ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

KOMBINOVANÝ SOLÁRNÍ KOLEKTOR VZDUCH-KAPALINA

Viacheslav Shemelin

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Technika prostředí

Školitel: doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha Září 2020

Dual Air/Liquid Solar Collector

Disertační práce byla vypracována v prezenční a kombinované formě doktorského studia na Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Viacheslav Shemelin
Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00

Školitel: doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.
Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v …… hod.

v zasedací místnosti Ústavu techniky prostředí č. B1-819 (8. patro) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Technika prostředí.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
předseda oborové rady oboru Technika prostředí
Fakulta strojní ČVUT v Praze

ANOTACE

Práce je založena na vývoji detailního matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru, implementaci vyvinutého modelu do simulačního prostředí TRNSYS a validaci modelu v kapalinovém a vzduchovém provozním režimu. Pro experimentální validaci modelu byl vytvořen funkční vzorek kombinovaného kolektoru se třemi různými konstrukcemi absorbéru. Následně byl validovaný model použit pro analýzu potenciálu využití kombinovaných solárních kolektorů pro různé klimatické podmínky, pro různé druhy solárních systémů a pro rodinné domy s různou energetickou náročností.

V úvodní části práce je provedena kritická literární rešerše. Cílem této rešerše bylo vytvořit kritický přehled současných znalostí na téma kombinovaného solárního kolektoru na bázi dvou teplonosných látek – vzduch/kapalina. Další část práce se věnovala vývoji matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru založeného na detailním popisu jednotlivých režimů přenosu tepla v jednotlivých částech kolektoru. Model řeší iteračně vnitřní a vnější energetickou bilanci kolektoru při jednotlivých provozních režimech (ohřev kapaliny/ohřev vzduchu). Následně byla provedena validace vyvinutého modelu, detailní analýza nejistoty experimentálního měření a detailní analýza nejistoty matematického modelu. V následující části byla provedena analýza potenciálu využití kombinovaných kolektorů vzduch/kapalina. V rámci této analýzy byla provedena energetická analýza čtyř různých systémů pro rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických (Stockholm, Praha a Milan) a stejných provozních podmínek: systém pro přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů v režimu ohřevu vody, dva systémy pro přípravu teplé vody a ohřev větracího vzduchu na bázi kombinovaných solárních kolektorů a následně systém přípravy teplé vody a cirkulačního vytápění také na bázi kombinovaných solárních kolektorů.

V závěrečné části práce pak byly porovnány výsledky s vytyčenými cíli. Kromě toho, byly uvedeny přínosy pro praxi i teorii a bylo nabídnuto další možné směrování výzkumu v oblasti kombinovaných solárních kolektorů.

SUMMARY

The dissertation work is focused on the development of the detailed mathematical model of a dual air/liquid solar collector, implementation of the model in TRNSYS simulation environment, and the model validation in liquid and air operating modes. To provide the experimental validation of the created mathematical model, the functional sample of the dual collector with three different absorber configurations was created. Subsequently, the validated model was used to evaluate the potential of using dual air/liquid collectors for different climatic conditions, for different solar systems, and for family houses with different energy performance. Finally, the theoretical design optimization of the functional sample was provided for specific climatic conditions and for a specific collector application.

Introduction is focused on the literature research. The main aim the research was to create a critical overview of current knowledge on the dual air/liquid solar collectors. The next part of the work was devoted to the development of the mathematical model of a dual solar collector based on a detailed description of individual heat transfer models in individual parts of the collector. The proposed model in general consists of two parts solved in iteration loops: the external energy balance of the absorber (heat transfer from the absorber surface to the ambient environment) and the internal energy balance of the absorber (heat transfer from the absorber surface into the heat transfer fluid). Furthermore, the model validation, the detailed uncertainty analysis of the experimental measurements and the detailed uncertainty analysis of the mathematical model were conducted. Subsequently, the validated model was used to evaluate the potential of using dual air/liquid collectors for different climatic conditions (Stockholm, Prague and Milan), for different solar systems, and for family houses with different energy performance. Four solar collector systems were compared with one another: solar domestic hot water system designed with dual air/liquid collectors used in water heating mode, two solar systems designed with dual air/liquid used for water heating and fresh air preheating, and solar system designed with dual air/liquid collectors used for water heating and space heating.

In the last part of the work were results compared with stated dissertation targets. In addition, contributions for practice and theory were presented. Another possible direction for research in the field of dual air/liquid solar collector was also offered.

OBSAH

1. ÚVOD…… 1
2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY…… 1
2.1 Koncept kombinovaného kolektoru…….. 1
2.2 Vývoj nových konstrukcí a matematických modelů kombinovaného kolektoru……... 2
3. FORMULACE CÍLŮ PRÁCE…… 4
4. METODY ŘEŠENÍ……...5
4.1 Matematický model kombinovaného kolektoru – kapalinová část…...6
4.2 Matematický model kombinovaného kolektoru – vzduchová část…...7
4.3 Implementace modelu kombinovaného kolektoru kapalina/vzduch do simulačního prostředí TRNSYS……...8
5. VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ……8
6. ANALÝZA VYUŽITÍ KOMBINOVANÝCH SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ……14
6.1 Solární systémy na bázi kombinovaných kolektorů……14
6.2 Výsledky analýzy využiti kombinovaných solárních kolektorů……18
7. ZÁVĚR……20
7.1 Porovnání dosažených výsledků s uvedenými cíli……21
7.2 Přínos pro praxi……23
7.3 Teoretický přínos……24
7.4 Návrhy pro další směřování práce……25
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZI……26
PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI……28
JINÉ PUBLIKACE AUTORA NEVZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI...30

1. ÚVOD

V souvislosti s aktuálním zněním Evropské směrnice o energetické náročnosti budov je nutné do roku 2030 projektovat budovy s výrazně nižší energetickou spotřebou budov. Podle strategie Evropské unie by to do roku 2030 mělo přinést významné snížení emisí skleníkových plynů o 40 % oproti roku 1990, zvýšení využité energie z obnovitelných zdrojů za celkového snížení spotřeby energie budov až o 32,5 % a navýšit podíl využití obnovitelné energie na 32 %. Evropská unie stanovila také dlouhodobý cíl do roku 2050. Potom, na konce roku 2019 Evropská komise představila Evropskou zelenou dohodu (European Green Deal), která zahrnuje seznam konkrétních plánů s cílem dosáhnout v EU do roku 2050 klimatické neutrality. V březnu roku 2020 byla Evropskou komisí přijata evropská průmyslová strategie zahrnující větší ambici ve snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030, z původních 40 % má být nyní 50 až 55 %. Základním předpokladem dosažení tohoto cíle je dekarbonizace energetického systému, a to na základě několika zásad. Jednou z hlavních zásad je upřednostnit energetickou účinnost a vytvořit odvětví energetiky, které bude z velké části založeno na obnovitelných zdrojích.

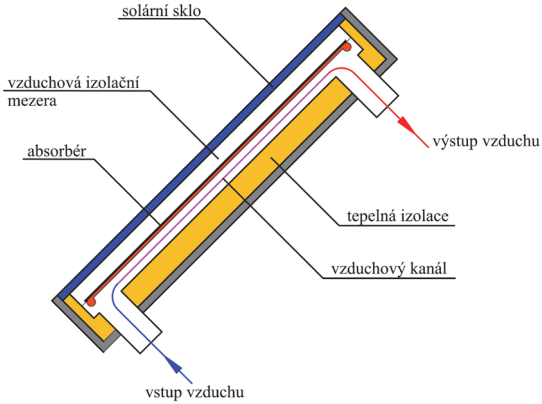
Za jeden z nejvýznamnějších obnovitelných zdrojů energie můžeme považovat sluneční energii. Sluneční energie patří mezi nevyčerpatelné zdroje energie (z hlediska délky trvání lidské populace) a její využití nemá žádné negativní dopady na životní prostředí.

V našich klimatických podmínkách je stále nejrozšířenější formou využití přímé fototermální přeměny sluneční energie přeměna pomocí plochých kapalinových solárních kolektorů. Nicméně stále častěji se lze setkat se snahami o využití ohřevu vzduchu v teplovzdušných kolektorech slunečního záření, ať již pro účely vytápění nebo pro ohřev větracího vzduchu. Myšlenka kombinovat oba druhy technologie pro konstrukci kombinovaného kolektoru pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina vyplynula z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizace doby provozu solárního systému. Kombinovaný kolektor s použitím dvou teplonosných látek vychází v principu ze situace typické pro mírné a chladné klimatické pásmo, kde sluneční záření v letním období je dostatečné pro přípravu teplé vody (50 až 60 °C), zatímco v zimním období výstupní teploty ze solárních kolektorů zpravidla nedosahují hodnot vyšších než 30 °C, nicméně mohou být dostatečné např. pro ohřev chladného větracího vzduchu.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Koncept kombinovaného kolektoru

Kombinovaný kolektor na bázi dvou teplonosných látek se obvykle skládá z jednoduchého zasklení solárním sklem v čirém nebo texturovaném provedení, kapalinového absorbéru slunečního záření se selektivním povrchem, vzduchového kanálu, tepelné izolace a rámu (*Obr. 1*).



Obr. 1 *Konstrukce kombinovaného kolektoru na bázi dvou teplonosných látek vzduch/kapalina*

Z takového konstrukčního řešení kolektoru v podstatě vyplývají tři možné provozní režimy:

- Kapalinový provozní režim: absorbérem protéká kapalina jako teplonosná látka a odebírá veškerou tepelnou energii z absorbéru slunečního ozáření. Vzduchový kanál je v tomhle případě zavřený a tvoří uzavřenou vzduchovou mezeru mezi absorbérem a zadní izolací, čím zvětšuje tepelný odpor zadní strany kolektoru.
- Vzduchový provozní režim: v tomto případě vzduch jako teplonosná látka neproudí v absorbéru, ale kolem něj. Vzduch obtéká absorbér a odnímá z něj teplo. Kapalina absorbérem neprotéká a neodvádí teplo.
- Kombinovaný provozní režim: tento případ představuje současné protékání dvou teplonosných látek (kapalina a vzduch) současně odebírajících teplo.

2.2 Vývoj nových konstrukcí a matematických modelů kombinovaného kolektoru

Assari [1] provedl analýzu energetického chování kombinovaných solárních kolektorů s různými konstrukcemi vzduchových kanálů. Kapalinovou část tvořil trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Vzduchová část se skládala ze vzduchových kanálů různého tvaru, umístěných pod absorbérem. Byl vytvořen zjednodušený matematický model kombinovaného kolektoru s dolním obtékáním absorbéru, který byl poté experimentálně ověřen. Podstatou vyvinutého modelu je použití ε – NTU metody. Bylo modelováno energetické chování kolektoru se třemi různými druhy vzduchového kanálu: a) bez žeber; b) s rovnými žebry; c) se zalomenými žebry. Výsledky modelování poukázaly na výrazný potenciál využití absorbéru s rovnými žebry v porovnání s absorbérem se zalomenými žebry a

absorbérem bez žeber. Co se týče matematického modelu, podstatnou nevýhodou vyvinutého modelu je předpoklad, že teplota absorbéru a teplota zadní strany vzduchového kanálu (vzduchových kanálů) se rovnají, což neodpovídá realitě a muže způsobit patrnou nepřesnost vypočtu (zejména v případě použití konstrukce absorbéru bez žeber). Kromě toho je další nevýhodou vyvinutého modelu zanedbání přestupu tepla ze zadní strany kolektoru a zjednodušený výpočet prostupu tepla přední stranou kolektoru.

Potom Jafari a kol. [2] pokračovali ve vývoji konceptu kombinovaného provozu kombinovaného solárního kolektoru se zalomenými žebry. Cílem jejich teoretické analýzy bylo stanovit energetickou a exergetickou účinnost kombinovaného solárního kolektoru v kombinovaném režimu a porovnat tyto účinnosti s kapalinovým režimem provozu kombinovaného kolektoru. Analýza byla provedena pomocí ε – NTU metody. Výsledky simulace potvrzují závěry předchozí práce, že při kombinovaném provozu kombinovaného kolektoru je množství odvedeného tepla a účinnost kolektoru vyšší nežli u pouze kapalinového provozního režimu. Hlavní nevýhodou prezentovaného modelu je použití ε – NTU metody pro modelování energetického chování solárního kolektoru a z toho vyplývající zjednodušení výpočtu.

Arun a Arun [3] ve své práci popisují principiálně jinou konstrukci kombinovaného kolektoru. V tomto kolektoru se vzduchový proud dělí při vstupu do kolektoru na dvě části. Část vzduchu proudí v horní části kolektoru mezi absorbérem a krycím zasklením. Druhá část proudí pórovitou látkou pod absorbérem. Na výstupu z kolektoru se proudy opět spojí. Kapalinovou část tvoří trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Simulační analýza byla provedena v simulačním softwaru ANSYS ve třech pracovních režimech: pouze ohřev vzduchu, pouze ohřev vody a kombinovaný ohřev vzduchu a vody. Výsledky simulace v režimu ohřevu vzduchu ukázaly, že při stejných klimatických a provozních podmínkách kombinovaný solární kolektor s pórovitou látkou a oboustranným průtokem vzduchu vykazuje větší výkon než kombinovaný kolektor se zalomenými žebry. Co se týče matematického modelování kombinovaného kolektoru, model nebyl validován, takže se nedá posoudit přesnost a správnost modelu. Kromě toho je modelování kombinovaného kolektoru v simulačním softwaru ANSYS dost omezující z pohledu dalšího využiti modelu v případě zapojení modelu kombinovaného kolektoru do energetického systému nebo změny konstrukce kolektoru.

Ma a kol. [4] představili konstrukci kombinovaného kolektoru s žebry nad absorbérem a oboustranným průtokem vzduchu. Kapalinovou část tvoří trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Vzduchový proud je rozdělen na dvě části, část vzduchu proudí nad absorbérem a část vzduchu proudí pod ním. Žebra jsou umístěna mezi krycím sklem a absorbérem a jsou pokryta spektrálně selektivním povlakem stejně jako zbytek absorbéru. V rámci této práce byla stanovena průměrná denní účinnost vzduchového a kapalinového provozního režimu. Nicméně jedna zásadní věc v této práci chybí, a to je roční simulace účinnosti systému na bázi kombinovaného kolektoru. Z práce není vůbec jasné, zdali je provoz kolektoru v těchto dvou režimech výhodnější oproti kapalinovému kolektoru.

He a kol. [5] provedli analýzu využití kombinovaných solárních kolektorů s horním krytem ve tvaru střešní krytiny, která zvyšuje estetickou a energetickou (minimalizují tepelné ztráty) kvalitu kolektoru. Krytina je vyrobená z PMMA (polymethylmethakrylát) a aplikovaná přímo na horní kryt kolektoru z kaleného skla. Cílem této práce bylo poukázat na potenciál využití PMMA v konstrukci kolektoru. Zhongting a kol. [6] ve své práci pokračovali ve vývoji potenciálu využití PMMA v konstrukci kolektoru. Jejich kombinovaný kolektor se skládá z vlnitého horního krytu vyrobeného přímo z PMMA, vzduchové mezery, absorbéru, vzduchového kanálu a zadní izolace. Pro analýzu tepelných toků uvnitř kolektoru byl zaveden matematický model kapalinové části kombinovaného kolektoru, který se skládá z vnější a vnitřní bilance. Model byl validován na základě experimentálního měření. Není však jasné, proč nebyl prezentován matematický model vzduchové části kolektoru.

Z výsledků rešerše současného stavu problematiky jasně vyplývá, že v současné době neexistuje žádný validovaný detailní matematický model kombinovaného solárního kolektoru vzduch/kapalina, který může být (v případě energetické analýzy) napojen na energetické systémy budovy a využit pro celoroční simulace energetického chování budovy.

3 FORMULACE CÍLŮ PRÁCE

Kombinované solární kolektory jsou relativně novým prvkem v oblasti solární tepelné techniky, který již prošel určitým vývojem. Požadavek na vývoj kombinovaných kolektorů pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina vyplynul z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření. Snahou je docílit vysokou účinnost v průběhu celého roku, resp. v průběhu doby využití a zároveň maximalizovat dobu provozu solárního systému. Aby bylo možné jejich širší uplatnění a tím zvýšení možností využití alternativních zdrojů energie v budovách, je nutné vytvořit dostatečné podklady pro výpočet energetické bilance kombinovaného kolektoru, s možností volby provozního režimu na základě navržených geometrických charakteristik daného kolektoru a použitých materiálů.

Vzhledem k tomu, že v současné době neexistuje žádný validovaný detailní matematický model kombinovaného solárního kolektoru, je nutné v rámci disertační práce vytvořit detailní matematický model kombinovaného solárního kolektoru pro různé druhy proudění vzduchu a experimentálně ověřit vyvinutý model. Disertační práce tak navazuje na některé teoretické i experimentální práce, které se zabývaly popisem energetických bilancí absorbérů teplovzdušných, teplovodních a kombinovaných kolektorů. Cílem práce je řešení následujících úkolů:

- vytvoření matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru vzduch/kapalina;
- implementace modelu kombinovaného kolektoru vzduch/kapalina do simulačního prostředí TRNSYS;
- vytvoření funkčního vzorku kombinovaného solárního kolektoru s možností změny konstrukce kolektoru;

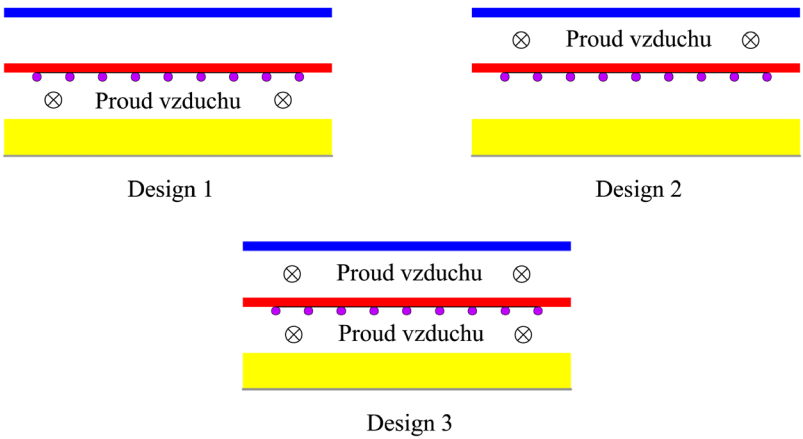
- experimentální ověření a validace navrženého modelu;
- analýza potenciálu využití kombinovaných kolektorů vzduch/kapalina v solárních systémech pro přípravu teplé vody a vytápění.

4 METODY ŘEŠENÍ

Pro účely analýzy použití kombinovaných kolektorů s dvojicí teplonosných látek bylo nezbytné sestavit matematický model solárního kolektoru vycházející ze základních rovnic přenosu tepla v kolektoru.

Funkci solárního kolektoru lze popsat obecnou energetickou rovnováhou. Solární kolektor přijímá sluneční záření, které je částečně odraženo a částečně přeměněno na teplo pohlcením na povrchu absorbéru. Část tepla je z absorbéru odvedena teplonosnou látkou, část odchází zpět do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát a část tepla se akumuluje v těle kolektoru. Pro modelování chování kolektoru se provádí "vnější bilance", tzn. modelování tepelných toků z povrchu absorbéru do okolí a "vnitřní bilance" modelování toků z povrchu absorbéru do teplonosné látky (vzduch/kapalina).

Pro simulaci kombinovaného kolektoru v simulačním prostředí TRNSYS byl nově vytvořen matematický model, který se ve své podstatě skládá z dílčích modelů vyvinutých v rámci disertační práce, a to modelu kapalinového kolektoru [6, 7] a modelu vzduchového kolektoru [8, 9]. Model nabízí výběr ze tří konstrukcí: kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s prouděním vzduchu mezi absorbérem a tepelnou izolací; kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s prouděním vzduchu mezi absorbérem a zasklením; kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s oboustranným prouděním vzduchu (viz *Obr. 2*).



Obr. 2 *Konstrukce kombinovaného kolektoru*

Zde je třeba zdůraznit, že vyvinutý model neuvažuje společné využití kapalinové a vzduchové části kolektoru. V podstatě to znamená, že model

kombinovaného kolektoru funguje buď jako kapalinový, nebo jako vzduchový kolektor, kde záleží na jednom ze vstupních údajů – Operating Mode. Pokud Operating mode je roven 0, model funguje jako kapalinový kolektor. Jestliže je Operating model roven 1, model funguje jako vzduchový kolektor.

4.1 Matematický model kombinovaného kolektoru – kapalinová část

V rámci vnější energetické bilance se řeší přenos tepla z povrchu absorbéru do okolí, a to přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi povrchem absorbéru a zasklením (resp. zadní izolací, boční izolací), sáláním mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení (resp. zadní izolací, boční izolací), vedením tepla zasklením (resp. zadní izolací, boční izolací) a přenos tepla (prouděním, sáláním) z vnějšího povrchu zasklení (resp. zadního rámu, bočního rámu) do okolí [10]. Pro stanovení jednotlivých součinitelů přestupu tepla je nutná znalost teplot v jednotlivých rovinách kolektoru, které jsou zpětně závislé na hodnotách součinitelů přestupu tepla. Vnější bilance se proto řeší ve vlastním iteračním cyklu na základě předem odhadnuté teploty absorbéru t_{abs} [°C] a teploty okolí t_e [°C]. Pro výpočet součinitelů přestupu tepla v základních rovinách kolektoru jsou potřebné povrchové teploty, které však na začátku procesu výpočtu nejsou známy. V prvním iteračním kroku jsou povrchové teploty odhadnuty z rozdílu teplot mezi absorbérem a okolním prostředím. Potom lze vypočítat součinitele prostupu tepla pro přední U_p, zadní U_z, boční strany U_b a celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U pro předem odhadnuté teploty.

Přenos tepla z povrchu absorbéru do kapaliny protékající uvnitř trubek může být popsán pomocí vnitřní energetické bilance absorbéru. Konstrukce plochých kapalinových kolektorů je zpravidla založena na trubce protékané teplonosnou kapalinou, na které je připevněna lamela s povrchem určeným k absorpci slunečního záření. Vnitřní energetická bilance absorbéru řeší přenos tepla vedením z povrchu absorbéru do místa spoje absorbéru a trubky, vedením vlastním spojem trubka-absorpční povrch a nucenou konvekcí z vnitřního povrchu trubky do kapaliny. Výpočty vnitřní energetické bilance jsou provedeny na základě odhadované průměrné teploty teplonosné kapaliny. Potom lze vypočítat účinnostní činitel F', tepelný přenosový činitel kolektoru F_R a tepelný výkon kolektoru $\dot{Q}_k$ pro odhadovanou průměrnou teplotu teplonosné kapaliny.

Jelikož obě bilance jsou vzájemně propojené a na sobě závislé, tak nadřazený iterační cyklus předává výsledky z vnější bilance do vnitřní (součinitel prostupu tepla U) a výsledky vnitřní do vnější (povrchová teplota absorbéru t_{abs}). Ustáleného stavu modelu se dosahuje po několika iteracích. Iterační výpočet trvá až do té doby, dokud rozdíl mezi vypočtenou teplotou absorbéru ve dvou po sobě jdoucích krocích je větší, než 0,01 K [11,12].

4.2 Matematický model kombinovaného kolektoru – vzduchová část

Pro modelování vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru byl vyvinut matematický model vzduchového kolektoru, který na základě detailních informací o konstrukci kolektoru (geometrické, optické a termofyzikální vlastnosti jednotlivých součástí) modeluje tepelné toky z povrchu absorbéru do okolí (vnější energetická bilance absorbéru) a z povrchu absorbéru do teplonosné tekutiny (vnitřní energetická bilance absorbéru) a v souvislosti s tím i rozložení teplot v kolektoru.

Matematický model umožňuje modelování následujících druhů vzduchových kolektorů: Design 1 – jednokanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu nad absorbérem; Design 2 – dvoukanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu pod absorbérem; Design 3 – vzduchový kolektor s oboustranným prouděním.

Vnější energetická bilance absorbéru řeší přenos tepla: konvekcí a sáláním z povrchu absorbéru, vedením tepla zasklením nebo izolací a konvekcí a sáláním z vnějšího povrchu zasklení a zadní strany do okolí. Pro správný výpočet součinitelů přestupu tepla je nutné znát teploty hlavních povrchů (zasklení, izolace). Zároveň rozložení teplot v kolektoru je závislé na hodnotách součinitelů přestupu tepla (poměru tepelných odporů). Proto je vnější energetická bilance absorbéru řešena v iteračním cyklu. Na začátku iteračního procesu se teplota absorbéru odhaduje z teploty vzduchu na vstupu do kolektoru. Dále dochází k odhadu povrchové teploty na základě rozdílu teplot mezi absorbérem a okolním prostředí [13].

Přenos tepla z povrchu absorbéru do teplonosné látky protékající ve vzduchovém kanálu může být popsán pomocí vnitřní energetické bilance absorbéru. Na začátku iteračního procesu se střední teplota vzduchu t_{vz} odhaduje z teploty vzduchu na vstupu do kolektoru.

Modelování přenosu tepla z horního a dolního povrchu kanálu do teplonosné látky je možné provést dvěma následujícími způsoby. Prvním způsobem je přímá metoda popsaná Duffie a Beckmanem [14]. Metoda spočívá v postupném stanovení celkového součinitele prostupu tepla U, účinnostního činitele F', průtokového činitele F'', přenosového součinitele F_R a využitelného tepelného výkonu $\dot{Q}_{vz}$. Druhá metoda je založena na rovnicích tepelné bilance sestavených pro teplotně různé povrchy kolektoru a inverzní způsob řešení maticových rovnic.

Vzhledem k tomu, že tepelný výkon kolektoru byl stanoven pro odhadnuté teploty, tak by měl následovat další iterační krok. Ustáleného stavu modelu se dosahuje po několika iteracích. Iterační výpočet trvá až do té doby, dokud rozdíl mezi vypočtenou teplotou vzduchu na výstupu z kolektoru t_{vz2} ve dvou po sobě jdoucích krocích je větší, než 0,01 K.

4.3 Implementace modelu kombinovaného kolektoru kapalina/vzduch do simulačního prostředí TRNSYS

Na základě vyvinutého matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru byl nově vytvořen software (komponenta) Type 207 [13, 15, 16] v simulačním prostředí TRNSYS, za účelem provedení celoroční simulace kombinovaného kolektoru zapojeného do solární soustavy.

Vstupními parametry Type 207 jsou:

- Operating mode – provozní režim (ohřev kapaliny /ohřev vzduchu);
- klimatické a provozní parametry (teplota vzduchu/kapaliny na vstupu do kolektoru, průtok vzduchu/kapaliny, venkovní teplota, teplota oblohy a tak dál) – celkově 12 parametrů.

Vlastními parametry Type 207 jsou:

- vlastnosti jednotlivých částí solárního kolektoru (geometrické a fyzikální vlastnosti) – 46 parametrů.

Volitelnými parametry Type 207 jsou:

- modely pro vypočet součinitelů přestupu tepla (korelace) – 9 parametrů.

Výstupními parametry Type 207 jsou:

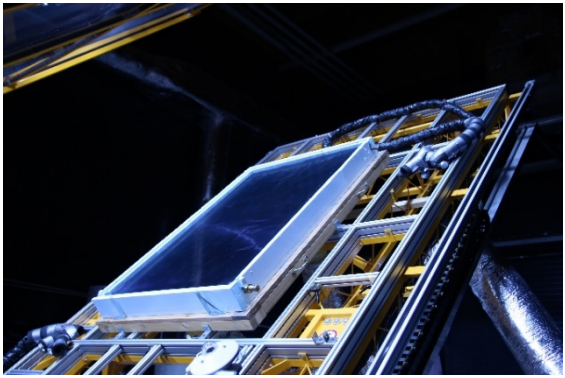
- výkonové a provozní parametry (teplota vzduchu/kapaliny na výstupu z kolektoru, průtok vzduchu/kapaliny, využitelný tepelný výkon, teplota absorbéru a provozní účinnost kolektoru).

5 VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ

Matematický model kombinovaného solárního kolektoru představuje teoretický popis chování skutečného kolektoru. Pro další analýzy využití kombinovaných solárních kolektorů v praxi je nezbytné ověřit do jaké míry je matematický model schopen reprodukovat reálné chování kolektoru. Model je nutné ověřit experimentálním měřením a případně upravit tak, aby odpovídal skutečnosti.

Vzhledem k absenci kombinovaných solárních kolektorů na tuzemském a zahraničním trhu byl pro účely validace vytvořen funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru [17]. Kormě toho funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru umožňuje měnit konstrukční parametry solárního kolektoru: tloušťka tepelné izolace (10 až 50 mm), různé zasklení, tloušťka vzduchové mezery mezi zasklením a absorbérem (10 až 30 mm), změna typu a parametrů absorbéru.

Funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru se skládá ze solárního skla, měděného absorbéru slunečního záření s nízkoemisivním povlakem, boční a zadní tepelné izolace a vzduchového kanálu vytvořeného mezi absorbérem a zadní izolace (*Obr. 3*). Detailní parametry kombinovaného kolektoru jsou uvedeny v *Tab. 1*.



Obr. 3 *Funkční vzorek kombinovaného kolektoru*

Tab. 1 *Parametry kombinovaného solárního kolektoru*

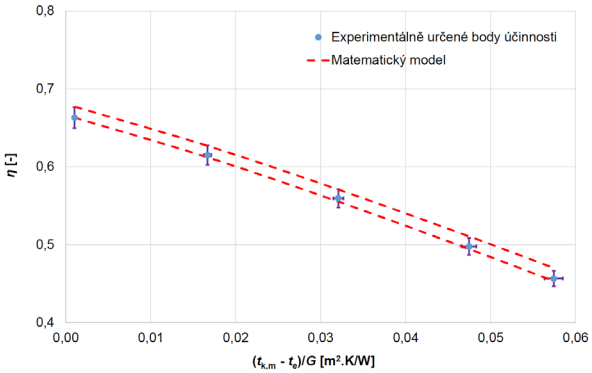
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Rozměry (šířka x výška x hloubka)	1 x 1,6 x 0,087 m	Rozteč mezi trubkami	50 mm
Plocha (apertura/absorbér)	1,52 m^2 / 1,49 m^2	Povrch absorbéru (pohltivost/emisivita)	0,95 / 0,05
Kryt	solární sklo 4 mm	Tloušťka vzduchové izolační mezery	30 mm
Absorbér	měď 0,4 mm	Tloušťka vzduchového kanálu	20 mm
Připojovací potrubí	Cu 22 x 1 mm	Způsob proudění vzduchu	absorbér s dolním obtékáním

Kapalinová i vzduchová část kolektoru byla testována za ustálených podmínek v souladu s ČSN EN ISO 9806 [18]. Kombinovaný kolektor byl testován v Solární laboratoři SOLAB[2] v UCEEB ČVUT.

Pro validaci matematického modelu solárního kolektoru byla využita metoda konfrontace experimentálně stanovené účinnosti a účinnosti stanovené matematickým modelem. Konstrukce kolektoru umožňuje řadu konstrukčních změn: tloušťka zadní tepelné izolace, tloušťka přední vzduchové mezery, tloušťka zadní vzduchové mezery a výměnu zasklení kolektoru. Díky této skutečností, byly vyzkoušeny různé konstrukce kombinovaného solárního kolektoru.

Na *Obr. 4* jsou porovnány výsledky modelování a experimentů pro kapalinovou část kolektoru. Tečky s chybovými úsečkami odpovídají experimentálně stanoveným bodům účinnosti solárního kolektoru a vypočtené rozšířené nejistotě měření pro každý pracovní bod. Křivka účinnosti stanovená matematickým modelem je znázorněna jako dvě limitní křivky pro mezní nejistoty uvažované u zadávaných detailních parametrů kolektoru. Ve

všech případech se experimentálně stanovené body účinnosti nachází mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma. Model v podstatě popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností v rámci nejistoty experimentální metody [13, 15].



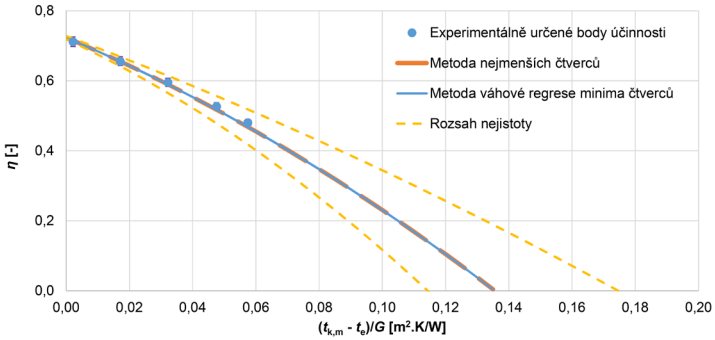
Obr. 4 *Validace kapalinové částí kolektoru*

Na základě stanovených bodů účinnosti se provádí aproximace naměřených bodů a vyhodnocují se účinnostní parametry solárního kolektoru. V současné době se účinnostní parametry solárního kolektoru vyhodnocují pomocí metody nejmenších čtverců. Metoda nejmenších čtverců ale uvažuje, že každý naměřený bod je spojen se stejnou a zároveň pro všechny body normálně rozdělenou chybou měření, což neodpovídá realitě. Standardní odchylka σ není téměř nikdy konstantní ale různá pro všechny body. Tento fakt sebou nese dva základní následky: žádný druh kontroly kvality aproximace nemůže být uskutečněn, a dále na základě této metody nelze provést výpočet nejistoty účinnostních parametrů kolektoru. Kromě toho nepřímým důsledkem výše uvedeného je, že nemůže být provedeno efektivní porovnání výsledků standardizovaných zkoušek mezi různými zkušebnami. Obecně platí, že absence analýzy nejistot výsledků zkoušky vede ke snížení jejich spolehlivosti a následně ke snížení spolehlivosti modelu s použitím těchto výsledků. Avšak tyto nedostatky mohou být překonány v případě použití metody váhové regrese minima čtverců. Metoda váhové regrese minima čtverců, která na rozdíl od předchozí metody uvažuje různou hodnotu standardní odchylky pro každý naměřený bod a také umožnuje vyhodnocovat účinnostní parametry společně s jejich nejistotami.

Obě výše popsané metody byly použity pro stanovení účinnostních parametrů kapalinové části kombinovaného kolektoru. Metoda váhové regrese minima čtverců byla zároveň použita pro stanovení nejistoty účinnostních parametrů.

Výsledky aproximace stanovených hodnot účinnosti kapalinové části kombinovaného kolektoru parabolou (polynomem druhého řádu) jsou znázorněny na *Obr. 5*. Z výsledků je zřejmé, že účinnostní křivka v rozsahu

naměřených hodnot popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností, a to v podstatě v rámci chyby experimentálního měření. Druhým závěrem je skutečnost, křivky účinnosti stanovené aproximací metodou nejmenších čtverců a metodu váhové regrese minima čtverců jsou téměř totožné.

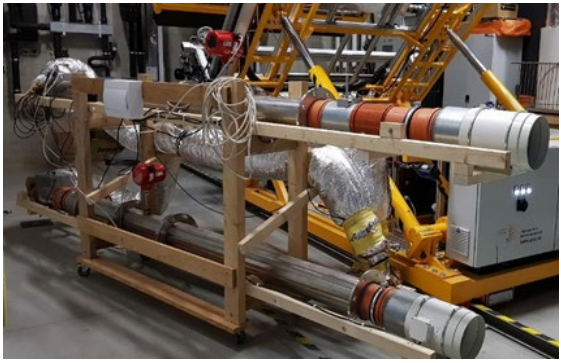


Obr. 5 *Rozsah nejistoty křivky účinností testovaného kombinovaného kolektoru (kapalinový provozní režim)*

Zároveň na obrázku jsou znázorněné dvě omezující křivky reprezentující rozšířenou nejistotu měření (k = 2). Skutečná hodnota účinností leží s jistou pravděpodobností 96 % v určitém „tolerančním pásmu“ okolo výsledku měření – rozsah tohoto pásma charakterizuje nejistota měření. Z grafu je zřejmé, že v oblasti testování solárního kolektoru má rozsah nejistoty nepatrný vliv na účinnost solárního kolektoru. Na druhou stranu v oblasti vysokých hodnot středního redukovaného teplotního rozdílu má rozsah nejistoty značný vliv na účinnost solárního kolektoru. Důvodem je malý rozsah teplot testování kombinovaného solárního kolektoru od 20 °C do 70 °C (z bezpečnostních důvodů – při výrobě kombinovaného kolektoru byl použit EPS a XPS polystyren), což odpovídá střednímu redukovanému teplotnímu rozdílu 0,002 až 0,057 m^2.K/W. Běžný plochý solární kolektor je testován ve větším rozsahu teplot 17 °C až 90 °C, což odpovídá většímu rozsahu středního redukovaného teplotního rozdílu 0,002 až 0,07 m^2.K/W. Nicméně v oblasti vysokých hodnot středního redukovaného teplotního rozdílu má rozsah nejistoty u běžného plochého solárního kolektoru značný vliv na účinnost solárního kolektoru.

Matematický model vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru byl experimentálně ověřován v rámci testování solárních kolektorů podle evropské normy EN ISO 9806 [18] v Solární laboratoři UCEEB (ČVUT) v Buštěhradě.

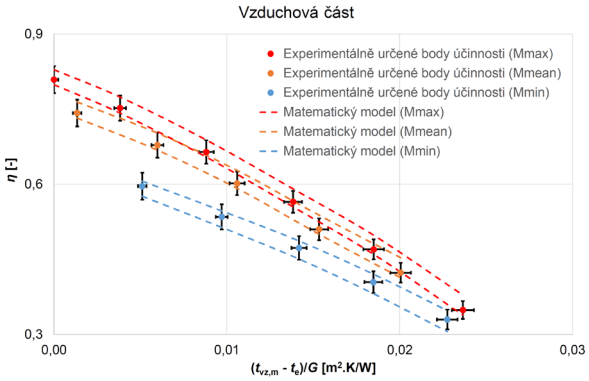
Pro posouzení energetické efektivity a přínosů vzduchové částí kombinovaného solárního kolektoru byla navržena a zrealizována zkušební trať *(Obr. 6)* pro testování vzduchových kolektorů (poloprovoz [19]). V současné době neexistuje jiné pracoviště v ČR, které by využívalo obdobné zařízení.



Obr. 6 *Zkušební trať pro testování vzduchových solárních kolektorů*

Zkušební trať pro testování vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru se skládá ze dvou ventilátorů, teplovodního výměníku napojeného na ultra-termostat pro nastavení vstupní teploty, škrticích klapek pro regulaci průtoku, průtokoměrů, čidel teploty na vstupu a na výstupu z kolektoru a vzduchotechnického pružného potrubí pro připojení kolektoru.

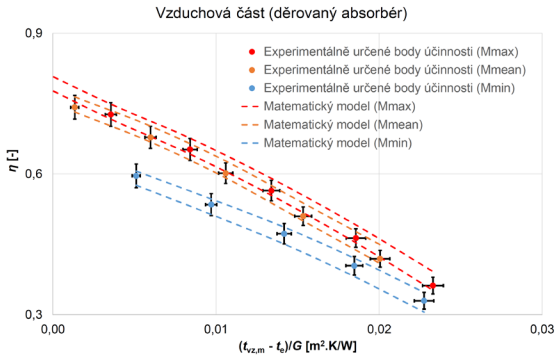
V první fázi ověření modelu bylo využito experimentálního stanovení účinnosti pro nejběžnější konstrukci vzduchového kolektoru (jednokanálové proudění vzduchu s dolním obtokem absorbéru) při ustálených provozních a klimatických podmínkách. Jak již bylo uvedeno v popisu modelu vzduchové části solárního kolektoru, v případě jednokanálového proudění vzduchu může být použita jak přímá metoda výpočtu, tak i inverzní metoda výpočtu. Nicméně na *Obr. 7* jsou uvedeny výsledky validace pouze pro přímou metodu výpočtu. Výsledky validace pro inverzní metodu výpočtu budou prezentovány později.



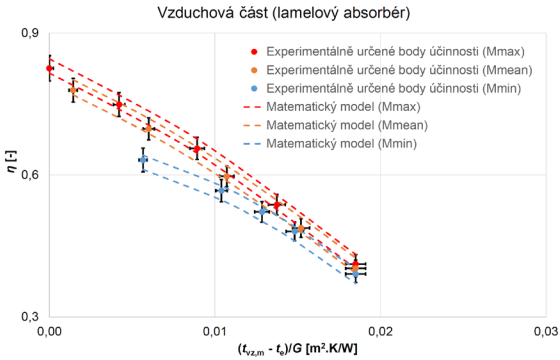
Obr. 7 *Výsledky validace modelu v režimu jednokanálového proudění vzduchu s dolním obtékaným absorbéru (přímá metoda vypočtu)*

V druhé fázi ověření modelu bylo využito experimentálního stanovení účinnosti pro složité konstrukce kolektoru. K takovým konstrukcím patří především kolektory s dvoukanálovým oboustranným prouděním vzduchu. V tomto případě je přesné stanovení účinnostního součinitele kolektoru *F'* velice obtížné a z tohoto důvodu se používá pouze inverzní metoda výpočtu.

Za účelem validace vzduchové části modelu kombinovaného kolektoru pro režim oboustranného proudění vzduchu, byly vyrobeny dvě složité konstrukce absorbéru (děrovaný a lamelový) na bázi rozebíratelného kombinovaného kolektoru. Výsledky validace pro tyto konstrukce jsou uvedeny na *Obr. 8* a *Obr. 9*.



Obr. 8 *Výsledky validace modelu v režimu dvoukanálového proudění vzduchu (inverzní metoda výpočtu)*

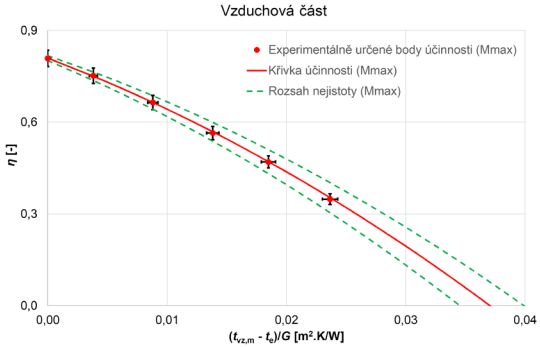


Obr. 9 *Výsledky validace modelu v režimu dvoukanálového proudění vzduchu (inverzní metoda výpočtu)*

Z výsledků validace je zřejmé, že i v případě složité konstrukce absorbéru je model kolektoru správný a přesný. Všechny stanovené body účinnosti se nachází mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma, i když

některé body (zejména při vysokých průtocích) se nachází na hranici tolerančního pásma [13,15].

Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti se provádí stejným způsobem, jak je popsáno pro kapalinovou část kolektoru. Zároveň byl v rámci analýzy nejistoty vyhodnocovaných hodnot účinnosti stanoven rozsah nejistoty pro různé průtoky. Na *Obr. 10* je znázorněn rozsah nejistoty pro maximální průtok. Rozsah nejistoty je pro průměrný i nejmenší průtok podobný [13,15].



Obr. 10 *Rozsah nejistoty křivky účinností vzduchové části kombinovaného kolektoru*

Z výsledků analýzy nejistoty naměřených bodů je patné, že rozsah nejistoty je mnohem větší než u kapalinové části solárního kolektoru. Důvodem je mnohem menší přesnost čidla průtoku vzduchu oproti čidlu průtoku kapaliny. Na druhou stranu, běžné vzduchové solární kolektory se používají v rozsahu středního redukovaného teplotního rozdílu 0 až 0,02 m^2.K/W, kde má rozsah nejistoty nepatrný vliv na účinnost vzduchové části solárního kolektoru.

6 ANALÝZA VYUŽITÍ KOMBINOVANÝCH SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

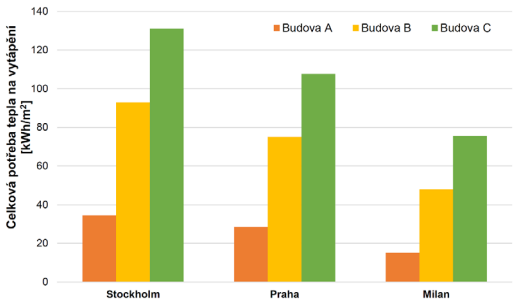
6.1 Solární systémy na bázi kombinovaných kolektorů

Pro analýzu využití kombinovaných solárních kolektorů byly uvažovány tři rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických podmínek (pro Stockholm, Praha a Milán). Geometricky se jedná o jeden rodinný dům se třemi variantami kvality obvodového pláště budovy. Budova A má odvodový plášť navržený podle doporučených hodnot součinitelů prostupu tepla pro pasivní budovy dle ČSN 73 0540-2 [20]. Budova B má odvodový plášť navržený podle doporučených hodnot součinitelů prostupu tepla a Budova C má odvodový plášť navržený podle požadovaných hodnot součinitelů prostupu tepla. Geometrický model rodinného domu byl vytvořen v softwaru pro tvorbu 3D modelů SketchUp a následně integrován do

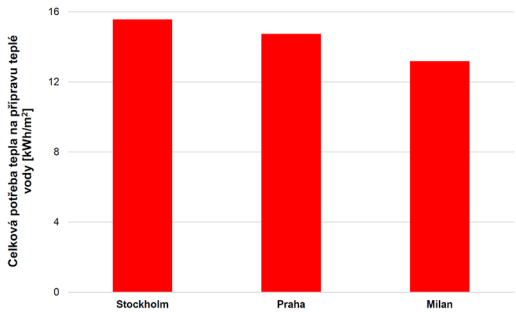
simulačního softwaru TRNSYS a TRNBuild. Hodinové klimatické údaje použité v simulační analýze byly převzaty z typického meteorologického roku TMY (Meteonorm) pro Stockholm, Prahu a Milán.

Odběr teplé vody ve všech variantách rodinného domu byl uvažován 160 l/den. Požadovaná teplota teplé vody byla 55 °C. Teplota studené vody byla převzata z typického meteorologického roku (TMY) pro uvažované lokality. Odběr teplé vody byl uvažován s profilem charakteristickým pro rodinný dům s letním poklesem o 30 % oproti ročnímu průměru. Průtok větracího vzduchu je 100 m^3/h (odpovídá intenzitě větrání 0,3 1/h vztažené k objemu obytné místností podle ČSN 15 665/Z1 [21]). Způsob vytápění je konvenční otopnými tělesy.

Výsledky simulace celkové roční potřeby tepla na vytápění a celkové roční potřeby tepla na přípravu teplé vody pro uvažované budovy a uvažované lokality jsou znázorněné na *Obr. 11* a na *Obr. 12*. Odlišná potřeba tepla na vytápění je dána odlišnými klimatickými podmínkami. Co se tyká přípravy teple vody, odlišná potřeba tepla je dána odlišnou teplotou studené vody, převzatou z typického meteorologického roku (TMY) pro Stockholm, Prahu a Milán [13,15].



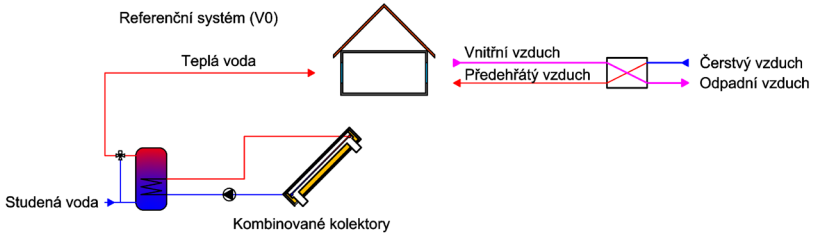
Obr. 11 *Celková roční potřeba tepla na vytápění pro uvažované budovy a uvazované lokality*



Obr. 12 *Celková roční potřeba tepla na přípravu teplé vody pro uvažované lokality*

V rámci analýzy využití kombinovaných solárních kolektorů byly zkoumány následující varianty solárních systémů:

Jako referenční varianta (V0) byl zvolen systém solárního ohřevu vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů se solárním pokrytím 60 %. Přičemž tato variantu uvažuje celoroční provoz kombinovaných solárních kolektorů v režimu ohřevu vody (schéma viz *Obr. 13*). V podstatě se jedná o solární systém ohřevu vody na bázi kapalinových solárních kolektorů, který je běžně nabízen na trhu pro rodinu se 3 až 4 členy. Konstrukční parametry uvažovaného kombinovaného kolektoru jsou uvedeny v *Tab. 1*. Detailní parametry referenčního solárního systému (V0) jsou uvedené v *Tab. 2*.



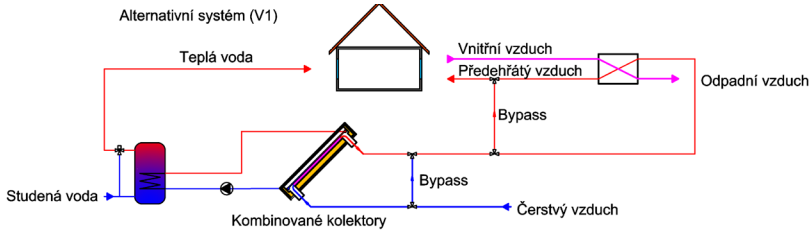
Obr. 13 *Principiální schéma referenčního systému (V0)*

Tab. 2 *Detailní parametry referenčního systému (V0)*

Parametr	Popis
Orientace kolektorů	Jih, 45° (podle sklonu střechy)
Plocha kolektorů	Stockholm a Praha 4,8 m^2, Milán 3.2 m^2
Průtok kolektorem	50 l/hod.m^2
Teplonosná látka	30% směs propylenglykolu s vodou
Řízení čerpadla	Spínaní čerpadla při rozdílu teplot ΔT = 2 K mezi výstupem z kolektoru a teplotou zásobníku v oblasti teplosměnné plochy
Potrubní rozvody	Přívodní a zpětné potrubí vedené vnitřním a vnějším prostředím: 10 m každé, DN 16 s 25 mm tepelné izolace (λ = 0,04 W/m^2.K). Ztráty se stanovují vůči vnitřní, resp. venkovní teplotě.
Výměník tepla	Vnořený výměník tepla z hladkých trubek s *UA* = 400 W/K (±15 %) při 42 °C / 40 °C (vstupní teplota / teplota zásobníku)
Zásobník	Objem: 200 l; tepelná ztráta 1 kWh/den

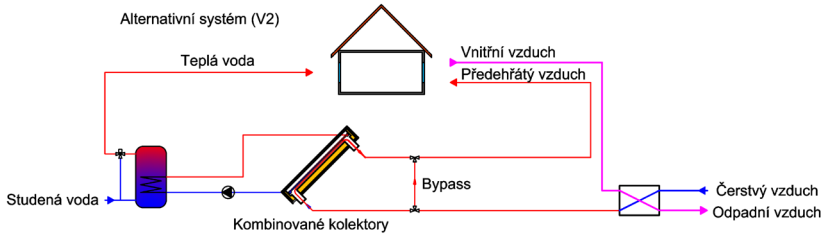
Varianta V1 uvažuje namísto celoročního provozu kombinovaných solárních kolektorů v režimu ohřevu vody použití střídavého provozního režimu (ohřev vzduchu/ohřev kapaliny) (schéma viz *Obr. 14*). Kombinované

solární kolektory pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina fungují takovým způsobem, že během zimního a přechodného období fungují jako vzduchové solární kolektory pro ohřev větracího vzduchu. Ve variantě V1 je kombinovaný kolektor zapojen před rekuperační jednotkou. Venkovní vzduch se v kolektoru předehřeje před vstupem do zařízení pro rekuperaci tepla. Pokud není dostatečný výkon slunečního záření (ve dnech s vysokou oblačností nebo v noci), vzduch kolektorem neproudí a dostává se do budovy přes bypass kolektoru a výměník ZZT. Teplota vystupujícího větracího vzduchu z kolektoru může v provozu dosahovat i teplot vyšších, než je teplota vzduchu v interiéru, a proto kromě snížení potřeby tepla na větrání může tato varianta hradit i část tepelných ztrát prostupem. Zbytek roku kombinované kolektory fungují v režimu přípravy teplé vody. Volba provozního režimu kombinovaného solárního kolektoru (ohřev kapaliny/ohřev vzduchu) je založená na porovnání měsíčního tepelného zisku kombinovaného kolektoru v obou provozních režimech a výběru maximálního měsíčního tepelného zisku.



Obr. 14 *Principiální schémata první alternativní varianty (V1)*

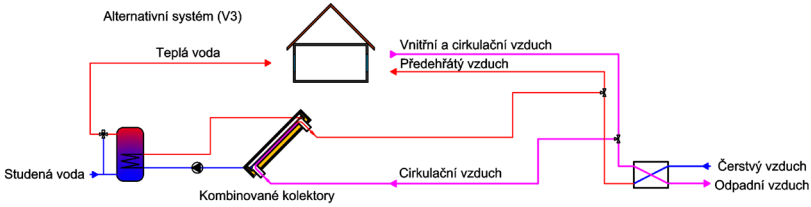
Varianta V2 funguje podobným způsobem jako varianta V1 s tím rozdílem, že kombinované kolektory jsou zapojeny až za rekuperační jednotkou (schéma viz *Obr. 15*). Venkovní vzduch předehřátý v rekuperační jednotce je veden přes kolektor a takto ohřátý je veden do vnitřního prostoru. Přiváděný vzduch je veden kolektorem pouze v době, kdy má kolektor potenciál vzduch ohřát, jinak by naopak teplo ztrácel.



Obr. 15 *Principiální schémata druhé alternativní varianty (V2)*

Varianta V3 uvažuje využití kombinovaných kolektorů během zimního a přechodného období pro cirkulační teplovzdušné vytápění (ohřev cirkulačního vzduchu), zbytek roku kombinované kolektory fungují jako

kapalinové kolektory pro přípravu teplé vody (schéma viz *Obr. 16*). Cirkulační vzduch odsávaný z místností se v kolektoru ohřívá a vede zpět do budovy. Přívodní větrací vzduch je po předehřátí v rekuperační jednotce smíchán se vzduchem cirkulačním a přiveden do obytných místností. Vzduch kolektorem neproudí ve dnech s podmračenou oblohou a v noci. Výhodou této varianty je možnost zvýšení účinnosti kolektorů pomocí zvýšení průtoku cirkulačního vzduchu.

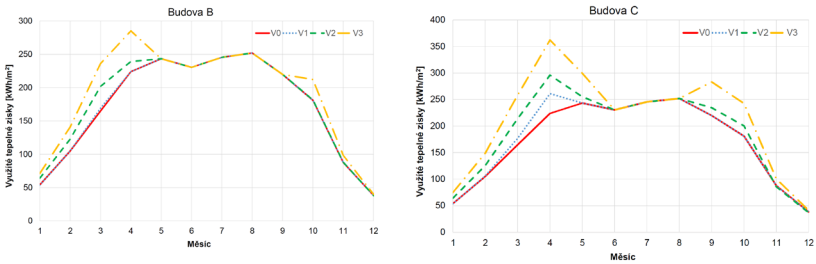


Obr. 16 *Principiální schémata třetí alternativní varianty (V3)*

Požadovaná teplota interiéru je 20 °C, ale v případě použití solárních vzduchových kolektorů za účelem vytápění se umožňuje navýšit teplotu interiéru na 22 °C. Průtok čerstvého vzduchu je ve všech variantách 100 m^3/h a účinnost rekuperační jednotky je uvažována 75 %. Průtok cirkulačního vzduchu ve variantě V3 je 400 m^3/h.

6.2 Výsledky analýzy využiti kombinovaných solárních kolektorů

Vyhodnocování energetického zisku uvažovaných solárních systémů bylo provedeno v simulačním prostředí TRNSYS. Na *Obr. 17* jsou v grafické formě znázorněny příklady výsledků simulovaných variant pro Prahu a pro budovy B a C [13,15]. V *Tab. 3* jsou uvedeny roční hodnoty pro všechny simulované varianty. V závorkách je uveden procentuální rozdíl v porovnání s referenčním systémem (V0).



Obr. 17 *Průběh zisků solárních systémů během roku pro Prahu*

Zaprvé, výsledky simulace naznačují, že použití kombinovaného solárního kolektoru namísto kapalinového kolektoru (kombinovaného kolektoru s celoročním provozem v režimu ohřevu vody) umožňuje zvýšit využitelný tepelný zisk solárního systému. Lze to vysvětlit tím, že v zimním a

přechodném období není výkon slunečního záření dostatečný pro ohřev kapaliny v kolektoru na teplotu použitelnou pro přípravu teplé vody, ale na druhé straně je dostatečný k ohřevu chladného čerstvého okolního vzduchu nebo cirkulujícího vzduchu. Kromě toho je patrné, že vyšší energetický úhrn solárních zisků vždy koreluje s vyšší potřebou tepelné energie. To znamená, že kombinované solární kolektory v režimu ohřevu čerstvého vzduchu nejen snižují tepelné ztráty větráním, ale také přispívají ke snížení potřeby tepla na vytápění.

Tab. 3 *Výsledky celoročního modelování solárních systémů*

	V0 (kWh/m^2)	**V1 (kWh/m^2)**	**V2 (kWh/m^2)**	**V3 (kWh/m^2)**
Stockholm				
Budova A	418	418 (0 %)	439 (5 %)	460 (9 %)
Budova B	418	424 (1 %)	461 (10 %)	494 (16 %)
Budova C	418	456 (9 %)	511 (20 %)	582 (32 %)
Praha				
Budova A	426	426 (0 %)	432 (1 %)	448 (5 %)
Budova B	426	427 (0 %)	443 (4 %)	474 (11 %)
Budova C	426	437 (2 %)	467 (9 %)	529 (22 %)
Milán				
Budova A	677	677 (0 %)	677 (0 %)	680 (0 %)
Budova B	677	677 (0 %)	684 (1 %)	692 (2 %)
Budova C	677	681 (1 %)	711 (5 %)	739 (9 %)

Zadruhé lze říci, že kombinace ohřevu čerstvého vzduchu kombinovaným kolektorem a jednotky ZZT (varianty V1 a V2) snižuje potenciální úspory tepla. Co se týká varianty V1, výkon jednotky zpětného získávaní tepla je omezený, protože teplota vzduchu za kombinovaným kolektorem může být výrazně vyšší než teplota čerstvého venkovního vzduchu. V případě, kdy teplota čerstvého vzduchu za kombinovaným kolektorem je vyšší než 18 °C, čerstvý vzduch obchází jednotku ZZT a proudí přímo do budovy. Umístění kombinovaného kolektoru za jednotkou ZZT (varianta V2) za účelem zvýšení teploty vzduchu přiváděného do místnosti, je výhodnější než varianta V1. Nicméně v takové konfiguraci systému dochází k omezení účinnosti kombinovaného kolektoru z důvodu vyšší provozní teploty kolektoru (vyšší teplota na vstupu do kolektoru) a následně vyšším tepelným ztrátám kolektoru v porovnání s variantou V1.

Zatřetí je patrné, že celoroční tepelný zisk varianty V3 je vyšší než varianty V1 a varianty V2. Je to dáno především vyšší účinností kombinovaného solárního kolektoru v režimu ohřevu cirkulačního vzduchu. V případě variant V1 a V2 je průtok vzduchu v kolektoru omezen průtokem větracího vzduchu (100 m^3/h). V případě alternativy V3 byl průtok vzduchu kolektorem zvýšen na 400 m^3/h. Vzhledem k významné závislosti účinnosti vzduchových kolektorů na průtoku vzduchu kolektorem, provozní účinnost kombinovaných kolektorů ve variantě V3 je vyšší než ve variantách V1 a V2.

Z výsledků vyplývá, že solární systém na bázi kombinovaných kolektorů je výhodnější v chladných a mírných klimatických zónách než v teplých klimatických zónách. Důvodem je fakt, že v teplých klimatických zónách je venkovní teplota vyšší a potřeba tepla na vytápění nižší než v chladných klimatických zónách, a tím pádem i nižší hodnota potenciálního zisku kombinovaných solárních kolektorů [13,15, 22-24].

7 ZÁVĚR

Solární tepelné systémy pro energetické zásobování budov mají velký aplikační potenciál. Takové systémy jsou založeny na přímé přeměně nevyčerpatelné sluneční energie dostupné všem a všude. V současné době jsou v podmínkách ČR využívány především systémy s kapalinovými kolektory. Vedle kapalinových solárních kolektorů, které mají své pevné místo na trhu a slouží k ohřevu vody a podpoře vytápění, existují na trhu také solární vzduchové kolektory, které mohou v uzavřeném okruhu nebo ve spojení s větráním zásobovat budovy teplem jako podpora provozu otopných soustav zejména v přechodném a zimním období. V minulosti bylo jejich využití v našich podmínkách vázáno především na zemědělství pro účely sušení plodin a píce. V současnosti se vzduchové solární kolektory využívají spíše jako demonstrační instalace u nízkoenergetických a pasivních rodinných domů pro vytápění a ohřev větracího vzduchu nebo částečně u administrativních objektů (dvojité fasády) pro větrací účely.

Za účelem zvýšení využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizace doby provozu solárního systému se vyskytla myšlenka kombinovat oba druhy technologie - ohřev kapaliny a ohřev vzduchu. Takový kombinovaný solární kolektor s použitím dvou teplonosných látek vychází ze situace typické pro mírné a chladné klimatické pásmo, kde je sluneční záření v letním období dostatečné pro přípravu teplé vody, zatímco v zimním období výstupní teploty ze solárních kolektorů nedosahují zpravidla hodnot vyšších než 30 °C, nicméně mohou být stále dostatečné např. pro ohřev chladného větracího vzduchu.

V rámci disertační práce byl vytvořen detailní matematický model kombinovaného kolektoru, který umožňuje popsat energetické chování kolektoru ve dvou provozních režimech (ohřev kapaliny / ohřev vzduchu) na základě parametrů jednotlivých částí kolektoru. Model byl validován na základě experimentálního měření vytvořeného funkčního vzorku kombinovaného kolektoru. Byla provedena analýza nejistoty experimentálního měření kolektoru (včetně jejího vlivu na výkonové charakteristiky solárního kolektoru), analýza nejistoty vstupních parametrů a parametrická analýza modelu. Nakonec byla provedena energetická analýza použití čtyřech různých systémů na bázi kombinovaných kolektorů pro rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických podmínek (Stockholm, Praha a Milán) a stejných provozních podmínek pro: systém pro celoroční přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů s celoročním provozem v režimu ohřevu vody, dva systémy pro přípravu teplé vody a ohřev větracího vzduchu na bázi kombinovaných solárních kolektorů a dále systém přípravy

teplé vody a cirkulačního vytápění také na bázi kombinovaných solárních kolektorů.

7.1 Porovnání dosažených výsledků s uvedenými cíli

a. Vytvoření matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru vzduch/kapalina a implementace vyvinutého modelu do simulačního prostředí TRNSYS

Za účelem splnění tohoto zásadního cíle byl nejprve vytvořen detailní matematický model kapalinového solárního kolektoru. Vytvořený model na základě detailních informací o konstrukci kolektoru (geometrické, optické a termofyzikální vlastnosti jednotlivých součástí) modeluje tepelné toky z povrchu absorbéru do okolí (vnější energetická bilance absorbéru) a z povrchu absorbéru do kapaliny (vnitřní energetická bilance absorbéru) a v souvislosti s tím i rozložení teplot v kolektoru. Ve své podstatě jde o jednorozměrný model, u kterého jsou v iteračních cyklech určovány střední teploty v základních rovinách kolektoru. Vstupními parametry vyvinutého modelu kapalinového solárního kolektoru jsou klimatické a provozní parametry kolektoru. Vlastními parametry jsou vlastnosti jednotlivých částí solárního kolektoru. Volitelnými parametry jsou korelace (modely) pro výpočet součinitelů přestupu tepla. Výstupními parametry vyvinutého modelu jsou teplota kapaliny na výstupu z kolektoru, využitelný tepelný výkon a provozní účinnost kolektoru (viz 4.1).

Poté byl vytvořen detailní matematický model vzduchového solárního kolektoru. V současné době model umožňuje modelování následujících druhů vzduchových kolektorů: jednokanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu nad absorbérem, dvoukanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu pod absorbérem, vzduchový kolektor s oboustranným prouděním. Model vzduchového kolektoru, stejně jako model kapalinového kolektoru, řeší vnější a vnitřní bilance absorbéru. Výpočet se také provádí iteračním způsobem, přičemž je zřejmé, že modelování vzduchového kolektoru se bude lišit v závislosti na druhu kolektoru (viz 4.2).

V dalším kroku byly vyvinuté modely kapalinového solárního kolektoru a vzduchového solárního kolektoru sloučeny do modelu kombinovaného solárního kolektoru. Je třeba však zdůraznit, že vyvinutý model neuvažuje společné využití kapalinové a vzduchové části kolektoru. V podstatě to znamená, že model kombinovaného kolektoru funguje buď jako kapalinový, nebo jako vzduchový kolektor. Tudíž, kromě výše uvedených vstupních, vlastních, volitelných a výstupních parametrů, model kombinovaného kolektoru má ještě jeden vstupní parametr – a to je Operating Mode (provozní režim). Pokud Operating mode je roven 0, tak model funguje jako kapalinový kolektor. V případě, že Operating mode je roven 1, model funguje jako vzduchový kolektor.

Na závěr byl vyvinutý model kombinovaného solárního kolektoru implementován do simulačního prostředí TRNSYS (viz 4.3). Implementace do simulačního prostředí umožňuje provést celoroční simulace kombinovaného

kolektoru zapojeného do solárního systému (vzduchotechnický rozvod, kapalinový rozvod, akumulace atd.).

b. Experimentální ověření a validace navrženého modelu

Validace vyvinutého matematického modelu kombinovaného kolektoru byla provedena konfrontací experimentálně stanovené účinnosti a účinnosti stanovené matematickým modelem (viz 5). Pro validaci byl vytvořen funkční vzorek rozebíratelného kombinovaného kolektoru s přesně definovanými parametry. Konstrukce kolektoru umožňuje řadu konstrukčních změn: tloušťka zadní tepelné izolace, tloušťka přední vzduchové mezery, tloušťka zadní vzduchové mezery a výměna zasklení kolektoru. Díky tomu bylo možné výrazně snížit nejistotu vstupních parametrů jednotlivých částí kolektoru (tepelná vodivost izolace, emisivita přední části absorbéru, propustnost zasklení) zadávaných do modelu a tím zúžit šířku tolerančního pásma. Ve všech případech se experimentálně stanovené body účinnosti nacházely mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma. Model tím popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností v podstatě v rámci chyby experimentálního měření.

c. Analýza potenciálu využití kombinovaných kolektorů vzduch/kapalina v solárních systémech pro přípravu teplé vody a vytápění

V rámci teoretické analýzy využití kombinovaných solárních kolektorů na tuzemském a zahraničním trhu byla provedena energetická analýza čtyř různých systémů pro rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických podmínek (Stockholm, Praha a Milán) a stejných provozních podmínek: systém pro celoroční přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů s celoročním provozem v režimu ohřevu vody, dva systémy pro přípravu teplé vody a ohřev větracího vzduchu na bázi kombinovaných solárních kolektorů a dále systém přípravy teplé vody a cirkulačního vytápění také na bázi kombinovaných solárních kolektorů. V rámci analýzy byly uvažovány tři varianty rodinného domu s různou energetickou náročností.

Jako referenční varianta (V0) byl zvolen systém solárního ohřevu vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů. Přičemž tato variantu uvažuje celoroční provoz kombinovaných kolektorů v režimu ohřevu vody. Ve variantě V1 kombinované solární kolektory pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina fungují tak, že v letním období jsou využity pro přípravu teplé vody, zatímco během zimního a přechodného období jsou v provozu jako vzduchové solární kolektory pro ohřev větracího vzduchu. Ve variantě V1 jsou kombinované kolektory zapojeny před rekuperační jednotkou. Varianta V2 funguje podobný způsobem jako varianta V1 s tím rozdílem, že kombinované kolektory jsou zapojeny až za rekuperační jednotkou. Varianta V3 uvažuje využití kombinovaných kolektorů během zimního a přechodného období pro cirkulační teplovzdušné vytápění (ohřev cirkulačního vzduchu). Vyhodnocování energetických zisků solárních systémů bylo provedeno v simulačním prostředí TRNSYS.

Porovnání variant na bázi kombinovaných kolektorů ukazuje, že použití kombinovaného solárního kolektoru namísto kapalinového kolektoru (kombinovaného kolektoru s celoročním provozem v režimu ohřevu vody) umožňuje zvýšit využitelný tepelný zisk solárního systému. Dalším závěrem je, že tepelný zisk varianty V3 je vyšší než varianty V1 a varianty V2. Svou roli zde hraje skutečnost, že rekuperační jednotka a kombinované kolektory si během zimního a přechodného období navzájem konkurují. Předehříváním vzduchu v kolektoru (V1) se omezuje výkon rekuperační jednotky, protože do ní buď proudí vzduch s vyšší teplotou než je teplota venkovního vzduchu, nebo neproudí vzduch vůbec (bypass), když je teplota vzduchu na výstupu z kolektoru vyšší než 18 °C. Co se týká varianty V2, tak předehříváním vzduchu v rekuperační jednotce se snižuje účinnost kombinovaného kolektoru tím, že do něj proudí vzduch s vyšší teplotou, čímž se zvyšují tepelné ztráty kolektoru. Kromě toho průtok vzduchu ve variantě V3 je čtyřikrát větší než ve variantách V1 a V2 (400 m^3/h oproti 100 m^3/h). Vzhledem k významné závislosti účinnosti vzduchových kolektorů na průtoku vzduchu kolektorem, provozní účinnost kombinovaných kolektorů ve variantě V3 je vyšší než ve variantách V1 a V2.

Pro daný konkrétní případ a dané klimatické podmínky bylo zjištěno:

- Kombinace systému na bázi kombinovaných kolektorů se systémem zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu snižuje potenciální úspory tepla.
- Systémy na bázi kombinovaných kolektorů jsou efektivnější pro budovy s vysokou potřebou tepelné energie umístěné v mírném a chladném klimatu. Například pro mírné klimatické podmínky a pro budovy s „vysokou“ potřebou tepelné energie je roční energetický zisk solárního systému V3 přibližně o 103 kWh/m^2 vyšší ve srovnání s referenční variantou systému V0. Na druhou stranu, za stejných klimatických podmínek a pro budovu s „nízkou“ potřebou tepelné energie je roční energetický zisk vyšší pouze o 22 kWh/m^2 ve srovnání s referenčním systémem V0.
- V závislosti na energetické náročnosti budovy umožňuje navržený systém V3 na bázi kombinovaných solárních kolektorů zvýšit roční energetický zisk solárního systému až o 32 % pro klimatické podmínky Stockholmu, až o 22 % pro klimatické podmínky Prahy a až o 9 % pro klimatické podmínky Milánu oproti referenčnímu solárnímu systému na bázi kombinovaných solárních kolektorů s celoročním provozem v režimu ohřevu vody.

7.2 Přínos pro praxi

Jednoznačným přínosem pro praktické využití je vytvořený matematický model kombinovaného kolektoru, matematický model kapalinového kolektoru a matematický model vzduchového kolektoru (viz 4). Vytvořené modely jsou následně implementovány do simulačního prostředí TRNSYS a jsou k dispozici na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Modely je možné využít pro provedení citlivostních

analýz vlivu základních parametrů kolektoru na jeho celoroční provoz v různých provozních podmínkách a různých klimatech. Jde především o analýzy vlivu použitého materiálu a geometrie absorbéru (plastové x kovové), optimálního průtoku systémem (low-flow x high-flow systémy) či vlivu sklonu solárního kolektoru na velikost a průběh celoročních zisků (střešní x fasádní kolektory).

Nezanedbatelným praktickým přínosem je i funkční vzorek modulárního kombinovaného solárního kolektoru (viz 5). Ani na tuzemském ani na zahraničním trhu nejsou v současné době k dispozici kombinované solární kolektory. Vzhledem k absenci kombinovaných solárních kolektorů ani na tuzemském ani na zahraničním trhu byl pro účely disertační práce vytvořen funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru. V současné době kombinovaný kolektor nabízí dva různé režimy proudění vzduchu. Prvním režimem proudění je proudění vzduchu ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zadní izolací kolektoru (plochý absorbér). Druhým režimem je oboustranné proudění vzduchu podél absorbéru ve dvou variantách absorbéru: děrovaný a lamelový. Kromě toho, funkční vzorek kombinovaného kolektoru může být využit pro detailní validace jakéhokoli dalšího matematického modelu kombinovaného, kapalinového nebo vzduchového solárního kolektoru. Toto zařízení umožňuje měnit konstrukční parametry solárního kolektoru: tloušťka zadní tepelné izolace (10 až 50 mm), výměna zasklení kolektoru, tloušťka vzduchové mezery mezi zasklením a absorbérem (10 až 30 mm), změna typu a parametrů absorbéru. Testováním výkonu jednotlivých nastavených variant solárního kolektoru je možné sledovat vliv konstrukčních parametrů na výkonnost solárního kolektoru. Zároveň, vzhledem ke znalosti vlastností použitých materiálů s nízkou nejistotou bylo dosáhnuto výrazného snížení nejistoty vstupních parametrů.

Praktickým přínosem je také vybudovaná testovací trať na zkoušení vzduchových kolektorů (poloprovoz) (viz 5). V současné době existuje na tuzemském a zahraničním trhu velké množství solárních vzduchových kolektorů, kde dodavatelé ke každému z nich musí uvádět technické parametry. Na rozdíl od kapalinových kolektorů však dlouhou dobu v Evropě neexistovala standardizovaná metoda zkoušení vzduchových kolektorů. V roce 2014, v rámci přechodu ze zkušební normy ČSN EN 12975-2 na ČSN EN ISO 9806, došlo k zavedení metod zkoušení i pro vzduchové kolektory. Testovací trať může tudíž posloužit pro zkoušení vzduchových solárních kolektorů, které jsou na trhu a nemají vyzkoušené technické parametry. Kromě toho v současné době neexistuje jiné pracoviště v ČR, které by mělo k dispozici obdobné zařízení. Na trhu v ČR se takové zařízení nevyskytuje. Zároveň, zkoušky solárních kolektorů v Solární laboratoři SOLAB[2] v UCEEB ČVUT jsou akreditované.

7.3 Teoretický přínos

Byl jednoznačně určen potenciál využití kombinovaných solárních kolektorů. Bylo prokázáno, že při různých klimatických podmínkách i různé energetické náročnosti, mají systémy na bázi kombinovaných solárních kolektorů větší využitelný solární zisk ve srovnání s referenčním systémem na

bázi kombinovaných solárních kolektorů s celoročním provozem v režimu ohřevu vody (viz 6).

Podstatným teoretickým přínosem je analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti, pro zohlednění vlivu nejistoty měření na skutečný zisk solárního systému. Jedná se o to, že v současné době technický protokol o zkoušce solárního kolektoru neobsahuje vypočtenou nejistotu účinnostních parametrů solárního kolektoru (norma pouze doporučuje uvádět vypočtenou nejistotu účinnostních parametrů solárního kolektoru). Nicméně analýza poukázala na zásadní vliv nejistoty naměřených hodnot účinnosti na reálný zisk vysokoteplotních solárních systémů (viz 5).

Dalším nezanedbatelným teoretickým přínosem je inverzní metodika výpočtu výkonu vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru. V případě složité konstrukce vzduchové části solárního kolektoru (děrovaný nebo lamelový absorbér) neumožňuje přímá metoda výpočtu přesné stanovení výkonu solárního kolektoru. V tomto případě lze využít inverzní metodu stanovení výkonu vzduchové části kombinovaného kolektoru (viz 4.2).

7.4 Návrhy pro další směřování práce

V této práci je popsán detailní matematický model pro kombinovaný solární kolektor (vzduch/kapalina). Následně, za účelem validace modelu, byl postaven funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru. Model byl validován a implementován do simulačního prostředí TRNSYS, aby bylo možné provést celoroční simulace kombinovaného kolektoru zapojeného do solárního systému. A nakonec byla provedena analýza využití kombinovaných solárních kolektorů pro různé solární systémy, pro různé klimatické podmínky a pro budovy s různou energetickou náročností.

K dalšímu vývoji patří například vylepšení konstrukce kombinovaného kolektoru, zejména jeho vzduchové části směrem ke zvýšení výkonu. Další možností vývoje je rozšíření modelu kombinovaného kolektoru o fotovoltaickou část a vytvoření kombinovaného hybridního FVT kolektoru na bázi dvou teplonosných látek (vzduch/kapalina).

Model kombinovaného solárního kolektoru může být dále rozšířen a použit pro noční chlazení. V současné době se věnuje značná pozornost výzkumu nočního chlazení jako nízkoenergetickému způsobu zajištění pokrytí potřeby chladu v budovách. Systém na bázi kombinovaných kolektorů umožní efektivní snížení spotřeby energie na chlazení a u některých budov mohou dokonce za jistých podmínek zcela zastoupit konvenční chladicí systémy. Zvýšení provozní doby kombinovaného solárního kolektoru a následné zvýšení využitelného tepelného zisku může přispět k jejich konkurenceschopnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZI

[1] ASSARI, M.R., H. BASIRAT TABRIZI a I. JAFARI. Experimental and theoretical investigation of dual purpose solar collector. *Solar Energy* [online]. 2011, **85**(3), 601-608 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2011.01.006. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11000181

[2] JAFARI, I., et al. Energy and exergy analysis of dual purpose solar collector. *Acad Sci Technol*, 2011, **81**, 259-261 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/f43e/300a938c1d683d568cb6780f352bbd6898e7.pdf

[3] AK, A. V. a P. ARUN. Simulation studies on porous medium integrated dual purpose solar collector. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 2013, **3**(1), 114–120.

[4] MA, J., W. SUN, J. JI, Y. ZHANG, A. ZHANG a W. FAN. Experimental and theoretical study of the efficiency of a dual-function solar collector. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2011, **31**(10), 1751-1756 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.019. ISSN 13594311. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431111000998

[5] HE, W., X. HONG, B. LUO, H. CHEN a J. JI. CFD and comparative study on the dual-function solar collectors with and without tile-shaped covers in water heating mode. *Renewable Energy* [online]. 2016, **86**, 1205-1214 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.renene.2015.09.053. ISSN 09601481. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115303323

[6] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. *TRNSYS Type 205 v.1.1 Model zaskleného kapalinového kolektoru založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci.* [Software] 2017. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=582

[7] SHEMELIN, V. a T. MATUSKA. Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2017, **2017**, 1–9. ISSN 1110-662X. Dostupné z: doi:10.1155/2017/1587592

[8] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. *TRNSYS type 206-Model of glazed solar air collector based on detailed construction parameters and energy balance*. [Software] 2017. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=951

[9] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Analýza využití solárních vzduchových kolektorů pro vytápění rodinného domu. *TZB-info* [online]. 2018, **20**(29), 1-8. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/teplovzdusne-vytapeni/17641-analyza-vyuziti-solarnich-vzduchovych-kolektoru-pro-vytapeni-rodinneho-domu

[10] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Teoretická analýza plochého solárního kolektoru s vakuovým zasklením. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, **23**(5), 240–244.

[11] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Teoretická analýza plochého solárního kolektoru s vakuovým zasklením. In: *Alternativní zdroje energie 2014, sborník přednášek z konference*. Alternativní zdroje energie 2014, Kroměříž, 2014-07-01/2014-07-03. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014. s. 173-179. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02546-7.

[12] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Matematické modelování plochého solárního kolektoru s vaukovým zasklením. In: BARTÁK, M., ed. *Simulace budov a techniky prostředí 2014 - sborník 8. konference IBPSA-CZ*. Simulace budov a techniky prostředí 2014, Praha, 2014-11-06/2014-11-07. Praha: IBPSA-CZ, 2014. s. 51-55. ISBN 978-80-260-7209-6.

[13] SHEMELIN, V. a T. MATUSKA. Performance Modelling of Dual Air/Water Collector in Solar Water and Space Heating Application. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2019, **2019**, 1-10 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1155/2019/8560193. ISSN 1110-662X. Dostupné z: https://www.hindawi.com/journals/ijp/2019/8560193/

[14] DUFFIE, J. A. a W. A. BECKMAN. *Solar engineering of thermal processes*. USA, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

[15] SHEMELIN, V. et al. Theoretical Analysis of Combined Solar System Based on Dual Purpose Solar Collector. In: HABERLE, A., ed. *Proceedings of the ISES EuroSun 2018 Conference – 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*. 12th International Conference on Solar Energy and Buildings - EuroSun 2018, Rapperswil, 2018-09-10/2018-09-13. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2018. s. 1043-1054. ISBN 978-3-9820408-0-6. DOI 10.18086/eurosun2018.10.06

[16] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B.ŠOUREK. *TRNSYS Type 207 Model duálního solárního kolektoru vzduch-kapalina založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci*. [Software] 2017.
Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=965

[17] SHEMELIN, V a B ŠOUREK. *Duální solární tepelný kolektor*. [Funkční vzorek] 2018.

[18] ISO. 9806: 2013. *Solar energy--Solar thermal collectors--Test methods*. 2013.

[19] SHEMELIN, V., B. ŠOUREK a T. MATUŠKA. Zkušební trať pro testování vzduchových solárních kolektorů. [Poloprovoz] 2018.

[20] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Úřad pro normalizaci, měření a státní zkušebnictví, 2011.

[21] ČSN EN 15665 Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy obytných budov. Úřad pro normalizaci, měření a státní zkušebnictví, 2009.

[22] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Teoretická analýza využití duálních solárních kolektorů. In: *Alternativní zdroje energie 2018, sborník přednášek z konference*. Alternativní zdroje energie 2018, Kroměříž, 2018-06-20/2018-06-21. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2018. s. 167-174. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02805-5.

[23] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Potenciální aplikace pro duální solární kolektory. In: BARTÁK, M. a K. KABELE, eds. *Simulace budov a techniky prostředí 2018*. Praha, 2018-11-15/2018-11-16. Praha: IBPSACZ, 2018. s. 63-68. ISBN 978-80-907423-0-7.

[24] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Duální solární kolektory a jejich využití. *Energie 21*. 2016, **IX**(6), 20-22. ISSN 1803-0394.

PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI

[A-1] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. *TRNSYS Type 205 v.1.1 Model zaskleného kapalinového kolektoru založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci*. [Software] 2017. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=582

[A-2] SHEMELIN, V. a T. MATUSKA. Detailed Modeling of Flat Plate Solar Collector with Vacuum Glazing. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2017, **2017**, 1–9. ISSN 1110-662X. Dostupné z: doi:10.1155/2017/1587592

[A-3] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. *TRNSYS type 206-Model of glazed solar air collector based on detailed construction parameters and energy balance*. [Software] 2017. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=951

[A-4] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Analýza využití solárních vzduchových kolektorů pro vytápění rodinného domu. *TZB-info* [online]. 2018, **20**(29), 1-8. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/teplovzdusne-vytapeni/17641-analyza-vyuziti-solarnich-vzduchovych-kolektoru-pro-vytapeni-rodinneho-domu

[A-5] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Teoretická analýza plochého solárního kolektoru s vakuovým zasklením. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, **23**(5), 240–244.

[A-6] SHEMELIN, V a T MATUŠKA. Theoretical Analysis of Vacuum Flat-plate Solar Collector with a Detailed Model. In: *Proceedings of the ISES EuroSun 2016 Conference* [online]. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2017. s. 1131-1142. ISBN 978-3-9814659-6-9. Dostupné z: doi:10.18086/eurosun.2016.07.06

[A-7] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Teoretická analýza plochého solárního kolektoru s vakuovým zasklením. In: *Alternativní zdroje energie 2014, sborník přednášek z konference*. Alternativní zdroje energie 2014, Kroměříž, 2014-07-01/2014-07-03. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2014. s. 173-179. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02546-7.

[A-8] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Matematické modelování plochého solárního kolektoru s vaukovým zasklením. In: BARTÁK, M., ed. *Simulace budov a techniky prostředí 2014 - sborník 8. konference IBPSA-CZ*. Simulace budov a techniky prostředí 2014, Praha, 2014-11-06/2014-11-07. Praha: IBPSA-CZ, 2014. s. 51-55. ISBN 978-80-260-7209-6.

[A-9] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Vzduchové solární kolektory. *Energie 21*. 2016, **IX**(4), 24-26. ISSN 1803-0394.

[A-10] SHEMELIN, V. a T. MATUSKA. Performance Modelling of Dual Air/Water Collector in Solar Water and Space Heating Application. *International Journal of Photoenergy* [online]. 2019, **2019**, 1-10 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1155/2019/8560193. ISSN 1110-662X. Dostupné z: https://www.hindawi.com/journals/ijp/2019/8560193/

[A-11] SHEMELIN, V. et al. Theoretical Analysis of Combined Solar System Based on Dual Purpose Solar Collector. In: HABERLE, A., ed. *Proceedings of the ISES EuroSun 2018 Conference – 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*. 12th International Conference on Solar Energy and Buildings - EuroSun 2018, Rapperswil, 2018-09-10/2018-09-13. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2018. s. 1043-1054. ISBN 978-3-9820408-0-6. DOI 10.18086/eurosun2018.10.06

[A-12] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B.ŠOUREK. *TRNSYS Type 207 Model duálního solárního kolektoru vzduch-kapalina založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci*. [Software] 2017. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=965

[A-13] SHEMELIN, V a B ŠOUREK. *Duální solární tepelný kolektor*. [Funkční vzorek] 2018.

[A-14] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Citlivostní analýza teoretického modelu plochého solárního kolektoru. In: JAROŠ, M. a M. BARTÁK, eds. *Simulace budov a techniky prostředí 2016 - sborník 9. konference IBPSA-CZ*. Simulace budov a techniky prostředí 2016: 9. konference IBPSA-CZ, Brno, 2016-11- 10/2016-11-11. Praha: IBPSA-CZ, 2016. s. 39-44. ISBN 978-80-270-0772-1.

[A-15] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Porovnání různých modelů výpočtu roční produkce tepla solárních kolektorů. *Vytápění, větrání, instalace*. 2016, **25**(3), 132-136. ISSN 1210-1389.

[A-16] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Parametry vzduchových solárních kolektorů a jejich zkoušení. *Energie 21*. 2017, **X**(5/2017), 14-17. ISSN 1803-0394.

[A-17] ŠOUREK, B. a V. SHEMELIN. Testování vzduchových kolektorů. In: *Alternativní zdroje energie 2018, sborník přednášek z konference*. Alternativní zdroje energie 2018, Kroměříž, 2018-06-20/2018-06-21. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2018. s. 211-218. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02805-5.

[A-18] SHEMELIN, V., B. ŠOUREK a T. MATUŠKA. Zkušební trať pro testování vzduchových solárních kolektorů. [Poloprovoz] 2018.

[A-19] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Teoretická analýza využití duálních solárních kolektorů. In: *Alternativní zdroje energie 2018, sborník přednášek z konference*. Alternativní zdroje energie 2018, Kroměříž, 2018-06-20/2018-06-21. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2018. s. 167-174. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02805-5.

[A-20] SHEMELIN, V., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Potenciální aplikace pro duální solární kolektory. In: BARTÁK, M. a K. KABELE, eds. *Simulace budov a techniky prostředí 2018*. Praha, 2018-11-15/2018-11-16. Praha: IBPSACZ, 2018. s. 63-68. ISBN 978-80-907423-0-7.

[A-21] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Duální solární kolektory a jejich využití. *Energie 21*. 2016, **IX**(6), 20-22. ISSN 1803-0394.

JINÉ PUBLIKACE AUTORA NEVZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI

[B-1] NOVOTNÝ J., N. POKORNÝ, V. SHEMELIN a Y. KACHALOUSKI. *Testovací autonomní mobilní zařízení pro získávání vody ze vzduchu v pouštních oblastech*. [Funkční vzorek] 2020.

[B-2] České vysoké učení technické v Praze, Praha 6, Dejvice, CZ. *Zařízení pro získávání vody ze vzduchu s jedním vzduchovodem*. Původci: N. POKORNÝ, V. SHEMELIN a T. MATUŠKA. Česká republika. Užitný vzor CZ 34074. 2020-06-09.
Dostupné z: https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0034/uv034074.pdf

[B-3] České vysoké učení technické v Praze, Praha 6, Dejvice, CZ. *Kompaktní zařízení pro získávání vody ze vzduchu*. Původci: N. POKORNÝ, V. SHEMELIN a T. MATUŠKA. Česká republika. Užitný vzor CZ 34073. 2020-06-09.
Dostupné z: https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0034/uv034073.pdf

[B-4] SHEMELIN, V. et al. Energy Savings Potential from Prismatic Glass Structure. In: ZLATEVA, P., ed. *2020 11th International Conference on Environmental Science and Development (ICESD 2020)*. 2020 11th International Conference on Environmental Science and Development, Barcelona, 2020-02-10/2020-02-12. Les Ulis: EDP Sciences, 2020. E3S Web Conf. sv. 167, s. 1-7. ISSN 2267-1242. DOI 10.1051/e3sconf/202016706004.

[B-5] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. The Influence of Climatic Conditions on the Efficiency of the Solar System. In: ZLATEVA, P., ed. *2020 11th International Conference on Environmental Science and Development (ICESD 2020)*. 2020 11th International Conference on Environmental Science and Development, Barcelona, 2020- 02-10/2020-02-12. Les Ulis: EDP Sciences, 2020. E3S Web Conf. sv. 167., s. 1-6. ISSN 2267-1242. DOI 10.1051/e3sconf/202016705002

[B-6] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Statistika tepelných solárních kolektorů. *TZB-info [online]*. 2019, **21**(49), s.1-6. ISSN 1801- 4399. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/19943-statistika-tepelnych-solarnich-kolektoru

[B-7] SHEMELIN, V. a B. ŠOUREK. Vliv klimatických podmínek na zisky solárních soustav. In: BAŠTA, J., ed. *Konference Vytápění Třeboň 2019*. 25. konference Vytápění Třeboň 2019, Třeboň, 2019-05-28/2019-05-30. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019. s. 116-120. ISBN 978-80-02-02847-5.

[B-8] POKORNÝ, N., V. SHEMELIN a T. MATUŠKA. Modelování provozu nezasklených FVT kolektorů během noci. *Vytápění, větrání, instalace*. 2019, **28**(4), 210-214. ISSN 1210-1389.

[B-9] SHEMELIN, V. a B. ŠOUREK. Vliv klimatických podmínek na zisky solárních soustav pro přípravu teplé vody. *TZB-info [online]*. 2019, **21**(37), s. 1-9. ISSN 1801-4399. Dostupné z: https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/19531-vlivklimatickych-podminek-na-zisky-solarnich-soustav-pro-pripravu-teple-vody

[B-10] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Analýza solárního ohřevu pro bytový dům. *Vytápění, větrání, instalace*. 2019, **28**(3), 126-129. ISSN 1210-1389

[B-11] MATUŠKA, T., N. POKORNÝ a V. SHEMELIN. Performance of Unglazed Photovoltaic-Thermal Collectors for Cooling Purpose. In: SOJKOVÁ, K. et al., eds. *Central Europe towards Sustainable Building (CESB19)*. Central Europe towards Sustainable Building 2019, Praha, 2019-07-02/2019-07-04. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2019, s 1-8. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science. sv. 290. ISSN 1755-1307. DOI 10.1088/1755- 1315/290/1/012081

[B-12] POKORNÝ, N., V. SHEMELIN a T. MATUŠKA. Noční radiační chlazení hybridními FVT kolektory. In: BARTÁK, M. a K. KABELE, eds. *Simulace budov a techniky prostředí 2018*. Praha, 2018-11-15/2018-11-16. Praha: IBPSA-CZ, 2018. s. 69-73. ISBN 978-80-907423-0-7.

[B-13] POKORNÝ, N. et al. *Testovací buňka pro energeticky aktivní fasádní moduly*. [Funkční vzorek] 2017.

[B-14] SOUREK, B., V. JIRKA, V. SHEMELIN a T. MATUSKA. Experimental characterization of glazing with glass prisms. *Solar Energy* [online]. 2017, **158**, 440-447 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2017.08.087. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17307685

[B-15] JIRKA V., V. SHEMELIN, B. ŠOUREK a T. MATUŠKA. Simulace kancelářské místnosti s lehkým obvodovým pláštěm s optickými rastry. *Vytápění, větrání, instalace*. 2017, **26**(4), 187-192. ISSN 1210-1389.

[B-16] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Energy-economic Optimization of Flat-plate Collector. In: *In: Proceedings of the ISES EuroSun 2016 Conference [online]. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2017*. s. 1120-1129. ISBN 978-3-9814659-6-9. Dostupné z: doi: 10.18086/eurosun.2016.07.12.

[B-17] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Analýza solárního ohřevu pro bytový dům. In: BAŠTA, J., ed. *Konference Vytápění Třeboň 2017*. Třeboň, 2017-05-23/2017-05-25. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017. s. 161-165. ISBN 978-80-02-02712-6.

[B-18] SHEMELIN, V. a B. ŠOUREK. *Modulární solární tepelný kolektor*. [Funkční vzorek] 2016.

[B-19] JIRKA, V., V. SHEMELIN a B. ŠOUREK. Energetická bilance místnosti s optickými rastry integrovanými v trojskle. In: JAROŠ, M. a M. BARTÁK, eds. *Simulace budov a techniky prostředí 2016 - sborník 9. konference IBPSA-CZ*. Simulace budov a techniky prostředí 2016: 9. konference IBPSA-CZ, Brno, 2016-11-10/2016-11-11. Praha: IBPSA-CZ, 2016. s. 111-115. ISBN 978-80-270-0772-1.

[B-20] JIRKA V., V. SHEMELIN, B. ŠOUREK a T. MATUŠKA. Prismatic Glazings for Façade Envelopes. In: HÁJEK, P. et al., eds. *Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Future*. Central Europe towards Sustainable Building 2016 Innovations for Sustainable Future, Prague, 2016-06-22/2016-06-24. Praha: GRADA PUBLISHING, 2016. s. 1121-1126. 1st edition, Prague, 2016. ISBN 978-80-271-0248-8.

[B-21] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Design Optimization of the Façade - Integrated Solar Thermal Collector. *Studentská tvůrčí činnost 2016*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. ISBN 978-80-01-05929-6. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/pdf16/6518.pdf?_=1460317230

[B-22] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Energeticko-ekonomická optimalizace konstrukce plochého solárního kolektoru. *Sborník konference Alternativní zdroje energie 2016*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2016. s. 157-164. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02666-2.

[B-23] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Teoretická analýza vlivu konstrukčních parametrů plochého solárního kolektoru na jeho výkonnost *TZB-info [online]*. 2016, **18**(3), s. 1-6. ISSN 1801-4399. Dostupné z: http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/13697-teoreticka-analyza-vlivu-konstrukcnich-parametru-plocheho-solarniho-kolektoru-na-jeho-vykonnost

[B-24] SHEMELIN, V. a T. MATUŠKA. Energeticky aktivní obálky budov budoucnosti. *Energie 21*. 2015, **8**(3), 10-12. ISSN 1803-0394.