů nízkých teplot v zásobníku malé a dosahují hodnoty 0.9 MWh/rok. Tloušťka tepelné izolace (140 mm) by pravděpodobně mohla být u reálného systému zmenšena, případně by mohl být řešen pouze jako částečně izolovaný.

Využití a akumulace odpadního tepla snížily potřebu el. energie systému oproti variantě s vzduchovým TČ o cca 61 MWh. Při uvážení nejdražší položky systému, zásobníku o objemu 60 m³ (cena cca 430 000 Kč) [3], se zdá být systém i z ekonomického hlediska reálný.

ZÁVĚR

Využití odpadního tepla z technologického chlazení prodejen potravin se zdá účelné. Množství odpadního tepla je často vyšší, než je vlastní spotřeba tepla objektu. Odpadní teplo je vhodné akumulovat ve vyrovnávacím teplovodním zásobníku, který slouží jako zdroj nízkopotenciálního tepla pro TČ. Systém s TČ může dosahovat vysokého sezonního topného faktoru *SPF* (zde cca 5.7). Akumulace tepla negativně neovlivňuje technologické chlazení objektu, chladicí faktor může za určitých podmínek naopak nepatrně vzrůst.

LITERATURA

- [1] Trnsys 16.01: *Transient System Simulation Tool* [online]. Madison: Thermal Energy System Specialists, b.r. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com>
- [2] Carrier Corporation: *Podklady pro návrh chladicích zařízení a TČ* [online]. b.r. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.carrier.com>.
- [3] Míč systém s.r.o: *ŽB monolitické zásobníky* [online]. b.r. [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: <http://www.micsystem.cz>

INOVATIVNÍ ŘEŠENÍ ABSORBČNÍCH VRSTEV TERMICKÝCH KOLEKTORŮ

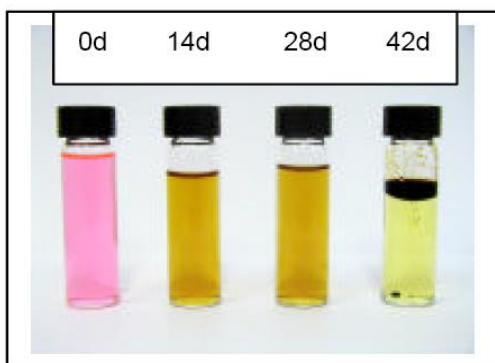
Jan Koláček

Viessmann, spol. s r.o.

KlkJ@viessmann.com

PROBLEMATIKA STAGNACE SOLÁRNÍCH ZAŘÍZENÍ

Solární termický kolektor generuje teplo vždy, když na jeho absorbér dopadne sluneční záření, a to nezávisle na aktuální potřebě. Není-li v soustavě možný nebo vhodný odběr tepla, dojde k růstu teploty v kolektoru až na maximální teplotu (tzv. klidová teplota), nastane stagnace, při které energetický zisk a ztráta udržují vzájemnou rovnováhu. V kolektorech se přitom dosahuje teplot, které překročí bod varu teplotnosné kapaliny. Většina výrobců používá teplotnosnou kapalinu na bázi propylenglykolu, u společnosti Viessmann je to kapalina s názvem Tyfocor LS. Tvoří ji směs vody s glykolem a doplňkové inhibitory na ochranu proti korozi a stárnutí. V případě časté stagnace dochází k vyššímu zatížení teplotnosné kapaliny a její postupné degradace. Molekuly glykolu se rozkládají přibližně při teplotách od 170 °C, vzniká oxidační reakce a začnou se tvořit kyseliny (vzrůstá nebezpečí koroze). Pokud klesne pH teplotnosné kapaliny pod hodnotu 7, je nutné kapalinu v soustavě vyměnit (viz Obr. 1). Při dlouho trvajícím jevu stagnace, může docházet až ke vzniku pevné inkrustace (viz Obr. 2).



Obr. 1 Degradace teplotnosné kapaliny (test kapaliny Tyfocor LS při 235 °C)



Obr. 2 Vznik pevné inkrustace v teplotnosné kapalině

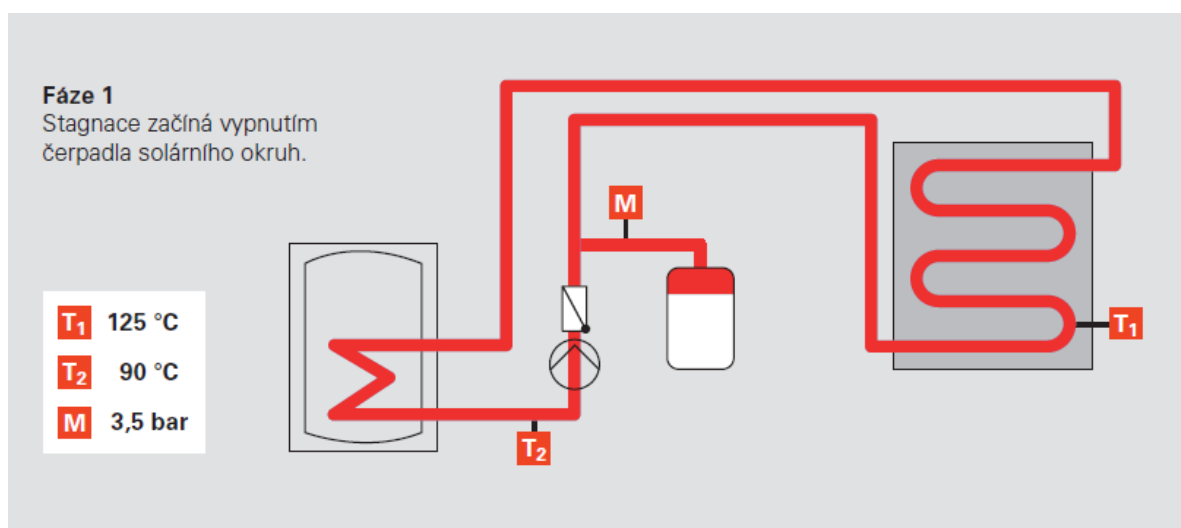
Důsledkem tohoto poškození ztrácí teplotná kapalina schopnost předávat teplo, dochází znečištění teplosměnných ploch, inkrustaci potrubí a může také dojít k poškození oběhového čerpadla. To vše znamená snížení účinnosti a nežádoucí dodatečné náklady na údržbu a provoz systému.

CHOVÁNÍ KOLEKTORU PŘI STAGNACI

Procesy, které se v kolektoru odehrávají při stagnaci, můžeme rozdělit na pět fází.

Fáze 1: Zvětšení objemu kapaliny

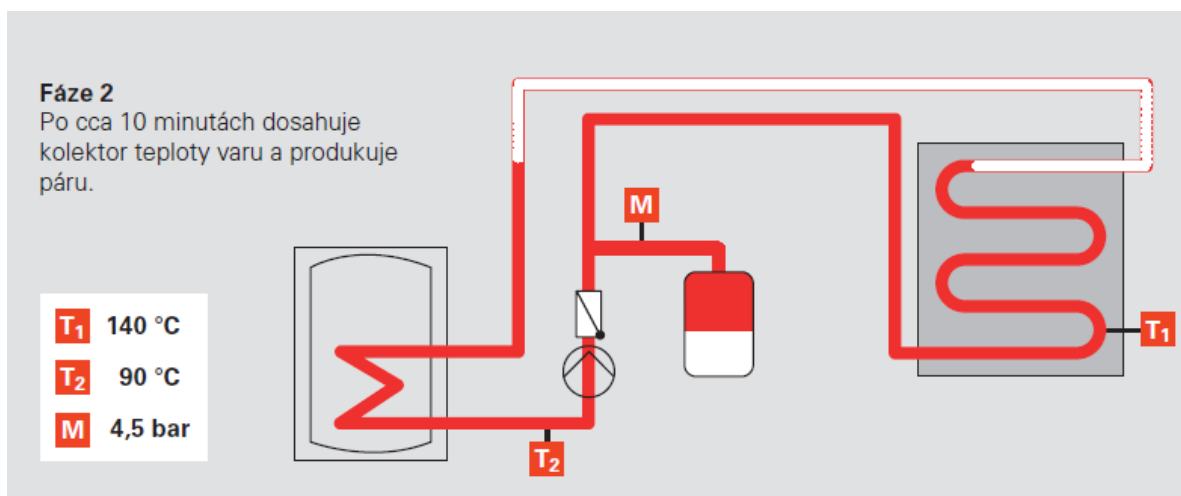
Bez odběru tepla z kolektoru v době příjmu slunečního záření se zvětšuje objem teplotné kapaliny a tlak v systému stoupá o přibližně 1 bar, dokud není dosaženo bodu varu (viz Obr. 3).



Obr. 3 První fáze procesu stagnace

Fáze 2: Odpařování teplotné kapaliny

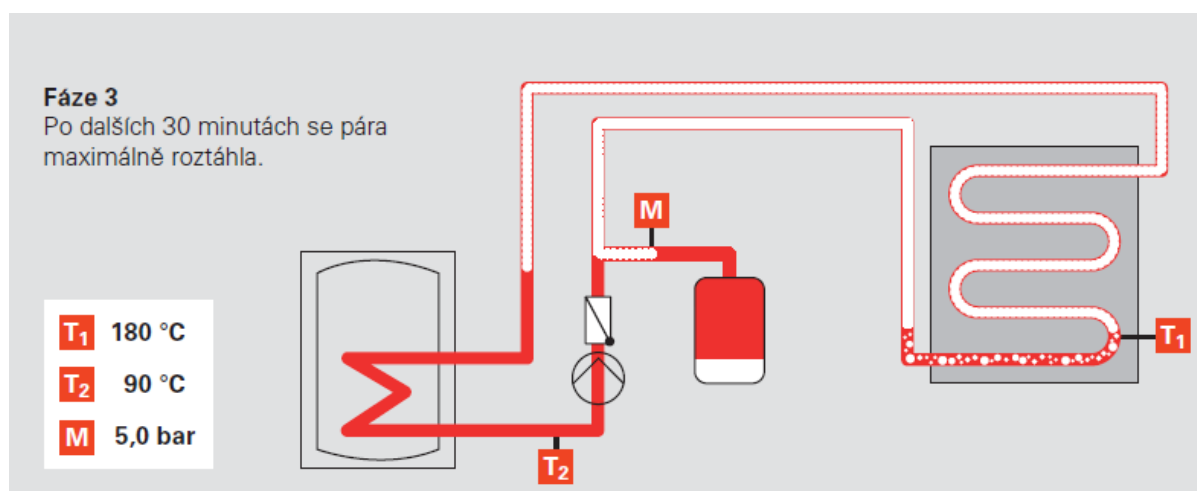
Při teplotě varu se v kolektoru tvoří pára, která začne vytlačovat kapalinu z kolektorů. Tlak v systému stoupne ještě o přibližně 1 bar. Teplota média se nyní pohybuje okolo 140 °C (viz Obr. 4).



Obr. 4 Druhá fáze procesu stagnace

Fáze 3: Bod varu teplotnosné látky v kolektoru

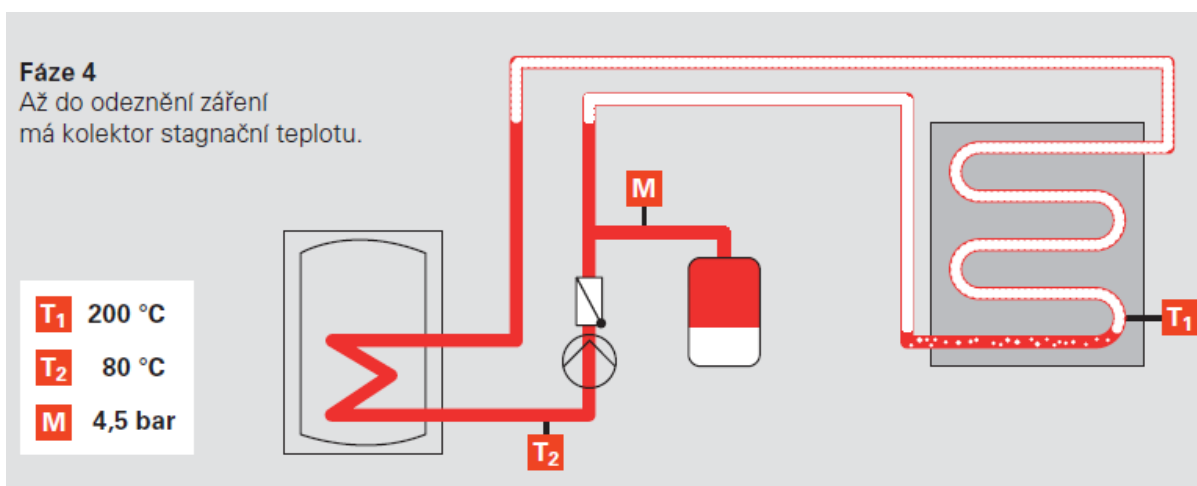
Dokud je v kolektoru teplotnosná kapalina, produkuje se pára. Směs glykolu a vody se přitom naředí, bod varu stoupá. Tlak v systému stoupá a dosáhne svého maxima, kapalina se zahřeje na teplotu až 180 °C (viz Obr. 5).



Obr.5 Třetí fáze procesu stagnace

Fáze 4: Přehřátí

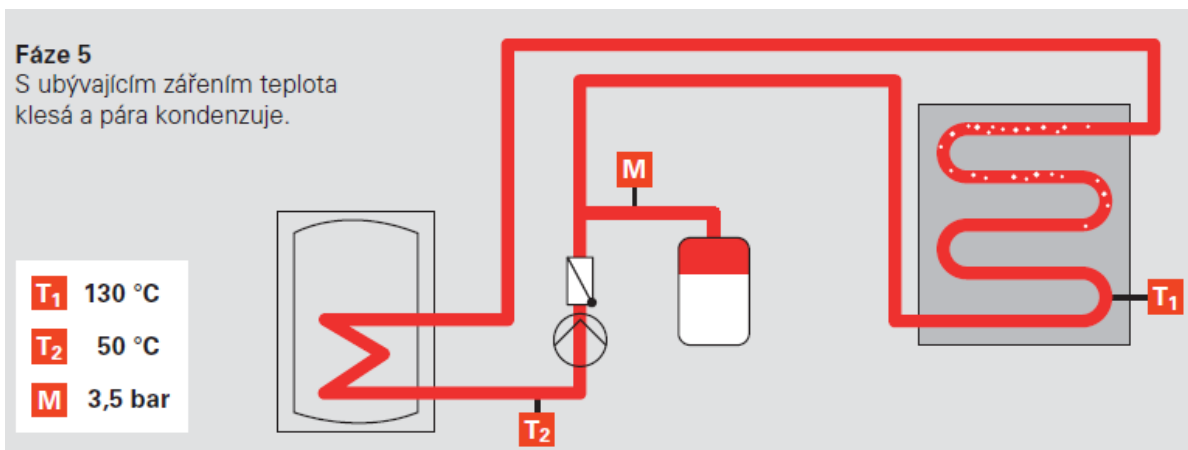
Naředěním kapaliny se může odpařovat stále méně vody. Dále stoupne bod varu a tím i teplota v kolektoru. Zmenšuje se výkon kolektoru a množství páry v systému ubývá. Tlak klesá, teplota v kolektoru dosahuje stagnační teploty. Tento stav přetrvává, dokud už nestačí záření, aby kolektor udrželo na stagnační teplotě (viz Obr. 6).



Obr.6 Čtvrtá fáze procesu stagnace

Fáze 5: Opětovné naplnění kolektoru

V případě úbytku solárního záření klesá teplota kolektoru a tlak v systému. Pára kondenzuje a teplotnosná kapalina se tlačí do kolektoru. Když dojde ke styku kapaliny s přehřátými kolektory, mohou se ještě objevit lehké parní rázy (viz Obr. 7).



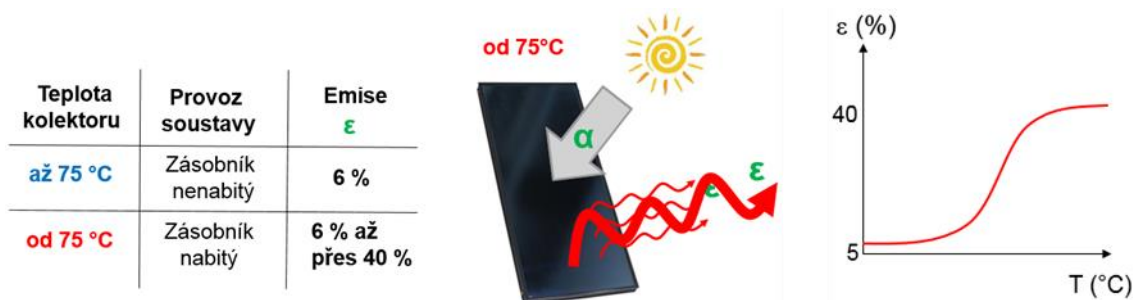
Obr. 7 Pátá fáze procesu stagnace

ŘEŠENÍ PROBLÉMU STAGNACE

Z výše uvedeného je zřejmé, že stagnace není v soustavě žádoucí. Důležité je tedy minimalizovat riziko stagnace. To lze docílit např. správným dimenzováním soustavy, použitím chladiče, použitím žaluzií pro zakrytí kolektorů, upuštěním zásobníku TV, ukládáním přebytků tepla do bazénu nebo otopné soustavy atd.

Společnost Viessmann nahlédla na problematiku eliminace stagnace z jiného úhlu. Hlavní myšlenkou bylo, řešit příčinu stagnace, nikoliv její následky. Proto se vývoj soustředil na místo, kde problém stagnace vzniká, tedy na absorpční vrstvu. Výsledkem dlouholetého vývoje a testování je zcela nová patentovaná absorpční vrstva ThermProtect. Vyvinout takovou vrstvu umožnil i fakt, že společnost Viessmann má vlastní výrobní technologii pro výrobu a nanášení absorpční vrstvy.

ThermProtect je selektivní vrstva absorpce, která v závislosti na teplotě mění své optické vlastnosti (krystalickou strukturu). Odevzdávání energie (emisivita ε) se automaticky přizpůsobuje podmínkám v soustavě. S rostoucí teplotou kolektorů se od teploty 75 °C zvyšuje emisivita (viz Obr. 8).

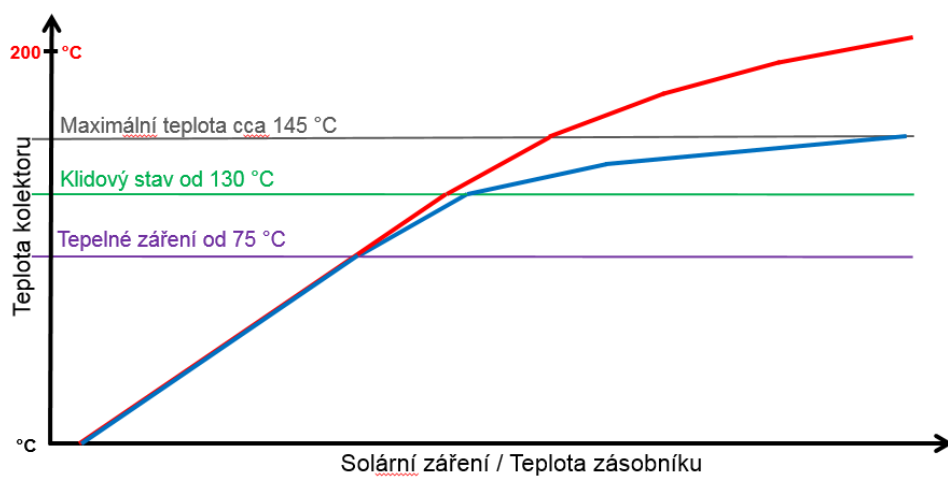


Obr. 8 Závislost emisivity na teplotě kolektoru

V normálním rozsahu teplot solárního zařízení mají kolektory s vrstvou ThermProtect tytéž výkonnostní parametry a optickou účinnost jako běžné solární kolektory. Jakmile však solární zásobník dosáhne požadovaného stavu nabití, působí nadbytek solární energie nárůst teploty kolektorů. Pokud teplota kolektoru překročí vypínací teplotu absorpce, přizpůsobí se výkon automaticky sníženému odběru tepla. Při zastavení zařízení dosahuje teplota v kolektoru max. klidové teploty 145 °C. Jakmile teplota kolektoru klesne, dojde opět k nárůstu výkonu.

Solární zařízení s plochými kolektory s funkcí vypínání umožňuje bezpečné zamezení tvorby páry při současném přizpůsobení tlaku v zařízení. Tento způsob je proto šetrný jak k součástem zařízení (čerpadlu, zpětným klapkám, expanzní nádobě atd.), tak k teplotně odolné kapalině. Výsledkem je vyšší spolehlivost, životnost systému a využití celého systému.

K zabránění jistého odpařování solární kapaliny je třeba u solárního zařízení s novými kolektory zvýšit jeho plnicí tlak. Tlak v nejvyšším bodě solární soustavy (kolektor) musí mít hodnotu 3,0 bar (v současných instalacích je tlak v nejvyšším bodě 1 bar). Při plnění solární soustavy musejí být rovněž započítány statická výška solárního zařízení, tlaková záloha pro ztráty odvodušňováním a přírůžka pro výškový rozdíl mezi expanzní nádobou a pojistným ventilem. Vstupní tlak expanzní nádoby musí být nastaven na konkrétní konfiguraci zařízení. Vstupní tlak expanzní nádoby se nastavuje vždy před plněním solární soustavy.

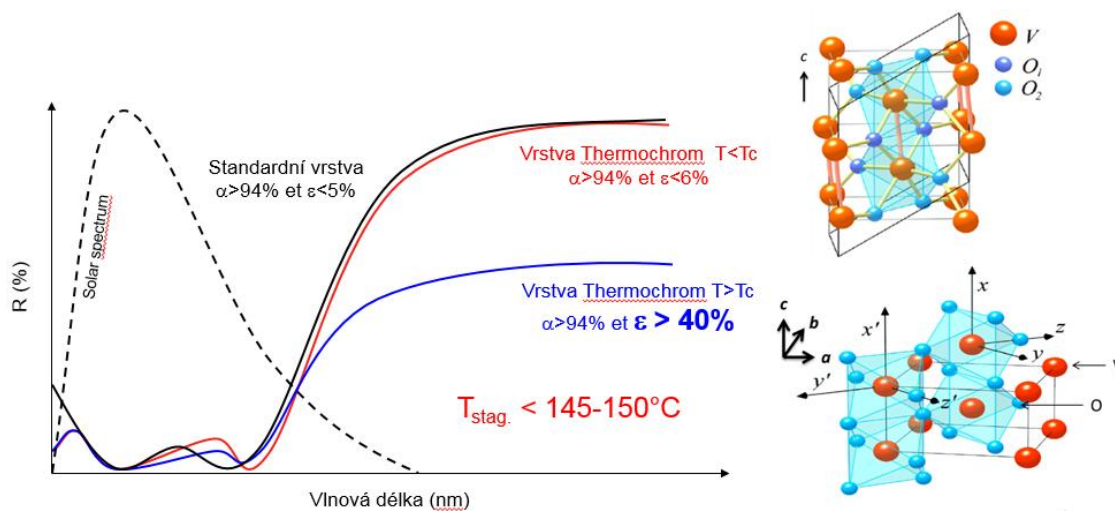


Teplotní průběh Selektivní vrstva (standard)

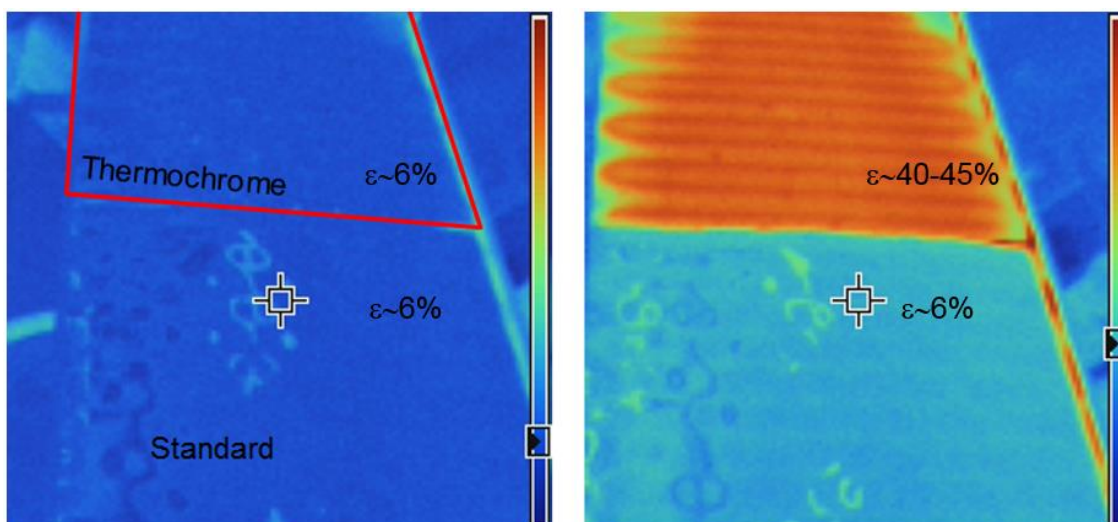
Teplotní průběh ThermProtect vrstva

Obr. 9 Závislost teploty solárního kolektoru na solárním záření a teplotě zásobníku

Základem ThermProtect je vrstva Thermochrom, která je mimojiné tvořena oxidy vanadia. V závislosti na teplotě se následně mění krystalická struktura vrstvy a její emisivita.



Obr. 10 Změna krystalické struktury vrstvy Thermochrom

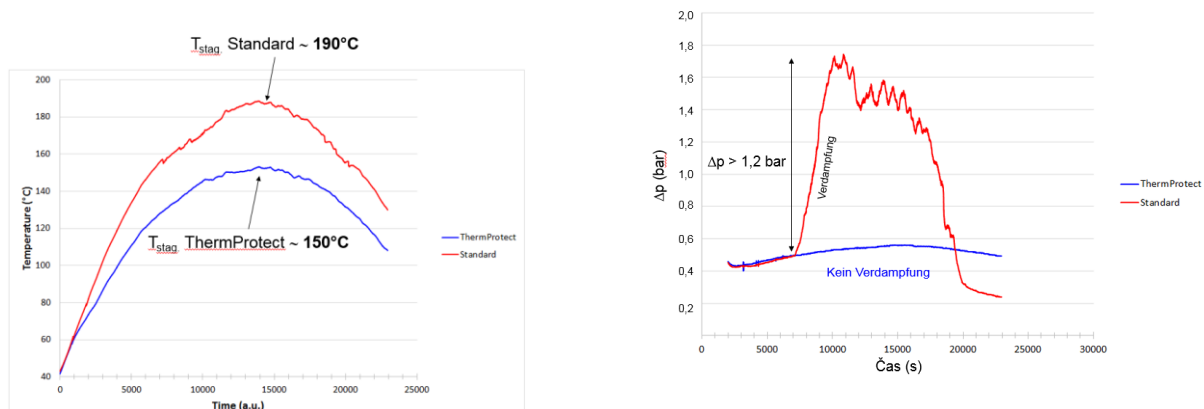


Obr. 11 Rozdíl emisivity na k standardní a novou vrstvou Thermochrome

TESTOVÁNÍ A PROTOTYPY

První prototypy nové absorbní vrstvy byly implementovány do kolektorů již před rokem 2010. Výsledkem byla série dlouhodobých testů, které prověřili parametry a funkčnost nové vrstvy. Testy byly zaměřené zejména na vysoké teploty ($T = 240\text{ °C}$), vysoké vlhkosti vzduchu ($T = 40\text{ °C}$, 95% RH) a cyklické zatěžování při teplotách 40 - 140 °C a více jak 7000 cyklech.

Parametry teploty stagnace a prevence odpařování v závislosti na čase byly porovnávány na identických instalacích.



Obr. 12 Průběh teploty stagnace a prevence odpařování

ZÁVĚR

Kolektory s vrstvou ThermProtect řeší základní problém stagnace solárních soustav, zejména při jejich předimenzování. Lze tedy pokrýt vyšší procento potřeby tepla bez rizika poškození systému a znehodnocení teplonosné kapaliny. Solární kolektory lze použít nejen pro ohřev TV, nebo jako podporu vytápění, ale také jako primární okruh pro adsorpční tepelné čerpadlo, nebo jako regenerační soustava pro tepelná čerpadla se zásobníkem ledu. Společnost Viessmann oficiálně představí kolektory nové generace během následujících týdnů. Tato nová technologie nenavyšuje výrobní náklady, cenová hladina kolektorů se tedy také nezmění. Souhrnné srovnání s dnes nabízenými kolektory je uvedeno níže (viz Obr. 13).

Standardní kolektor	Nový ThermProtect kolektor
$\alpha > 94\%$	$\alpha > 94\%$
$\varepsilon < 6\%$ pro nízkou T°	$\varepsilon < 6\%$ pro nízkou T°
$\varepsilon < 6\%$ pro vysokou T°	$\varepsilon > 40\%$ pro vysokou T°
Stagnace $T^\circ \sim 190^\circ\text{C}$	Stagnace $T^\circ < 145\text{--}150^\circ\text{C}$
Tlakové rázy: Vysoké (>1 bar)	Tlakové rázy: Žádné
Výkon: Vysoký	Výkon: Vysoký
Problém stagnace: Ano	Problém stagnace: Ne
Spolehlivost: Variabilní	Spolehlivost: Stále vysoká
Předimenzování: Ne	Předimenzování: Ano

Obr. 13 Porovnání rozdílů standardních kolektorů s kolektory nové generace

LITERATURA

- [1] VIESSMANN spol. s r.o., Projekční příručka - Solární termické systémy, 2009
- [2] VIESSMANN Werke GmbH & Co. KG, Multiplikatorenschulung schaltende Kollektoren, 2016
- [3] VIESSMANN spol. s r.o., Projekční návod Vitosol, 2016

TEPELNÉ ČERPADLO ZEMĚ-VODA JAKO ZDROJ TEPLA I CHLADU PRO UNIVERZITNÍ BUDOVU

Miloš Lain

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze
milos.lain@fs.cvut.cz

ANOTACE

Příspěvek se zabývá provozem tepelného čerpadla, které slouží jako zdroj tepla a chladu pro historickou univerzitní budovu s laboratořemi. Jsou provedeny analýzy teplot a vyhodnoceny topné a chladicí faktory. V článku je otevřena i problematika hodnocení zařízení při paralelní přípravě tepla a chladu.

ÚVOD

Potřeba chlazení u stávajících budov má obecně rostoucí tendenci. Stále širší používání moderních elektronických technologií vede k potřebě chlazení a klimatizace. Zajímavým příkladem tohoto vývoje je budova Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze na Albertově. Potřeba chlazení technologických zařízení instalovaných v této budově vedla k rozhodnutí instalovat centrální zdroj tepla a chladu tepelné čerpadlo se zemními vrty. Vzhledem k tomu, že se jedná o univerzitní pracoviště, byl od samého počátku projektu kladem velký důraz na monitorování provozu. Proto jsou k dispozici velmi podrobná data nejen ze strojovny ale i z vlastního pole vrtů.

POPIS BUDOVY A SYSTÉMU

V řešené univerzitní budově se nachází poměrně velké množství laboratorních přístrojů jako např. mikroskopy, lasery atd. Většina z těchto přístrojů vyžaduje buď přímé chlazení vodou, nebo nepřímé vzduchem z místnosti o požadované teplotě. Takové místnosti jsou pak osazeny ventilátorovými konvektory. Toto technologické chlazení je pro většinu aplikací v provozu celoročně. Jedná se původní zděnou budovu bez zateplení proto má budova i značné požadavky na vytápění v zimních měsících.

Vrty

Systém jímání tepla pro tepelná čerpadla ze země je založen na hlubinných geotermálních vertikálních vrtech (GVS). Bylo realizováno 27 vrtů o hloubce 135 m ve dvou vrtných polích. Horizontální vedení od jednotlivých vrtů vede do sběrné jímky, kde je umístěn rozdělovač a sběrač. Z rozdělovače a sběrače vychází páteřní vedení k tepelným čerpadlům.

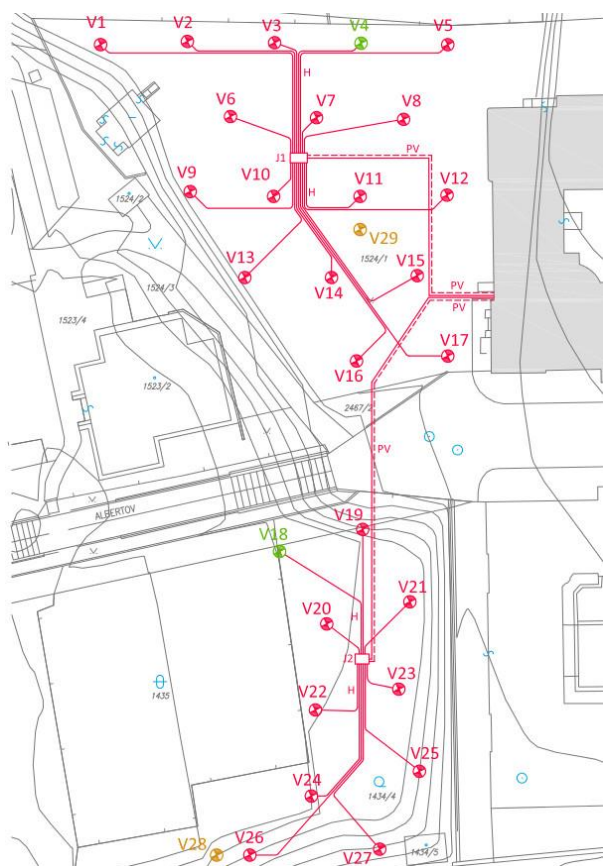
Zdroje tepla a chladu

Původní zdroj tepla byla plynová kotelná o výkonu 1360 kW. K tomuto zdroji tepla se přidaly v roce 2012 dvě tepelná čerpadla země/voda Viessmann 300-G PRO o celkovém jmenovitém topném výkonu 270 kW a celkovém jmenovitém chladicím výkonu 200 kW. Pro 0 °C je celkový tepelný výkon 250 kW a je to zároveň bod bivalence. Zapojení tepelných čerpadel je paralelní.

Teplonosnou látkou primárního okruhu je 30% roztok ethylenglykolu a sekundárního okruhu voda. Jsou použity dva deskové výměníky Alfa Laval CB76-50l a Alfa Laval CB200-80l a tři akumulární nádoby Regulus PS-1000, každá o objemu 1 m³.

Zapojení umožňuje 4 režimy provozu tepelného čerpadla:

- V prvním režimu slouží tepelné čerpadlo jako zdroj tepla pro akumulční zásobník topné vody a na primární straně odebírá teplo z vrtů.
- V druhém režimu slouží tepelné čerpadlo jako zdroj tepla i chladu a přečerpává teplo mezi zásobníky topné a chladné vody.
- V třetím režimu je možné volné chlazení ze zemních vrtů a tepelné čerpadlo je mimo provoz.
- Ve čtvrtém režimu slouží tepelné čerpadlo jako zdroj chladu pro akumulční zásobník chladné vody a přebytečné teplo odvádí do vrtů.



Obr. 1 Pole vrtů situace (vlevo) a fotografie stávající situace (vpravo nahoře) a tepelné čerpadlo (vpravo dole).

Měření a řízení

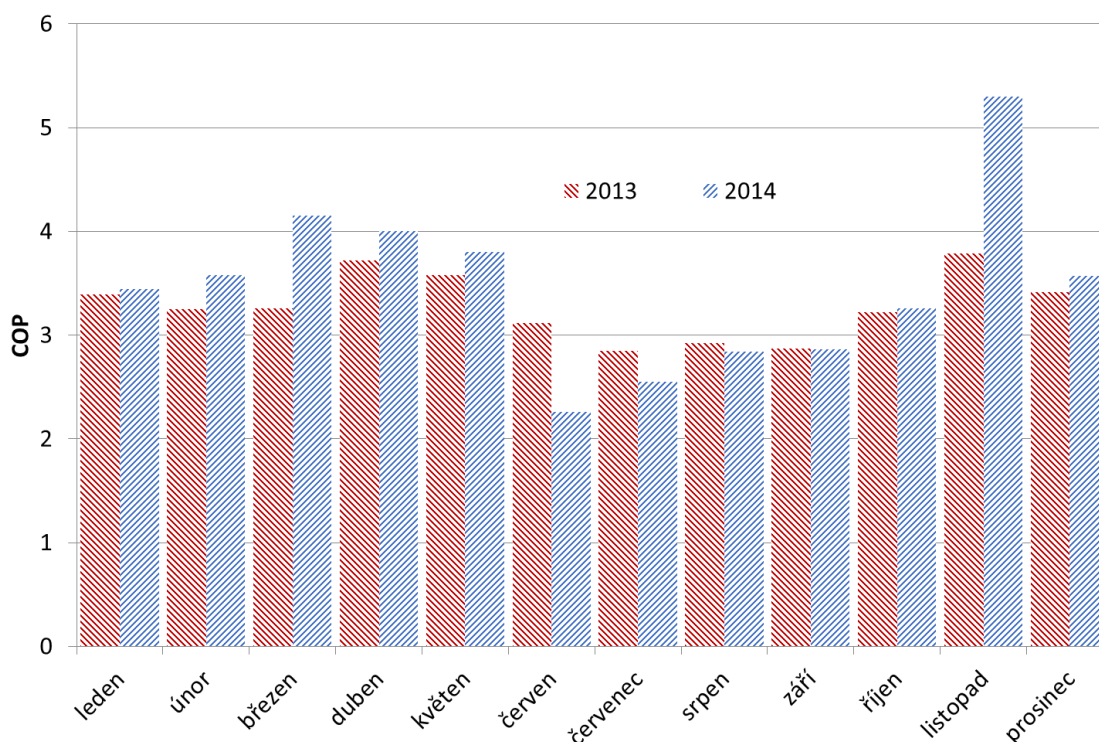
V celém systému je asi 140 senzorů. Tyto senzory snímají především teploty (ve vrtu v různých hloubkách, otopné a chladicí vody apod.) dále pak tepelné výkony (získávané z vrtů, výkon spotřebovaný na vytápění a chlazení) a spotřebu elektrické energie. Senzory pro snímání teploty jsou ve čtyřech vrtech a z toho ve dvou vrtech probíhá pouze měření bez odběru tepla nebo chladu.

Technologie je řízena digitálním řídicím systémem TRONIC 2000. Řídicí systém zajišťuje optimální přepínání mezi provozními režimy. Řídicí systém je pomocí Ethernetu připojen k nadřazenému centrálnímu dispečinku, ve kterém je vizualizační a bilanční software operátorského řízení. Naměřená data jsou ukládána do SQL databáze.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

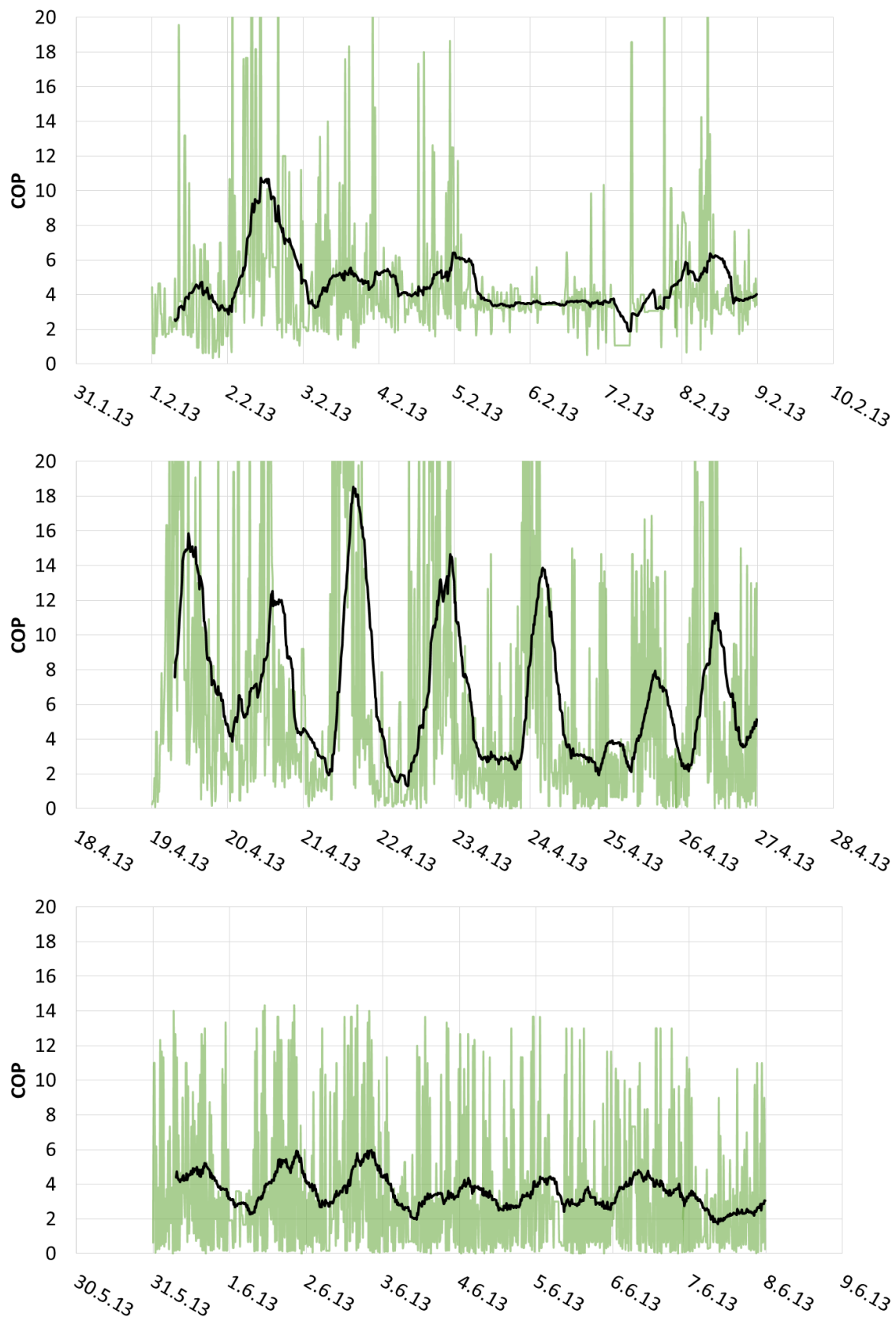
Byla provedena analýza naměřených dat z období roku 2013 a 2014. Z pohledu provozu zdroje tepla/chladu je zásadním ukazatelem chladicí/topný faktor. Je otázkou jak přistoupit k vyhodnocení topného a chladicího faktoru v případě, že zdroj slouží paralelně pro vytápění i chlazení. V sledovaném období vycházíme-li z 15-minutových dat, byla četnost provozu tepelného čerpadla pouze pro vytápění 27 %, pro paralelní vytápění chlazení 16 %, pro volné chlazení 3 % a pro pouze chlazení 54%. Při provozu však často dochází k přepínání režimů a v rámci celého dne je téměř vždy část provozu pro chlazení, takže ve výsledku je střádavé, či paralelní vytápění chlazení používáno celé zimní a přechodové období. Proto je vhodné vyhodnocovat celkový topný a chladicí faktor, zde označovaný *COP*, definovaný jako poměr součtu dodaného tepla a chladu k elektrickému příkonu tepelného čerpadla. V řešené budově však není měřen příkon výhradně tepelného čerpadla, ale celkový příkon strojovny zahrnující i pomocné energie oběhových čerpadel a prvků měření a regulace. Při vyhodnocování detailních (15 minutových) dat, je třeba zohlednit i zpoždění vzniklé díky hydraulice okruhu a setrvačnosti čidel.

Pro celkové hodnocení zdroje tepla/chladu je vhodné pracovat s dlouhodobějšími hodnotami, střední měsíční hodnoty vypočítané z měsíční výroby tepla chladu a spotřeby el. energie jsou znázorněny v následujícím grafu na Obr. 2.



Obr. 2 Měsíční hodnoty celkových topných/chladicích faktorů.

V grafech na Obr. 3 jsou znázorněny průběhy celkových topných + chladicích faktorů pro typických 9 dní různých období. Ve všech případech čtvrt hodinové hodnoty *COP* (v grafu zeleně) výrazně kolísají, to je způsobeno jak přepínáním režimů, tak zpožděním čidel. Pro vyhodnocení průběhu jsou vhodnější klouzavé průběhy vynesené plnou čarou.



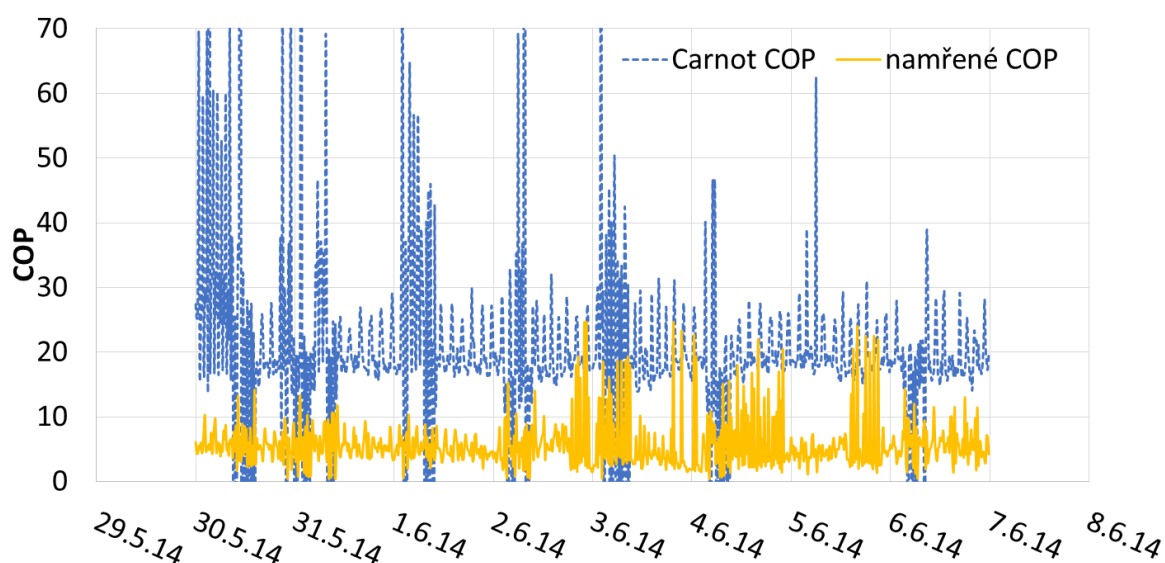
Obr. 3 Průběhy celkových topných/chladicích faktorů pro typickou zimu, přechodové období a léto.

V zimním období je v provozu vytápění i chlazení průběh a klouzavých průměrů kolísají mírně a faktor se pohybuje často kolem 4.

V přechodovém období na druhém grafu je kolísání výraznější většinou s denním cyklem ale ne s pravidelným výskytem minim a maxim. Celkové topné/hladicí faktory dosahují i poměrně vysokých hodnot.

V letním období, jak ukazuje třetí graf, jsou hodnoty většinou poměrně stabilní, zařízení pracuje jako zdroj chladu s chladicím faktorem kolem 3.

Byla provedena i analýza závislosti celkového faktoru na rozdílu teploty vody na výparníku a kondenzátoru tepelného čerpadla. A přestože tento teplotní rozdíl je teoreticky nejdůležitějším faktorem, díky vysokému kolísání způsobenému zpožděními, nelze jednoznačnou závislost prokázat. Ani vypočtený celkový topný/chladicí faktor vypočítaný z naměřených teplot pro ideální Carnotův cyklus nevykazuje podobnost s naměřenými hodnotami.



Obr. 4 Průběhy celkových topných/chladicích faktorů vypočtených z naměřených hodnot výkonů a příkonů a vypočtených pro Carnotův cyklus z naměřených teplot.

ZÁVĚR

Z výsledků měření a vyhodnocených celkových topných/chladicích faktorů tepelných čerpadel v řešené budově jednoznačně vyplývá, že pro budovu s celoroční potřebou chlazení je volba tepelného čerpadla se zemními vrty jako zdroje tepla a chladu velmi vhodná.

Analýzy naměřených dat napomáhají další optimalizaci provozu. V roce 2015 došlo ke zvýšení kapacity akumulace teplé a studené vody a pracujeme na analýze dat z roku 2015/16.

LITERATURA

- [1] CHARY, R., LAIN, M. (vedoucí). *The Ground to Water Heat Pump – the Energy Source for Heating and Cooling*. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí, 2015.
- [2] BEBER, R., *Dodávka a instalace technologie využití zemního tepla pro vytápění*, Projektová dokumentace ke stavebnímu povolení, Trocnic Control, Praha, 2011

VYUŽITÍ TEPLA Z KOMPRESOROVÉHO CHLAZENÍ NA ZIMNÍM STADIONU

Vladimíra Linhartová

České vysoké učení technické v Praze
vladimira.linhartova@fsv.cvut.cz

ANOTACE

Snahou provozovatelů zimních stadionů je snižovat množství spotřebovaných energií a zajistit tak ekonomicky vyrovnaný provoz. Mezi zásadní spotřebitele energie patří chlazení ledové plochy, ohřev vody pro rolbu, příprava TV, vytápění, systémy VZT a úprava vzduchu, osvětlení ledové plochy. Největším spotřebitelem energie je jednoznačně chlazení ledové plochy, jehož dopad lze eliminovat využitím tepla, které při chlazení vzniká jako vedlejší produkt. Zapojením výměníku k využití přehřátých par chladiva chladicího cyklu je již rozšířenou aplikací, využití kondenzačního tepla nikoliv. Na případové studii zimního stadionu v ČR, kde je využíváno teplo z přehřátých par chladiva, bude analyzována spotřeba energií jednotlivých technologií za sezónu. V zimním stadionu byla měřena spotřeba zemního plynu v kotelně a spotřeby vody pro rolbu a teplé vody v šatnách. Poté bude ověřen možný přínos využití nízko-potenciálního kondenzačního tepla v kombinaci s tepelným čerpadlem. Využití kondenzačního tepla bude posouzeno z hlediska dosažitelných úspor a investičních nákladů.

ÚVOD

Vynaložená energie k chlazení ledových ploch zimního stadionu může být ve formě odpadního tepla využita pro pokrytí potřeb tepla k ohřevu vody a vytápění v jeho areálu. Kondenzační teplo se uvolňuje ve více teplotních úrovních, jako teplo přehřátých par a latentní teplo kondenzace. V posuzovaném zimním stadionu je využíváno teplo přehřátých par k ohřevu vody pro rolby, k tání ledu ve sněžných jámách a k temperování podloží pod hrací plochou. Článek posuzuje možnost využití kondenzačního tepla pomocí tepelného čerpadla, které má potenciál, vzhledem k rozsahu teplot využívaného tepla, dosáhnout vysokých energetických, ekonomických a ekologických parametrů.

PARAMETRY ZIMNÍHO STADIONU

Areál zimního stadionu, který hostí 1. hokejovou ligu, zahrnuje hlavní ledovou plochu, tréninkovou plochu, administrativní část pro vedení klubu a restauraci s kavárnou. Na hlavní ledové ploše je led od července do konce dubna, dva měsíce v roce je plocha využívána k jiným účelům např. in-line bruslení. Rozměr ledové plochy je 26x59,5 m a je zde kapacita pro 5200 diváků. Provoz stadionu začíná v pracovní dny v 6 hodin a končí mezi 21 a 23 hodinou. Průměrně je ledová plocha upravována rolbou 12 krát za den. Druhá ledová plocha slouží k tréninkům a její provoz je kratší než provoz hlavní plochy. Druhá ledová plocha je upravována rolbou průměrně 8 krát za den.

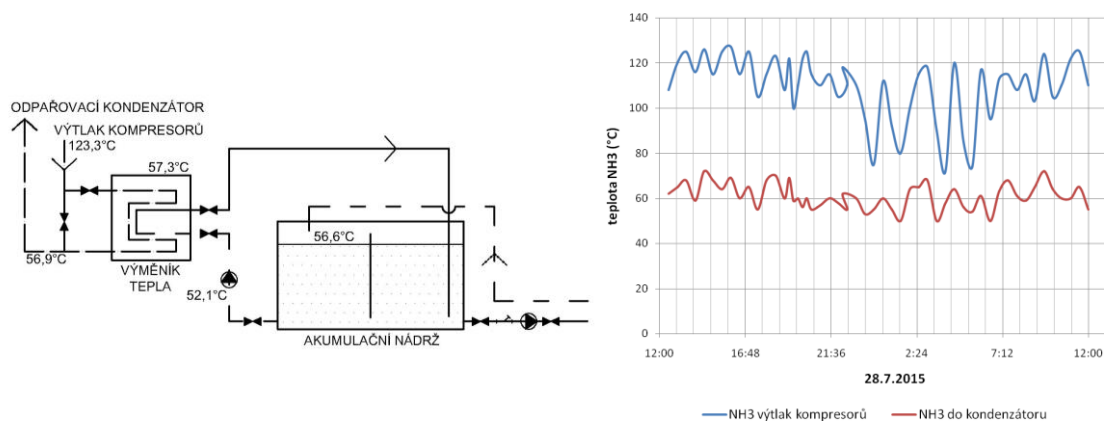
Zdroj energie pro chlazení ledových ploch

Zdrojem chladu jsou tři kompresorová zařízení, která jsou zde v provozu od roku 2002. Dva kompresory jsou čtyřválcové o chladicím výkonu 252 kW při teplotách -12/35 °C, třetí kompresor je šestiválcový o chladicím výkonu 378 kW při teplotách -12/35 °C, příkon šestiválcového kompresoru je 90 kW, čtyřválcového 70 kW. Při kondenzační teplotě 35 °C je teplota chladiva na výtlaku kompresoru 128 °C a izoentropická účinnost dosahuje hodnoty

0,84. Systém chlazení ledové plochy je přímý, neboli ledová plocha je výparníkem chladicího okruhu. Chladivem je R717 (čpavek) a jeho celkový objem v systému je 9 tun.

Odpadní teplo z přehřátých par kompresorového chladicího cyklu

Z chladicího systému je využíváno teplo přehřátých par NH_3 k odtávání ledu ve sněžné jámě hlavní ledové plochy, která má objem 23 m^3 , k tání ledu ve druhé sněžné jámě o objemu 4 m^3 , k ohřevu teplé vody pro úpravu ledu rolbou a také k temperování podloží ledové plochy. Požadovaná teplota vody pro rolbu je $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a objem pro jednu úpravu ledu 9 m^3 . Schéma zapojení výměníku předávajícího teplo přehřátých par do akumulačního zásobníku, který má objem 5 m^3 , je na obrázku 1 vlevo. Teplota vody v akumulační nádrži se pohybuje mezi 50 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Na Obr. 1 vpravo je vidět průběh teploty NH_3 na vstupu a výstupu z výměníku ze dne 28. 7. 2015.

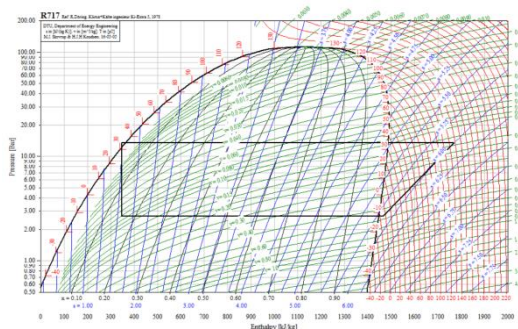
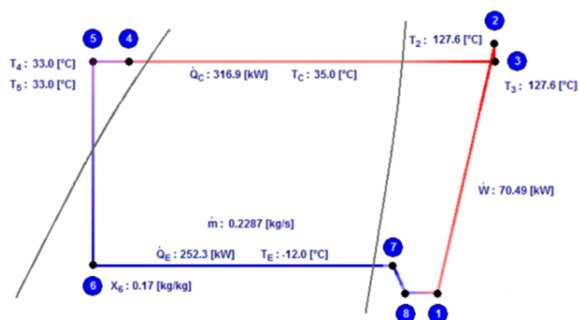


Obr. 1 Schéma zapojení výměníku pro využití tepla přehřátých par na akumulační zásobník a graf průběhu teplot NH_3 z 28. Července 2015.

Chladicí systém produkuje teplo, které se rovná součtu chladicího výkonu a absorbované spotřebě elektrické energie kompresoru. Teplo odváděné z chladicího zařízení q_K není na jedné teplotní úrovni, ale je rozděleno na teplo v přehřátých parách q_P a skupenské teplo kondenzace l_K .

Teplo v přehřátých parách tvoří max. 15 až 20 % z celkového odpadního tepla z chlazení a jeho množství závisí na výtláčné teplotě [1]. Teplota na výtlaku z kompresoru je závislá na kondenzační teplotě chladiva, termodynamických vlastnostech chladiva, vypařovací teplotě, na přehřátí nasávaných par a typu kompresoru. Teoretické maximální množství tepla v přehřátých parách je dáno ochlazením par až na kondenzační teplotu. Při zvýšení kondenzační teploty odpovídá nárůst pohonné energie zvýšení množství tepla v přehřátých parách a také se zvyšuje jeho teplota a tudíž i využitelnost.

Chladicí cyklus jednotlivých kompresorů byl vymodelován v programu CoolPack (viz Obr. 2). V CoolPacku bylo stanoveno celkové množství kondenzačního tepla a podíl tepla v přehřátých parách. V daném chladicím cyklu na tomto zimním stadionu tvoří teplo v přehřátých parách 17,7 % z celkového kondenzačního tepla.



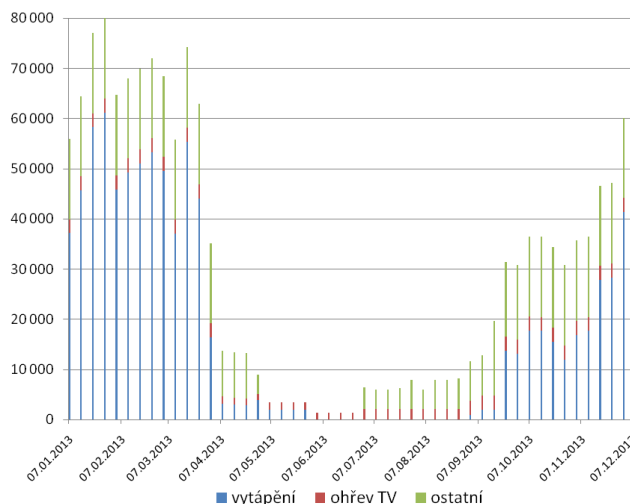
Obr. 2 Chladicí cyklus čtyřválcového kompresoru chlazení v programu CoolPack.

Pro stanovení množství tepla v přehřátých parách a skupenského tepla kondenzace byla zjištěna doba provozu jednotlivých kompresorů. Šestiválcový kompresor pracuje 2500 motohodin.rok⁻¹, první čtyřválcový kompresor 3080 motohodin.rok⁻¹ a druhý čtyřválcový 2750 motohodin.rok⁻¹. Maximální množství tepla z přehřátých par chladicího cyklu je celkem ze tří kompresorů 516 MWh.rok⁻¹.

Využitím tepla z přehřátých par nedochází v tomto případě k ovlivnění procesu chlazení a výraznému snížení chladicího faktoru, protože kondenzační teplota je výrazně pod výstupní teplotou z vloženého výměníku. Za výměníkem dále páry čpavku odcházejí do odpařovacího kondenzátoru o celkovém výkonu 1350 kW.

Zdroj tepla

Zdrojem tepla pro vytápění jsou tři plynové teplovodní kondenzační kotle o výkonu každého 330 kW. Plynové kotle slouží k vytápění administrativní části a šaten, k ohřevu TV, k ohřevu vody pro výměník VZT jednotky v tréninkové hale, k vaření v restauraci a při nedostatku tepla z přehřátých par slouží jako náhradní zdroj tepla. Spotřeba plynu je na zimním stadionu měřena po týdnech. Na Obr. 3 je graf se spotřebou plynu v roce 2013.



Obr. 3 Graf spotřeby plynu na zimním stadionu v roce 2013.

VYUŽITÍ KONDENZAČNÍHO TEPLA Z CHLADICÍHO CYKLU V AREÁLU ZIMNÍHO STADIONU

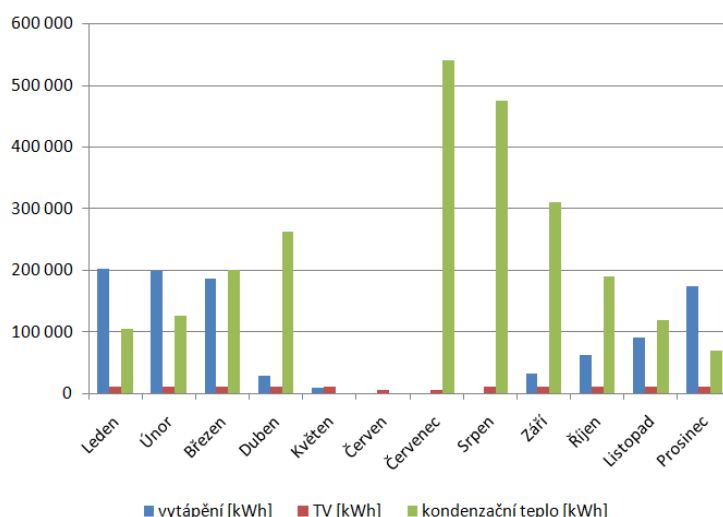
Kondenzační teplo tvoří největší část odpadního tepla z chlazení, ale je na nízké teplotní úrovni. Kondenzační teplota chladicích zařízení pracujících se čpavkem v létě dosahuje 35 °C, v zimním období neklesá pod 25 °C. Uvažovaná teplota vody ohřívané přes vložený

výměník čpavek/voda je v rozmezí 20 až 24 °C. Voda bude akumulována v zásobníku, aby mohla být dále přivedena do tepelných čerpadel voda-voda. Voda o teplotě 60 °C na výstupu tepelných čerpadel bude před distribucí do objektu akumulována v zásobníku. Možnosti využití tepla z kondenzace po zvýšení jeho teploty tepelnými čerpadly jsou (technologie, které již využívají teplo přehřátých par, nejsou uvažovány):

- Teplovodní vytápění,
- Příprava TV,
- VZT jednotka v tréninkové hale.

Vzduchotechnika a systém odvlhčování vzduchu o výkonu 50 kW je v tréninkové hale využíván nárazově a jeho potřeba tepla je ve srovnání s vytápěním a přípravou TV zanedbatelná, nebude proto v bilanci dále uvažována.

Roční spotřeba plynu pro vytápění v roce 2013 byla 985 MWh a pro přípravu TV 121 MWh. Celkové množství nízkoteplotního kondenzačního tepla bylo výpočtově stanoveno 2400 MWh.rok⁻¹. V grafu na Obr. 4 je vidět, že téměř polovina dostupného kondenzačního tepla je v měsících červenec a srpen, kdy je energeticky nejnáročnější vytvořit a udržovat ledovou plochu. Možnost využití kondenzačního tepla v letním období, kdy není potřeba vytápění, je v areálu zimního stadionu pouze k přípravě teplé vody.

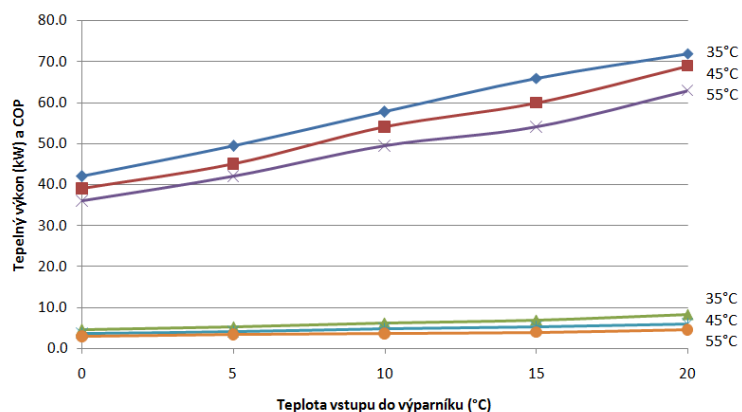


Obr. 4 Bilance potřeby plynu na UT a přípravu TV v zimním stadionu a množství dostupného nízkoteplotního kondenzačního tepla.

Z měsíční bilance energií vyplývá, že potřeba energie na přípravu TV bude pokryta kondenzačním teplem ze 100 % ve všech měsících kromě května a června, kdy kompresory chlazení nejsou v provozu. Potřeba tepla na vytápění bude kondenzačním teplem pokryta v lednu ze 46 %, v únoru z 60 %, v březnu, dubnu, září, říjnu a listopadu ze 100 % a v prosinci z 34 %. V celoroční bilanci energií je možné v areálu zimního stadionu využít 32 % nízkoteplotního kondenzačního tepla.

Návrh tepelného čerpadla

Teplota vody z nízkoteplotního akumulačního zásobníku bude navýšena tepelnými čerpadly voda-voda o výkonu každého 58 kW při W10W35. Podrobnější výkonové charakteristiky zařízení jsou na Obr. 5. Tepelná čerpadla budou zapojena dvě v kaskádě.

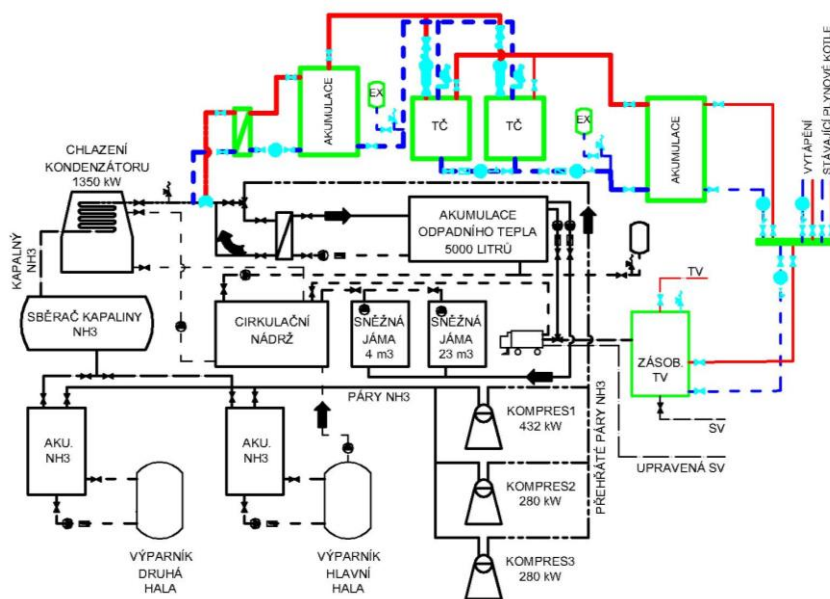


Obr. 5 Charakteristika hodnoceného tepelného čerpadla převzata z podkladů výrobce.

Bilance energií tepelných čerpadel byla provedena intervalovou metodou. Teplota vody z kondenzátoru tepelných čerpadel byla uvažována 60 °C, elektrický příkon oběhových čerpadel byl uvažován celkem 0,5 kW. Teplota vody na vstupu do tepelného čerpadla byla 20 až 24 °C. Výsledkem hodnocení je maximální využitelné množství dodaného tepla 772,4 MWh.rok⁻¹ přičemž množství spotřebované elektrické energie na pohon TČ je 192,6 MWh.rok⁻¹ a spotřeba elektrické energie pro pohon pomocných zařízení 6,2 MWh.rok⁻¹.

Aby bylo omezeno cyklování tepelných čerpadel, je navržena zásobník kondenzačního tepla objemu 4,5 m³ pro nabíjecí teplotu vody 24 °C, teplotu zpětné vody 14 °C. Objem akumulčního zásobníku na výstupu tepelných čerpadel byl navržen 5,0 m³ pro teplotu nabíjecí vody 60 °C. Oběh vody na obou stranách tepelných čerpadel je zajištěn oběhovými čerpadly, jejich regulace bude propojena s provozem tepelných čerpadel.

Na Obr. 6 je schéma zapojení stávajícího chladicího okruhu s doplněným vloženým výměníkem NH₃/voda, akumulčními nádržemi a tepelnými čerpadly. Stávající stav zapojení komponent chladicího systému a využití přehřátých par je znázorněn černobíle, navrhované využití kondenzačního tepla barevně.



Obr. 6 Schéma zapojení stávajícího a navrhovaného okruhu s tepelnými čerpadly.

Ekonomické hodnocení instalace

V Tab. 1 je uveden výsledek výpočtu prosté návratnosti investice systému k využití kondenzačního tepla. Ve výpočtu byla uvažována cena za elektrickou energii 1910 Kč.MWh⁻¹ a 1537 Kč.MWh⁻¹ zemního plynu.

Tab. 1 Vstupy a výsledky výpočtu prosté návratnosti investice pro využití nízkoteplotního kondenzačního tepla.

Skutečně dodané teplo TČ do systému	772,4	MWh.rok ⁻¹
Energie pro pohon TČ	192,6	MWh.rok ⁻¹
Energie pro pohon pomocných zařízení	6,2	MWh.rok ⁻¹
Zvýšení spotřeby elektrické energie instalací TČ	379 708	Kč
Úspora energie na přípravu TV	121	MWh.rok ⁻¹
Úspora energie na vytápění	667,5	MWh.rok ⁻¹
Úspora plynu celkem	1 211 925	Kč.rok ⁻¹
Investiční náklady	2 350 000	Kč
Prostá návratnost investice	2,8	rok

ZHODNOCENÍ

Na zimním stadionu, kde jsou zdrojem chladu tři kompresory, bylo vypočítáno množství odpadního tepla v přehřátých parách chladicího cyklu a množství nízkoteplotního kondenzačního tepla. Nyní je v komplexu využívána energie přehřátých par k temperování podloží ledové plochy, k tání ledu ve sněžných jámách a k ohřevu technologické vody pro rolbu.

Aby mohlo být využito nízkoteplotní kondenzační teplo, byl do systému vložen výměník čpavek/voda a akumulární nádrž, které umožní zapojit dvojici tepelných čerpadel a ta budou sloužit ke zvýšení teploty vody na využitelnou úroveň. Tato energie bude využívána k vytápění a ohřevu teplé vody. Navržené řešení bylo analyzováno z hlediska současnosti odběru a dodávky tepla. Téměř 50 % nízkoteplotního kondenzačního tepla je k dispozici v červenci a v srpnu, kdy je potřeba tepla na vytápění nulová. V zimních měsících je v objektu možné kondenzační teplo využít, ale pro pokrytí potřeb tepla budou částečně využívány i stávající plynové kotle. V přechodném období budou potřeby tepla na UT a TV pokryty kondenzačním teplem ze 100 %.

Přestože toto technické řešení využije jen 32 % kondenzačního tepla, nízké investiční náklady na instalaci a velká úspora zemního plynu vede ke krátké prosté době návratnosti, která je kratší než životnost vložených zařízení. Využitím nízkoteplotního kondenzačního tepla je možné snížit spotřebu plynu o 73 216 m³.rok⁻¹.

Využití kondenzačního tepla z chladicího cyklu mimo areál zimního stadionu

Poté co jsou veškeré potřeby tepla v areálu zimního stadionu související s vytápěním, temperováním podloží a ohřevem teplé a technologické vody pokryty v technicky možné míře odpadním teplem z chladicího cyklu, je k dispozici stále 68 % nízkoteplotního kondenzačního tepla. Jedná se celkem o 1,6 MWh tepelné energie za rok. V zimních měsících je veškeré odpadní teplo využito v areálu zimního stadionu, dostupná tepelná energie je k dispozici v měsících březen, duben a červenec až listopad. Kondenzační teplo může být v letních měsících akumulováno v podzemním zásobníku tepla nebo může být využito v sousedním objektu, například k ohřevu vody v bazénu.

ZÁVĚR

Předmětem článku je zhodnocení možností využití tepla, které vzniká při kompresorovém chlazení ledové plochy na zimním stadionu. Kondenzační teplo se skládá z části energie v přehřátých parách a z nízkoteplotního skupenského tepla kondenzace. V zimním stadionu je využíváno teplo přehřátých par. Analýza možností využití nízkoteplotního kondenzačního tepla v kombinaci s tepelnými čerpadly prokázala, že na tomto zimním stadionu je ekonomicky výhodné dostupnou energií pokrýt potřebu tepla na vytápění a přípravu teplé vody. Roční úspora zemního plynu může dosáhnout až 73 216 m³. Zejména v letních měsících se nabízí možnost akumulace nebo dalšího využití kondenzačního tepla například k ohřevu vody na plaveckém bazénu.

LITERATURA

- [1] Norma ČSN EN 15 316-4-2 Tepelné soustavy v budovách – Výpočtová metoda pro stanovení energetické potřeby a účinností soustavy - Část 4-2: Výroba tepla pro vytápění, tepelná čerpadla.
- [2] PETRÁK J. PETRÁK M. Tepelná čerpadla. České vysoké učení technické v Praze. Praha 2004.

Tento článek vznikl za podpory studentského grantu SGS ČVUT.

MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI MIKROKOGENERAČNÍHO ORC ZAŘÍZENÍ NA BIOMASU

Jakub Maščuch, Václav Vodička, Matěj Vykoukal

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

Matej.Vykoukal@fs.cvut.cz

ANOTACE

Evropská unie předpokládá v rámci svých strategických dokumentů z oblasti energetiky přechod současného energetického systému na tzv. Smart Grids. Principem Smart Grids je vzájemná obousměrná komunikace mezi lokálními výrobními zdroji elektrické energie a spotřebiči. Bude-li se i nadále zvyšovat tlak na snižování produkce CO₂ a na zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu, bude muset Česká republika intenzifikovat využití biomasy v lokálních zdrojích. Biomasa je jediným tzv. tvrdým obnovitelným zdrojem, tedy zdrojem dostupným dle potřeby bez přímého vlivu počasí. Jednou z klíčových výhod, které mikrokogenerace ve srovnání s centrálními systémy přináší, je možnost jednoduše a levně kombinovat tepelné cykly s cílem zvýšit celkovou elektrickou účinnost zařízení. V příspěvku je blíže popsána jedna z perspektivních cest kombinování kondenzačních tepelných cyklů, která navazuje na výzkum a vývoj unikátní ORC technologie nízkého elektrického výkonu z biomasy v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Jde o jejich sériové řazení do systému označovaného DORC (double ORC).

ORC NA ČVUT

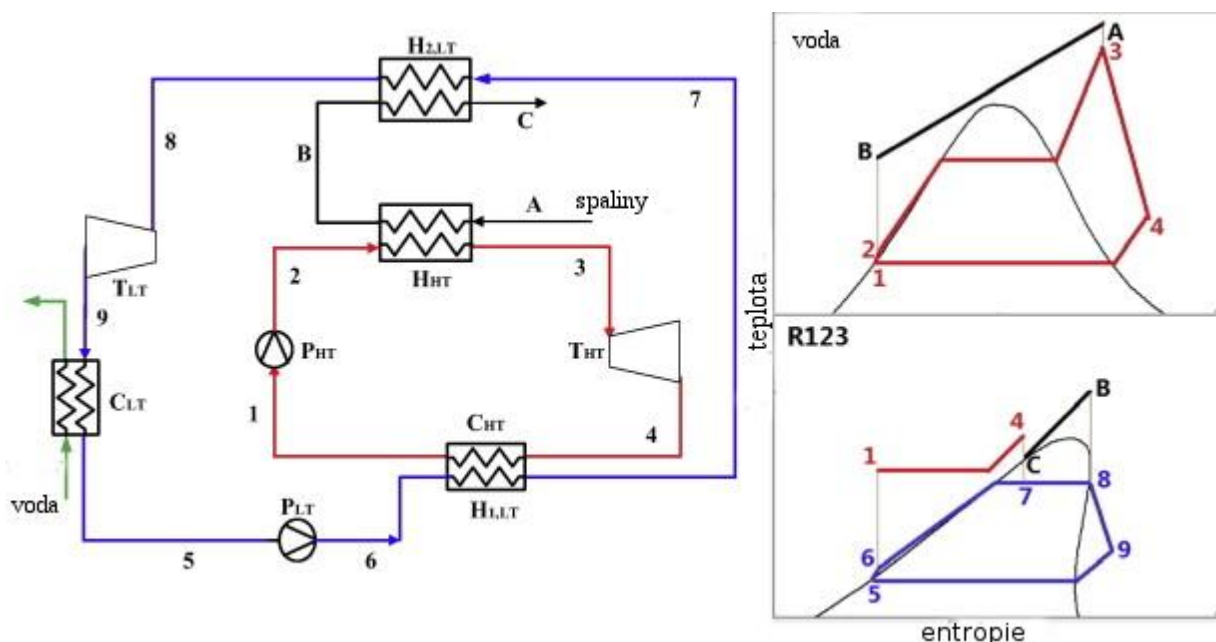
Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze se zabývá problematikou vývoje jednotky na biomasu nízkého elektrického výkonu na bázi organického Rankinova cyklu (ORC) již od roku 2008. Po ekonomických analýzách následoval návrh a realizace první experimentální jednotky ORC, jejímž základem byl modifikovaný ocelový kotel o tepelném výkonu 25 kW. Zařízení bylo koncipováno jako model pro ověření teoretických předpokladů a poskytovalo přibližně 0,5 kW hrubého elektrického výkonu. Po výstavbě Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT se sídlem v Buštěhradu byla otevřena moderní Laboratoř organických Rankinových cyklů a jejich aplikací (LORCA). V polovině roku 2014 byl uveden do provozu laboratorní prototyp II. generace ORC, které slouží jako technologický základ pro další aplikace. Významným milníkem v historii projektu byl získání ocenění E-ON Energy Globe Award ČR, tzv. „ekologický oskar“ v roce 2015, v kategorii Nápad. Předmětem vítězného projektu byla „Mikroelektrárna WAVE na výrobu elektřiny a tepla z biomasy“. Technologie je modifikací laboratorního zařízení II. generace, ve kterém je jako zdroj tepla využito teplo spalín ze spalování dřevních štěpek. V polovině roku 2014 byla započata výstavba prototypu této oceněné jednotky, který je interně označován názvem CHP (Combined Heat and Power). Jeho tepelný výkon je 50 kW a elektrický výkon činí po odečtení vlastní spotřeby 1,5 kW. Jako pracovní médium se zde používá silikonový olej – hexamethyldisiloxan (MM). Generátor na výrobu elektřiny je poháněn lamelovým expandérem s unikátní konstrukcí, která je výsledkem vývoje na UCEEB ČVUT v Praze. V současné době je prototyp podrobován prvním testům, jejichž výsledky naplňují očekávání a zařízení dosahuje navržených parametrů. Jednou z cest budoucího výzkumu a vývoje směrem k vyšší elektrické účinnosti je kombinování kondenzačních tepelných cyklů.

ANALÝZA DORC

Klíčovou výhodou mikrokogenerace oproti centrálním systémům je možnost levného a relativně snadného kombinování kondenzačních tepelných cyklů. Jednou z perspektivních

cest kombinování kondenzačních tepelných cyklů je sériové řazení ORC cyklů do systému označovaného jako DORC (Dual ORC, Double ORC). Na UCEEB ČVUT v Praze, ve spolupráci s Ústavem Energetiky ČVUT v Praze, byla zpracována práce [4], která měla za cíl určit perspektivu DORC. Jako výchozí pro další aplikace byla zvolena kombinace Rankinova cyklu (RC) a Organického Rankinova cyklu (ORC), která je popsána v práci [1]. Tento systém pracuje s pracovními látkami: voda / chladivo R123 a byl vybrán k podrobné analýze na základě následujících kritérií:

- systém pracoval ve výkonovém pásmu do 50 kW, proto spadá do kategorie mikrogenerace a výkonově odpovídá zařízení CHP;
- v práci je k dispozici dostatek vstupních dat a dalších informací pro kompletní zpracování analýzy;
- práci bylo možné analyzovat s použitím dostupných počítačových programů;
- konfigurace nebyla příliš komplikovaná a bylo možné ji modifikovat pro jiné pracovní látky;
- k dispozici byly i předešlé práce autorů na téma DORC [2, 3].



Obr. 1 Schéma oběhu DORC vlevo, vpravo obecný průběh procesů v systému na $T - s$ diagramu, převzato z [1] a upraveno

Schematicky je kombinace oběhů znázorněna na Obr. 1 vlevo. V pravé části obrázku jsou zobrazeny průběhy tepelných oběhů pro obě části v $T-s$ (teplota – entropie) diagramech. Každý z oběhů se skládá z turbíny, napájecího čerpadla, spalínového výměníku tepla a kondenzátoru. Výměna tepla začíná v prvním výměníku tepla spaliny/voda (H_{HT}), kde se využívá ještě poměrně vysokých teplot (spaliny) pro ohřev RC parního oběhu s konáním práce na turbíně (T_{HT}). Odvedené teplo v kondenzátoru RC části (C_{HT}) slouží jako výparné teplo pro druhý oběh ORC ($H_{1,LT}$), přičemž další dodatečný ohřev chladiva ORC oběhu probíhá ve druhém výměníku tepla spaliny/chladivo ORC ($H_{2,LT}$). Další užitečnou práci vykoná ORC turbína (T_{LT}) a odvod tepla z celého kombinovaného cyklu zabezpečuje kondenzátor ORC chladivo/chladicí voda (C_{LT}). Autoři [1] vyhodnotili právě navrhovaný oběh DORC voda / R123 z hlediska sledovaných parametrů (užitečný výkon, tepelná a exergetická účinnost atp.) jako nejlepší a tedy i nejperspektivnější pro uvažovanou aplikaci.

Základním cílem práce [4] bylo vytvoření matematického modelu, podle kterého by bylo možné hodnotit parametry systému. Tento model byl převzat z [1] a při jeho tvorbě se vycházelo z následujících základních předpokladů:

- všechny procesy probíhají za ustálených stavů;
- tlakové a tepelné ztráty všech komponent a spojovacích potrubí jsou zanedbány;
- Rankinův parní cyklus pracuje při podkritických parametrech;
- Rankinův organický cyklus pracuje při podkritických parametrech;
- s ohledem na rosný bod spalin je nejnižší teplota spalin vždy větší nebo rovna 120 °C.

V Tab. 1 jsou uvedeny vstupní parametry výpočtů, které byly převzaty z reálného spalovacího motoru, na který byl systém v [1] navržen.

Tab. 1 Parametry kogenerační jednotky zdroje tepla z [1]

Motor – čtyřdobý dieselaagregát			
Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu (Obr. 1)
Elektrický výkon	235,8	kWe	
Teplota výstupních spalin	519	°C	A
Hmotnostní tok spalin	0,2752	kg/s	

Dalšími veličinami, které musely být definovány, byly parametry pro komponenty RC a ORC částí, konkrétně pro tepelné výměníky a točivé stroje. Tyto jsou uvedeny v Tab. 2.

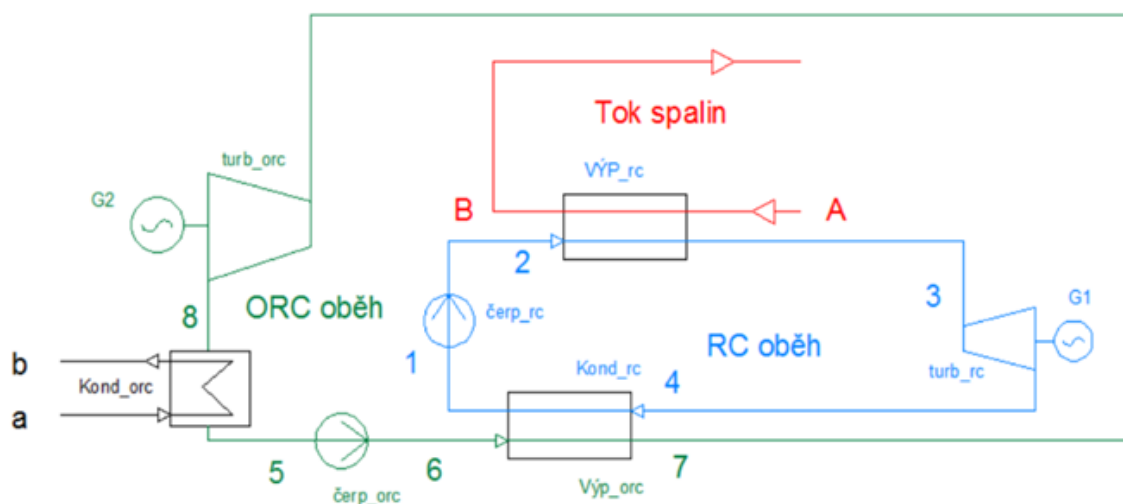
Tab. 2 Parametry RC a ORC části

Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu (Obr. 1)
Termodynamická účinnost čerpadel	80	%	
Termodynamická účinnost turbín	75	%	
Teplota vstupní chladicí vody	20	°C	D
Výparný tlak RC oběhu	6	MPa	2
Kondenzační teplota RC oběhu	97	°C	1
Výparná teplota ORC oběhu	92	°C	6
Kondenzační teplota ORC oběhu	30	°C	5

Postup matematického modelování je detailně popsán v práci [4]. Za účelem ověření funkčnosti modelu použitého v [1] byla v práci [4] provedena kontrola výsledků formou výpočtu se stejnými hodnotami jako v [1]. Výsledky byly následně porovnány. Z tohoto porovnání byl zjištěn nesoulad, který je způsoben nerespektováním minimálního teplotního přiblížení (PP_{spal}) ve výparníku RC části (H_{HT} na Obr. 1). To zásadním způsobem ovlivňuje výsledky matematického modelu. Tyto problémy by mohly být vyřešeny pomocí kontroly minimálního teplotního přiblížení (PP_{spal}) ve výparníku RC části (H_{HT} na Obr. 1). Přestože tato kontrola v publikované studii [1] chybí, byla zařazena do matematického modelu v [4].

NÁVRCH ZJEDNODUŠENÉ KONFIGURACE SYSTÉMU DORC

Základní motivací pro zjednodušení konfigurace DORC byla možnost jeho aplikace na zařízení CHP. Po kontrole a následné modifikaci matematického modelu bylo v práci [4] navrženo zjednodušení a následně porovnáno s původním systémem za stejných vstupních podmínek. Nový zjednodušený systém je znázorněn na Obr. 2. V porovnání s původní variantou na Obr. 1 zde chybí spalínový výměník tepla na ORC části ($H_{2,LT}$) a tedy vypařování organické pracovní látky probíhá výhradně ve výměníku RC/ORC (označení $KOND_{RC} = VÝP_{ORC}$). Jako vstupní parametry byly použity hodnoty z Tab. 1 a 2. Oba kombinované oběhy DORC tedy pracovaly při stejných výparných, kondenzačních a vstupních tlacích (a teplotách), a také při stejných termodynamických účinnostech komponent. Pro zjednodušení bylo přistoupeno k úpravě uspořádání výměny tepla ve zjednodušeném návrhu DORC, která spočívala ve specifické změně koncové teploty spalin za výměníkem tepla $VÝP_{RC}$ a v úpravě hmotnostního toku spalin tak, aby byla zabezpečena stejná množství přivedeného tepla do obou systémů. Díky tomuto předpokladu je možné porovnat účinnosti samotných cyklů a nikoliv účinnosti celých zařízení. S ohledem na cíl práce, kterým bylo dosažení maximální celkové elektrické účinnosti, je tento předpoklad přijatelný. Porovnání vstupních parametrů je v Tab. 3.



Obr. 2 Návrh zjednodušené konfigurace DORC

Postup výpočtu pro zjednodušenou variantu DORC byl proveden pomocí stejného matematického modelu jako u původního DORC s použitím stejných pracovních látek voda / R123. Dosažené hodnoty sledovaných veličin jsou zobrazeny v Tab. 4.

Celková elektrická účinnost η_{all} je definována vztahem

$$\eta_{all} = \frac{W_{RC} + W_{ORC}}{Q_{p_{all}}} \quad (1)$$

kde W_{RC} je práce RC cyklu, W_{ORC} je práce ORC cyklu a $Q_{p_{all}}$ je celkové přivedené teplo do DORC. Z porovnání lze konstatovat, že výhodnější konfigurací z hlediska celkové elektrické účinnosti je zjednodušená varianta DORC. V porovnání s původní konfigurací dokáže zjednodušená varianta DORC produkovat v RC části víc užitečného výkonu W_{RC} vzhledem k tomu, že veškeré přijaté teplo (původně přiváděné do $VÝP_{RC}$ a $VÝP_{ORC}$) je dodáno jenom do výměníku $VÝP_{RC}$. To znamená, že RC část o stejných parametrech dokáže z většího množství tepla vyprodukovat víc užitečného výkonu, což má kladný vliv i na celkovou elektrickou účinnost DORC. Zmenšení výkonu na ORC části bylo ve zjednodušené variantě jenom

nepatrné. Na základě těchto skutečností byl pro další optimalizaci zvolen zjednodušený návrh DORC, který je z hlediska dosažitelné nejvyšší celkové elektrické účinnosti vhodnější.

Tab. 3 Vstupní parametry pro oba systémy

Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu (Obr. 2)
Přivedené teplo do obou systémů	122,571	kW	
Vstupní teplota turbíny RC (turb_rc)	480	°C	3
Parametry DORC podle [1] (Obr. 1)			
Hmotnostní tok spalin	0,2752	kg/s	
Teplota spalin na vstupu do VÝP_rc	519	°C	A
Teplota spalin na výstupu z VÝP_rc	223	°C	B
Parametry návrhu zjednodušeného DORC (Obr. 2)			
Hmotnostní tok spalin	0,400	kg/s	
Teplota spalin na vstupu do VÝP_rc	519	°C	A
Teplota spalin na výstupu z VÝP_rc	250	°C	B

Tab. 4 Porovnání dosažených parametrů obou systémů

Parametr	Původní DORC	Zjednodušený DORC	Jednotka	Absolutní rozdíl hodnot	Relativní rozdíl v %
Užitečná práce RC	21,170	28,110	kW	+6,940	32,783
Užitečná práce ORC	10,879	10,135	kW	-0,744	6,842
Celková užitečná práce	32,049	38,244	kW	+6,196	19,332
Celková elektrická účinnost	26,147	31,201	%	5,054	19,330

ANALÝZA PRACOVNÍCH LÁTEK ZJEDNODUŠENÉHO SYSTÉMU DORC

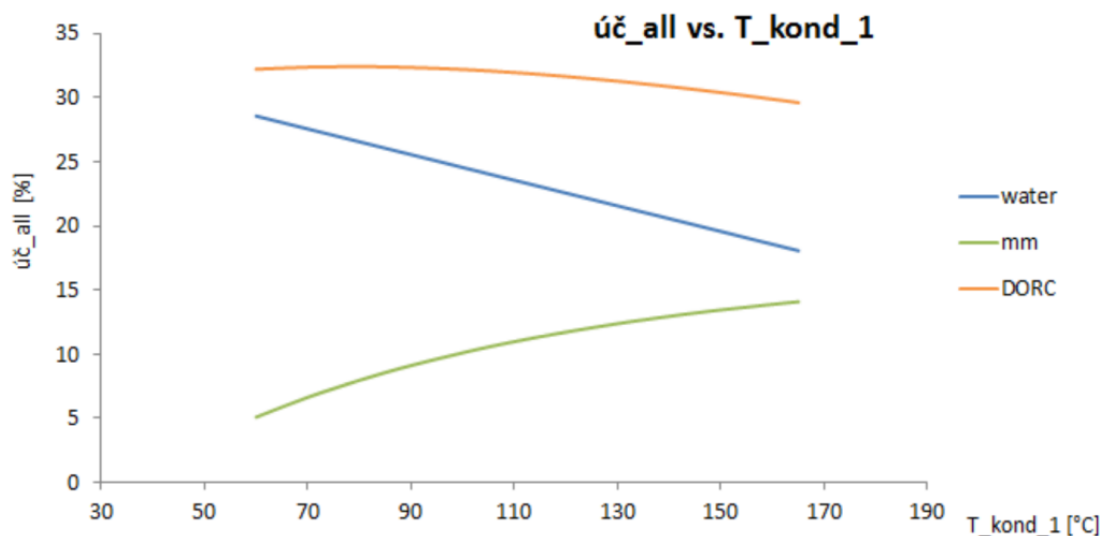
Rozšíření studie [4] o další pracovní látky mělo za cíl zjistit, jak se změní celková elektrická účinnost zjednodušeného systému DORC pro různé kombinace v RC a ORC části. Výpočty byly provedeny pro kombinaci vody a organické látky nebo dvou organických látek. Byla přijata podmínka, že expanze par za turbínou končí v oblasti přehřáté páry. Během konání práce neprobíhají skupenské změny, které by přinášely problémy na lopatkách reálného expanzního zařízení. Kromě vody bylo celkem posuzováno dalších 7 pracovních látek ze tří základních kategorií: **Chladiva** (R1234yf); **Siloxany** (MM, MDM); **Uhlovodíky** (Isobutan, Propan, Etanol, Metanol). Chladivo R123 nebylo dále posuzováno, jelikož jeho použití je zakázáno Montrealským protokolem [5] o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu. Pro dosažení co možná nejvyšší elektrické účinnosti pro CHP bylo zkoumáno použití vyšších admisních (tlakových a teplotních) parametrů než bylo v práci [1] a hledala se optimální teplota pro kondenzaci 1. oběhu. Jako zdroj energie byly uvažovány spaliny o vstupních parametrech, které jsou uvedeny v Tab. 5. Tyto parametry byly vybrány tak, aby se co nejvíce blížily parametrům v zařízení CHP, které bylo v té době projektováno.

Tab. 5 Vstupní parametry zdroje tepla

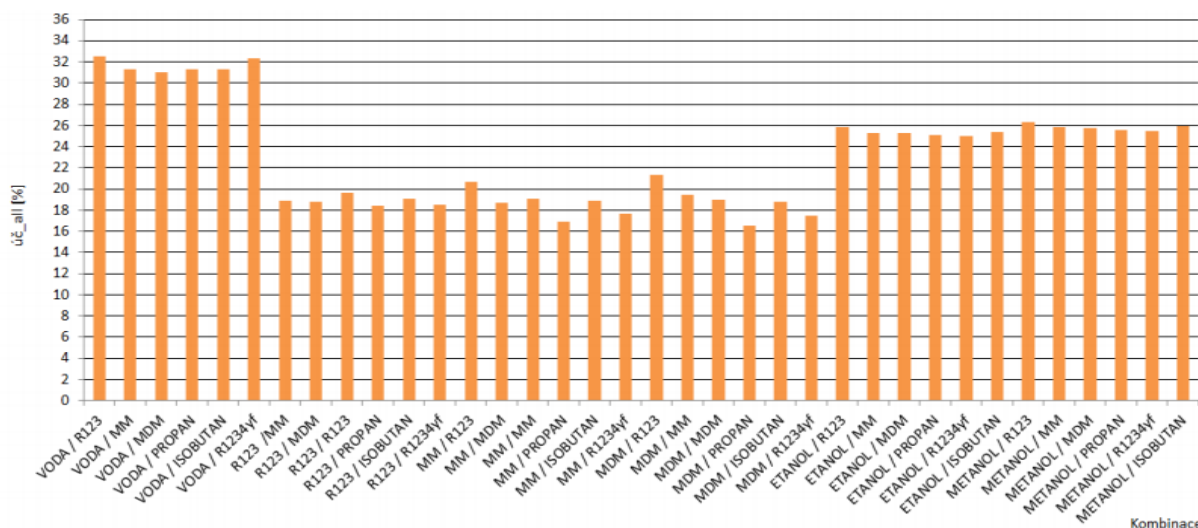
Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu (Obr. 2)
Teplota spalin na vstupu	650	°C	A
Teplota spalin na výstupu	200	°C	B
Hmotnostní tok spalin	0,2752	kg/s	
Dostupná tepelná energie spalin	142,528	kWt	

Na Obr. 3 je zachycena závislost celkové elektrické účinnosti (η_{all}) na kondenzační teplotě RC oběhu, která byla definována tlakem 10 MPa. Parametr kondenzační teploty RC oběhu měl značný vliv na změnu celkové tepelné účinnosti DORC a tento vliv je znázorněn na obrázku 3 pro kombinaci voda / MM. Díky tomu bylo nutné najít pro každou kombinaci médií optimální kondenzační teploty tak, aby byl zajištěn konec expanze RC oběhu v oblasti přehřáté páry. Výchozím systémem pro budoucí aplikaci DORC je CHP, ve kterém se využívá médium MM. Z tohoto důvodu je na obrázku 3 znázorněna kombinace médií voda / MM.

Pracovní látky propan, R1234yf a isobutan byly posouzeny jako nevhodné pro aplikaci na 1. stupeň DORC vzhledem k velmi nízkým hodnotám maximální výparné teploty. Celkem byla provedena komparace 36 kombinací pracovních látek, výsledky jsou uvedeny ve [4]. Pro srovnání výsledků byly pro všechny kombinace použity stejné vstupní parametry tepla (Tab. 5) a technické omezení komponent (Tab. 2). Hlavním sledovaným parametrem byla elektrická účinnost systému DORC. Porovnání posuzovaných DORC ve smyslu celkové elektrické účinnosti je na obrázku 4. Nejvyšších hodnot elektrické účinnosti dosahovala kombinace voda / R1234yf a voda / MM. U čistě organických kombinací to byly metanol / R123 a metanol / isobutan.



Obr. 3 Závislost celkové účinnosti DORC na kondenzační teplotě RC oběhu



Obr. 4 Elektrická účinnost sledovaných kombinací pracovních látek DORC

ZÁVĚR

Na základě provedených analýz je možné dospět k závěru, že aplikace DORC je perspektivní cestou pro zvýšení elektrické účinnosti ORC cyklů využívaných v zařízení CHP na UCEEB ČVUT v Praze. Po porovnání kombinací osmi druhů médií bylo zjištěno, že účinnost systému voda / MM se příliš neliší od maximální účinnosti všech zkoumaných kombinací. Z tohoto důvodu je pokračování výzkumu a vývoje ORC s MM perspektivní cestou. Na základě provedených analýz byl navržen systém DORC, který by výhledově mohl dosáhnout celkové elektrické účinnosti na hranici 30 % pro aplikace v decentralizované energetice.

ZDROJE

- [1] SHU, G. a kolektiv. *Comparative study of alternative ORC-based combined power systems to exploit high temperature waste heat*. [online]. Tianjin University China: 28.10.2014, [4.5.2016]. Energy conversion and management 89 (2015), s. 541 - 554. doi:10.1016/j.enconman.2014.10.020.

- [2] SHU, G. a kolektiv. *Analysis of regenerative dual-loop organic Rankine cycles (DORCs) used in engine waste heat recovery*. [online]. December 2013, [4.5.2016]. Energy conversion and management 76 (2013) str. 234 - 243. doi:10.1016/j.enconman.2013.07.036.
- [3] SHU, G. a kolektiv. *Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery*. [online]. January 2014, [4.5.2016]. Applied Energy 113 (2014) str. 1188 - 1198. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.027
- [4] CHABREČEK E., Studie kombinace vybraných tepelných cyklů pro mikrokogenerační jednotky s vysokou elektrickou účinností (2015) g
- [5] Vídeňská úmluva na ochranu ozonové vrstvy a Montrealský protokol o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, 1985.

KOMBINACE FV SYSTÉMU, TEPELNÉHO ČERPADLA A DLOUHODOBÉ AKUMULACE

Tomáš Matuška¹, Bořivoj Šourek¹, Jan Sedlář¹, Michal Broum²

¹Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

²Regulus, s r.o.

tomas.matuska@uceeb.cvut.cz

ANOTACE

Příspěvek se zabývá simulační analýzou energetického systému, který kombinuje fotovoltaický systém s tepelným čerpadlem a sezónním akumulátorem vytvořeným v podzákladí rodinného domu. Výsledky ukazují, že využitím pokročilého řízení může energetický systém výrazně snížit spotřebu elektrické energie a zvýšit využití OZE v budově. Rodinný dům tak může splnit i ambiciózní kritéria hodnocení téměř nulových budov.

ÚVOD

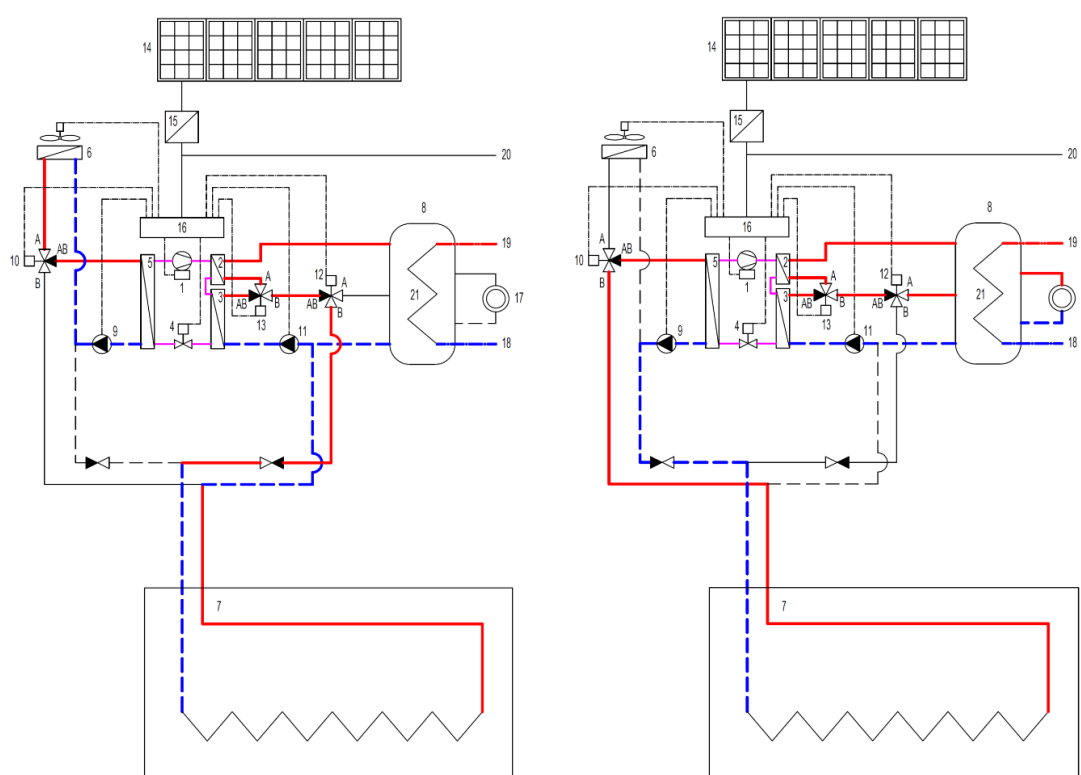
Novela Evropské směrnice o energetické náročnosti budov [1] přinesla jasnou vizi a příležitost k proměně výstavby budov směřujících k tzv. energeticky nulovým budovám. Členské státy přistupují k nastavení legislativních podmínek různým způsobem a s různou rychlostí. Praktický dopad nastavení podmínek pro téměř nulové budovy v České republice [2] je tristní, neboť téměř nulovou budovou může běžně být v oblasti rodinných a bytových domů budova bez jakéhokoli využití OZE [3], v případě administrativních budov dokonce budova vytápěná neobnovitelnou elektřinou [4]. Jiný (nelegislativní) přístup, daleko více v proudu snah evropských států skutečně snižovat energetickou náročnost budov představuje například informativní příloha A normy ČSN 73 0540-2 [5]. V oblasti rodinných domů jsou tzv. téměř nulové budovy definovány jako budovy s měrnou potřebou neobnovitelné primární energie (na vytápění, chlazení, přípravu teplé vody a pomocné energie) menší než **30 kWh/m².rok**, což je poloviční (přísnější) hodnota oproti českému požadavku na energetickou náročnost pasivního domu [6].

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov spolupracuje od roku 2015 v rámci řešení projektu TA04021243 se společností Regulus na vývoji energetického systému pro téměř nulové budovy. Cílem řešení projektu je vyvinout ekonomicky konkurenceschopný energetický systém s vysokým podílem využití obnovitelných zdrojů energie (nad 70 %) pro vytápění a přípravu teplé vody v budově, který umožní maximálně využít produkci místního FV systému.

KONCEPT

Koncept energetického systému pro zvýšení využití OZE pro vytápění a přípravu teplé vody v rodinném domě je založen na kombinaci fotovoltaické technologie a technologie pokročilého tepelného čerpadla. Vyvíjený systém zároveň nemá mít vyšší náklady (investiční a provozní v časovém horizontu 10 let) než tradiční kombinace FV systému a běžného tepelného čerpadla (se zemním vrtem), nicméně má výrazně zvýšit podíl OZE pro dodávku tepla v rodinném domě spojením se stavebně jednoduchou a levnou sezónní akumulací v podzákladí domu a tepelným čerpadlem s přizpůsobováním elektrického příkonu aktuální výrobě FV systému a zároveň má snížit náročnost budovy na odběr energie pro vytápění a přípravu teplé vody z elektrické sítě.

Základem takového systému (viz zjednodušené schéma na Obr. 1) je tepelného čerpadlo sestávající z výparníku (5), **kompresoru s regulací otáček (1)**, kondenzátoru (3) doplněného **chladičem přehřátých par (2)** pro zvýšení využitelnosti přečerpávaného tepla a tím celkové efektivity, dále elektronicky řízeného expanzního ventilu (4) a **integrovaného regulátoru (16)**. Otáčky kompresoru tepelného čerpadla jsou řízeny integrovaným regulátorem podle externího požadavku vycházejícího z aktuálního elektrického výkonu místního FV systému (14) tak, aby příkon kompresoru včetně dalších pomocných prvků (oběhová čerpadla, pohony ventilů, regulace) nepřekročil elektrický výkon aktuálně generovaný FV systémem. Pokročilý regulátor využívá matematického popisu provozních parametrů tepelného čerpadla a **podle aktuálních podmínek predikuje jeho elektrický příkon** a podle poměru mezi aktuálním elektrickým výkonem FV systému a predikovaným elektrickým příkonem systému s tepelným čerpadlem **přizpůsobuje otáčky kompresoru tepelného čerpadla výkonu FV systému**. Zároveň ale regulátor udržuje kompresor v jeho pracovní oblasti, která se mění se změnou otáček a s teplotou na primární a sekundární straně tepelného čerpadla [7].



Obr. 1 Schéma konceptu tepelného čerpadla: provoz v létě (vlevo), provoz v zimě (vpravo)

Součástí technického řešení energetického systému je **spojení tepelného čerpadla se zemním zásobníkem tepla v podloží domu** pro sezónní akumulaci tepla prostřednictvím výměníku tepla z plastových trubek. Tepelné čerpadlo v případě dostatečné produkce elektrické energie FV systémem v letním období přizpůsobuje svůj elektrický příkon a podle potřeby přečerpává teplo z okolního prostředí chladičem venkovního vzduchu (6) do budovy pro přípravu teplé vody prostřednictvím kombinovaného vodního zásobníku tepla (8) nebo ho ukládá do zemního zásobníku tepla (7), anebo současně - teplo z kondenzátoru na nízké teplotě 25 až 35 °C se ukládá do zemního zásobníku, zatímco teplo z chladiče přehřátých par chladiva s vysokou teplotní úrovní 60 °C se ukládá do kombinovaného vodního zásobníku, a to **bez použití elektrické energie z konvenční elektrické sítě**.

V případě odběru tepla budovou při podmínkách snížené produkce elektrické energie FV systémem pod minimální hodnotu sníženého elektrického příkonu kompresoru tepelného čerpadla, tj. zejména v zimním období nebo v noci, se využívá pro pohon tepelného čerpadla automaticky i elektrické energie z konvenční elektrické sítě. Tepelné čerpadlo pak odebírá naakumulované teplo ze zemního zásobníku o významně vyšší teplotě (10 až 35 °C) než je teplota okolního prostředí a pracuje tak s významně vyšší efektivitou při dodávce tepla do budovy. Tím dochází k **úspoře elektrické energie z konvenční sítě** a zároveň celoročně k maximalizaci využití dostupné obnovitelné elektrické energie z FV systému. Schéma funkce systému je uvedeno na Obr. 1 pro letní období (vlevo) a zimní období (vpravo). Schéma je znázorněno zjednodušeně bez respektování odlišných teplotných látek v okruzích. Jejich definice bude součástí dalšího vývoje.

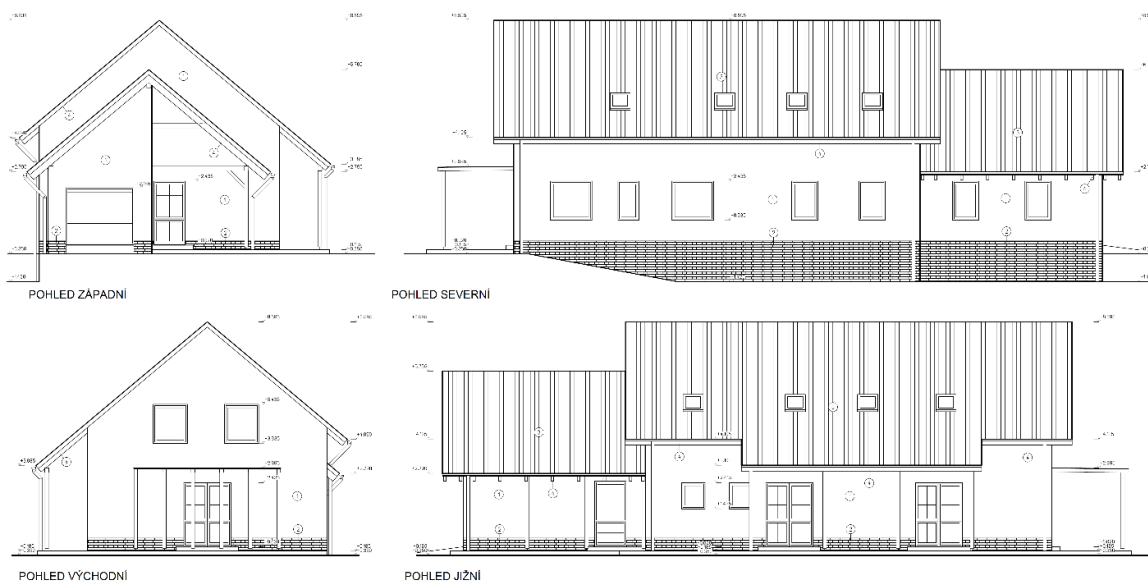
Oproti konvenčnímu řešení má navržené řešení energetického systému několik zásadních výhod:

- využití chladiče přehřátých par pro přípravu teplé vody na vysoké teplotě bez zvýšení spotřeby elektrické energie kompresoru – zvýšení efektivity samotného tepelného čerpadla;
- kombinovaný vodní zásobník tepla s optimalizovanou polohou připojovacích nátrubků a vhodně navrženou plochou vnitřního výměníku přípravy teplé vody – větší plocha výměníku v zóně přípravy teplé vody snižuje potřebný rozdíl teplot mezi vodním objemem a vystupující teplou vodou) a umožňuje efektivní provoz tepelného čerpadla i pro přípravu teplé vody;
- využití přebytečné obnovitelné elektřiny pro tepelné čerpadlo k nabíjení zásobníku teplé vody na vyšší teplotu a tím zvýšení jeho akumulační schopnosti pro překlenutí odběrových špiček – v letním období výrazné zvýšení pokrytí potřeby tepla na přípravu teplé vody z OZE;
- využití přebytečné obnovitelné elektřiny pro nabíjení zemního zásobníku a akumulaci tepla – snížení energetické náročnosti provozu tepelného čerpadla v zimním období využitím zemního zásobníku;
- možnost řízení elektrického příkonu tepelného čerpadla podle výkonu FV systému (20 až 100 %) – možnost provozovat tepelné čerpadlo výraznou dobu v roce zcela bez potřeby vnější elektrické energie;
- snížení investičních nákladů – provedení zemního zásobníku a chladiče venkovního vzduchu bude levnější než náklady na provedení zemní sondy;
- možnost provozu zemního zásobníku s otopnou vodou namísto nemrznoucí kapaliny – bude prověřeno počítačovou simulací, možná další úspora nákladů.

BUDOVA

Pro ověření funkce systému nejdříve simulací a posléze realizací demonstračního zařízení byl zvolen rodinný dům v Hamrech u Hlinska. Rodinný dům je dvoupodlažní stavba (viz Obr. 2) s obestavěným prostorem 935 m³ a celkovou obytnou plochou 190 m². Rodinný dům je stavebně koncipován s velmi nízkou energetickou náročností. Součinitele prostupu tepla konstrukcí splňují hodnoty doporučené pro tzv. pasivní domy. Základy jsou provedeny systémem ztraceného bednění opatřeným polystyrenem EPS tl. 16 cm. Podlaha přízemí je ze stropních betonových panelů Goldbeck, svrchní tepelná izolace podlahy je provedena v tl. 24 cm, izolace mezi panely a zemním zásobníkem je 10 cm polystyrenu (celkem 34 cm

izolace mezi zásobníkem v podloží a vnitřním prostorem). Dům je postaven v systému Porotherm Profi 30T s vnějším kontaktním zateplovacím systémem tloušťce 18 cm na bázi minerální vlny. Sedlová střešní konstrukce se sklonem 40° je tvořena tesařským krovem vaznicové soustavy s tepelnou izolací z minerální vlny 24 cm.



Obr. 2 Pohledy na rodinný dům



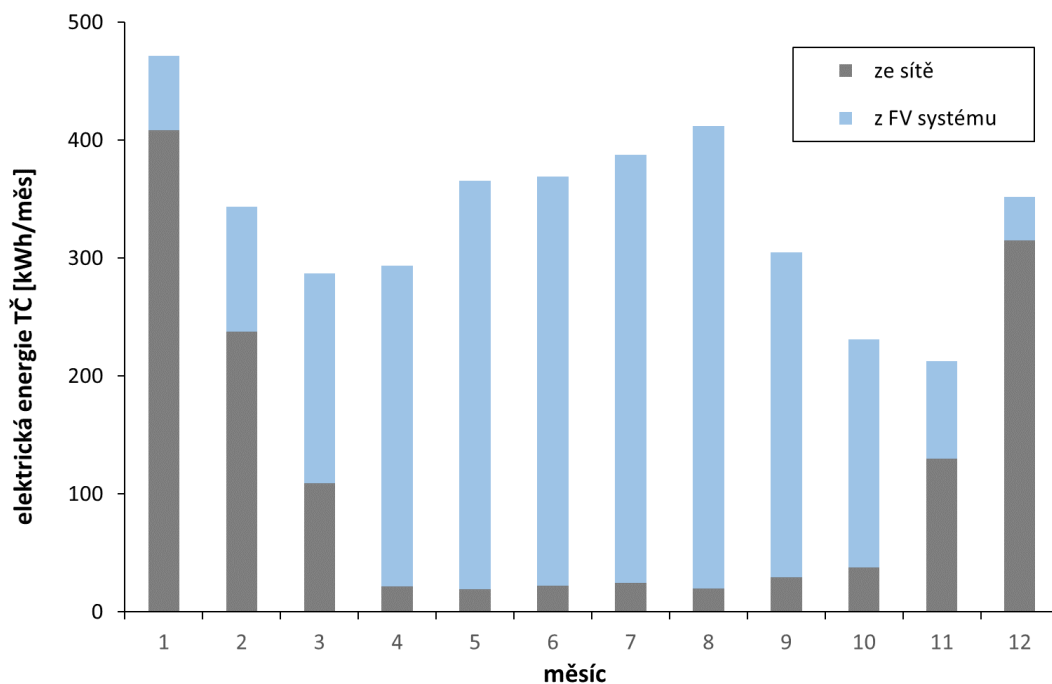
Obr. 3 Výstavba zemního výměníku v podzákladí

Návrhová tepelná ztráta objektu je 4.5 kW. Potřeba tepla na vytápění je 3400 kWh/rok, potřeba tepla na přípravu teplé vody je 3060 kWh/rok. Vytápění domu je navrženo podlahové, pro koupelny jsou zvolena trubková otopná tělesa. Návrhová teplota otopné vody je 40/35 °C. Pro větrání je navržena větrací jednotka s maximálním větracím průtokem 275 m³/h.

Již v rámci výstavby rodinného domu byl realizován zemní zásobník s trubkovým výměníkem (viz Obr. 3) v prostoru 14.4 m x 8.0 m mezi základy domu, které jsou hluboké 1.5 m a zároveň opatřeny vnější tepelnou izolací o tl. 16 cm. Vnitřní obvod zemního zásobníku je ještě navíc tepelně izolován od základů do hloubky cca 0.5 m. Navržený zemní výměník je tvořen plastovým potrubím DN32 uloženým na odhrabanou ornici do rýhy v hloubce cca 30 cm a zalitým cementovou směsí s křemičitým pískem pro zlepšení kontaktu s rostlým terénem. Rozteč jednotlivých potrubí výměníku je 0.6 m. Výměník je realizován ve dvou okruzích, každý v délce cca 100 m. Dva okruhy byly zvoleny pro snížení náročnosti na čerpací práci při provozu. Tepelnou izolaci mezi zemním výměníkem a podlahou přízemí tvoří izolační hmota (polystyren, aj.) v tloušťce 10 cm.

SIMULAČNÍ ANALÝZA SYSTÉMU

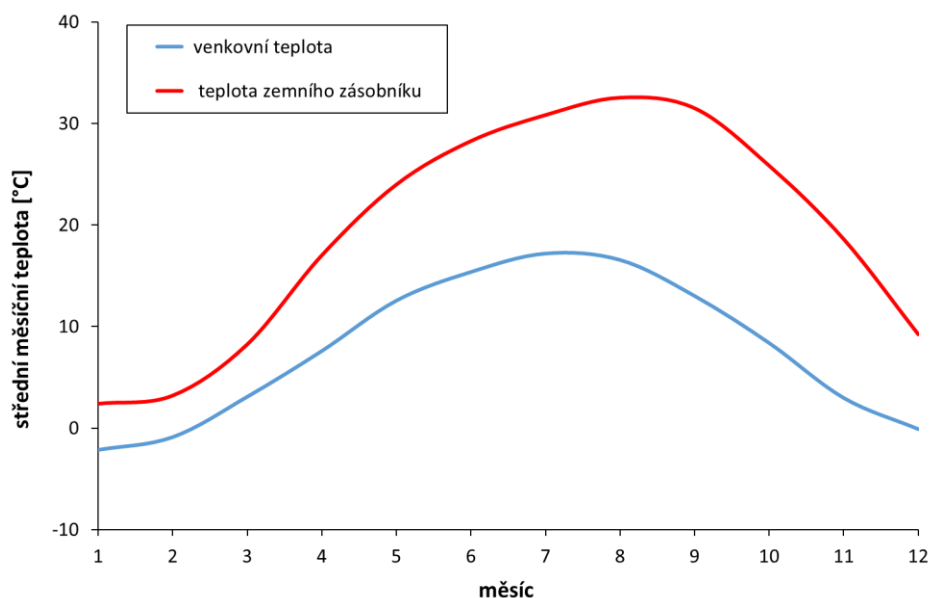
Počítačová simulace energetického systému, který byl navržen a je vyvíjen v rámci projektu, byla provedena v simulačním prostředí TRNSYS [8]. TRNSYS umožňuje počítačové modelování chování dynamických systémů, zejména komplexních energetických (tepelných, elektrických) soustav budov. Počítačová simulace měla především prokázat funkčnost navrženého konceptu tepelného čerpadla ve spolupráci s ostatními částmi systému (vodní akumulční zásobník, zemní výměník v podzákladí stavby, FV systém) a porovnat výsledky s definovaným referenčním (konvenčním) systémem. Pro modelování jednotlivých komponent byly použity buď modely dostupné v běžné verzi simulačního prostředí TRNSYS nebo modely nestandardní (vyvinuté a ověřené v jiných projektech), případně modely vlastní [9]. Počítačové simulace systémů byly prováděny s časovým krokem 2 min a byly vždy simulovány dva roky po sobě (vzhledem na využití zemního masivu v obou případech) a výsledky pro vyhodnocení byly vždy převzaty z druhého roku.



Obr. 4 Bilance potřeby elektrické energie navrženého energetického systému

Byl vytvořen matematický model referenčního (konvenčního) systému s tepelným čerpadlem se zemním vrtem, standardním kombinovaným zásobníkem tepla s vnitřním výměníkem pro přípravu teplé vody a FV systémem. Celková spotřeba elektrické energie referenčního systému (tepelné čerpadlo, oběhová čerpadla, dodatkový zdroj, i s odečtením elektrické energie, kterou pokryje FV systém) je **2200 kWh/rok** a systém pracuje s ročním topným faktorem $SPF = 2.9$. Na podobné úrovni se pohybují i měsíční topné faktory systému.

Hlavním důvodem nízké efektivity provozu referenčního systému je velký podíl potřeby tepla na přípravu teplé vody v celoroční bilanci spojená s nutností nabíjení horní části zásobníku na teplotu 55 °C pro omezení dohřevu teplé vody elektrickou topnou vložkou. Na vysoké potřebě elektrické energie se podílí i nízké využití FV systému vlivem časově se rozcházejících špiček odběru teplé vody (ráno, večer) a špiček odběru tepla pro vytápění (zimní období, noční doba) s produkcí FV systému. Pouze 420 kWh/rok z celkové roční spotřeby elektrické energie systému 2620 kWh pokrývá FV systém, přestože jeho špičkový výkon je 6 kW_p s roční výrobou elektrické energie okolo 6020 kWh.

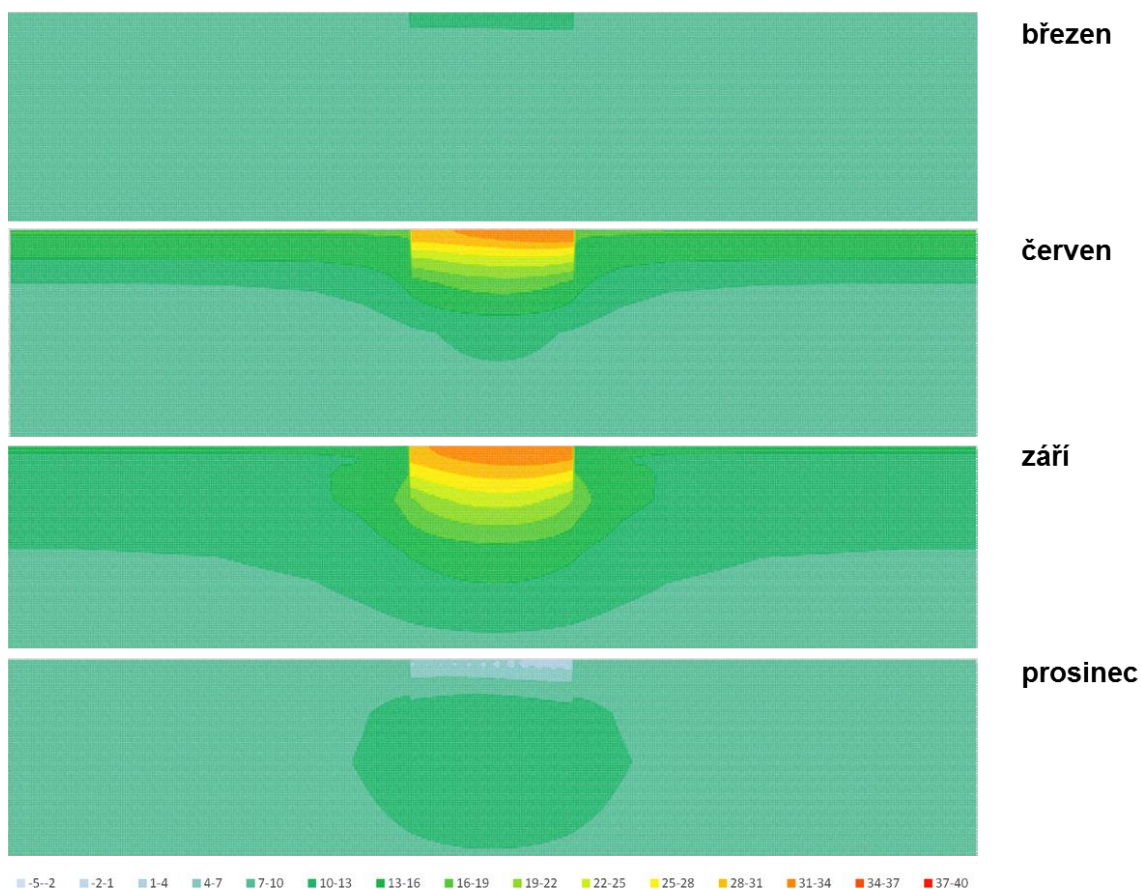


Obr. 5 Průběh teploty v zemním zásobníku v podloží budovy (teplota v horní vrstvě) ve 2. roku simulace

Byl vytvořen matematický model navrženého systému a byly provedeny počítačové simulace jeho chování. Celková spotřeba elektrické energie (tepelné čerpadlo, oběhová čerpadla, dodatkový zdroj, chladič venkovního vzduchu s odečtením elektrické energie, kterou pokryje FV systém) je 1370 kWh/rok a systém pracuje s ročním topným faktorem $SPF = 4.7$. Na Obr. 4 je znázorněna energetická bilance systému a je patrná velice nízká spotřeba elektrické energie ze sítě mimo otopné období, měsíční topné faktory SPF celého systému dosahují hodnot **větších než 10**. Nicméně, i v nejnepříznivějších měsících otopného období se měsíční topné faktory celého systému pohybují mezi hodnotami 3.5 a 4.7 vlivem příznivých teplotních podmínek v zemním zásobníku, odkud je odebíráno teplo (viz obr. 5). Na obr. 6 je znázorněn průběh nabíjení zásobníku v podloží budovy (podélný řez).

V celkové bilanci navržený energetický systém umožňuje využít téměř 80 % energie z obnovitelných zdrojů. Potřeba měrné primární neobnovitelné energie dosahuje hodnoty **22 kWh/m².rok**, což je nakonec výrazně méně než cílené kritérium. Navíc se v tomto případě

nejedná o výsledek bilančního hodnocení budovy využívající fiktivního výpočtu roční bilance, včetně odedčítání exportu fotovoltaické elektřiny do nadřazené sítě.



Obr. 6 Nabíjení a vybíjení zemního výměníku v průběhu 2. roku simulace

ZÁVĚR

Navržený energetický systém prokázal (zatím pouze) simulací možnost významného využití místního FV zdroje a úspory elektrické energie ze sítě pro vytápění a přípravu teplé vody oproti konvenčnímu systému s tepelným čerpadlem země-voda. Tím umožňuje i podle realistického přístupu k hodnocení budovy dosáhnout téměř nulového standardu. Další část projektu je věnována návrhu a optimalizaci jednotlivých komponent: tepelné čerpadlo s chladičem přehřátých par a kompresorem s řízením příkonu podle externího signálu, kombinovaný zásobník pro vytápění a přípravu teplé vody a pokročilý regulátor. Po laboratorních testech budou komponenty nasazeny v uvažovaném rodinném domě v Hamrech u Hlinska.

LITERATURA

- [1] Směrnice 2010/31/ES o energetické náročnosti budov, Brusel, 2010.
- [2] Vyhláška č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov, MPO 2013.
- [3] URBAN, M., KABELE, K. Vliv legislativních požadavků kladených na energetickou náročnost budov vzhledem k využití alternativních zdrojů energie. *Sborník konference Alternativní zdroje energie 2014*, str. 213-219, 2014.
- [4] URBAN, M., BEJČEK, M., WOLF, P., VODIČKA, A. Koncept administrativní budovy jako budovy s téměř nulovou spotřebou energie. *Sborník konference Alternativní zdroje energie 2016*, 2016.

- [5] ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky, ÚNMZ 2011.
- [6] TNI 73 0329 - Zjednodušené výpočtové hodnocení a klasifikace obytných budov s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění - Rodinné domy, ÚNMZ, 2010.
- [7] MATUŠKA, T. Tepelné čerpadlo s využitím obnovitelného zdroje elektřiny a sezónního zásobníku, Užitný vzor 29082, Úřad průmyslového vlastnictví, 2016.
- [8] Transient System Simulation Tool - TRNSYS 17.1, The University of Wisconsin, Madison, [http:// http://sel.me.wisc.edu/trnsys](http://sel.me.wisc.edu/trnsys).
- [9] SEDLÁŘ, J. Type260 – Variable Speed Ground Source Heat Pump with Desuperheater and Subcooler, UCEEB ČVUT, 2016.

Vývoj energetického systému pro téměř nulové budovy probíhá s finanční podporou TA ČR v rámci projektu TA04021243 Udržitelný energetický zdroj pro téměř nulové budovy.

KONSTRUKCE TERMICKÉHO SOLÁRNÍHO KOLEKTORU S PODUŠKOVÝM ABSORBÉREM A JEHO VARIANTY

Libor Mrňa^{1,2}, Jan Řiháček¹, Kamil Podaný¹, Eva Peterková¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno

²Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Brno

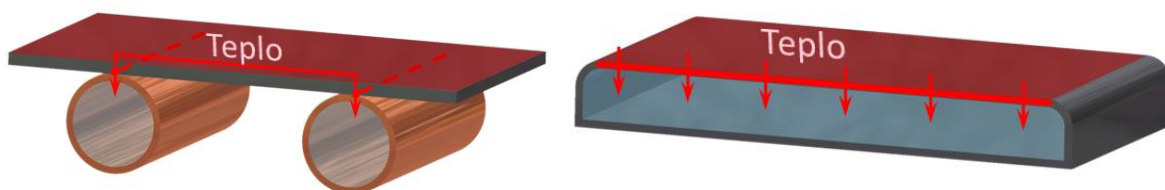
mrna@fme.vutbr.cz

ANOTACE

Konstrukce stávajících plochých solárních kolektorů je ustálena do podoby základního nosného rámu (vany) s vloženým solárním absorptérem, nad kterým se nachází krycí sklo a ve spodní části pak tepelná izolace. Článek popisuje novou konstrukci solárního kolektoru, kde je základním nosným prvkem solární absorptér poduškové konstrukce disponující přímo protékanou meandrovou strukturou, která umožňuje řízený průtok teplosměnného média skrze celou plochu absorptéru. Ten společně s obvodovým rámem a krycím sklem tvoří integrální tuhou konstrukci. Přívodní trubky pro připojení kolektoru jsou průběžné pro snadné propojování kolektorů do většího systému. V současné době je realizován solární kolektor s rozměrem 1000 x 1000 mm. Je rozpracována varianta harmonického absorptéru.

ÚVOD

Solární kolektory představují jednu z možností ohřevu vody pro přípravu TV a ohřev bazénů. Jejich vývoj se v průběhu mnoha let jejich užívání rozvinul do mnoha variant s cílem absorbovat co nejvíce sluneční energie. Asi nejrozšířenějším v dnešní době je plochý solární kolektor, který absorbuje záření pomocí tenké hliníkové absorpční desky opatřené spektrálně selektivním absorptérem. Teplo je odváděno registrem Cu trubek připojených na zadní stranu absorpční desky. Celek je zasazen do rámu z Al profilů, které umožňují vsazení krycího skla snižujícího tepelné ztráty na horní straně a vložení tepelné izolace ze spodní strany absorptéru [1]. U této konstrukce existuje určitá technologická těžkost při spojování Cu trubky s Al absorpční deskou a vlastní absorptér má principiální problém předávání tepla s Al desky pouze tečným dotykem mezi trubkou a absorptérem viz Obr. 1 (vlevo). Tato skutečnost zvyšuje tepelný odpor systému, což má za následek snížení tepelné účinnosti.



Obr. 1 Přestup tepla u absorptéru s trubkovým registrem (vlevo) a u poduškového absorptéru (vpravo)

PODUŠKOVÝ SOLÁRNÍ ABSORBÉR

Výše popsané problémy řeší poduškový solární absorptér. V principu jde o dutý kvádr, jehož jeden rozměr je vůči ostatním dvěma rozměrům řádově menší. Pokud jeho plochu opatříme absorpční vrstvou, pak se předává absorbované teplo do teplosměnné kapaliny pouze přes tenkou stěnu a v celé ploše absorptéru, viz Obr. 1 (vpravo). V tomto případě je ovšem nutné pro rovnoměrný odvod tepla zajistit pokud možno rovnoměrné proudění kapaliny přes celou plochu absorptéru. Toho lze dosáhnout vytvořením meandrové struktury zajišťující potřebné

proudění. Další věcí je odolnost vůči vnitřnímu přetlaku teplosměnné kapaliny, která je pro poduškový solární absorber obecně nižší. Důležitou je též technologie výroby poduškového solárního absorberu. V literatuře [2, 3] je popsáno řešení návrhu a výroby poduškového solárního absorberu pomocí technologie laserového svařování, která umožňuje jednoduché vytvoření meandrové struktury i sítě výztužných průvarů zajišťujících zvýšení odolnosti proti přetlaku.

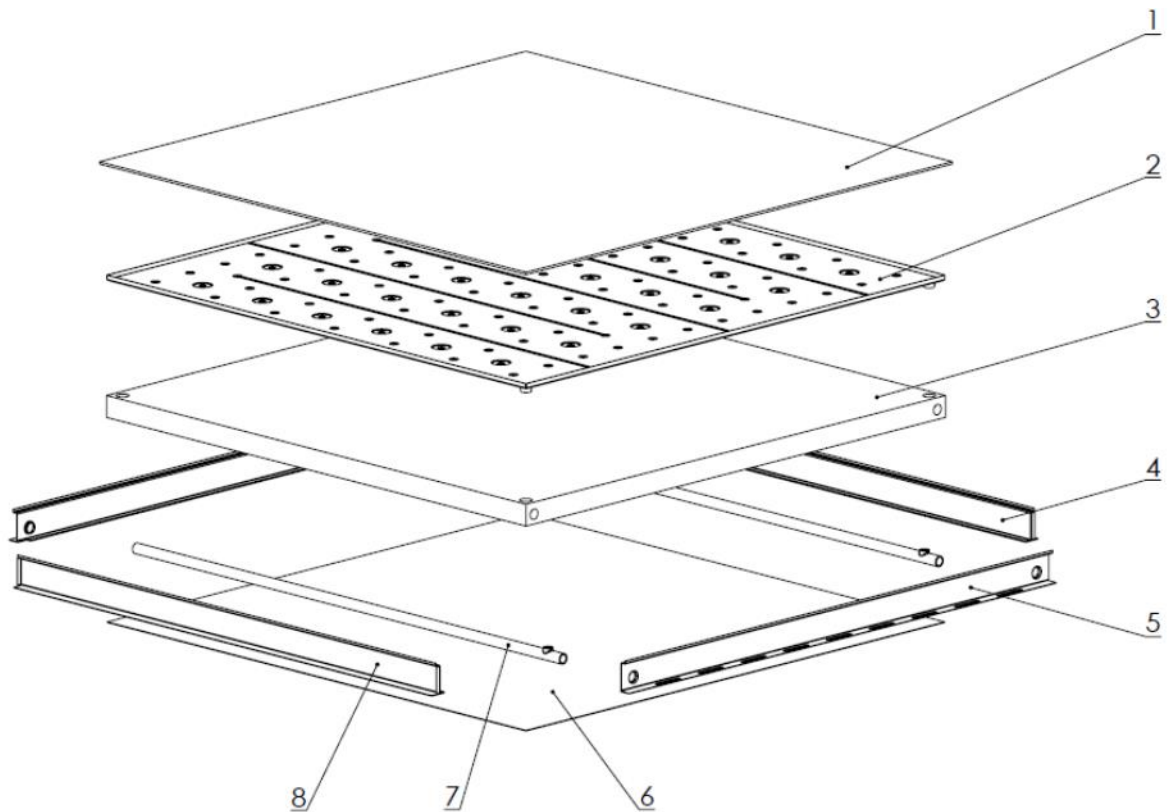
KONSTRUKCE SOLÁRNÍHO KOLEKTORU ZALOŽENÁ NA PODUŠKOVÉM SOLÁRNÍM ABSORBÉRU.

Vzhledem k samonosnosti vyvinutého poduškového solárního absorberu bylo rozhodnuto přizpůsobit konstrukci celého solárního kolektoru. Vlastní poduškový solární absorber (1) má okraje za svarem ohnuté do pravého úhlu vzhledem k rovině absorberu. Tímto opatřením se jednak ztuhne jeho konstrukce a umožní snadné spojení s konstrukcí rámu. Druhou částí je obvodový rám tvořený čtyřmi speciálními profily (4), (5) a (8). Ke stěnám profilů je technologií odporového bodového svařování přivařený solární absorber (2). Jednotlivé části absorberu jsou opět spojeny bodovými svary. Celek tvoří integrální tuhou konstrukci. Princip konstrukce je popsán na Obr. 2 v jeho horní části. Detaily konstrukce jsou ve spodní části Obr. 2. Profil rámu má v horní části osazení, do kterého se vlepí čelní ochranné a izolační sklo (4) pomocí silikonového těsnícího tmele (13). Tato koncepce dále zvyšuje celkovou tuhost konstrukce solárního kolektoru. Vlepením čelního skla se zároveň dosáhne těsnosti solárního kolektoru proti vlhkosti a srážkové vodě.

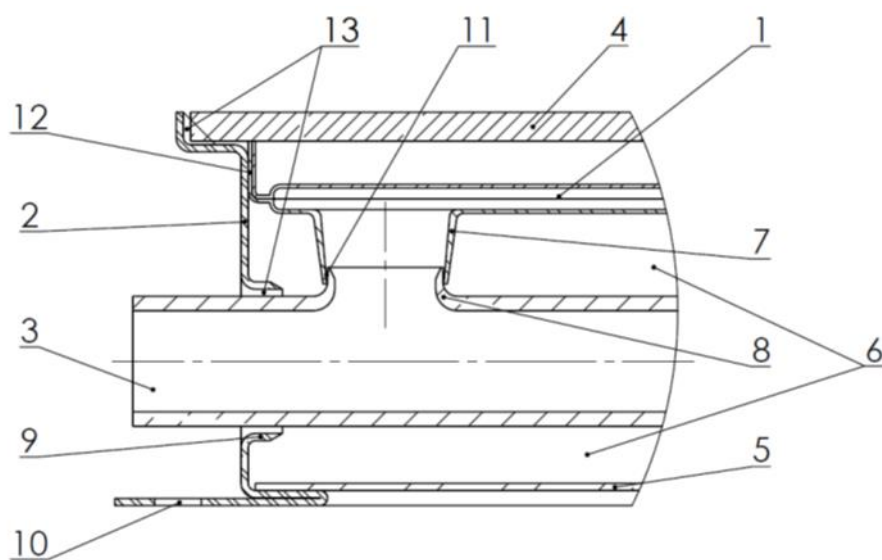
Ve spodní části všech profilů rámu jsou vytvořeny lemy, za které se zasune zadní krycí plech (5), který je pojištěn proti vysunutí upevněním buď šrouby, nebo nýty. Systém lemů je uspořádán tak, aby nedocházelo k pronikání vlhkosti do solárního kolektoru. Mezi zadním plechem a solárním absorberem je umístěna tepelná izolace buď z desek minerální vlny, nebo z organické PUR pěny (6). Boční profily mají rozšířené spodní okraje se systémem oválných děr pro upevnění kolektoru (10) ke střešní konstrukci budovy.

Na bocích profilu jsou vytvořeny technologií lisování kruhové průtaže (9), kterými prochází trubky (3) pro přívod a odvod teplosměnné kapaliny do solárního absorberu. Prostor mezi trubkou a stěnou průtaže je finálně utěsněn vstříknutým těsnícím tmelem (13). Výhodou je jednoduchost utěsnění trubky bez nutnosti používání šroubovacích průchodek. Byl vyvinut a v několika postupných krocích odladěn a odzkoušen lisovací přípravek na vytváření těchto průtaží ve vytvořeném otvoru.

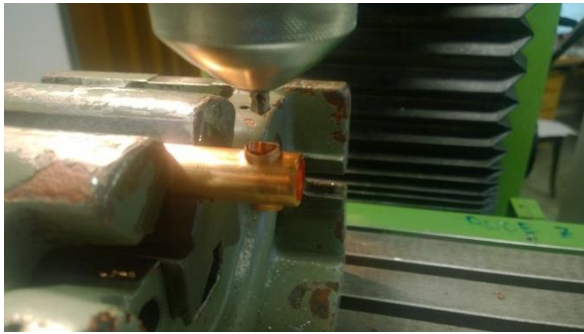
Kvůli možnosti propojovat solární kolektor do větších celků byly přívodní Cu trubky koncipovány jako průběžné, solární kolektor je na ně připojen svým vstupním hrdlem jako odbočka. Pro vytvoření propojení mezi přívodní trubkou a hrdlem deskového absorberu (7) byla použita technologie vyhrdlování trubky (8) pomocí speciálního rotačního nástroje s obchodním názvem T-Drill, při kterém odpadá nutnost použít dodatečných tvarovek (kolena, T-kusy). To snižuje počet spojů v hydraulickém okruhu solárního kolektoru. Spoj mezi oběma hrdly se vytvořil pomocí pájení (11) tvrdou Ag pájkou. Situace při vyhrdlování trubky nástrojem T-Drill na konzolové frézce je zobrazen na Obr. 3a, detail pájeného spoje mezi odbočkou na trubce a hrdlem v solárním absorberu je na Obr. 3b.



Legenda: 1 – krycí sklo, 2 poduškový solární absorbér, 3 – tepelná izolace, 4 - horní čelo, 5 - bočnice, 6 – spodní krycí plech, 7 – Cu trubka, 8 – spodní čelo



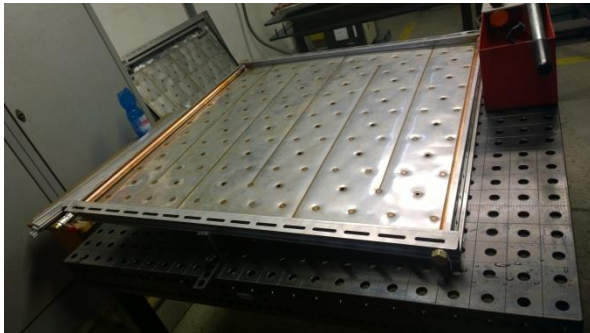
Obr. 2 *Konstrukce solárního kolektoru s poduškovým absorbérem. Legenda: 1 - poduškový solární absorbér, 2 – boční rám, 3 – Cu trubka D18 mm, 4 – krycí sklo, 5 – spodní krycí plech, 6 – tepelná izolace, 7 – výstupní hrdlo, 8 - vyhrdlení trubky, 9 – průtaž pro trubku, 10 – otvory pro upevnění kolektoru, 11 – tvrdá pájka, 12 – bodový svar, 13 – těsnící silikonový tmel*



Obr. 3a Výroba vyhrdlení na trubce nástrojem T-Drill



Obr. 3b Zkouška pájení mezi vyhrdlením trubky a hrdlem na absorbéru



Obr. 4a Solární kolektor před tlakovou zkouškou



Obr. 4b Solární kolektor po tlakové zkoušce



Obr. 4c Princip měření vydutí solárního absorbéru



Obr. 4d Detail místa porušení v pájeném spoji



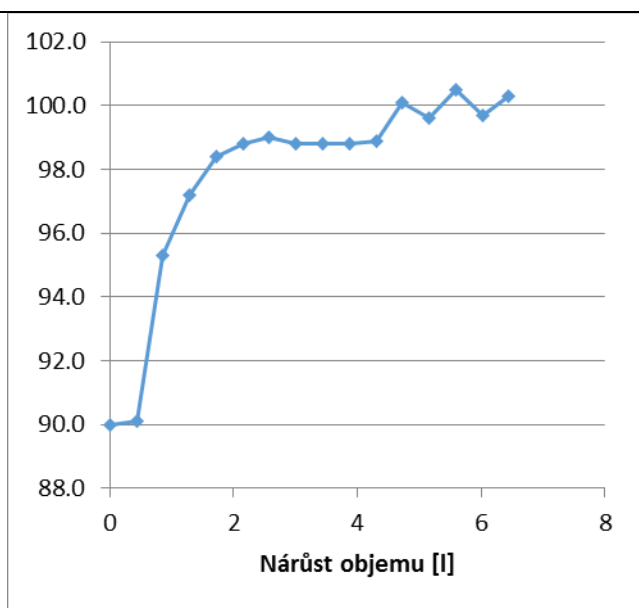
Obr. 4e Deformace bočnic po testu

Výsledkem je solární kolektor s integrální konstrukcí, který se vyznačuje vysokou celkovou i torzní tuhostí, malým počtem dílů, dobrou odolností proti vlhkosti a jednoduchou technologií výroby.

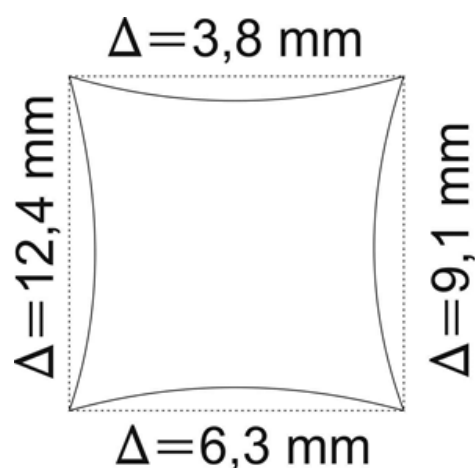
Jeden sestavený solární kolektor posloužil na test tlakové odolnosti. V případě tohoto kusu proto nebyl aplikován absorpční nátěr a krycí sklo mělo tloušťku jen 3 mm. Na konce trubek byly připájeny standardní koncovky se závitem G1/2“, dvě byly uzavřeny zásepky, na jeden byl připojen kulový ventil pro odvzdušnění a na zbývající přívod k tlakové pumpě. Solární absorbér se naplnil vodou a odvzdušnil se. Poté byla provedena tlaková zkouška, při které byl testovaný kolektor položen sklem na stůl a při tlakování se měřil průhyb středu absorbéru, množství přidávané vody a tlak v systému. Test skončil při porušení těsnosti soustavy a ztrátě tlaku. Na Obr. 4a-e jsou uvedeny některé momenty z tlakové zkoušky.

Nárůst objemu [l]	Přetlak [bar]	Vyduť [mm]
0	0,0	90,0
0,43	0,0	90,1
0,86	0,0	95,3
1,29	0,0	97,2
1,72	0,0	98,4
2,15	0,0	98,8
2,58	0,0	99,0
3,01	0,4	98,8
3,44	0,5	98,8
3,87	1,0	98,8
4,3	1,0	98,9
4,73	1,2	100,1
5,16	1,5	99,6
5,59	1,9	100,5
6,02	2,1	99,7
6,45	2,5	100,3
6,67	2,8	porušení

Obr. 5a Tabulka závislosti vyduť solárního absorbéru na nárůstu objemu



Obr. 5b Graf závislosti vyduť tabulky 5a



Obr. 5c Změřen průhyb kolektor po tlakové zkoušce

Pro vytvoření spektrálně selektivní absorpční vrstvy byly použity nátěry na organické bázi, které jsou komerčně dostupné:

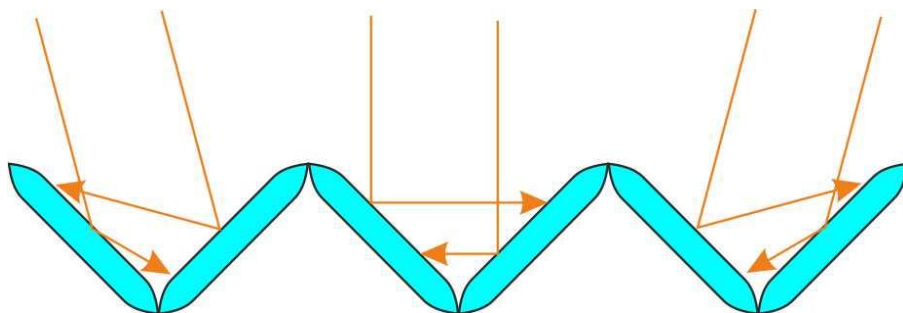
- Rabsorb 5 (Slovensko) [4], emisivita 0.96
- SOLKOTE HI/SORB-II (USA) [5], emisivita 0.79

Podobně jako v předešlém případě byl podklad z nerezového plechu X5CrNi 18-10 tl. 0,5 mm. Po očištění a otryskání stejnými postupy jako v předchozích případech byly nastříkány na povrch tři vrstvy každého typu barvy. Poté bylo provedeno měření emisivity podle stejného postupu uvedeného výše. Výsledek měření emisivity jsou uvedeny výše v odrážkách. V obou případech je absorbance na úrovni 92 % (dle firemních údajů). Z hlediska emisivity je jasnou volbou barva Solkote HI/Sorb2. Navíc výrobce uvádí její tepelnou stálost do 530 °C, kdežto Rabsorb5 má zaručený tepelný rozsah do 400 °C. Na základě těchto měření a údajů bylo proto rozhodnuto používat jako absorber barvu Solkote HI/Sorb2. Její aplikace formou stříkání je navíc jednodušší než s barvou Rabsorb5 (tato má tendenci k sedání během aplikace a je nutné s ní neustále míchat).

SOLÁRNÍ KOLEKTOR S HARMONIKOVÝM ABSORBÉREM

Další cestou, jak zvýšit celkovou tepelnou bilanci je snížit závislost absorpce na úhlu dopadu, tedy na denním chodu slunce vzhledem k ploše kolektoru. Toho se dá dosáhnout vhodnou úpravou povrchu tak, aby na něm docházelo k vícenásobnému odrazu záření na absorpční ploše. Kromě možnosti popsané v [2] lze uvažovat o konstrukci, jejíž princip je na Obr. 6. Výhodou takové konstrukce je její relativní výrobní jednoduchost, neboť lze vyjít z poduškového solárního absorberu a z něj vhodnou technologií ohýbání vytvořit ohýbaný solární kolektor, který je pracovním názvem nazván harmonikovým solárním absorberem.

Byl proveden technologický test ohýbání deskového solárního absorberu na ohraňovacím lisu, jehož princip umožňuje ohýbání právě takovýchto struktur. Dosažený výsledek je na Obr. 7. Ohyby jsou prozatím 900, počítá se se snížením úhlu na 600. Princip konstrukce solárního kolektoru pak bude stejný jako pro výše popsaný solární kolektor s integrální konstrukcí, pouze obvodový rám bude vyšší.



Obr. 6 Princip harmonikového solárního absorberu s naznačenými úhly dopadu slunečního záření a vícenásobným odrazem

ZÁVĚR

V článku je popsána konstrukce solárního kolektoru využívajícího výhody poduškového solárního absorberu s meandrovou strukturou. Díky jeho tuhosti může konstrukce solárního kolektoru jednoduchá a vlepáním skla se jeho tuhost dále zvýší. Je diskutován harmonikový solární absorber vzniklý na základě poduškového solárního absorberu. Důvodem pro tuto konstrukci je zvýšení tepelné účinnosti kolektoru. Presentované možnosti konstrukcí

solárních kolektorů představují další možné směry vývoje solárních termických kolektorů. Jsou cestou ke zvýšení účinnosti, nasazení moderních a efektivních výrobních technologií a zvýšení celkové robustnosti konstrukce.

LITERATURA

- [1] MATUŠKA, T. *Solární zařízení v příkladech*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-3525-2
- [2] MRŇA, L., ŘIHÁČEK J., LIDMILA Z., PODANÝ K. A KUBÍČEK J. Solární absorber se strukturovaným povrchem - možná cesta ke zvýšení účinnosti. In: *Alternativní zdroje energie 2014: sborník přednášek z konference*. Praha: Stpcr, 2014, s. 119-128. ISBN 978-80-02-02546-7.
- [3] MRŇA, L. VUT Brno, CZ. *Zařízení pro pneumatické přidržování součástí u velkoplošného průvarového svařování*. ČR. Užité vzor, 25889. Uděleno 2.10.2013. Zapsáno 24.9.2013.
- [4] Kolektorová selektivní farba Rabsorb 5. Movychem [online]. SR [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.movychem.sk/kolektorove-farby/42-kolektorova-selektivni-barva-rabsorb-5>
- [5] SOLEC: Solar Energy corporation. Solkote selective solar absorber [online]. USA [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.solec.org>

Příspěvek vznikl v rámci projektu TA ČR: „Vývoj nových typů solárních absorberů“ č. TA04020456, a za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

MOŽNOSTI ZLEPŠOVÁNÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ VERTIKÁLNÍCH HORNINOVÝCH VÝMĚNÍKŮ VE FUNKCI NÍZKOTEPLNÍCH ZDROJŮ TEPELNÝCH ČERPADEL

Pavel Neuberger, Radomír Adamovský

Technická fakulta ČZU v Praze
neuberger@tf.czu.cz, adamovsky@tf.czu.cz

ANOTACE

Cílem ověřování bylo hledat a analyzovat možnosti zvýšení energetické účinnosti vertikálních horninových výměníků ve funkci nízkoteplotních zdrojů energie pro tepelná čerpadla. Sledovány byly teploty horninového masivu, měrné tepelné výkony a měrné energie odvedené horninovému masivu dvěma typy vertikálních výměníků, jednoduchým U výměníkem (U1) a dvojitým U výměníkem (U2). Hodnocen byl rovněž druh proudění teplotnosné kapaliny a vliv koncentrace teplotnosné kapaliny na výkon výměníku. Výsledky ověřování prokázaly výhodnost využívání dvojitého U2 výměníku jak z hlediska jeho vlivu na topný faktor tepelného čerpadla, tak i z hlediska měrných tepelných výkonů a měrných energií odvedených horninovému masivu. Průměrné denní teploty teplotnosné kapaliny ve výměníku U2 byly vyšší o 4,5 %, měrné tepelné výkony o 26,8 % a měrné energie odvedené horninovému masivu o 25,6 % než ve výměníku U1.

ÚVOD

Geotermální energie je odvozena z neustálého tepelného toku pocházejícího ze Země. Tato tepelná energie je produktem mnoha zdrojů. Nejvýznamnějšími zdroji je původní teplo zemského tělesa, které zbylo z vesmírné etapy jeho vzniku a rozpadu radioaktivních minerálů. Dalšími zdroji tepelné energie Země je sluneční záření, energie vznikající transformací kinetické energie při tektonických pohybech v zemské kůře, energie vznikající stlačováním podložních vrstev vahou nadloží a náhlým uvolněním tlaků, energie pohlcených seizmických vln, fyzikálněchemické exotermní reakce, energie uvolňující se při dopadu meteoritů, energie slapových sil produkovaná vzájemným třením vodních mas a o pevný zemský povrch [1]. Myslíl a kol. [1] uvádí hodnotu tepelného toku na zemském povrchu v rozmezí 30-120 mW·m⁻², střední hodnotu 70 mW·m⁻². V Evropě je pod svrchními 10 až 15 metry masivu teplota v průběhu roku relativně stabilní. Od této hloubky do hloubky 100 metrů, teplota masivu stoupá. Svislá vzdálenost, na niž stoupne teplota při sestupu pod zemský povrch o 1 K, bývá označována jako geotermický stupeň. Pro střední Evropu je průměrný geotermický stupeň uváděn ve výši 33 m·K⁻¹ [1].

Geotermální energii je možné využít pro přímé vytápění, výrobu elektrické energie a jako nízkoteplotní zdroj energie pro tepelná čerpadla. Energetické systémy pro přímé vytápění a tepelná čerpadla jsou více rozšířeny, protože nevyžadují energii o vysokém potenciálu. Pro získání energie z horninového masivu se využívají vertikální výměníky tepla. V těchto výměnících, v Evropě instalovaných nejčastěji v hloubkách 50 až 150 m, se ohřívá teplotnosná kapalina, která na výparníku tepelného čerpadla předává potřebnou energii o nízkém energetickém potenciálu.

U těchto relativně investičně nákladných zdrojů energie bývá předpokládána využitelnost a životnost v řádu desítek let. To znamená, že po ukončení životnosti jednoho energetického systému tepelného čerpadla bude na vertikální výměník připojen nový, modernější. Tato koncepce zvýší efektivnost celého systému z hlediska návratnosti investice na realizaci výměníku. Tyto důvody nás vedly k provoznímu ověřování výměníků, jehož cílem bylo

monitorovat a analyzovat rozdíly parametrů výměníků a specifikovat jejich zlepšení. Sledovány byly teploty a změny teplot horninového masivu v topném období a v období stagnace výměníků. Rovněž měrné tepelné toky a měrné energie odvedené horninovému masivu v topném období.

MATERIÁL A METODY

Vertikální výměníky U1 a U2 jsou zdroji energie pro tepelná čerpadla 1 × IVT PremiumLine EQ E13 a 2 × GreenLine HT Plus E 17 využívaná pro vytápění administrativní budovy a provozních hal firmy VESKOM s. r. o. se sídlem v Praze Dolních Měcholupech. Tepelná čerpadla byla používána pouze pro vytápění objektů, nikoliv pro jejich chlazení.

Měření byla uskutečněna na 2 typech výměníků umístěných ve vrtech o hloubkách vrtů 113 m. V jednom vrtu je jednoduchý U výměník (U1) z polyetylénového potrubí PE 100RC 2×40×3,7 mm odolného proti bodovému zatížení a vzniku trhlin. Vnější plocha výměníku vztažená na 1 m délky činí 0,2512 m²·m⁻¹, vnitřní 0,2047 m²·m⁻¹. V druhém vrtu je umístěn dvojitý U výměník (U2) z polyetylénového potrubí PE 100RC 4×32×2,9 mm. Vnější plocha výměníku vztažená na 1 m délky činí 0,4019 m²·m⁻¹, vnitřní 0,3291 m²·m⁻¹.

V obou vrtech je umístěno mezi potrubí 5 teplotních čidel Pt1000 A v hloubce 0,2 m, 9 m, 20 m, 50 m a 100 m. Teplota vzduchu byla zaznamenávána čidlem typu ATF 2 KTY 81.210 umístěným ve výšce 2,5 m nad zemí. Na vstupním a výstupním potrubí vrtů byla instalována teplotní čidla Pt100 měřící teplotu teplotnosné kapaliny. Všechny teploty byly zaznamenávány ve čtvrt hodinových intervalech. Tepelné výkony výměníků a hodnoty energie odvedené horninovému masivu byly stanoveny elektronickým měřičem spotřeby tepla MTW 3. Teplotnosnou kapalinou protékající vertikálními výměníky byla směs 33 % etylalkoholu a 67 % vody.

Vrchní část geologického profilu horninového masivu vrtů je tvořena navážkami, jejichž mocnost se pohybuje v rozmezí 4,0-9,5 m. V podloží navážek se nachází šedočerné jílovité břidlice. V hlubších partiích jsou horniny masivní a místy silně rozpukané, čemuž nasvědčují silné přítoky podzemní vody do vrtů. Z výsledků testů teplotní odezvy vyplývá průměrná hodnota součinitele tepelné vodivosti horninového masivu $\lambda_{r.m.} = 2,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a celkový tepelný odpor vrtů 0,137 K·m·W⁻¹.

Ověřování výměníků probíhalo v topném období (19. 9. 2012-22. 4. 2013, 216 dní) a v období stagnace výměníků (23. 4 2013-17. 9. 2013, 148 dní), následujícím po topném období.

VÝSLEDKY

Teploty horninového masivu v oblasti výměníků

Průběh průměrných denních teplot horninového masivu v topné sezóně vyjadřujeme rovnicí vycházející z rovnice pro volné netlumené kmitání hmotného bodu [2]:

$$t_{CR} = \bar{t}_C + \Delta t_{am} \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + \varphi) \quad (1)$$

Jedná se o nelineární regresi y na x , proto je použit pro stanovení míry těsnosti závislosti mezi oběma náhodnými veličinami index determinace I_{yx}^2 (-), [3].

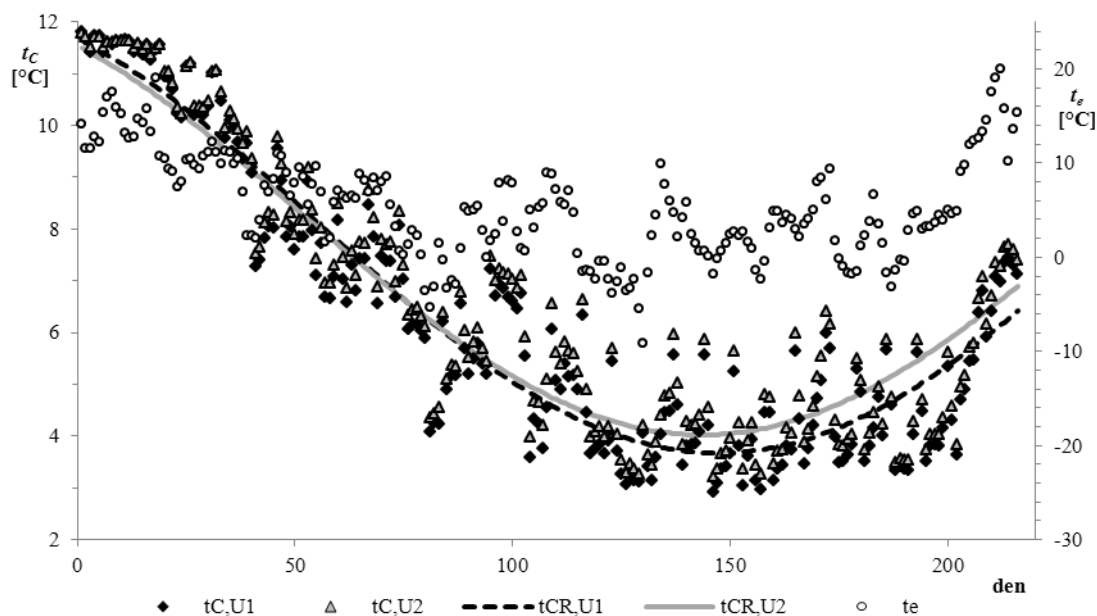
V Tab. 1 jsou shrnuty teploty horninového masivu v jednotlivých sledovaných hloubkách a teplota okolního prostředí v topném období.

Výsledky ověřování ukazují, že teploty horninového masivu ve všech sledovaných hloubkách, byly v topném období kladné. To je důležitý moment z hlediska topného faktoru i provozu tepelného čerpadla. Rovněž bylo zjištěno, že průměrné denní teploty jsou u jednoduchého výměníku U1 nižší než u dvojitého výměníku U2.

Tab. 1 Průměrné denní a minimální teploty horninového masivu a teploty vzduchu v topných obdobích.

Výměník	Teplota	Teplota v hloubce				t_c [°C]	t_e [°C]
		9 m [°C]	20 m [°C]	50 m [°C]	100 m [°C]		
U1	t_{θ}	6,26 ± 2,98	6,27 ± 2,78	6,24 ± 2,45	6,48 ± 2,41	6,31	5,34
	$t_{min.}$	0,53	0,31	0,71	0,65	-	-15,80
U2	t_{θ}	6,96 ± 2,86	6,42 ± 2,69	6,34 ± 2,46	6,60 ± 2,33	6,58	5,34
	$t_{min.}$	0,59	0,75	0,49	0,78	-	-15,80

V grafu na Obr. 1 jsou znázorněny naměřené hodnoty a regresní křivky průběhu průměrných denních teplot horninového masivu t_c a teploty okolního prostředí t_e v topném období.



Obr. 1 Průměrné denní teploty horninových masivů v topném období a teploty okolního prostředí.

Od počátku topného období průměrné denní teploty horninového masivu t_c v oblasti výměníků shodně klesají s ohledem na zvyšující se tepelný výkon odváděný výměníkem v důsledku klesající teploty okolního prostředí. Pokles teplot probíhá přibližně 150 dní s intenzitou 1 K za 18,36 dne (výměník U1) a 19,20 dne (výměník U2). V následující fázi dochází díky zvýšení teplot okolního prostředí a snížení odběru tepla k nárůstu teplot masivu se stejnou intenzitou jako docházelo k jeho poklesu. V závěru topného období (216 den) průměrné denní teploty horninového masivu dosáhnou hodnoty 60,40 % (U1), respektive 62,81 % (U2) teploty masivu na počátku topného období. Průměrné denní teploty horninového masivu byly v průběhu topného období vyšší než průměrné denní teploty okolního prostředí u výměníku U1 v 59,72 %, a u výměníku U2 v 62,96 % topného období. Průběhy průměrných denních teplot $t_{CR,U}$ horninového masivu ve sledovaném topném období lze vyjádřit ve smyslu rovnice (1) rovnicemi (2) a (3).

$$t_{CR,U1} = 8,072 + 4,399 \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + 2,179) \quad I_{CR,U1}^2 = 0,897 \quad (2)$$

$$t_{CR,U2} = 8,241 + 4,216 \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + 2,241) \quad I_{CR,U2}^2 = 0,888 \quad (3)$$

Schopnost regenerace energetického potenciálu horninového masivu v průběhu stagnace výměníků hodnotíme teplotami masivu na začátku a konci po sobě následujících topných období. V Tab. 2 jsou shrnuty průměrné denní teploty horninového masivu na začátcích a koncích topných období I. (19. 9. 2012-22. 4. 2013) a období II. (18. 9. 2013-23. 5. 2014). Na základě uvedených výsledků lze předpokládat, že vertikální horninové výměníky jsou stabilními zdroji nízkoteplotními zdroji energie s dlouhou životností. K obdobným závěrům dospěli při provozním ověřování vertikálních výměníků Lua a kol. [4] a ve své studii Darkwa a kol. [5]. Větší rozdíly teplot na konci topných období I. a II. vyplývají z nižších teplot okolního prostředí v topném období I. a tedy zvýšenému odběru tepla z obou výměníků.

Tab. 2 Průměrné denní teploty horninového masivu na začátcích a koncích topného období.

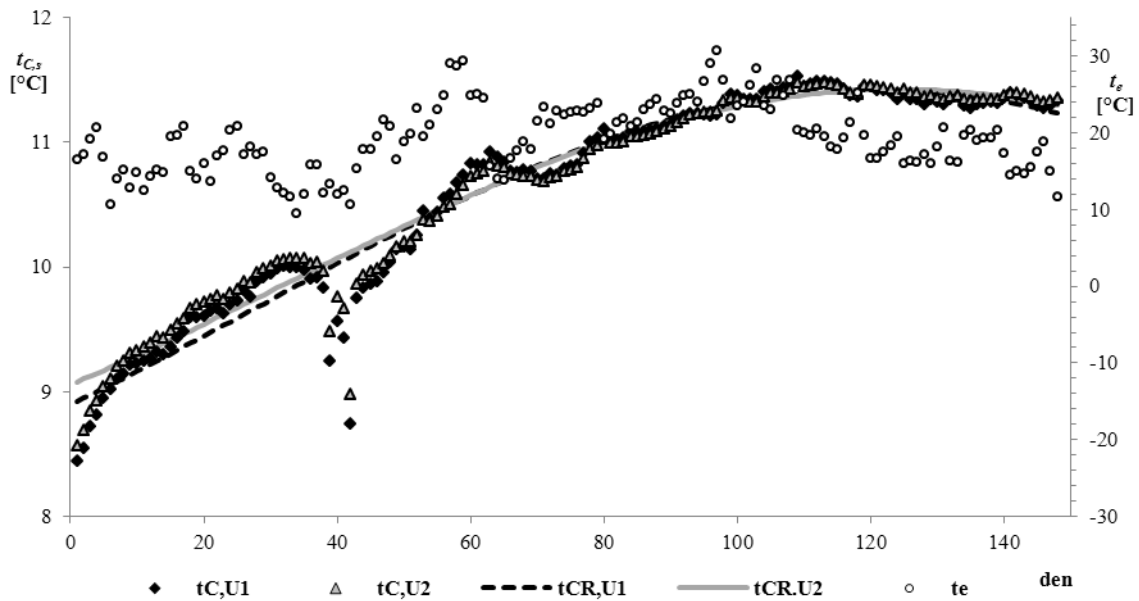
	Výměník	Topné období	Teplota v hloubce				t_c [°C]	t_e [°C]
			9 m [°C]	20 m [°C]	50 m [°C]	100 m [°C]		
Začátek topného období	U1	I.	13,06	12,31	11,02	10,89	11,82	-0,61
		II.	12,28	11,60	10,41	10,53	11,21	
	U2	I.	13,43	12,04	10,94	10,72	11,78	-0,49
		II.	12,67	11,51	10,53	10,44	11,29	
Konec topného období	U1	I.	6,90	7,13	7,12	7,40	7,14	2,98
		II.	10,67	10,41	9,60	9,80	10,12	
	U2	I.	7,38	7,30	7,28	7,64	7,40	2,78
		II.	10,87	10,32	9,72	9,80	10,18	

V grafu na Obr. 2 jsou znázorněny průběhy průměrných denních teplot t_c horninového masivu v období stagnace výměníků, následující po topném období. Z grafu je patrné, že rozdíly průměrných denních teplot t_c v oblasti výměníků U2 a U1 nejsou v období stagnace významné. Teploty horninového masivu stoupají přibližně do 120. dne období stagnace s intenzitou 1 K za 40 dní. Pak teplota masivu mírně klesá. Prudký pokles teploty horninového masivu (39-42. den) je reakcí na snížení teploty okolního prostředí t_e a uvedení otopného systému do provozu.

Průběhy průměrných denních teplot horninového masivu $t_{CR,U,s}$ v období stagnace výměníků lze vyjádřit ve smyslu rovnice (1) rovnicemi (4) a (5).

$$t_{CR,U1,s} = 9,725 + 1,692 \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + 5,774) \quad I_{U1,s}^2 = 0,948 \quad (4)$$

$$t_{CR,U2,s} = 9,885 + 1,538 \cdot \sin(\Omega \cdot \tau + 5,715) \quad I_{U2,s}^2 = 0,958 \quad (5)$$



Obr. 2 Průměrné denní teploty horninových masivů v období stagnace a teploty vzduchu.

Měrné tepelné výkony a měrné energie odváděné výměníky

V Tab. 3 jsou zpracovány tepelné výkony, měrné energie odváděné výměníky za den a celkové energie odvedené 1 m délky výměníku v topném období při průměrné teplotě okolního prostředí $t_e = 5,34 \text{ }^\circ\text{C}$.

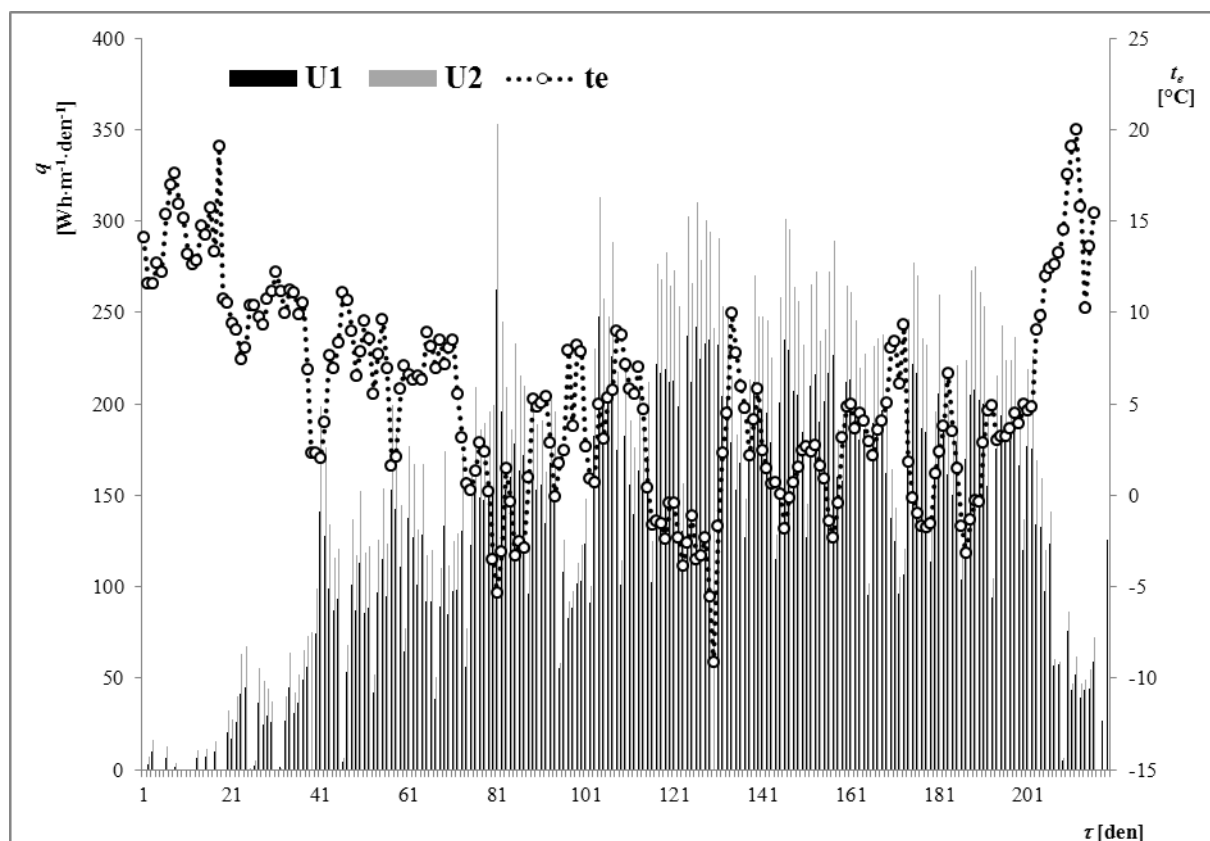
Tab. 3 Průměrné a maximální měrné tepelné výkony a měrné energie odvedené horninovému masivu.

Výměník	q_τ [W·m ⁻¹]	$q_{\tau,max}$ [W·m ⁻¹]	q [Wh·m ⁻¹ ·den]	q_{max} [Wh·m ⁻¹ ·den]	q_Σ [kWh·m ⁻¹]
U1	$6,46 \pm 2,19$	20,66	$125,48 \pm 72,17$	262,77	27,16
U2	$8,19 \pm 2,73$	26,57	$157,54 \pm 90,73$	353,16	34,10

Výsledky ověření shrnuté v tab. 3 ukazují, že měrné tepelné výkony q_τ , $q_{\tau,max}$ výměníku U2 i měrné energie q , q_{max} , q_Σ odvedené horninovému masivu jsou vyšší než u výměníku U1. Vyšší měrné tepelné výkony i měrné energie odvedené horninovému masivu výměníkem U2 vyplývají z jeho větší teplosměnné plochy. Vnější teplosměnná plocha vztažená na 1 m délky výměníku U2 je o 60 % větší než u výměníku U1. Výsledky ověření také prokázaly, že maximální měrné tepelné výkony výměníků $q_{\tau,max}$ a celkové energie odvedené horninovému masivu q_Σ nedosahují mezních hodnot, které uvádí Banks [6] a VDI [7]. Tepelné výkony a s nimi i odvedené energie jsou v našich ověřeních limitovány nízkou hodnotou součinitele přestupu tepla α mezi vnitřní stěnou trubky výměníku a teplotou kapaliny, vyplývající z ryze laminárního proudění teplotosné kapaliny. Výpočty a analýzy ukázaly, že snížení koncentrace teplotosné kapaliny by mělo výrazně pozitivní vliv na Reynoldsovo kritérium a součinitel přestupu tepla α , ale rychlosti proudění teplotosné kapaliny jsou v obou výměnících nízké. Pohybují se v rozmezí $w = 0,03$ až $0,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ u výměníku U1 a $w = 0,02$ až $0,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ u výměníku U2. Termokineticky výhodného turbulentního proudění ($Re > 2\,500$) by bylo dosaženo při koncentraci 20 % a rychlosti proudění teplotosné kapaliny $w > 0,39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve výměníku U1 a $w > 0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v U2. Podle Bankse [6] není dosažení

turbulentního proudění nezbytně nutné. Laminární proudění však není z hlediska sdílení tepla efektivní.

Ve sloupkovém grafu na Obr. 3 je znázorněna měrná tepelná energie odvedená výměníky v jednotlivých dnech celého topného období. Reakce provozu výměníku na teplotu okolního prostředí je, z průběhu měrných energií odvedených horninovému masivu v jednotlivých dnech, zřejmá.



Obr. 3 Měrné energie odvedené horninovému masivu v topném období.

ZÁVĚR

Naplnění cílů ověřování umožnilo získat poznatky naznačující možnosti zlepšení parametrů a zvýšení účinnosti vertikálních horninových výměníků. Monitorování teplot, tepelných výkonů a tepelných energií odvedených horninovému masivu prokázalo, že:

- Ochlazení horninového masivu v oblasti výměníku U2, bylo menší než u výměníku U1. Teploty horninového masivu v oblasti obou výměníků byly kladné;
- Průběhy průměrných denních teplot horninového masivu t_c v topném období a v období stagnace lze s vyhovující přesností vyjádřit jednoduchými rovnicemi (2), (3) a (4),(5). Znalosti průběhu teplot masivu, spolu se znalostmi jeho tepelných charakteristik a teplot okolního prostředí jsou důležitými podklady pro regulaci energetických systémů s tepelnými čerpadly;
- Průměrné denní teploty horninového masivu byly u obou výměníků po větší část topného období vyšší než teploty okolního prostředí (59,72 % u U1; 62,96 % u U2) Ověřování potvrzuje výhody vertikálních výměníků jako nízkoteplotních zdrojů energie tepelných čerpadel oproti venkovnímu vzduchu;

- Rozdíly teplot horninového masivu v oblasti výměníků na počátcích a koncích topných období nejsou významné. Výsledky ověřování tak naznačují, že vertikální horninové výměníky lze považovat za stabilní nízkoteplotní zdroje energie s dlouhou životností;
- Měrné tepelné výkony a měrné energie odvedené horninovému masivu výměníkem U2 byly vyšší než u výměníku U1;
- V obou typech výměníků U1 i U2 bylo dosaženo pouze laminárního proudění teplotnosné kapaliny. Významnou příčinou nevýhodného laminárního proudění je vysoká koncentrace etylalkoholu, která neodpovídá zjištěným pracovním teplotám teplotnosné kapaliny;
- Snížení koncentrace etylalkoholu má pozitivní vliv na druh proudění teplotnosné kapaliny a součinitel přestupu tepla mezi teplotnosnou kapalinou a stěnou potrubí výměníku.

Cílem dalších našich prací bude analýza a ověření možností zvýšení měrných tepelných výkonů výměníků dosažením alespoň přechodného – turbulentního proudění teplotnosné kapaliny. Dále pak získání poznatků o vlivu využívání vertikálních horninových výměníků pro vytápění a chlazení objektů na teplotní pole, tepelné výkony a měrné energie odvedené masivu.

LITERATURA

- [1] MYSLIL V., KUKAL Z., POŠMOURNÝ K., FRYDRYCH V. Ekologická energie z Hlubin Země – současné možnosti využívání. *Planeta*, 4: 1 – 32, 2007
- [2] NEUBERGER P., ADAMOVSÝ R., ŠEĐOVÁ M. Temperatures and Heat Flows in a Soil Enclosing a Slinky Horizontal Heat Exchanger. *Energies*, 7: 972 – 978, 2014
- [3] BOWERMAN B. L., O'CONNELL, R. T. *Applied statistics: improving business processes*. 1nd ed., Boston, United States of America, Richard D. Irvin Inc., 1997.
- [4] LUO J., ROHN J., BAYER M., PRIESS A. Thermal performance and economic evaluation of double U-tube borehole heat exchanger with three different borehole diameters. *Energy and Buildings*, 67: 217 – 224, 2013
- [5] DARKWA J., SU W., CHOW D. H. C. Heat dissipation effect on a borehole heat exchanger coupled with a heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 60: 234 – 241, 2013
- [6] BANKS, D. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. 2nd ed. Oxford, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [7] VDI 4640- Part 2, *Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2001

SEZNAM OZNAČENÍ

t_{CR}	teplota horninového masivu	[°C]
t_{\emptyset}	průměrná denní teplota horninového masivu	[°C]
t_{min}	minimální teplota	[°C]
t_C	průměrná denní teplota horninového masivu v celé délce vrtu	[°C]
t_e	teplota okolního prostředí	[°C]
\bar{t}_C	střední teplota horninového masivu	[°C]
Δt_{am}	amplituda oscilace kolem teploty \bar{t}	[K]
τ	počet dní od počátku měření	[den]
φ	počáteční fáze kmitu	[rad]
Ω	úhlová rychlost ($2 \cdot \pi / 365$)	[rad·den ⁻¹]
q_{τ}	průměrný tepelný výkon výměníku	[W·m ⁻¹]
$q_{\tau,max}$	maximální tepelný výkon výměníku	[W·m ⁻¹]

q	průměrná energie odvedená výměníkem	[Wh·m ⁻¹ ·den]
q_{\max}	maximální energie odvedená výměníkem	[Wh·m ⁻¹ ·den]
q_{Σ}	celková energie odvedená výměníkem za topné období	[kWh·m ⁻¹]
I	index determinace	[-]

Děkujeme vedení firmy VESKOM spol. s r. o. se sídlem v Praze - Dolních Měcholupech za všestrannou vstřícnost při realizaci našich sledování na experimentálním pracovišti firmy.

HISTORIE SOLÁRNÍCH TERMICKÝCH KOLEKTORŮ A SOUSTAV

Jaroslav Peterka

Fakulta umění a architektury TU v Liberci
jaroslav.peterka@tul.cz

ANOTACE

Příspěvek přibližuje začátek a vývoj solární fototermiky v bývalém Československu a okolních státech a na obrázcích dokumentuje zkoušené a převzaté koncepce solárních kolektorů, nosných konstrukcí a solárních soustav. Upozorňuje na chyby, které by se mohly stát začínajícím solárním firmám i v přítomnosti. V uvedených souvislostech se vyvinula nová profese se současným názvem „instalatér solárních termických soustav“.

ÚVOD

Vyspělejší západoevropské státy začaly s intenzivním vývojem zařízení pro aktivní využívání sluneční energie hned po roce 1973, kdy vznikla první světová ropná krize. V ČSSR se začalo až o několik let později, přesněji ve 2. polovině 70. let. Boom byl po celá 80. léta. Pro rodinné domy se téměř nic nenavrchovalo, protože návratnost byla 50 – 70 let, ale navrhovala se hned velká solární zařízení pro zemědělství a průmysl, kteréžto resorty to měly zadány Státním cílovým programem pro úspory paliv a energie. Vybrané obrázky v rozsahu příspěvku dokumentují historii pouze velmi omezeně.

SOLÁRNÍ KOLEKTORY

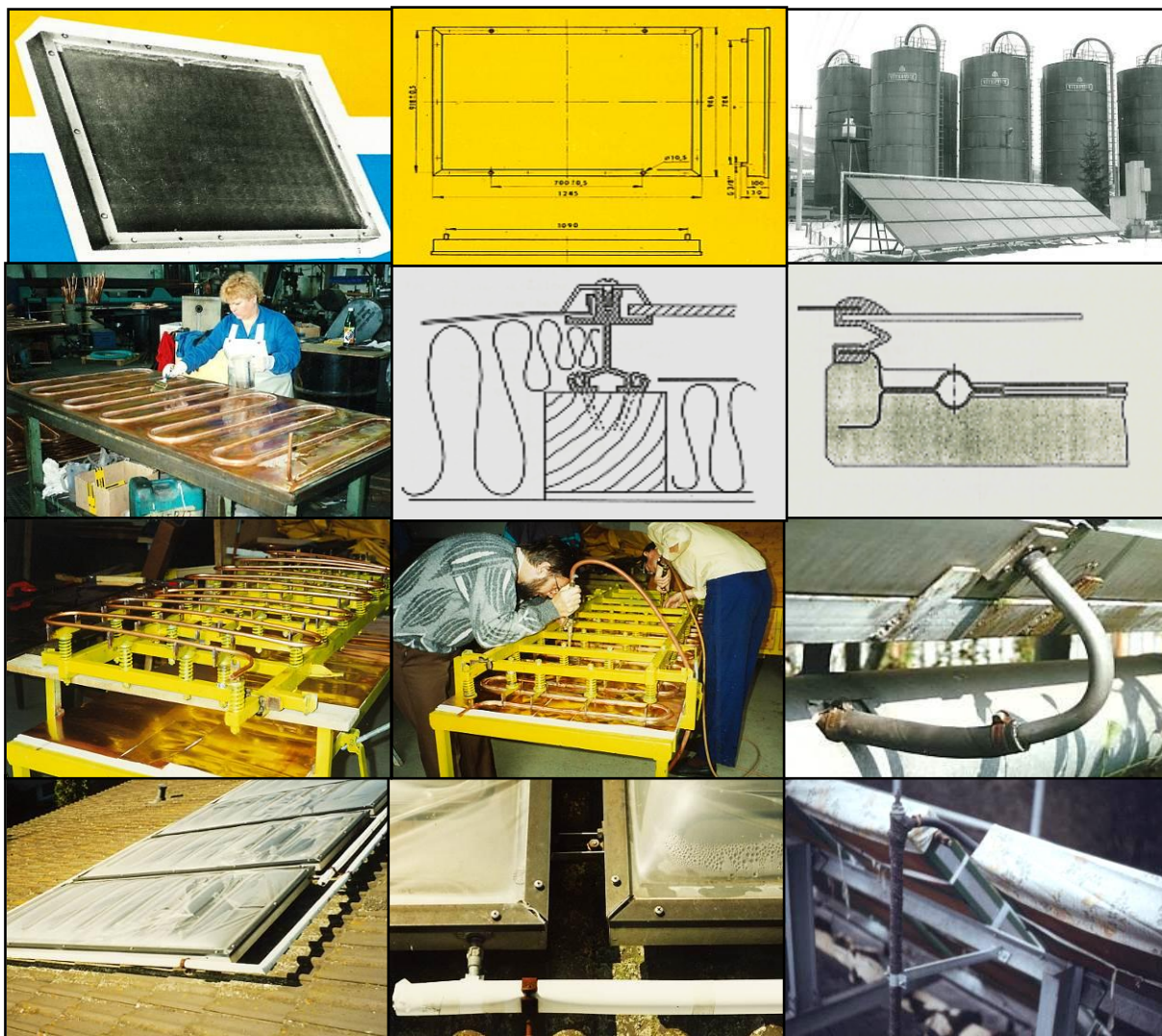
Lze konstatovat, že s vývojem začínali nejen sólo nadšenci, některé zemědělské a průmyslové podniky, ale i oblast služeb. Koncepcí bylo mnoho od různých velikostí, materiálů, druhů rámu, zasklení, izolace, absorbérů, s různou nutnou údržbou, spojováním sériovým i paralelním atd. Panovalo rčení, že kdo umí vyrobit sluneční kolektor, umí využívat sluneční energii, což nebyla pravda, viz dále. Na Obr. 1 jsou uvedeny např. malé celoželezné kolektory, detail styku rámu, ukázka zakrytí vypouklým plexisklem s PE fólií proti omezení cirkulace vzduchu nad absorbérem, samozřejmě se životností jedno léto, s krytem na zimu, detaily ze Švédska, kusová výroba v dílně a výroba svépomocí na zařízeních zapůjčených Rakouskem. Velikost se značně lišila od 90/120, 80/160, 100/200, 100/300, ale i 100/400 cm.

NOSNÉ KONSTRUKCE NA TERÉNU

První konstrukce byly pevné, typové, prefabrikované. Později se volila koncepce sklápění pro letní a celoroční provoz, ale ta se téměř nevyužila. Ze zahraničí byly známy obrázky sklápěných a natáčecích kolektorů, což se u nás řešilo pouze pro koncentrační kolektory. Vlivem nadměrné hmotnosti, ochrany před větrem a nutné údržbě také skončily. Konstrukce má životnost vždy delší než kolektory, pro nové moderní typy už nemusí v detailu vyhovovat. Nepodařilo se realizovat „švédskou“ koncepci velkoplošných kolektorů na terénu, viz Obr. 2.

ZAPOJENÍ KOLEKTOROVÝCH POLÍ

O Tichelmannově smyčce se vědělo, ale první prospekty výrobců kolektorů s ní vůbec nepočítaly, viz Obr. 3. Když se s ní začalo uvažovat, tak se některé chyby objevovaly delší dobu, např. že „smyčku je vhodné navrhnout na teplém vývodu z kolektorů než na chladném přívodu“. U aplikací na šikmých střeších je opět žádoucí uschovat ji pod střešní plášť a nenechávat ji ochlazovat nad střešním pláštěm.



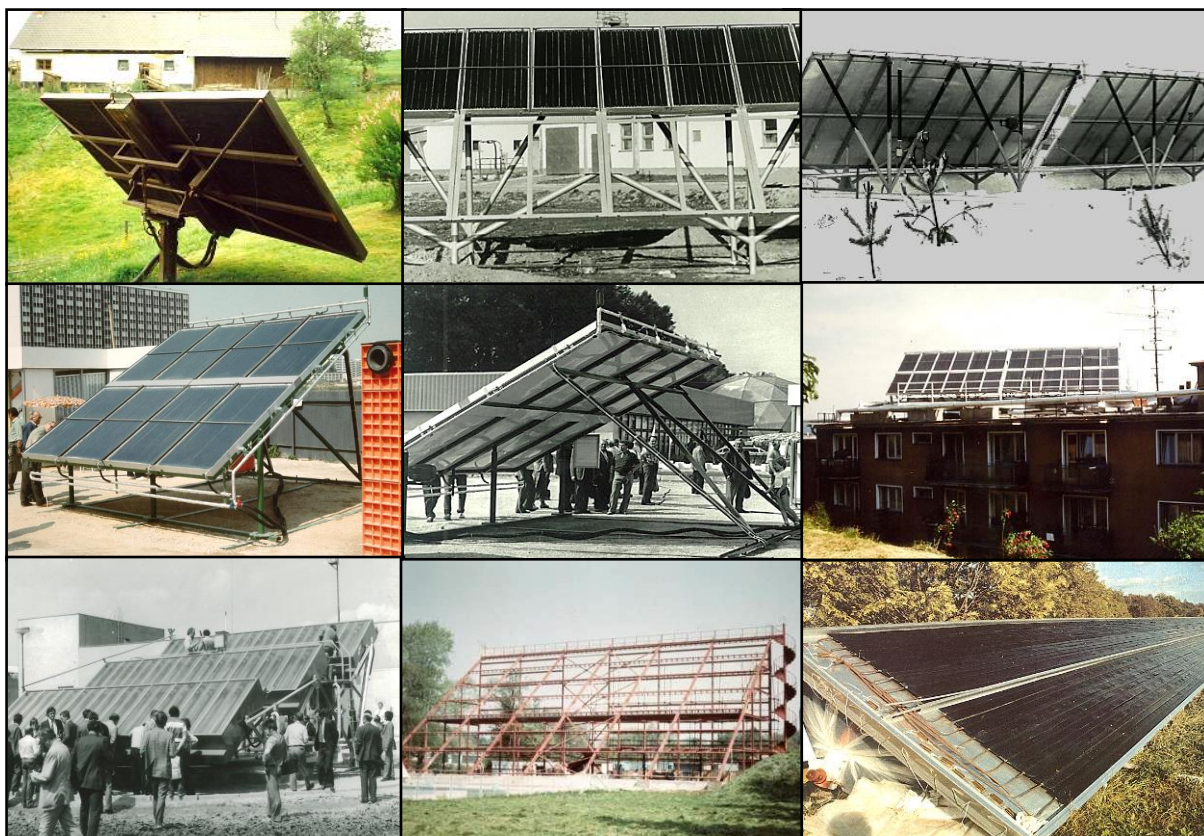
Obr. 1 Sluneční kolektory všeho druhu

NOSNÉ KONSTRUKCE NA STŘEŠE

Střešní instalace provázely neznalosti dalšího zatížení nosných prvků střechy, konstrukční detaily kotvení do šikmých střech (některé kolektory vyžadovaly samostatnou ocelovou nosnou konstrukci), problémy poškození střešního pláště u plochých střech, nevyzkoušené zatížení větrem, sněhem, samovolné sjíždění sněhu z kolektorů atd., viz Obr. 4.

SOLÁRNÍ SOUSTAVY

Koncepce rozvodů byla od začátku ve stylu kusové atypické dodávky. Později se začala používat deska, na kterou se upevnilo oběhové čerpadlo a některé armatury nebo automatická regulace. Později se na desku umístilo veškeré možné technické zařízení a potrubím se už jenom připojila ke kolektorům a solárnímu ohřívači. Následně bylo vše zakapotováno izolací, viz Obr. 5. Někdy se nenamontoval zpětný ventil a teplo z ohřívače unikalo v noci do kolektorů. Nedostávalo se vhodných solárních ohřívačů, které potřebovaly větší teplosměnnou plochu. Objevily se i první tuzemské výrobky protiproudých výměníků tepla. Posuzovaly se koncepce víceokruhových primárních kolektorů řízených trojcestnými ventily s pohonem nebo dalšími oběhovými čerpadly. Místo ručního odvzdušnění kolektorů se začaly používat automatické odvzdušňovací ventily a musely být kovové.



Obr. 2 Různé koncepce nosných konstrukcí na terénu.



Obr. 3 Umístění Tichelmannovy smyčky.

NEVHODNÉ NEBO NÁHRADNÍ KOMPONENTY SOUSTAV

Projektanti neměli k dispozici vhodné solární ohřivače. Ty, které byly trochu vhodné, měly pro ohřev vody pro vysokopotenciální zdroj tepla malou topnou vložku. Deskové výměníky tepla pro solární soustavy byly ještě „neznámé“. Noví výrobci se teprve učili, viz Obr. 6 a vývoj postupně reagoval na požadavky až po vhodný kombinovaný ohřivač s dostatečným výměníkem(ky) a elektrickou vložkou. Cílem vývoje byly solární ohřivače v dnešní podobě.



Obr. 4 Umístění kolektorů na střeše.



Obr. 5 Solární soustavy.

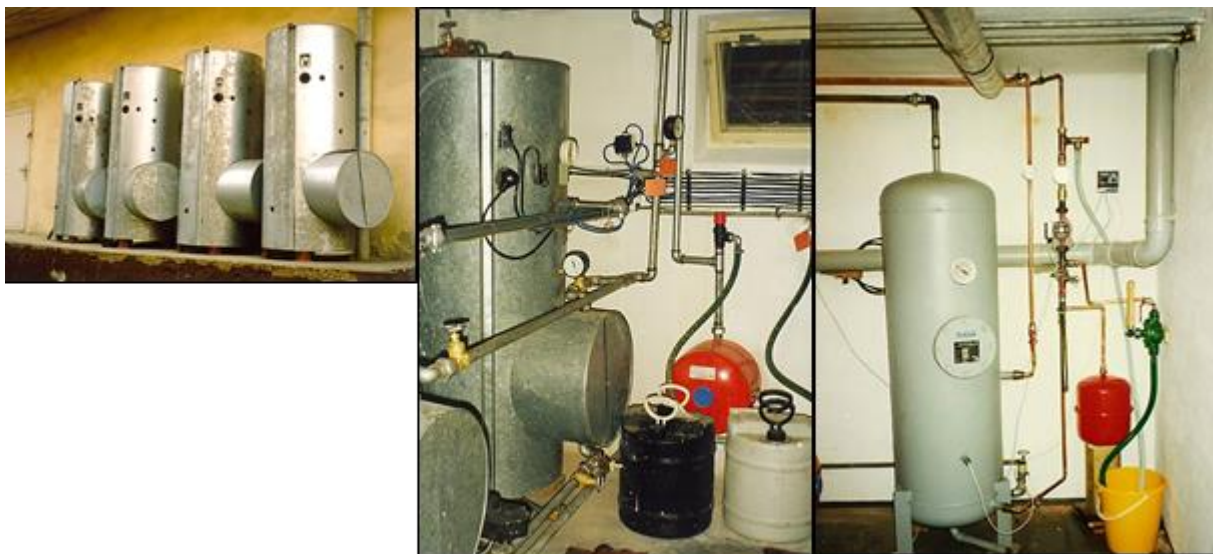
DIMENZOVÁNÍ KOLEKTOROVÉ PLOCHY

Specifickým problémem bylo dimenzování kolektorové plochy. Aby se získalo co nejvíce sluneční energie, počítalo se „jarní a podzimní“ záření, tzn. plocha byla o něco větší, než kdyby se uvažovalo větší „letní“ záření. Logicky z toho vyplývá běžné letní přehřívání, které se projevovalo vytečením už nemrznoucí kapaliny do zásobní nádrže s ručním dočerpáním. Takový stav byl normální, úkony nového dočerpání byly předepsány v provozním řádu a každá soustava byla vybavena ručním (někdy i elektrickým) čerpadlem, viz Obr. 7.

AUTOMATICKÁ REGULACE

Základní ovládání oběhového čerpadla zapnuto/vypnuto (nebyla ještě tříotáčková čerpadla) bylo brzy překonáno řízeným obtokem čerpadla, viz obr. 8. Regulátor TRS se ZPA Ústí n. L.

Navíc se navrhoval tzv. malý a velký okruh. Malý sloužil pro prohřátí kolektorů a primárního okruhu. Velký se potom otvíral do vložky ohřívače. Později se přešlo na jediný okruh.



Obr. 6 Náhradní řešení solárních ohřívačů, na estetiku opláštění se tolik nehledělo.



Obr. 7 Běžné ruční dočerpávání kolektorů.



Obr. 8 Dvojitý primární okruh, změna průtoku kolektory a kapotovaná pohonná jednotka. Ukázka typové dodávky solárních soustav. Ve skříni je též solární ohřívač 300 l.

Na Obr. 8 nahoře jsou tři TRSy, které ovládaly čerpadlo, prepouštěcí elektroventil a pohon trojcestného ventilu. Velikost regulátorů se neustále zmenšovala, viz Obr. 9. Regulátory se postupně vyvíjely od analogového systému k digitálnímu, byly vybavovány ručním ovládním a dalšími nastavitelnými funkcemi. Dnes může být regulace solární soustavy zahrnuta do celkového energetického ovládní domu i energetické bilance domu s možností ovládní přes PC. Dnešní výběr je velmi velký, někteří výrobci solárních komponentů si dodávají i své vlastní regulátory.



Obr. 8 Zmenšování skříní MaR.

VÝZNAMNÁ SOUVISLOST

Značný odpor proti realizacím solárních soustav vznikal tam, kde se sluneční kolektory umísťovaly na plochých strechách a prítom ji při montáži poškodily. Zatekání bralo iniciativu dalším zájemcům. Vše se řešilo ochranou strešního pláště jako součásti solární dodávky. Od nejdražší, která se strešního pláště vůbec „nedotkla“ neboli vše bylo „ve vzduchu“, až po nejjednodušší pomocí položených dlaždic nebo přilepených gumových pásů, viz Obr. 10.



Obr. 9 Ochrana strešního pláště.

OCENĚNÍ VĚDCE

Na minulé konferenci v roce 2014 jsem vzpomněl izraelského vědce Harryho Zvi Tabora, který v tom roce oslavil 97 let svého plodného života. Byl to on, který v roce 1955 vyvinul způsob, jak výrazně zvýšit účinnost primitivních solárních absorbérů a tím i solárních kolektorů. Jedná se o spektrálně selektivní vrstvu na absorbéru, která se používá dodnes. Výrobu vrstvy v dnešní slovenské firmě Thermosolar Žiar upřesnil a zavedl Ing. Jindřich Baloun, CSc. Kolektory s touto vrstvou se nazývaly kolektory druhé generace. Dnes už mají tuto vrstvu na absorbéru všechny solární kolektory. H. Z. Tabor zemřel 15. 12. 2015 ve věku 98 let.



POLNÍ ENERGETICKÉ PLODINY

Vlasta Petříková

CZ Biom – České sdružení pro biomasu
vpetrikova@volny.cz

ANOTACE

Polní energetické plodiny (PEP) jsou produktem sluneční energie, i když nepřímým. Z jednoletých se jedná např. o **čiroky**, které se jako zdroj energie používají spíše pro vývin bioplynu, než pro suchou biomasu. Ze **světlice barvířské** je pro vytápění vhodná sláma po vymláčení semen. **Hořčice sareptská** má výhodu ve snadném a levném pěstování. **Konopí seté** je významná plodina pro technické i lékařské účely. Pro spalování se využívají brikety či pelety lisované z pazdří. Z víceletých a vytrvalých PEP se nejlépe osvědčil **krmný šťovík**, využívaný pro přímé spalování suché biomasy a pro bioplyn. Výhodný je i pro krmení zvířat, kde zvyšuje jejich užitkovost. Poměrně známá je **ozdobnice čínská – Miscanthus**, ale trpí v 1. roce vymrzáním, proto se doporučuje jen pro teplejší oblasti. Další plodinou je **topinambur hlíznatý**, vhodný i pro technické účely. Samostatnou skupinou jsou tzv. **energetické trávy**. Výhodné jsou trávy vysoké s dostatečnými výnosy, např. **chrastice (lesknice) rákosovitá, sveřep bezbranný, ovsík vyvýšený, psineček veliký, kostřava rákosovitá aj.** Výše uvedené plodiny jsou již ověřeny v provozu, proto je lze doporučit k plošnému pěstování. Perspektivní jsou i další plodiny, např. **mužák prorostlý, vlákeň obouhlovná (sida) nebo jestrábina východní aj.**, které je nutné v provozu ověřit.

ÚVOD

Biomasa pro energetické účely je nepřímým produktem sluneční energie a také jedním z jejich nejdůležitějších alternativních zdrojů. Odpadní materiál a vedlejší produkty už nestačí pro zajištění potřeby energetické biomasy, a proto je třeba biomasu zajišťovat přímo, záměrným pěstováním vhodných druhů rostlin. Vedle běžně známých dřevin jsou stejně vhodné polní plodiny popsány v tomto příspěvku. Za energetické využití biomasy je obvykle považováno přímé spalování, nově pak pro vývin bioplynu v bioplynové stanici (BPS). Sluneční energii využívají rostliny také k produkci krmných píce a při jejich následném krmení hospodářských zvířat to je vlastně další způsob nepřímého alternativního zdroje energie. Biomasa má vedle přímého zdroje alternativní energie také velmi důležitý význam nepřímý, neboť omezuje výskyt skleníkových plynů v atmosféře, což je v zájmu trvale udržitelného způsobu života na Zemi, požadavek stále naléhavější.

Polní energetické a technické plodiny (PEP) lze pro přehled rozdělit na jednoleté, víceleté až vytrvalé a na samostatnou skupinu tzv. energetických trav. Pro produkci biomasy jsou důležité hlavně víceleté a vytrvalé druhy, vysoce vzrůstné, které vytvářejí dostatečně vysoké výnosy. Jednoleté plodiny jsou významné hlavně pro možnost jejich zařazování do řádného osevního postupu, což přispívá k žádoucímu rozšíření sortimentu pěstovaných plodin na zemědělské půdě.

JEDNOLETÉ POLNÍ ENERGETICKÉ PLODINY

Tento typ plodin je vedle přímého energetického zdroje významný také jako relativně nový druh rostlin, což přispívá k širší biologické diversifikaci. V současné době se totiž pěstují v podstatě jen 3 druhy hlavních plodin (obilí, kukuřice, řepka), což je pro trvale udržitelný rozvoj nepřijatelné. Pro jejich zásadní rozšíření se ale v současném tržním hospodářství těžko argumentuje, neboť se zemědělci orientují na plodiny s jistým a stálým ziskem. To je sice pochopitelné, ale vzhledem ke zmíněným obecným potřebám by bylo žádoucí posílit i tento

segment energetické biomasy. V dalším popise jsou uvedeny jako příklad jen nejdůležitější jednoleté plodiny.

Čiroky

Čiroky představují skupinu více druhů, z nichž je několik vhodných i pro energetické využití. Jedná se např. o čirok zrnový, cukrový či kombinovaný a také o súdanský, zvaný též súdanská tráva. Využívá se zpravidla celá jejich nadzemní hmota. V poslední době se jako alternativní energie uplatní spíše v bioplynových stanicích jako substrát k doplnění či nahrazení tradiční kukuřice. Nově se zkouší i některé druhy s genetickou modifikací - zatím pokusně. Zelená hmota se pro BPS zpravidla silážuje a v této formě se přidává do fermentoru. Lze k tomu použít všechny uvedené druhy čiroků, včetně súdanského. Pro vytápění budov se využívá rovněž celá nadzemní hmota, a to nejčastěji z čiroku súdanského (viz Obr. 1). Čiroky jsou plodiny teplomilné, vyžadující pozdní setí a navíc mívají dlouhou vegetační dobu. To je příčinou pozdní sklizně, kdy bývá sušení často problematické, proto se v poslední době čiroky používají převážně silážované pro výrobu bioplynu.



Obr. 1 *Súdanská tráva před sklizní na zeleno*



Obr. 2 *Porost světlice barvířské před sklizní v plné zralosti na Žatecku*

Světlice barvířská – saflor

Světlice barvířská je olejnatá plodina, která je tudíž energeticky velmi bohatá. U nás se ale využívá hlavně pro krmění drobného ptactva a pro výrobu speciálních olejů. Pro energetické potřeby je ve formě celkové nadzemní hmoty samozřejmě rovněž vhodná. Bylo to zjištěno při jejím spalování přímo v provozu teplárny, kde byla potvrzena i její vysoká výhřevnost. Z ekonomického hlediska je to ale způsob méně efektivní. Lépe je proto využívat pro spalování jen slámu po vymláčení semene světlice barvířské, které se výhodně prodá pro jiné účely. I v tomto případě je sláma pro vytápění vhodná, díky olejnatým semenům, která jsou v ní ještě ve zbytcích obsažena. Využívání slámy safloru pro vytápění pak záleží už jen na dostatečně vysokých výnosech, aby bylo efektivní slámu pro tyto účely sklízet.

Světlice barvířská se u nás úspěšně pěstuje hlavně v teplejších oblastech, snáší dobře i výsušné lokality. Dobré zkušenosti s ní mají např. na Žatecku (viz Obr. 2), nebo v některých oblastech na jižní Moravě.

Hořčice sareptská

Sareptská hořčice patří mezi plodiny brukvovité, u nás se pěstuje hlavně pro výrobu kremžské hořčice. Pro energetické účely byla ověřována v provozních podmínkách proto, že je to plodina nenáročná, pěstuje se snadno a také levně. Má poměrně krátkou vegetační dobu, takže se sklízí v létě zpravidla za suchého počasí. Využívat se může pro přímé spalování a to jak ve formě celkové hmoty včetně semen, tak jako sláma po vymláčení. Je rovněž velmi vhodná pro

zpestření sortimentu pěstovaných zemědělských plodin, což má nesporně značný význam ekologický.

Konopí seté

Tato vysoce vzrůstná mohutná rostlina má celou řadu významných vlastností, postupně zjišťovaných a využívaných, zvláště v poslední době u nás i ve světě. Pro energetické účely bylo technické konopí zkoušeno v provozu již před více než 15 lety, hlavně pro účely suché biomasy k vytápění. Dosažené výsledky byly při spalování příznivé, ale vyskytovaly se problémy se sklizní. Vlákna obsažená v této přadné rostlině způsobovala poruchy sklizňových strojů namotáváním na hřídele a další mechanické součástky. Postupně se tento problém sice vyřešil zajištěním speciální mechanizace, ale mezitím pokročil výzkum využívání této rostliny k jiným účelům natolik, že je v současné době podle názoru odborné veřejnosti konopí ke spalování škoda. Byla totiž zjištěna celá řada odvětví, včetně lékařství, kde lze technické konopí s velkým úspěchem zužitkovat. Pro energetické účely je proto úspěšné a efektivní využití např. pazdeří po zpracování vlákna, z kterého se lisují pelety nebo brikety (viz Obr. 3 a 4). Tato tvarovaná paliva se dobře uplatní zejména v domácnostech nebo jiných menších topeništích.



Obr. 3 Lisování briket z pazdeří v Kácově



Obr. 4 Brikety pro vytápění z konopného

VÍCELETÉ A VYTRVALÉ ENERGETICKÉ PLODINY

Ze skupiny těchto plodin jsou popsány hlavně druhy, které byly již ověřeny při pěstování v provozních podmínkách. To je totiž pro praktické využití rozhodující, protože výsledky z pokusů pro zemědělskou praxi nestačí. Předem je třeba vypracovat řádné a spolehlivé agrotechnické zásady, což vyžaduje víceleté zkušenosti. V závěru této kapitoly jsou pro úplnost stručně uvedeny i druhy, které jsou pro energetické využití potenciálně perspektivní, ale v provozu zatím ověřeny nebyly.

Krmný šťovík – Rumex OK 2 (shavnat)

Krmný šťovík je dlouhodobě vytrvalá polní energetická plodina a také vynikající kvalitní pícnina. Ze všech víceletých a vytrvalých PEP se osvědčil nejlépe a to jak pro energetické účely, tak později pro krmení. U nás se v provozu pěstuje už téměř 20 let, takže jsou již bohaté zkušenosti s jeho pěstováním i využíváním. Původně byl pěstován téměř výhradně pro suchou biomasu k přímému spalování. To se osvědčilo zejména proto, že se sklízí už začátkem léta, v plné zralosti a není potřeba jej sušit. Pouze se nechá na poli doschnout tak jako sláma, pak se slisuje do balíků pro následnou přepravu buď přímo do kotelny, nebo se z něj vyrábějí tvarovaná paliva – brikety nebo pelety (viz Obr. 5, 6).



Obr. 5 Sklizeň krmného šťovíku-osmý rok vegetace **Obr. 6** Lisování suché šťovíkové biomasy

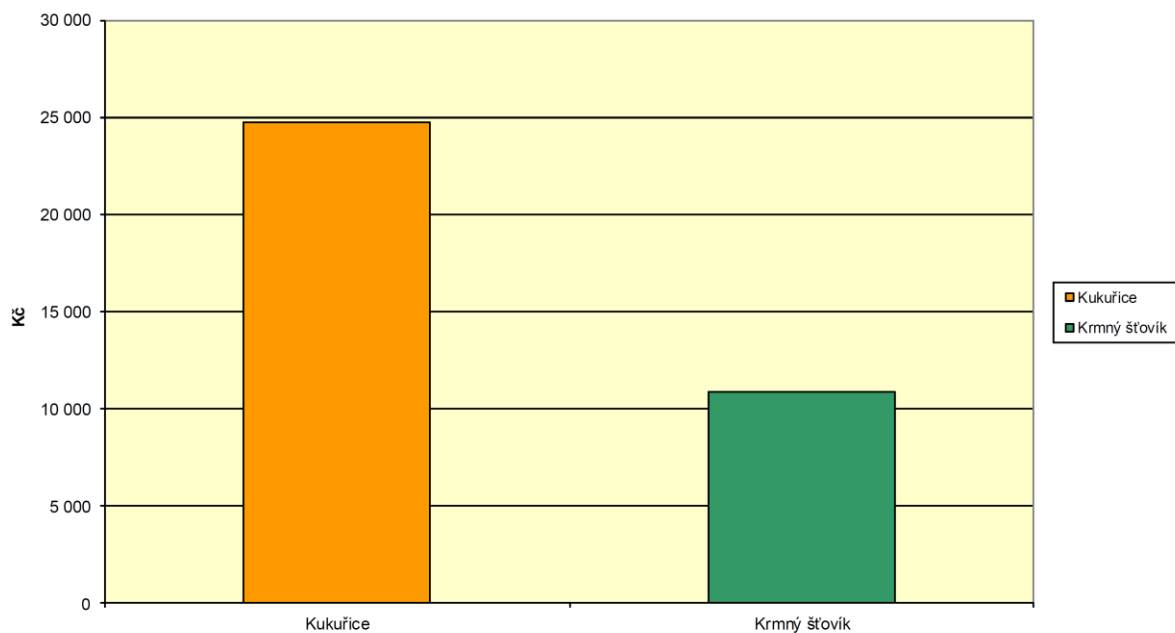
Krmný šťovík je výhodný i proto, že vydrží v plné vegetaci 10 i více let od zasetí a také proto, že založení jeho porostu je relativně levné. Osivo stojí jen cca 4.000 Kč/ha, což je oproti rychle rostoucím dřevinám (RRD) několika násobně nižší a také kultivační práce jsou řádově levnější, protože se porost zakládá jednoduchým setím. Výnosově jej lze srovnat s výnosy z RRD (v přepočtu na rok) a také jeho výhřevnost se blíží dřevinám. Sklízí se každým rokem a to již od 2. roku vegetace, což je další výhodou, protože není nutné čekat několik let, až vyrostou do užitkové sklizně.

Nevýhodou šťovíkové biomasy pro vytápění je jeho nízká výkupní cena, která se v praxi odvíjí většinou od výkupní ceny slámy. To je ale vedlejší produkt zemědělství, kde náklady na pěstování se hradí sklizní zrna. Proto se v současné době šťovík na trhu s biomasou nemůže uplatnit a tak se pěstuje jen pro vlastní spotřebu. U nás je teď několik pěstitelů, kteří jej úspěšně využívají pro vytápění svých provozních budov, nebo rodinných domů.

V poslední době se krmný šťovík osvědčil při získávání alternativní energie také při výrobě bioplynu v bioplynových stanicích (BSP). Lze jím úspěšně nahradit nebo doplnit běžně používanou kukuřici, což má několik výhod a to nejen ekonomických, ale i ekologických. Daří se mu dobře i ve vyšších polohách, kde bývá chladno, což kukuřici neschvídá a také jej lze pěstovat i na větších svazích, kde spolehlivě ochrání půdu proti erozi. To je výhoda zcela zásadní, neboť tím přispívá i k přímému udržení půdní úrodnosti. Sklízí se v červnu na začátku kvetení (viz Obr. 7) a pak se siláží. Po této hlavní sklizni znovu obrůstá a během léta a podzimu vytvoří ještě 2 tzv. doplňkové seče, vhodné rovněž pro využití v BPS (nebo ke krmení). Oproti kukuřici je výhodný i proto, že jeho pěstování je výrazně levnější: náklady na pěstování 1 ha jsou méně než poloviční (viz Graf. 1).



Obr. 7 Krmný šťovík při sklizni - 3. rok vegetace



Graf 1 Náklady na pěstování 1 ha

V poslední době se zvyšují osevní plochy pro BPS a pro krmení, ale pro suchou biomasu se jeho pěstování naopak omezuje, důsledkem jeho nízké výkupní ceny (jak bylo již uvedeno). Vedle zmíněného přínosu šťovíku pro ekologii je třeba zvláště zdůraznit jeho zásadní význam pro udržení a zlepšení půdní úrodnosti. Vytváří velké množství organických zbytků (zdroj humusu) a svými mohutnými hlubokými kořeny proniká až do spodních profilů půdy, tím ji prokypřuje a biologicky oživuje. Proto je třeba uvítat jeho pěstování pro jakýkoliv způsob jeho využití a osevní plochy co nejvíce rozšířit.

Ozdobnice čínská – *Miscanthus sinensis*

Tato vysoká statná tráva je u nás již poměrně známá, začala se pěstovat hlavně pro její dlouhodobou vytrvalost i poměrně vysoké výnosy suché hmoty. V našich podmínkách dorůstá obvykle do výšky nejméně 2 a 3 m, jak je zřejmé z Obr. 8. Porost na fotografii je z druhého roku vegetace. Pěstuje se v klimaticky vhodné lokalitě nedaleko Prahy, proto se založení porostu podařilo a splňuje tak i očekávané výsledky s dostatečným nárůstem biomasy.



Obr. 8 Ozdobnice čínská během zimy



Obr. 9 Pole koncem května s výsadbou ozdobnice po prvním přezimování

Nevýhodou ozdobnice čínské je dlouhá vegetační doba, takže je ke konci roku její biomasa málo vysušená a proto se nechává přes zimu vymrznout. Sklizeň se pak provádí až na jaře, což bývá mnohdy nesnadné, pokud je jaro „mokré“, s častými srážkami, což ale v poslední době nehrozí, naopak bývá jaro suché, pak tento problém odpadá. Sklízí se zpravidla pojízdnou řezačkou a z řezanky se lisují tvarovaná paliva, obvykle pelety pro možnost jejich automatického příkládání.

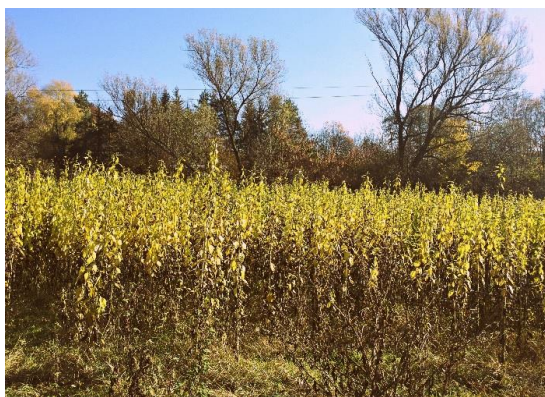
Ozdobnice čínská je teplomilná rostlina, proto je nutné zakládat její porosty jen v oblastech, kde není nebezpečí jejího vymrznutí. Zakládá se zpravidla výsadbou odděnků, protože u nás nedozrává a není proto možné získat osivo. Cena 1 odděnků se pohybuje od cca 3 až po 7 Kč a když je jich třeba 10 tis./ha, tak se cena jen za sadbu pohybuje od cca 30 až do 70 tis. ha. Nebezpečí vymrznutí výsadby není jen teoretické, ale zcela reálné, jak se stalo nedávno při výsadbě rozsáhlých plantáží – přes 170 ha a kde tak jen za nákup odděnků vznikla škoda přes cca 12 mil. Kč. Během první zimy po výsadbě zmrzla v podstatě celá výsadba. Rostliny ozdobnice čínské se na jaře následujícího roku vyskytly pouze ojediněle a na poli převládá plevel – viz **Obr. 9**. Proto je velmi důležité zvolit pro její pěstování jen takovou lokalitu, kde vymrznutí nehrozí a zbytečně tak neriskovat případné škody. V současné době není ještě dostatek praktických zkušeností se stanovením takové spolehlivé lokality, proto lze pro ozdobnici čínskou doporučit zodpovědně jen teplejší oblasti, především na jižní Moravě nebo v okolí Prahy či v Polabí apod.

Topinambur hlíznatý

Topinambur je další z víceletých až vytrvalých polních plodin pro energetické využití, který je vhodný i pro jiné technické účely. Jedná se o nenáročnou plodinu, která snáší i chladnější oblasti. Její vytrvalost je dána bohatě se tvořícími podzemními hlízami, které i po sklizni zůstávají v určitém množství v půdě a tak zajistí obrůstání porostu v následujícím roce. Sklizené hlízy obsahují inulin, a proto jsou vhodné v potravinářství i pro výživu zvířat (včetně lesních).

Pro energetické účely jej lze využívat k vytápění budov, ve formě suché nadzemní hmoty (viz Obr. 10). Sklízí se běžnou mechanizací, nechá se na zemi doschnout a pak se lisuje do balíků, nebo se rozřeže na řezanku a může se dále zpracovat, nebo spálit přímo ve větší kotelně jako štěpka.

Při sklizni na zeleno lze topinambur využít i jako doplněk substrátu pro BPS k výrobě bioplynu, ale to je potřeba předem náležitě ověřit v provozních podmínkách.



Obr. 10 Porost tupinamburu – po doschnutí vhodný ke sklizni na suchou biomasu



Obr. 11 Zralý porost chrastice rákosovité před sklizní

Energetické trávy

Pro energetické účely jsou samostatnou kapitolou i tzv. **energetické trávy**. Lze je používat jak tradičně pro krmení, tak pro suchou biomasu, nebo pro vývin bioplynu v BPS. K tomu se hodí hlavně trávy vysokého vzrůstu, které poskytují dostatečně vysoké výnosy, např. **chrastice (lesknice) rákosovitá, sveřep bezbranný, ovsík vyvýšený, psineček veliký, kostřava rákosovitá aj.** Z ekonomických důvodů je vhodné pěstovat trávy na semeno a pro energii využít pouze vymlácenou slámu (např. pro vytápění budov).

V poslední době se pro vytápění používá často travní seno, zejména proto, že je běžně k dispozici, neboť pěstování trav je u nás tradičně dobře známé. Využívají se hlavně porosty trav starších, které nemají zpravidla vysokou krmnou hodnotu. Takové seno se drtí a lisují se z něj pelety (i brikety). Vyrábějí se ze sena hlavně proto, že je relativně snadno dostupné, ale kvalita pelet bývá horší, ne vždy se správně slisují (mohou se dříve rozpadat) a také výhřevnost bývá nižší. Pro snadnou dostupnost tohoto materiálu je ale u nás jejich výroba dost rozšířená a to i pro častý nedostatek jiného kvalitnějšího materiálu, např. dřevní hmoty. Příkladem vhodné trávy, účelově pěstované pro energetické využití suché biomasy k vytápění budov je chrastice (lesknice) rákosovitá – viz Obr. 11.

V poslední době se tráva využívá k energetickým účelům i při výrobě bioplynu, ve formě zelené hmoty či nejčastěji jako travní siláž. Tento způsob je rovněž značně rozšířený, proto se jím u nás podrobně zabývají specializované instituce a to jak při jejich pěstování (např. Oseva pro, Zubří), tak při různých technologických způsobech využívání v BPS (např. VÚZT Praha aj.), aby se tak zajistil co největší efekt. Bližší podrobnosti je proto možné získat na těchto či podobných specializovaných pracovištích.

ENERGETICKÉ PLODINY POTENCIÁLNĚ VHODNÉ, ZATÍM V PROVOZE NEOVĚŘENÉ

Výše uvedené energetické rostliny jsou popsány výhradně podle zkušeností z provozu a proto je lze pro jejich plošné pěstování již spolehlivě doporučit (v rámci stanovených parametrů). Perspektivní jsou i další druhy vytrvalých rostlin, které je ale nutné napřed ověřit v provozních podmínkách.

Mužák prorostlý

Mužák je mohutná vytrvalá rostlina, dorůstá výšky 2 až 3 m. Je u nás zatím méně známý, ale svými vlastnostmi si v poslední době zasloužil pozornosti pro energetické využívání. Vytváří velké množství zelené hmoty, proto by bylo vhodné jej používat především pro výrobu bioplynu v BPS. Je to plodina velmi raná a vydrží na stanovišti 20 až 25 let. Z tohoto hlediska je považován za velmi perspektivní plodinu. Vyplývá to z výsledků dlouhodobých pokusů, kde jsou porosty dostatečně narostlé, plně zapojené - viz Obr. 12.

Pro plošné praktické pěstování je ale třeba jej u nás ještě ověřit v provozu. Jeho perspektivu lze doložit mimo jiné i tím, že se jím už podrobně zabývají v Německu, v různých lokalitách a to i v provozu.



Obr. 12 Mužák prorostlý na pokusné parcele

Sida vytrvalá - vláčeň oboupohlavná

Jedná se rovněž o velmi perspektivní dlouhodobě vytrvalou rostlinu, podobnou bavlníku, neboť obsahuje také textilní vlákna - proto i název vláčeň. V pokusech s pěstováním sidy (vláčeň) jsou u nás dobré výsledky a tak je jí věnována potřebná pozornost. Dorůstá do výšky kolem 2 m, což je dostačující pro její výhodné využívání i pro energetické účely. Zatím se ale jedná jen o výsledky z pokusů, kde vytváří pěkný porost – viz **Obr. 13**. Sida je v jarním období šťavnatá a poskytuje kvalitní píci i pro krmení dobytka. Proto by byla k energetickým účelům vhodná především v BPS pro výrobu bioplynu.



Obr. 13 Sida vytrvalá v polním pokuse podmínkách



Obr. 14 Sida vytrvalá v provozních

K plošnému pěstování je ale nutné sidu v provozu náležitě ověřit, neboť výsledky z pokusů se mohou diametrálně lišit od výsledků z drsného zemědělského provozu, jak to bylo bohužel již v reálu potvrzeno. V prvním roce po zasetí vzešla sida na poli jen ojedinele a rostliny dosáhly výšky jen cca 10 až 20 cm. Podobně tomu bylo i ve druhém vegetačním roce, jak je zřejmé z Obr. 14. Příčinou byla zřejmě nevhodná poměrně chladná lokalita pro její pěstování a také nedostatek výživy rostlin, způsobený zřejmě neznalostí potřebné intenzity hnojení. Proto není možné bez provozního ověření tuto plodinu zodpovědně doporučit k pěstování v provozních

podmínkách (ostatně tak jako jiné, nepříliš známé rostliny), ale je nutné předem získat praktické zkušenosti s produkcí této biomasy i jejím využíváním.

Jestřabina východní

Za stručnou zmínku ze skupiny perspektivních, ale ještě v provozu neověřených rostlin stojí také jestřabina východní. Je to relativně skromná plodina, daří se jí dobře i na méně úrodných půdách a na sušších stanovištích. Určitou pěstitelskou výhodou je i její schopnost poutat vzdušný dusík, neboť se jedná o rostlinu bobovitou. Podobá se částečně vojtěšce, ale je mnohem mohutnější a vzrostlejší a je také dlouhodoběji vytrvalá. Z tohoto důvodu by se hodila hlavně pro využívání ve formě zelené hmoty nebo siláže pro výrobu bioplynu. Pro praktické využití v provozu je ale rovněž nutné ji předem ověřit.

ZÁVĚR

Biomasa z polních energetických plodin (PEP) je důležitou složkou pro obnovitelné zdroje energie. Využívá se pro vytápění budov, podobně jako biomasa dřevní. Oproti pěstování dřevin je pěstování polních plodin levnější a navíc se biomasa získá dříve, již od 2. roku. Přesto se na trhu s biomasou PEP těžko uplatňují, pro nízkou výkupní cenu, odvozenou zpravidla od ceny slámy. Proto se vyplatí hlavně pro vlastní potřebu k vytápění podnikových budov nebo rodinných domů. Lze je používat také jako zelenou či silážovanou hmotu k výrobě bioplynu. Z polních energetických plodin jsou důležité hlavně víceleté a vytrvalé druhy, včetně lučních porostů. Nejvýznamnější je krmný šťovík – Rumex OK 2 (shavnat). V BPS jím lze nahradit nebo doplnit kukuřici. To je výhodné i pro ekologii, protože šťovík omezuje erozi půdy a zlepšuje úrodnost. Jednoleté energetické plodiny mají význam i pro rozšíření sortimentu pěstovaných plodin. Novější méně známé druhy rostlin musí být před jejich zavedením do praxe ověřeny v provozních podmínkách a pro pěstitele musí být k dispozici spolehlivě vypracovaná agrotechnika. Podrobné informace o jednotlivých druzích rostlin jsou uvedeny v nové publikaci [1].

ZÁVĚR

- [1] PETŘÍKOVÁ, V., WEGER, J. *Pěstování rostlin pro energetické a technické využití*, ProfiPress, Praha 2015.

PROVOZNÍ ANALÝZA SOLÁRNÍ SOUSTAVY S HYBRIDNÍMI FVT KOLEKTORY

Nikola Pokorný^{1,2}, Tomáš Matuška^{1,2}

¹Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT

²Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

nikola.pokorny@fs.cvut.cz

ANOTACE

Příspěvek se věnuje problematice vývoje a výzkumu zaskleného kapalinového fotovoltaicko-tepelného (FVT) kolektoru. Popisuje vytvořený matematický model FVT kolektoru, na základě kterého bylo možné provést optimalizaci konstrukce kolektoru. Dále pak příspěvek představuje nasazení FVT kolektorů na experimentální instalaci solární soustavy pro přípravu teplé vody, aby bylo možné potvrdit jejich energetický přínos.

ÚVOD

Problematika hybridních FVT kolektorů začíná být v posledních letech předmětem vývoje mnoha výzkumných institucí. Hybridní FVT kolektor kombinuje technologii fotovoltaických (FV) panelů a solárních termických kolektorů. Vzhledem ke snaze o zvýšení energetického využití obálky budovy je hybridní FVT kolektor díky kombinované výrobě tepla a elektřiny (solární kogeneraci) vhodné efektivní řešení. Hybridní FVT kolektory existují v mnoha konfiguracích. Je možné je rozdělit na kapalinové a vzduchové popřípadě zasklené a nezasklené. Vzhledem k omezenému využití ohřátého vzduchu v budovách v letním období, jsou vzduchové kolektory v současnosti poněkud stranou zájmu. Nezasklená varianta FVT kolektoru je vhodná zejména pro aplikace, u kterých je prioritou produkce elektrické energie a využití nízkopotenciálního tepla je přidanou hodnotou. Většina komerčně vyráběných FV panelů je schopna přeměnit dopadlou sluneční energii na elektrickou s účinností okolo 15 %, zbylá část sluneční energie se přemění na teplo, které buď odchází do okolí ve formě tepelné ztráty, nebo ohřívá FV články a tím snižuje jejich účinnost. Nárůst produkce elektrické energie je díky chlazení FV modulů výrazný pouze v oblastech s vyššími úhrny dopadlé sluneční energie. V oblasti střední Evropy však není nárůst produkce elektrické energie díky chlazení FV modulů značný, pokud nejsou významně integrovány do obálky budovy, zejména střechy. Vývoj zaskleného kapalinového FVT kolektoru je zaměřen na zvýšení produkce tepelné energie v takové míře, aby mohl FVT kolektor konkurovat konvenčním termickým kolektorům na trhu. Zasklený kapalinový FVT kolektor bude mít díky sekundární produkci elektrické energie konkurenční výhodu. Celkový energetický přínos zaskleného FVT kolektoru by tak měl být vyšší než u odděleného řešení FV panelů a solárních tepelných kolektorů. Velký potenciál pro zasklené kapalinové FVT kolektory se nachází zejména u staveb s omezenou plochou střechy.

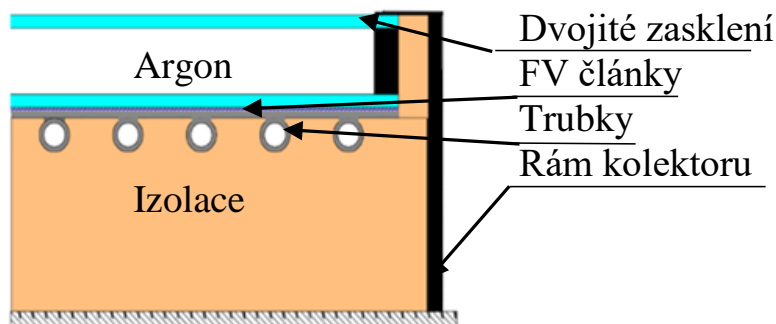
Dosud bylo vyvinuto několik prototypů zasklených i nezasklených kapalinových FVT kolektorů, některé z nich jsou běžně dostupné na evropském trhu. Nevýhodou současných zasklených kapalinových FVT kolektorů je omezená teplotní odolnost běžné etylenvinylacetátové (EVA) laminace. Deklarovaná odolnost EVA laminace je zpravidla do 85 °C. Vyšší teploty způsobují degradaci, termický rozklad a korozi kontaktů FV článků v kyselém prostředí laminátu [8]. Zároveň degradace snižuje i propustnost laminační vrstvy. Výzkum se proto ubírá směrem k nalezení vhodného řešení snížení tepelných ztrát FVT kolektoru během stagnace, nebo k využití teplotně odolných materiálů pro nahrazení EVA laminace. Teplota stagnace pro zasklený FVT kolektor se může pohybovat okolo 150 °C.

Příspěvek popisuje matematický model zaskleného kapalinového FVT kolektoru, na základě kterého je možné analyzovat a optimalizovat konstrukci kolektoru. Matematický model byl implementován do simulačního prostředí TRNSYS jako nová komponenta. Simulace zaskleného kapalinového FVT kolektoru lze v prostředí TRNSYS provést pomocí komponenty type 50b [7]. Model je však značně zjednodušený, součinitel tepelné ztráty kolektoru uvažuje konstantní. Dále jsou v příspěvku prezentovány výsledky měření hybridních kolektorů na experimentální instalaci.

PROTOTYP HYBRIDNÍHO KOLEKTORU

V rámci vývoje a výzkumu hybridního zaskleného kapalinového FVT kolektoru v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) bylo vytvořeno několik prototypů. Všechny vyvinuté prototypy hybridních kolektorů spojuje použití technologie zalévání FV článků do polysiloxanového gelu. Nahrazení EVA laminace polysiloxanovým gelem s sebou přináší řadu výhod [6]. Gel je pružný a umožňuje kompenzovat teplotní roztažnost absorberu a FV článků. Gel vykazuje oproti EVA laminaci mírně vyšší propustnost slunečního záření, zásadní výhodou polysiloxanového gelu jako zapouzdřovacího materiálu je však teplotní odolnost v rozsahu -50 až 250 °C.

Dosud bylo vytvořeno několik variant prototypů FVT kolektorů s různými typy absorberů a odlišnými povlaky na zasklení. Byla provedena optimalizace konstrukce podle výsledků ročních simulací solárního systému s FVT kolektory [4]. Sledoval se vliv některých konstrukčních parametrů (tloušťka izolace, povlak na FVT absorberu) na energetický přínos FVT kolektoru. Z energetického hlediska byla vybrána konstrukce kolektoru skládající se z dvojitého zasklení (24 mm mezera mezi zasklením), měděného trubkového registru (rozteč trubek 50 mm), izolace (30 mm na zadní straně) a rámu, viz Obr. 1.



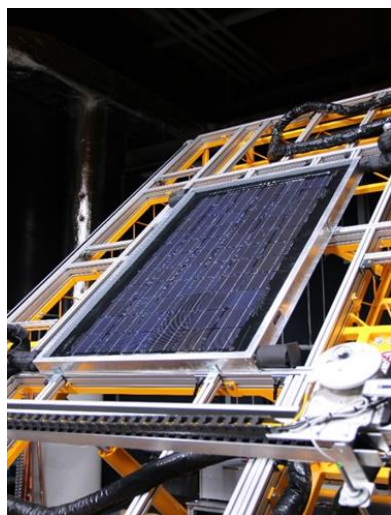
Obr. 1 Prototyp zaskleného hybridního FVT kolektoru

V počátcích vývoje bylo pro prototypy hybridních kolektorů s nízkoemisivním povlakem využito komerčně dostupné dvojité zasklení s nízkoemisivním povlakem, díky kterému byly sníženy tepelné ztráty sáláním z absorberu do okolí. Nevýhodou komerčně dostupných zasklení s nízkoemisivním povlakem je nízká sluneční propustnost slunečního záření, zejména pak v oblasti blízkého infračerveného záření. Pro zatím poslední prototyp FVT kolektoru bylo využito dvojité zasklení s nízkoemisivním povlakem vysoce propustným ($\tau = 0,86$) v celém spektru slunečního záření s emisivitou 0,3 vyvinutým ve výzkumném institutu v Německu [2]. Analýza v tomto příspěvku se věnuje pouze **neselektivnímu zasklenému FVT kolektoru**.

MODEL ZASKLENÉHO KAPALINOVÉHO FVT KOLEKTORU

Matematický model zaskleného kapalinového FVT kolektoru byl vytvořen podle teoretického popisu popsaného v [1]. Detailní popis matematického modelu implementovaného do simulačního prostředí TRNSYS jako nový type 223 je popsán v [3]. Funkce FVT kolektoru lze popsat energetickou rovnováhou, která se stanoví na základě dopadajícího slunečního záření, které je částečně odraženo od zasklení a absorbérů, zbytek se pohlcuje na povrchu FV článků a mění se v tepelnou a elektrickou energii. Část tepla, která se neodvedla teplonosnou kapalinou, se akumuluje v těle kolektoru nebo odchází do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát. Vnější energetická bilance FVT kolektoru řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbérů vodivě spojeného s chladicím registrem do okolí. Vnitřní energetická bilance řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbérů do teplonosné kapaliny.

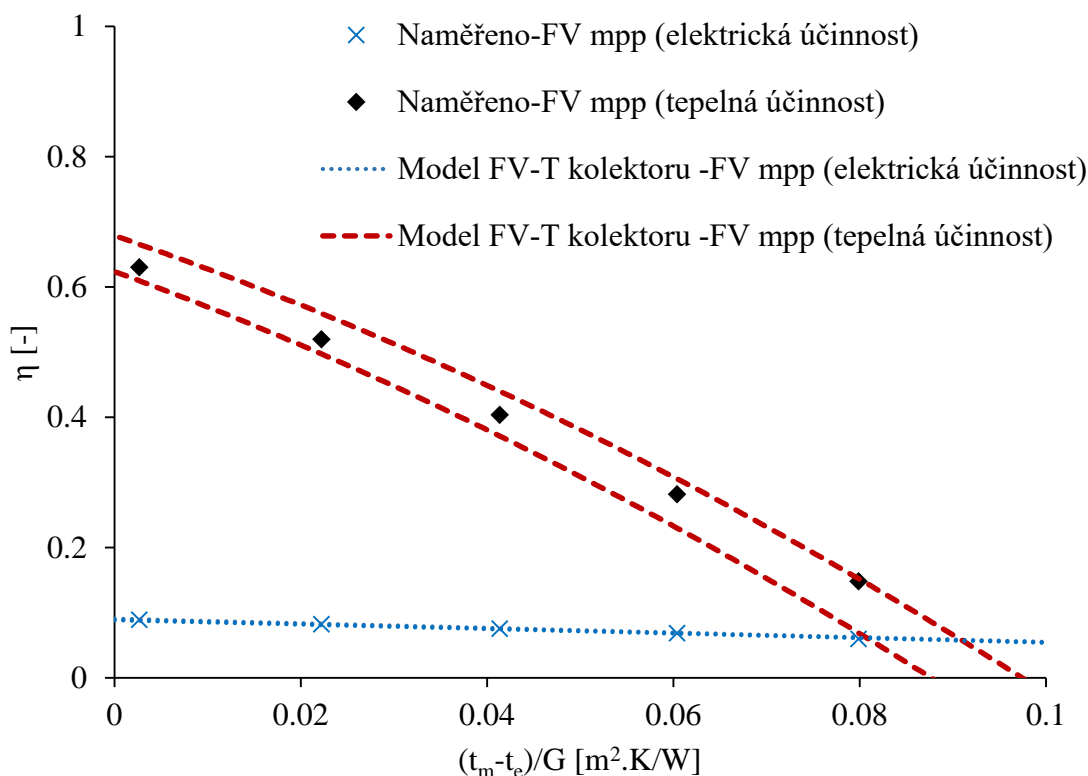
Validace matematického modelu FVT kolektoru byla provedena na solárním simulátoru v UCEEB ČVUT (viz Obr. 2). Výsledky simulace byly porovnány s experimentálně určenou křivkou tepelné a elektrické účinnosti. Experimentální ověření bylo provedeno podle EN ISO 9806. Experimentální měření bylo provedeno ve dvou variantách, s otevřeným (bez odběru elektrické energie) a uzavřeným elektrickým okruhem (s odběrem elektrické energie). V příspěvku je uvedena validace s uzavřeným elektrickým okruhem. Výsledky validace bez odběru elektrické energie jsou obdobné.



Obr. 2 Testovaný prototyp zaskleného FVT kolektoru v solární laboratoři UCEEB (vlevo) a v experimentální instalaci na střeše Fakulty strojní (vpravo) ČVUT v Praze

Experimentální měření bylo provedeno se sledovačem maximálního bodu výkonu (mpp) FV části kolektoru. Okrajové podmínky pro měření byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 931 W/m^2 , hmotnostní průtok 123 kg/h , sklon kolektoru 45° , okolní teplota 17°C . Na obr. 3 jsou vyneseny křivky tepelné a elektrické účinnosti stanovené experimentem a na základě modelu FVT kolektoru. Křivky elektrické a tepelné účinnosti uvedeny na obr. 3 jsou vztaženy k celkové ploše kolektoru. Pro křivky tepelné a elektrické účinnosti stanovené na základě matematického modelu je vyneseno pásmo nejistoty modelu. Meze byly stanoveny z nejistot vstupních parametrů, například nejistota hodnoty tepelné vodivosti izolace, pro kterou není známa měřená hodnota, může být až 10 %. Na druhé straně nejistota vlastností zasklení (propustnost) a absorbérů (emisivita) je podle podkladů dodavatele známá a činí okolo $\pm 2\%$. Každý z parametrů má rozdílný vliv na křivku tepelné a elektrické účinnosti. Pro každou simulaci kombinace zadání parametrů v mezích rozsahu vyplývá jedna křivka (viz Obr. 3). V ploše mezi dvěma mezními obalovými křivkami (čárkované čáry) se potom pro validaci musí nacházet naměřená data. Na obr. 3 je patrné, že křivka elektrické účinnosti výrazně na

těchto parametrech nezávisí, rozsah mezních variant je nepatrný. Z výsledků validace lze vyplývá, že měřené body leží v daných mezích modelu a matematický model FVT kolektoru umožňuje reprezentovat testovaný kolektor. Je však nutné uvést, že model neuvažuje vliv difúzního slunečního záření nebo vliv tepelné setrvačnosti kolektoru (testy byly provedeny pro stacionární podmínky, solární simulátor). V další kapitole bude provedeno porovnání i pro tepelný a elektrický výkon za reálných podmínek.



Obr. 3 Křivky tepelné a elektrické účinnosti testovaného FVT kolektoru

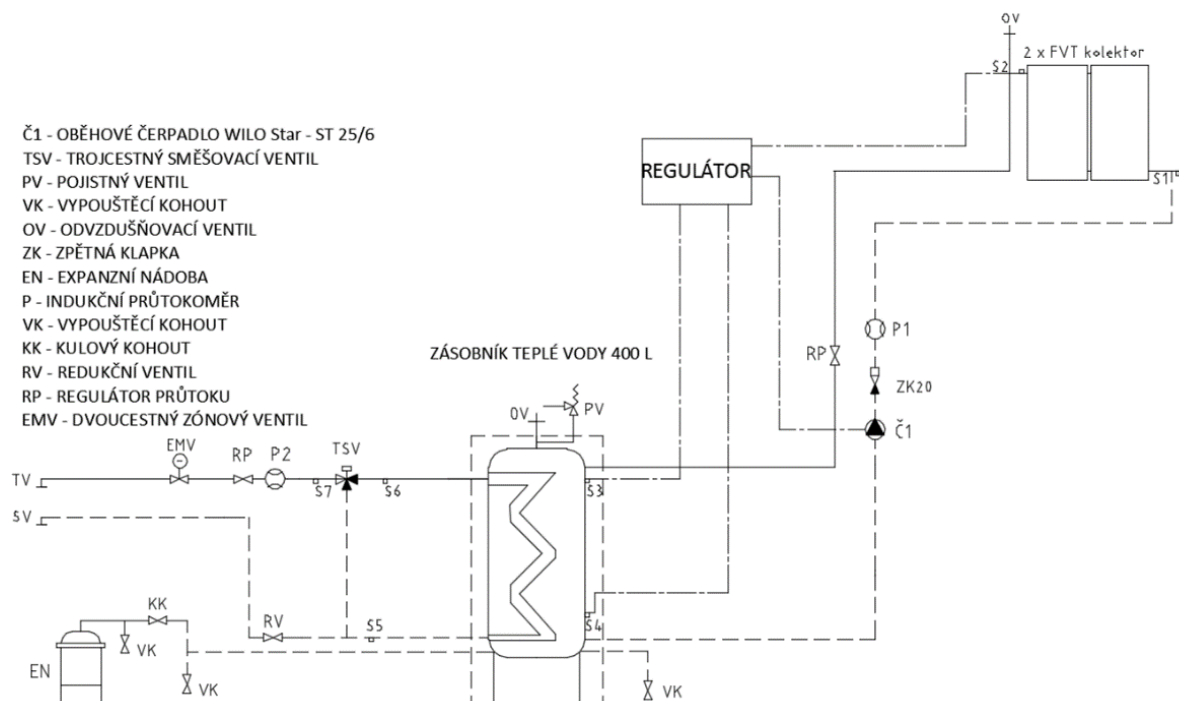
Kromě toho byl proveden test elektrické části FVT kolektoru. Měření bylo provedeno při standardních testovacích podmínkách dané normou ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, AM1,5). Měření voltampérové charakteristiky FV modulu bylo provedeno na FEL ČVUT. Výsledky měření jsou následující: $U_{OC} = 40,7 \text{ V}$, $I_{SC} = 5,1 \text{ A}$, $U_{MPP} = 31,4 \text{ V}$, $I_{MPP} = 4,81 \text{ A}$, $P_{MPP} = 151 \text{ W}$, $\eta_{STC} = 8,8 \%$ (účinnost je vztažena k hrubé ploše $1,71 \text{ m}^2$, FV články zaujímají pouze 60 % hrubé plochy kolektoru).

SOLÁRNÍ SOUSTAVA S HYBRIDNÍMI KOLEKTORY

V rámci vývoje pokročilých FVT kolektorů byl vytvořen funkční vzorek experimentální solární soustavy pro přípravu teplé vody [5], na kterém lze hybridní FVT kolektory testovat za reálných podmínek. Účelem instalace testovací trati je zkoušení prototypů hybridních kolektorů za proměnlivých klimatických podmínek a vyhodnocení jejich potenciálního přínosu pro domácnost ve srovnání s konvenčním provedením solární soustavy. Testovací trať lze využít i pro validaci modelu FVT kolektoru za reálných podmínek.

Dva hybridní kolektory instalované na střeše Fakulty strojní ČVUT v Praze (viz Obr. 2) produkují jak tepelnou energii, která se ukládá v zásobníku teplé vody, tak elektrickou energii, kterou se nabíjí dvě baterie. Vnitřním okruhem (Obr. 4 a 6) je simulován odběr teplé vody v domácnosti. Elektromagnetický ventil instalovaný na vnitřním okruhu otevírá okruh pro přípravu teplé vody podle zvoleného odběrového profilu. Jsou zde instalována teplotní

čidla (S1 až S7) a průtokoměry (P), díky kterým je možno vyhodnotit celkový přínos solární soustavy s FVT kolektory.



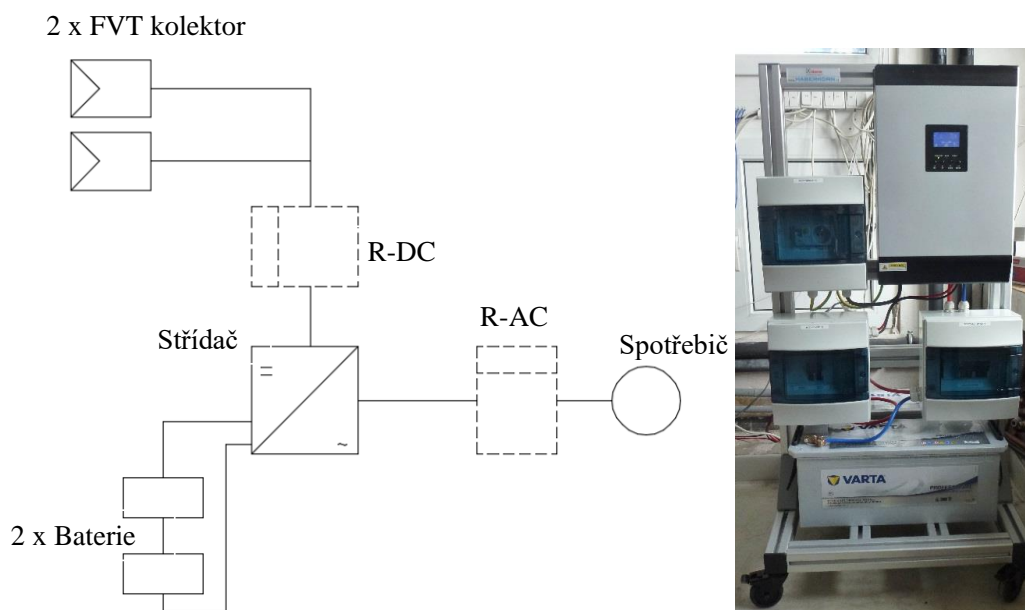
Obr. 4 Schéma zapojení tepelné části

Solární soustava je určena pro přípravu teplé vody v centrálním zásobníku tepla (400 l), ve kterém jsou instalovány paralelně dva trubkové výměníky. Celý objem zásobníku slouží jako akumulace ohřáté vody z FVT kolektorů. Hybridní kolektory jsou propojené se zásobníkem napřímo, což v praxi není zvykem. Hlavním účelem instalace bylo otestovat kolektory za reálných podmínek. Solární soustavu tvoří dva zasklené kapalinové FVT kolektory (celková plocha je 3,42 m²), základní ovládací prvky (oběhové čerpadlo, uzavírací a pojistné armatury, snímače teploty a tlaku) a potrubní rozvody s tepelnou izolací. Solární kolektory jsou instalovány na kovové konstrukci s orientací na jih se sklonem 45°. Průtok teplotonosné látky solární soustavou je 180 l/hod a je nastaven na seřizovacím ventilu. Provoz solární soustavy je ovládán centrálním regulátorem. Regulace pracuje na základě porovnávání teploty v zásobníku tepla (čidlo S4) a kolektoru (čidlo S2). Regulátor sepne oběhové čerpadlo, pokud teplota v kolektorech dosáhne hodnoty vyšší než v zásobníku o nastavený teplotní rozdíl. Zároveň regulátor umožňuje měnit otáčky oběhového čerpadla. Při překročení nastavené maximální teploty zásobníku, případně pokud je na snímači teploty kolektorů překročena hodnota 130 °C, je oběhové čerpadlo vypnuto.

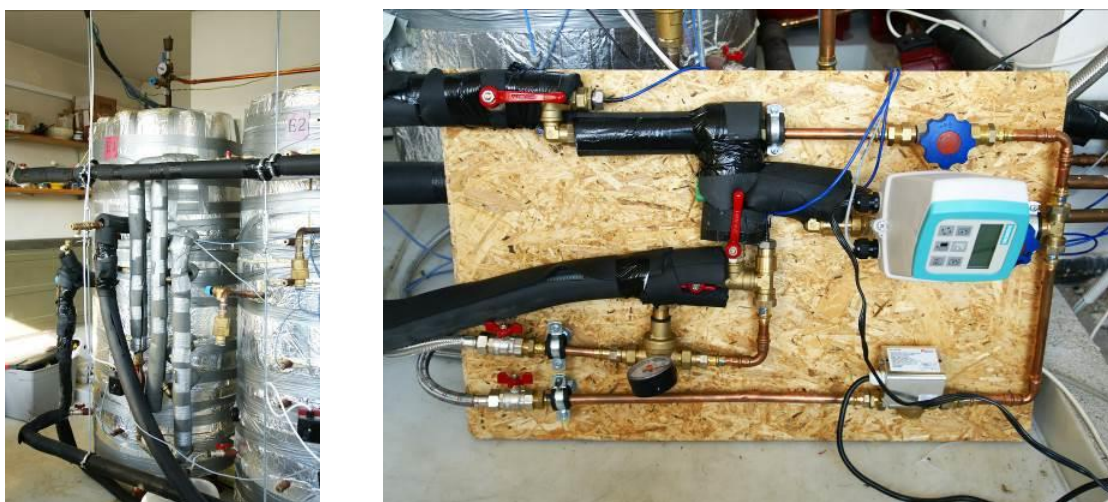
FVT kolektory byly elektricky zapojeny do série na hybridní střídač s instalovaným sledovačem maximálního bodu výkonu (viz obr. 6). Elektrická energie z akumulátorů je odebírána kontinuálně, aby nedošlo k odstavení odběru elektrické energie z FVT kolektorů z důvodu plného nabití akumulátorů.

Odběr teplé vody byl uvažován 200 l/den s nastaveným průtokem 5 l/min. Profil odběru teplé vody byl nastaven ve čtyřech periodách v průběhu dne v délce 5 až 10 minut. Termostatický směšovací ventil byl nastaven na požadovanou teplotu 50 °C. Dohřev teplé vody nebyl uvažován, aby bylo možné monitorovat konkrétní přínos FVT kolektorů do zásobníku teplé vody. Vzhledem ke skutečnosti, že teplota za termostatickým směšovacím ventilem v monitorovaném období nepřesáhla teplotu 50 °C, byl tepelný zisk soustavy se zasklenými

neselektivními FVT kolektory stanoven na základě tepla dodaného do odběru za směšovací ventilem.



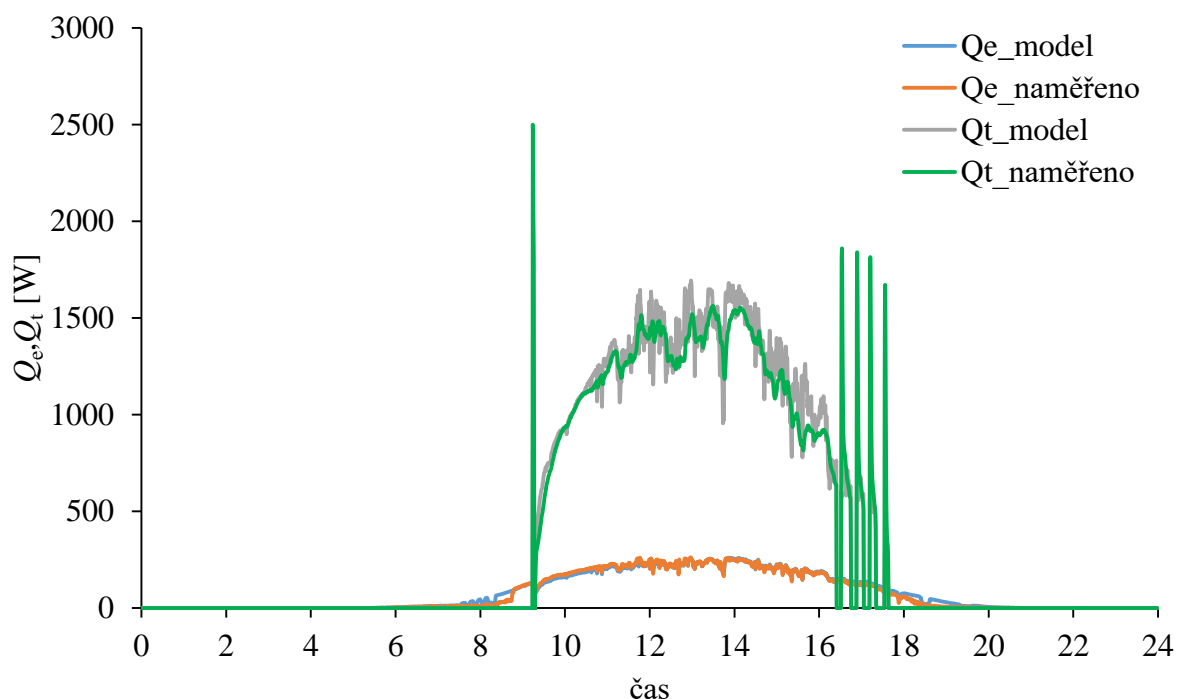
Obr. 5 Schéma zapojení elektrické části včetně fotografie



Obr. 6 Zapojení pro simulaci odběru teplé vody

POROVNÁNÍ SIMULACE S REÁLNÝMI ZISKY

Analýza naměřených dat byla provedena pro 5 dní od 19. 5. 2016 do 23. 5. 2016. Přestože se nejedná o typickou solární soustavu odpovídající běžné praxi, pro otestování funkčnosti nových prototypů FVT kolektorů je experimentální zařízení dostačující. Na Obr. 8 je vyneseno porovnání průběhu naměřeného a experimentálně stanoveného tepelného a elektrického výkonu během jasného dne. Pro validaci modelu za reálných podmínek byly vybrány pouze dva dny, kdy nedocházelo k častému spínání čerpadla během dne. Rozdíl mezi naměřeným a teoretickým tepelným výkonem ve chvíli, kdy sepne čerpadlo je značný, neboť matematický model zatím neuvažuje tepelnou setrvačnost kolektoru (viz výkonové špičky při spouštění čerpadla na Obr. 8). Období pro validaci modelu bylo uvažováno od 10.00 do 16.00, aby nebyl brán v úvahu nárůst tepelného výkonu vlivem cyklování oběhového čerpadla.



Obr. 8 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne (22.5.2016)

Srovnání simulace s naměřenými daty je uvedeno v Tab. 1. Odchylka teoretického denního elektrického zisku od naměřeného byla maximálně 1,5 %, v případě denního tepelného zisku 4,4 %.

Tab. 1 Srovnání modelu s naměřenými daty za zkrácené období 6 hodin (pro plochu 3,42 m²)

Datum	Q _{e, model} [kWh]	Q _{e, naměřeno} [kWh]	Q _{t, model} [kWh]	Q _{t, naměřeno} [kWh]
22. 5. 2016	1,29	1,31	7,94	7,60
23. 5. 2016	1,01	1,01	5,21	5,30

V Tab. 2 jsou uvedena naměřená data s experimentálního měření po dobu pěti dnů. Byl měřen tepelný a elektrický výkon FVT kolektoru, dále pak odebraná energie ze zásobníku. Na základě potřeby energie na přípravu teplé vody a reálně odebrané energie bylo možné stanovit solární pokrytí, viz Tab. 2.

Tab. 2 Naměřená data na solární soustavě s FVT kolektory (pro plochu 3,42 m²)

Datum	Q _{e, naměřeno} [kWh/den]	Q _{t, naměřeno} [kWh/den]	Q _{s, naměřeno} [kWh/den]	Q _{p, TV} [kWh/den]	Q _{dod, TV} [kWh/den]	Solární pokrytí
19. 5. 2016	1,2	5,8	17,4		2,5	36 %
20. 5. 2016	1,2	5,0	16,6		2,9	41 %
21. 5. 2016	1,4	6,5	19,3	7	3,3	50 %
22. 5. 2016	1,8	9,0	24,3		4,1	59 %
23. 5. 2016	1,2	5,8	16,7		4,2	60 %

ZÁVĚR

Bylo zkonstruováno dva prototypy zaskleného neselektivního FVT kolektoru, které byly nasazeny v experimentální instalaci solární soustavy pro účely ohřevu vody. Tepelné a elektrické chování zaskleného FVT kolektoru v reálných podmínkách mělo sloužit k ověření validovaného matematického modelu a analýze využití FVT kolektorů v typické aplikaci. Monitoring instalace pokračuje a bude sloužit zejména pro vývoj komplexního modelu FVT kolektoru, který bude odpovídat realitě. Model v současné době neodpovídá naměřeným datům zejména v období cyklování oběhového čerpadla v ranních a večerních hodinách. Rozšíření modelu o difúzní člen a tepelnou setrvačnost bude předmětem další práce.

LITERATURA

- [1] FLORSCHUETZ, W. L. Extension of the Hottel-Whilier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collector. *Solar energy*, vol. 22, pp. 361-366, 1979.
- [2] GIOVANNETTI, F., FOSTE, S., EHRMANN, N., ROCKENDORF, G., High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance, *Solar energy*, vol. 104, pp. 52-59, 2014.
- [3] POKORNÝ N., MATUŠKA T., *TRNSYS Type 223 V0.1 - Model of glazed liquid photovoltaic-thermal solar collector based on detailed construction parameters and energy balance*, Software, 2015.
- [4] POKORNÝ N., MATUŠKA T., ŠOUREK B., Modelling of glazed liquid PV-T collector with use of detail model, in Proceedings of the Building Simulation International Conference (BS '15), Hyderabad, India, 2015.
- [5] POKORNÝ N., MATUŠKA T., Solární soustava pro přípravu teplé vody s fotovoltaicko-tepelnými kolektory, *Funkční vzorek*, 2015.
- [6] POULEK, V., STREBKOV, D. S., PERSIC, I. S., LIBRA, M., Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology, *Solar energy*, vol. 86, pp. 3013-3108, 2012.
- [7] TRNSYS Manual, 2006. TRNSYS 16 a TRaNsient SYstem Simulation program. In: *Mathematical Reference*, vol. 5. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison.
- [8] ZONDAG, H. A., VAN HELDEN W. G. J.: Stagnation temperature in PVT collectors, *PV in Europe*, Rome (Italy), 2002.

SEZNAM OZNAČENÍ

Q_s	denní dávka dopadlé sluneční energie	[kWh]
$Q_{dod,TV}$	energie dodaná do systému	[kWh]
Q_e	elektrický zisk FVT kolektoru	[kWh]
$Q_{p,TV}$	potřeba tepla pro přípravu teplé vody	[kWh]
Q_t	tepelný zisk FVT kolektoru	[kWh]
η_e	elektrická účinnost	[-]
η_t	tepelná účinnost	[-]

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT. Část týkající se simulace odběru teplé vody byla řešena v rámci projektu SGS16/212/OHK2/3T/12.

EXPERIMENTÁLNE POROVNANIE VÝKONU SOLÁRNEHO VÁKUOVÉHO TRUBICOVÉHO KOLEKTORA S KONŠTRUKČNÝM PRVKOM NA BÁZE PENOVÝCH KOVŮ

Radim Rybár, Martin Beer

Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Slovensko
radim.rybar@tuke.sk, martin.beer@tuke.sk

ANOTÁCIA

Príspevok sa zaoberá experimentálnym porovnaním tepelného výkonu vákuového trubicového solárneho kolektora s autormi vyvinutým zberačom na báze penových kovov (MF) a kolektorom so zberačom štandardnej konštrukcie. Dáta použité pri porovnávaní boli získané skúšobnou súbežnou prevádzkou dvoch navzájom prepojených solárnych systémov v Centre obnoviteľných zdrojov energie, Košice, Slovensko počas mesiacov apríl a máj pri rôznych poveternostných a klimatických podmienkach. Navrhnutý zberač kolektora s konštrukčným prvkom na báze penových kovov čiastočne odstraňuje niektoré nedostatky štandardných zberačov zmenou vedenia prúdu k jednotlivým kondenzátorom, zmenšením vnútorného kvapalinového objemu a zavedením nového prvku v podobe teplovýmennnej komory z MF, ktorá zväčšuje teplovýmennú plochu kondenzátora. Prezentované dáta tvoria výber zo súboru uskutočnených meraní, počas ktorých takto upravený kolektor vykazoval zvýšenie výkonu približne o 25% a zníženie tepelnej zotrvačnosti kolektora pri zmene intenzity insolácie absorpčnej plochy kolektora čo viedlo k celkovému zlepšeniu funkcie solárneho systému.

ÚVOD

Tepelná trubica je konštrukčne jednoduché zariadenie bez pohybujúcich sa častí, ktoré dokáže efektívne transportovať veľké množstvo tepla na relatívne veľké vzdialenosti bez externého energetického zdroja [1]. Využitie tepelných trubíc je rozšírené v chladiarenských aplikáciách, solárnej technike či v elektrotechnike [2]. Využitie tepelných trubíc v solárnej tepelnej technike predstavujú aplikácie v podobe solárnych vákuových trubicových kolektorov. Solárne vákuové trubice sú zložené z tepelnej trubice, absorbéra slnečného žiarenia a sklenenej vonkajšej trubice. Tepelná izolácia je tvorená vákuom v celom objeme solárnej vákuovej trubice, alebo vákuom medzi vonkajším a vnútorným zasklením dvojplášťovej sklenenej trubice.

Solárne vákuové trubicové kolektory sú v súčasnosti technicky najdokonalejším spôsobom konverzie slnečného žiarenia na využiteľné technické teplo, čo dokazuje jednak ich značné nasadenie v praxi tak aj ich porovnanie s kolektormi s plochými absorbérmi, kde môže byť v niektorých aplikáciách ich energetický zisk podľa [3], [4] vyšší až o 63 % oproti kolektorom s plochým absorbérom. V porovnaní so solárnymi kolektormi s plochými absorbérmi s registrom, sa vyznačujú konštrukčne jednoduchším hydraulickým okruhom, ktorý má nižšiu tlakovú stratu a taktiež redukuje nežiaduce účinky stagnačného prehrievania solárneho kolektora. Využívanie tepelných trubíc pri transformácii slnečnej energie pomocou solárnych vákuových trubicových kolektorov predstavuje konštrukčne jednoduchší a ekonomicky výhodnejší spôsob prevádzky.

ZBERAČ SOLÁRNEHO VÁKUOVÉHO TRUBICOVÉHO KOLEKTORA

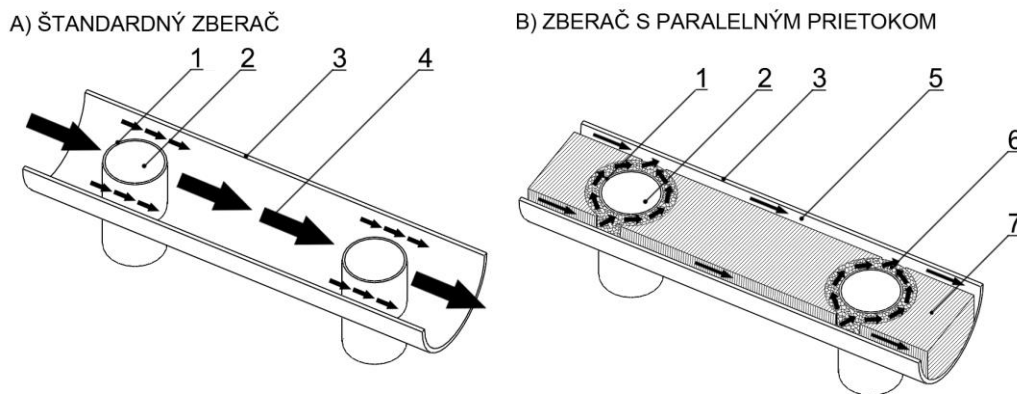
Pri komerčne dostupných zberačoch môže byť teplo z absorbérov vákuových trubíc solárnych kolektorov odvádzané do teplonosnej kvapaliny priamo U potrubím, alebo prostredníctvom

tepelnej trubice. Kondenzátory trubíc môžu byť zasunuté do zberača priamo (mokré spojenie), alebo prostredníctvom puzdier kondenzátorov (suché spojenie). V doteraz známych konštrukciách zberačov sú jednotlivé puzdra kondenzátorov hydraulicky zapojené sériovo za sebou. Z pohľadu podmienok prenosu tepla je každé puzdro kondenzátora v kontakte s teplotou kvapaliny s inou teplotou, čo znamená, že každá trubica má iný tepelný výkon a účinnosť. Ak sa posúdi priebeh ohrevu vákuového trubícového kolektora v smere od vstupu teplotnej kvapaliny do zberača smerom k výstupu, tak teplota kvapaliny postupne narastá. Nárast teploty teplotného média pozostáva z parciálnych prírastkov teplôt, ktorých veľkosť sa v smere k výstupu zo zberača postupne znižuje. To súvisí so znižujúcim sa teplotným spádom medzi teplotou kondenzátora trubice a teplotou teplotnej kvapaliny a faktom, že účinnosť solárneho absorbéra klesá nepriamo úmerne s nárastom teplotného gradientu.

Jednotlivé trubice počas celej doby prevádzky pracujú pri iných teplotách, čím dochádza k ich nerovnomernému opotrebovaniu (resp. namáhaniu). Pri autormi navrhnutom zberači s paralelným prietokom média je každý kondenzátor tepelnej trubice obmývaný teplotným médiom s rovnakou teplotou, z čoho vyplýva rovnaký teplotný prírastok a rovnaká účinnosť absorbéra.

Prezentovaný zberač vákuového trubícového solárneho kolektora s konštrukčným prvkom na báze MF bol navrhnutý za účelom eliminácie, v súčasnosti identifikovaných, konštrukčných nedostatkov a slabých miest existujúcich zberačov solárnych vákuových trubícových kolektorov (nerovnomerný odber tepla z kondenzátorov, relatívne veľký kvapalinový objem zberača, sériové zapojenie kondenzátorov a pod.). Predmetné riešenie čiastočne odstraňuje disproporcie sériového ohrevu zabezpečením rovnakých tepelnotechnických podmienok prevádzky trubíc. V návrhu sa uvažovalo s kombináciou nového hydraulického usporiadania a použitia pórovitých materiálov s rôznymi vlastnosťami (tepelné vodiče a izolanty). Podstatným evolučným znakom návrhu je spôsob vymedzenia prietokových kanálov kombináciou priepustných a nepriepustných penových materiálov za súčasného vzájomného tepelného oddelenia jednotlivých parciálnych výmenníkov tepla – konštrukčnej skupiny puzdier kondenzátorov.

Návrh vychádzal z cieľa dosiahnuť rovnomerný odber tepla z kondenzátorov a zároveň zväčšiť teplotnú plochu použitím penového kovu a tým zlepšiť transfer tepla do teplotnej kvapaliny. Novým konštrukčným prvkom tvoreným penovým kovom sú teplotné komory obklopujúce puzdra kondenzátorov. Tieto umožňujú uskutočňovať výmenu tepla v celom svojom objeme. V súčasných zberačoch predstavujú puzdra kondenzátorov sériovo zapojené miestne hydraulické odpory, čím tlaková strata v zberači postupne narastá. Pri použití teplotných komôr tvorených penovým kovom by došlo k významnému nárastu hydraulického odporu zberača, preto sa pri návrhu uvažovalo s ich paralelným zapojením. Pri paralelnom zapojení pracujú všetky trubice pri rovnakej teplote a s rovnakou účinnosťou. Z pohľadu hydraulického je prúd teplotnej kvapaliny rozdelený na parciálne prúdy pre každú jednotlivú teplotnú komoru. Základné časti zberača s paralelným prietokom s konštrukčným prvkom na báze penového kovu (B) a jeho porovnanie so štandardnou konštrukciou (A) je zobrazené na Obr. 1, ktorý zároveň zjednodušenou grafickou formou zobrazuje jeho základné časti (1 - puzdro kondenzátora tepelnej trubice, 2 - kondenzátor tepelnej trubice, 3 - telo zberača, 6 - teplotná komora z penového kovu, 7 - hydrofóbne izolačné piliere) a smer a členenie prúdenia teplotného média v zberači (4 - zjednodušené zobrazenie prúdenia teplotného média v štandardnom zberači, 5 - zjednodušené zobrazenie prúdenia teplotného média v zberači s paralelným prietokom).

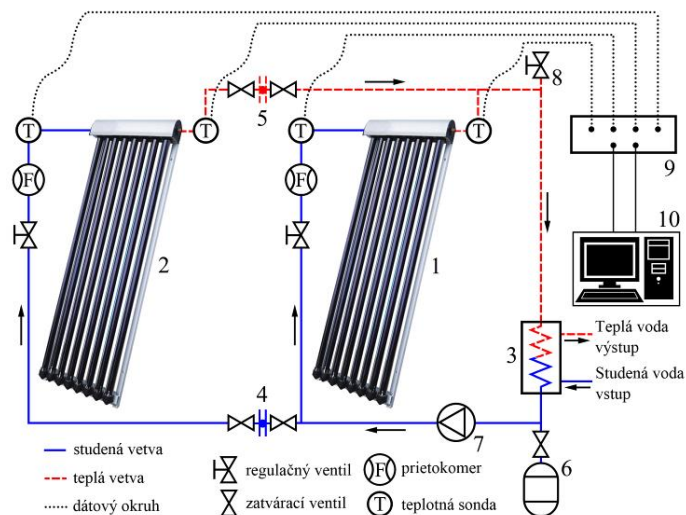


Obr. 1 Porovnanie rozdielu v komponentovej skladbe štandardného zberača a zberača s paralelným prietokom s teplovýmennými komorami z penového kovu

Teplovýmenná komora kondenzátora solárnej vákuovej trubice je vyhotovená z penového kovu s otvorenou štruktúrou pórov, ktorá umožňuje voľné prúdenie média. V tepelnej technike nachádzajú uplatnenie najmä v oblasti tepelných výmenníkov, kde sa v súčasnosti do popredia dostávajú práve tepelné výmenníky vyhotovené z penových kovov [5],[6]. Výhodnosťou použitia penových kovov ako teplovýmennnej plochy sa zaoberali viaceré štúdie [7],[8], ktoré potvrdili vysokú účinnosť teplovýmenného procesu v samotnej štruktúre, ktorou prúdi teplonosné médium. Špecifická plocha penového kovu, teda plocha, ktorá sa zúčastňuje na teplovýmennom procese medzi prúdiacim médiom a penovým kovom môže mať pri rôznych konfiguráciách penového kovu od 500 do 10 000 m².m⁻³ [9]. Pórovitosť penového kovu, pomer voľného priestoru k objemu pevnej látky, dosahuje hodnoty v intervale 0,3 až 0,95, to znamená použitie malého objemu základného materiálu, teda kovu v teplovýmennnej komore, ktorá je väčšou časťou tvorená prázdny priestorom. To znamená znižovanie spotreby samotného základného (primárneho) materiálu pri súčasnom zvýšení jeho schopnosti vymieňať teplo s okolitým prostredím. Matrica penového kovu je pri aplikáciách v tepelnej technike vyrobená najčastejšie z vysoko teplo vodivého kovu, napr. hliníka alebo medi, tá svojou prítomnosťou v objeme prúdiaceho média zvyšuje jeho tepelnú vodivosť.

METODIKA

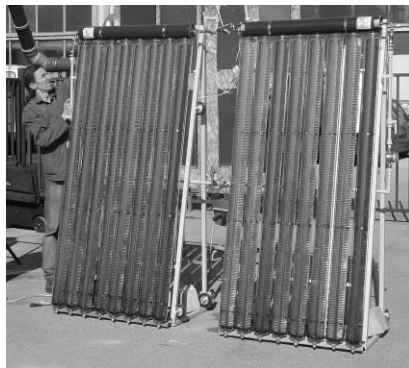
Autormi navrhnutý a zhotovený zberač s konštrukčným prvkom na báze penového kovu bol súčasťou solárneho kolektora SEIDO 1-8 výrobcu Sunda Solar, kde nahradil výrobcom dodávaný zberač. Ako porovnávací solárny kolektor slúžil rovnaký kolektor SEIDO 1-8, ale s výrobcom dodávaným štandardným zberačom. V ďalšom texte bude táto dvojica kolektorov označovaná ako SK-1 (STAND) a SK-2 (MF), tieto solárne kolektory majú zhodnú absorbnú plochu 2,23 m² a zhodný typ vákuových tepelných trubíc, líšia sa iba v použitých zberačoch. Oba kolektory (so štandardným zberačom, resp. so zberačom na báze penových kovov) boli súčasťou experimentálneho solárneho systému, ktorý umožňoval ich súbežnú prevádzku. Súbežná prevádzka zabezpečila rovnaké insolačné podmienky, ale aj klimatické a poveternostné podmienky v celom procese merania. Experimentálny solárny systém bol inštalovaný v Centre obnoviteľných zdrojov energie v Košiciach, Slovensko a prevádzkovaný počas mesiacov apríl a máj. Obr. 2 znázorňuje experimentálny merací systém, ktorý pozostával z dvojice posudzovaných solárnych kolektorov (1) a (2), nosnej konštrukcie a hydraulického okruhu, ktorý bol pre tento účel navrhnutý a zostavený. Solárne kolektory mali počas všetkých meraní sklon 75° a smerovali na juh (sklon bol daný priestorovým obmedzením Centra obnoviteľných zdrojov energie).



Obr. 2 Schematický diagram experimentálnej meracej aparatúry s vyznačenou polohou teplotných sond a základnými konštrukčnými časťami

Hydraulický systém experimentálnej solárnej sústavy je zložený z rozvodu teplonosného média, elektrického obehového čerpadla (7), expanznej nádoby (6), prietokomerov, regulačných a odvzdušňovacích ventilov (8), protiprúdneho špirálového výmenníka tepla (3), teplotných sond prepojených s dataloggerom (9) a PC (10). Vzhľadom k uľahčeniu manipulácie sa experimentálny systém skladal z dvoch prepojených častí, ktoré boli prepojené pomocou dvoch konštrukčných skupín (4)(5) skladajúcich sa zo sústavy uzatváracích a odvzdušňovacích ventilov.

Hydraulický okruh bol doplnený o meracie zariadenia v podobe štyroch teplotných sond a dvoch prietokomerov. Teplotné sondy KIMO TTKE-363 (type K, rozsah od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$) boli nainštalované pred a za zberačom v špeciálnom uložení pomocou metrického závitú M8. Účelom teplotných sond bolo zaznamenávanie rozdielu teplôt teplonosného média. Signál z teplotných sond bol zaznamenávaný pomocou zariadenia KIMO AMI 300 s dataloggerom, ktorý bol následne prepojený s osobným počítačom, kde bol výstup v podobe databázy ďalej spracovaný. Prietok teplonosného média bol sledovaný pomocou dvoch mechanických prietokomerov (pre každý zberač zvlášť). V rámci merania prietoku boli použité prietokomery SMART+ JS-02 s upraveným šrubeníím pre polypropylénové rúrky. Regulácia prietoku prebiehala pomocou jednopalcových regulačných ventilov.



Obr. 3 Experimentálny solárny systém v priestoroch Centra OZE, TU v Košiciach

Porovnanie tepelného výkonu solárnych vákuových trubicových kolektorov prebiehalo v jarných, resp. skorých letných mesiacoch počas kvázi dynamickej skúšky, s meniacimi sa

hodnotami teploty okolia, rýchlosti prúdenia vzduchu a intenzity slnečného žiarenia, od jasnej oblohy až po oblohu s rýchlo sa meniacou oblačnosťou. V rámci merania bolo vykonaných šesť 150 minútových meraní (s intervalom záznamu dát 10 s), ktorých reprezentatívna vzorka (TEST 1 - 4) je prezentovaná v tomto príspevku. Popisované solárne kolektory boli porovnávané pri rozdielnych hmotnostných prietokoch teplotného média. Ako základný hmotnostný prietok bola zvolená hodnota $0.033 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, ktorú za odporúčanú udáva výrobca kolektorov SUNDA SOLAR, v rámci testovania funkcie prototypu zberača boli ešte kolektory posudzované pri hmotnostnom prietoku polovičnom teda $0.016 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a takmer dvojnásobnom $0.061 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Ako teplotné médium bola použitá voda.

Za výstupný parameter porovnania predmetných kolektorov bol zvolený tepelný výkon kolektora SK-1(STAND) podľa rovnice (1) a výkon kolektora SK-2(MF) podľa rovnice (2). Vo finálnom vzťahu vystupujú hodnoty rozdielu teplôt (ΔT), hmotnostného prietoku (\dot{m}) a špecifickej tepelnej kapacity teplotného média (c).

$$P_{t_{MF}} = \dot{m}\cdot c\cdot\Delta t_S \quad (1)$$

$$P_{t_{MF}} = \dot{m}\cdot c\cdot\Delta t_{MF} \quad (2)$$

V procese merania boli zaznamenávané teploty teplotného média pred vstupom do zberača $t_{MF,I}$ (resp. $t_{S,I}$) a po výstupe zo zberača $t_{MF,O}$ (resp. $t_{S,O}$). Tieto teploty slúžili k určeniu nárastu teploty teplotného média Δt_{MF} , resp. Δt_S podľa rovnice (3) a (4).

$$\Delta t_{MF} = t_{MF,O} - t_{MF,I} \quad (3)$$

$$\Delta t_S = t_{S,O} - t_{S,I} \quad (4)$$

Hodnoty hmotnostného prietoku (\dot{m}) boli zaznamenávané pre každý test zvlášť, veľkosť špecifickej tepelnej kapacity bola určená s využitím korekčného teplotného faktora. Zohľadnenie nepresností meracích prístrojov a propagácie chyby do celkového výsledku hodnoty tepelného výkonu vzťahnutého na jednotkovú plochu absorbéra bolo vykonané pomocou Kline-McClintock metódy [10] podľa rovnice (5). V rámci tejto chyby bola zohľadnená nepresnosť teplotnej sondy, ktorá je podľa výrobcu $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ spolu s nepresnosťou zariadenia na úrovni $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim chybovosť výsledku bola presnosť odčítania a regulácie hmotnostného prietoku pomocou mechanického prietokomeru, suma týchto nepresností je podľa výrobcu stanovená na úrovni $\pm 5 \%$ z odčítanej hodnoty.

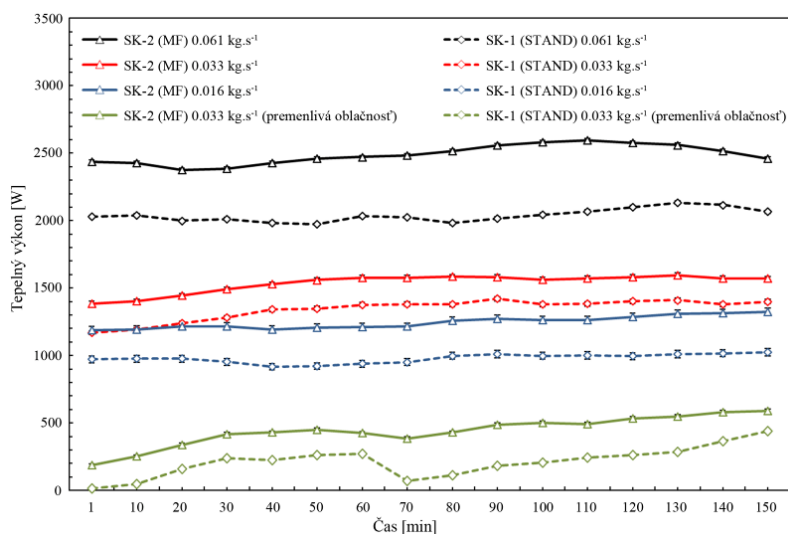
$$U_p = \sqrt{\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2} \times 100\% \quad (5)$$

Z výsledkov analýzy nepresností vyplýva, že priemerná chyba hodnoty tepelného výkonu vzťahnutého na jednotkovú plochu je $\pm 1.7 \%$ s maximálnou hodnotou $\pm 2.6 \%$. Kolektory neboli porovnávané z hľadiska výpočtu účinnosti solárneho zariadenia, keďže neboli jednoznačne definovateľné insolačné podmienky. Zohľadnením faktu, že účelom meraní bolo vzájomné porovnanie odlišných konštrukčných riešení zberačov pri zachovaní rovnakých ostatných častí kolektora (solárne vákuové trubice, izolácia a obal zberača atď.) a faktu, že okolité podmienky vplývali na oba kolektory rovnako, môžeme konštatovať, že prezentovaná forma merania bola pre daný účel vhodná. Pre dosiahnutie reprezentatívnych výkonových parametrov oboch zariadení, pre účel ich porovnania, sme zvolili vyššie popisovanú metódu využívajúcu súčasnú prevádzku oboch kolektorov a nie metódu porovnávania účinnosti zariadení, ktorá je determinovaná okolitými podmienkami, pretože ich dostatočné obsiahnutie

je náročnejšie na počet meraných veličín a ďalších operácií, ktoré v konečnom dôsledku môžu viesť k menšej presnosti dát.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Porovnanie kolektorov SK-1 (STAND) a SK-2 (MF) prebehlo porovnaním ich tepelného, ako najefektívnejšieho (najjednoduchšieho) spôsobu kvantifikovania prínosu popisovanej inovácie na celkové tepelné zisky. Prezentované výsledky predstavujú reprezentatívny výber zo všetkých uskutočnených meraní. Redukcia dát je vykonaná s cieľom zvýšenia zrozumiteľnosti výsledného porovnania. Pre účely kvantifikácie sú preto vyselektované štyri kompletne sety meraní označené ako TEST 1 až 4, ktoré boli uskutočnené pri rôznych klimatických podmienkach a s rôznymi použitými hmotnostnými prietokmi teplonosného média v solárnom okruhu.



Obr. 4 Porovnanie tepelného výkonu posudzovaných kolektorov pri rôznych hmotnostných prietokoch teplonosného média

Prvé meranie, označené ako TEST 1 bolo vykonané s najvyšším prietokom teplonosného média 0.061 kg.s⁻¹. Tento najvyšší prietok, takmer dvojnásobný oproti doporučenému optimálnemu prietoku výrobcom, bol zvolený s cieľom otestovať vyhotovený prototyp zberača aj za hranicou bežných prevádzkových podmienok. V tomto meraní dosahoval SK-2 (MF) vyššiu hodnotu tepelného výkonu oproti SK-1 (STAND), v priemere 2227 W oproti 1829 W, t.z. nárast výkonu bol o 18,2 %.

Druhé meranie, označené ako TEST 2, bolo vykonané s prietokom 0.033 kg.s⁻¹, ktorý predstavuje bežne využívaný prietok teplonosného média pre podobné typy solárnych kolektorov. V tomto meraní dosahoval SK-2 (MF) vyššiu hodnotu tepelného výkonu SK-1 (STAND), v priemere 1574 W oproti 1382 W, t.z. nárast výkonu bol 12,8 %

Tretie meranie, označené ako TEST 3, bolo vykonané s prietokom 0.016 kg.s⁻¹, ktorý predstavuje polovičnú hodnotu bežne využívaného a výrobcom doporučeného prietoku teplonosného média. V tomto meraní dosahoval SK-2 (MF) vyššiu hodnotu tepelného výkonu vzhľadom na jednotkovú plochu kolektora oproti SK-1 (STAND), v priemere 1256 W oproti 981 W, t.z. nárast výkonu bol o 21,8 %.

Štvrté meranie, označené ako TEST 4, zobrazuje prevádzku oboch kolektorov počas dňa s premenlivou intenzitou slnečného žiarenia spôsobenou zmenou veľkosti oblačnosti. TEST 4 bol vykonaný s prietokom 0.033 kg.s⁻¹. V celom trvaní merania dosahoval SK-2 (MF) vyššiu

hodnotu tepelného výkonu vzťahnutého na jednotkovú plochu kolektora oproti SK-1 (STAND), v priemere 455 W/m^2 oproti 222 W/m^2 , t.z. nárast výkonu bol o 51 %. Ako je aj z Obr. 4 možné odvodiť, interval merania začínal v čase keď intenzita slnečného žiarenia dosahovala

v dôsledku zväčšenej oblačnosti nižšie hodnoty, v takýchto podmienkach SK-1 (STAND) dosahoval nízke hodnoty tepelného výkonu, naopak SK-2 (MF) už aj v týchto nepriaznivých podmienkach dokázal dosahovať hodnoty vyššie. Po zvýšení intenzity slnečného žiarenia výkon oboch kolektorov rovnomerne stúpал až do doby kedy opäť intenzita slnečného žiarenia vplyvom oblačnosti klesla (v čase 75. minúty). Pri reálnej prevádzke solárnych systémov by v tomto momente došlo k odstaveniu obehového čerpadla, čo by spôsobilo zastavenie cirkulácie ochladeného teplotného média v solárnom systéme. Z tohto dôvodu došlo k manuálnemu odstaveniu obehového čerpadla aj v hydraulickom okruhu experimentálneho meracieho aparátu. Zastavená cirkulácia a nízka hodnota intenzity slnečného žiarenia spôsobili pokles výkonu oboch kolektorov. Výrazný rozdiel v poklese výkonu je spôsobený nielen nižšou počiatočnou teplotou teplotného média v kolektore SK-1 (STAND) ale najmä použitím teplovýmenných komôr z penového kovu v kolektore SK-2 (MF), ktorých naakumulované teplo dokáže udržať vyššiu teplotu teplotného média aj po znížení intenzity slnečného žiarenia, t.z. teplota teplotného média neklesne v takej miere ako je to pri kolektore SK-1 (STAND). Po opätovnom zvýšení intenzity slnečného žiarenia, a teda aj začatí cirkulácie teplotného média došlo k zvýšeniu výkonu oboch kolektorov, pričom rýchlejší nárast výkonu v prospech kolektora SK-2 (MF) je možné pripísať zmene vnútornej skladby zberača, ktorá je okrem iného charakteristická aj redukciou kvapalinového objemu zberača. Menší kvapalinový objem zberača dokáže pohotovejšie reagovať na zmeny insolácie kolektora vďaka nižšej hodnote tepelnej zotrvačnosti.

Z uvedených výsledkov je zrejmé, že solárny kolektor s inovovaným zberačom dosahoval vyššiu hodnotu tepelného výkonu v každom popisovanom meraní. Nárast výkonu z týchto štyroch prezentovaných reprezentatívnych meraní je v priemere $25.95 \% \pm 1.7 \%$ v prospech kolektora s autormi navrhnutým a vyhotoveným prototypom zberača s paralelným prietokom s konštrukčným prvkom na báze penového kovu. Tento nárast výkonu je spôsobený niekoľkými faktormi vyplývajúcimi z konštrukcie zberača a z použitých materiálov, menovite penového kovu. Po prvé, implementovanie teplovýmenných komôr z penového kovu zvyšuje teplovýmennú plochu medzi kondenzátorom tepelnej trubice a prúdiacim teplotným médium, t.z. plochu, cez ktorú sa uskutočňuje teplovýmenný proces. Po druhé, unikátna pórovitá štruktúra mení parametre prúdu z laminárneho prúdenia na turbulentné prúdenie, ktoré taktiež zvyšuje celkovú efektívnosť teplovýmenného procesu. Po tretie, tepelná akumulačná schopnosť penového kovu prispieva k zvyšovaniu teploty teplotného média v podmienkach nízkej hodnoty intenzity slnečného žiarenia. Po štvrté, použitie blokov z penového skla, ktoré vytvárajú prietokové kanály v rámci paralelného vedenia prúdu k jednotlivým kondenzátorom znižuje kvapalinový objem zberača, čo taktiež zvyšuje efektívnosť teplovýmenného procesu a v neposlednom rade zlepšuje prevádzkové podmienky celého kolektora. Prezentované merania preukázali funkčnosť novej koncepcie, resp. vyhotoveného prototypu zberača a jednoduchým spôsobom dokázali kvantifikovať jej prínos na celkové tepelné zisky kolektora.

ZÁVER

Navrhnutý zberač s paralelným prietokom s konštrukčným prvkom na báze penového kovu predstavuje nové technické riešenie, ktoré odstraňuje v súčasnosti identifikované nedostatky štandardných zberačov solárnych vákuových trubicových kolektorov, ktoré rieši zmenou vnútorného usporiadania jednotlivých častí zberača, čím sa zmenila nielen celková filozofia vedenia prúdu teplotného média k jednotlivým kondenzátorom vákuových tepelných

trubic, zo sériového na paralelné vedenie prúdu, ale aj celkový objem zberača. Zásadným prínosom tohto technického riešenia je vytvorenie teplovýmennej komory z penového kovu, ktorá zväčšuje teplovýmennú plochu kondenzátora. Pre overenie funkčnosti a kvantifikáciu prínosu tejto koncepcie bol navrhnutý experimentálny solárny systém, na ktorom prebiehalo porovnanie tepelného výkonu dvoch solárnych vákuových trubicových kolektorov, pričom jeden kolektor obsahoval štandardný zberač, druhý zberač s paralelným prietokom s konštrukčným prvkom na báze penového kovu. Experimentálna súbežná prevádzka kolektorov zabezpečovala rovnaké podmienky (klimatické podmienky, okolitá teplota, intenzita slnečného žiarenia) pre oba kolektory v celom procese merania, pri ktorom boli použité hmotnostné prietoky 0,016; 0,033 a 0,061 kg.s⁻¹. Merania sa uskutočňovali počas jasnej oblohy a pri oblohe s premenlivou oblačnosťou. Výsledky jednotlivých meraní preukázali funkčnosť koncepcie zberača s paralelným prietokom, ktorá sa odrazila na navýšení tepelného výkonu o približne 25 % voči kolektoru so štandardným zberačom, a znížením tepelnej zotrvačnosti tohto zberača. Navrhovaný zberač s paralelným prietokom je patentovo formou udelených dvoch úžitkových vzorov UV 6323[11] a UV 7002 [12].

LITERATÚRA

- [1] KALOGIROU, S. A. A review of heat pipe systems for heat recovery and renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (4): 2249 – 2259, 2012
- [2] HASSAN, H. An Experimental Study of Heat Pipe Performance Using Nanofluids. *International Journal of Green Energy*, 12 (3): 596 – 607, 2013
- [3] REAY, D., KEW, P. *Heat pipes – theory, design and applications*. Butterworth – Heinemann, 2006
- [4] YANG, X. et al. Recent developments of lightweight, high performance heat pipes. *Applied Thermal Engineering* 33–34: 1–14, 2012
- [5] OZMAT, B. et al. Thermal applications of open cell metal foams. *Materials and Manufacturing Processes* 19 (5): 839 – 862, 2004
- [6] BOOMSMA, K. Metal foams as compact high performance heat exchangers. *Mechanics of Materials* 35: 1161 – 1176, 2003
- [7] ZHAO, C.Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Volumetric Transfer* 55 (13-14): 3618 – 3632, 2012
- [8] KAVIANY, M. *Principles of heat transfer in porous media*. Springer, 1995
- [9] BHATTACHARYA, A. et al. Thermophysical properties of high porosity metal foams. *International Journal of Heat and Volumetric Transfer* 45 (5): 1017–1031, 2002
- [10] KLINE, S.J., McCLINTOCK, F.A. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*: 3–8, 1953
- [11] RYBÁR, R. et al. Zberač s paralelným prietokom. Úžitkový vzor ÚV 6323, 2014
- [12] RYBÁR, R. et al. Trapézový zberač s paralelným prietokom. Úžitkový vzor ÚV 7002, 2014

ZOZNAM OZNAČENÍ

c	merná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
t	teplota	[°C]
\dot{m}	hmotnostný prietok	[kg.s ⁻¹]
P_t	tepelný výkon	[W]
U_P	miera nepresnosti tepelného výkonu	[%]

OPTIMALIZACE TEPELNÉHO ČERPADLA

Jan Sedlár

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze
jan.sedlar@cvut.cz

ANOTACE

Na tepelná čerpadla jako moderní zdroje tepla pro přípravu teplé vody a vytápění jsou v současnosti právem kladeny vysoké nároky na provozní efektivitu. Té může být dosaženo nejen použitím kvalitních komponent a technickou optimalizací konstrukce tepelného čerpadla. Základem optimalizace je matematický model popisující chování tepelného čerpadla a určující nejvýhodnější měřené body pro měření ve zkušebně, tak aby provozní energetická efektivita naměřená a vypočtená v souladu s normou ČSN EN 14825 byla co nejvyšší.

ÚVOD

Tepelná čerpadla jsou stejně jako ostatní ohřívače vnitřních prostorů řazena do jednotlivých tříd energetické účinnosti podle Nařízení Komise 811/2013 [1]. Hodnocení závisí kromě jejich typu především na výpočtu sezónního topného faktoru $SCOP$ [-], který je určen výpočtem z naměřených hodnot podle ČSN EN 14825 [2]. Do výpočtu vstupuje několik proměnných ovlivňujících jak měření, tak následný výpočet. Výrobce (objednatel měření) stanovuje např. jmenovitý tepelný výkon P_{rated} [kW] (návrhovou tepelnou ztrátu objektu hrazenou tepelným čerpadlem), tomu odpovídající bivalentní teplotu t_{biv} [°C] nebo mezní provozní teplotu TOL [°C]. Výsledek měření a následných výpočtů lze tedy „optimalizovat“ pro maximální $SCOP$ a energetickou účinnost.

Tento příspěvek si klade za cíl ukázat pomocí matematického modelu tepelného čerpadla vliv nastavení teplot, návrhové hrazené tepelné ztráty a řízení výkonu pomocí modulace otáček kompresoru na $SCOP$ a sezónní energetickou účinnost η_s [-] tepelného čerpadla. Hodnocení bude provedeno jak pro tepelná čerpadla země-voda, tak i vzduch-voda pomocí zjednodušeného matematického modelu.

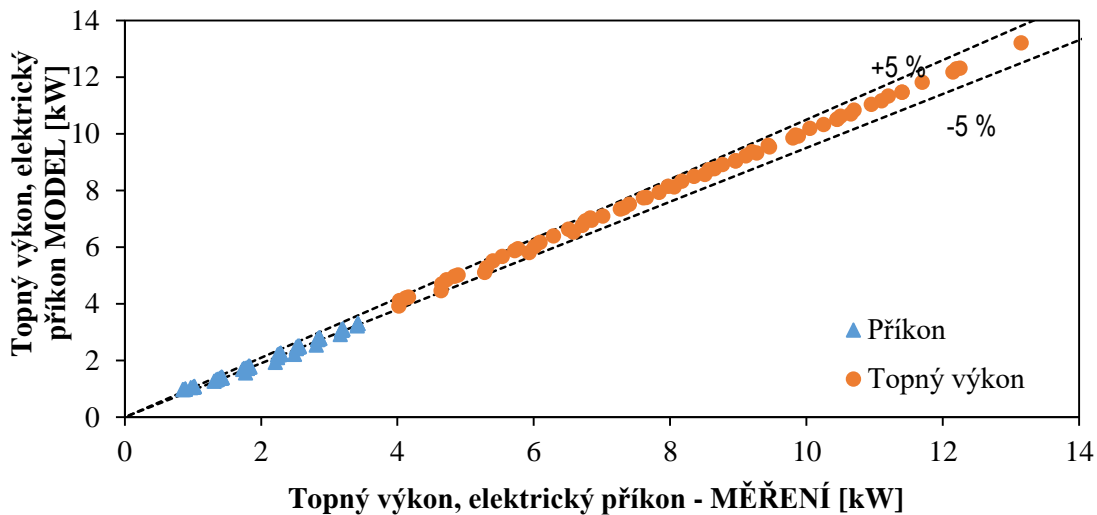
VÝPOČET SEZÓNÍ ENERGETICKÉ ÚČINNOSTI TEPELNÉHO ČERPADLA

Tepelná čerpadla pro vytápění jsou stejně jako ostatní ohřívače vnitřních prostorů řazena do jednotlivých tříd pomocí sezónní energetické účinnosti η_s [-]. Nařízení Komise 811/2013 stanovuje postup výpočtu η_s . Pro tepelná čerpadla je η_s funkcí $SCOP$, který se stanoví postupem podle ČSN EN 14825. Postup měření, vyhodnocení a výpočty podle současné legislativy a norem jsou komplexně popsány v [3], v tomto příspěvku není pro popis problematiky dostatečný prostor.

Pro zjednodušení výpočtů a rychlý výpočet hodnoty sezónní energetické účinnosti byl vytvořen software [4], který je volně k dispozici. V následujících kapitolách budou přínosy k energetické efektivitě tepelného čerpadla hodnoceny pomocí uvedeného softwaru.

TEPELNÉ ČERPADLO ZEMĚ-VODA BEZ MODULACE VÝKONU

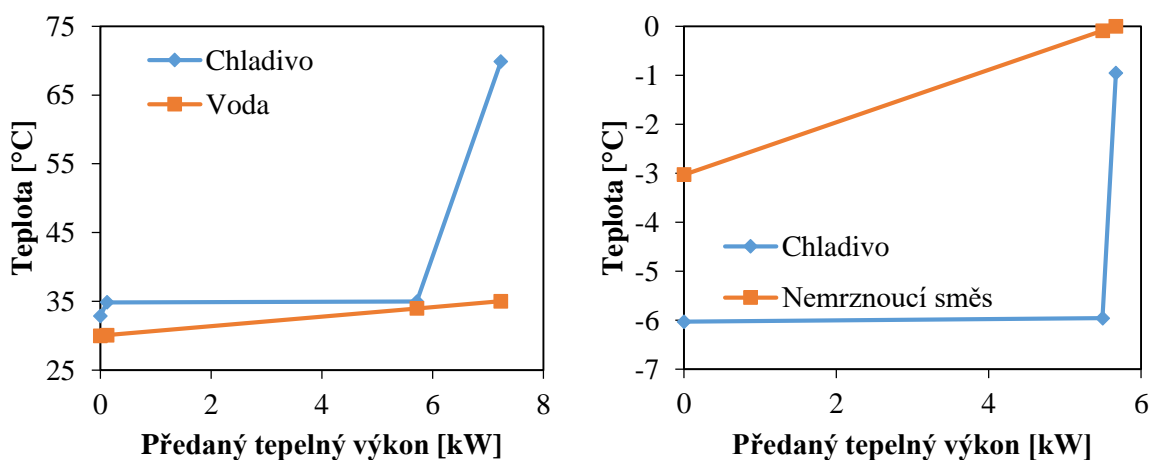
Jako reference je zvoleno tepelné čerpadlo země-voda s chladivem R410a a kompresorem scroll Copeland ZH06K1P-TFM. Model kompresoru vychází z jednoduché závislosti izoentropické účinnosti a dopravního součinitele na tlakovém poměru mezi tlakem kondenzačním a vypařovacím [5]. Přesnost modelu vůči výrobcem udávaným je na Obr. 1.



Obr. 1 Porovnání topného výkonu a elektrického příkonu kompresoru Copeland ZH06K1P-TFM vypočteného z modelu a udávaného výrobcem.

Model dokázal poměrně přesně popsat výrobcem udávané hodnoty ve všech provozních stavech. Model kompresoru lze použít v simulačním nástroji popsaném v [6]. Simulační model tepelného čerpadla země-voda na základě znalosti modelu kompresoru a vlastností výměníků tepla predikuje provozní chování tepelného čerpadla. Referenční tepelné čerpadlo je dimenzováno v pracovním bodě B/W – 0/35 °C podle ČSN EN 14511. Předpokládaný topný výkon tepelného čerpadla je v tomto provozním stavu 6,3 kW.

Výhodou použití simulačního modelu je možnost dimenzování výměníků tepla ve vazbě na kompresor. U referenčního tepelného čerpadla je vybrán výměník tepla s velikostí, aby se kondenzační teplota v bodě B/W – 7/35 podle normy ČSN EN 14511 rovnala výstupní teplotě vody za kondenzátorem (tedy 35 °C). Příkladem takového výměníku je např. SWEP B25x30. U výparníku je dimenzování jednodušší. Expanzní ventil udržuje v modelu ideálně stále stejné přehřátí chladiva na výparníku. V matematickém modelu je u výparníku nastaveno přehřátí 3 K, které je udržitelné při ideální náplni chladiva v okruhu (nebo použití sběrače chladiva) a elektronickém expanzním ventilu. Pro výparník byl vybrán softwarem výrobce [7] výměník tepla stejný deskový výměník tepla jako v případě kondenzátoru. Teplotní profily na obou výměnících tepla jsou na Obr. 2.



Obr. 2 Teplotní profil na kondenzátoru (vlevo) a výparníku (vpravo).

Pro referenční tepelné čerpadlo byla zjišťována závislost sezónní energetické účinnosti vytápění na zvolené teplotě bivalence t_{biv} . Bivalentní teplota je venkovní teplota, při níž je topný výkon tepelného čerpadla roven uvažované tepelné ztrátě budovy. Jestliže je venkovní teplota nižší než teplota bivalentní, tepelné čerpadlo není schopno dodat požadovaný topný výkon a chybějící energii musí dodat doplňkový zdroj tepla (ve výpočtu elektrický odporový ohřivač). Při vyšších teplotách naopak tepelné čerpadlo přetápí výstupní vodu z kondenzátoru, což vede k vyšší teplotě kondenzační a zhoršenému topnému faktoru. Navíc je výpočtový topný faktor dále ponížěn vlivem cyklování podle ztrátového součinitele C_d .

Postup výpočtu pomocí modelu odpovídá postupu ve zkušebně, kdy je tepelné čerpadlo nejprve proměřeno při standardních podmínkách pro vysokoteplotní aplikaci B0/W55 (B/brine - teplota nemrznoucí směsi na vstupu do výparníku; W/water - teplota vody na výstupu za kondenzátorem). Měření slouží k nastavení jmenovitých průtoků vody a nemrznoucí směsi, které jsou následně udržovány i při zkoušce při částečném zatížení. Výsledky modelování standardních podmínek jsou v Tab. 1. Následně je tepelné čerpadlo proměřeno v bodech podle Tab. 2. Výrobce zařízení přitom musí udat jmenovitý tepelný výkon P_{rated} , bivalentní teplotu t_{biv} a mezní provozní teplotu TOL. Pokud topný výkon při t_{biv} neodpovídá vypočtenému topnému výkonu při částečném zatížení, měření se opakuje s korekcí P_{rated} .

Tab. 1 Výsledky modelování standardních podmínek v bodě B0/W55

Bod	Topný výkon [kW]	COP [-]	Průtok vody kondenzátorem [kg/s]
0/55	6.86	2.73	0.21

Díky možnostem matematického modelování je možné predikovat výsledky měření a nastavit správně teplotu bivalentní a jmenovitý tepelný výkon. Jako příklad lze uvést nastavení s $P_{rated} = 8$ kW, $t_{biv} = -3$ °C pro výše popsané tepelné čerpadlo při vysokoteplotní aplikaci a průměrných klimatických podmínkách. V Tab. 2 jsou výsledky z modelu, které by byly pravděpodobně naměřeny na zkušebně.

Tab. 2 Výsledek modelování zkoušky tepelného čerpadla při $P_{rated} = 8$ kW a $t_{biv} = -3$ °C.

Naměřený bod	Venkovní teplota [°C]	Koeficient částečného zatížení	Vnitřní výměník			Model	
			Vstup [°C]	Výstup [°C]	$Q_{k,pož}$ [kW]	Q_k [kW]	COP [-]
A	-7	0.88	44.0	52	7.1	6.5	2.80
B	2	0.54	37.1	42	4.3	6.6	3.23
C	7	0.35	32.9	36	2.8	6.6	3.54
D	12	0.15	28.6	30	1.2	6.7	3.90
E – TOL	-10	1.00	45.9	55	8.0	6.4	2.69
F - t_{biv}	-3	0.73	37.9	45	5.8	7.0	3.41

Při venkovní teplotě -3 °C (odpovídající bivalentní teplotě) je dostupný topný výkon tepelného čerpadla 7,0 kW a požadovaný 5,8 kW, což neodpovídá a měření je nutné opakovat pro jinou t_{biv} nebo P_{rated} . Model umožňuje najít odpovídající kombinaci bivalentní teploty a P_{rated} . Pro uvedený příklad jsou pozměněné výsledky v Tab. 3. Pro $t_{biv} = -3$ °C je to $P_{rated} = 9.6$ kW. Požadovaný topný výkon při teplotě t_{biv} se rovná výkonu dostupnému.

Tab. 3 Výsledek modelování zkoušky tepelného čerpadla při $P_{rated} = 9.6 \text{ kW}$ a $t_{biv} = -3 \text{ °C}$.

Naměřený bod	Venkovní teplota [°C]	Koeficient částečného zatížení	Vnitřní výměník			Model	
			Vstup [°C]	Výstup [°C]	$Q_{k,pož}$ [kW]	Q_k [kW]	COP [-]
A	42.4	0.88	42.4	52	8.5	6.5	2.80
B	36.1	0.54	36.1	42	5.2	6.6	3.23
C	32.2	0.35	32.2	36	3.3	6.6	3.54
D	28.3	0.15	28.3	30	1.5	6.7	3.90
E – TOL	44.1	1.00	44.1	55	9.6	6.4	2.69
F - t_{biv}	36.5	0.73	36.5	45	7.0	7.0	3.41

Hodnotu $SCOP$ je možno určit postupem uvedeným v [3] nebo s využitím softwaru [4]. Pro jeho vyhodnocení je třeba zadat hodnotu spotřeby elektrické energie v jiném než aktivním režimu. Hodnoty uvažované v příkladu jsou v Tab. 4. Příslušné počty hodin jsou uvedeny v Nařízení Komise 811/2013. Poslední hodnota nutná pro výpočet $SCOP$ je koeficient ztráty energie C_d [-]. Pokud není změřen, je jeho hodnota předepsána na 0.9, většina tepelných čerpadel má tuto hodnotu proměřenu a blíží se k 1. V příkladu budeme uvažovat $C_d = 0.97$.

Tab. 4 Spotřeba energie v jiných režimech než aktivním.

Příkon jednotky ve vypnutém stavu termostatu	P_{TO}	0.017	kW
Příkon jednotky v pohotovostním režimu	P_{SB}	0.017	kW
Příkon ve vypnutém stavu	P_{OFF}	0.017	kW
Příkon v režimu zahřívání skříně kompresoru	P_{CK}	0.017	kW

Výsledky z příkladu včetně zařazení do třídy energetické efektivity jsou v Tab. 5. Výsledná hodnota sezónní energetické účinnosti, podle které se určuje energetická třída, je 1.17. Výsledek platí pro zvolenou teplotu t_{biv} (a k tomu příslušnou hodnotu P_{rated}). Pro jiné hodnoty t_{biv} se budou lišit jak hodnoty P_{rated} (při nižších bivalentních teplotách se blíží topný výkon naměřený při bivalentní teplotě P_{rated}), tak i $SCOP$ a η_s . V Tab. 6 jsou shrnuty výsledné hodnoty η_s pro jednotlivé bivalentní teploty a příslušné P_{rated} .

Tab. 5 Výsledné hodnoty sezónní energetické efektivity tepelného čerpadla při $t_{biv} = -3 \text{ °C}$ a $P_{rated} = 9.6 \text{ kW}$.

Sezónní topný faktor v aktivním režimu	$SCOP_{ON}$	3.19	-
Sezónní spotřeba elektrické energie	Q_{HE}	6344	kWh
Sezónní topný faktor	$SCOP$	3.13	kWh
Sezónní energetická účinnost	η_s	1.17	-
Třída energetické efektivity	A+		

Tab. 6 Výsledné hodnoty sezónní energetické efektivity tepelného čerpadla při měnící se t_{biv} .

t_{biv} [°C]	P_{rated} [kW]	$SCOP_{ON}$ [-]	$SCOP$ [-]	η_s [-]	Energetická třída
-10	6.85	3.23	3.13	1.17	A+
-9	7.18	3.25	3.16	1.18	A+
-8	7.48	3.27	3.18	1.19	A+
-7	7.91	3.31	3.23	1.21	A+
-6	8.67	3.34	3.26	1.23	A+
-5	8.67	3.38	3.29	1.24	A+
-4	9.10	3.37	3.23	1.21	A+
-3	9.60	3.19	3.13	1.17	A+

Z výsledků je zřejmé, že optimální sezónní energetická účinnost je při $t_{biv} = -5$ °C. Výrobci tepelných čerpadel země-voda udávají často bivalentní teplotu -7 °C, aby nebylo nutné ve zkušebně samostatně měřit bod A a F – t_{biv} . Posun t_{biv} a změna η_s nemají v tomto případě vliv na zařazení do třídy sezónní energetické účinnosti.

TEPELNÉ ČERPADLO ZEMĚ-VODA S MODULACÍ VÝKONU

Pro tepelné čerpadlo země-voda byl stejně jako v předchozím případě vytvořen matematický model. Pro simulace byl použit ověřený model kompresoru Mitsubishi ANB33FBDMT [8] a výměníky tepla stejné jako v předchozí kapitole. U tepelných čerpadel s kompresorem s regulací výkonu se $SCOP$ stanovuje stejným postupem jako v předchozím případě. Protože ale není možné bez určení otáček kompresoru naměřit průtok odpovídající standardním podmínkám podle ČSN EN 14511, je možné si průtok vody kondenzátorem v modelu zvolit. Výhodou tepelných čerpadel s regulací je možnost přizpůsobení topného výkonu aktuální potřebě. Z toho důvodu je vhodné volit při testu $t_{biv} = TOL$. Možnost optimalizace výsledků zkoušky tepelného čerpadla při částečném zatížení lze hledat především ve stanovení P_{rated} , přičemž jedné hodnotě P_{rated} odpovídají jedny otáčky kompresoru. Pro predikci optimálního topného výkonu tepelného čerpadla byl použit model napojený na software [4]. Výsledky jsou v Tab. 7.

Tab. 7 Výsledky modelu tepelného čerpadla země-voda s regulací otáček kompresoru.

P_{rated} [kW]	Otáčky v bodě E [s^{-1}]	t_{biv} [°C]	$SCOP_{ON}$ [-]	$SCOP$ [-]	η_s [-]	Energetická třída
4	28	-10	3.36	3.19	1.20	A+
6	42	-10	3.53	3.40	1.28	A++
8	56	-10	3.61	3.51	1.32	A++
10	72	-10	3.72	3.64	1.37	A++
12	87	-10	3.67	3.60	1.36	A++
14	102	-10	3.63	3.58	1.35	A++
16	113	-10	3.57	3.52	1.33	A++
18	120	-8	3.49	3.44	1.30	A++
20	120	-5	3.38	3.35	1.26	A++
22	120	-4	3.27	3.24	1.21	A+

Z Tab. 7 je patrné, že nejlepší hodnotu sezónní energetické účinnosti bude mít tepelné čerpadlo s P_{rated} 10 kW. Při P_{rated} vyšším než 16 kW by vzrostly otáčky kompresoru nad maximální povolenou hodnotu 120 s^{-1} , pokud by byla zachována podmínka $t_{biv} = -10 \text{ °C}$. Proto hodnota t_{biv} musí úměrně vzrůst.

TEPELNÉ ČERPADLO VZDUCH-VODA BEZ MODULACE VÝKONU

Postup zkoušky tepelného čerpadla vzduch-voda bez modulace výkonu se neliší od zkoušky tepelného čerpadla země-voda. Model tepelného čerpadla vzduch-voda je pro jednoduchost stejný jako u tepelného čerpadla země-voda – stejná velikost výměníků tepla, stejný kompresor, zanedbaný vliv kondenzace a namrzání vzdušné vlhkosti na výparníku. Modelové tepelné čerpadlo má při standardních podmínkách A7/W35 výkonnostní parametry podle ČSN EN 14511 v Tab. 8.

Tab. 8 Výsledky modelování standardních podmínek v bodě A7/W55

Bod	Topný výkon [kW]	COP [-]	Průtok vody kondenzátorem [kg/s]
7/55	8.0	3.16	0.24

Podobně jako u tepelného čerpadla země-voda lze modelovat závislost sezónní energetické účinnosti na teplotě bivalentní. Výsledky jsou v Tab. 9. Se snižující se t_{biv} klesá P_{rated} . Optimální t_{biv} je stejně jako u systému země-voda okolo -7 °C . Rozdíl v η_s se neprojeví přechodem do jiné třídy energetické efektivity. V Tab. 9 je zobrazena i teplota po kompresi v bodě TOL, která s klesající teplotou t_{biv} roste. Při teplotě $t_{biv} = -8 \text{ °C}$ a nižší již bude kompresor pravděpodobně pracovat mimo pracovní obálku a regulace jej vypne.

Tab. 9 Výsledné hodnoty sezónní energetické efektivity tepelného čerpadla při měnící se t_{biv} .

t_{biv} [°C]	P_{rated} [kW]	Q_{HE} [kWh]	Dodáno tepla [kWh]	$SCOP_{ON}$ [-]	$SCOP$ [-]	η_s [-]	teplota po kompresi v bodě E [°C]	Energetická třída
0	11.5	8114	23771	3.00	2.93	1.09	111	A+
-1	10.5	7101	21778	3.15	3.07	1.15	113	A+
-2	9.7	6336	20074	3.26	3.17	1.19	114	A+
-3	8.8	5634	18265	3.35	3.24	1.22	116	A+
-4	8.3	5218	17111	3.40	3.28	1.23	117	A+
-5	7.6	4764	15665	3.42	3.29	1.24	118	A+
-6	7.3	4446	14598	3.42	3.28	1.23	119	A+
-7	7.1	4447	14601	3.42	3.28	1.23	119	A+
-8	6.0	3901	12445	3.35	3.19	1.20	121	A+
-9	5.6	3650	11468	3.31	3.14	1.18	122	A+
-10	5.1	3418	10555	3.26	3.09	1.16	123	A+

TEPELNÉ ČERPADLO VZDUCH-VODA S MODULACÍ VÝKONU

Pro model tepelného čerpadla vzduch-voda s modulací byl použit stejný model kompresoru jako u tepelného čerpadla země-voda s regulací výkonu a stejná zjednodušení jako v předchozí kapitole. Tepelné čerpadlo s modulací výkonu má výhodu v možnosti přizpůsobení výkonu požadavku, proto bude nejlepší parametrů dosahovat, pokud se bude t_{biv} pohybovat blízko

TOL (viz Tab. 10). Omezení možnosti modulace je v limitu výtlačné teploty chladiva po kompresi. Pokud teplota po kompresi přesáhne limit, musí regulace kompresor odstavit. V Tab. 10 jsou výsledky modelování tepelného čerpadla s $t_{biv} = -10\text{ °C}$ pro měnící se P_{rated} , respektive otáčky kompresoru při TOL.

Tab. 10 Výsledky modelu tepelného čerpadla vzduch-voda s regulací otáček kompresoru.

P_{rated} [kW]	Otáčky [s ⁻¹]	$SCOP_{ON}$ [-]	$SCOP$ [-]	η_s [-]	Energetická třída	teplota po kompresi v bodě E [°C]
4	34	3.73	3.52	1.33	A++	120
6	52	3.91	3.75	1.42	A++	119
8	70	3.95	3.83	1.45	A++	126
10	89	3.98	3.88	1.47	A++	131

Ačkoli se zvyšujícím se P_{rated} roste η_s , roste i teplota po kompresi. Pro daný případ je přípustný pouze topný výkon P_{rated} 6 kW, kde se teplota po kompresi v bodě E (při venkovní teplotě a hrazeném tepelném výkonu odpovídajícím -10 °C) drží mírně pod 120 °C . Toto chování je dáno závislostí izoentropické účinnosti kompresoru na otáčkách, kdy je optimum při 50 s^{-1} [8].

ZÁVĚR

Legislativa a systém měření tepelných čerpadel přinesly možnost optimalizace měření pro dosažení optimálních provozních účinností. Ačkoli jsou všechna modelovaná zařízení z hlediska kvality komponent srovnatelná, dosahují vlivem rozdílné metodiky měření rozdílných sezónních účinností. Tepelná čerpadla s modulací výkonu dosahují přibližně o 15 % vyšší účinnosti. V článku bylo na příkladech ukázáno, jak ovlivní volba t_{biv} a P_{rated} hodnotu účinnosti.

LITERATURA

- [1] Nařízení Komise 811/2013 o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích ohřivačů pro vytápění vnitřních prostorů, kombinovaných ohřivačů, souprav sestávajících z ohřivače pro vytápění vnitřních prostorů. Brusel 2013
- [2] ČSN EN 14825 - Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru - Zkoušení a klasifikace za podmínek částečného zatížení a výpočet při sezónním nasazení. ÚNMZ 2014
- [3] MATUŠKA T., SEDLÁŘ J., STRAKA T. *Hodnocení tepelných čerpadel ve světle nové legislativy*. STP, 2016, ISBN 978-80-02-02662-4
- [4] SEDLÁŘ J. *Výpočet SCOP podle ČSN EN 14825*. Software, UCEEB, 2016, Dostupné z: Dostupné z: <<http://www.uceeb.cz>>.
- [5] SEDLÁŘ J. *Tepelné čerpadlo s dochlazovačem pro přípravu teplé vody*. Vytápění, větrání, instalace, 2014, roč. 23., č. 3, s. 116-120. ISSN 1210-1389
- [6] SEDLÁŘ J., BROUM M., MATUŠKA T., ŠOUREK B. *Model tepelného čerpadla s odvodem tepla na třech úrovních*. Vytápění, větrání, instalace, 2015, roč. 24., č. 1, s. 16-21. ISSN 1210-1389
- [7] software SSP G7, SWEP, verze 7.0.3.24

- [8] PETRÁK J., PETRÁK M., KOLOVRATNÍK M., SEDLÁŘ J. *Model jednostupňového objemového kompresoru*. Vytápění, větrání, instalace, 2015, roč. 2015, č. 2, s. 82-86. ISSN 1210-1389

ENERGETICKO-EKONOMICKÁ OPTIMALIZACE KONSTRUKCE PLOCHÉHO SOLÁRNÍHO KOLEKTORU

Viacheslav Shemelin^{1,2}, Tomáš Matuška^{1,2}

¹Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

²Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

viacheslav.shemelin@uceeb.cz

ANOTACE

Příspěvek představuje energeticko-ekonomickou optimalizaci konstrukce plochého solárního kolektoru na základě analýzy vlivu hlavních konstrukčních parametrů (šířka vzduchové mezery mezi absorberem a sklem, rozteč mezi trubkami absorberu, emisivita absorberu a tloušťka tepelné izolace) na výkonnost plochého solárního kolektoru. Jako referenční varianta byl vybrán kvalitní plochý solární kolektor. Cílem analýzy je ukázat, do jaké míry je možné upravit tyto parametry směrem ke snížení doby návratnosti počáteční investice.

ÚVOD

V oboru vývoje plochých solárních kolektorů lze sledovat trend zvyšování jejich energetické kvality různou konstrukcí a použitím nových materiálů. Zlepšování účinnosti plochého kolektoru vede vždy v zásadě dvěma cestami: zlepšováním procesu pohlcení slunečního záření a odvodu tepla z absorberu a snižováním tepelné ztráty celého kolektoru. Zvyšování „optické“ účinnosti je možné zajistit vyšší propustností zasklení kolektoru například aplikací skel s antireflexními povlaky, vyšší pohltivost absorberu například pohltivějším povlakem případně lepším odvodem tepla z povrchu absorberu například použitím plně smáčivého registru namísto konstrukce trubka-lamela. Zvyšování množství tepla odváděného tepelnou látkou lze dosáhnout snižováním rozteče mezi trubkami. Snížení tepelné ztráty kolektoru se dosahuje především nízkou emisivitou povrchu absorberu a tloušťkou tepelné izolace (zadní strany a boků). Méně se používají nízkoemisivní povlaky na zasklení kolektoru, neboť s sebou přinášejí i snížení propustnosti slunečního záření. Tepelnou ztrátu přední části kolektoru je možné do jisté ovlivnit i šířkou vzduchové mezery mezi absorberem a zasklením, případně její výplní jiným méně vodivým plynem nebo dokonce jeho absencí (ploché vakuové kolektory).

Každé zlepšování směrem k vyšší efektivitě kolektoru s sebou nese náklady. Použití povlaků s vyšší selektivitou vyráběné novými technologiemi je dražší než použití starých elektrochemickou cestou nanášených povlaků. Také antireflexní povlaky zatím znamenají významné zdražení ceny kolektoru. Zvýšení tloušťky tepelné izolace a snižování rozteče mezi trubkami se úměrně nárůstu množství materiálu promítá do ceny kolektoru. I zvolená šířka vzduchové mezery mezi absorberem a krycím sklem má vliv na cenu kolektoru, neboť ovlivňuje stavební výšku kolektoru a tedy množství materiálu použitého na rámovou konstrukci. Na druhé straně solární kolektory prodávané na trhu v dnešní době jsou drahé a nezlevňují.

Předmětem analýzy je optimalizace konstrukce solárních kolektorů pro dosažení kratší doby návratnosti, avšak při zachování obdobné energetické kvality, spolehlivosti a životnosti. Energeticko-ekonomická optimalizace konstrukce musí vždy vycházet z konkrétních podmínek a z plánovaného využití solárního kolektoru. Následující analýza je provedena nejprve obecně a potom detailněji pro oblast nejčastější aplikace: solární přípravy teplé vody.

KONSTRUKCE REFERENČNÍHO KOLEKTORU

Referenční variantou (RK) použitou v analýze je kvalitní plochý kolektor se solárním sklem a selektivním absorberem. Detailní parametry solárního kolektoru jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Parametry solárního kolektoru

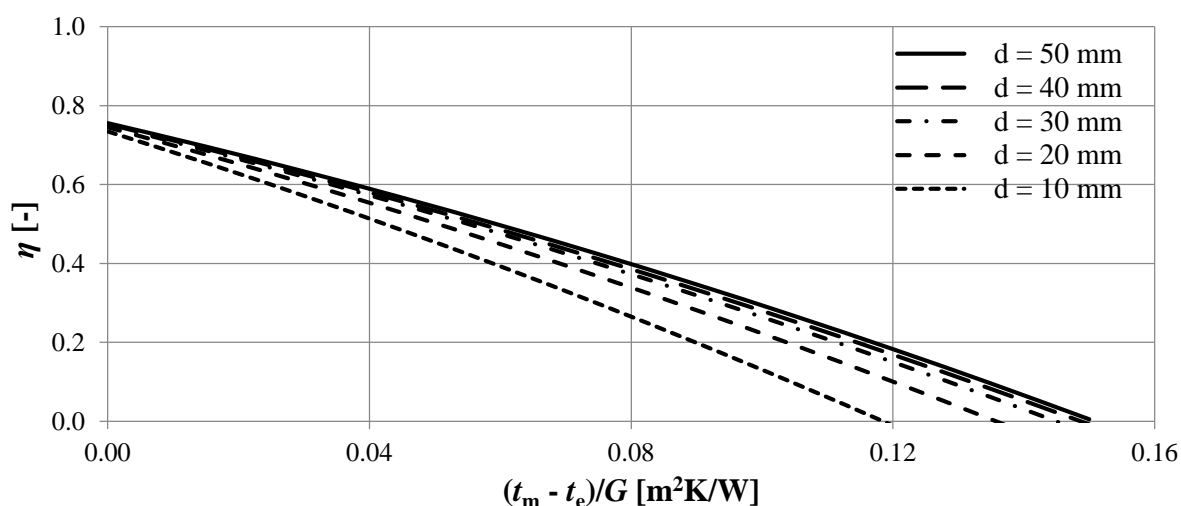
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Šířka	1175 mm	Plocha absorberu	2.185 m ²
Výška	2017 mm	Materiál absorberu	Hliník
Hloubka	87 mm	Tloušťka absorberu	0.4 mm
Připojovací potrubí	Cu 22 x 1 mm	Emisivita absorberu	0.05
Materiál krytu	Solární sklo	Počet trubek	11
Tloušťka krytu	4 mm	Rozteč mezi trubkami	100 mm
Plocha apertury	2.25 m ²	Tloušťka izolace	50 mm
Tloušťka vzduchové mezery	30 mm	Izolační materiál	Minerální vlna

V rámci analýzy jsou pro jednotlivé varianty jako proměnné uvažovány čtyři parametry:

Tloušťka tepelné izolace (10 až 50 mm s krokem 10 mm)

Tepelnou izolací se rozumí izolace spodní a boční strany absorberu jako součást rámové konstrukce. Izolační materiály pro solární systémy musí vyhovovat předepsané normě ČSN EN 12 975 (Tepelné solární soustavy a součástí - Solární kolektory) a dalším zákonným předpisům. Tepelná izolace by měla snášet teploty až do 200 °C, které mohou nastat při stagnačních podmínkách, kdy z kolektoru není odebíráno žádné teplo.

Boční izolace není pro svou omezenou plochu tak podstatná jako izolace na zadní straně kolektoru, proto zpravidla postačuje tloušťka 15 až 20 mm. Větší tloušťka boční tepelné izolace nepřinese výrazné zlepšení tepelných vlastností, naopak by zbytečně narostl hrubý rozměr kolektoru.

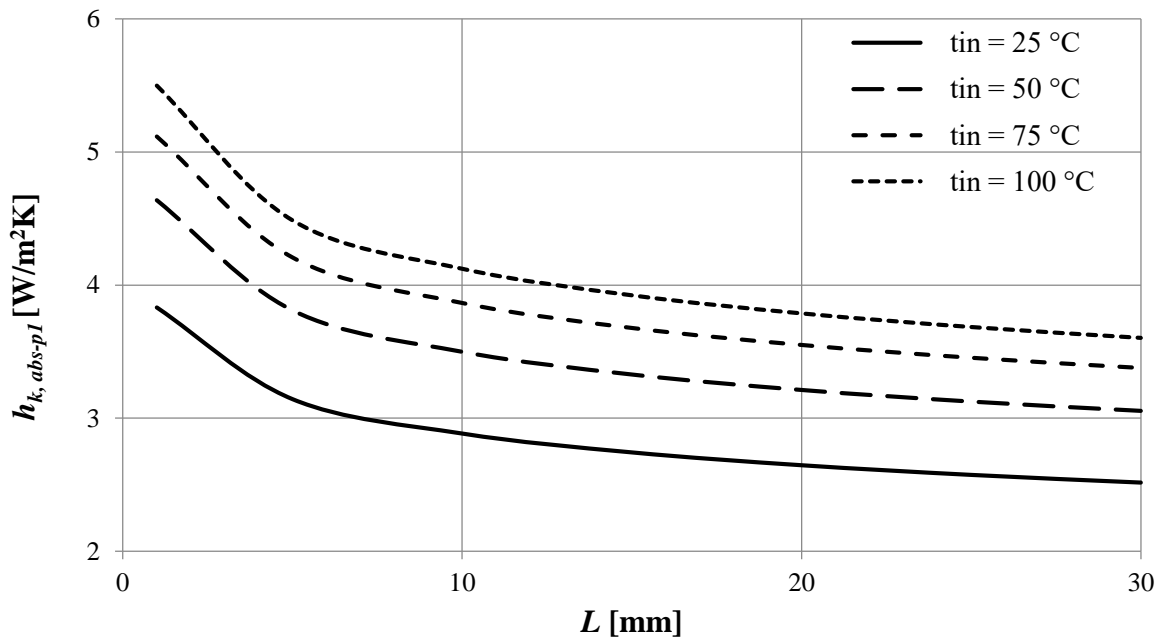


Obr. 1 Účinnost kolektoru pro uvažované konstrukční varianty

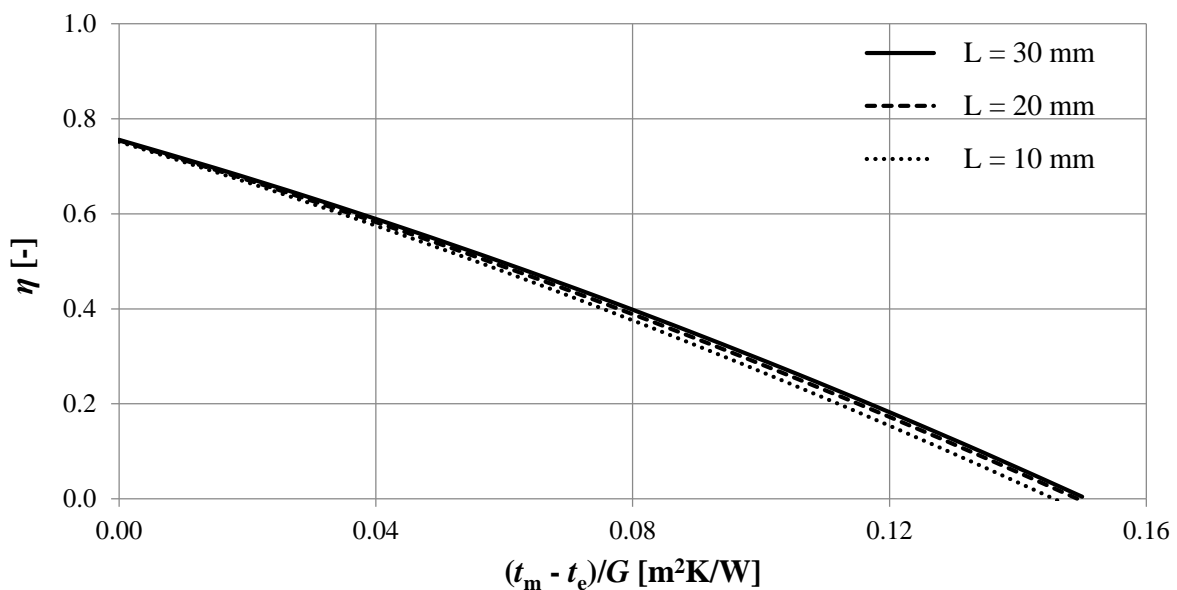
Tepelná izolace zadní strany má vliv větší, nicméně může nastat právě otázka, jaká tloušťka izolace ještě dává smysl a jaká už ne? Na Obr. 1 je porovnávána účinnost pro 5 solárních kolektorů se stejnými geometrickými a fyzikálními vlastnostmi, avšak s různou tloušťkou zadní izolace.

Tloušťka vzduchové mezery (10, 20 a 30 mm)

Důležitou roli v energetickém chování solárního kolektoru hraje vzduchová mezera mezi absorbérem a krycím sklem, neboť zvyšuje tepelný odpor přední stranou kolektoru a tím pádem zvyšuje účinnost kolektoru. Otázkou je, jestli opravdu dává smysl mít tloušťku vzduchové vrstvy 30 mm, nebo v našich klimatických podmínkách postačuje tloušťka menší? Na Obr. 2 je znázorněn součinitel přestupu tepla přirozeným prouděním v uzavřené vzduchové vrstvě mezi absorbérem a zasklením v závislosti na tloušťce vzduchové mezery. Výsledky modelování účinnosti solárního kolektoru jsou uvedeny na Obr. 3. Varianty kolektorů mají stejnou konstrukci. Liší se pouze tloušťkou vzduchové mezery: 10, 20 a 30 mm.



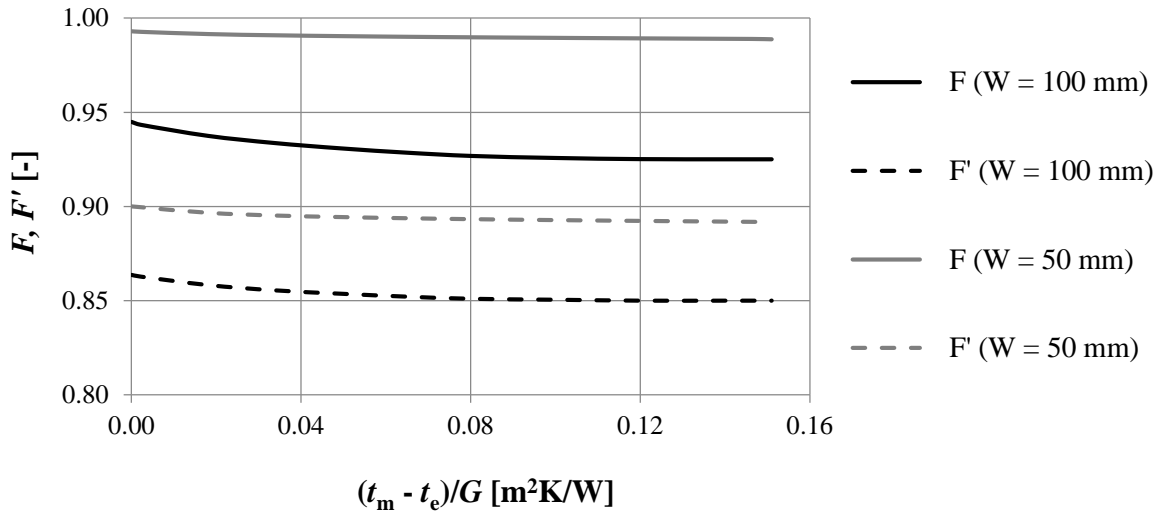
Obr. 2 Součinitel přestupu tepla volným prouděním v uzavřené vzduchové vrstvě mezi absorbérem a zasklením v závislosti na tloušťce vzduchové mezery



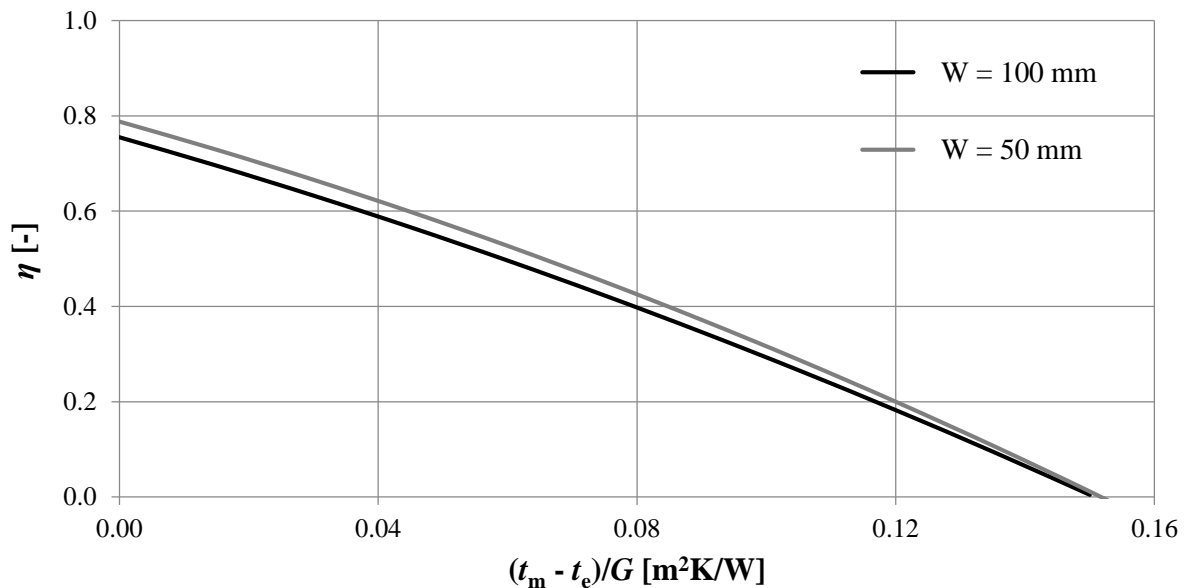
Obr. 3 Porovnání účinnosti kolektoru pro uvažované tloušťky vzduchové mezery

Rozteč mezi trubkami (50 a 100 mm)

Absorbér dnešních solárních kolektorů bývá vyroben v naprosté většině jako celoplošný, na který je zesponu přivařen trubkový registr. U plochých solárních kolektorů jsou pro konstrukci zásadními parametry tepelná vodivost absorbéru, tloušťka absorbéru a rozteč mezi trubkami, které významně ovlivňuje účinnost. Snižování rozteče vede ke zvýšení účinnosti žebra F , účinnosti součinitele kolektoru F' a účinnosti kolektoru samotného η (viz Obr. 4 a 5). Z toho důvodu je v analýze uvažováno možné snížení rozteče ze 100 mm na 50 mm.



Obr. 4 Účinnost žebra, účinnosti činitel pro uvažované varianty kolektoru



Obr. 5 Účinnost kolektoru pro uvažované varianty kolektoru

Emisivita absorbéru (0.05 a 0.12)

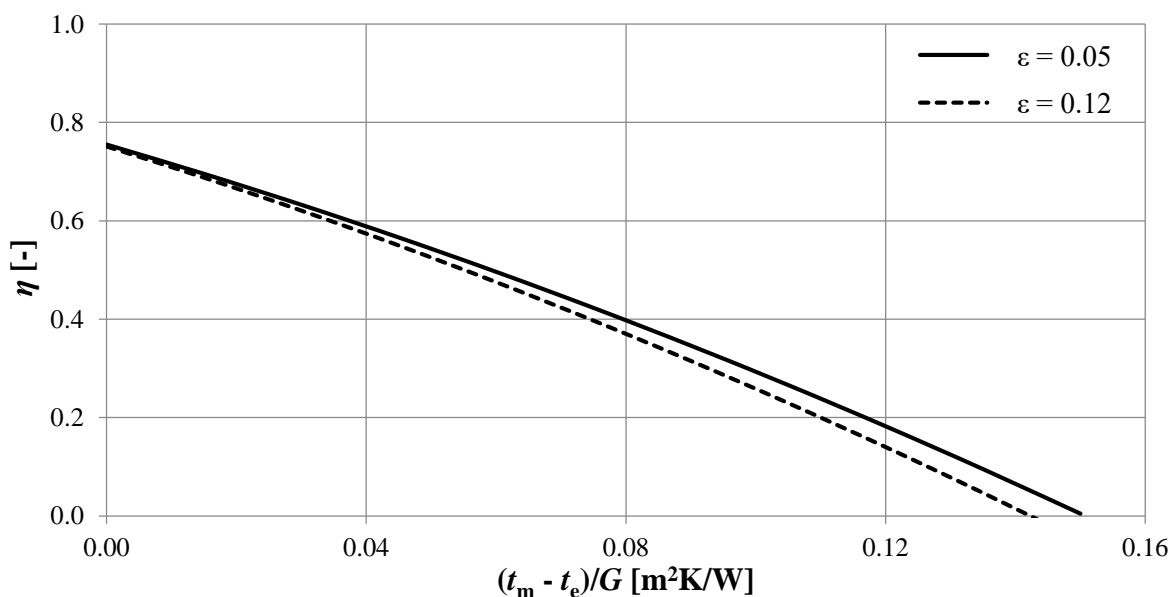
Absorbéry mohou mít různý typ povrchu. Ten potom určuje možnosti využití kolektoru, ale také jeho cenu. Kvalitu povrchu určuje nanosená vrstva a její optické vlastnosti. Pro využití v solární technice je určující spektrální závislost pohltivosti α a emisivity ε resp. jejich poměr α/ε . Spektrální závislost selektivního povlaku zajišťuje vysokou pohltivost v oblasti krátkovlnného záření, kde dopadá převážná část energie slunečního záření, a nízké vyzařování

v oblasti dlouhovlnného záření (snížení tepelných ztrát zářením). V Tab. 2 je uveden přehled různých druhů selektivních povrchů.

Tab. 2 Absorpční schopnost a emisivity selektivních povlaků

Selektivní povlak	Materiál absorbéru	Metoda	Pohltivost [-]	Emisivita [-]
Nikl, oxidy niklu	hliník	naprašování	0.96	0.05
Optický aktivní třívrstvý povlak	hliník	vakuové napařování	0.94	0.05
Keramicko-kovová struktura CERMET	měď	naprašování	0.95	0.05
Černý chrom na niklu	měď	galvanická	0.95	0.12
Vrstva titan-nitrid-oxid	měď	vakuové napařování	0.95	0.05
Pigmentovaný nikl, oxid hliníkový	hliník	galvanická	0.90-0.96	0.15-0.20

Za účelem energeticko-ekonomické analýzy je uvažovány povrchy ve dvou variantách: moderní napařovaný PVD povlak s emisivitou 0.05 nebo starší a levnější elektrochemický (galvanický) povlak s emisivitou 0.12 avšak se stejnou pohltivostí 0.95. Obr. 6 ukazuje křivky účinnosti variant kolektoru jako výsledek komplexního modelování.



Obr. 6 Účinnost kolektoru pro varianty kolektoru s emisivitou absorbéru $\epsilon = 0.05$ a $\epsilon = 0.12$

VÝSLEDKY ENERGETICKÉ ANALÝZY

Pro analýzy kolektorů byly využity dva základní přístupy, které hodnotí celoroční produkci tepla z kolektoru simulačním výpočtem. Pro obecnou analýzu je použit přístup hodnocení výpočtem výkonnosti solárního kolektoru nezapojeného do solární soustavy, avšak s definovanou a celoročně stálou provozní teplotou. Druhým způsobem je porovnání ročního měrného zisku solárního kolektoru zapojeného do definované solární soustavy pro přípravu teplé vody. Klimatické údaje použité v obou simulačních analýzách byly převzaty z typického meteorologického roku TMY (Meteonorm) pro Prahu. Klimatické údaje TMY vykazují úhrn dopadající sluneční energie na vodorovnou rovinu 1096 kWh/m².rok a roční průměrná teplota

venkovního vzduchu je 8,9 °C. Solární kolektory uvažované ve všech variantách mají sklon 45° a orientaci k jihu.

Pomocí simulačního prostředí TRNSYS byla modelována výkonnost srovnávaných variant solárního kolektoru při provozní teplotě 25, 50 a 75 °C s využitím detailního modelu plochého solárního kolektoru, který umožňuje zohlednit změny konstrukčních parametrů [1]. Výkonnost je zde definována jako čistý roční tepelný zisk kolektoru při celoročně konstantní teplotě kapaliny [2]. Výsledky simulace jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Porovnání tepelných zisků srovnávaných variant solárního kolektoru (vztaženo k hrubé ploše kolektoru) v závislosti na tloušťce izolace, tloušťce vzduchové mezery, emisivitě absorberu a rozteči mezi trubkami, RK – referenční kolektor

Tepelný zisk [kWh/m².rok]	25 [°C]	50 [°C]	75 [°C]
RK	527	308	165
tloušťka izolace [mm]			
40	519 (-1 %)	297 (-4 %)	155 (-6 %)
30	507 (-4 %)	280 (-9 %)	139 (-16 %)
20	485 (-8 %)	249 (-19 %)	112 (-32 %)
10	432 (-18 %)	183 (-41 %)	61 (-63 %)
tloušťka vzduchové mezery [mm]			
20	522 (-1 %)	300 (-3 %)	158 (-5 %)
10	512 (-3 %)	287 (-7 %)	145 (-13 %)
emisivita absorberu [-]			
0.12	513 (-3 %)	288 (-7 %)	145 (-13 %)
rozteč mezi trubkami [mm]			
50	554 (+5 %)	324 (+5 %)	175 (+6 %)

Z výsledků simulace je patrné, že optimální hodnota tloušťky izolace se pohybuje mezi 30 a 40 mm. Další navyšování tloušťky izolace až do 50 mm vede pouze k nepatrnému zvyšování zisku. Snižování tloušťky tepelné izolace pod 20 mm vede k významnému snížení tepelných zisků. Rozdíl ve výsledcích v uvažované oblasti tloušťky vzduchové mezery je pouze v řádu procent. Rozdíl ve výsledcích v případě zvyšování emisivity nepřesahuje 7 % při středních pracovních teplotách okolo 50 °C. Snižování rozteče mezi trubkami vede k zvyšování tepelných zisků o 5 % napříč všem pracovními teplotami, neboť příliš nesouvisí s tepelnými ztrátami.

Pro zohlednění vlivu konstrukčních změn na celoroční tepelný zisk solárního kolektoru byla uvažována solární soustava pro přípravu teplé vody. Definice parametrů solární soustavy a okrajových podmínek byla převzata z pravidel pro výpočet kritéria roční produkce energie podle směrnice RAL-UZ 73 (Modrý Anděl, Německo) [3]. Výsledky simulace jsou uvedeny v Tab. 4. Pro výpočet srovnávaných variant se volí vždy taková plocha solárního kolektoru, aby solární pokrytí potřeby tepla bylo 40 % (v rozmezí 39.5 až 40.5 %). Z výsledků simulace provozu solárního kolektoru v systému solárního ohřevu s nízkým pokrytím (bez stagnačních

stavů) je patrné, že oproti předchozí analýze výkonnosti při konstantní teplotě se rozdíly mezi uvažovanými variantami významně smazávají.

Tab. 4 Výsledky simulace celoročního chování solární soustavy podle metodiky Modrý anděl

Varianty	Měrný tepelný zisk kolektoru [kWh/m ² .rok]	Varianty	Měrný tepelný zisk kolektoru [kWh/m ² .rok]
RK	503		
tloušťka izolace [mm]		tloušťka vzduchové mezery [mm]	
40	499 (-1 %)	20	499 (-2 %)
30	492 (-2 %)	10	492 (-1 %)
20	481 (-4 %)		
10	459 (-9 %)		
emisivita absorbéru [-]		rozteč mezi trubkami [mm]	
0.12	492 (-2 %)	50	517 (+3 %)

VÝSLEDKY EKONOMICKÉ ANALÝZY

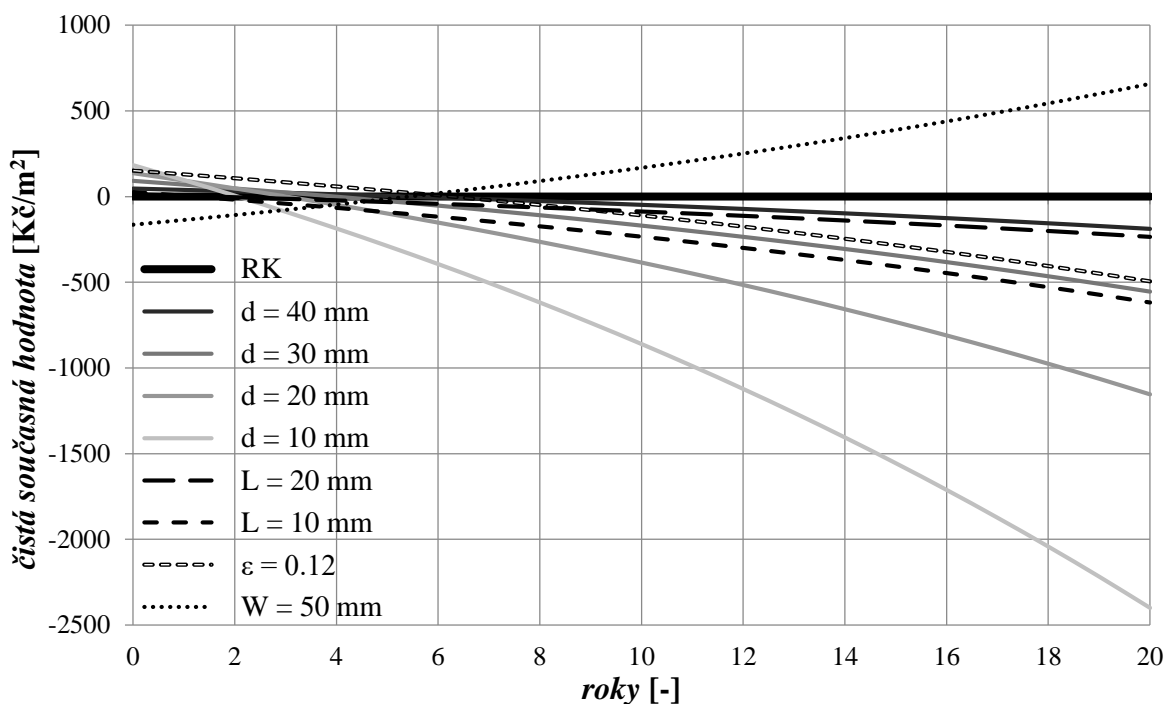
Dále bylo provedeno ekonomické porovnání všech variant solárního kolektoru zapojeného do solární soustavy pro přípravu teplé vody. Na základě spolupráce s výrobcem solárních kolektorů byla stanovena referenční cena kolektoru a vyhodnocen vliv změny jednotlivých parametrů na cenu kolektoru (viz Tab. 5).

Tab. 5 Vliv změny jednotlivých konstrukčních parametrů na cenu kolektoru (vztaženo k hrubé ploše kolektoru)

Varianty	Rozdíl ceny [Kč/m ²]	Varianty	Rozdíl ceny [Kč/m ²]
RK	x		
tloušťka izolace [mm]		tloušťka vzduchové mezery [mm]	
40	-46	20	-13.5
30	-91	10	-27
20	-137		
10	-183		
emisivita absorbéru [-]		rozteč mezi trubkami [mm]	
0.12	-151	50	+164

Pro vyhodnocení ekonomické návratnosti jednotlivých změn konstrukce byla uvažována průměrná cena tepelné energie 2 Kč/kWh s tempem ročního růstu 5 % [4]. Diskont, jako cena peněz zaplacených za danou variantu solárního kolektoru, byl uvažován na úrovni 0,1 % (předpokladu použití vlastních finančních prostředků uložených v běžné bance na běžném účtu).

Na základě výsledku simulace celoročního tepelného zisku solárního kolektoru zapojeného do systému pro přípravu teplé vody (Tab. 4) a vlivu změny ceny kolektoru při jednotlivých změnách byla provedena analýza ekonomické návratnosti odůvodněných změn konstrukce. Výsledky ekonomického porovnání jsou uvedeny graficky na Obr. 7. Doba hodnocení je 20 let.



Obr. 7 – Ekonomické porovnání uvažovaných variant kolektoru

Z grafu ekonomického srovnání vyplývá celkem zřetelně, že jedinou ekonomicky opodstatněnou změnou konstrukce plochého solárního kolektoru je změna rozteče mezi trubkami z původní hodnoty 100 mm do 50 mm, přičemž čistá současná hodnota investice po 20 letech provozu je 700 Kč/m² a diskontovaná návratnost takové změny je 5 let. Zbývající konstrukční změny vykazují záporné hodnoty bilance, což ukazuje na ekonomickou nevýhodnost změny konstrukce.

ZÁVĚR

Pomocí simulačního prostředí TRNSYS byly teoreticky porovnány různé konfigurace plochého solárního kolektoru. Pro porovnání byly využity dva odlišné přístupy. Výsledky simulace pro uvažované varianty poukázaly na možnost navrhování solárního kolektoru s vyšší pořizovací cenou, avšak s diskontovanou dobou návratnosti dodatečných nákladů na změnu konstrukce 5 let. Snižování rozteče mezi trubkami do 50 mm by bylo jak správným krokem k snížení doby návratnosti solárního kolektoru tak i snížení doby návratnosti celého kolektorového systému pro přípravu teplé vody. Zbývající konstrukční změny jsou z ekonomického pohledu nevýhodné.

LITERATURA

- [1] SHEMELIN, V., MATUŠKA, T. *TRNSYS type 205 – Detailed Model of Flat Plate Solar Collector*, UCEEB CVUT 2015.
- [2] MATUŠKA T. *Hodnocení výkonnosti solárních kolektorů*. Tzb-info, dostupné na <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/7091-hodnoceni-vykonnosti-solarnich-kolektoru>.
- [3] RAL-UZ 73 Basic Criteria for Award of the Environmental Label "Der Blaue Engel", Solar Collectors, dostupné na <http://www.blauer-engel.de>.
- [4] Ceny tepelné energie. Pražská teplárenská. Dostupné na <http://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/ceny-a-obchodni-podminky/ceniky/>

MOŽNOST AKUMULACE ENERGIE VE FORMĚ TEPLA A CHLADU DO AKUMULAČNÍCH PANELŮ

Jan Skovajsa, Martin Koláček, Martin Zálešák

Ústav automatizace a řídicí techniky, Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně
jskovajsa@fai.utb.cz, kolacek@fai.utb.cz, zalesak@fai.utb.cz

ANOTACE

Príspevek popisuje využití akumulace energie ve formě tepla a chladu pomocí specifického zařízení termálního panelu složeného z PCM (phase-change materiál). Akumulace tepla je možná s využitím termálního panelu, jež je napojen na solární tepelné kolektory, které slouží k ohřevu vody v trubkovém výměníku uloženém uvnitř termálního panelu. Jako zdroj energie pro ohřev vody bylo využito solárních kolektorů a také tepelného čerpadla. Nízká teplota ohřívání vody je vhodná právě pro použití v aplikaci s PCM panely, které mají teplotní omezení vlivem fázové změny v materiálu. Akumulace energie ve formě chladu do tepelně akumulčních panelů lze provést pomocí chladicí kapaliny získané z chladicího režimu tepelného čerpadla, nebo pomocí elektrických peltierových článků. Dalším specifickým využitím zdroje energie pro tepelně akumulční soustavu je využití fotovoltaických panelů.

ÚVOD

Jednou z nevýhod moderních lehkých konstrukcí je nedostatek tepelné hmoty, což může v létě vést k přehřívání, či problémům s udržení tepla v zimě. Tento problém je možné řešit využitím akumulace tepla, kterou lze definovat jako dočasné uložení tepelné energie. Zjednodušeně jde o nahromadění tepla v určitém tělese, konkrétně ve stavební konstrukci, kde při poklesu teploty v okolním prostoru dochází k předávání tepla do místnosti. Při plánování budov lze minimalizovat použití chladících zařízení, nebo dokonce se jim vyhnout úplně, a to především díky dobrým akumulčním vlastnostem konstrukčních materiálů.

Teplo lze akumulovat prostřednictvím citelného tepla, kde je důležitým parametrem měrná tepelná kapacita. Dále lze teplo akumulovat prostřednictvím latentního tepla, zde závislost souvisí s množstvím tepla skupenské přeměny daného materiálu. Specifickou metodou jsou PCM materiály, které kombinují jak teplo citelné tak teplo latentní.

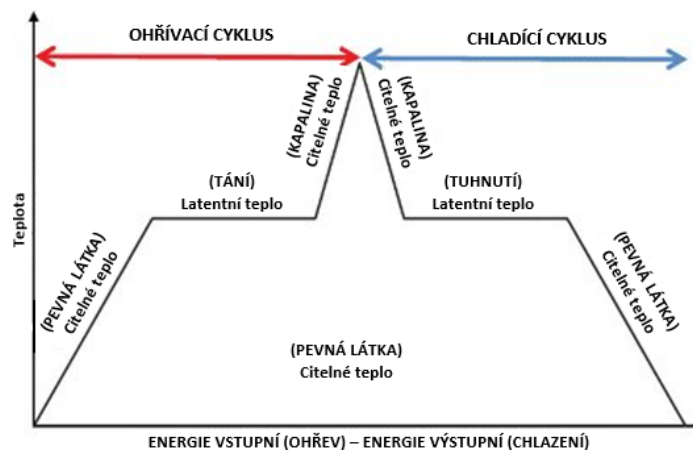
Stěžejním parametrem akumulace citelného tepla je měrná tepelná kapacita, která předurčuje možné množství tepelné energie, které je materiál schopen pojmout v závislosti na změně teploty akumulčního média. Výhodou tohoto procesu je schopnost téměř úplné návratnosti během procesu vybíjení a nabíjení a tedy i s neomezenou životností těchto cyklů.

$$Q = m \cdot \int_{T_f}^{T_i} c_p dT \quad (1)$$

V případě akumulace latentního tepla dochází ke stavu, kdy latentní teplo je právě to, které se spotřebovává nebo uvolňuje během změny skupenství daného materiálu. Tato změna probíhá za téměř konstantní teploty a právě během ní dochází k možnosti materiálu akumulovat velké množství energie, avšak může docházet k nepatrné objemové změně. Výsledné množství akumulované energie je dáno změnou entalpie. Určuje se tedy z hodnoty entalpie během procesu tání, v pevném stavu a v kapalném stavu.

$$\Delta Q = m \cdot \Delta h \quad (2)$$

Obr. 1 znázorňuje princip akumulace energie ve formě tepla a chladu u PCM materiálů.



Obr. 1 Citelné a latentní teplo při ohřevu a chlazení PCM materiálů [1]

V podstatě lze všechny materiály chápat jako PCM. Nicméně, požadované charakteristiky pro efektivní a předvídatelné ukládání tepelné energie vylučuje velké množství materiálů. Vhodnými PCM materiály pro oblast domácností jsou parafiny, příp. hydráty solí. PCM materiály založené na bázi parafinového vosku se směsí polymeru etylenu, využívají molekulární zapouzdření, jež je dáno vysokou koncentrací polymerní sloučeniny materiálu. Molekuly jsou navrženy tak, že spojení jednotlivých molekul vosku vytváří homogenní směs. Takto vytvořená struktura, představuje vysoce odolný materiál v širokém provozním teplotním rozsahu 0 až 40 °C a to s možností materiál řezat, či vrtat bez jakéhokoliv úniku materiálu během změny skupenství. [2]

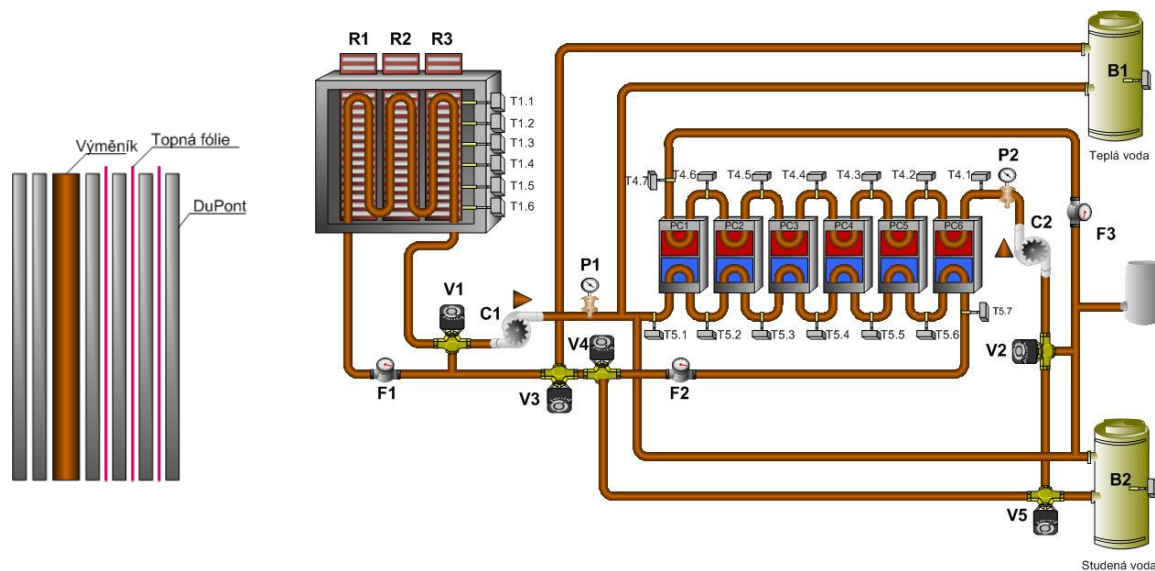
Dnešní klasické chladicí systémy se používají k chlazení místností, aby zajistily, že pokoje se ochladí na příjemnou teplotu ve všech klimatických podmínkách okolního prostředí. Tyto systémy jsou účinné, nicméně mohou mít i vyšší energetickou účinnost v případě, kdy využijí přirozené teplotní rozdíly mezi dnem a nocí pro účely chlazení. Zde se uplatňují PCM materiály, jež slouží k omezení nadměrných výchylek teploty pomocí ukládání přebytečného tepla během dne a jeho uvolněním v noci.

PCM materiály mohou být použity s využitím přirozeného zdroje tepla a chladu, například solární energie pro vytápění v průběhu večera nebo noci, příp. použití nočního chladu pro chlazení během dne. Dále lze PCM použít s umělými zdroji tepla nebo chladu. Kromě toho jsou i různé možnosti použití PCM. V budovách mohou být umístěny ve stavebních prvcích, jako jsou stěny nebo stropy, nebo mohou být uspořádány do samostatných zásobníků tepla nebo chladu. V budovách jsou PCM materiály nejčastěji využívány jako pasivní systémy. V chladírenských nebo tepelných úložištích slouží jako systémy aktivní, kde je teplo získáno z externích zdrojů tepla, je ukládáno mimo budovu a jeho dodání je na vyžádání. Zajímavou možností je zkoumaná a měřená technologie založená na aktivním systému v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. [3]

TECHNOLOGIE

Technologie aktivního systému pro ohřev a chlazení s akumulací tepla nebo chladu, na níž jsou prováděna měření, je umístěna v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Základem aktivního systému jsou dva akumulární panely o rozměrech 1,25 x 0,083 x 2,07 m, které jsou složeny z 6 vrstev termálních panelů DuPont Energain. Mezi druhou a třetí vrstvou těchto panelů se nachází tepelný výměník napojen na zásobníky teplé a studené vody, příp. na okruh termoelektrických článků. Systém je v daném složení možno využívat jak pro ohřev, tak i pro chlazení PCM panelů. Mezi vrstvami akumulárního panelu jsou dále umístěny tři elektrické topné fólie.

Hmotu termálních panelů tvoří směs polymeru etylenu a organického PCM parafinového vosku. Při teplotě pod 18 °C zůstává parafin v pevném skupenství. Jakmile teplota panelu vzroste, začne se parafin zkapalňovat a absorbovat teplo až do 515 kJ·m⁻² při 18 až 24 °C. Průměrný bod tání je 22 °C, což odpovídá standardním teplotním podmínkám v domácnosti. Tepelná kapacita akumulací hmoty je udávána výrobcem na 70 kJ·kg⁻¹ a více. [4]



Obr. 2 Schéma akumulčního panelu a použité technologie [5]

Na Obr. 2 je znázorněno schéma hydraulického zapojení celého systému, který využívá různé zdroje tepla, včetně využití obnovitelných zdrojů energie. Systém je primárně napájen z distribuční sítě 230 VAC a současně jej lze napájet také z fotovoltaických panelů, které získanou elektrickou energii pomocí měniče dodávají do elektrické sítě.

Pro daný systém je využito 11,25 m² polykrystalických fotovoltaických panelů, přičemž účinnost fotovoltaického celku byla v dřívějších měřeních stanovena na 11 až 13 %. Technologie je dále vybavena termoelektrickými články, které mohou být také napájeny fotovoltaickými panely, příp. elektrickou energií z distribuční sítě. Ohřev zásobníku teplé vody je možné provádět pomocí solárních kolektorů, příp. pomocí tepelného čerpadla vzduch/voda. Dané tepelné čerpadlo je také využíváno pro vychlazování zásobníku se studenou vodou. [6]

PROVOZ TECHNOLOGIE

Technologie systému pro akumulaci tepla nebo chladu lze provozovat v několika režimech, podle aktuálních požadavků. Systém lze z neširšího hlediska provozovat jako standardní pasivní systém, který akumuluje teplo nebo chlad, což zmenšuje teplotní špičky a udržuje tak stabilnější průběh teplot v kontrolované místnosti během dne a noci. Při provozu v aktivním režimu je možné teplotní parametry místnosti v omezených rozmezech ovlivnit, pomocí akumulace tepla či chladu dodaného z externích zdrojů, příp. odvedení akumulované energie. V následujících bodech textu jsou popsány základní režimy aktivního provozu.

- **Ohřev termálních panelů pomocí topných fólií**

Elektrické topné fólie jsou instalovány mezi jednotlivé vrstvy panelu a jsou rozděleny do tří sekcí, kde každá disponuje výkonem 600 W. Spínání jednotlivých sekcí je závislé na teplotě panelu, příp. i na výkonu fotovoltaických článků. [5]

- **Ohřev termálních panelů ze zásobníku teplé vody**

Složený termální panel je opatřen trubkovým výměníkem pro předávání tepla z hydraulické části technologie, kde jako teplotonosná látka využita voda. Teplá voda v zásobníku může být ohřívána jakoukoliv jinou instalovanou technologií, která je k dispozici. Pro danou instalaci je možné použít tepelné čerpadlo, solární kolektory i elektrokotel.

- **Chlazení termálních panelů ze zásobníku studené vody**

Podobně jako u zásobníku s teplou vodou je technologie opatřena zásobníkem se studenou vodou. Vodu v zásobníku lze chladit pomocí chladicího režimu tepelného čerpadla.

- **Chlazení termálních panelů pomocí termoelektrických článků**

Peltierovy články jsou použity pro režim chlazení, přičemž jsou schopny dosáhnout nízkých teplot, avšak je nutné zajistit chlazení druhé strany těchto článků, jelikož produkují velké množství odpadního tepla. Pro instalovaný systém je využit hydraulický okruh pro odvod chladu z článků do termálních panelů a okruh pro odvod odpadního tepla z peltierových článků. Teplotu termálních panelů lze regulovat pomocí počtu zapnutých termoelektrických článků. Počet zapnutých článků je rovněž závislý na množství dodávané energie z fotovoltaických panelů. [5]

- **Odebírání tepla, příp. chladu z termálních panelů**

Systém lze také používat bez aktivního chlazení či ohřevu, příp. lze akumulovanou energii v panelech odevzdat do zásobníku s teplou, příp. studenou vodou.

MĚŘENÍ

Cílem měření bylo zjistit průběh teplot v režimu ohřevu i chlazení. Měřeny byly různé parametry v rámci celé technologie, nejdůležitější bylo měření teplot uvnitř panelů, teploty jejich povrchů, průtok teplotonosného média a jeho teploty na vstupu a výstupu z výměníku uvnitř panelů. Dále byla měřena teplota ve sledované místnosti a teplota vnějšího prostředí pomocí vlastní meteorologické stanice umístěné na střeše budovy fakulty.

Povrch jednoho panelu je natřen matnou černou barvou, která zvyšuje emisivitu povrchu a tím také součinitel přestupu tepla. V předchozím výzkumu byl průměrný součinitel přestupu tepla pro neupravený povrch stanoven na hodnotu $4, \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ a na hodnotu $8,29 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pro panel s povrchovou úpravou. Dalším důležitým parametrem je také časová konstanta, jež činí 6,8 hodin pro neupravený povrch a 5,5 hodiny pro povrch upravený. Jeden samostatný PCM panel DuPont Energain má časovou konstantu rovnu 75 minutám. [7]



Obr. 3 Sestava povrchově upraveného a neupraveného akumulčního panelu

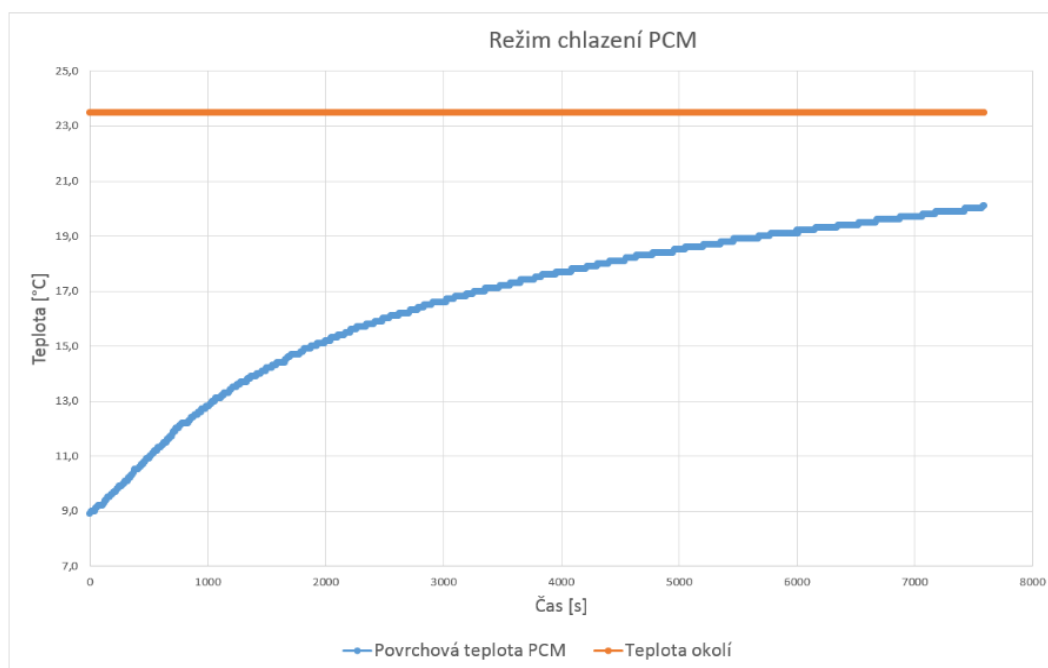
Z měřených parametrů technologie, které zahrnují průtoky a vstupní a výstupní teploty teplotonosného média, bylo možné zjistit množství tepla, příp. výkon, který byl předáván nebo odebírán akumulacím panelům pomocí tepelného výměníku. Teplo a aktuální předávaný výkon lze stanovit pomocí rovnice (1) a rovnice následující.

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\theta \quad (3)$$

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření ohřevu PCM materiálů bylo již mnohokrát zkoumáno, dalším specifickým využitím je použití akumulacím materiálů formou chladicího prvku. Důležitým parametrem samotné akumulace materiálu je měrná tepelná kapacita. V oblasti nízkých teplot 10 až 21 °C dosahuje u tohoto PCM materiálu hodnoty kolem 6800 J.kg⁻¹.K⁻¹. U chladicích zařízení je hlavním omezujícím faktorem riziko kondenzace vodní páry. Je tak nutné zajistit teplotu přírodní vody do chladicího zařízení takovou, aby teploty povrchu byly minimálně o 1 K vyšší, než je teplota rosného bodu proudícího vzduchu v místnosti.

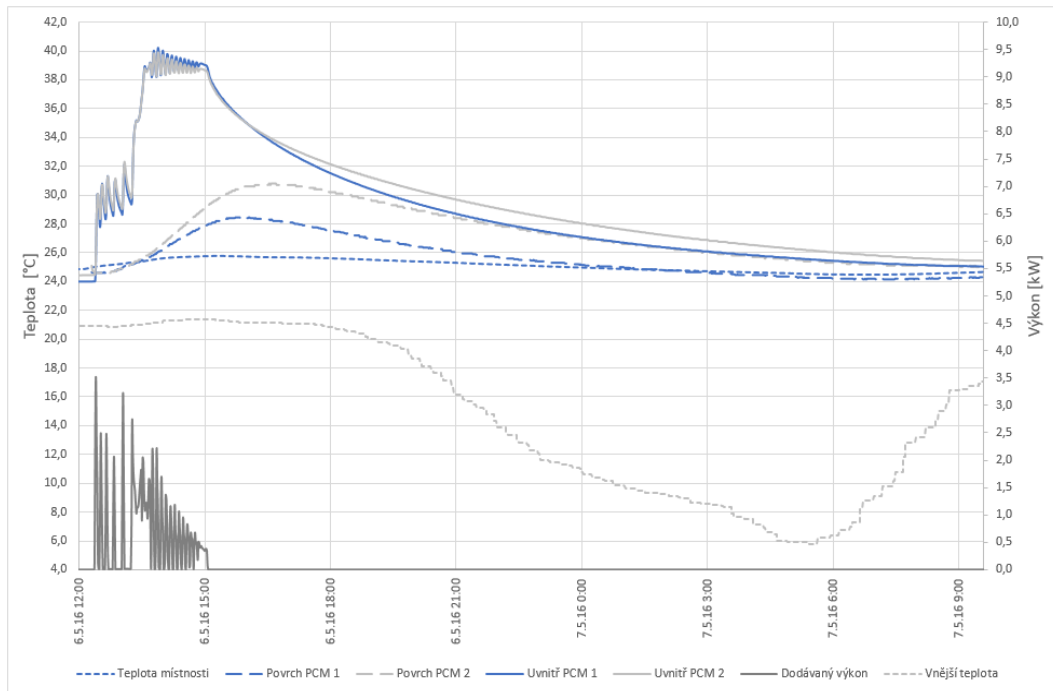
V následujícím obrázku 4 jsou zobrazeny výsledky měření samostatného PCM materiálu, který byl vychlazen v šokové komoře na teplotu 9 °C a následně byl umístěn do místnosti s teplotou vzduchu 23,5 °C. Jednalo se o zkušební vzorek materiálu o rozměrech 0,5 x 0,5 m tloušťky 5 mm. Z grafu je patrné chování tohoto materiálu a to především z hlediska doby, za kterou materiál dosáhl teploty okolí. Tento materiál tak představuje atypickou možnost využití v chladicích zařízeních s teplotním rozsahem pod oblastí změny skupenství, to především díky svým dobrým parametrům.



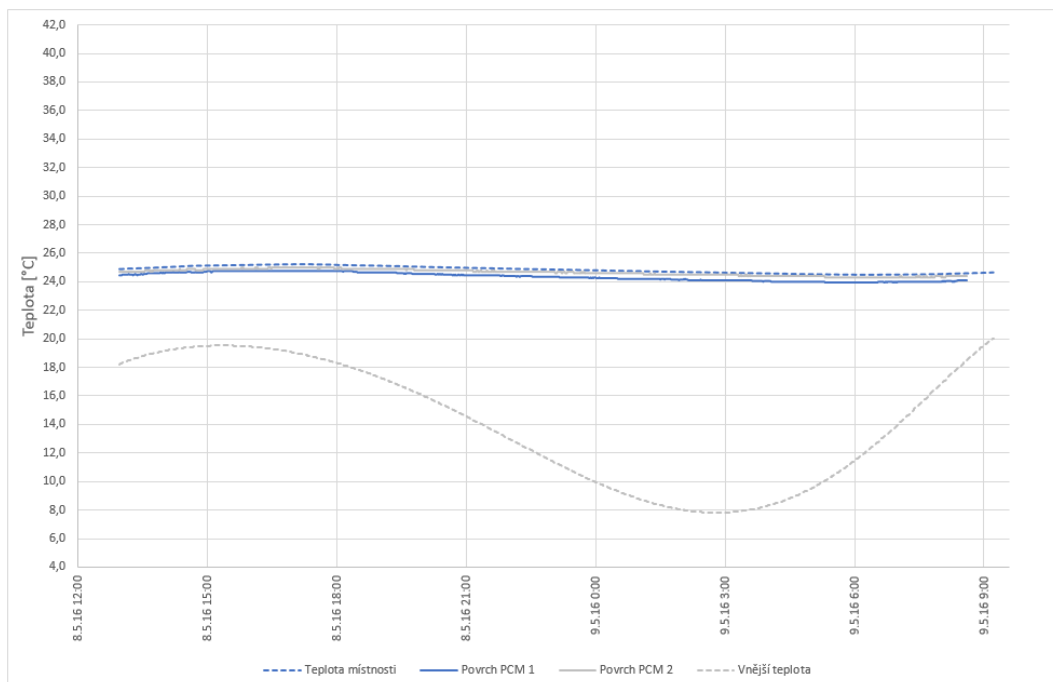
Obr. 4 PCM materiál s počáteční teplotou 9 °C umístěn v místnosti se stálou teplotou 23,5 °C

Na instalované technologii byla provedena tři různá měření. První měření představovalo použití technologie v aktivním režimu ohřevu, viz Obr. 5. Následující měření znázorňovalo standardní pasivní režim provozu, viz Obr. 6. Poslední měření se zaměřilo na aktivní režim chlazení, viz Obr. 7. Pro přípravu teplé a studené vody v zásobnících bylo využito solárních kolektorů a tepelného čerpadla.

Režim aktivního ohřevu, viz Obr. 5, zobrazuje průběh ohřevu akumulčních panelů, přičemž je možné pozorovat nejdříve pomalejší růst povrchové teploty, později také rychlý nárůst teploty. Tento jev nastal ve chvíli, kdy se už se přestává akumulovat latentní teplo, ale materiál absorbuje pouze teplo citelné. Akumulační panely byly schopny navýšit teplotu vzduchu v místnosti a udržovat ji i během následné chladnější noci. Energie dodána do panelů byla 1,9 kWh. V pasivním režimu, kdy nejsou v provozu jiné aktivní části systému, byly akumulční panely schopny udržovat stabilní průběh teploty vzduchu v místnosti, viz Obr. 6.

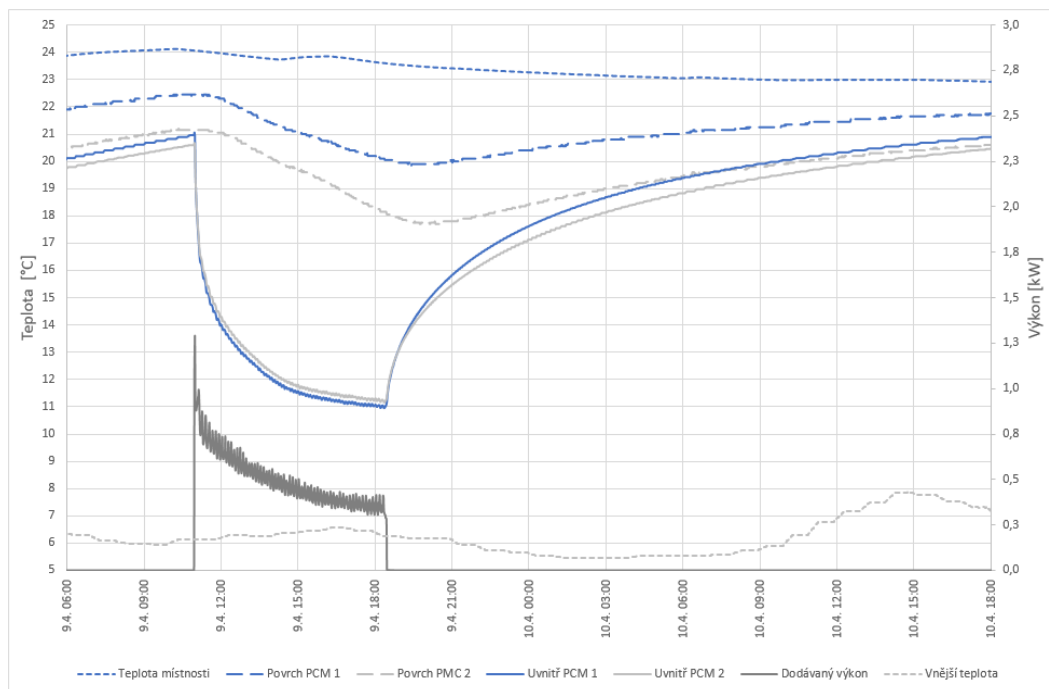


Obr. 5 Aktivní režim technologie – ohřev



Obr. 6 Pasivní režim technologie PCM

U aktivního režimu chlazení, viz Obr. 7, je možné sledovat průběh teplot akumulčních panelů a teploty vzduchu v místnosti. Je možné vidět, že vliv úpravy povrchu panelů je znatelný. Změna povrchové teploty neupraveného panelu z 21,2 °C na 17,7 °C a změna pro upravený povrch z 22,4 °C na 19,8 °C trvala téměř shodně cca 9 hodin. Při tomto chlazení byla z akumulčních panelů odebrána celková energie o hodnotě 3,7 kWh. Odebírání tepelné energie z místnosti, tj. zpětný ohřev akumulčních panelů, trvalo cca 24 hodin.



Obr. 7 Aktivní režim technologie - chlazení

ZÁVĚR

Článek se zabýval možností využití PCM akumulčních materiálů v aktivním režimu provozu s možností využití různých zdrojů energie ve formě tepla nebo chladu. Pasivní systémy jsou použitelné především k eliminaci teplotních špiček. Instalovaná technologie umožňuje, na rozdíl od pasivních systémů, také omezené změny tepelných parametrů prostředí sledované místnosti. Problematickým faktorem akumulčních panelů je zejména nízký energetický tok, což vychází z nízkého součinitele přestupu tepla. Nicméně i tak je možné daný aktivní systém využívat, pro dosažení lepších hodnot tepelné pohody v místnosti. V dalších fázích výzkumu je možné zvýšit přestup energie pomocí nucené konvekce.

LITERATURA

- [1] SUTTERLIN, William. A brief comparison of ice packs, salts, paraffins and vegetable-derived phase change materials. In: *PureTemp* [online]. Plymouth: PureTemp, 2014 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.puretemp.com/stories/a-brief-comparison-of-ice-packs-salts-paraffins-and-vegetable-derived-phase-change-materials>
- [2] SÁNCHEZ, Luz, Paula SÁNCHEZ, Antonio DE LUCAS, Manuel CARMONA a Juan F. RODRÍGUEZ. Microencapsulation of PCMs with a polystyrene shell. *Colloid and Polymer Science* [online]. 2007, 285(12), 1377-1385 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1007/s00396-007-1696-7. ISSN 0303-402x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00396-007-1696-7>
- [3] PASUPATHY, A., R. VELRAJ a R.V. SEENIRAJ. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial

- establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, **12**(1), 39-64 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.010. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106000724>
- [4] Energain® PCM Tepelně akumulací materiál. In: *DuPont™ Energain® - A thermal mass solution that's ready to make its mark* [online]. 2007 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Energain/en_GB/index.html
- [5] HABROVANSKÝ, Tomáš. *Řízení a monitorování vytápěcího a chladičho zařízení v laboratoři řídicích systému budov*. Zlín, 2008. Dostupné také z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/6910>. Diplomová práce. FAI UTB ve Zlíně.
- [6] CHROBÁK, Pavel, Stanislav SEHNÁLEK a Martin ZÁLEŠÁK. Verification options of the effectiveness for photovoltaic panels. In: *Electrorevue* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2014, s. 7 [cit. 2016-04-10]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/moznosti-overeni-ucinnosti-fotovoltackych-panelu--verification-options-of-the-effectiveness-for-photovoltaic-panels/>
- [7] KOLÁČEK, Martin a Martin ZÁLEŠÁK. The parameters of the Thermal panel based on a Phase Change Materials. In: *International Journal of Materials*. International Journal of Materials. Volume 3, 2016. Pp: 7-12. ISSN 2313-0555

SEZNAM OZNAČENÍ

c_p	měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
T_i	počáteční teplota materiálu	[K]
T_f	konečná teplota materiálu	[K]
h	entalpie	[J.kg ⁻¹]
Q	množství dodané nebo uvolněné energie	[J]
m	hmotnost	[kg]
P	výkon	[W]
\dot{m}	hmotnostní průtok	[kg.s ⁻¹]

This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic within the National Sustainability Programme project No. LO1303 (MSMT-7778/2014) and also by the European Regional Development Fund under the project CEBIA-Tech No. CZ.1.05/2.1.00/03.0089 and also by internal grant agency of Tomas Bata University in Zlin no. IGA/CEBIA-Tech/2016/001

CHLADIVA PRO TEPELNÁ ČERPADLA A NOVÁ LEGISLATIVA

Štěpán Stojanov¹, Marian Formánek²

¹Svaz chladicí a klimatizační techniky

²VUT Brno, Fakulta stavební, ústav TZB

stojanov@schkt.cz, formanek.m@fce.vutbr.cz

ÚVOD

Příspěvek se zabývá novou legislativou pro práci s F plyny, platnou od roku 2015. Z nového nařízení EK č. 517/2014 vyplývají nové požadavky a povinnosti pro provozovatele chladicích zařízení a nové povinnosti certifikovaných osob. Dopady zákazů a omezení na trh s chladiivy, výhled do budoucnosti. V současné době probíhá implementace tohoto nařízení do české legislativy a do konce roku 2016 je tzv., přechodné období, kdy současně platí předešlá legislativa i nové nařízení EK.

NAŘÍZENÍ EK Č. 517/2014

Nařízení vstoupilo v platnost 1. 1. 2015, nahrazuje Nařízení ES č. 842/2006, hlavní body regulace zůstávají v platnosti. Kromě prevence zavádí nové nařízení EK 517/2014 zákazy a omezení.

Společný základ:

Opatření zavedení Nařízením 842/2009 zůstávají v platnosti:

- Povinné vedení záznamů
- Označování zařízení
- Pravidelné kontroly těsnosti
- Certifikace osob

Zákon č. 73/2012 a vyhláška č. 257/2012 zůstávají dál v platnosti, dokud nebude hotová jejich novelizace (asi v roce 2016). Stávající evidenční knihy a štítky zůstávají beze změny.

Nové povinnosti provozovatelů – kontrola těsnosti:

- Provozovatel je povinen zajistit znovuzískání chladiiva a kontaminovaného oleje a deinstalaci zařízení certifikovanou osobou.
- vyřazení z provozu a o dalším naložení s chladiivem a olejem musí být proveden záznam.

Zůstávají podmínky pro kontroly těsnosti určitých zařízení, kontroly zařízení se provádějí:

- Při uvádění zařízení do provozu
- V pravidelných intervalech (1x12m/1x 6m/1x 3m)
- Do jednoho měsíce po opravě
- Pouze certifikovanou osobou

Kontroly těsnosti se týkají:

- Stacionární chladicí zařízení
- Stacionární klimatizační zařízení
- Stacionární tepelná čerpadla
- Nově - chladicí jednotky chladírenských nákladních vozidel a přívěsů

Podle nového nařízení EK 517/2014 se mění systém stanovování limitů pro kontroly těsnosti z kg se přechází na:

TUNY EKVIVALENTU OXIDU UHLIČITÉHO (xx t CO₂ eq)

Změna limitů:

3kg → 5 tun CO₂-eq (6 kg → 10 t CO₂-eq)

30kg → 50 tun CO₂-eq

300kg → 500 tun CO₂-eq

Článek 2, §7 definuje ekvivalent jako: “Množství skleníkových plynů vyjádřené jako součin hmotnosti skleníkových plynů v metrických tunách a jejich potenciálu globálního oteplování”.

Hmotnost chladiva v tunách x GWP chladiva = **t CO₂ eq**

Limitní hodnoty se liší podle hodnoty GWP každého chladiva

Příklady limitů pro běžně používaná chladiva:

R134a = 3,50 kg

R404A = 1,27 kg

R407C = 2,82 kg

R410A = 2,39 kg

R507 = 1,25 kg

R32 = 7,41 kg

Hodnoty GWP jsou v příloze N. 517/2014

Přechod na t CO₂ eq

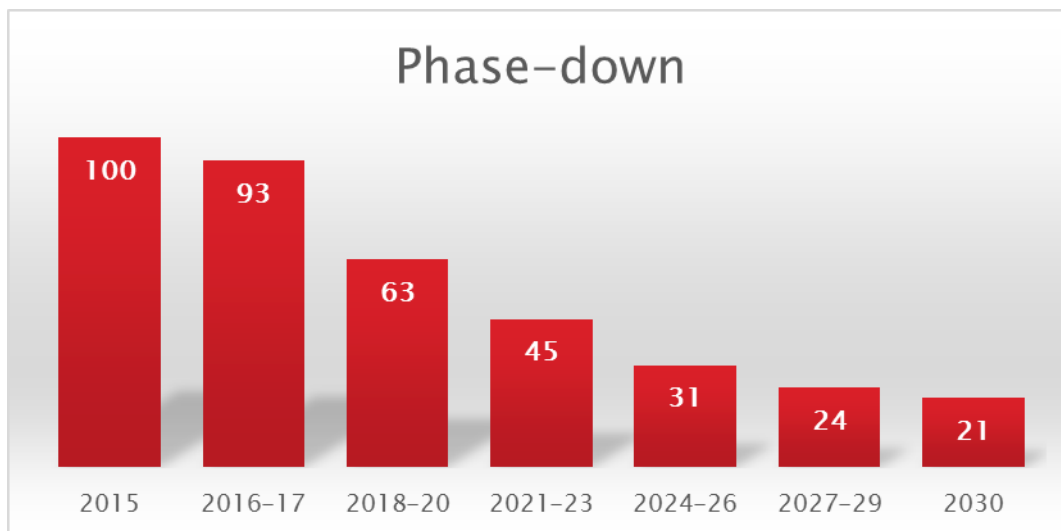
- 1. 1. 2015 pro zařízení s min. obsahem 3kg (stávající spodní hranice v kg, zůstává do 31. 12. 2016)
- od 1. 1. 2017 pro zařízení s min. 5 t CO₂ eq
- (tj. i pro zařízení, která mají méně jak 3 kg chladiva)
- Zařízení s méně jak 5 t CO₂ eq se nadále kontrolovat nemusí

Nové povinnosti certifikovaných osob - vedení záznamů

- Nově musí certifikovaná osoba uchovávat kopie záznamů po dobu pěti let!
 - Na základě konzultace s MŽP by měla stačit i kopie záznamů pořízená fotoaparátem mobilního telefonu a poté vytisknutá a uchovaná v papírové podobě.
 - Na začátek záznamu doporučujeme uvádět evidenční číslo zařízení
- Uvažuje se o digitální podobě záznamů, kde by tato povinnost odpadla.
- Od 1.1.2015 je prodej F-plynů za účelem instalace, servisu, údržby nebo opravy zařízení, povolen pouze podnikům, které jsou držiteli příslušného certifikátu či osvědčení!!!
 - (platí pro certifikáty dle 303/2008 a 307/2008)
- Distributoři chladiv musí kontrolovat a zaznamenávat čísla certifikátů osob, kterým F-plyny prodávají

Dopady zákazů a omezení – Phase-down

Phase-down znamená postupné snižování celkového množství F-plynů na trhu v EU. V roce 2015 došlo ke zmražení celkového množství a příští rok dojde k redukci o 7%, Cílem je dosáhnout v roce 2030 hodnoty 21% v porovnání s referenčními roky 2009-12, viz obr. 1.



Obr. 1 Graf postupného snižování množství F-plynů na trhu v EU

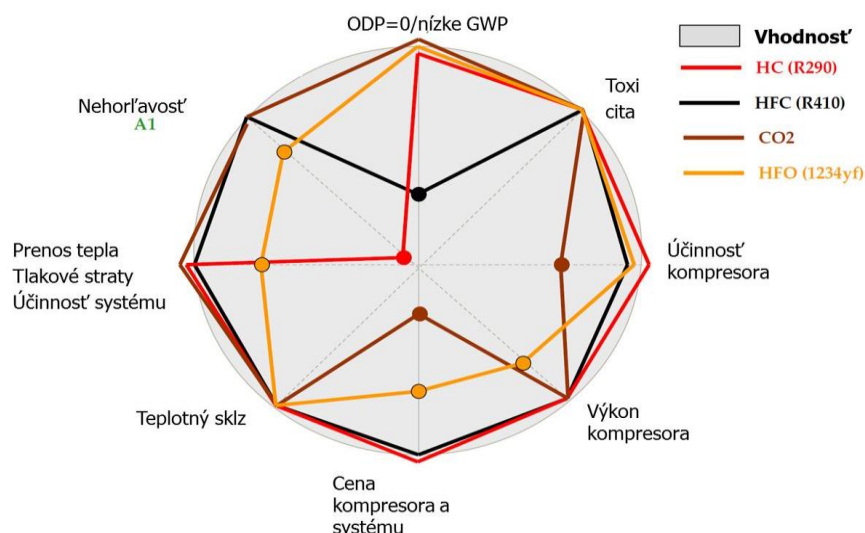
Dopady zákazů a omezení budou především v rostoucí ceně chladiv s vysokým GWP a od roku 2017 mohou být zavedeny poplatky. Nárůst cen je patrný již v roce 2014 až 2015.

- ▶ R410 v roce 2014 = 125 Kč/kg
- ▶ R410 v roce 2015 = 158 Kč/kg a další růst na cca 170 Kč/kg

Dopady zákazů a omezení – chladiva s nízkým GWP

- ▶ Výrobci chladiv a zařízení se budou snažit prosazovat chladiva s co nejnižším GWP
- ▶ Nejprve F-plyny s GWP do 2000 jako náhradu za R22 a R404A
- ▶ R134a končí do 2017 v autoklimatizacích
- ▶ Na trh přicházejí směsi HFO s velmi nízkým GWP, zatím málo dostupné a drahé
- ▶ Více aplikací s přírodními chladivy (CO₂, uhlovodíky, čpavek, voda)

Výhled do budoucnosti a hledání ideálního chladiva splňující požadavek nízkého GWP a ostatních fyzikálních a chemických vlastností nutné pro ideální chladivo. Vlastnosti chladiv jsou vyobrazeny na obr. 2.



Obr. 2 Vlastnosti chladiv – hledání ideálního chladiva

Vlastnosti chladiv

Pokud se požaduje u chladiva nízké GWP, začíná chladivo spadat do málo hořlavých chladiv (viz Tab. 1). Pro tyto chladiva byla vytvořena nová třída hořlavosti a to A2L.

Tab. 1 Vlastnosti chladiv dle ISO 817 (ASHRAE 34)

	Rychlost hoření	Nízká toxicita	Vysoká toxicita
Nehořlavé		A1	B1
Málo hořlavé	< 10 cm/s	A2L	B2L
Hořlavé	≥ 10 cm/s	A2	B2
Vysoce hořlavé		A3	B3

Příklady hořlavosti některých chladiv:

A2L R32 – 6,32 cm/s, R1234yf – 1,5 cm/s

A2 R152a – 23 cm/s

A3 R290(propan) – 43 cm/s

B2L R 717 (amoniak) – 7,7 cm/s

ALTERNATIVNÍ CHLADIVA PRO TEPELNÁ ČERPADLA

V současné době se pro tepelná čerpadla využívají chladiva R407C = 2,82 kg (GWP = 1774) a R410A = 2,39 kg (GWP = 2088). Pro uživatele tepelných čerpadel to znamená od obsahu 2,82 kg pro R407C a 2,39 kg pro R410A, provádět povinné kontroly těsnosti. Provoz tepelných čerpadel zvláště systému vzduch–voda, vzduch–vzduch bývá při velmi velkém rozsahu vypařovacích teplot. Nalezené vhodné alternativy splňující požadavky tepelných čerpadel i splnění požadavku NK 517/2014 je velmi obtížné.

Dostupné potenciální alternativy k R134a a R410

R744 – CO₂ (vysoké tlaky, náročná konstrukce)

R32 – bezpečnostní třída A2L, jednosložkové, nízká cena

R1234yf – A2L, zatím moc drahé

Novinky (začátek výroby/testy)

R447A

R450A

Opteon XL41

R450A – Solstice® N-13

- Náhrada za R134a, tepelná čerpadla, chillery, chlazený nábytek, chladiče nápojů, vysokotlaký stupeň kaskád CO₂
- GWP STR = 547
- Zeotropní směs R134a/R1234ze 42%/58%
- Vypařovací teplota: -23,1 °C při p_{bar}
- Zařazení: A1, nehořlavé
- Olej: POE

R32 – Daikin

- Náhrada za **R410**, klimatizace
- R410 = 50% R32 + 50% R125
- GWP = 675
- Vypařovací teplota: -51,65 °C při p_{bar}
- Zařazení: **A2L**, hořlavé, těžce vznětlivé
- Olej: POE

R447A – Solstice® L-41

- Náhrada za R410, klimatizace, tepelná čerpadla
- GWP STR = 583
- Zeotropní směs R32/R125/R1234ze
- Zařazení: A2L, hořlavé, těžce vznětlivé
- Olej: POE

Opteon XL41

- Náhrada za R410 pro TČ, klimatizace
- GWP 460
- Bezpečnostní třída A2L
- Výrobce – DuPont

Ve vývoji další náhrady jako chladiva R134a a R410A.

R134a	Arkema	ARM-41a	R-32/R-134a/R-1234yf
	Arkema	ARM-42a	R-134a/R-152a/R-1234yf
	Daikin	D4Y	R-134a/R-1234yf
	DuPont	XP-10	R-134a/R-1234yf
	Mexichem	AC5	R-32/R-152a/R-1234ze(E)
R410A	Arkema	ARM-70a	R-32/R-134a/R-1234yf
	Daikin	D2Y-60	R-32/R-1234yf
	DuPont	DR-5	R-32/R-1234yf
	Mexichem	HPR1D	R-32/R-744/R-1234ze(E)

ZÁVĚR

Splnění nového nařízení EK č. 517/2014 vyplynou nové požadavky a povinnosti pro provozovatele chladicích zařízení a nové povinnosti certifikovaných osob. Zároveň splněné požadavky omezí produkci skleníkových plynů v oblasti chladicích, klimatizační techniky a tepelných čerpadel. Omezení produkce skleníkových plynů a zpomalení globálního oteplování je celosvětovou prioritou v ochraně životního prostředí.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 13 313 - chladicí zařízení a tepelná čerpadla, odborná způsobilost osob, 1.6.2011.
- [2] ČSN EN 378 - chladicí zařízení a tepelná čerpadla, bezpečnostní a environmentální požadavky, 1. 12. 2012.
- [3] Svaz chladicích a klimatizační techniky. *Domovská stránka*, aktualizováno, Dostupné z: < <http://www.chlazení.cz/legislativa/regulace-f-plynu> >.
- [4] Nařízení ES č. 842/2006, ze dne 17. 5. 2006
- [5] Zákon č. 73/2012, 7. 2. 2012, ze dne 12. 6. 2012
- [6] Vyhláška č. 257/2012
- [7] Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 517/2014, ze dne 16. 4. 2014

SEZNAM OZNAČENÍ

GWP global warming potential – potenciál globálního oteplování
t CO₂ eq množství skleníkových plynů vyjádřené jako součin hmotnosti skleníkových plynů v metrických tunách a jejich potenciálu globálního oteplování

NÁRODNÍ POKYNY PRO SKLADOVÁNÍ PELET A VÝSTAVBU PELETOVÝCH SKLADŮ

Vladimír Stupavský

Česká peleta, z.s.p.o. (Klastr Česká peleta)
stupavsky@ceska-peleta.cz

ANOTACE

Aktuálně vydaná příručka pro výstavbu sil a skladování dřevních pelet popisuje požadavky na ochranu kvality paliva a tím zajišťuje bezpečné skladovací podmínky pelet pro obě zúčastněné strany – instalační techniky i spotřebitele. Jsou zde zahrnuty jak technické požadavky na sklady s peletami, tak informace ohledně bezpečného a hospodárneho provozu těchto skladů.

ÚVOD

Vytápění dřevními palivy posiluje v českých domácnostech, firmách i státní správě. Svědčí o tom tisíce instalací i spokojených uživatelů. Kdo dřevními peletami vytápí, šetří nejen životní prostředí, ale i svoje finance. Nemusí slevovat z navyklé pohody, kdy kotel řídí termostat umístěný v obývacím pokoji a vydává kotli pokyny: teď se zapal, teď si přidej palivo, teď se vypni. Doba i nároky na komfort se značně posunuly a automatické kotle na pelety naše očekávání s přehledem splňují.

Pokud má vše fungovat zcela automaticky, je důležité dbát i na správnou instalaci a péči o palivové sklady na pelety – peletová sila. Ty musí splňovat řadu požadavků, které zajišťují, aby byla zachována vysoká kvalita pelet a zaručena bezpečnost provozu.

Příručka nenahrazuje přesné technické pokyny pro používání podávacích zařízení ani pokyny výrobců peletových kotlů, ale má přednost před doporučeními distributorů pelet a projektantů. Při výstavbě a provozu peletového sila musí být každopádně používány výrobcem určené díly, pomůcky pro konkrétní peletové kotle, dodržovány předpisy závozu paliva a systémy skladování.

Profesionální instalace je základním stavebním kamenem úspěšného provozu peletových sil.

Peletové skladovací systémy

Dnes je běžné vybudovat sklady pro pelety ve stávajících místnostech nebo sklepech, často zbudovaných majitelem nemovitosti. Avšak mezi výhody na zakázku stavěných a sériově vyráběných skladů patří např. dobré využití prostoru a snadný přístup k plnicím přírubám. Špatně navrhované sklady, postavené svépomocí, způsobují značné problémy a rizika.

Sériově vyráběné skladovací systémy nabízejí prověřené řešení, zahrnující vhodné plnicí a odsávací potrubí, které zajistí, že je dodržována požadovaná kvalita a bezpečnost provozu. Z tohoto důvodu je doporučeno používat tyto skladovací systémy.

Sklady postavené svépomocí musí být navrženy, postaveny a vybaveny kvalifikovanými profesionály.

Kapacita skladu – kolik je potřeba místa?

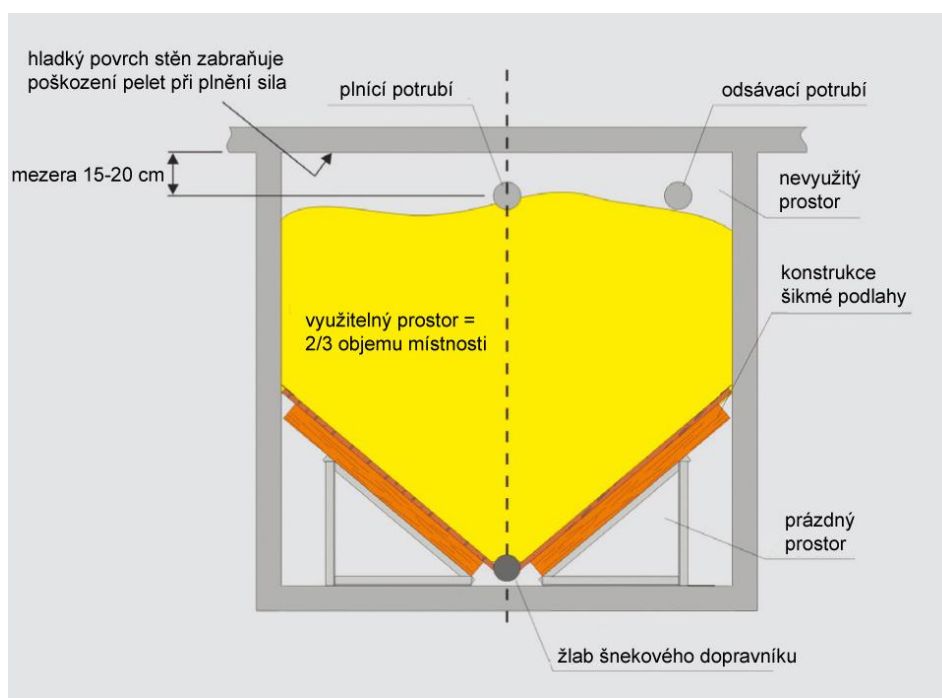
Celosezónní sklady pelet pro spotřebitele (jmenovitý výkon kotle < 70 kW) musí pojmut roční spotřebu pelet. Doporučená kapacita skladu se odvíjí od nároků budovy na vytápění. Nároky na vytápění mohou být spočítány odborníkem, nebo stanoveny odhadem podle

spotřeby paliva předchozího topného systému. Pokud je topný systém přebudován z olejového nebo uhelného na peletový, spotřeba pelet v kilogramech bude oproti spotřebě oleje v litrech dvojnásobná, resp. obdobná se spotřebou hnědého uhlí (původní ručně plněný HU kotel). Hodnoty uvedené v Tab.2 jsou založeny na moderním olejovém topném systému s hodnotami podobnými modernímu peletovému systému. Pokud jsou vyměňovány starší neefektivní olejové topné systémy, může být spotřeba pelet a doporučená kapacita skladu zredukována o 20 %.

Tab. 1 Doporučená kapacita skladu pro peletové kotelny

Nároky na topení v kWh/rok	5 000	10 000	20 000	50 000
Spotřeba oleje v l/rok	625	1 250	2 500	6 250
Požadavky na pelety v kg/rok	1 250	2 500	5 000	12 500
Doporučená kapacita skladu v m ³	2,5	5	10	25

Reálná kapacita skladu je vždy menší než teoretický celkový objem místnosti. Kapacita se zmenšuje s dvojitou nebo šikmou podlahou. Pelety se nenaplní více, než nad spodní hranu plnicích přírub.



Obr. 1 Kapacita skladu

Při plánování skladů pro velký topný systém (jmenovitý výkon kotle > 70 kW) musí být zváženy i jiné faktory. Kapacita skladu musí být dimenzována tak, aby pojala více než maximum kapacity největšího přepravního vozidla, které bude možné k dodávce použít.

Jelikož je potřeba mít kapacitu skladu větší než je kapacita přepravního vozidla, mohou být úplné dodávky přijímány, aniž by musel být sklad pokaždé vyprázdněn. Přístup k silu bude určovat největší auto, které může pelety dodat. Doporučuje se spojit se s vybraným dodavatelem volně ložených pelet před tím, než je vybavení pro peletové silo objednáno a podle kapacity největšího vozidla naprojektovat velikost skladu.

Dodávka pelet na sklad

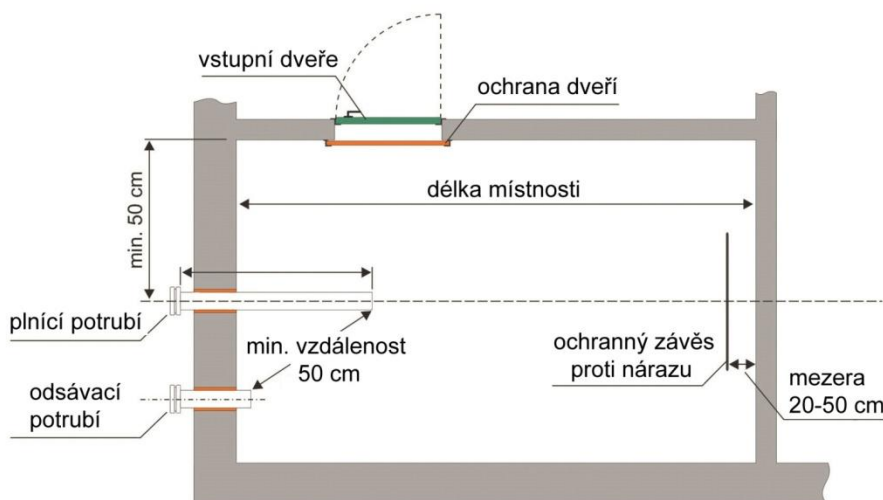
Volně ložené dřevní pelety mohou být dodávány cisternovými vozidly, které foukají pelety dovnitř do skladu. Je potřeba co nejvíce zkrátit transportní délku foukání, omezit změny směru (časté ohyby) a výškový rozdíl mezi vozidlem a skladem. To vše zvyšuje mechanické opotřebení pelet během foukání a zvyšuje podíl jemných částic. Plnicí hadice a instalované plnicí potrubí musí být co nejkratší (celková délka by neměla přesáhnout 30 m). Chytrý projekt plnicí trasy může pomoci vzdálenost zkrátit a tím zajistit takové podmínky foukání, které neohrozí kvalitu pelet.

Je potřeba vzít v úvahu následující:

- Přístup musí být vhodný pro všechny typy peletových cisteren, šířka cesty pro příjezd musí být min. 3,5 m a bez výškového omezení (min. nad 4 metry), které by mohlo ztěžovat přístup k místu vykládky. Zvažte také sklon a povrch přístupové cesty v zimě, nebo omezení jinými vozidly parkujícími podél silnice.
- Musí být brána v potaz celková hmotnost vozidla a jeho poloměr otáčení.
- Vozidlo musí být schopno správně a bez zbytečných průtahů zaparkovat, doba vykládky může trvat i přes hodinu.
- Plnicí a odsávací cesty by měly vést venkovním trvale ukotveným potrubím. Pokud není možné použít toto trvale instalované potrubí, musí být blízko peletového sila otevíratelné prostory s okny nebo dveřmi. Přípojné armatury na koncích potrubí nesmí být příliš blízko rámu dvěří/oken, kvůli nemožnosti připojení plnicích hadic.
- Všechny změny směru potrubí musí být realizovány s co nejméně ohyby a s co nejkratší vzdáleností mezi příjmem a výdejem. Je potřeba se vyhnout kolenům nad 90 stupňů. Pokud to není možné, doporučuje se vnitřní průměr potrubí zvětšit na minimálně 200 mm.
- Plnicí přípojky by měly být maximálně 1,8 m vysoko, aby mohly být plnicí hadice jednoduše zapojeny. V opačném případě musí být zajištěn bezpečný přístup pro rampu nebo plošinu.
- Potrubí, hadice a přípojky by měly mít vnitřní průměr 100 mm a být vyrobeny z pevných a uzemněných materiálů.
- Pokud neexistují žádné zpřesňující národní normy, musí být použity plnicí přípojky STORZ typu A (100 mm).
- Trvale instalované plnicí potrubí musí být vodivé a uzemněné drátem (4 mm²) k zemnicímu bodu kvalifikovaným elektrikářem.

Požadavky na sklady pelet

Skladovací místnosti mají obvykle obdélníkový tvar. Obě přípojky (plnicí i odsávací) by měly být instalovány na kratší straně místnosti a k oběma přípojkám musí být zajištěn snadný přístup. Ve skladovacích místnostech by neměla být žádná elektrická zařízení, ani rozvody vody a vzduchotechniky. Náraz foukaných pelet do stěn skladovací místnosti musí být tlumen ochrannými závěsy (rohožemi) proti rozbíjení pelet. Stropy a stěny by měly být konstruovány tak, aby nebyly pelety znečišťovány odpadajícím materiálem (např. omítkou).



Obr. 2 Obecné rozmístění prvků ve skladech vlastní konstrukce

Všechny svislé plochy ve skladovací místnosti musí mít hladké povrchy, aby se zabránilo ulpívání prachu. Vodorovné plochy nejsou vhodné. Všechna potrubí i vodivé přípojky musí být uzemněny profesionálními elektrikáři.

Požadavky na zátěž

Podlahy, stěny a stropy musí unést statickou i dynamickou zátěž způsobenou pohybem pelet (hustota 750 kg/m^3) a změnami tlaku (plus 500 kg/m^2 navíc k vlastní zátěži pelet) vznikajícími transportem pelet během plnění.

Nemohou být použity stěny vyrobené z pórobetonu. Dále nemohou být instalována skleněná okna nebo velké plastové okenní tabule s výjimkou případů, kdy jsou přímo určeny k vyrovnávání tlaků. Všechny spoje vedoucí do zdiva, rohů a propustí ve stěnách, musí být vzduchotěsné. Výstavba větších skladů musí být konzultována s odborníky z pozemního stavitelství a požární ochrany.

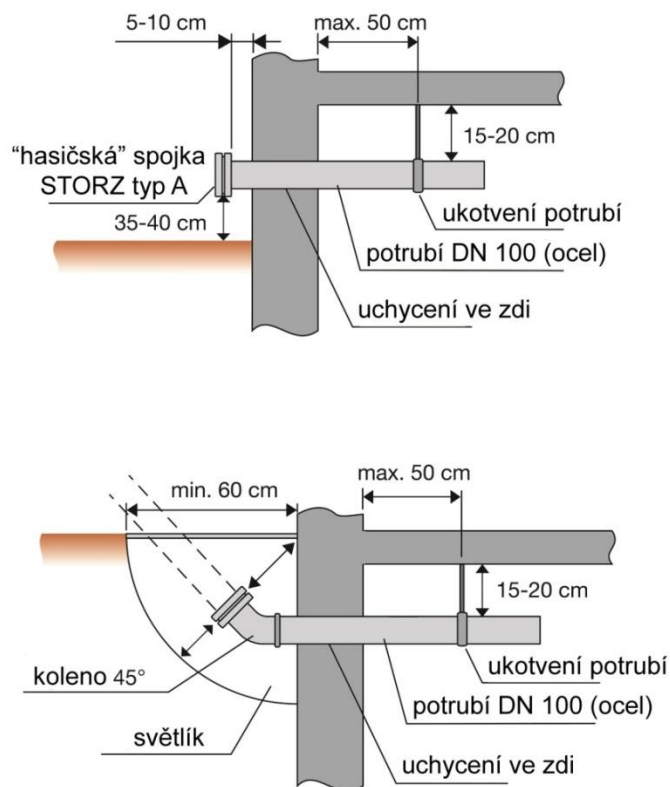
Pro plynulost provozu a práce ve skladovacích místnostech s kapacitou nad 10 tun a výškou nad 2 m musí být konstrukce stěn provedena následovně:

- Železobetonová stěna: tloušťka min. 10 cm
- Cihlová stěna: tloušťka min. 17,5 cm, zděná, omítnutá po obou stranách, zpevněné rohy a napojení na strop
- Dřevěná konstrukce: nosníky s hranou min. 12 cm, rozestup max. po 62 cm, pokryté z obou stran min. třívrstevnými stavebníky deskami nebo vícevrstvou překližkou, pevně spojených se stropem, podlahou a zdmi. V závislosti na provedení konstrukce může být nezbytné použití ocelového kotvení.

Plnicí systém

Skladovací místnost potřebuje nejméně jednu plnicí přípojku pro příjem pelet a jedno odsávací potrubí. Jejich účel musí být jasně a viditelně uveden na potrubí a na uzávěrech. Přípojky musí být namontovány alespoň 15 cm pod stropem sila (měřeno od stropu po vrchní hranu plnicího potrubí). Potrubí musí být pevně ukotveno a zajištěno objímkami (maximálně po 50 cm).

Obecně uznávaným standardem pro vnitřní průměr trubek je průměr 100 mm (s "hasičskými" koncovkami STORZ typu A). Toto platí jak pro plnicí, tak odsávací potrubí. Přípojky by měly být instalovány na dobře přístupném místě, hadice by měly po napojení pokračovat bez zbytečných ohybů přímo k cisterně. Spojky by měly být instalovány tak, aby se nemohly během plnění protáčet a kroutit.

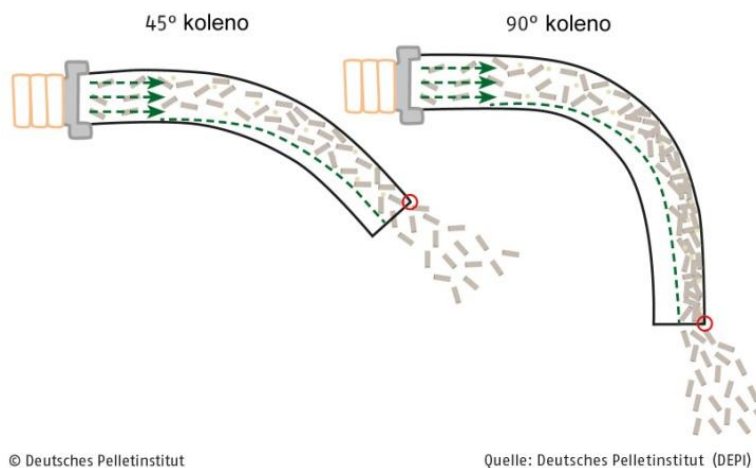


Obr. 3 Doporučení pro instalaci plnicích přírub umístěných nad i pod zemí

Plnicí systém by měl splňovat následující podmínky:

- Všechny přípojky (plnicí i odsávací) by měly být "STORZ typ A" (nebo ve stejném provedení), veškeré potrubí průměr 100 mm.
- Potrubí musí být vyrobeno z kovu a odolné vůči tlaku nejméně 1 baru.
- Trubky musí mít hladký povrch, aby se zabránilo obrušování pelet. Nýtování ani šrouby nesmí zasahovat do trubek. Pokud jsou trubky svařované, je potřeba zkontrolovat hladké provedení spojů jiná poškození na vnitřní straně potrubí a ve svarech. Hrany ocelových trubek po řezání musí být začištěny.
- Potrubí by mělo být co nejkratší. Je potřeba vyhnout se častým změnám směru. V případě ohybů by potrubí mělo mít průměr min. 200 mm.
- Plnicí potrubí by mělo mít u zakončení rovný díl v délce min. 30 až 50 cm, aby se zabránilo turbulencím v proudu foukaných pelet, které mohou vést k negativnímu rozptylu pelet po výstupu z koncovky.
- Plnicí systém musí být uzemněn kabelem 4 mm² k zemnicímu bodu.
- Plnicí i odsávací přípojky musí být jasně označeny a popsány. Je potřeba se vyhnout foukání pelet skrze sací potrubí, pokud k tomu není plnicí systém přizpůsoben. Pelety mohou odsávací potrubí zablokovat.
- Kolem přípojek musí být udržován min. 40 cm volný pracovní prostor k bezpečnému napojení koncovek.

- Odsávací ventilátor potřebuje nedaleko přípojek elektrickou zásuvku (230 V, 16 A). Musí být přístupná pro řidiče cisternového vozidla.
- Přístup k přípojkám a jejich okolí musí být dostupný i v zimě, za sněhu a ledu.
- Po skončení plnění musí být přípojky uzavřeny ventilačními uzávěry, které mohou být uzamykatelné. Klíče musí být pro řidiče cisterny dostupné.



Obr. 4 Modely foukání pelet skrz různé ohyby bez použití vhodného rovného stabilizačního dílu

Odstředivá síla v ohybech trubek způsobuje tření, které zvyšuje podíl jemných částic v peletách. Tlak a proudění plnicího vzduchu se v různých segmentech potrubí liší. Počet ohybů v plnicím potrubí by měl být snížen na minimum. Pokud je to možné, je třeba se vyhnout ohybům (kolenům) s obloukem $> 45^\circ$. Po každém kolenu musí následovat stabilizační rovný díl trubky s průřezem nejméně 30 cm. V opačném případě se budou pelety v tomto místě rozbíjet.

Sklady pelet musí být odvětrávány. Při kapacitě skladu do 40 t s potrubím vedeným vně budovy a kratším než 2 m poskytují dostatečnou ventilaci samotné přípojky a ventilační koncovky. Ve všech ostatních případech jsou zapotřebí instalovat samostatné ventilační potrubí.

ZÁVĚR

Národní pokyny pro správné skladování pelet a výstavbu peletových skladů lze nalézt v elektronické verzi na www.ceska-peleta.cz v sekci „Možnosti vytápění“ pod rubrikou „Kotelny a sklady“.

NÁVRH ALGORITMŮ PRO ZÍSKÁNÍ PŘEDPOVĚDI DOPADAJÍCÍHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

Jan Šulc^{1,2}, Martin Procházka^{1,2}, Marek Maška¹, Jan Včelák¹

¹Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

²Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky, ČVUT v Praze

jan.sulc.2@cvut.cz, prochm46@fel.cvut.cz, marek.maska@cvut.cz, vcelakj1@fel.cvut.cz

ANOTACE

Příspěvek se zabývá návrhem algoritmů pro získání předpovědi krátkovlnného dopadajícího slunečního záření pro účely řízení malých hybridních fotovoltaických systémů. Díky dostatečně přesné predikci je možné naplánovat řízení nabíjení bateriového úložiště do hodin s nízkým tarifem elektrické energie za účelem snížení její spotřeby. Predikce slunečního záření může být dále využita pro získání predikce výroby velkých fotovoltaických elektráren (FVE), což může v budoucnu sloužit distributorům elektrické energie ke stabilizaci a zvýšení efektivity distribuční sítě. Tento systém je potom dobrým základem tzv. chytrých sítí Smart grids a systémů Demand response. Součástí příspěvku je i vyhodnocení přesnosti predikce včetně porovnání s reálně změřenými daty slunečního záření na dvou místech v České republice.

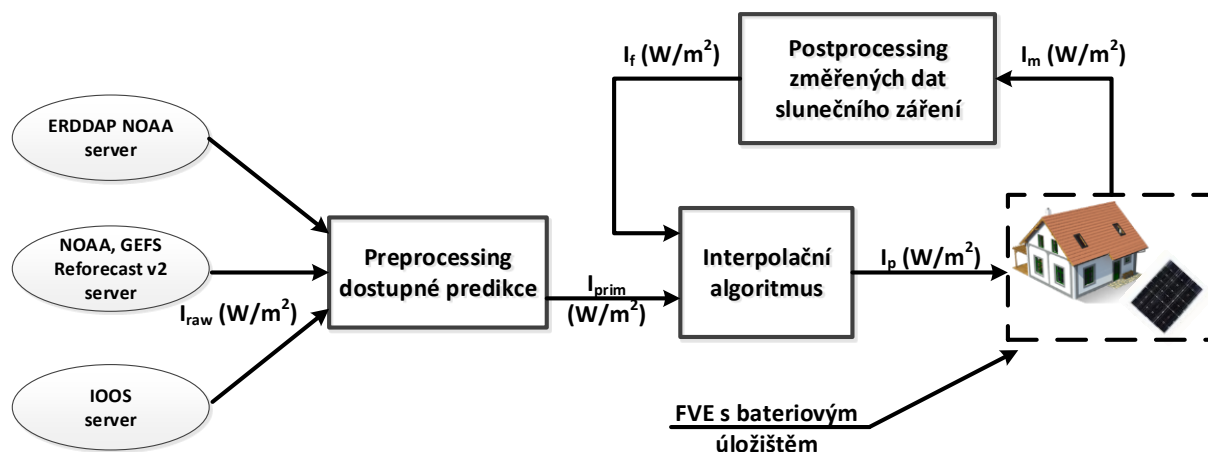
ÚVOD

S rapidním nárůstem FVE po roce 2010 je také zvýšený zájem o akumulaci energie v podobě bateriových úložišť. FVE ve spojení s bateriovým úložištěm dokáže flexibilně reagovat na požadavky centrální energetiky. Nevýhodou klasických velkých elektráren (uhelné, jaderné) je jejich velmi omezená schopnost regulace a nevýhodou FVE je nerovnoměrné rozložení výroby během dne a její velmi obtížná predikce. V případě dostatečně přesné predikce výroby FVE je možné efektivně řídit nabíjení a vybíjení bateriového úložiště, což vede ke snížení nákladů na elektrickou energii a celkové stabilizaci energetické sítě. Ke konci roku 2013 činil instalovaný výkon FVE v ČR 2132,4 MWp [1], což představuje 8. příčku mezi státy Evropské unie [2]. Na základě odhadů [3], bude mít v roce 2026 trh s bateriovými úložišti hodnotu 8 miliard dolarů a bez integrace FVE s bateriovým úložištěm se provoz FVE ekonomicky nevyplatí. Hlavní smysl budou mít bateriová úložiště po roce 2023 z důvodu klesající ceny solárních panelů. Předpověď intenzity slunečního záření a následně výroby FVE bude nezbytnou součástí chytrých algoritmů pro efektivní řízení nabíjení bateriových úložišť.

POPIS PŘEDPOVĚDNÍHO ALGORITMU

Obecný popis algoritmu

Cílem algoritmu pro předpověď slunečního záření je zpřesnění dostupné predikce na základě reálně změřených dat slunečního osvětlení. Navržený algoritmus využívá několika zdrojů předpovědních dat, přičemž cílem je vybrat co nejspolehlivější zdroj, a to nejenom z hlediska kvality předpovědních dat, ale také s ohledem na dostupnost predikce (frekvence aktualizace dat, četnost výpadků, lokality, pro které je predikce poskytována, atd.). Změřená data slunečního osvětlení poskytují zpětnou vazbu pro samoučící algoritmus, který zpřesňuje predikci, získanou z dostupných předpovědních dat. Obecné schéma algoritmu je zobrazeno na Obr. 1. Jednotlivé části algoritmu jsou popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 1 Zjednodušené schéma zpětnovazebního algoritmu pro predikci slunečního záření.

Předpovědní zdroje

V současné době algoritmus využívá třech volně dostupných zdrojů, které poskytují predikci krátkovlnného slunečního záření (intenzity záření v jednotkách W/m^2). Jedná se o následující zdroje:

- ERDDAP NOAA Server [4]
- NOAA, GEFS Reforecast v2 Server [5]
- IOOS Server [6]

Všechny dostupné zdroje počítají predikci podle vlastních modelů, avšak všechny modely uvažují počáteční podmínky ze serveru NOAA [7]. Výstupem jednotlivých zdrojů je predikce intenzity slunečního záření pro danou lokalitu (s rozlišením $0,5^\circ$ v zeměpisné šířce i délce) na období 0-72 hodin dopředu ve vybraných hodinách (obvykle 0, 3, 6, 9, ... 72 hodin). Tato predikce je v schématu na Obr. 1 vyznačena symbolem I_{raw} .

Preprocessing dostupné predikce

Tato část algoritmu zajišťuje úpravu výstupu předpovědních zdrojů (veličiny I_{raw}) pro následné využití v dalších částech algoritmu. Preprocessing zabrání neočekávaným hodnotám v predikci slunečního záření. Ze zkušenosti použití těchto zdrojů víme, že se v předpovědních datech často vyskytují neočekávané hodnoty intenzity slunečního záření (např. nenulové hodnoty intenzity záření po západu nebo před východem slunce). V některých případech data dokonce chybí. Preprocessing dále zajišťuje převzorkování dat s periodou 1 hodina, výsledkem jsou tedy upravená data predikce slunečního záření (ve schématu označena I_{prim}) pro jednotlivé zdroje na časový horizont 0-72 hodin se vzorkováním 1 hodina.

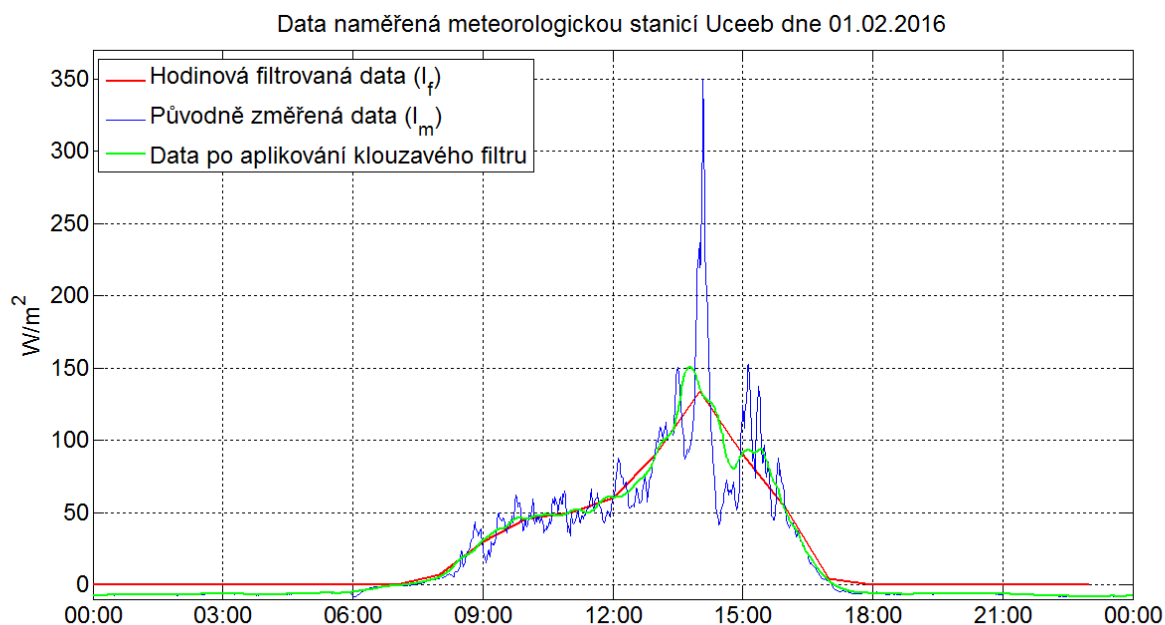
Postprocessing změřených dat

Měřená data slunečního záření poskytují důležitou informaci pro interpolační algoritmus. V současnou chvíli využíváme měřená data intenzity slunečního záření ze třech meteorologických stanic – budova UCEEB ČVUT v Buštěhradě a měřicí stanice firmy Fiedler v Domaníně a Novém Lískovci [8]. Výstupem změřených dat je krátkovlnné dopadající záření na vodorovnou plochu v jednotkách W/m^2 . Tato data jsou ve schématu na Obr. 1 označena symbolem I_m . Data jsou měřena s minutovými (UCEEB), resp. s desetiminutovými intervaly (Domanín, Nový Lískovec) a pro účely interpolačního algoritmu je nutné tato data filtrovat a převzorkovat se vzorkovací periodou 1 hodina, tj. stejně jako předpovědní data z jednotlivých zdrojů. Vzhledem k tomu, že interpolační

algoritmus využívá pouze historicky měřených dat, je možné pro filtraci použít tzv. nekauzální klouzavý průměr, jehož výpočet popisuje vzorec (1)

$$I_f(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=i-n/2}^{i+n/2} I_m(k), \quad (1)$$

Ukázka měřených dat včetně výstupu postprocessingu je zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2 Ukázka měřených dat intenzity dopadajícího krátkovlnného záření v lokalitě UCEEB ČVUT v Buštěhradu. Modrá křivka reprezentuje měřená data bez jakékoli úpravy (ve schématu na Obr. 1 označena I_m), zelená křivka měřená data po aplikování nekauzálního klouzavého průměru a červená křivka výsledná data I_f se vzorkováním 1 hodina.

Interpolační algoritmus

Interpolační algoritmus ve schématu na Obr. 1 využívá dvou vstupů. Prvním z nich jsou filtrovaná měřená data slunečního záření z předchozích 14 dnů (I_f). Toto číslo je jedním z parametrů, kterým se interpolační algoritmus naladí. Druhým vstupem jsou upravená předpovědní data z jednotlivých zdrojů (I_{prim}). Interpolační algoritmus je možné popsat dvěma kroky:

1. Vytvoření interpolační mřížky – algoritmus vytvoří celkem 24 interpolačních mřížek na základě historických měřených dat slunečního záření a historických predikovaných hodnot slunečního záření ze všech zdrojů za posledních 14 dní. Každá z 24 interpolačních mřížek reprezentuje danou konkrétní hodinu během dne. Pro každou hodinu k je sestaveno celkem 14 dvojic hodnot $[I_{prim}(k), I_f(k)]$. Osa x reprezentuje predikovaná data slunečního záření a osa y měřená data slunečního záření. Data jsou potom seřazena vzestupně podle osy x . Příklad interpolační mřížky je uveden v Tab. 1.
2. Interpolace dat – V druhém kroku algoritmus interpoluje data, za účelem získání zpřesněné predikce slunečního záření na další den. Pro interpolaci je vždy vybrán zdroj, pro nějž vychází přesnost predikce pro danou lokalitu nejlépe, viz část VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI PREDIKCE.

Tab. 1 Příklad vytvoření interpolační mřížky pro 13. hodinu z historických měřených a predikovaných dat slunečního osvětlení za posledních 14 dní pro různé předpovědní zdroje. Všechny hodnoty jsou v jednotkách W/m^2 .

Predikovaná hodnota (ERDDAP)	Predikovaná hodnota (Reforecast v2)	Predikovaná hodnota (IOOS)	Měřená hodnota
80,50	62,15	105,25	100,18
85,02	70,36	109,41	100,40
93,99	100,77	117,93	96,54
122,81	101,87	119,16	125,06
186,61	139,32	122,24	123,71
206,21	158,41	150,24	171,32
207,38	159,98	177,03	162,99
256,36	190,01	186,87	184,61
323,44	196,11	201,83	212,67
365,52	231,25	226,74	236,59
368,36	235,44	245,56	297,47
370,74	236,75	300,07	300,47
395,01	242,18	303,31	287,30
427,00	296,86	352,59	353,13

Implementace algoritmu prostřednictvím webové služby

Celý algoritmus pro získání předpovědi slunečního záření je nyní implementován prostřednictvím webové služby, která zajišťuje běh algoritmu v reálném čase. Algoritmus vypočítává predikci slunečního záření vždy 2x denně, a to v 11 a ve 23 hodin a poskytuje předpověď až na 48 hodin dopředu. Služba je určena primárně pro lokální instalace PLC, které formou HTTP dotazu obdrží hodinovou predikci slunečního záření pro svoji lokalitu. Webová služba zajišťuje predikci pro celkem 77 bodů v České republice a jejím nejbližším okolí. Vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body je cca 55 km v zeměpisné šířce a asi 25 km v zeměpisné délce. Jedná se o placenou službu, kterou je možné objednat na <http://www.pvforecast.cz>.

VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI PREDIKCE

Na Obr. 3 je zobrazen průběh původní predikce, výsledné predikce upravené interpolačním algoritmem a naměřených dat slunečního osvětlení z období 1. až 7. 2. 2016 pro lokality UCEEDB ČVUT v Buštěhradě (horní graf) a Domanín (dolní graf). Pro vyhodnocení přesnosti predikce byly použity relativní chyby, které lze vypočítat následujícími vzorci:

$$r_m = \frac{|s_p - s_m|}{s_m} \cdot 100, \quad (2)$$

$$r_t = \frac{|s_p - s_m|}{s_t} \cdot 100, \quad (3)$$

$$r_{800} = \frac{|s_p - s_m|}{s_{800}} \cdot 100. \quad (4)$$

Pro vyhodnocení přesnosti predikce pro soubor více dní je vhodnější použít veličiny RMSE (střední kvadratická chyba) a MAE (angl. mean absolute error). Tyto veličiny lze vypočítat vzorci (5) a (6).

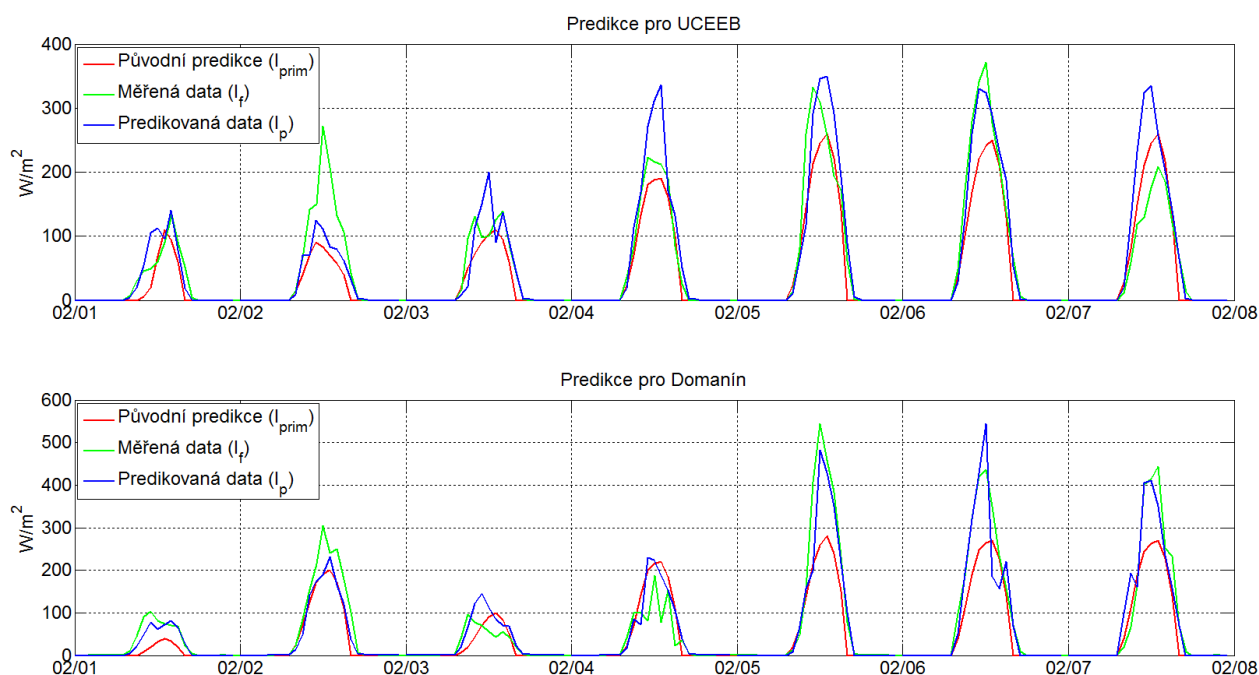
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_p(i) - s_m(i))^2}, \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |s_p(i) - s_m(i)|. \quad (6)$$

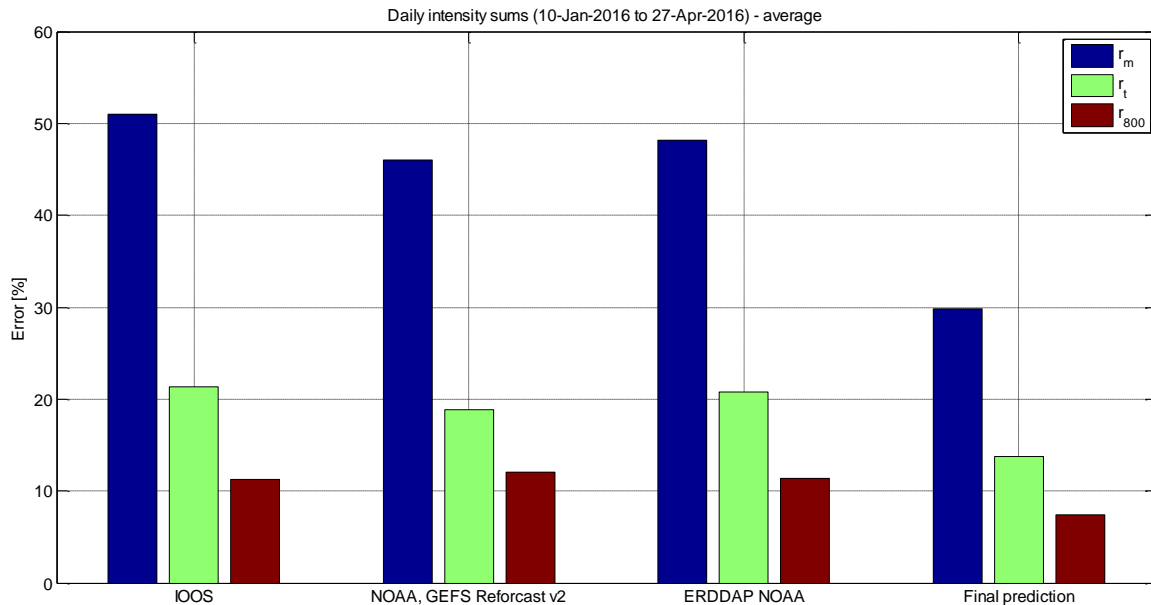
Přesnost predikce byla vyhodnocena pro každý zdroj předpovědi – IOOS, ERDDAP NOAA, Reforcast v2 a pro finální predikci vypočtenou interpolačním algoritmem pomocí vzorců (2)-(6) za období 10.1 až 27. 4. 2016, přičemž relativní chyba byla vyhodnocena pro každý den v tomto období a z těchto chyb byl posléze vypočítán průměr. Grafy vypočtených chyb jsou uvedeny na Obr. 4 a 5 a výsledné chyby jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Tabulka vyjadřující přesnost jednotlivých zdrojů predikce a výsledné zpřesněné predikce předpovědního algoritmu vypočítanou podle jednotlivých metrik (2)-(6).

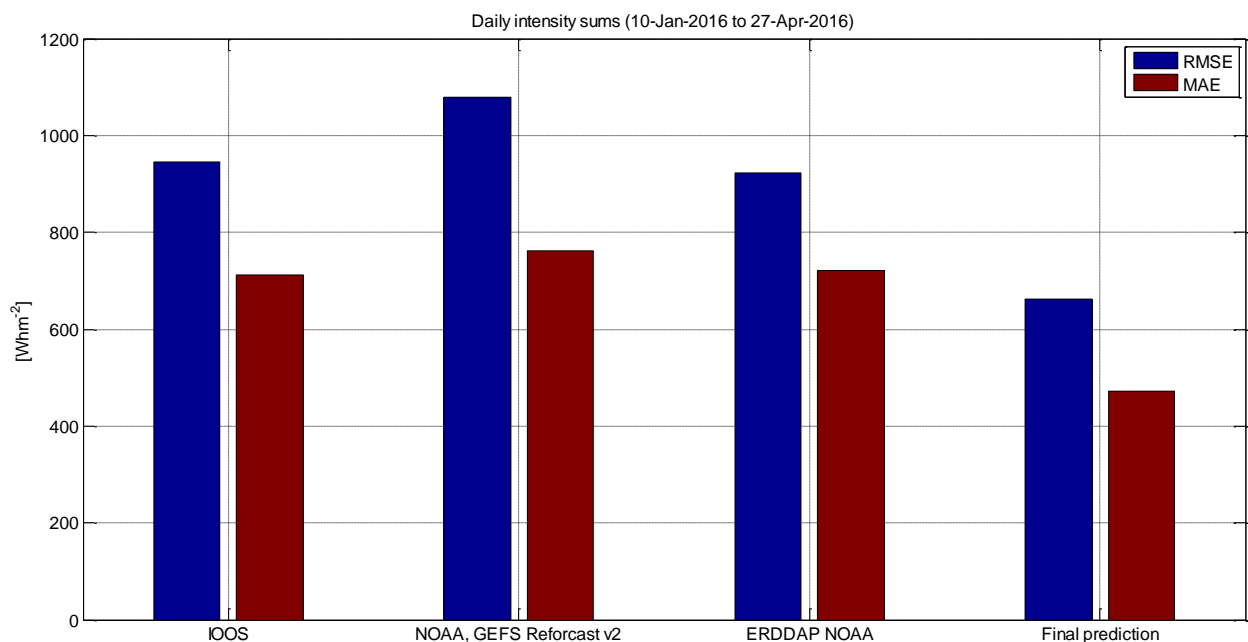
Zdroj předpovědi	r_m [%]	r_t [%]	r_{800} [%]	RMSE [Wh/m ²]	MAE [Wh/m ²]
ERDDAP	47,5	21	12,5	922	715
Reforcast v2	46	19	13,5	1066	781
IOOS	51,8	22	12,5	951	696
Výsledná predikce (I_p)	29,8	13,7	7,46	663	471



Obr. 3 Porovnání původní predikce (I_{prim}), výsledku interpolačního algoritmu (I_p) a měřených dat (I_m) slunečního osvětlení v lokalitách UCEEDB a Domanín. Období 1. až 7. 2. 2016.



Obr. 4 Vyhodnocení přesnosti predikce pomocí relativních chyb (2), (3) a (4) v lokalitě UCEEB ČVUT Buštěhrad za období 10.1 až 27. 4. 2016.



Obr. 5 Vyhodnocení přesnosti predikce pomocí RMSE a MAE (5), (6) v lokalitě UCEEB ČVUT Buštěhrad za období 10.1 až 27. 4. 2016.

ZÁVĚR

Cílem článku bylo popsat zpětnovazební algoritmus pro zpřesnění predikce krátkovlnného slunečního záření pro potřeby fotovoltaických systémů s bateriovým úložištěm. Ačkoli je predikce slunečního záření velmi obtížná, autorům se podařilo vyvinout jednoduchý interpolační algoritmus, který zpřesňuje predikci, která je volně dostupná z meteorologických serverů. Výsledky algoritmu jsou uspokojivé, viz Tab. 2 a Obr. 4 a 5. Algoritmus je v současnou chvíli provozován jako webová služba, která poskytuje předpověď intenzity

záření v reálném čase pro lokální PLC s instalací FVE. Další informace o službě je možné nalézt na webových stránkách <http://www.pvforecast.cz>.

LITERATURA

- [1] SKLENÁŘ, O. *Fotovoltaika v České republice po roce 2014, struktura instalací FVE z různých pohledů*. TZB-INFO. Dostupné online na: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12162-fotovoltaika-v-ceske-republice-v-roce-2014>
- [2] EurObserv'ER: „Photovoltaic Barometer“, duben 2014, dostupné online na: http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro-jdp11_en.pdf
- [3] Lux Research. *Energy Storage for Solar Systems Will be an \$8 Billion Market in 2026*. Zpráva uvedena dne 28.1.2016, dostupné online na: <http://www.luxresearchinc.com/news-and-events/press-releases/read/energy-storage-solar-systems-will-be-8-billion-market-2026>.
- [4] ERDDAP – Marine Domain Awareness (MDA) ERDDAP Server – JRC Italy, dostupné online na: <https://bluehub.jrc.ec.europa.eu/erddap/index.html>
- [5] Hamill, T. M., G. T. Bates, J. S. Whitaker, D. R. Murray, M. Fiorino, T. J. Galarneau, Jr., Y. Zhu, a W. Lapenta. *NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set*. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1553-1565. 2013.
- [6] Pacific Islands Ocean Observing System, dostupné online na: <http://oos.soest.hawaii.edu/pacioos/index.php>
- [7] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), dostupné online na: <http://www.noaa.gov>
- [8] Webový prohlížeč měřených dat – FIEDLER AMS s.r.o., dostupné online na: <https://stanice.fiedler-magr.cz/>
- [9] Webová služba PV Forecast, dostupné online na: <http://www.pvforecast.cz>.
- [10] ŠMÍDEK, J. *Prediktivní řízení malých hybridních solárních systémů*. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta Elektrotechnická. Květen 2015.
- [11] Technická norma ČSN CLC/TS 61836 – Solární fotovoltaické energetické systémy – Termíny, definice a značky. Březen 2012.
- [12] Technická norma ČSN EN 61215 – Fotovoltaické (PV) moduly pro pozemní použití – Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu. Leden 2016.

SEZNAM OZNAČENÍ

I_{raw}	originální neupravená předpověď intenzity slunečního záření	[W.m ⁻²]
I_{prim}	upravená předpověď intenzity slunečního záření z jednotlivých zdrojů	[W.m ⁻²]
I_m	měřená intenzita slunečního záření	[W.m ⁻²]
I_f	filtrovaná měřená intenzita slunečního záření v hodinových intervalech	[W.m ⁻²]
I_p	zpřesněná predikovaná intenzita slunečního záření v hodinových intervalech	[W.m ⁻²]
s_p	denní suma predikovaných hodnot slunečního záření I_p	[Wh.m ⁻²]
s_m	denní suma naměřených hodnot slunečního záření I_f	[Wh.m ⁻²]
s_t	denní suma teoretických hodnot slunečního záření, viz pozn. 1	[Wh.m ⁻²]
s_{800}	denní suma teoretických hodnot slunečního záření s maximální hodnotou 800 W/m ² , viz pozn. 1	[Wh.m ⁻²]
r_m	relativní chyba vztažená k denní sumě naměřených hodnot	[%]
r_t	relativní chyba vztažená k denní sumě teoretických hodnot	[%]
r_{800}	relativní chyba vztažená k denní sumě teoretických hodnot dne s maximální hodnotou 800 W/m ² , viz pozn. 1	[%]

<i>RMSE</i>	root mean square error (střední kvadratická chyba)	[Wh.m ⁻²]
<i>MAE</i>	mean absolute error	[Wh.m ⁻²]
<i>N</i>	počet dní, pro které se vyhodnocuje přesnost predikce	[-]
<i>n</i>	celkový počet vzorků, ze kterých se průměr počítá, v našem případě n=60	
<i>I_f(i)</i>	filtrovaná hodnota intenzity záření v dané hodině, i=0, 1, ... 24	
<i>I_m(k)</i>	měřená hodnota intenzity záření v danou minutu	

Tato práce vznikla z projektu Univerzitní centrum energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze a interního grantu ČVUT SGS16/232/OHK3/3T/13.

KONCEPT ADMINISTRATIVNÍ BUDOVY JAKO BUDOVY S TĚMĚŘ NULOVOU SPOTŘEBOU ENERGIE

Miroslav Urban, Michal Bejček, Petr Wolf, Aleš Vodička

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

miroslav.urban@fsv.cvut.cz

ANOTACE

Předmětem příspěvku je stavebně – technické řešení administrativní budovy s důrazem na vliv hybridního fotovoltaického systému ve smyslu splnění požadavků na budovu s téměř nulovou spotřebou energie. Budova využívá ke svému provozu pouze elektřinu ze sítě a elektřinu z hybridního fotovoltaického systému, který bude umožňovat efektivní provoz budovy ale také možné vyrovnávání distribuční sítě. Budova má splňovat nejen legislativní požadavky ve smyslu požadavků na budovy s téměř nulovou spotřebou, ale současně naplňovat technický smysl tohoto termínu. Účelem specifického technického řešení budovy je ověřit spolupráci hybridního fotovoltaického systému a distribuční chytré sítě tak, aby byla prokázána výhodnost tohoto řešení pro provozovatele energetické soustavy i pro uživatele. Předpokládané dokončení budovy je v červnu 2016.

ÚVOD

Objekt je umístěn ve výrobním areálu firmy v Jeseníku a bude sloužit k administrativnímu účelu a demonstračnímu účelu – předvedení výrobků firmy v podobě elektrických topných systémů. Budova je koncipována jako třípodlažní nepodsklepený objekt. V prvním nadzemním podlaží bude situována expozice výrobků, část pracovníků technické podpory a hygienické zázemí. Druhé nadzemní podlaží pokrývají oddělené kanceláře a hygienické zařízení. V třetím uskočeném nadzemním podlaží je situována zasedací místnost a technické místnost.

Cílem investora je:

- realizovat budovu s téměř nulovou spotřebou energie ve smyslu české legislativy,
- na všechny činnosti v budově využívat pouze elektřinu,
- zajistit vytápění budovy pouze přímotopným elektrickým systémem,
- osadit budovu hybridním fotovoltaickými systém umožňujícím odběr z distribuční sítě a dodávku do distribuční sítě z hybridního FV systému.

Stavebně - konstrukční řešení

Konstrukčně-stavební řešení budovy představuje železobetonový skelet s výplňovým zdívkem z vápenopískových cihel. Budova je následně zateplena. Parametry obvodových konstrukcí jsou na úrovni lepší, než doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla podle ČSN 73 0540:2011. Základní parametry součinitele prostupu tepla byly předmětem vlastní nákladové optimalizace konceptu budovy.

Technické systémy budovy

Vytápění budovy je zajištěno kombinací elektrických přímotopných a plošných elektrických otopných ploch. Celkový elektrický příkon systému pro vytápění budovy je 11,1 kW, vytápění venkovních ploch má elektrický příkon 1,6 kW. Regulace lokálních prvků otopného systému je pomocí systému BMR, kdy v místnostech jsou umístěny senzory teploty, doplněné o senzory relativní vlhkosti. Systém vytápění je ovládán a řízen po jednotlivých místnostech.

Chlazení vnitřních prostor zajišťují vnitřní cirkulační jednotky ve vybraných prostorech, kdy centrální kondenzační jednotka multisplit systému je umístěna na střeše. Současně je chlazen přiváděný vzduch ve VZT jednotce pomocí přímého výparníku. Kondenzační jednotka je umístěna na střeše objektu.

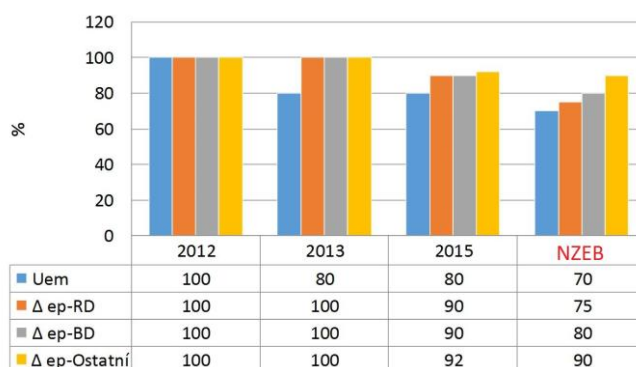
Obsluhované prostory jsou větrány centrálním VZT systémem s VZT jednotkou. Jednotka je umístěna ve strojovně v 3.NP. Maximální objemový průtok jednotkou je 1400 m³/h, hygienické minimum předpokládá objemový průtok větracího vzduchu 390 m³/h. Jednotka je osazena přímým výparníkem chlazení a elektrickým ohřívačem. V jednotlivých podlažích je větrací vzdušina distribuována pomocí plochých kanálů. Rozvody jsou rozděleny na tři výkonnostní samostatně oddělené režimy po jednotlivých podlažích, kdy každá část je osazena regulační a uzavírací klapkou.

Příprav teplé vody je zajištěna lokálně pomocí elektrických ohřívačů teplé vody.

Na střeše budovy je osazen hybridní fotovoltaický systém o výkonu 7,8 kW_p propojený s akumulátorovým úložištěm o kapacitě 26,96 kWh a max. dosažitelném výkonu 15 kW. Akumulátory umožní zvýšit podíl využití energie z FV systému pro vlastní spotřebu – budou nabíjeny v době, kdy je výkon FV systému vyšší nežli spotřeba v objektu, a vybíjeny v době, kdy spotřeba objektu přesahuje aktuální výrobu FV systému. Dále mohou být akumulátory využity pro spolupráci s distribuční sítí a sousední budovou. Bude uvažován režim řízení dle aktuálního ¼ hodinového maxima a možné potenciální rozšíření pro využití tarifní struktury – ať již fixních hodinových sazeb energie či flexibilních vnitrodenních sazeb, podrobně viz příspěvek Petra Wolfa v tomto sborníku.

HODNOCENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI BUDOVY V REŽIMU NZEB

Pokud má být podle současné legislativy budova v režimu nZEB, musí splňovat požadavky dané národní legislativou [1], [2]. Budovou s téměř nulovou spotřebou energie, dále jen nZEB, se rozumí „budova s velmi nízkou energetickou náročností, jejíž spotřeba energie je ve značném rozsahu pokryta z obnovitelných zdrojů“ [1]. Praktickou stránku a provedení tohoto požadavku řeší [2], kdy hodnota požadavku ukazatele energetické náročnosti – neobnovitelné primární energie – bude ponížena o procentuální podíl viz Obr. 1. Filosofie tohoto opatření je založena na předpokladu, že potom hodnocená budova musí zpřísněný požadavek dosáhnout zvýšením podílu systémů využívajících OZE, a současně zlepšením parametrů obálky budovy.



Obr. 1 Vývoj požadavků na ukazatele energetické náročnosti budov podle platné legislativy – vyjadřuje vývoj požadavků k nZEB

Z výše uvedených požadavků je patrné, že ponížení neobnovitelné primární energie je nejvyšší u rodinných a bytových domů, zatímco pro budovy ostatní, tedy i tuto budovu, je ponížení pouze o 10 %.

Požadavky na energetickou náročnost

Pro uvedený objekt jsou nastaveny minimální legislativní požadavky, tyto požadavky představují minimální standard pro novostavby, současně se požadavky na tento minimální standard v čase zpřísňují. Minimální legislativní požadavky pro jednotlivé ukazatele energetické náročnosti reprezentuje Tab. 1.

Tab. 1 Minimální legislativní požadavky pro ukazatele energetické náročnosti budovy

Ukazatel energetické náročnosti	Nová administrativní budova po 1.1.2015	Administrativní budova v režimu nZEB
$U_{em,R}$ [W/m ² .K]	0,37	0,33
$Q_{fuel,R}$ [kWh]	28 117	26 419
$Q_{nPE,R}$ [kWh]	59 414	56 923

Vzhledem k výše uvedeným předpokladům byly obavy o splnění požadavku $Q_{nPE,R}$, kdy v případě bytových objektů, zejména rodinných domů, využívajících pouze elektřinu na všechny činnosti je velmi obtížné splnit požadavky uvedené v Tab. 1. Výše uvedené požadavky vycházejí z referenční budovy, která je geometricky a provozně totožná, pouze se liší v kvalitě obálky, technických systémech a konverzních faktorech neobnovitelné primární energie.

Referenční budova má kvalitu obálky budovy nastavenou na požadovanou úroveň podle [3] a výsledné U_{em} ponížené na úroveň, viz Obr. 1, čili tomu odpovídá $U_{em,R}$ v Tab. 1. Technické systémy mají svoji kvalitu v podobě celkových účinností nastavenou podle [2] a současně jsou pro jednotlivé činnosti nastaveny referenční konverzní faktory pro $Q_{nPE,R}$, viz Tab. 2. Na základě uvedených požadavků bylo nutné prověřit splnění/nesplnění požadavků energetické náročnosti a stanovit minimální podíl produkce energie z FV systému pro přímé využití v budově.

Tab. 2 Konverzní faktory na neobnovitelnou primární energii

Typ činnosti	Referenční budova $f_{nPE,R}$ [-]	Hodnocená budova f_{nPE} [-]
Vytápění	1,1	3,0
Chlazení	3,0	3,0
Větrání	3,0	3,0
Příprava teplé vody	1,1	3,0
Osvětlení, ostatní spotřeba	3,0	3,0
Produkce energie z FV systému	-	0,0

Obálka budovy

Z pohledu obálky budovy byla prověřována řada 55 možných kombinací základních parametrů obálky budovy – okna, stěna, podlaha, střecha. Varianty seřazené podle výsledných U_{em} obálky budovy jsou prezentovány na vodorovné ose na grafech dále, viz Obr. 2 až 6. Kombinace parametrů obálky budovy č. 1, viz Tab. 3, představuje požadované hodnoty podle [3], ostatní kombinace jsou logickými kombinacemi, které mohou nastat.

Podrobně pak byly prověřovány některé kombinace parametrů obálky budovy tak, že byla měněna tloušťka tepelné izolace na střeše, podlaze, stěnách v kombinaci s různou kvalitou oken a hledalo se technicky nákladové optimum, ve kterém rozhodovala cena velkých výplní

otvorů. Tato optimalizace probíhala v přímé vazbě s projektanty stavební části tak, aby byl zvolen co nejoptimálnější koncept stavebně technického řešení. Nejvýhodnější varianta obálky budovy tak byla stanovena kombinace č. 35, viz Tab. 3.

Tab. 3 Výběr kombinací řešení obálky budovy, červeně znázorněné podrobně prověřované varianty obálky budovy

kombinace	Stěny	Podlaha	Střecha	Okna		Budova
	U [W/m ² .K]	U [W/m ² .K]	U [W/m ² .K]	U [W/m ² .K]	g [-]	U_{em} [W/m ² .K]
1	0,20	0,45	0,24	1,50	0,75	0,441
Kvalitativní limit pro novou budovu po 1. 1. 2015						
6	0,14	0,38	0,18	1,32	0,75	0,368
↕ dílčí kombinace						
8	0,21	0,28	0,14	1,05	0,75	0,339
14	0,20	0,29	0,15	1,03	0,75	0,334
Kvalitativní limit pro novou budovu s téměř nulovou spotřebou energie						
12	0,19	0,26	0,13	0,98	0,70	0,315
↕ dílčí kombinace						
52	0,11	0,24	0,14	0,73	0,65	0,237
35	0,11	0,24	0,14	0,73	0,63	0,236
42	0,11	0,24	0,10	0,73	0,63	0,234
18	0,11	0,24	0,14	0,70	0,63	0,233
48	0,11	0,24	0,10	0,70	0,63	0,230

Řešení technických systémů byly danost, pouze byla provedena optimalizace FV systému pro budovu, kdy na základě optimalizovaného řešení FV systému byl následně zpracován PENB. Z pohledu prokázání dosažení požadavků na energetickou náročnost budov je níže prezentována varianta budovy s FV systémem a bez FV systému.

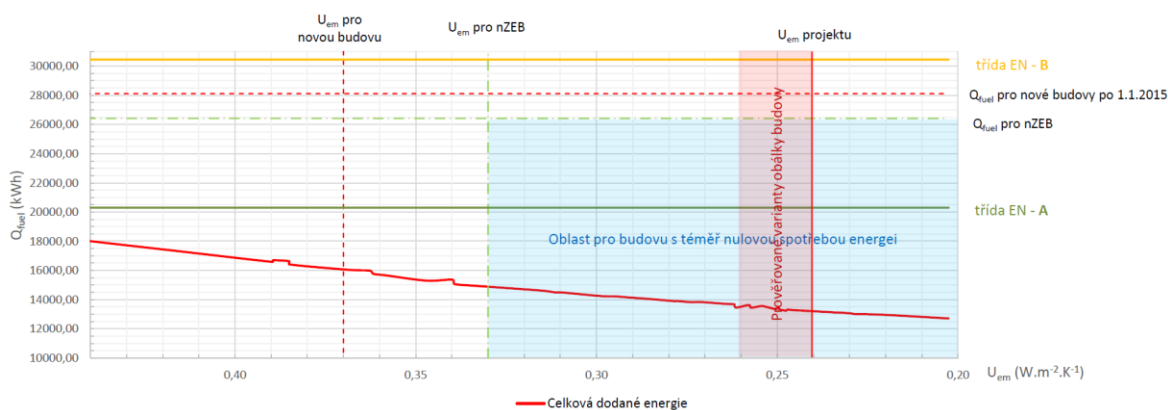
Možnosti dosažení standardu budovy s téměř nulovou spotřebou energie

Administrativní budova disponuje energeticky vztažnou plochou o výměře 316 m², z tohoto důvodu se na tento typ bytového domu vztahuje, v případě podání stavebního povolení po 1. 1. 2020, požadavek na prokázání splnění požadavků pro NZEB.

Následující grafy, viz obr., demonstrují průběh celkové dodané energie do budovy Q_{fuel} a neobnovitelné primární energie Q_{nPE} .

Graf průběhu celkové dodané energie do budovy Q_{fuel} na obr. 2 demonstruje následující:

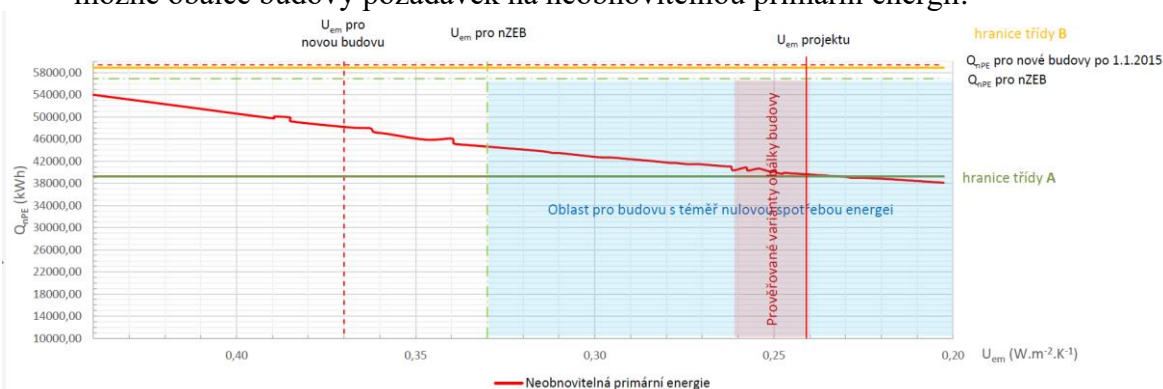
- V případě obálky budovy nastavené na minimální legislativně požadovanou úroveň bude budova v rámci variantních řešení 4 zařazena do klasifikační třídy A.
- Pokud bude obálka budovy nastavena na minimální požadovanou úroveň pro nZEB standard, tzn. $U_{em} = 0,33 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, budova automaticky splňuje požadavek pro nZEB také z pohledu celkové dodané energie pro všechny řešené varianty technických systémů budovy, tzn. vč. FV systému, nebo bez FV systému.



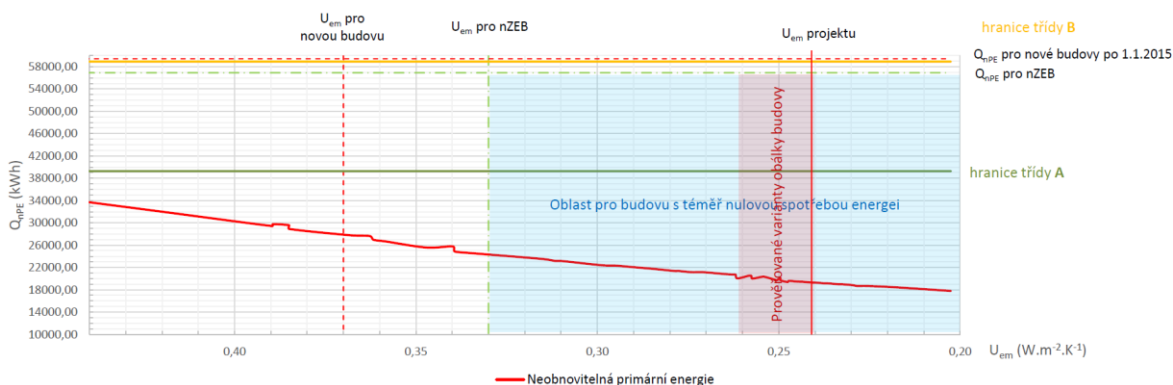
Obr. 2 Průběh celkové dodané energie Q_{fuel} v závislosti na obálce budovy

Grafy pro variantní řešení objektu bez FV systému, viz obr. 3 a s navrženým FV systémem, viz obr. 4, ukazují:

- Pokud bude obálka budovy nastavena na minimální požadovanou úroveň pro nZEB standard, tzn. $U_{em} = 0,33 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, budova pro obě varianty automaticky splňuje požadavek pro nZEB i z pohledu neobnovitelné primární energie. Řešení technických systémů objektu využívající elektřinu jako hlavní energonositel splní i při nejhorší možné obálce budovy požadavek na neobnovitelnou primární energii.



Obr. 3 Průběh neobnovitelné primární energie Q_{nPE} v závislosti na obálce budovy bez FV

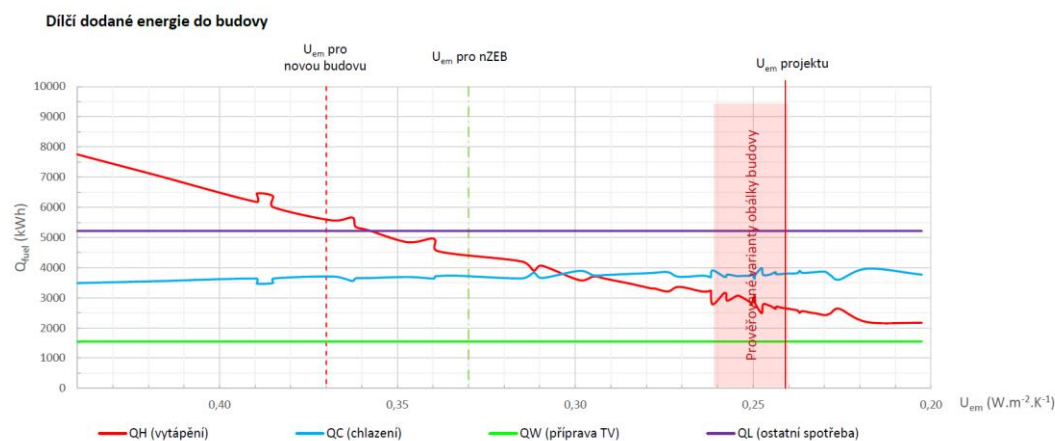


Obr. 4 Průběh neobnovitelné primární energie Q_{nPE} v závislosti na obálce budovy včetně FV

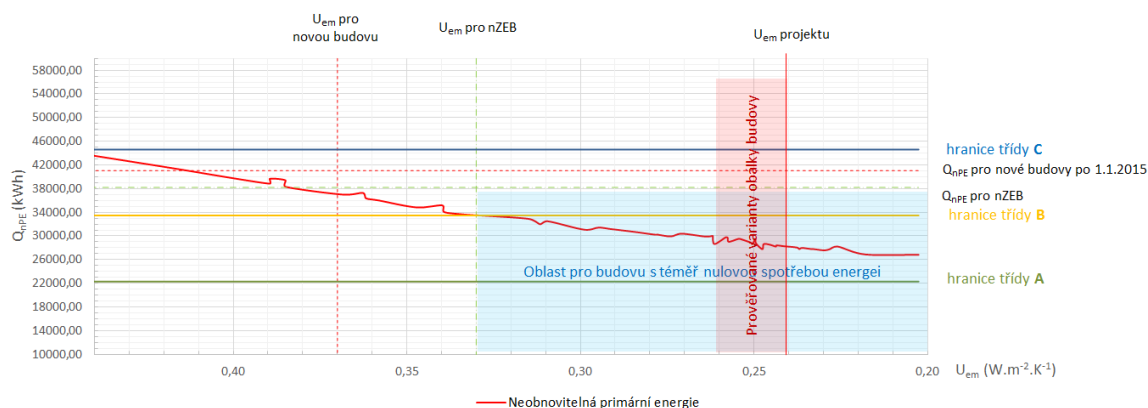
Z výše uvedených grafů je patrné, že takto koncipovaný objekt i bez systémů využívající OZE splní požadavky na budovu s téměř nulovou spotřebou energie a to i z pohledu ukazatele EN neobnovitelné primární energie. Tato skutečnost je v nepoměru s požadavky na energetické náročnosti pro rodinné domy, kdy rodinný dům spotřebovávající čistě elektřinu, není schopen splnit výše uvedené požadavky z pohledu neobnovitelné primární energie.

Důvody, proč tato budova administrativního charakteru splňuje požadavky na neobnovitelnou primární energii pro budovy s téměř nulovou spotřebou energie, jsou následující:

- Požadavek na neobnovitelnou primární energii je pro administrativní budovy zpřísněn pouze o 10%, pro rodinné domy o 25 %, viz Obr. 1.
- Výpočet neobnovitelné primární energie pro referenční budovy, tzn. výpočet požadavku, se řídí požadavky vyhlášky, kdy pro dílčí energie pro vytápění a přípravu TV je nastaven konverzní faktor $f_{nPE,R} = 1,1$ a pro chlazení a ostatní spotřeby $f_{nPE,R} = 3,0$. Z Obr. 5 je patrné, že pro řešenou variantu obálky budovy je dílčí dodaná energie na vytápění díky kvalitní obálce minimalizována a díky charakteru budovy je také minimální spotřeba teplé vody. Naopak potřeba energie na chlazení a ostatní spotřeby dominují. Z tohoto důvodu nedochází k zásadnímu rozdílu mezi neobnovitelnou primární energií pro hodnocenou a referenční budovu.
- Budova disponuje strojním chlazením, kdy dodaná energie pro chlazení převyšuje dodanou energii na vytápění. Díky tomuto faktu, lepší účinnosti zvoleného zařízení, než referenční účinnost uvedená ve vyhlášce a konverznímu faktoru referenční budovy pro činnost chlazení $f_{nPE,R} = 3,0$, bude administrativní budova se strojním chlazením hodnocena z pohledu požadavku na neobnovitelnou primární energii paradoxně méně přísně, než budova bez strojního chlazení. Pro porovnání jsou výsledky budovy bez chlazení uvedeny na Obr. 6. Pokud by budova nedisponovala strojním chlazením, byly by požadavky na Q_{nPE} paradoxně podstatně přísnější.



Obr. 5 Průběh dílčích dodaných energií v závislosti na obálce budovy pro variantu bez FV



Obr. 6 Průběhu neobnovitelné primární energie Q_{nPE} v závislosti na obálce budovy bez FV systému a systému strojního chlazení

HODNOCENÍ PROVOZNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI A VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ BUDOVY

Budova splňuje všechny legislativní požadavky, nicméně z pohledu investora je důležitý provoz budovy a kvalitní vnitřní prostředí uvnitř budovy, které utváří technické systémy. Z tohoto důvodu budou monitorované v maximální míře všechny provozní spotřeby a parametry vnitřního prostředí ve vazbě na provozní režim HFV systému. Monitorované parametry budou sloužit k vyhodnocení provozních stavů budovy ve vazbě na provoz HFV systému a provozní energetickou náročnost v kombinaci s hodnocením vnitřního prostředí budovy.

Každý systém (vytápění, chlazení, klimatizační jednotka, fotovoltaický systém) má vlastní řídicí systém. Budova nedisponuje centrálním zastřešujícím řídicím systémem. Vybraná data však budou ukládána lokálně v analyzátoch BMR, současně pak v centrální jednotce TECO a dále na portálu dálkového monitoringu UCEEB MONITOR. V jednotce TECO budou dále shromažďována aktuální data ze zvolených zařízení a dávána k dispozici při dotazu zařízení, které o to požádají. Jednotka TECO bude tímto sloužit jako centrální uzel pro výměnu informací instalovaných systémů.

Budova jako celek využívá ke svému provozu jediný energonositel – elektřinu. Energetické toky v budově v podobě elektřiny budou sledovány a měřeny pomocí analyzátorů výkonu typu BMR PLA 33 a BMR PLA 34 umístěnými v hlavním rozvaděči ve 3.NP budovy. Okruhy v budově budou rozděleny na dvě části – zálohované okruhy (ZO) a nezálohované okruhy (NO). U objektu se následně předpokládají tyto provozní stavy:

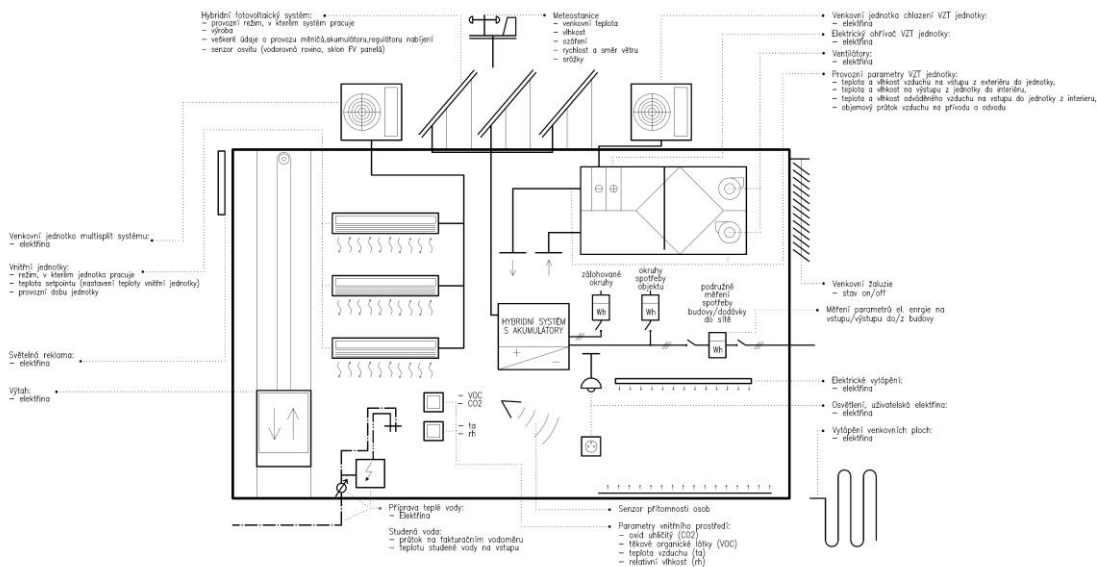
- Energie pro okruhy budovy (ZO a NO) je zajištěna pouze ze sítě - např. Standby režim, či režim Self consumption při dosažení spodního limitu nabití akumulátoru
- Energie pro okruhy budovy (ZO a NO) je zajištěna ze sítě a HFV systému - např. Standby režim, či režim Self consumption pokud je akumulátor dostatečně nabit, či je energie z FV zdroje
- Energie pro okruhy budovy (ZO a NO) je zajištěna téměř výlučně z HFV systému, DS je připojena - např. Nucený autonomní režim, či režim Self consumption pokud akumulátor dosáhne definovaného stavu nabití.
- Energie pro okruhy budovy (ZO) je zajištěna výlučně z HFV systému, NO jsou bez dodávky energie - stav výpadku elektrické energie ze strany DS, autonomní zásobování objektu.

V budově budou snímány parametry vnitřního prostředí a provozní energetické náročnosti budovy, podrobně viz Obr. 7. Vyhodnocení měřených parametrů vnitřního prostředí a provozních parametrů energetické náročnosti budovy v rámci různých provozních stavech, viz výše. Současně bude provoz budovy a parametry vnitřního prostředí sledovány ve vazbě na vnitřní prostředí, bude sledováno chování objektu v rámci:

- letních a zimních teplotních extrémů (vždy po souvislou dobu týdenního extrému),
- letních a zimních extrémů z pohledu intenzity ozáření (nemusí se shodovat s teplotním extrémem),
- přechodném období (typický provoz budovy).

V režimu nuceného autonomního režimu bude vyhodnocován stav nejnižší spotřeby energie ve vazbě na dodržení požadovaného vnitřního prostředí. Tento stav bude vyvolán pro v denním kroku v závislosti na klimatických podmínkách pro:

- letní a zimní teplotní extrém (vazba na provoz vytápění, resp. chlazení a VZT systému),
- běžný provozní stav v přechodném období.



Obr. 7 Schéma sledování provozních parametrů budovy

ZÁVĚR

Prezentovaný realizovaný koncept budovy splňuje požadavky na nZEB bez ohledu na existenci systémů využívajících OZE a za předpokladu využití jediného energonositele v podobě elektřiny. Legislativní požadavky na nZEB v tomto případě nenaplnují technický význam tohoto slovního spojení. Konečným výsledkem celkové koncepce je však budova, která by se technicky a zejména provozně významu uvedeného pojmu mohla více než přibližovat.

LITERATURA

- [1] Zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů
- [2] Vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov
- [3] ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky
- [4] URBAN, M., KABELE, K. Národní kalkulační nástroj NKN [počítačová aplikace]. Ver. 3.052 Praha, 2014. Dostupné z <<http://nkn.fsv.cvut.cz>>. Výpočetní nástroj pro stanovení energetické náročnosti budov, 37 MB.

SEZNAM OZNAČENÍ

Δep	ponížení referenčního požadavku	[%]
f_{nPE}	konverzní faktor neobnovitelné primární energie	[-]
g	součinitel prostupu sluneční energie	[-]
Q_{fuel}	celková dodaná energie	[kWh]
Q_{nPE}	neobnovitelná primární energie	[kWh]
U	součinitel prostupu tepla	[W/m ² .K]
U_{em}	průměrný součinitel prostupu tepla	[W/m ² .K]
DS	distribuční síť	
HFV	hybridní fotovoltaický systém	
nZEB	budova s téměř nulovou spotřebou energie	
OZE	obnovitelný zdroj energie	

DOJDE K RENEZANCI ELEKTRICKÉHO AKUMULAČNÍHO VYTÁPĚNÍ?

František Vybíralík

EEC

fvybiralik@seznam.cz

ANOTACE

V současné době se neustále zvyšuje podíl elektrické energie vyráběné z obnovitelných zdrojů: Výroba elektřiny u těchto zdrojů značně kolísá v závislosti na přírodních podmínkách (sluneční osvit, rychlost větru). V souvislosti s aplikací Smart Grids a Smart Metering se hledají spotřebiče, jejichž odběr elektřiny lze řídit podle situace v elektrizační soustavě. Počítá se s postupnou instalací „chytrých“ spotřebičů, jejichž chod lze dálkově ovládat (pračky, myčky, sušičky). Další oblastí spotřeby představují spotřebiče pro ohřev vody a pro vytápění a to jak přímotopné, tak i akumulární. Zejména akumulární tepelné spotřebiče mohou být významným prvkem, který umožní regulaci odběru elektrické energie. V článku budou uvedeny základní typy akumulárních spotřebičů pro vytápění a přípravu teplé vody, zásady pro jejich dimenzování a možnosti regulace jejich provozu.

ÚVOD

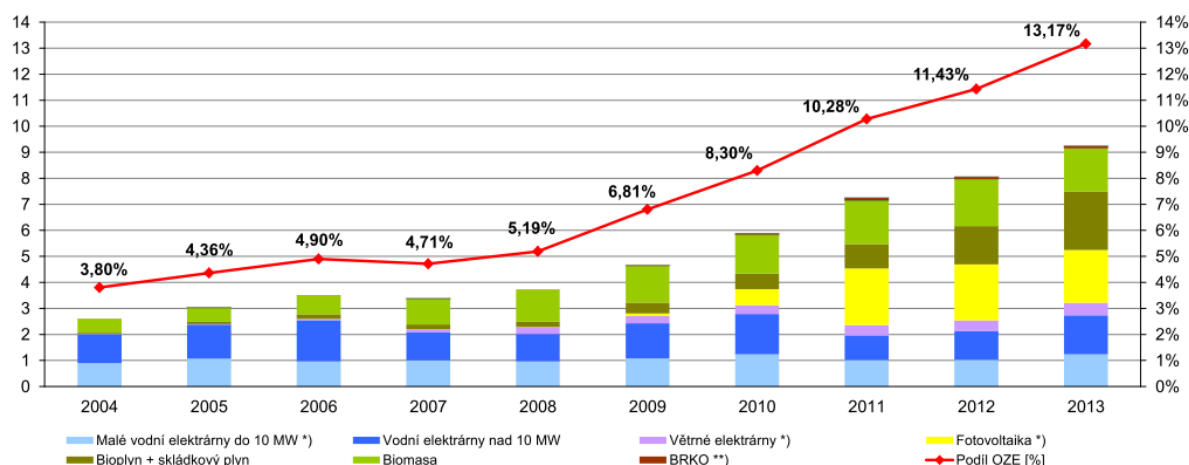
Základními zdroji elektrické energie v České republice jsou uhelné a jaderné elektrárny, které pokrývají základní pásmo v denním diagramu zatížení. Instalovaný výkon těchto elektráren je přibližně 75 % z celkového instalovaného výkonu. Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie v roce 2013 činila 9,2 TWh a na hrubé domácí spotřebě se podílela 13,17 %. Česká republika tak splnila cíl, který přijala podle plánu EU pro rok 2020. Pro další období do roku 2030 se předpokládá zvýšení podílu na 18 %.

Produkce elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie je velmi proměnlivá. Ve fotovoltaických a větrných elektrárnách se vyrábí v době, kdy pro ni není uplatnění. Elektrickou energii vyrábíme a spotřebováváme v jiné době, než ji můžeme využít (spotřebovat). Proto potřebujeme vytvořit lokální zásobu elektrické energie – krátkodobou zálohu pro překlenutí výpadku hlavního zdroje nebo nadřazené sítě. Mezi základní principy akumulace energie patří:

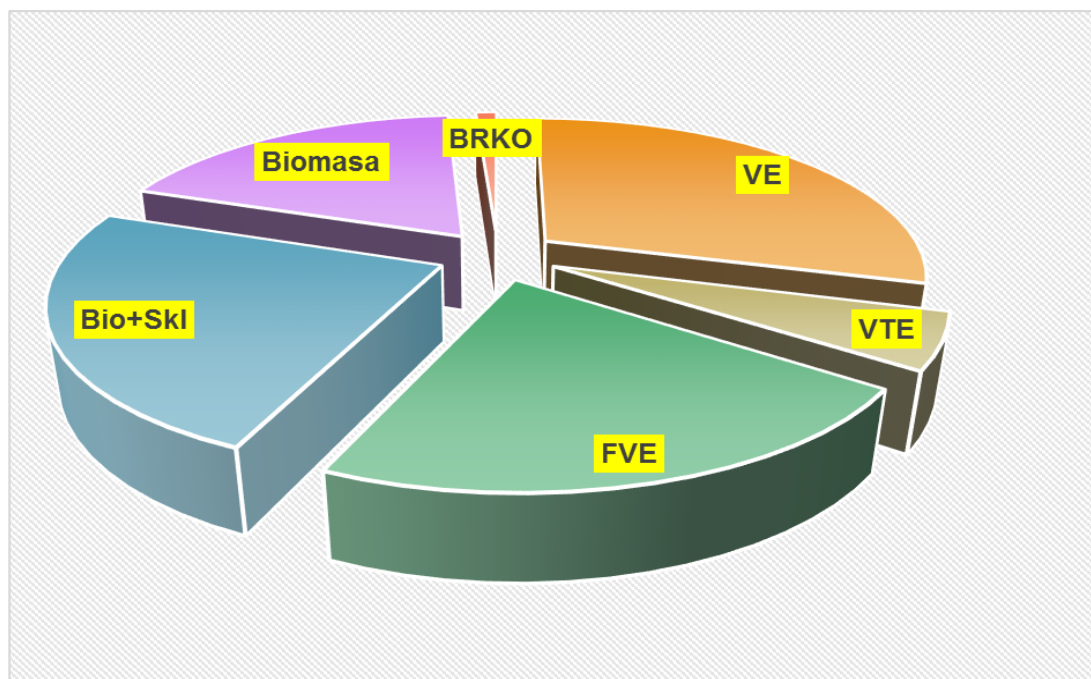
- tepelná s využitím klasických či přírodních materiálů (pevné materiály, slané roztoky),
- mechanická (setrvačníky, přečerpávací vodní elektrárny, akumulace stlačeného vzduchu)
- elektrická – kondenzátory, super kondenzátory, supravodivé technologie
- elektrochemická – klasické akumulátory, elektrochemické palivové články, palivové články
- chemická – vodík.

VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OZE

Elektrické vytápění dnes málokdo doporučuje. V porovnání s topením plynem nebo pevnými palivy je dnes provozně dražší a produkuje více oxidu uhličitého, ne sice v místě spotřeby, kde se elektrická energie mění v teplo, ale v místě výroby elektrické energie. Na další vývoj elektrického vytápění jsou rozporuplné názory mezi energetiky, ale i v renomovaných energetických institutech. Německý institut pro teplo a techniku topných olejů (IWO Hamburg) vidí budoucnost vytápění v elektrickém vytápění. Důvodem pro toto doporučení je skutečnost, že v roce 2013 se v Německu výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů podílela 24 % na celkové výrobě elektřiny. Tento podíl se stále zvyšuje, v roce 2020 by vzrostl 35 % a v roce 2050 dokonce na 80 %. Převažujícími zdroji budou větrné a fotovoltaické elektrárny, které neprodukují žádné emise CO₂.



Obr. 1 Vývoj výroby elektřiny z OZE a její podíl na hrubé domácí spotřebě v ČR (TWh)



Obr. 2 Podíl druhů OZE na celkové výrobě elektrické energie z OZE (9,2 TWh v roce 2013)

AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE V TOPNÝCH ZAŘÍZENÍCH

Aby bylo možno proměnlivou výrobu elektrické energie, danou závislostí na povětrnostních podmínkách efektivně využívat, je nutno vyrovnávat kolísavou výrobu hospodárnou akumulací přebytečné energie a jejím zpětným využitím. Přebytky elektrické energie, které nebude možno uplatnit na trhu s elektrickou energií, se v elektrických topných zařízeních přemění na teplo a akumuluje se v akumulčních nádržích v topných soustavách a v akumulčních zásobnících pro přípravu teplé vody. Elektrická topná zařízení mohou být dálkově ovládána provozovateli distribučních sítí a tak pružně reagovat na potřeby distribuční sítě a využívat elektrickou energii s výhodou v době, kdy jí bude přebytek. Tím by se zvýšila akumulční kapacita sítě a tak by se mohla vyrovnávat bilance vyráběného a odebíraného elektrického výkonu a do značné míry by se omezila závislost obnovitelných zdrojů na počasí. Operativně by se mohly využívat přebytky elektrické energie z vlastních domácích fotovoltaických elektráren.

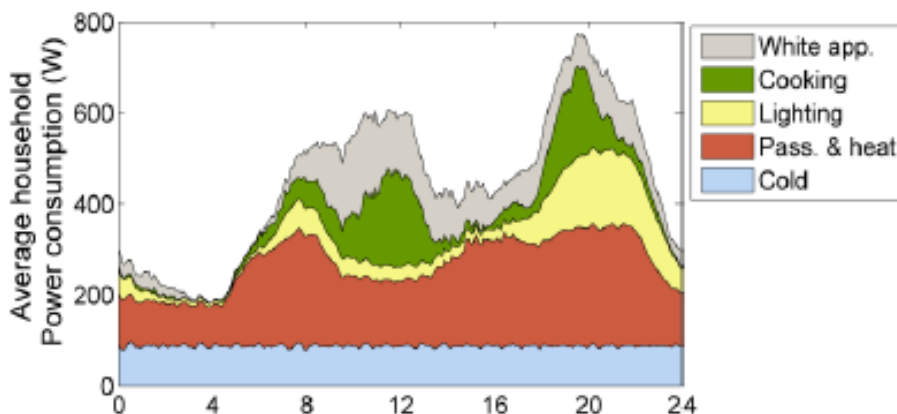
Současný trend vývoje pomalu směřuje k elektrickému vytápění, přestože někteří odborníci poukazují na to, že topná zařízení využívající elektrickou energii vykazují málo účinné využití primárních energetických zdrojů dané účinností výroby elektrické energie v tepelných elektrárnách. Elektrická topná zařízení omezí závislost na trhu s plynem a dalšími palivy. Oproti jiným topným systémům mají tato zařízení daleko nejnižší pořizovací náklady a minimální náklady na údržbu. Přenos a rozvod elektrické energie lze realizovat při nejmenším průřezu mezi všemi možnými nosiči energie, nevyžadují tepelnou izolaci, nešíří kolem sebe za provozu žádný jiný zbytkový odpad.

Bohužel trh s elektřinou není na tuto změnu připraven. Tarify pro elektrické vytápění u distribučních společností neslouží k podpoře tohoto druhu využívání elektrické energie. Rozdíly mezi cenou elektrické energie ve vysokém a nízkém tarifu nemotivují zákazníky k tomu, aby si pořizovali ve větší míře elektrické topné spotřebiče.

VYUŽITÍ CHYTRÝCH SÍTÍ PRO ELEKTRICKÉ VYTÁPĚNÍ

Zavedení chytrých sítí povede ke zvýšení spolehlivosti elektrizační soustavy, umožní integraci velkého počtu obnovitelných zdrojů energie, jejichž prostřednictvím se získá velký objem elektrické energie, kterou bude možno spotřebovat v místní spotřebě. Smart Grids jsou nezbytné pro rozvoj trhu s elektrickou energií a pro zvýšení účinnosti při využívání elektrické energie. Zavádění inteligentních sítí je spojeno s velkými investicemi do síťové infrastruktury a to nejen silové (vedení, rozvodny, transformátory), ale zejména do komunikační infrastruktury. Protože tyto investice budou hrazeny platbami za přenesenou elektrickou energii od zákazníků, bude nutno provést optimalizaci projektu tak, aby náklady byly pro zákazníky únosné.

Základním principem chytrého měření (Smart Metering) je vzájemná oboustranná komunikace mezi zdroji (distribuce) a zákazníky. Ta umožní, aby se zákazníci mohli rozhodovat o provozu elektrospotřebičů podle aktuální situace v síti. Zákazníci budou nastavit intervaly spínání topných spotřebičů (vytápění, ohřev teplé vody), dalších energeticky náročných spotřebičů (pračky, myčky, sušičky) tak, aby jejich provoz byl co nejhospodárnější a šetrný k síti. K tomu budou potřebovat informace o možnostech sítě (přetížení, výroba z OZE) a o tarifech (dynamické tarify). V těchto sítích by mohlo vyšší nasazení elektrického vytápění sehrát stabilizující roli při zajišťování rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.



Obr. 3 Denní diagram zatížení podle skupin elektrických spotřebičů

DIMENZOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO VYTÁPĚNÍ

Základním údajem pro návrh elektrického akumulčního vytápění jsou tepelné ztráty místností vytápěného objektu stanovené podle ČSN EN 12831. Dále je třeba znát režim vytápění daného objektu. Dimenzování akumulčních topidel uvedeme na příkladu elektrických akumulčních kamen. Během nabíjecí doby je třeba naakumulovat teplo pro celodenní provoz. Nabíjení probíhá po dobu 8 hodin. Tato doba může být souvislá nebo dnes častěji rozdělena na dvě časová pásma, např. 5 hodin v noční době a 3 hodiny v odpolední mimošpičkové době.

Příkon akumulčních kamen P pro jednotlivé místnosti se stanoví ze vztahu:

$$P = Q_d \cdot k_v \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

kde k_v je součinitel provozu

Denní potřeba tepla Q_d se stanoví:

$$Q_d = Q_c \cdot T_v \quad (2)$$

kde T_v je součinitel provozního režimu vytápění v hodinách.

ZÁVĚR

Podle NAP se má v České republice do roku 2040 zvýšit celkový instalovaný výkon malých fotovoltaických elektráren o cca 5 000 MW. Instalovaný výkon jedné fotovoltaické elektrárny na rodinném domku je podle zkušeností distribučních společností 5 kW. Tyto výkony bude možno připojit k síti bez licenčního řízení. Distribuční společnosti však požadují, aby veškerá vyrobená elektrická energie byla spotřebována v příslušném domku a dodávka do sítě by byla nulová. Akumulace energie v tepelných zařízeních je jednou z cest, jak tento požadavek naplnit.

LITERATURA

- [1] Sborník konference EGU Praha Engineering, 2011
- [2] Materiály ERÚ, ČEZ Distribuce

CHYTRÁ ENERGETIKA PRO ADMINISTRATIVNÍ BUDOVU

Petr Wolf, Jan Včelák, Aleš Vodička, Marek Maška

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze
petr.wolf@cvut.cz

ANOTACE

Príspevek ukazuje na príkladu nově vznikající administrativní budovy možnosti využití fotovoltaiky jako lokálního zdroje elektrické energie pro částečné pokrytí spotřeby objektu. Zabývá se vhodným dimenzováním komponent hybridního fotovoltaického systému pomocí celoroční simulace provozu, přičemž je kladen důraz na lokální využití energie a vysoký podíl krytí vlastní spotřeby z fotovoltaického zdroje.

ÚVOD

V posledních letech vzrůstá snaha o využívání obnovitelných zdrojů pro lokální vlastní spotřebu. Pro aplikaci na budovách se přímo nabízí instalace fotovoltaického (FV) systému na obálce budovy a využití aktuálně vyráběné energie pro napájení vnitřních elektrických okruhů. Pokud nelze využít prodeje přebytků do sítě, případně je toto ekonomicky nevýhodné, je třeba systém navrhnout tak, aby energie byla převážně lokálně využita. To lze zajistit jednak vhodným návrhem a dimenzováním FV systému, jednak vhodným provozním režimem.

Při návrhu FV systému je třeba zvážit následující kritéria:

- Výkon FV systému
- Sklon, typ instalovaných FV modulů
- Využití akumulátorů – jejich případné parametry
- Možnosti řízení spotřeb v objektu
- Topologie FV systému a způsob jeho řízení

Velmi důležitým vstupem při návrhu, kde se současně dá udělat největší chyba, je definování předpokládaného odběrového profilu a to nejlépe v jednom celoročním cyklu. Již při jeho srovnání s odhadovaným časovým profilem výroby FV zdroje se ukáže, nakolik je možné energii FV zdroje využít v objektu a zda by se vyplatila instalace akumulátorů či aktivního řízení spotřeb. Obecně lze říci, že spotřeba energie v administrativních budovách má daleko „vhodnější“ časový průběh pro využití energie FV systému pro lokální spotřebu v porovnání s residenčními budovami. V mnohých případech lze FV zdroj v administrativních budovách či výrobních halách efektivně provozovat i bez využití akumulátorů.

Pro posouzení míry využití energie z FV zdroje je vhodné definovat následující parametry [1]:

- Index soběstačnosti F_S vyjadřující podíl energie FV zdroje, která se lokálně spotřebuje vůči celkové spotřebě v budově. Jinak řečeno, se vzrůstající hodnotou tohoto parametru roste podíl energie FV zdroje na celkové spotřebě.
- Index využitelnosti produkce F_U . Vyjadřuje podíl energie FV zdroje, která se lokálně spotřebuje vůči celkové vyrobené energii FV zdrojem. Jinak řečeno, se vzrůstající

hodnotou tohoto parametru roste množství energie FV zdroje, které jsme schopni lokálně využít, a klesá přetok energie do sítě (případně nutné omezení výroby energie).

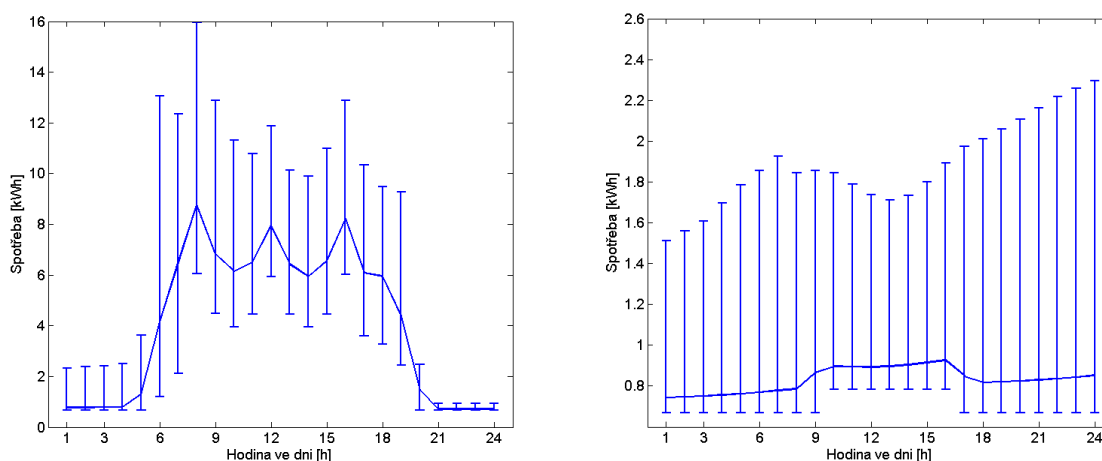
NÁVRH SYSTÉMU PRO ADMINISTRATIVNÍ BUDOVU

Návrh topologie a dimenzování hybridního FV systému s akumulací bude ukázáno na příkladu administrativní budovy společnosti Fenix Group v Jeseníku. Tato budova je výjimečná tím, že kromě pečlivě navrženého stavebního provedení zajišťujícího nízkou provozní energetickou náročnost bude využívat hybridní fotovoltaický systém s akumulátorovým úložištěm a zakázkově vyvíjeným systémem řízení. Dále bude podrobně monitorována kvalita vnitřního prostředí v jednotlivých částech budovy (teplota, vlhkost vzduchu, koncentrace CO₂ a těkavých látek), spotřeba a teplota vody z řadu a vnější klimatické podmínky měřené meteostanicí spolu s čidly osvětlení určenými pro fotovoltaiku [2]. Měření spotřeby elektrické energie bude rovněž probíhat v mnoha nezávislých okruzích; některé z nich budou umožňovat zálohovaný provoz v případě výpadku elektrické energie. Pro řízení akumulátorového úložiště bude využito nových principů vyvíjených v rámci projektů UCEEB založených na cloudové službě předpovědi počasí PVforecast [3, 4] a předpovědi spotřeby v budově. V první polovině roku 2016 dojde ke zprovoznění uvedených technologií a následně bude budova dlouhodobě monitorována s cílem vyhodnotit zvolené řešení a optimalizovat provoz řízení použitých technologií.

Spotřeba elektrické energie v objektu

Při analýze spotřeby elektrické energie objektu byly spotřebiče rozděleny na základní okruhy do dvou kategorií, pro které byl definován roční profil odběru v hodinových intervalech:

- Kategorie (A): Spotřebiče, jejichž spotřeba souvisí s venkovními podmínkami a mění se během roku (vytápění, chlazení, osvětlení) a s obsazeností budovy (pracovní den / víkend).
- Kategorie (B): Spotřebiče, jejichž spotřeba nezávisí na venkovních podmínkách. Může mít shodný průběh každý den nebo záviset pouze na obsazenosti budovy (pracovní den / víkend), (výtah, chladničky, VZT, expozice, slaboproud, TUV).



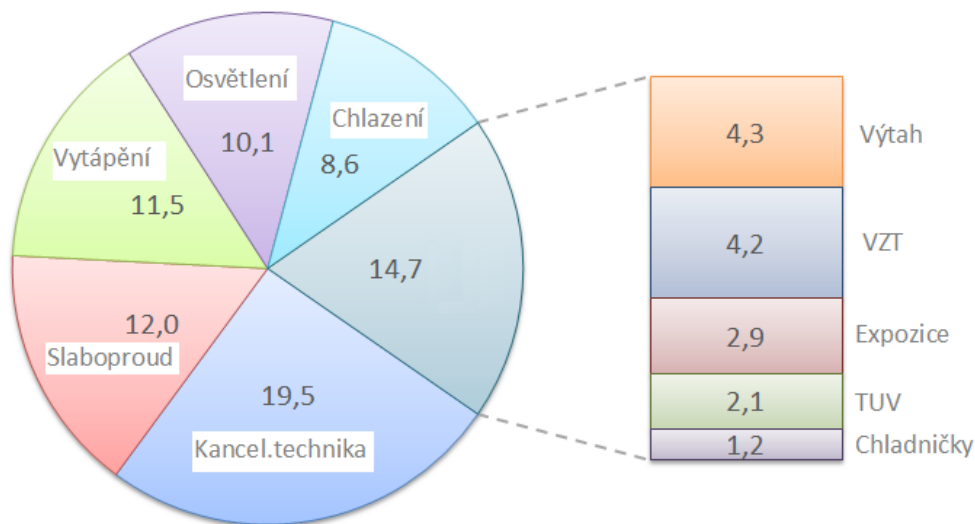
Obr. 1 Denní předpokládaný profil spotřeby elektrické energie během pracovních dní a o víkendu – průměrné, maximální a minimální hodnoty spotřeby v jednotlivých hodinách

Model energetického chování objektu byl vytvořen v simulačním SW Designbuilder, který umožňuje podrobnou hodinovou, nebo sub-hodinovou analýzu ročního provozu. Současně

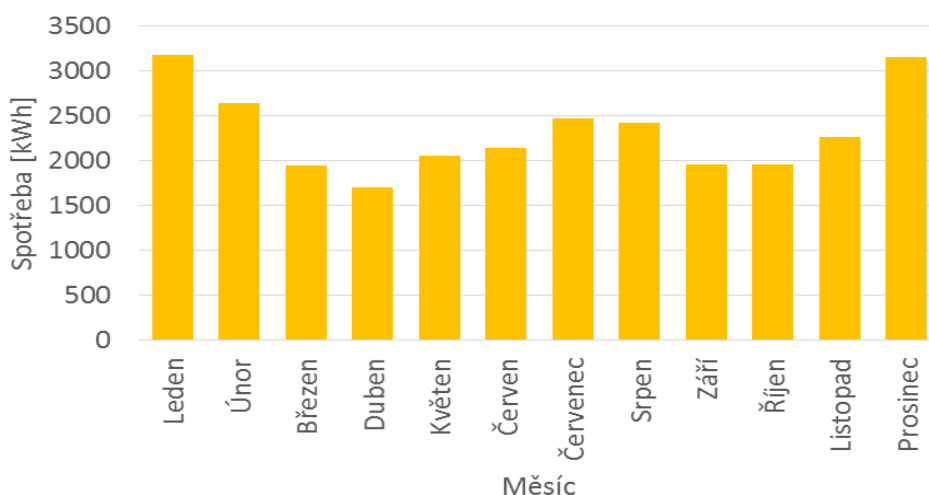
umožňuje stanovit návrhová výkonová kritéria pro energetické systémy a posouzení tepelného komfortu. Simulační model byl použit ke stanovení předpokládaných hodinových spotřeb elektriny. Profily užívání objektu byly upraveny na předpokládaný provoz budovy.

Profil průměrné, maximální a minimální spotřeby energie během pracovních dní a o víkendu ukazuje obr 1. Spotřeba energie během víkendu je v porovnání s pracovním dnem minimální, jsou sníženy požadavky na temperování místností, nejsou provozovány kancelářské spotřebiče a kuchyňka, je též redukován provoz vzduchotechniky řízené čidly CO₂.

Průměrnou denní spotřebu elektrické energie v definovaných okruzích ukazuje Obr. 2, celkový odhad spotřeby elektrické energie pro jednotlivé měsíce poté Obr. 3.



Obr. 2 Průměrná denní spotřeba elektrické energie dle kategorie spotřebičů [kWh]



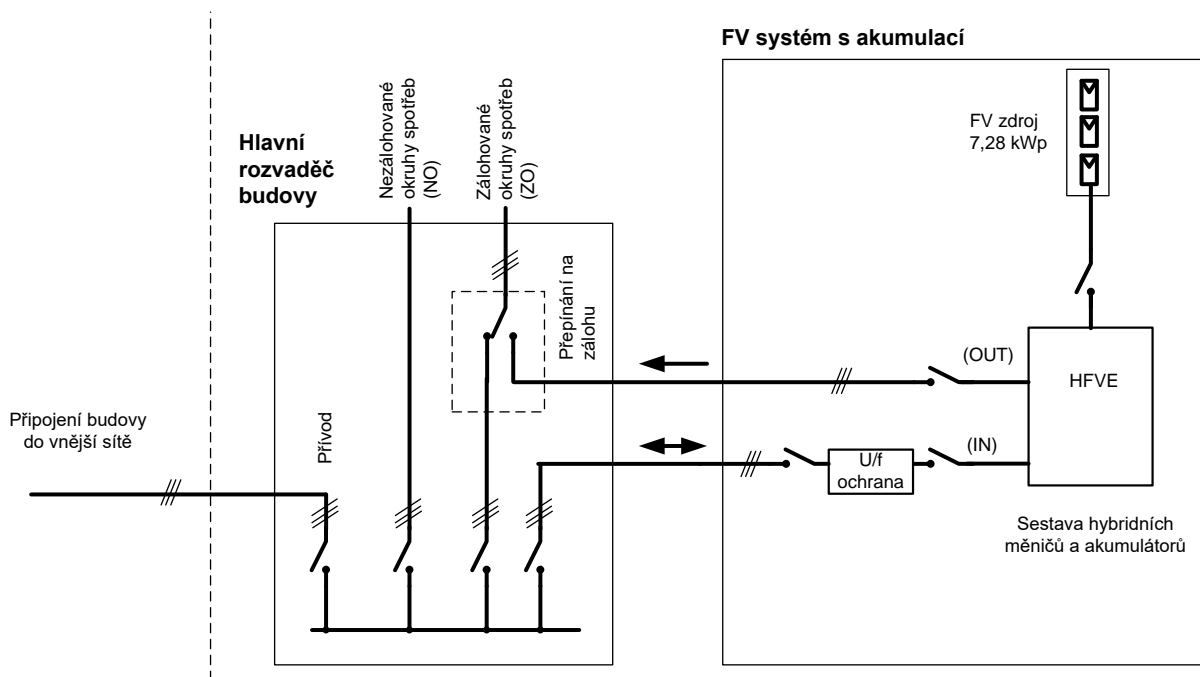
Obr. 3 Odhad spotřeby elektrické energie v jednotlivých měsících

Hybridní fotovoltaický systém

Hybridní fotovoltaický (HFV) systém je tvořený sestavou FV modulů na střeše budovy o výkonu 7,28 kW_P, 3 ks hybridních jednofázových měničů (Studer XTH 6000-48), 4 ks lithium-iontových akumulátorů (BMZ ESS 7.0) a rozhraním pro lokální i dálkové řízení a monitoring. To tvoří jednak datalogger a řídicí rozhraní (Studer RCC-02), jednak zakázkově

naprogramované PLC výrobce TECO a.s. Přes tuto jednotku je hybridní systém lokálně i dálkově sledován a řízen, jednotka je dále využita pro celkový monitoring systémů TZB v budově a sběr dat z čidel prostředí v budově.

Připojení HFV systému do rozvodů budovy ukazuje Obr. 4. Instalované měniče mají dvě výkonové svorkovnice pro připojení střídavého proudu. Vstup značený (IN) lze použít jako vstup připojen k distribuční síti. Měnič lze zapnout do režimu, kdy z tohoto vstupu energii odebírá pro spotřebu na druhé svorkovnici (OUT) či pro nabíjení akumulátorů nebo naopak energii z akumulátorů či FV systému do něj dodává. Svorkovnice (IN) nemůže být použita (a to i z bezpečnostních důvodů) pro zálohování výpadku energie. Pro splnění požadavků na paralelní provoz vyroben je zde instalována externí napěťově frekvenční (U/f) ochrana. Svorkovnice (OUT) slouží pro napájení lokálních okruhů, lze ji použít pro zálohování výpadku distribuční sítě.



Obr. 4 Blokové schéma zapojení elektroinstalace budovy včetně HFV systému

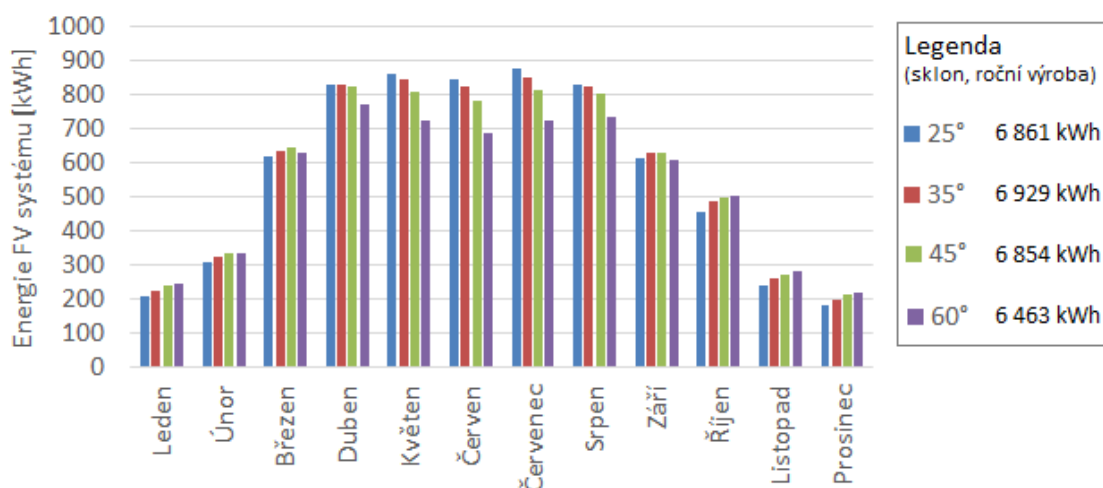
HFV systém je navržen tak aby byl maximálně konfigurovatelný a řízen zakázkově připravovaným nadřazeným systémem, bude pro objekt zabezpečovat následující funkce:

- **Zvýšení podílu vlastní spotřeby vyrobené energie FV zdrojem** - Energie získaná FV zdrojem bude maximálně lokálně využívána, nadbytek energie bude akumulován pro následné lokální využití v budově. Pro efektivní řízení bude implementována predikce zisku z FV systému založená na cloudové službě PVforecast a predikce spotřeby objektu.
- **Možnost podpory zajištění ¼ h maxim sousední výrobní haly** - Nová administrativní budova je fyzicky připojena do rozvaděče již stávajícího výrobního areálu. Bude možné testovat provoz a balancování odběrů současně s tímto areálem.
- **Řízení spotřeb v objektu** - Řídicí systém umožní předávat dalším systémům TZB informaci o energetické situaci aby na ni mohli reagovat např. snížením spotřeb v budově.

- **Balancování odběru budovy s ohledem na omezený maximální příkon** - Akumulátorové úložiště bude moci vyvažovat krátkodobé odběrové špičky v objektu.
- **Balancování odběru s ohledem na tarif energie** - Systém je připraven na budoucí rozšíření pro využití vícetarifních sazeb energie i flexibilního vnitrodenního trhu s energií.
- **Podpora sítě** - Systém je připraven na budoucí rozšíření pro vyvažování distribuční sítě, tj. může působit jako aktivní prvek pro „smart grid“.

Fotovoltaický zdroj

Při návrhu instalace FV modulů připadalo v úvahu využití plochy na rovné střeše. Obr. 5 ukazuje předpokládanou energii vyrobenou FV systémem v závislosti na volbě sklonu FV modulů, vycházející ze zpracování meteorologických dat softwaru Meteororm v minutovém kroku. Vyšší sklon zajistí podpoření výroby FV zdroje v zimním období, přínos však není vysoký. Vyšší sklon v zimním období by mohl mít důležitý přínos pro lepší skluz sněhu v zimním období; pokrytí modulů sněhem však není v datech grafu uvažováno.



Obr. 5 Blokové schéma zapojení elektroinstalace budovy včetně HFV systému

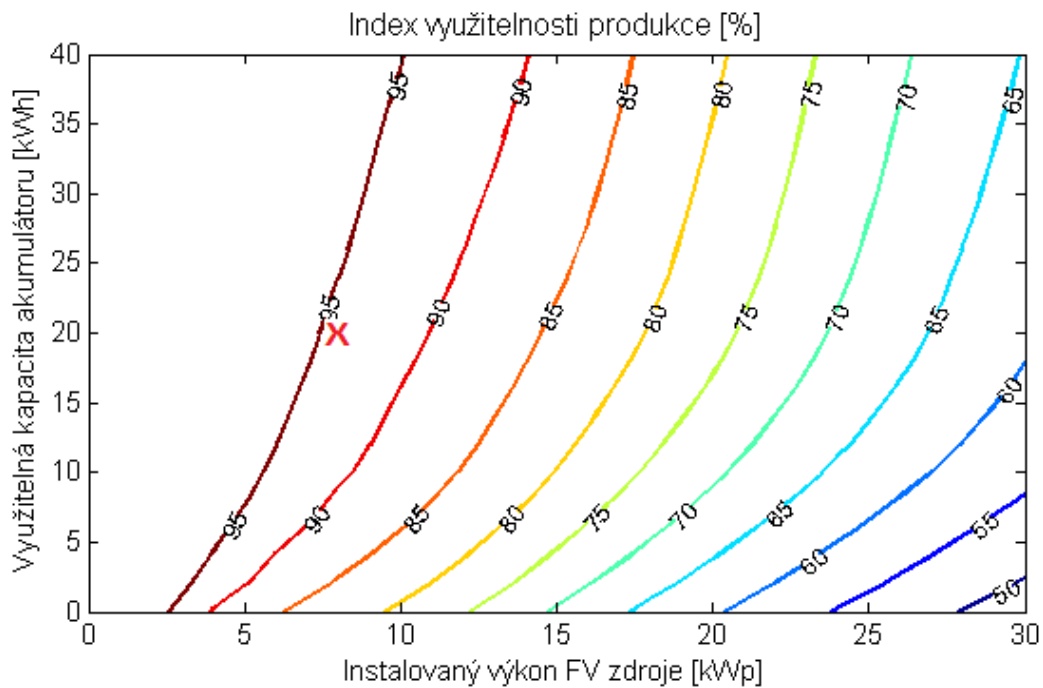
V rámci objektu byla zvolena varianta se sklonem 35°, na rovnou střechu bylo při uvážení potřebných odstupů řad s FV moduly a místa pro potřebné další prvky TZB instalováno celkem 7,28 kW_P.

Simulace provozu HFV systému s akumulátorem

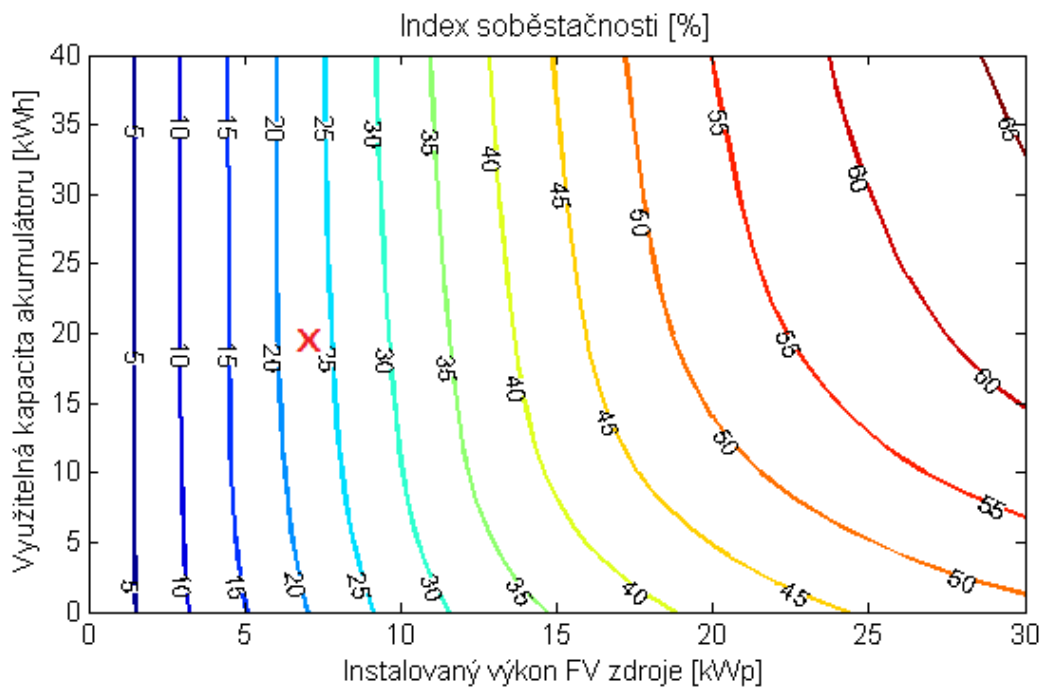
Data o předpokládané spotřebě elektrické energie v administrativní budově byla spolu s předpokládanou výrobou FV systému použita pro provedení simulace s krokem 1 minuty pomocí programu Matlab. Byly též ve zjednodušené formě zohledněny ztráty na měniči a účinnost akumulátoru při nabíjení a vybíjení. Byl uvažován instalovaný výkon FV modulů v rozsahu 0 – 30 kW_P a využitelná kapacita akumulátoru v rozsahu 0 – 40 kWh. Výsledky prováděných simulací pro kombinace uvedených parametrů byly zpracovány ve formě Obr. 6 (Index využitelnosti produkce F_U) a Obr. 7 (Index soběstačnosti F_S).

Z uvedeného je patrné, že uvažovaný profil odběru administrativní budovy je velmi vhodný pro zapojení FV zdroje. I při absenci akumulátoru lze vysoký podíl energie z fotovoltaického zdroje využít v rámci budovy ($F_U = 83 \%$) a zajistit tudíž částečné pokrytí spotřeby budovy tímto zdrojem ($F_S = 20 \%$). Zapojení akumulátoru do systému umožní hodnoty těchto

parametrů ještě zvýšit ($F_U = 94\%$, $F_S = 23\%$) a umožní další funkce (záložní zdroj, omezení špiček odběrů, podpora distribuční sítě).



Obr. 6 Očekávaný index vyžitelnosti produkce FV zdroje v závislosti na instalovaném výkonu FV zdroje a kapacity akumulátoru s vyznačením parametrů instalace (x)



Obr. 7 Očekávaný index soběstačnosti objektu v závislosti na instalovaném výkonu FV zdroje a kapacity akumulátoru s vyznačením parametrů instalace (x)

ZÁVĚR

Na zvoleném příkladu parametrizované simulace bylo ukázáno, že zvolená administrativní budova má vhodný profil odběru pro využití fotovoltaického zdroje pro vlastní spotřebu.

Instalace FV systému s akumulátorem umožní ještě více vyrobenou energii zužítkovat pro vlastní spotřebu, nicméně stále se jedná o drahou investici. Akumulátor však může zajistit další funkce pro budovu, jako např. záložní zdroj energie, balancování sítě a snížení požadavků na připojitelný výkon, aktivní využívání různých cenovými tarifů energie, či podporu distribuční sítě. Toto jsou funkce, které přináší nový pohled na budovu jako aktivního prvku chytré sítě. Lze očekávat, že při stále narůstajícím výkonu obnovitelných zdrojů v distribuční soustavě jednotlivé budovy budou moci efektivně přispívat k balancování sítě. Pro toto bude třeba vyvinout nové motivační prostředky a tarifní strukturu, např. proměnné vnitrodenní ceny silové energie poskytnuté koncovým zákazníkům, tj. maloodběratelům.

LITERATURA

- [1] STANĚK, K. Fotovoltaika pro budovy. ISBN: 978-80-247-4278-6. Grada 2012.
- [2] KOPAČKOVÁ, D. Nový energetický koncept - testovací budova Fenix v Jeseníku. TZB-INFO. Dostupné online na: <http://elektro.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13528-novy-energeticky-koncept-testovaci-budova-fenix-v-jeseniku>
- [3] VČELÁK, J., WOLF, P., et al. Využití předpovědi osvitů pro řízení hybridních fotovoltaických systémů. 34. Nekonvenční zdroje elektrické energie. Vyškov.
- [4] Webová služba PV Forecast, dostupné online na: <http://www.pvforecast.cz>.

SEZNAM OZNAČENÍ

HFV	hybridní fotovoltaický (systém)	
F_S	index soběstačnosti	[%]
F_U	index využitelnosti produkce FV zdroje	[%]
FV	fotovoltaický (systém)	
TZB	technické zabezpečení budovy	

Tato práce vznikla z projektu Univerzitní centrum energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze.

BIOMASA JAKO ZDROJ PRO VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE A TEPLA V BYTOVÝCH DOMECH

Zbyněk Zelený, Anna Fořtová, Marek Slavík

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze
zbynek.zeleny@cvut.cz, anna.fortova@cvut.cz

ANOTACE

Energie z fotovoltaických, fototermtických panelů a tepelná čerpadla jsou nejvyužívanější formou energie z obnovitelných zdrojů v rodinných a bytových domech.

Tepelná čerpadla jsou vhodná jako zdroj tepla i přesto, že počáteční investice mohou být vysoké. Fotovoltaické a fototermtické panely, které dodávají elektrickou energii a teplo, jsou závislé na intenzitě slunečního záření a mohou být proto těžce regulovatelné. Především u fotovoltaických panelů je obtížné jejich využití v inteligentních sítích (tzv. smart grids).

V České republice je stále většina budov energeticky závislých na fosilních palivech. Alternativu k fosilním palivům můžeme najít v biomase, která je běžně používána jako zdroj energie pro větší objekty. Konečný produkt musí splňovat požadavky, jako jsou nízké provozní a investiční náklady, aby byl pro potenciální zákazníky atraktivní. Tým LORCA na UCEEB (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov) na takovém zařízení již několik let pracuje.

Hlavním účelem tohoto článku je popis kogenerační jednotky založené na principu organického Rankinova cyklu (dále jen ORC) pro využití v bytových domech. Významná část této práce je zaměřena na modelování dat tepelné potřeby domu a požadavku na dodávku elektrické energie. Cílem je určit výkonové parametry kogenerační jednotky, nezbytné kapacity pro akumulaci tepla, provozní stavy jednotky, investice a provozní náklady.

ÚVOD

V současné době je většina rodinných a bytových domů závislá na dodávkách energie pocházející z fosilních paliv. Tato skutečnost nepůsobí příliš pozitivně na životní prostředí. Nejen z tohoto důvodu se v posledních pár letech lidstvo začalo zaměřovat na energii získávanou z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Mezi OZE řadíme sluneční energii, energii získanou z vody, větru, spalováním biomasy a geotermální energii.

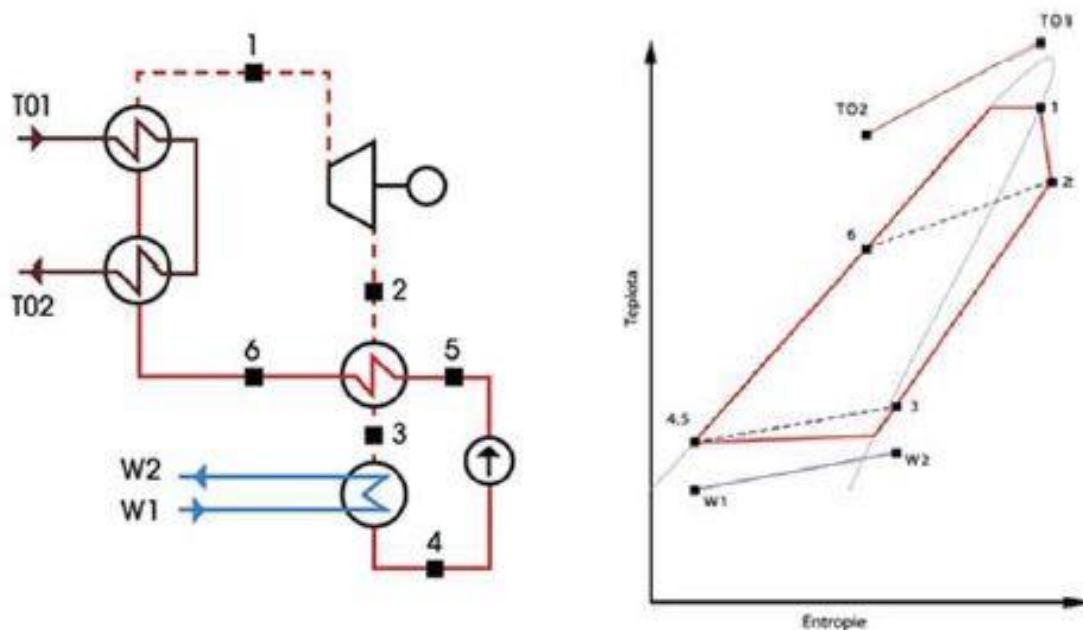
Zařízení, která k výrobě elektrické nebo tepelné energie využívají OZE, přispívají dílem jak ke snížení energetické závislosti na spalování fosilních paliv, tak ke zlepšení životního prostředí a v neposlední řadě také k decentralizaci energetiky, ke které lidstvo v rámci zvýšení soběstačnosti, směřuje. V případě vhodného použití takového zařízení se může významně zvýšit ekonomická efektivita, zmíněná kvalita životního prostředí a efektivita využití primárních zdrojů energie (PEZ). [1]

Tato práce se věnuje jedné z variant využití OZE, konkrétně nasazení ORC technologie pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla z biomasy.

POPIS, PRINCIP ORC

Organický Rankinův cyklus (dále ORC) je velmi podobný Rankine - Clausiovu cyklu, který běžně využívají konvenční tepelné elektrárny. Principiální schéma ORC oběhu s regenerací a T-s diagram tohoto oběhu je na Obr. 1. Cirkulace oběhu je zajištěna napájecím čerpadlem,

kde dochází ke zvýšení tlaku pracovní látky (4–5), ta se dostává dál do dvoustupňového výparníku ohřivaného teplotněnou látkou, kde při stálém tlaku dochází ke zvýšení teploty na teplotu varu a poté dochází k vypařování látky. Sytá pára (1) vstupuje do expanzního stroje, kde se část její tepelné energie mění na mechanickou energii a v generátoru na elektrickou energii. Část tepla přehřáté páry mezi body 2–3 se využívá v rekuperačním výměníku k tzv. regeneraci (využije se pro ohřev již zkondenzované pracovní látky). Ochlazené páry vstupují následně do kondenzátoru (3), kde se odvádí teplo z cyklu (3–4). U mikro-kogeneračního zařízení se předpokládá využití tohoto tepla k vytápění objektů. [2]



Obr. 1 Schéma ORC oběhu (vlevo); T-s diagram ORC (vpravo)

Na rozdíl od běžného parního Rankine-Clausiova cyklu používá ORC jako pracovní látku organickou sloučeninu (např. uhlovodíky, fluorovodíky, silikonové oleje). Oproti vodě mají tyto látky nevýhody jako je agresivita vůči konstrukčním materiálům, takže konstrukce musí být z kvalitních materiálů, jako je korozivzdorná ocel, fluorový kaučuk, teflon atd. Dále pak fakt, že používané látky mohou být zdravotně závadné a proto je vysoký požadavek na těsnost zařízení, aby látky neunikaly do ovzduší. Nicméně jejich výhody náročnou konstrukci zařízení často vykompenzují. Patří mezi ně dobré termodynamické vlastnosti jako je nízká tepelná kapacita a nízké výparné teplo, ale i vyšší molární hmotnost, díky které má, ve srovnání s parní elektrárnou nízkého výkonu, výrazně vyšší objemové toky turbínou. Díky tomu lze navrhnout turbínu s menším počtem pracovních stupňů pracující na nižších otáčkách, což snižuje její obvodové ztráty. [2]

POPIS MODELOVÉHO DOMU

Jako modelový dům se pro účely této práce bude posuzovat osmipodlažní dům, který je výškově osazen v úrovni 1. nadzemního podlaží. Objekt obsahuje 32 bytových jednotek, kde v typickém podlaží jsou 3 byty o rozloze 63,5 m² a 1 byt o rozloze 72 m², přičemž konstrukční výška podlaží je 2,8 m. Obvodové panely pláště jsou sendvičové, železobetonové o tl. 300 mm, střecha je jednovrstevná, nevětraná a okna a balkonové dveře jsou s dvojitým zasklením a neoprenovým těsněním. V Tab. 1 jsou uvedeny součinitele prostupu tepla pro dílčí konstrukce.

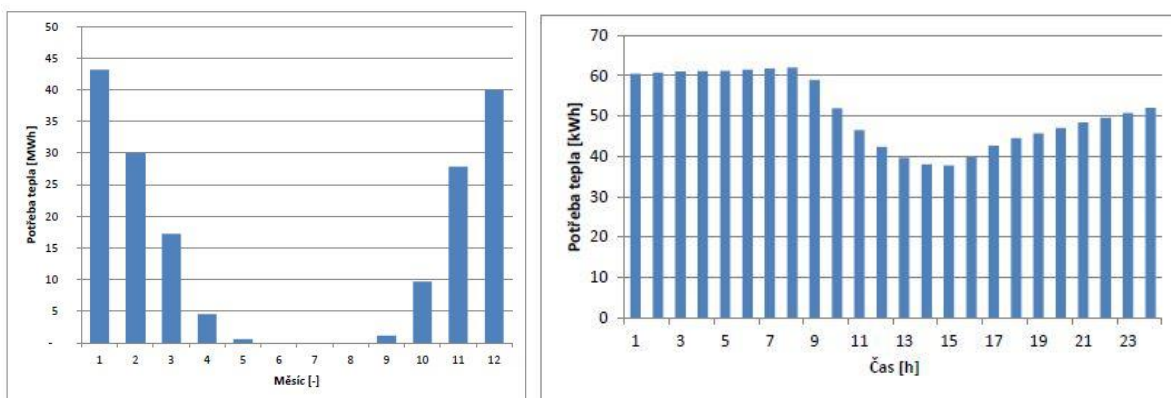
Tab. 1 Součinitele prostupu tepla konstrukcí.

Konstrukce	U [W/m ² K]
Obvodový plášť	0,67
Střešní plášť	0,33
Podlaha na terénu	1,31
Okna a balkonové dveře	2,9

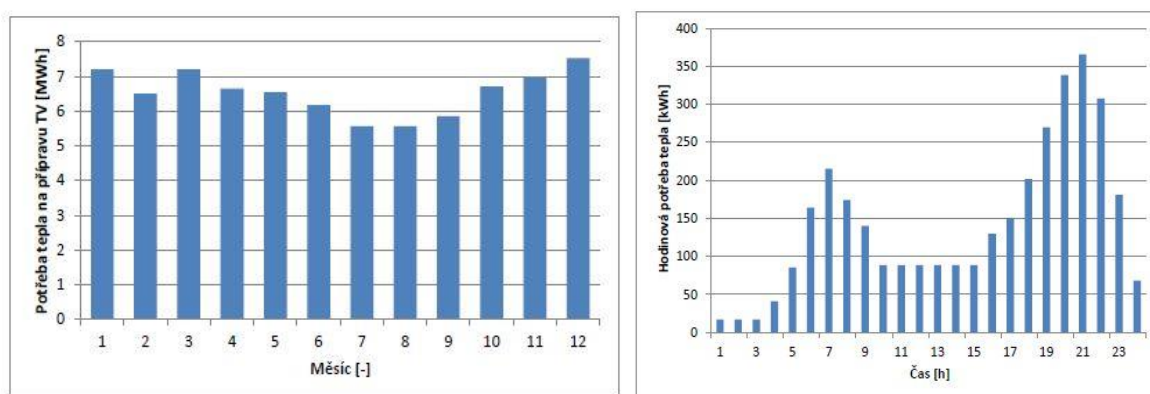
ANALÝZA TEPELNÝCH POTŘEB

Celková tepelná ztráta objektu činí 127 kW, celková roční potřeba tepla na vytápění tvoří 193 MWh/rok, potřeba tepla na přípravu teplé vody (dále TV) činí 79 MWh/rok a potřeba elektrické energie pak 73 MWh/rok. Pro stanovení potřeby tepla na vytápění se uvažuje výpočtová venkovní teplota $t_{e,v} = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$, průměrná venkovní výpočtová teplota činí $t_{e,p} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a průměrná vnitřní výpočtová teplota vytápěného objektu činí $t_{in} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro otopné období, které se uvažuje měsíčně. [1]

Uváděné měsíční potřeby tepla jsou uvedeny na Obr. 2 vlevo. Tepelná potřeba byla určena pomocí hodinové potřeby pro každý den otopného období. Příklad takového hodinového rozdělení pro zimní měsíc je uveden na Obr. 2 vpravo.



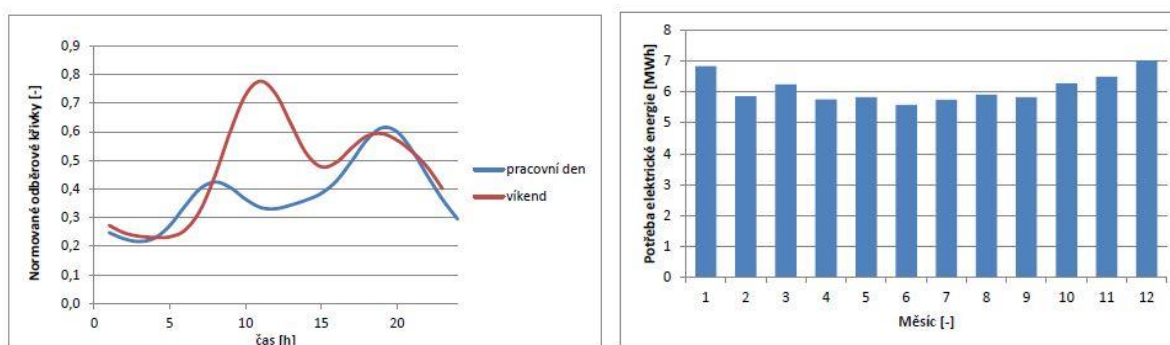
Obr. 2 Měsíční a hodinové rozložení potřeby tepla pro vytápění (příklad zima)



Obr. 3 Měsíční a hodinové rozložení potřeby tepla pro přípravu TV

Na Obr. 3 jsou znázorněny konkrétní hodnoty hodinového průběhu potřeby tepla na přípravu TV pro přechodné období (Březen) a měsíční potřeba tepla na přípravu TV.

Průběh denní spotřeby elektrické energie je modelován s využitím průběhu typových diagramů uveřejněných Operátorem trhu s elektřinou (dále OTE). V případě pracovního dne se vyskytují extrémní ráno a večer a o víkendu potom dopoledne a večer. Na Obr. 4 je pak ukázán průběh denní a měsíční potřeby elektrické energie.



Obr. 4 Denní a měsíční potřeba elektrické energie

Potřeba elektrické energie je větší v zimních měsících. Pro uvedený objekt je potřeba tepla na vytápění přibližně dvakrát větší než potřeba tepla na přípravu TV (tento poměr se však u moderních budov blíží k jedné).

NÁVRH SYSTÉMU S KOGENERAČNÍ JEDNOTKOU ORC A ŠPIČKOVÝM KOTLEM

ORC jednotka je navržena tak, aby výroba tepla pokryla potřeby na vytápění a přípravu TV v modelovém objektu. Tato ORC jednotka používá jako palivo dřevní štěpku. Součástí návrhu systému s kogenerační jednotkou je také vyhodnocení provozních a investičních nákladů. Optimální výkonové parametry jsou posuzovány na základě dat pro potřebu tepla na vytápění a přípravu TV a závisí na:

- potřebě tepla v daném časovém úseku;
- provozních režimech kogenerační jednotky v jednotlivých obdobích roku;
- provozním režimu špičkového kotle;
- požadavku na výrobu elektrické energie.

Návrh provozních režimů je volen tak, aby v zimním období byla jednotka v provozu 24 hodin, pro přechodová období byl navržen provoz na 16 hodin a v letním období 8 hodin. Ve dnech, kdy kogenerační jednotka není schopna pokrýt potřebu tepla, je sepnut špičkový kotel, který je navržen na spalování dřevní štěpky.

Optimální výkon kogenerační jednotky byl stanoven na 44 kW. Minimální výkon špičkového kotle byl stanoven na 63 kW.

Jako akumulční nádoby jsou pro celý systém navrženy:

- hlavní akumulční nádoba pro kogenerační jednotku;
- akumulční nádoba špičkového zdroje;
- zásobník teplé vody.

Vyrobená elektrická a tepelná energie kogenerační jednotkou a špičkovým kotlem pro dané režimy a celkové hodnoty jsou uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 *Bilance vyrobených energií v průběhu roku*

Energie	[kWh/rok]
Vyrobená el. energie - 8h provoz	3 744
Vyrobená el. energie - 16h provoz	1 680
Vyrobená el. energie - 24h provoz	18 644
Vyrobená el. energie - celkem	24 068
Vyrobené teplo - ORC	216 613
Vyrobené teplo – špičkový kotel	60 636
Vyrobené teplo - celkem	277 249
Celková potřeba tepla	277 249

EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro vypočítané hodnoty potřeby elektrické energie a tepla je stanovena potřeba paliva a entity s ní spojené (pořizovací náklady, náklady na dopravu, skladování a servisní náklady a náklady na opravy ORC jednotky). Celkové provozní náklady (bez DPH) činí 200 tis. Kč/rok a zahrnují jmenovitě

- náklady na palivo 128 tis Kč/rok (roční potřeba paliva 1 276 GJ/rok = 92 t štěpky/rok);
- náklady na dopravu a skladování paliva 33 tis. Kč/rok;
- servisní náklady a náklady na opravy 40 tis. Kč/rok.

Investiční náklady dle aktuálních cen a nabídek jsou uvedeny v tab. 3

Tab. 3 *Investiční náklady*

Investiční náklady	Cena [Kč bez DPH]
Technologie ORC + hořák 60 kW	1 000 000
Kotel EGV – Multifuel BIO 80 kW	285 640
Sklad paliva	200 000
Elektroinstalace	50 000
Stavební úpravy	60 000
Odkouření	80 000
Komín	70 000
Čerpadla a armatury	160 000
Ekvitermní regulace	60 000
Akumulační nádoby + zásobník TV	189 480
Projekční a inženýrská činnost	112 322
Technický dozor investora	70 201
Rozpočtová rezerva	112 322
Investiční náklady celkem	2 449 966

V případě tohoto systému je uvažováno využití veškeré energie spotřebitelem, přebytečná energie není dodávána do sítě. Vlastní spotřeba jednotky je stanovena na 1 kW a při standby režimu 80 W (tyto hodnoty vycházejí ze zkušeností s experimentálním ORC zařízením na UCEEB). Úspory se počítají z vyrobené elektrické energie za rok (po odečtení spotřeby, která činí 18 108 kWh/rok). Cena elektrické energie po odečtení poplatků za OZE, služeb a činností OTE a přičtení zelených bonusů činí 3,43 Kč/kWh. Při uvažování této ceny elektrické energie činí celková roční úspora 62 075 Kč/rok (za první rok). V dalších letech se uvažuje klesající trend cen elektrické energie o 1,5 % meziročně. Při uvažování těchto podmínek se investice do ORC vrátí reálně za 4,9 let a při minimální životnosti ORC, která je 12 let, by dosažitelná úspora byla 2 867 tis. Kč. [1]

ZÁVĚR

Instalování kogenerační jednotky v bytovém komplexu, na kterém bylo provedeno zhodnocení energetické náročnosti (potřeb elektrické a tepelné energie), může z hlediska dlouhodobého používání této jednotky (minimální životnost 12 let) uspořit poměrně vysokou částku peněz tj. 2 867 tis. Kč. Investice do této jednotky, která při použití současných technologií a nabídek činí 2 450 tis. Kč, se při optimálním provozu vrátí za 4,9 let. Provoz této jednotky je volen tak, aby v zimním období byla jednotka v provozu 24 hodin, pro přechodová období byl navržen provoz na 16 hodin a v letním období 8 hodin, kdy její výkon je stanoven na 44 kW a maximální výkon špičkového kotle 63 kW.

Používání kogenerační jednotky může výrazně přispět k současnému trendu zvyšování podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu a zároveň ke snížení využívání uhlí jako paliva pro malé lokální výtopy a domácnosti a tak obecně ke snížení emisí. Zároveň může přispět k decentralizaci energetiky a tak lokálně k vyšší energetické soběstačnosti.

Dalším budoucím uplatněním jednotek může být zajištění zálohování napájení v oblastech, kde je veřejná síť často mimo provoz (v podmínkách ČR jsou to např. horské chaty a pensiony, apod.) nebo je poměrně nestabilní.

LITERATURA

- [1] SLAVÍK, M.: Využití jednotky s ORC v bytovém domě. Praha: ČVUT, Diplomová práce, vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D., 2015.
- [2] MYDLIL, P.: Návrh ORC jednotky pro využití odpadního tepla v mikroturbíně. Praha: ČVUT, Diplomová práce, vedoucí práce doc. Ing. Michal Kolovratník CSc., 2012.