

**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

ZASKLENÝ KAPALINOVÝ FOTOVOLTAICKO-
TEPELNÝ KOLEKTOR

Ing. Nikola Pokorný

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."

Glazed liquid photovoltaic-thermal collector

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

Disertant: Ing. Nikola Pokorný
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

Školitel-specialista: Ing. Bořivoj Sourek, Ph.D.
UCEEB ČVUT v Praze
Třinecká 1024, Buštěhrad, 273 43

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

SOUHRN

Fotovoltaicko-tepelný kolektor díky současné produkci tepla a elektrické energie může výrazně navýšit využití dopadlé sluneční energie na plochu střechy. Zasklená varianta kapalinového fotovoltaicko-tepelného kolektoru má však svá konstrukční omezení, proto není dosud významně zastoupena na světovém trhu, přestože se jedná o solární prvek, který má velký potenciál zejména v oblasti přípravy teplé vody v bytových a rodinných domech. Výzkum se zabývá matematickým modelováním a experimentálním zkoušením nového prototypu zaskleného kapalinového fotovoltaicko-tepelného kolektoru. Vyvinutý fotovoltaicko-tepelný kolektor využívá unikátní technologie zapouzdření fotovoltaických článků do polysiloxanového gelu. V disertační práci je představen nový dynamický a stacionární matematický model fotovoltaicko-tepelného kolektoru na základě kterého bylo možné optimalizovat konstrukci FVT kolektoru, podle výsledků ročních simulací pro vybrané klimatické podmínky. Na základě optimalizačních analýz bylo vytvořeno několik nových prototypů kolektorů, které byly experimentálně otestovány jak za laboratorních, tak za reálných venkovních klimatických podmínek. Závěrečná část práce zhodnocuje přínos fotovoltaicko-tepelných kolektorů v cílové aplikaci nejen v teoretické rovině na základě simulačních analýz, ale i v rovině praktické, nasazením fotovoltaicko-tepelných kolektorů na konkrétních měřených aplikacích. První popsaná aplikace byl solární systém pro přípravu teplé vody se zasklenými fotovoltaicko-tepelnými kolektory měřený na experimentální instalaci na střeše Ústavu techniky prostředí, Fakulty Strojní ČVUT v Praze. Druhé dlouhodobé měření za venkovních klimatických podmínek bylo provedeno za účelem zhodnocení energetického přínosu integrovaných fotovoltaicko-tepelných kolektorů do lehkého obvodového pláště budovy. Pro dlouhodobý monitoring integrovaných fotovoltaicko-tepelných kolektorů byla zhotovena experimentální testovací buňka pro měření energeticky aktivních fasád nacházející se na experimentální ploše Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT.

SUMMARY

Photovoltaic-thermal collector can maximize utilization of incident solar radiation because of simultaneous thermal and electrical energy production. Glazed liquid photovoltaic-thermal collector has design restrictions, due to this fact it is not widely represented on the world market. Although, glazed liquid photovoltaic-thermal collector has large potential especially in solar domestic hot water application for family and multifamily buildings. Research is focused on the mathematical modelling and experimental testing of new prototype of glazed liquid photovoltaic-thermal collector. Developed photovoltaic-thermal collector is based on unique technology of encapsulation photovoltaic crystalline cells into polysiloxane gel. In the dissertation thesis new dynamic and steady state model of glazed photovoltaic-thermal collector will be presented. Mathematical model is convenient for optimisation process of photovoltaic-thermal collector design based on annual simulations for chosen climatic conditions. Based on optimization analysis several new prototypes of glazed photovoltaic-thermal collectors were manufactured and experimentally tested both under indoor steady state conditions and under real outdoor climatic conditions. Conclusion part of dissertation thesis is focused on evaluation of photovoltaic-thermal collector benefit in terms of simulation analysis of promising applications and measurement of real particular applications with new prototypes. First application was solar domestic hot water system with photovoltaic-thermal collectors measured at experimental installation on the roof of Department of Environmental Engineering Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague. Second long-term monitoring has been carried out with focusing on energetic evaluation of benefit of integrated photovoltaic-thermal collector into façade module. The measurement has been done at University Centre for Energy Efficient Buildings of CTU.

OBSAH

SOUHRN	5
SUMMARY	6
ÚVOD.....	8
1 STAV PROBLEMATIKY	10
1.1 Zasklený kapalinový FVT kolektor.....	11
1.2 Modelování FVT kolektoru	14
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	15
3 MODEL ZASKLENÉHO FVT KOLEKTORU	17
3.1 Validace modelu FVT kolektoru	19
3.1.1 Validace modelu za ustálených podmínek.....	19
4 KONSTRUKCE FVT KOLEKTORU A JEJÍ OPTIMALIZACE	24
4.1 Koncept zaskleného FVT kolektoru.....	25
5 APLIKACE FVT KOLEKTORŮ.....	31
5.1 Potenciální aplikace pro FVT kolektory	31
5.1.1 Zasklené FVT kolektory pro bytový dům	31
5.2 Experimentální měření na konkrétních aplikacích	36
5.2.1 Solární soustava pro přípravu teplé vody s FVT kolektory.....	36
5.2.2 Soustava s FVT kolektory integrovanými do fasády budovy	38
ZÁVĚR.....	43
6 DŮSLEDKY PRO VĚDU A PRAXI	46
6.1 Přínos pro praxi	46
6.2 Teoretický přínos	46
6 Návrhy pro další směřování práce	47
SEZNAM LITERATURY	48
SEZNAM LITERATURY AUTORA	50

ÚVOD

Pařížská dohoda o klimatu si stanovila cíl dosáhnout do roku 2050 uhlíkové neutrality [21]. Vypouštěné emise CO₂ by se měly rovnat množství emisí skleníkových plynů, které jsou z atmosféry přírodními či technologickými procesy absorbovány. Jedním z dílčích cílů Evropské unie je snížení produkce emisí CO₂ o 40 % do roku 2030 oproti stavu z roku 1990. K velmi podobnému snížení se zavazuje stále více měst a obcí v rámci Paktu starostů a primátorů pro udržitelnou energii a klima. Ve světovém měřítku spotřebovává provoz budov okolo 30 % neobnovitelné primární energie, což odpovídá přibližně 28 % skleníkových plynů [33]. V Evropě jsou budovy zodpovědné za 40 % spotřeby neobnovitelné primární energie a 36 % emisí CO₂ [6]. Důraz na snižování spotřeby neobnovitelné primární energie a s tím související snižování emisí CO₂ otevírá dveře pro nové energeticky efektivní řešení. Zvyšování účinnosti a efektivní využívání obnovitelných zdrojů energie je jedním z podstatných aspektů při boji s klimatickou změnou.

Fotovoltaicko-tepelný (FVT) kolektor díky kombinaci produkce tepla a elektrické energie může výrazně navýšit využití dopadlé sluneční energie na zemský povrch. Disertační práce se zabývá výzkumem v oblasti zaskleného kapalinového FVT kolektoru jak v teoretické, tak experimentální rovině. Většina komerčně vyráběných fotovoltaických (FV) panelů je schopna přeměnit dopadlou sluneční energii na elektrickou energii s účinností 10 až 18 %, část energie se odrazí a 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. Díky kombinaci FV panelu a solárního tepelného kolektoru lze významně navýšit využití dopadlé sluneční energie. Existuje řada odlišných technických provedení FVT kolektorů lišících se zejména typem teplonosné látky případně využitím krycího zasklení za účelem snížení tepelných ztrát. Velmi rozšířené jsou kapalinové a vzduchové FVT kolektory. Vzduchové FVT kolektory jsou v současné době spíše stranou zájmu vzhledem k omezenému využití tepelné energie v budovách v letním období. Kapalinové FVT kolektory existují v nízkoteplotním (nezasklené) a vysokoteplotním provedení (zasklené). Nezasklená varianta FVT kolektoru je vhodná pro aplikace, kde je prioritou produkce elektrické energie a využití nízkopotenciálního tepla je přidaná hodnota. Nezasklený FVT kolektor je výhodný zejména pro oblasti jižní Evropy, kde jsou vysoké celoroční úhrny dopadlé sluneční energie. V jižní Evropě je možné očekávat nárůst produkce elektrické energie nezasklených FVT kolektorů vlivem ochlazení FV části, ale pouze v řádu procent. V oblasti střední Evropy je nárůst produkce elektrické energie díky chlazení FV modulů velmi nízký. Napříč Evropu se pro využití v budovách jeví jako velmi výhodný kapalinový zasklený FVT kolektor, který je možné provozovat při vyšších teplotách dostačujících zejména pro přípravu teplé vody. Právě příprava teplé vody solárním tepelným systémem patří mezi nejrozšířenější aplikaci solárních tepelných kolektorů ve světě [39]. Vývoj zaskleného kapalinového FVT kolektoru směřuje ke zvýšení produkce tepelné energie do takové míry, aby mohl v budoucnu konkurovat konvenčním tepelným kolektorům na trhu. Zasklený kapalinový FVT kolektor však bude mít

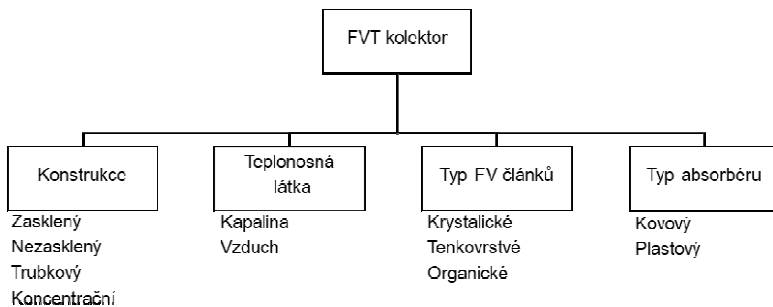
jako přidanou hodnotu výrobu elektrické energie. Celkový energetický přínos zaskleného FVT kolektoru by tak měl být vyšší než u odděleného řešení FV panelů a solárních tepelných kolektorů. Velký potenciál pro zasklené kapalinové FVT kolektory se pak nachází zejména u staveb s omezenou plochou střechy.

1 STAV PROBLEMATIKY

První vědecké publikace v oblasti FVT kolektorů se objevují již v 70. letech 20. století. Je tomu tak z důvodu tehdejší ropné krize, která stimulovala vlády investovat více do výzkumu obnovitelných zdrojů energie. I přes poměrně dlouhé časové období od prvních zmínek o FVT kolektorech je výzkum v oblasti FVT kolektorů stále aktuální. FVT kolektory jsou v současné době předmětem vývoje mnoha výzkumných institucí nejen v Evropě, ale i na celém světě. Jedním z posledních důkazů o podstatnosti tématu je běžící projekt Mezinárodní Energetické Agentury spadající pod program mezinárodní spolupráce SHC (Solar Heating and Cooling). Jedná se o projekt Task 60 (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems) [25], který se do hloubky věnuje problematice FVT kolektorů. Na projektu se podílí řada renomovaných výzkumných center a univerzit.

FVT kolektor kombinuje technologii FV panelů a solárních tepelných kolektorů. Vzhledem ke snaze o zvýšení energetického využití obálky budovy je FVT kolektor díky kombinované výrobě tepla a elektřiny (solární kogeneraci) vhodné efektivní řešení. Jedná se o účinnější řešení než využití konvenčních technologií solárních tepelných kolektorů a FV panelů odděleně. Funkce FVT kolektoru lze popsat energetickou rovnováhou, která se stanoví na základě dopadajícího slunečního záření, které je částečně odraženo od zasklení a absorbérů, zčásti se pohlcuje na povrchu FV článků a mění se v teplo a elektrickou energii. Část tepelné energie, která se neodvedla teplosnosnou kapalinou, se akumuluje v těle kolektoru nebo odchází do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát.

FVT kolektory existují v mnoha konfiguracích, viz obr. 1.1. Je možné je rozdělit podle konstrukce, teplosnosné látky, typu použitých FV článků nebo podle typu absorbérů. Výzkum v jednotlivých konstrukčních oblastech FVT kolektorů je velmi aktivní. Vědecké práce se zpravidla zabývají nezasklenými kapalinovými FVT kolektory, zasklenými kapalinovými FVT kolektory, koncentračními FVT kolektory a vzduchovými FVT kolektory. V současné době existují velmi citované rešerše výzkumu v oblasti FVT kolektorů od prof. Chowa [24], prof. Asteho [1] či prof. Zondaga [43], které se více méně věnují všem jmenovaným typům FVT kolektorů.



Obr. 1.1 Rozdělení FVT kolektorů

1.1 Zasklený kapalinový FVT kolektor

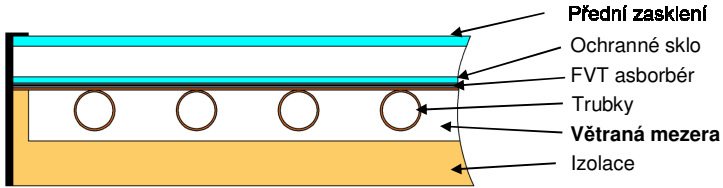
Zasklená varianta FVT kolektoru je v současné době zastoupena na trhu v omezené míře. Podle rešerše světového trhu provedené na SPF v Rapperswilu z března roku 2017 [40] bylo na světovém trhu 6 výrobců zasklených FVT kolektorů z toho 5 v Evropě. V březnu 2018 vydalo SEAC (Solar Energy Application Centre) v Eindhovenu vlastní rešerši [9], kde jsou již zasklené FVT kolektory zastoupeny na Evropském trhu pouze dvěma výrobci. Zasklené FVT kolektory mají teplotní omezení jako běžné FV panely v podobě teplotní odolnosti laminace FV části okolo 85 °C. Avšak stagnační teploty zasklených FVT kolektorů se mohou pohybovat v rozsahu 130 až 180 °C. Stagnační teploty zaskleného FVT kolektoru mohou proto nevratně zničit FV část FVT kolektoru [42], což vede ke komplikovaným provozním opatřením pro zajištění jejich spolehlivosti. Zasklené FVT kolektory mají tedy velmi omezené možnosti pro úspěch na trhu.

Z hlediska vývoje a výzkumu není koncept zaskleného FVT kolektoru nový. Již od 70. let minulého století byly publikovány vědecké práce zaměřené na kombinaci FV panelů a tepelných kolektorů v rozličných provedeních. Na významnou výzkumnou činnost prof. Zondaga v oblasti vývoje zasklených FVT kolektorů navázal Dr. Dupeyrat. Jeho experimentální měření bylo prováděno na Fraunhofer ISE (Institut for Solar Energy ve Freiburgu), kde se zabýval experimentálním vývojem FVT kolektorů včetně zasklené varianty. Vývoj byl soustředěn zejména na optimalizaci tepelného a elektrického výkonu, výzkum byl zakončen disertační prací [13]. Další, kdo navázal na práci Dr. Dupeyrat ve Fraunhofer ISE byl Dr. Lämle, který se zabýval obdobně vývojem a modelováním zasklených FVT kolektorů. Výzkum byl zaměřen zejména na vývoj nových opatření proti přehřívání FVT kolektoru během stagnace. Opět byla výzkumná činnost zakončena disertační prací [29]. Vývoj zaskleného kapalinového FVT kolektoru je v posledních letech soustředěn zejména na ochranu FV části při vyšších provozních teplotách. Kromě toho se vývoj v oblasti zasklených FVT kolektorů zabývá optimalizací tepelné a elektrické produkce energie FVT kolektoru aplikací různých povlaků na krycí sklo či absorbér FVT kolektoru [11, 27]. Současný výzkum a vývoj v oblasti zaskleného FVT kolektoru lze rozdělit podle přístupu na tři hlavní trendy:

- nahrazení EVA laminace teplotně odolným materiálem;
- nalezení vhodného opatření pro zamezení přehřívání FVT kolektoru;
- optimalizace tepelného a elektrického výkonu FVT kolektoru.

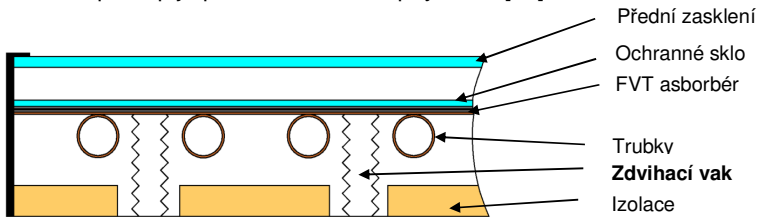
Možností jak ochránit FV část FVT kolektoru je celá řada. Společným jmenovatelem konceptů proti přehřívání kolektoru je však navýšení ceny a technické složitosti kolektoru. Jeden z možných přístupů, jak vyřešit degradaci EVA laminace během stagnace je její nahrazení za teplotně odolný materiál (polysiloxanový gel), což dosud nebylo ve vědecké literatuře posáno a tato problematika je zároveň předmětem disertační práce.

Druhému přístupu je věnována celá řada vědeckých publikací. Jedno z diskutovaných opatření proti přehřívání zasklených FVT kolektorů je řízené větrání vnitřního boxu kolektoru okolním vzduchem během stagnace (obr. 1.2). Pokud FVT kolektor stagnuje, otevře se ve spodní a horní části kolektoru otvor, kterým prochází venkovní vzduch a tím kolektor ochlazuje. Tého problematice se věnuje řada publikací zaměřených na tepelné kolektory, protože i pro tepelný kolektor je z hlediska provozu solární tepelné soustavy výhodné vyhnout se stagnačním teplotám [5, 17]. Konkrétní testy provětrávání FVT kolektoru během stagnace jsou popsány v disertační práci Dr. Lämmleho [29].



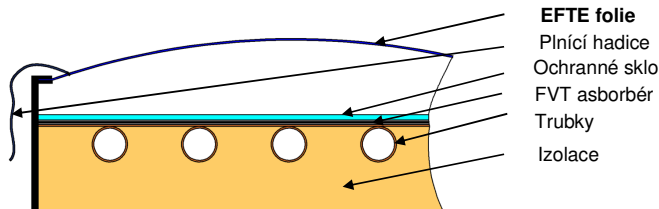
Obr. 1.2 Provětrávaný zasklený FVT kolektor během stagnace

Další možností, jak zamezit přehřívání FVT kolektoru je využití volně uloženého FVT absorberu, který je vytlačován vakem, kde je napuštěn plyn s velkou objemovou roztažností. Plyn při vyšších teplotách zvětší svůj objem a přiblíží FVT absorber k zasklení, a tím se zvýší tepelné ztráty kolektoru, viz obr. 1.3. Tento přístup je patentován Dr. Dupeyratem [12].



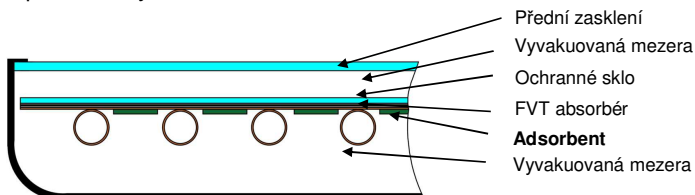
Obr. 1.3 Zasklený FVT kolektor s pohyblivým absorberem

Jedním z dalších konceptů pro zamezení přehřívání FVT kolektoru je využití EFTE (ethylen-tetrafluorethylen) folie jako krytu kolektoru [28]. Jedná se o materiál, který našel místo v současné architektuře, folie vykazuje vysokou pevnost, trvanlivost a propustnost pro sluneční záření. Vzduch mezi absorberem a folií je během vysokých teplot vypuštěn, aby byly zvýšeny tepelné ztráty kolektoru, viz obr. 1.4. Během provozu je pak prostor nad absorberem opět napuštěn vzduchem. Přístup je spíše teoretický vzhledem k problematickému použití za venkovních podmínek, zatím koncept nebyl dlouhodobě testován za venkovních podmínek.



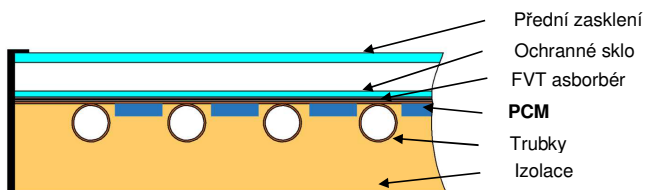
Obr. 1.4 Koncept FVT kolektoru s vrchní krycí EFTE folií

V německém městě Freiburg byly instalovány v rámci projektu na Fraunhofer ISE vakuové ploché FVT kolektory s adsorbentem jako ochrannou proti přehřátí FVT kolektoru [38]. Varianta vakuového FVT kolektoru s adsorbentním materiálem na zadní straně absorberu byla patentována prof. Henningem [20]. Během stagnace se ze sorpčního materiálu na zadní straně absorberu uvolňují molekuly vody, díky kterým pak narůstá tepelná ztráta kolektoru (obr. 1.5). V období, kdy teplota v kolektoru klesne, materiál na zadní straně absorberu opět adsorbuje molekuly vody a sníží tak tepelné ztráty kolektoru.



Obr. 1.5 Vakuový zasklený FVT kolektor s adsorbentem na zadní straně absorberu

Ve Španělsku byl popsán přístup ochranný FV části FVT kolektoru fixací PCM (Phase Change Material) na zadní straně FVT absorberu [35]. PCM zvýší tepelnou kapacitu konstrukce FVT kolektoru. PCM materiál během stagnačních teplot naakumuluje tepelnou energii, kterou vypustí ve večerních či nočních hodinách. Díky PCM se FVT kolektor nepřehřívá a zároveň přesouvá naakumulovanou energii do večerních hodin, což může být z hlediska energetického využití u většiny instalací žádoucí [8]. Zásadní nevýhoda tohoto konceptu je velmi vysoká cena PCM a jeho teplotní stabilita.



Obr. 1.6 Zasklený FVT kolektor s PCM na zadní straně absorberu

1.2 Modelování FVT kolektoru

Modelovat provozní chování zaskleného FVT kolektoru je možné na základě parametrického nebo detailního matematického modelu. Jeden z prvních matematických popisů provozního chování zaskleného FVT kolektoru byl publikován již v 70. letech minulého století, jednalo se o model podle Florschuetze [14]. Model vycházel ze známého matematického popisu solárního tepelného kolektoru podle Hottella a Whillera [22]. Model podle Florschuetze byl rozšířením o stanovení elektrického výkonu FV části. Dosud byla publikována řada analytických stacionárních [4, 10, 41] a dynamických [15, 19, 23] modelů, které byly více či méně inspirované prací odvedenou v 70. letech. Některé z nich byly experimentálně validovány, některé nikoliv. Dynamické modely jsou zpravidla založeny na výpočtu pomocí metody konečných objemů, kde pro každý kontrolní objem je stanovena energetická bilance. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého počtu objemů, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Elektrická část FVT kolektoru je pak vyhodnocena modelem stejnosměrného napětí, který je založen na Shockleyho aproximaci ideální diody. Tento přístup je popsán například v práci podle Dr. Hauranta [19]. Poslední dvě disertační práce zabývající se experimentálním vývojem FVT kolektoru [13, 29] využívají matematický model FVT kolektoru. Ani v jedné z prací však v modelu není zohledněna tepelná setrvačnost kolektoru, kterou lze výpočet značně zpřesnit. Dosud nebyl ve vědecké literatuře popsán detailní matematický model FVT kolektoru rozšířený o experimentálně stanovenou tepelnou kapacitu FVT kolektoru. Kromě toho, je nutné uvést, že dosud není v simulačním prostředí TRNSYS žádný experimentálně ověřený model implementován. Simulace zaskleného kapalinového FVT kolektoru lze v prostředí TRNSYS provést pomocí komponenty type 50b [37]. Model je však značně zjednodušený a nespolehlivý, některé jeho parametry (teplotní součinitel FVT kolektoru, součinitel prostupu tepla FVT kolektorem) nejsou uvažovány jako proměnné, ačkoliv by se právě během proměnných provozních a klimatických podmínek měli být.

Jak již bylo v úvodu zmíněno, další možností, jak modelovat provozní chování FVT kolektorů je využitím parametrického modelu, který vychází z naměřených dat dle normy ČSN ISO 9806 [7] a dle výsledků testu FV částí. V posledních letech přibývaly impaktované publikace věnující se právě problematice parametrického modelování FVT kolektorů [26, 30]. Nevýhodou parametrického modelu je, že je nevhodný pro optimalizační úlohy zabývající se konstrukčním provedením kolektoru. Nelze sledovat vliv jednotlivých konstrukčních detailů na tepelný či elektrický výkon, bez nutnosti zkonstruovat a otestovat prototyp FVT kolektoru. Parametrický model je zejména vhodný pro optimalizaci energetického systému s existujícími FVT kolektory na trhu. V simulačním prostředí je možné využít ještě type 203 [36]. Jedná se však pouze o model pro nezasklený FVT kolektor. Type 203 uvažuje nezasklený FVT kolektor jako dvě odlišná zařízení. Vstupní data do modelu jsou výsledky zkoušky solárního tepelného kolektoru a FV panelu separátně.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tematicky je disertační práce orientovaná na problematiku zasklených kapalinových FVT kolektorů, které nejsou takřka zastoupeny na světovém trhu, přestože by jejich energetický přínos pro budovy mohl být významnější oproti ostatním konstrukčním typům FVT kolektorů či současným konvenčním solárními technologiím (solární tepelné kolektory a FV panely). Zasklené FVT kolektory mají konstrukční omezení z hlediska maximální provozní teploty. Pokud je překročena maximální provozní teplota, dojde k termickému rozkladu EVA laminace, kde jsou zapouzdřeny FV články. V současné vědecké literatuře existuje řada technických řešení, jak zamezit přehřívání zaskleného FVT kolektoru a tím degradaci FV části. Doposud popsaná opatření proti zamezení přehřívání FVT kolektoru vedou k velmi komplikovanému provedení s navýšením počtu konstrukčních či ovládacích prvků nebo k výraznému navýšení ceny FVT kolektoru. Jako slibné technické řešení, které je současně předmětem disertační práce, se nabízí využití polysiloxanového gelu pro zapouzdření FV článků místo konvenčního zapouzdření do EVA laminace. Cena a technické provedení FVT kolektoru s polysiloxanovým gelem by mělo být v budoucnu konkurenceschopné oproti současným technologiím dostupným na trhu. **Jedním z hlavních cílů disertační práce je matematické modelování a experimentální testování nového konceptu zaskleného FVT kolektoru, které povede k nalezení výhodného konstrukčního provedení kolektoru. Jako další hlavní cíl je vytvoření optimalizovaného prototypu FVT kolektoru na základě výsledků celoročních simulací. Energetický přínos prototypu FVT kolektoru je nutné experimentálně ověřit jak za laboratorních podmínek, tak za reálných venkovních klimatických podmínek.** Aby bylo možné optimalizovat konstrukci nestandardního FVT kolektoru je nutné použít nový validovaný matematický model zaskleného FVT kolektoru, který je možné využít pro celoroční simulace v simulačním prostředí TRNSYS. Současně s disertační prací byl realizován projekt podpořený Technologickou Agenturou České republiky, který byl ve spolupráci s průmyslovým partnerem firmou Skanska. Jedna část projektu se zabývala integrací FVT kolektoru do obálky budovy. Právě integrace FVT kolektoru do obálky budovy s následným dlouhodobým experimentem je jedním z dalších cílů disertační práce.

Díličí cíle disertační práce lze rozdělit následovně:

- stacionární a dynamický model FVT kolektoru.

První a podstatnou část práce je vytvoření a validování detailního stacionárního modelu FVT kolektoru, který vychází z vnější a vnitřní energetické bilance FVT absorbéru. Vnější energetická bilance řeší přestup tepla mezi FVT absorbérem a okolím. Vnitřní energetická bilance řeší přestup tepla z FVT absorbéru do teplotně kapalin. Model zohledňuje optické, tepelné, elektrické a geometrické vlastnosti FVT kolektoru. V současné vědecké literatuře existuje řada detailních matematických modelů zasklených FVT kolektorů, žádný validovaný model nebyl dosud implementován v simulačním prostředí TRNSYS. Kromě toho ne všechny dosud známé matematické popisy FVT kolektorů jsou výhodné pro optimalizační analýzy a

jsou experimentálně validovány. Za účelem validace je nutno zhotovit prototyp zaskleného FVT kolektoru a experimentálně měřit jak za laboratorních, tak za venkovních klimatických podmínek. Pro zohlednění dynamických provozních podmínek solárního systému s FVT kolektory je nutné vytvořit rozšíření modelu o dynamický člen. Dynamický model je schopen zohlednit ranní a večerní spínání solární tepelné soustavy či náhlé změny teploty na vstupu do FVT kolektoru během dne. V současné vědecké literatuře nebyl dosud popsán detailní matematický model zaskleného FVT kolektoru, který by byl rozšířen o experimentálně stanovenou tepelnou kapacitu FVT kolektoru.

- Optimalizace konstrukce kolektoru.

Validovaný matematický model je využit pro optimalizaci konstrukce FVT kolektoru na základě celoročních simulačních analýz. Simulační analýzy jsou zaměřeny například na tloušťku zadní izolace, geometrii tepelného výměníku, tloušťku vzduchové mezery v zasklení apod. Jednou z hlavních kapitol optimalizace konstrukce je aplikace nízkoemisivního povlaku na povrch FVT absorberu za účelem snížení tepelných ztrát absorberu sáláním.

- Realizace prototypu FVT kolektoru.

Na základě výsledků optimalizačních analýz je zkonstruováno několik optimalizovaných prototypů FVT kolektorů. Výkonové charakteristiky FVT kolektorů budou experimentálně naměřeny. Dále bude vytvořena integrovaná varianta FVT kolektoru, která je součástí energeticky aktivního fasádního modelu.

- Výkonová analýza aplikace FVT kolektoru.

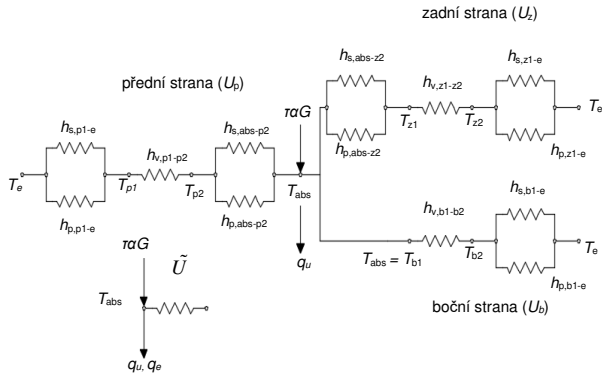
Jedním z dílčích cílů disertační práce je prověřit koncept zaskleného FVT kolektoru v cílové aplikaci. Budou stanoveny očekávatelné tepelné elektrické zisky pro jednotlivé aplikace. Budou provedeny simulační analýzy pro přípravu teplé vody v bytovém a rodinném domě pro odlišné Evropské klimatické podmínky. Energetický přínos bude hodnocen jak na základě výsledků simulačních analýz, tak na základě dvou měřených aplikací. První aplikace FVT kolektorů pro přípravu teplé vody byla experimentálně měřena na střeše Fakulty Strojní Ústavu Techniky prostředí ČVUT v Praze. Druhá aplikace byla zaměřena na dlouhodobé vyhodnocení energetického přínosu energeticky aktivního fasádního modulu s integrovaným FVT kolektorem. Aplikace s integrovaným FVT kolektorem byla měřena po dobu dvou let na experimentální ploše Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Praze.

3 MODEL ZASKLENÉHO FVT KOLEKTORU

Za účelem optimalizace konstrukce FVT kolektoru byl vytvořen detailní matematický model zaskleného FVT kolektoru, který bylo nezbytné implementovat do simulačního prostředí TRNSYS, kde je možné provádět celoroční analýzy. V simulačním prostředí TRNSYS není dosud žádný experimentálně ověřený model zaskleného FVT kolektoru implementován. Simulace zaskleného kapalinového FVT kolektoru lze v prostředí TRNSYS provést pomocí komponenty typu 50b [37]. Model je však značně zjednodušený a nespolehlivý, některé jeho parametry (teplotní součinitel FVT kolektoru, součinitel prostupu tepla FVT kolektorem) nejsou uvažovány jako proměnné, ačkoliv by právě během proměnných provozních a klimatických podmínek měly být. Tepelnému výkonu stanovenému komponentou typu 50b nelze důvěřovat. Matematický model zaskleného FVT kolektoru vycházel z teoretického popisu popsaného v [14]. Model řeší přestup tepla mezi FVT absorbérem a okolím a je rozdělen na dvě energetické bilance. Vnější energetická bilance FVT kolektoru řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbéru vodivě spojeného s chladicí lamelou do okolí. Vnitřní energetická bilance řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbéru do teplotonosné kapaliny. Princip iteračního výpočtu byl inspirován modelem solárního tepelného kolektoru [32]. Matematický model by vytvořen v programovacím jazyce C++ a následně implementován do simulačního prostředí TRNSYS. Přenos tepla popisovaný vnější energetickou bilancí v zaskleném FVT kolektoru lze popsat jako:

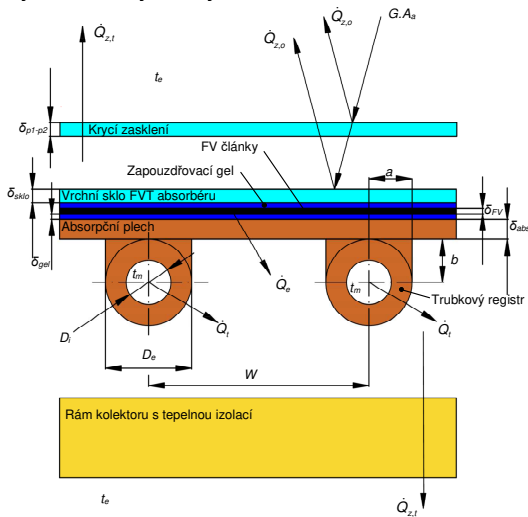
- sálání mezi FVT absorbérem a zasklením kolektoru, sálání mezi FVT absorbérem a rámem kolektoru;
- sálání mezi zasklením a venkovním prostředím, sálání mezi zadní částí rámu kolektoru a přilehlou plochou;
- přirozená konvekce mezi FVT absorbérem a zasklením, přirozená konvekce mezi FVT absorbérem a rámem kolektoru;
- vedení tepla zasklením a rámem kolektoru (tepelnou izolací);
- nucená nebo přirozená konvekce okolo zasklení a rámu kolektoru.

Na obr. 3.1 je zjednodušené schéma vnější energetické bilance FVT kolektoru. Vnější energetická bilance řeší přestup tepla sáláním a přirozenou konvekcí z přední strany FVT absorbéru na zasklení, stejně tak i z boční a zadní strany na rám kolektoru. Kromě toho vnější energetická bilance řeší vedení tepla přes zadní a boční izolaci. Pro stanovení součinitelů přestupu tepla na jednotlivých úrovních kolektoru je nutné v prvním iteračním kroku povrchové teploty odhadnout, v následujícím kroku jsou již stanoveny na základě vnější energetické bilance.



Obr. 3.1 Schéma vnější energetické bilance volně stojícího FVT kolektoru

Vnitřní energetické bilance řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbéru do teplonosné kapaliny, viz obr. 3.2. Uvažuje se, že určitá část dopadlého slunečního záření se přemění na elektrickou energii. Přestup tepla je řešený iteračně, s tím, že počáteční odhad je proveden pro vstupní teplotu do kolektoru. Výsledkem vnitřní energetické bilance je povrchová teplota FVT absorbéru. Nově stanovená teplota povrchu FVT absorbéru se následně předá do vnější energetické bilance, kde je výsledkem korigovaný součinitel prostupu tepla, který je právě vstup do vnitřní energetické bilance. Iterační cyklus se opakuje, dokud výsledky obou bilancí nezačnou konvergovat.



Obr. 3.2 Schéma vnitřní energetické bilance volně stojícího FVT kolektoru

Dále byl stacionární model rozšířen o zohlednění tepelné setrvačnosti FVT kolektoru. Postup výpočtu byl inspirován parametrickým modelem solárního tepelného kolektoru popsáným v [16], kde jsou jako hlavní vstupy do modelu výsledky kvazi-dynamické zkoušky tepelného výkonu. V současné vědecké literatuře není dosud popsán dynamický model zaskleného FVT kolektoru, který by kombinoval detailní fyzikální model rozšířený o efektivní tepelnou kapacitu FVT kolektoru.

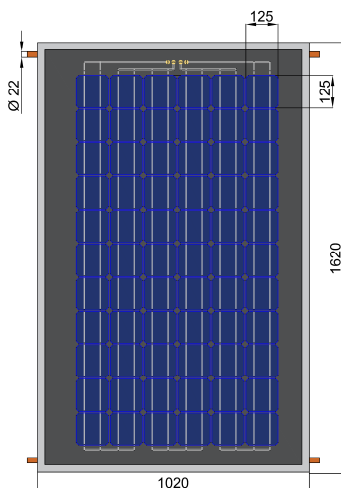
3.1 Validace modelu FVT kolektoru

Validace matematického modelu FVT kolektoru byla provedena jak pro stacionární model [57], tak pro dynamický model [54, 56]. V tezi disertační práce je prezentována validace za ustálených podmínek pro poslední prototyp zaskleného FVT kolektoru.

3.1.1 Validace modelu za ustálených podmínek

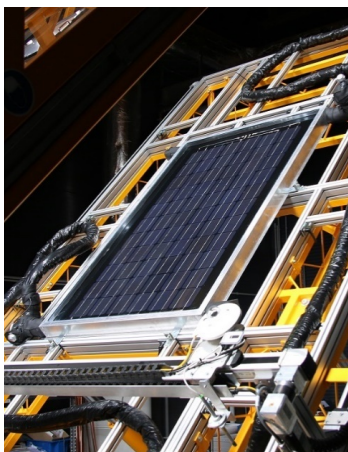
Validace modelu byla provedena na solárním simulátoru v solární laboratoři UCEEB ČVUT [63]. Výsledky matematického modelu byly porovnány s experimentálně určenou křivkou tepelné a elektrické účinnosti. Ustálené podmínky během experimentálního měření odpovídaly podmínkám při zkoušení tepelných kolektorů podle EN ISO 9806. Experimentální měření bylo provedeno ve dvou variantách, s otevřeným elektrickým okruhem (bez odběru elektrické energie) a s uzavřeným elektrickým okruhem (s odběrem elektrické energie).

Výkres prototypu FVT kolektoru se základními rozměry je na obr. 3.3 (tloušťka FVT kolektoru je 80 mm). Pro FV část je instalováno 6 x 11 monokrystalický FV článků o rozměrech (125 x 125) mm. Deklarovaná účinnost FV článků od výrobce je 18,8 %. FVT kolektor byl zaizolován na zadní straně 30 mm minerální izolací a 10 mm na bočních stranách. Mezera mezi krycím zasklením a FVT absorbérem je naplněna argonem a tloušťka mezery je 24 mm. Na povrch FVT absorbéru je použito zasklení s emisivitou 30 %. Mezi vnitřním zasklením a absorbérem jsou stringy FV článků ve vrstvě gelové laminace. Jako absorbér je použit přilepený trubkový registr na měděný plech o tloušťce 0,2 mm. Rozteč trubek je 50 mm. Trubkový registr je složen z trubek 8 x 1 mm. Testovaný prototyp FVT kolektoru instalován na testovací stolici solárního simulátoru je zobrazen na obr. 3.4.



Obr. 3.3 Výkres prototypu FVT kolektoru využitého pro validaci

Na obr. 3.5 až obr. 3.7 je porovnání tepelné a elektrické účinnosti FVT kolektoru stanovené na základě modelu a experimentálního měření. V grafech je vynesena nejistota stanovení účinnosti, jejíž výpočet je popsán v následující kapitole. Kromě toho je vynesena horní a dolní mez pro vstupní údaje do matematického modelu. Tyto meze berou v potaz nejistotu správnosti vstupních parametrů použitých pro modelování tepelného a elektrického chování FVT kolektoru.



Obr. 3.4 Testovaný prototyp FVT kolektoru

Pro křivky tepelné a elektrické účinnosti stanovené na základě matematického modelu jsou vyneseny meze, které byly stanoveny na základě nejistoty měření vstupních parametrů do matematického modelu. Byly vybrány vstupní parametry, které mají významný vliv na tepelný a elektrický výkon. Některé parametry byly naměřeny, u některých byla převzata hodnota od výrobce. Nejistota měření pro tepelnou vodivost izolace je uvažována okolo 10 %, nejistota optických vlastností zasklení a absorbérů je 2 % (emisivita, propustnost, pohltivost). Nejistota stanovení elektrické účinnosti a nejistota stanovení teplotního výkonového koeficientu je 5 %. Některé vstupní parametry a jejich nejistoty byly převzaty od výrobce, u některých bylo nezbytné hodnotu naměřit a stanovit nejistotu z měření. Nejistota geometrických parametrů nebyla uvažována. Každý z parametrů má rozdílný vliv na křivku tepelné a elektrické účinnosti. Horní mez hodnoty účinnosti z modelu byla stanovena uvažováním krajních hodnot vstupních parametrů, na základě kterých narůstá tepelný výkon případně výkon elektrický. V případě dolní meze byl postup opačný. Dvě simulace o rozdílných vstupních parametrech (emisivita absorbérů, pohltivost absorbérů, tepelná vodivost izolace) určily meze, ve kterých by se měla nacházet naměřená data z experimentálního stanovení účinnosti. V tab. 3.1 a tab. 3.2 a je možno vidět parametry pro jednotlivé meze modelu. Stejný postup byl aplikovaný pro elektrickou účinnost, byly uvažovány změny stejných parametrů až na tepelnou vodivost, která nemá takřka žádný dopad na elektrickou účinnost FVT kolektoru.

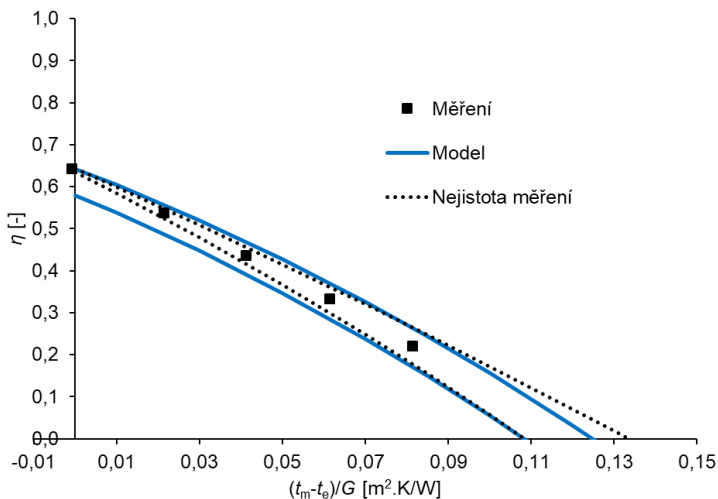
Tab. 3.1 Vybrané vstupní parametry pro meze modelu tepelné účinnosti

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Horní mez	Spodní mez	Zdroj údajů
Propustnost zasklení	τ	0,923	-	0,941	0,905	Naměřeno
Pohltivost FVT absorbérů	α_{abs}	0,81	-	0,826	0,794	Naměřeno
Emisivita FVT absorbérů	$\epsilon_{\text{abs,p}}$	0,30	-	0,294	0,306	Výrobce
Součinitel tepelné vodivosti izolace	λ_{iz}	0,040	W/m.K	0,036	0,044	Výrobce
Teplotní součinitel účinnosti	γ_{ref}	0,0044	%/K	0,0046	0,0042	Výrobce
Referenční elektrická účinnost FVT absorbérů vztahena k ploše FV části (bez krycího zasklení)	η_{ref}	12,9	%	12,0	13,5	Naměřeno

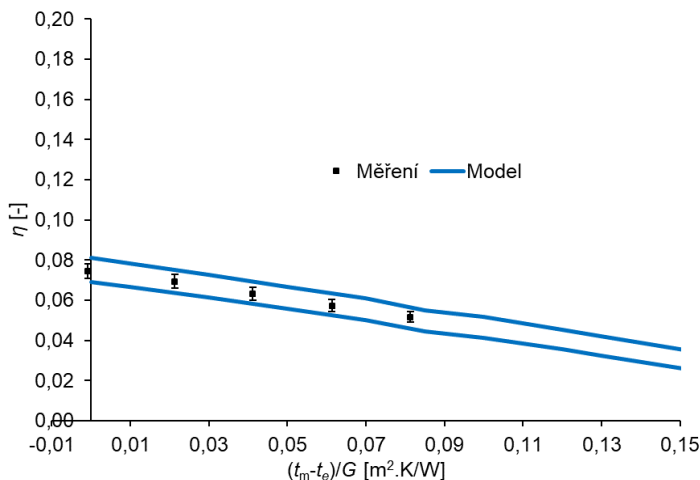
Tab. 3.2 Vybrané vstupní parametry pro meze modelu elektrické účinnosti

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Horní mez	Spodní mez	Zdroj údajů
Propustnost zasklení	τ	0,923	-	0,941	0,905	Naměřeno
Pohltivost FVT absorberu	α_{abs}	0,81	-	0,794	0,826	Naměřeno
Emisivita FVT absorberu	$\varepsilon_{\text{abs,p}}$	0,30	-	0,306	0,294	Výrobce
Teplotní součinitel účinnosti	γ_{ref}	0,0044	%/K	0,0042	0,0046	Výrobce
Referenční elektrická účinnost FVT absorberu vztahena k ploše FV části (bez krycího zasklení)	η_{ref}	12,9	%	13,5	12,0	Naměřeno

Experimentální měření s uzavřeným elektrickým okruhem bylo provedeno se sledovačem maximálního bodu výkonu (MPP) FV části kolektoru, tedy běžný provoz FVT kolektoru při různých vstupních teplotách do kolektoru. Nejednalo se o využití standardizovaného regulátoru pro hledání maxima (MPP tracker). Byla využita proměnlivá elektrická zátěž, díky které bylo možné v každém ustáleném bodě nastavit maximální možný elektrický výkon FVT kolektoru. Na obr. 3.5 a obr. 3.6 jsou naměřené údaje v konfrontaci s údaji teoreticky stanovenými pro tepelnou a elektrickou účinnost FVT kolektoru. Okrajové podmínky pro měření byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 915 W/m², hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 117 kg/h, sklon kolektoru 45°, teplota okolního vzduchu 18,7 °C.



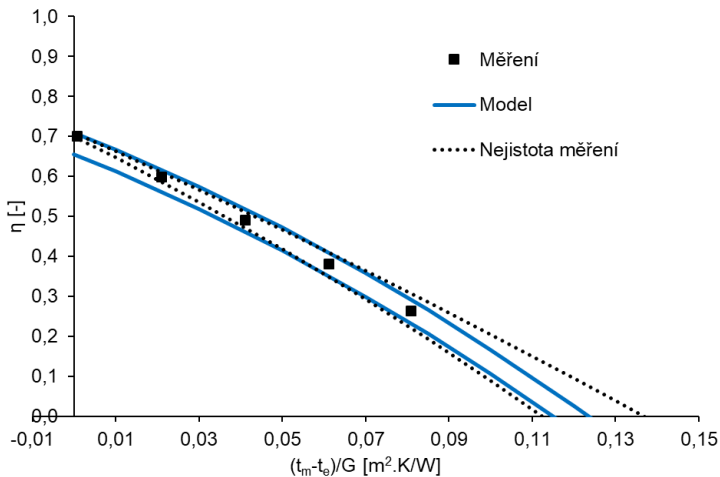
Obr. 3.5 Tepelná charakteristika FVT kolektoru při souběžném odběru elektrické energie



Obr. 3.6 Elektrická účinnost FVT kolektoru při odběru elektrické energie

Přestože FVT kolektor bude v provozu výhradně s odběrem elektrické energie, bylo provedeno i experimentální měření v režimu bez odběru elektrické energie (obr. 3.7), aby bylo možné validovat model pouze z hlediska tepelného chování. Okrajové podmínky experimentálního měření

pro validaci s otevřeným elektrickým okruhem byly: sluneční ozáření na plochu kolektoru 918 W/m^2 , hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 122 kg/h , sklon kolektoru 45° , teplota okolního vzduchu $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Pásmo nejistoty modelu je v tomto případě užší, protože nejsou při modelování kolektoru uvažovány elektrické vlastnosti FV části. Z výsledků validace lze usoudit, že matematický model FVT kolektoru vykazuje dobrou shodu s experimentálním stanovením křivky, všechny naměřené body se nachází v mezích modelu.



Obr. 3.7 Tepelná charakteristika FVT kolektoru v režimu bez odběru elektrické energie

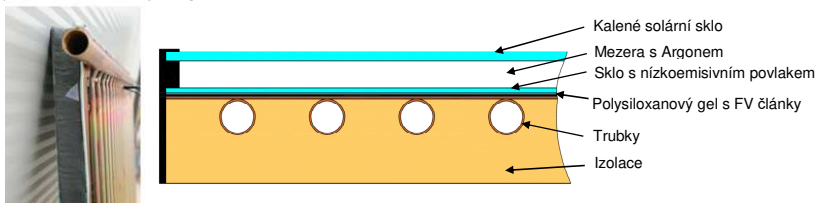
4 KONSTRUKCE FVT KOLEKTORU A JEJÍ OPTIMALIZACE

V následující kapitole bude představen nový koncept zaskleného FVT kolektoru a zvolená metoda pro optimalizaci. Matematický model lze výhodně využít pro analýzu vlivu konstrukčních parametrů ještě nerealizovaného prototypu FVT kolektoru na jeho výkon a účinnost a provést optimalizaci konstrukčního návrhu. Umožňuje analyzovat vliv změn jednotlivých konstrukčních parametrů kolektoru na elektrický a tepelný výkon FVT kolektoru. Jako simulační nástroj byl zvolen TRNSYS (Transient System Simulation Tool) [37], který je v oblasti dynamických simulací energetických systémů s obnovitelnými zdroji energie velmi často využívaný. Z výsledků ročních simulací je možné získat velké množství informací o chování celého

energetického systém. Výsledky mohou sloužit nejen k optimalizaci konstrukce ale k optimalizaci jednotlivých komponent energetického systému či k regulaci energetického systému. V disertační práci je provedeno několik optimalizačních analýz konkrétní konstrukce FVT kolektoru. V tezi disertační práce nejsou popsány jednotlivé provedené optimalizace.

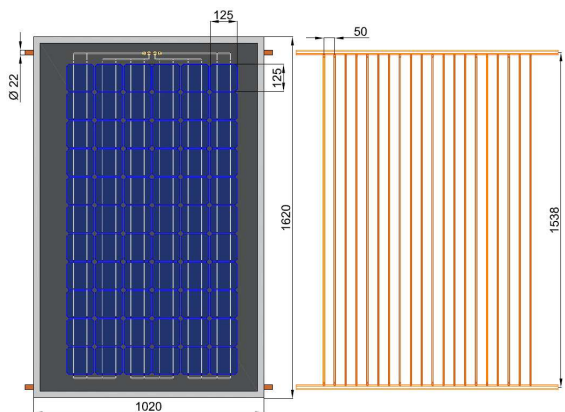
4.1 Koncept zaskleného FVT kolektoru

Na základě optimalizačních analýz bylo zhotoveno několik prototypů FVT kolektorů. FVT kolektory se lišily zejména rozdílnými geometrickými a optickými vlastnostmi FVT absorbéru. V této podkapitole jsou popsány a představeny dva finální prototypy FVT kolektoru, jeden jako samostatné provedení a jeden jako FVT kolektor integrován do fasádního modulu. V rámci výzkumu na UCEEB ČVUT byl chráněn patent na konstrukci solárního kolektoru pro transformaci slunečního záření na teplo a elektrickou energii s poddajným absorbérem [31]. Jedná se o FVT kolektor s dvojitým zasklením, přičemž jedno ze zasklení je umístěno přímo na povrchu absorbéru [61], viz obr. 4.1. Technologie zalévání FV článků polysiloxanovým gelem je výhodně proveditelná právě v konstrukci s dvojitým zasklením. UCEEB ČVUT v současné době vlastní licencované zařízení pro zapouzdření FV článku polysiloxanovým gelem.



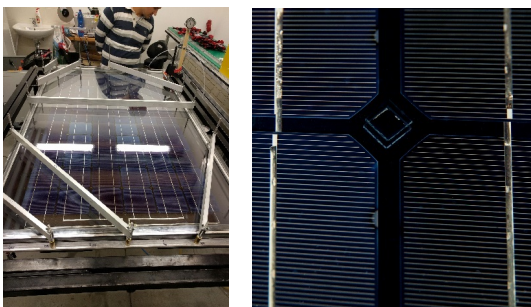
Obr. 4.1 Boční fotografie FVT kolektoru bez rámu a izolace (vlevo), příčný řez prototypem zaskleného FVT kolektoru (vpravo)

FVT kolektoru má rozměry (1,02 x 1,62) m, tedy hrubá plocha kolektoru je 1,65 m², viz obr. 4.2. Pro FV část je instalováno 6 x 11 monokrystalický FV článků o rozměrech (125 x 125) mm. Deklarovaná účinnost FV článků od výrobce je 18,8 %. FV články byly spojeny vodičem do jednoho stringu (řady) pomocí FV stringer. FV články byly poté položeny a v některých místech zafixovány lepidlem na měděný plech, který na sobě měl již aplikován povlak vysoce pohltivý pro sluneční záření. Kromě povlaku měl měděný plech na sobě nalepenou transparentní PVC folii, která byla aplikována za účelem elektrické izolace mezi kovovým plechem a FV články.



Obr. 4.2 Výkres FVT kolektoru

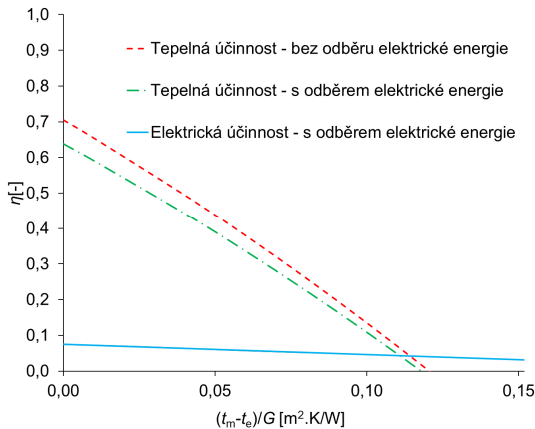
Prefabrikované dvojité zasklení vyplněné argonem bylo následně položeno na FVT absorbér s rozloženými FV články. Mezera mezi dvojitým zasklením a FVT absorbérem je vymezena skleněnými distančními čtverečky, viz obr. 4.3. Takto uchycené spojení dvojitého zasklení a plechu s FV články se následně plnilo polysiloxanovým gelem. Mezi vnitřním sklem a měděným plechem jsou poté stringy FV článků ve vrstvě gelové laminace. V disertační práci se dále objevuje termín FVT absorbér, který představuje spojení spodního skla s gelem a tepelným výměníkem plech-registr. Na vrchní povrch FVT absorbéru je použito zasklení s emisivitou 30 %. Vypočtená pohltivost FVT absorbéru by měla být 86 %. Mezera s argonem mezi krycím zasklením a FVT absorbérem má tloušťku 24 mm. Na zadní část měděného plechu o tloušťce 0,2 mm spojeného s dvojitým zasklením se poté přilepil měděný trubkový registr. Rozteč trubek je 50 mm. Průměr jednotlivých trubek registru je 8 x 1 mm. Úplně na závěr byl FVT kolektor zarámován a zaizolován na zadní straně 40 mm minerální izolací a 10 mm na bočních stranách.



Obr. 4.3 Spojení dvojitého zasklení (vlevo), distanční element mezi zasklením a měděným plechem (vpravo)

Vyrobený FVT kolektor byl následně experimentálně měřen za ustálených podmínek v Solární laboratoři UCEEB ČVUT. Křivky tepelné a elektrické účinnosti otestované ve dvou režimech, bez odběru elektrické energie a s odběrem elektrické energie, jsou zobrazeny na obr. 4.4.

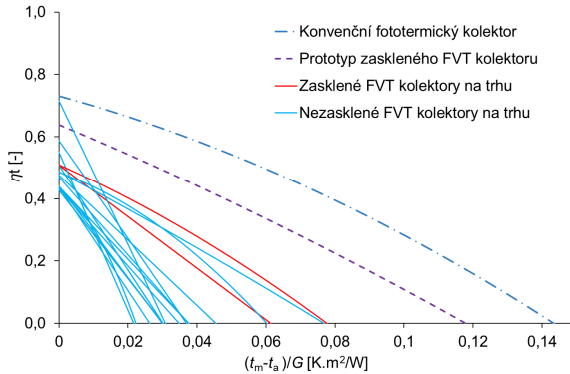
V režimu s odběrem elektrické energie byla stanovena tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách k celkové ploše 64 %. Elektrická účinnost odpovídající bodu při nulových tepelných ztrátách byla stanovena 7,5 %. Tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách v režimu bez odběru elektrické energie byla stanovena 71 %. Okrajové podmínky pro měření v režimu s odběrem elektrické energie byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 915 W/m², hmotnostní průtok teplosné kapaliny kolektorem 117 kg/h, sklon kolektoru 45°, teplota okolního vzduchu 18,7 °C. Okrajové podmínky pro měření bez odběru elektrické energie byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 918 W/m², hmotnostní průtok teplosné kapaliny kolektorem 122 kg/h, sklon kolektoru 45°, teplota okolního vzduchu 18,9 °C.



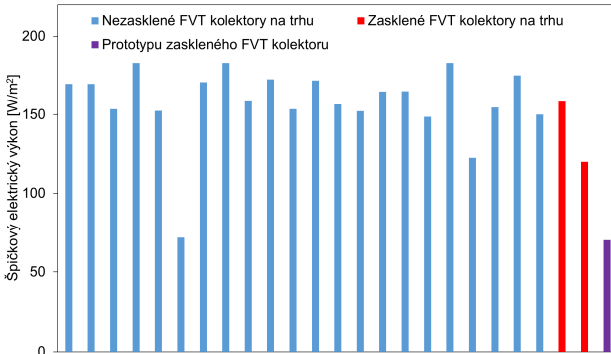
Obr. 4.4 Tepelná a elektrická účinnost FVT kolektoru vztažena k celkové ploše kolektoru

Na obr. 4.5 je zobrazeno porovnání tepelné účinnosti prototypu FVT kolektoru s FVT kolektory na trhu, zároveň je v grafu i tepelná účinnost konvenčního fototermického kolektoru. Lze vidět, že tepelné účinnosti fototermického kolektoru nedosahuje žádný FVT kolektor, protože FVT kolektory část dopadlého záření přemění na elektrickou energii. Přesto prototyp FVT kolektoru vykazuje výrazně vyšší tepelnou účinnost oproti FVT kolektorů na současném trhu zejména pak ve vyšších provozních teplotách a blíží se tepelné účinnosti konvenčnímu fototermickému kolektoru. Pokud se porovná špičkový elektrický výkon oproti FVT kolektorů na trhu (obr. 4.6), tak prototyp FVT kolektoru vykazuje nižší elektrický výkon. Je tomu tak, protože plocha FV článků zaujímá 62 % celkové plochy kolektoru. Zvýšit špičkový

elektrický výkon FVT kolektoru lze docílit změnou rozměrů FVT kolektoru tak, aby FV články mohly plnit co největší plochu z kolektoru.



Obr. 4.5 Porovnání tepelné účinnosti prototypu FVT kolektoru s FVT kolektory na současném trhu



Obr. 4.6 Porovnání špičkového elektrického výkonu prototypu FVT kolektoru s FVT kolektory na současném trhu

Další možností, jak využít FVT kolektor je jeho integrace do obálky budovy (obr. 4.7). V rámci projektu TAČR ve spolupráci s průmyslovým partnerem firmou Skanska, a.s. oblast LOP, byl vytvořen energeticky aktivní lehký obvodový plášť (LOP). Výzkumné aktivity nebyly soustředěny pouze na problematiku FVT kolektorů v obvodovém plášti budovy, ale i na využití optických rastrů pro snížení solárních zisků v letním období a využití pasivních zisků v zimním období [47]. Jeden fasádní element LOP se zaskleným FVT kolektorem má rozměry (3 x 3) m. Celková plocha FVT kolektoru je 1,56 m², plocha apertury 1,4 m². Plocha FV článků je 0,94 m². FV část se skládá z 6 x 10 FV článků o referenční účinnosti udávané výrobcem 18,8 %. Rozměr FV článků byl (125 x 125) mm. FVT kolektor je zaizolován na

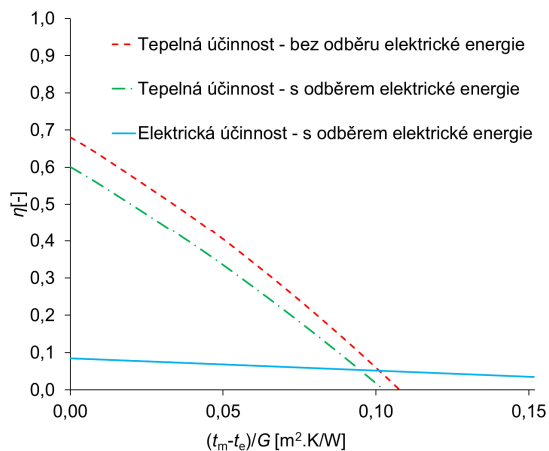
zadní straně minerální vlnou o tloušťce 140 mm. Byly vyrobeny dva prototypy fasádních modulů LOP lišící se aplikací nízkoemisivního povlaku na FVT absorbéru. Jeden prototyp měl vrchní sklo na FVT absorbéru s emisivitou 85 %, ale vysokou propustností pro sluneční záření až 91 % (neselektivní). Druhý prototyp měl vrchní sklo na FVT absorbéru s emisivitou 30 % a propustností pro sluneční záření 85 % (selektivní).



Obr. 4.7 Energeticky aktivní fasádní modul LOP s integrovaným FVT kolektorem (vlevo) a fasádní modul s integrovaným FVT kolektorem umístěným na solárním simulátoru (vpravo)

Prototyp se selektivním povrchem FVT absorbéru byl testován na solárním simulátoru v UCEEB ČVUT opět v režimu s odběrem a bez odběru elektrické energie. Na solárním simulátoru byl testován pouze prototyp bez selektivního povrchu na FVT absorbéru. Selektivní a neselektivní FVT absorbér byl porovnán na dlouhodobém měření v kvazi reálné instalaci. Dva fasádní moduly LOP se selektivním a s neselektivním FVT absorbérem byly testovány za proměnlivých klimatických podmínek po dobu dvou let.

Na obr. 4.8 jsou zobrazeny křivky tepelné a elektrické účinnosti pro fasádní modul LOP s integrovaným FVT kolektorem. Hodnota tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách vztažena k celkové ploše kolektoru v režimu s odběrem elektrické energie byla měřením stanovena 60 %. Elektrická účinnost odpovídající bodu při nulových tepelných ztrátách byla měřením stanovena 8,4 %. Tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách v režimu bez odběru elektrické energie byla měřením stanovena 68 %. Okrajové podmínky pro měření v hybridním režimu byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 924 W/m^2 , hmotnostní průtok teplotonosné kapaliny kolektorem 108 kg/h , sklon kolektoru 90° , teplota okolního vzduchu $18,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Okrajové podmínky pro měření bez odběru elektrické energie byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 931 W/m^2 , hmotnostní průtok teplotonosné kapaliny kolektorem 107 kg/h , sklon kolektoru 90° , teplota okolního vzduchu $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 4.8 Tepelná a elektrická účinnost FVT kolektoru integrovaného do fasádního modulu LOP vztahená k celkové ploše kolektoru

5 APLIKACE FVT KOLEKTORŮ

5.1 Potenciální aplikace pro FVT kolektory

Problematicke aplikací FVT kolektorů se věnuje úkol Mezinárodní Energetické agentury v programu solární vytápění a chlazení Task 60 [25], který je spíše zaměřen na nezasklené FVT kolektory, protože jsou většinově zastoupeny na světovém trhu [48]. Celosvětově jsou aplikace nezasklených FVT kolektorů využity zejména v kombinaci s tepelným čerpadlem případně pro předehřev studené vody. V jižní Evropě existují i aplikace s nezasklenými FVT kolektory i pro přípravu teplé vody. Nezasklené FVT kolektory jsou výhodné zejména pro aplikace, kde je prioritou produkce elektrické energie a současně možnost využití nízkoteplotního tepla [51, 52]. Aplikace zasklených FVT kolektorů jsou zastoupeny v realizovaných instalacích přibližně dvěma procenty z celkové instalované kapacity ve světě [39]. Hlavním důvodem tak malého zastoupení je pravděpodobně problematika teplotní odolnosti FV části kolektoru během stagnace. Pro naznačení potenciálu zasklených FVT kolektorů je v této kapitole analyzována aplikace, v které by se v budoucnu zasklené FVT kolektory mohly objevit. Jedná se o přípravu teplé vody v bytovém dome. Právě solární příprava teplé vody patří mezi nejrozšířenější aplikace solárních termických kolektorů, a tedy velmi rozšířený trh. V budoucnu by zasklený FVT kolektor mohl zaujmout místo po konvenčních tepelných kolektorech, protože bude mít konkurenční výhodu ve formě sekundární produkce elektrické energie.

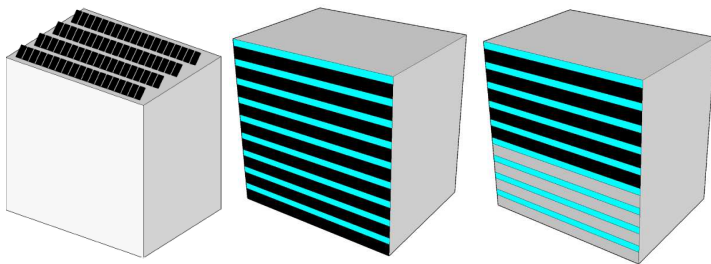
V první části kapitoly bude analyzován energetický přínos FVT kolektorů na základě simulačních analýz pro konkrétní bytový dům. Pro simulační analýzy byl využit matematický model FVT kolektoru implementovaný do simulačního prostředí TRNSYS. V druhé části kapitoly budou představeny dvě experimentální měření na konkrétních aplikacích FVT kolektorů v solární soustavě pro přípravu teplé vody.

5.1.1 Zasklené FVT kolektory pro bytový dům

U aplikace zasklených FVT kolektorů pro přípravu teplé vody v bytovém dome se značně projeví jejich zásadní výhoda, a to současná produkce jak tepla, tak elektrické energie. Maximalizace využití dopadlého slunečního záření se projeví zejména u budov s omezenou plochou střechy a velkou potřebou tepla. Simulační analýza představená v této kapitole se zabývá porovnáním FVT kolektorů instalovaných na střeše a integrovaných FVT kolektorů v jižní fasádě budovy [44, 45]. Kromě toho jsou systémy s FVT kolektory porovnány s konvenčním systémem skládající se s FV panelů a fototermických kolektorů. Fasáda sestavená z fasádních elementů je spíše spojována s kancelářskými budovami. Případová studie však byla provedena pro bytový dům, který je v České republice v hojném zastoupení a má dostatečnou spotřebu tepla pro přípravu teplé vody, což je nezbytný předpoklad pro aplikace se zasklenými FVT kolektory. Bytový dům byl vybrán

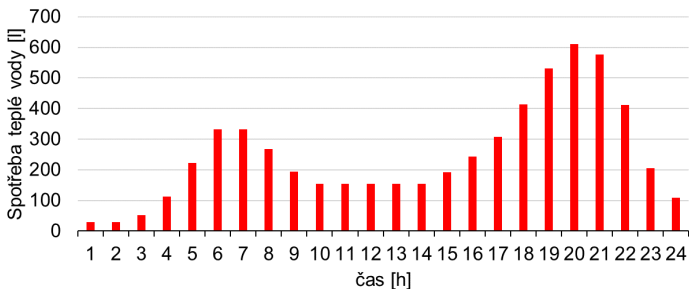
také s ohledem na plánované rekonstrukce bytových domů postavených v 70. letech, kterými budou muset v budoucnu projít.

Byla provedena simulační analýza s matematickým modelem FVT kolektoru implementovaným do simulačního prostředí TRNSYS. Uvažovaný bytový dům má 45 bytů se 100 osobami. Rozměry domu jsou (25 x 19 x 25,2) m. Byly porovnány tři odlišné plochy pro solární systémy s FVT kolektory, viz obr. 5.1. Celková půdorysná plocha domu je 475 m². První alternativa uvažovala střešní instalaci (S). Dostupná plocha pro solární systém byla uvažována jako 35 % celkové plochy střechy, což znamenalo plochu 165 m². Fasádní řešení bylo analyzováno, protože střechy bytových domů mají často velmi omezené prostory. Plocha jižní fasády byla 630 m². Druhá alternativa uvažovala FVT kolektory v každém patře (F9), což znamenalo zastavení 140 m² (22 % z jižní fasády). V třetí alternativě bylo uvažováno využití pouze horních 5 pater s plochou pro solární systém 78 m² (F5), protože často dochází ke stínění spodní pater vzrostlou vegetací. Tyto tři FVT systémy byly následně porovnány s konvenčním solárním systémem stávající se z 50 % fototermických (FT) kolektorů a z 50 % FV panelů.

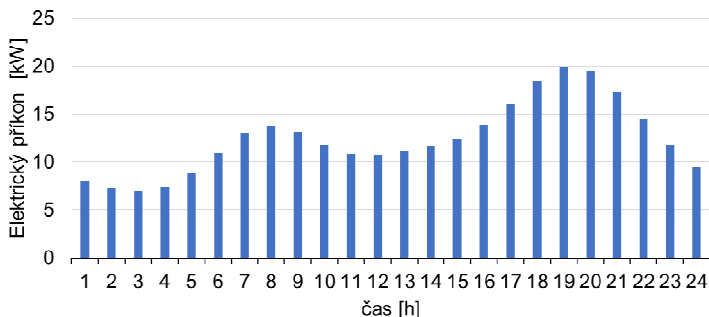


Obr. 5.1 Studované varianty instalace FVT kolektorů, zleva střešní instalace (S), fasádní instalace na 9 pater (F9) a fasádní instalace na 5 pater (F5)

Spotřeba tepla na přípravu teplé vody bez uvažování ztrát cirkulací byla 116 MWh/rok. Profil odběru teplé vody byl rovnoměrně rozdělen do celého dne s uvažováním dvou odběrových špiček v ranních a večerních hodinách, viz obr. 5.2. Požadovaná teplota teplé vody byl uvažována 55 °C. Teplota studené vody byla uvažována po celý rok 10 °C. Spotřeba elektrické energie v bytovém domě byla uvažována 96 MWh/rok. Na obr. 5.3 je zobrazen uvažovaný odběrový profily pro odběr elektrického příkonu v bytovém domě.



Obr. 5.2 Profil odběru teplé vody v bytovém domě

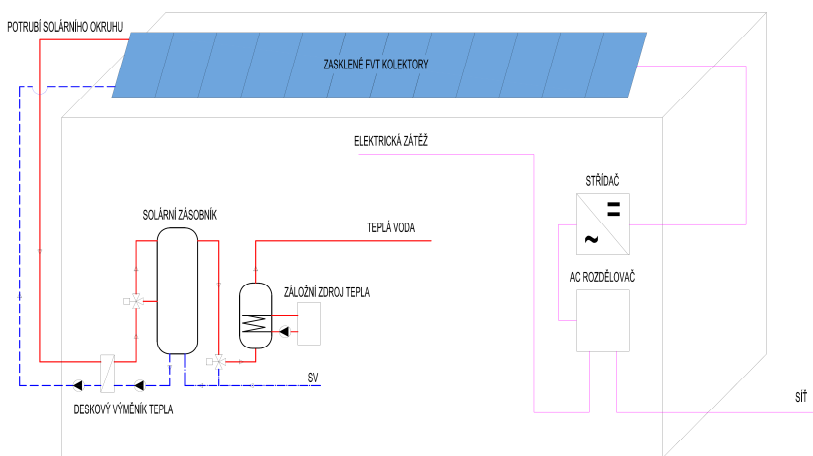


Obr. 5.3 Profil odběru elektrického příkonu v bytovém domě

Schéma solárního systému s FVT kolektory je na obr. 4.4. Simulační analýza byla provedena pro tři různé klimatické podmínky s rozdílnými úhrny dopadlého slunečního záření za rok: Madrid (1864 kWh/m².rok), Praha (1115 kWh/m².rok) a Helsinky (1153 kWh/m².rok). Každý systém měl jinak dimenzované potrubí a izolaci potrubí případně objem solárního zásobníku, viz tab. 5.1. Solární termický systém a FVT systém instalovaný na střechu měl uvažovaný sklon instalace 45°. V případě fasádní instalace byl uvažován sklon 90°. Pro instalaci na střechu odděleného konvenčního řešení byl uvažován sklon FV panelů 30°. Kromě toho byla uvažována orientace na jih. Délka izolované potrubí ve vnitřní části budovy byla 80 m a ve vnější také 80 m. Termická část systému byla dimenzována s ohledem na specifický průtok kolektorovým polem 15 kg/h.m². FV systém byl uvažován běžný grid-on s měničem napětí DC/AC. Elektrické ztráty byly uvažovány 10 %. Produkce z FV části je primárně spotřebována v bytovém domě.

Tab. 5.1 Parametry základních komponent solárního systému

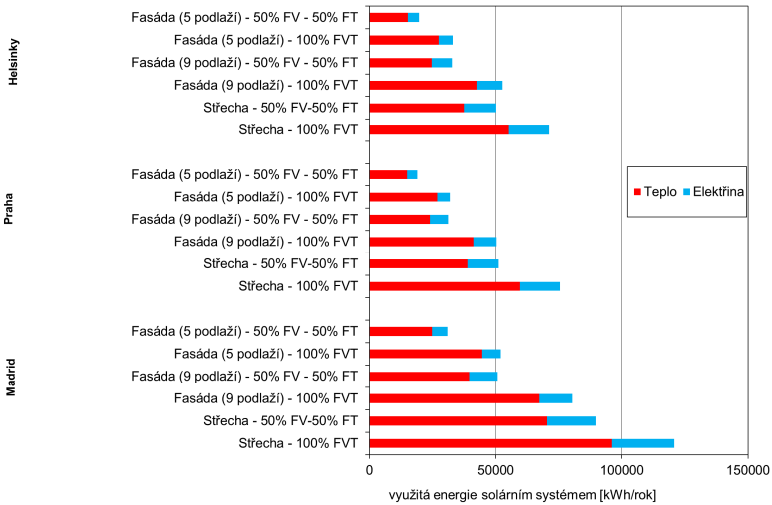
Alternativa	Plocha solárního systému	Objem solárního zásobníku	Dimenze kolektorové ho potrubí	Tloušťka izolace kolektorové ho potrubí
	m ²	m ³	mm	mm
S - FVT	165	8,3	35 × 1,5	25
S – 50FV50FT	82,5	4,1	28 × 1,5	25
F9 – FVT	140	7	35 × 1,5	25
F9 - 50FV50FT	70	3,5	28 × 1,5	25
F5 - FVT	78	3,9	28 × 1,5	25
F5 - 50FV50FT	39	1,9	22 × 1,5	19



Obr. 5.4 Schéma studovaného solárního systému

V obr. 5.5 jsou zobrazeny výsledky simulační analýzy pro tři lokality, konkrétně se jedná o využitou tepelnou a elektrickou energii v bytovém domě. Jsou zde vidět konvenční varianty solárních tepelných kolektorů a FV panelů ve srovnání s FVT kolektory. S ohledem na roční úhrny dopadlého slunečního záření pro jednotlivé lokality, lze vidět, že i v nejižnější položeném Madridu podle očekávání odpovídá nejvyšší množství vyrobené energie solárním systémem. Přestože v severní Evropě je jsou nižší teploty vzduchu, využitá energie v bytovém domě je srovnatelná jako ve střední Evropě. Rozhodujícím faktorem je roční úhrn dopadlého slunečního záření. Měrný tepelný zisk FVT systému se pro tři lokace pohybuje v rozmezí 352 až 582 kWh/m². Měrný

elektrický zisk FVT systému pro tři lokace se pohybuje v rozmezí 63 and 149 kWh/m².



Obr. 5.5 Výsledky simulační analýzy pro bytový dům

Ve všech variantách byla produkce tepla a elektrické energie vyšší u solárního systému s FVT kolektory. V tab. 5.2 je pro každou variantu uvedena hodnota nárůstu produkce energie díky využití FVT kolektorů oproti konvenčnímu řešení. Nárůst produkce tepelné energie se pohybuje od 37 % do 53 % pro střešní instalaci, pro fasádu 71 % až 81 %. Nárůst produkce elektrické energie se pohybuje v rozmezí 19 % až 32 %. Kromě toho je v tabulce solární pokrytí spotřeby teplé vody a solární pokrytí spotřeby uživatelské elektrické energie v bytovém domě. Hodnota solárního pokrytí tepelné energie je maximální pro Madrid, kde dosahuje dokonce 83 %. V klimatických podmínkách České republiky se hodnota pokrytí pohybuje od 21 do 39 %. Solární pokrytí spotřeby elektrické energie se pohybuje v rozmezí 5 až 26 %. Veškerá vyprodukovaná elektrická energie byla spotřebována přímo v místě. Výsledky poukázaly na velký potenciál maximalizace využití dopadlého slunečního záření FVT kolektory a tím navýšení solárního pokrytí.

Tab. 5.2 Výsledky simulační analýzy pro bytový dům

Locace	Alternativa	Nárůst využitě tepelné energie díky hybridnímu řešení	Nárůst využitě elektrické energie díky hybridnímu řešení	Solární pokrytí spotřeby TV	Solární pokrytí spotřeby el. energie
Madrid	Střecha	37 %	27 %	83 %	26 %
	Fasáda 9 podlaží	70 %	19 %	61 %	14 %
	Fasáda 5 podlaží	79 %	22 %	58 %	8 %
Praha	Střecha	53 %	32 %	34 %	17 %
	Fasáda 9 podlaží	72 %	21 %	39 %	9 %
	Fasáda 5 podlaží	81 %	23 %	21 %	5 %
Helsinky	Střecha	47 %	28 %	52 %	17 %
	Fasáda 9 podlaží	72 %	23 %	34 %	10 %
	Fasáda 5 podlaží	81 %	25 %	36 %	6 %

V rámci disertační práce byly publikovány 4 publikace zabývající se problematikou solárního systému s FVT kolektory pro bytový dům [44, 45, 59, 61]. Společným jmenovatelem všech těchto publikací je energetická výhodnost FVT kolektorů oproti konvenčnímu solárnímu systému zastoupeném FV panely tepelnými kolektory. V analýze provedené v [112] zaměřené také na bytový dům byly porovnány i alternativy včetně nezasklených FVT kolektorů a jiných poměrů konvenčních systémů s výsledkem, že nejvyšší energetický přínos lze očekávat od FVT systému se zasklenými FVT kolektory.

5.2 Experimentální měření na konkrétních aplikacích

V současné literatuře není publikováno příliš prací zabývajících se experimentálním měření zasklených FVT kolektorů. Práce jsou zejména zaměřeny na experimentální měření nezasklených FVT kolektorů v kombinaci s tepelným čerpadlem [2, 3] či pro přehřev teplé vody [34]. Přesto existují měření, kde byly kratší dobu testovány i zasklené FVT kolektory [18]. Bohužel v tomto případě nebyly publikované žádné výsledky týkající se teplotní odolnosti v období stagnace FVT kolektorů, což je pro FVT kolektor rozhodující z hlediska dlouhodobého použití. Publikované výsledky byly uváděny pouze pro velmi krátké období.

5.2.1 Solární soustava pro přípravu teplé vody s FVT kolektory

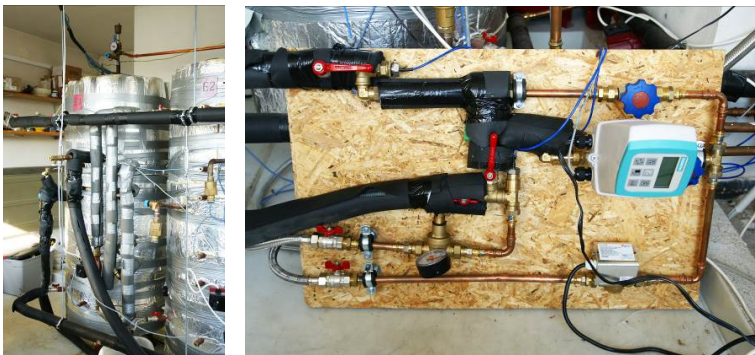
Pro monitoring FVT kolektorů v aplikaci přibližující se instalaci v rodinném domě byl vytvořen funkční vzorek solární soustavy pro přípravu teplé vody [62]. Účelem instalace testovací trati je zkoušení prototypů FVT

kolektorů za proměnlivých klimatických podmínek a vyhodnocení jejich potenciálního přínosu pro domácnost ve srovnání s konvenčním provedením solární soustavy. Testovací trať byla využita i pro validaci dynamického matematického modelu FVT kolektoru. Dva FVT kolektory instalované na střeše Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze (obr. 5.6) produkují jak tepelnou energii, která se ukládá v zásobníku teplé vody, tak elektrickou energii, kterou se nabíjí dvě baterie. Elektrická energie je po nabití baterií následně mařena žárovkou, jako elektrickou zátěží. Vnitřním okruhem, který propojuje zásobník teplé vody a řád (obr. 5.7), je emulován odběr teplé vody v domácnosti. Teplá voda je následně vypuštěna do odpadu. Elektromagnetický ventil instalovaný na vnitřním okruhu otevírá okruh pro přípravu teplé vody podle zvoleného odběrového profilu. Jsou zde instalována teplotní čidla a indukční průtokoměry, díky kterým je možno vyhodnotit celkový tepelný přínos solární soustavy s FVT kolektory. Technický popis a schéma zapojení je popsáno v disertační práci.

Hlavním účelem instalace bylo otestovat neselektivní FVT kolektory (celková plocha 3,42 m²) za reálných podmínek. Je uvažován zásobník tepla o objemu 400 l, ve kterém jsou instalovány dva trubkové výměníky propojené v sérii (obr. 3.17). Celý objem zásobníku slouží jako akumulace ohřáté vody z FVT kolektorů, FVT kolektory jsou tedy propojené se zásobníkem napřímo, což v praxi není zvykem. Nicméně pro účely testování FVT kolektorů za reálných podmínek je to dostačující. FVT kolektory jsou instalovány na kovové konstrukci s orientací na jih. Sklon FVT kolektorů je 45°. Průtok teplotnosné kapaliny (vody) solární soustavou je 180 l/h. Solární tepelná soustava je ovládána konvenčním centrálním regulátorem. 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 k faktu, že teplota za termostatickým směšovacím ventilem v monitorovaném období nepřesáhla teplotu 50 °C, byl tepelný zisk FVT kolektorů stanoven na základě tepla dodaného za směšovacím ventilem.



Obr. 5.6 Dva zasklené neselektivní FVT kolektory zapojené v sérii



Obr. 5.7 Zapojení pro emulaci odběru teplé vody

V tab. 5.3 jsou uvedena vyhodnocená data z 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 ($Q_{p,TV}$) a reálně odebrané energie (Q_{ss}) bylo možné stanovit solární pokrytí. Hodnoty solárního pokrytí jsou v rozmezí 36 až 60 %. Hodnota průměrné denní tepelné účinnosti během měřených dnů se pohybovala v rozmezí 30 až 37 %, elektrická účinnost se pohybovala v rozmezí 6,9 až 7,4 %. Obě účinnosti jsou vztaženy k celkové ploše 3,42 m².

Tab. 5.3 Naměřená data na solární soustavě s FVT kolektory pro přípravu teplé vody

Datum	Q_s	Q_e	Q_t	$Q_{p,TV}$	Q_{ss}	f
	kWh/den	kWh/den	kWh/den	kWh/den	kWh/den	%
19. 5. 2016	17,4	1,2	5,8	7	2,5	36
20. 5. 2016	16,6	1,2	5,0		2,9	41
21. 5. 2016	19,3	1,4	6,5		3,3	50
22. 5. 2016	24,3	1,8	9,1		4,1	59
23. 5. 2016	16,7	1,2	5,8		4,2	60

5.2.2 Soustava s FVT kolektory integrovanými do fasády budovy

Dlouhodobé chování zasklených FVT kolektorů integrovaných do fasády (modul LOP) bylo zkoumáno na konkrétní instalaci. V rámci výzkumného projektu TAČR TA04021195 (Energeticky aktivní lehký obvodový plášť) byl vyvinut selektivní a neselektivní FVT kolektor. Za účelem testování energeticky aktivních fasádních modulů byla postavena

experimentální buňka na UCEEB ČVUT, která byla vykázána jako funkční vzorek [53]. Vývoj a výzkum energeticky-aktivního fasádního modulu byl záměr společného projektu UCEEB ČVUT a průmyslového partnera Skanska, a. s., v letech 2015 až 2017. Byl vyvinut fasádní modul s integrovaným FVT kolektorem a se selektivně odraznými optickými rastry v horní části modulu pro snížení tepelné zátěže prostoru v budově. Zasklený FVT kolektor je umístěn v parapetní části fasádního elementu s navrženými rozměry 3,0 x 3,0 m. Celková plocha jednoho FVT kolektoru je 1,55 m². Celková plocha samotných FV článků je 0,94 m². Více je popsáno v kapitole 4.1.

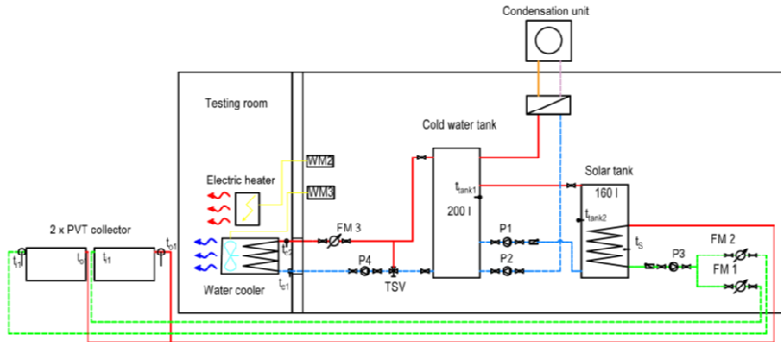
Aby bylo možné fasádní moduly dlouhodobě monitorovat za venkovních podmínek, byla vytvořena testovací buňka (obr. 5.8), která byla rozdělena na dvě části: na testovací prostor, ve kterém se udržuje požadovaná teplota a technologickou místnost, ve které je technické zázemí. Na základě dlouhodobého monitoringu fasádního modulu se vyhodnocoval nejen přínos FVT kolektorů, ale i přínos selektivně odrazivých rastrů [47]. Na buňku byly instalovány dva fasádní moduly. Hlavní rozdíl mezi moduly bylo použité zasklení na povrchu FVT absorberu. První neselektivní absorber, měl použité standardní solární kalené sklo o propustnosti 92 % a emisivitě 85 %. Druhý neselektivní absorber, využil dříve zmíněné zasklení Euroglas s nízkoemisivním povlakem s deklarovanou propustností 85 % a emisivitou 30 %. Kromě samotného dlouhodobého ověření konceptu bylo cílem měření porovnat z energetického hlediska dva odlišné FVT absorberů [49].



Obr. 5.8 Experimentální buňka pro testování energeticky aktivních fasád

V technologické místnosti experimentální buňky se nachází zásobník chladu, který je vychlazován kondenzační klimatizační jednotkou na střeše objektu (obr. 5.9). Zásobník chladu slouží k akumulaci chladu pro chlazení prostoru v letním období a zároveň pro maření vyprodukované tepelné energie z FVT kolektorů během nočních hodin. FVT kolektory jsou tepelně napojeny na solární zásobník o objemu 160 l. V obr. 5.9 jsou naznačena i

čidla měření, která musela být instalována za účelem vyhodnocení energetického přínosu FVT kolektorů. Měřili se teploty teplotnosné kapaliny na vstupu a výstupu z FVT kolektoru, průtok teplotnosné kapaliny každým kolektorem zvlášť, dopadlé sluneční záření na jižní fasádu buňky. Pro odběr produkce elektřiny slouží dva střídače, které jsou připojeny přímo na elektrickou síť, kde je energie využita v rámci výzkumného centra. Původně byla elektrická energie akumulovaná v bateriích následně mařena tepelným odporem, tento přístup byl však nespolehlivý z hlediska regulace, proto se následně mařila elektrická energie přímo v elektrické síti výzkumného centra.



Obr. 5.9 Schéma zapojení v experimentální buňce

Solární systém s FVT kolektory byl v provozu přes dva roky, vyhodnocení bylo provedeno pro tři vybrané měsíce za toto období. Tři měsíce byly vybrány z důvodu častých změn v měření zejména elektrického výkonu FVT kolektorů. Nebylo tedy možné vyhodnotit celý rok najednou. Kromě toho v určitých obdobích byly zaznamenány výpadky elektrické energie pro měřicí zařízení, měsíce s výpadkem nebylo možné tedy také vyhodnotit. Naměřená data pro selektivní a neselektivní FVT kolektor jsou uvedena v tab. 5.4. V tab. 5.5 je uveden nárůst produkce tepelné energie pro jednotlivé měsíce, který odpovídá očekávání. Zároveň je zde uveden pokles produkce elektrické energie vlivem selektivního povlaku. Pokles produkce elektrické energie selektivního FVT kolektoru je větší, než byl očekáván. Jedním z možných důvodů většího poklesu elektrického výkonu může být nalomení FV článků během výroby FVT kolektoru či vyšší elektrické ztráty na kontaktech FV článků. Kromě již zmíněného mohl být elektrický výkon ovlivněn rozdílnou výrobní kvalitou sledovače maximálního bodu výkonu. Měsíční průměrná tepelná účinnost se pohybuje v rozsahu od 35 do 50 %. Měsíční průměrná elektrická účinnost se pohybuje od 5,7 do 7,9 %, viz tab. 5.6. Obě účinnosti jsou vztaženy k celkové ploše kolektoru. Přičemž FV část se podílí na 60 % celkové plochy FVT kolektorů.

Tab. 5.4 Naměřený tepelný a elektrický zisk (plocha kolektoru 1,56 m²)

Měsíc	Q_s úhrn dopadlého slunečního záření	Q_t selektivní absorbér	Q_e selektivní absorbér	Q_t neselektivní absorbér	Q_e neselektivní absorbér
	kWh/měsíc	kWh/měsíc	kWh/měsíc	kWh/měsíc	kWh/měsíc
Červenec 2018	170	94,6	9,9	85,9	11,9
Červenec 2019	138	50,7	6,1	47,6	7,2
Leden 2019	32,6	18,2	2,9	15,0	4,0

Tab. 5.5 Rozdíl mezi selektivním a neselektivním absorbérem v produkci tepelné a elektrické energie

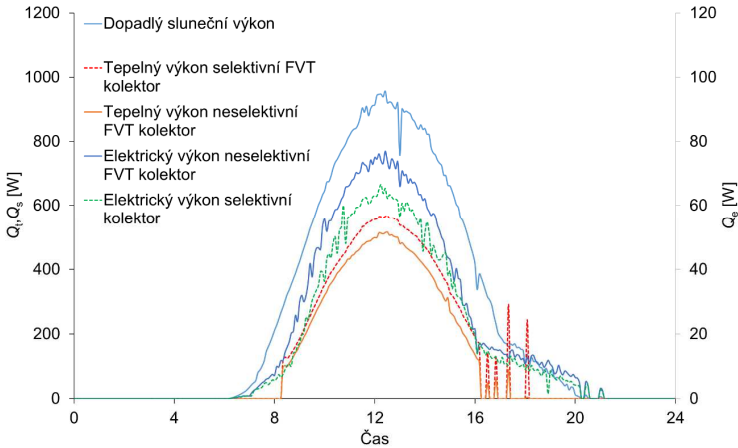
Měsíc	Nárůst produkce tepelné energie vlivem selektivního povlaku	Pokles produkce elektrické energie vlivem selektivního povlaku
Červenec 2018	10,1 %	-16,8 %
Červenec 2019	6,5 %	-15,3 %
Leden 2019	21,3 %	-27,5 %

Tab. 5.6 Průměrné měsíční účinnosti selektivního a neselektivního FVT kolektoru

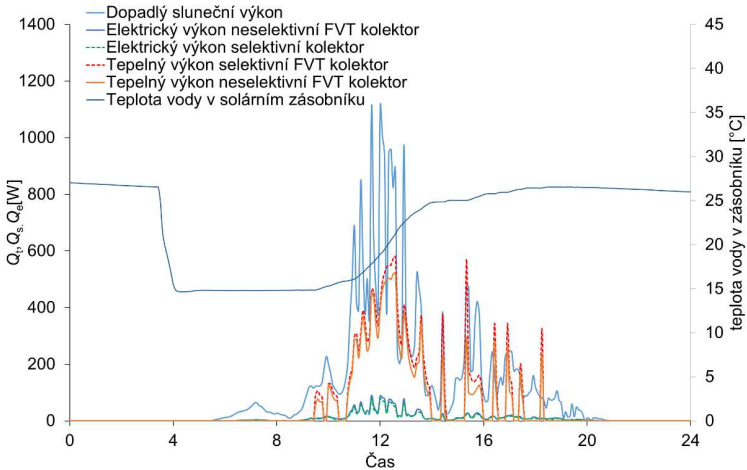
Měsíc	η_t selektivní	η_e selektivní	η_t neselektivní	η_e neselektivní
Červenec 2018	55,6 %	5,8 %	50,5 %	7,0 %
Červenec 2019	50,5 %	6,1 %	47,4 %	7,2 %
Leden 2019	35,8 %	5,7 %	29,5 %	7,9 %

Na obr. 5.10 je průběh tepelného a elektrického výkonu pro selektivní a neselektivní FVT kolektor. Z průběhu je patrné, že selektivní FVT kolektor vykazuje vyšší tepelný výkon vlivem snížení ztrát sáláním a nižší elektrický výkon vlivem nižší propustnosti slunečního záření skla s povlakem. Na obr. 5.11 je průběh tepelného a elektrického výkonu pro oblačný den. Z průběhu

Ize vidět časté spínání oběhového čerpadla, které způsobuje výkonové špičky FVT kolektoru. Dále je v grafu zobrazena teplota v solárním zásobníku během dne. Každou noc okolo půl čtvrté hodiny byl solární zásobník vybit.



Obr. 5.10 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne (4. 7.2019)



Obr. 5.11 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne, dále průběh teploty vody v zásobníku (14. 7. 2019)

ZÁVĚR

V rámci disertační práce byl vytvořen detailní stacionární model zaskleného FVT kolektoru, který vycházel z vnější a vnitřní energetické bilance FVT absorberu. Stacionární model FVT kolektoru byl později rozšířen o dynamický člen. Jak dynamický, tak stacionární model zaskleného FVT kolektoru byl vytvořen programovacím jazyce C++. Oba modely byly implementovány do simulačního prostředí TRNSYS jako dvě nové komponenty typu 223 a typu 224 a vykázány jako autorizovaný software [50, 60]. Stacionární model byl validován za ustálených podmínek v Solární laboratoři UCEEB ČVUT, dynamický model byl validován za reálných klimatických podmínek na střeše Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Bylo provedeno porovnání stacionárního a dynamického modelu za reálných klimatických podmínek [54, 56]. Ze srovnání dynamického a stacionárního modelu vyplývá významně lepší shoda energetických bilancí mezi experimentem a dynamickým modelem v době proměnlivých klimatických podmínek. V případě jasného dne je odchylka mezi dynamickým a stacionárním modelem v denních ziscích zanedbatelná. Uvažovat tepelnou setrvačnost u FVT kolektorů je zapotřebí zvláště v případě vyšší hodnoty účinné tepelné kapacity kolektoru. V případě simulací solárních tepelných soustav s FVT kolektory s delším časovým krokem (10 min a více) se neprojeví ranní a večerní cyklování oběhového čerpadla, proto lze tedy pro výpočet využít stacionární model. Simulace se stacionárním modelem je obecně rychlejší a pro zjednodušené simulační analýzy jsou výsledky dostačující.

Validovaný matematický model byl využit pro optimalizaci konstrukce zaskleného FVT kolektoru na základě celoročních simulačních analýz v simulačním prostředí TRNSYS [57, 58, 64]. Simulační analýzy byly zaměřeny na: tloušťku zadní izolace, geometrii a materiál výměníku tepla, tloušťku vzduchové mezery v zasklení a typ plynu v této mezeře, aplikaci nízkoemisivního povlaku na povrch FVT absorberu a typ zapouzdřovacího materiálu pro FV články. Jedním z podstatných poznatků z optimalizační analýzy je význam nízkoemisivního povlaku pro zasklené FVT kolektory. Nízkoemisivní povlak na povrchu FVT absorberu zaručí nárůst produkce tepelné energie FVT kolektor až o 10 % a současně pokles produkce elektrické energie o 2 % [57]. Dále bylo potvrzeno, že typ zapouzdřovacího materiálu pro FV články neovlivňuje významně tepelný výkon FVT kolektoru. Výstupem optimalizační analýzy byl prototyp zaskleného FVT kolektoru využívající nové technologie zalévání FV článku do polysiloxanového gelu [61]. Bylo vytvořeno několik prototypů zasklených FVT kolektorů, které byly experimentálně naměřeny [55]. Na základě experimentálního měření byly stanoveny křivky tepelné a elektrické účinnosti. V režimu s odběrem elektrické energie byla stanovena tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách vztažena k celkové ploše 64 %. Elektrická účinnost odpovídající bodu při nulových tepelných ztrátách byla stanovena 7,5 %.

Další možností, jak využít FVT kolektor, je jeho integrace do obálky budovy [47]. V rámci projektu TAČR ve spolupráci s průmyslovým partnerem

firmou Skanska, a.s. oblast LOP byl vytvořen energeticky aktivní lehký obvodový plášť (LOP). Výzkumné aktivity nebyly soustředěny pouze na problematiku FVT kolektorů v obvodovém plášti budovy, ale i na využití optických rastrů pro snížení solárních zisků v letním období a využití pasivních zisků v zimním období. Měřením stanovená hodnota tepelné účinnosti integrovaného neselektivního FVT kolektoru do obálky budovy při nulových tepelných ztrátách vztažena k celkové ploše FVT kolektoru v režimu s odběrem elektrické energie byla 60 %. Elektrická účinnost odpovídající bodu při nulových tepelných ztrátách byla měřením stanovena 8,4 %.

Pro monitoring FVT kolektorů v aplikaci přibližující se instalaci v rodinném domě byl vytvořen funkční vzorek solární soustavy pro přípravu teplé vody [62]. Účelem realizace testovací trati bylo experimentální měření prototypů FVT kolektorů za proměnlivých klimatických podmínek a vyhodnocení jejich potenciálního přínosu pro domácnost. Testovací trať byla vytvořena na střeše Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Kromě zhodnocení energetického přínosu byla využita i pro validaci dynamického matematického modelu FVT kolektoru. Hodnoty solárního pokrytí byly v rozmezí 36 až 60 %. Hodnota průměrné denní tepelné účinnosti během měřených dnů se pohybovala v rozmezí 30 až 37 %, elektrická účinnost se pohybovala v rozmezí 6,9 až 7,4 %. Druhá měřená aplikace byla zaměřena na dlouhodobé vyhodnocení energetického přínosu integrovaného FVT kolektoru do fasádního modulu. Výsledky z měření aplikace byly uvedeny i v reportu mapující instalace FVT kolektorů ve světě [46], který byl z jedním z posledních výstupů mezinárodního projektu IEA SHC Task 60 [25]. Aplikace s integrovaným FVT kolektorem do obálky budovy byla měřena po dobu dvou let na UCEEB ČVUT. Pro vybrané měsíce byla stanovena měsíční průměrná tepelná účinnost v rozsahu od 35 do 50 %. Měsíční průměrná elektrická účinnost se pohybovala od 5,7 do 7,9 %. V rámci měření byl porovnán selektivní a neselektivní povlak na povrchu FVT absorberu. Vlivem selektivního povlaku byl sledován významný nárůst produkce tepelné energie a současně nepatrný pokles produkce elektrické energie [49]. Pokles produkce elektrické energie vlivem selektivního povlaku byl vyšší, než bylo očekáváno.

Pro naznačení potenciálu zasklených FVT kolektorů byly analyzovány dvě cílové aplikace, ve kterých by se v budoucnosti zasklené FVT kolektory měly objevit. U obou aplikací se jedná o přípravu teplé vody, v jednom případě v rodinném domě [57, 58], v druhém případě v bytovém domě [44, 45, 59, 61]. Právě solární příprava teplé vody patří mezi nejrozšířenější aplikace solárních termických kolektorů, a tedy velmi rozšířený trh. V budoucnu by zasklený FVT kolektor mohl zaujmout místo po konvenčních tepelných kolektorech, protože bude mít srovnatelný tepelný výkon a konkurenční výhodu ve formě sekundární produkce elektrické energie až 95 kWh/m².rok. Byly stanoveny očekávatelné tepelné elektrické zisky pro jednotlivé aplikace. Byly provedeny simulační analýzy pro přípravu teplé vody v bytovém a rodinném domě pro odlišné Evropské klimatické podmínky. Pro konkrétní bytový dům bylo provedeno porovnání mezi instalací FVT systému na střechu a na jižní fasádu domu. Tyto dvě různé instalace pak byly porovnány s konvenčním solárním systémem skládajícím se z 50 % z FV panelů a z 50 %

z FT kolektorů. Měrný tepelný zisk FVT systému v bytovém domě se pro tři lokace pohybuje v rozmezí 352 až 582 kWh/m². Měrný elektrický zisk FVT systému pro tři lokace se pohybuje v rozmezí 63 až 149 kWh/m². Nárůst produkce tepelné energie FVT systému oproti konvenčnímu systému se pohybuje od 37 % do 53 % pro střešní instalaci (záleží na lokalitě), pro fasádu 71 % až 81 %. Nárůst produkce elektrické energie FVT systému se pohybuje v rozmezí 19 % až 32 %.

6 DŮSLEDKY PRO VĚDU A PRAXI

6.1 Přínos pro praxi

Jako přínos pro praxi lze považovat nový koncept zaskleného FVT kolektoru, který je schopen generovat jak tepelnou, tak elektrickou energii. Zasklené FVT kolektory mají konstrukční omezení z hlediska maximální provozní teploty. Pokud je překročena maximální provozní teplota, dojde k termickému rozkladu EVA materiálu, ve kterém jsou zapouzdřeny FV články. V současné vědecké literatuře je popsána řada technických řešení, jak zamezit přehřívání zaskleného FVT kolektoru a tím degradaci FV části. Doposud popsaná opatření proti zamezení přehřívání FVT kolektoru vedou k velmi komplikovanému provedení s navýšením počtu konstrukčních či ovládacích prvků nebo k výraznému navýšení ceny FVT kolektoru. Jako slibné technické řešení se nabízí právě využití teplotně odolného polysiloxanového gelu pro zapouzdření FV článků místo konvenčního zapouzdření do EVA materiálu. V disertační práci je představen koncept zaskleného FVT kolektoru využívajícího polysiloxanového gelu pro zapouzdření FV článků, který byl detailně optimalizován z hlediska produkce tepelné a elektrické energie. Cena a technické provedení FVT kolektoru s polysiloxanovým gelem by mělo být v budoucnu konkurenceschopné oproti současným technologiím dostupným na trhu.

Dalším přínosem pro praxi je energetické zhodnocení potenciálních aplikací, kde lze zasklený FVT kolektor nasadit. V rámci disertační práce byly provedeny simulační analýzy solární soustavy pro přípravu teplé vody v bytovém domě, kde byly uvažovány FVT kolektory buď na střeše nebo integrované v jižní fasádě. Nárůst produkce tepelné energie FVT systému oproti konvenčními solárnímu systému (50 % FV panely a 50 % FT kolektory) se pohybuje od 37 % do 53 % pro střešní instalaci, pro fasádu 71 % až 81 % pro tři Evropské lokality (Madrid, Praha, Helsinky). Nárůst produkce elektrické energie se pohybuje v rozmezí 19 % až 32 %.

Jednoznačný přínos pro praxi je i dlouhodobý monitoring aplikace se zasklenými FVT kolektory a tím ověření spolehlivosti konceptu. Dosud ve vědecké literatuře nebylo popsáno dlouhodobé experimentální měření zasklených FVT kolektorů ukazující teplotní odolnosti v období stagnace FVT kolektorů, což je pro FVT kolektor rozhodující z hlediska dlouhodobého použití.

6.2 Teoretický přínos

Jako teoretický přínos lze disertační práci přisoudit nový validovaný stacionární a dynamický matematický model zaskleného kapalinového FVT kolektoru. Zejména rozšíření detailního stacionárního modelu zaskleného FVT kolektoru o experimentálně stanovenou tepelnou kapacitu FVT kolektoru dosud nebylo ve vědecké literatuře publikováno. Jedná se o kombinaci detailního analytického a parametrického modelu zaskleného FVT kolektoru. Detailní část modelu bere v úvahu vstupní parametry jako jsou geometrické, optické a tepelné vlastnosti FVT kolektoru, parametrická část modelu bere v

úvahu tepelnou kapacitu FVT kolektoru. Dynamický model byl následně schopen zohlednit ranní a večerní spínání solární tepelné soustavy či náhlé změny teploty teplotnosné kapaliny na vstupu do FVT kolektoru během dne. Jak stacionární, tak dynamický model je výhodný pro optimalizační analýzy konstrukce zaskleného FVT kolektoru, oba modely jsou vhodné zejména pro vývojovou činnost v počátcích vývoje FVT kolektoru. Matematický model umožňuje sledovat vliv jednotlivých konstrukčních prvků na elektrický a tepelný výkon FVT kolektoru.

V současné době žádný simulační software, kde lze simulovat provoz energetických systémů s obnovitelnými zdroji energie, nemá součástí knihovny implementovaný validovaný model zaskleného FVT kolektoru. V rámci disertační práce byl jak stacionární, tak dynamický model implementován do simulačního prostředí TRNSYS. Matematický model je tedy možno využít vědeckou veřejnosti například pro vývoj nových potenciálních aplikací pro zasklené FVT kolektory. Stacionární model je výhodný pro zjednodušené optimalizační analýzy s delším časovým krokem. Naproti tomu dynamický model FVT kolektoru je výhodný zejména pro simulační analýzy s krátkým časovým krokem a s nárokem na vyšší míru spolehlivosti energetického výpočtu.

6 Návrhy pro další směřování práce

- Další možný směr by mohl být soustředěn na hledání dalších potenciálních aplikací vhodných pro zasklené FVT kolektory, v kterých budou mít energetické opodstatnění a budou ekonomicky konkurenci schopné. Dosud nebylo ve vědecké literatuře detailně popsána problematika kombinace zasklených FVT kolektorů v kombinaci s ORC (Organic Rankine Cycle) kombinovanou výrobou tepla a elektrické energie. Další možnou aplikací, o které se dosud mnoho nepublikovalo je využití zasklených FVT kolektorů v solárním centralizovaném zásobování teplem.

- Z hlediska optimalizace konceptu kolektoru je možné se do budoucna zaměřit na optimalizaci váhy kolektoru, na kterou nebyl kladen příliš velký důraz. Je možné analyzovat možné změny materiálů. Další možností z hlediska úpravy konceptu je možné se zaměřit na zvýšení zastoupení plochy FV článků vůči celkové ploše kolektoru s ohledem na optimalizaci tloušťky vzduchové mezery, aby nedocházelo ke stínění FV článků bočním rámem kolektoru.

- Optimalizovat dynamický model vzhledem k výpočetnímu času. Rozdělením FVT kolektoru na větší počet segmentů narůstá požadavek na výkon výpočetního nástroje, do budoucna by bylo vhodné zaměřit se i na tuto problematiku.

- Krystalické FV články na trhu mají zpravidla nízkou odrazivost v oblasti spektra slunečního záření a vysokou odrazivost v oblasti blízkého infračerveného záření. Do budoucna by bylo vhodné se věnovat problematice vývoje vhodných povlaků na FV člancích, které budou vykazovat nízkou odrazivost i v oblasti blízkého infračerveného záření a budou tedy vhodné pro využití ve FVT kolektorech.

SEZNAM LITERATURY

- [1] ASTE, N., DEL PERO, C., LEONFORTE, F., Water flat plate PV–thermal collectors: A review. *Solar Energy*, 2014, vol. 102, s. 98–115. DOI: 10.1016/j.solener.2014.01.025, 2014.
- [2] BAI, Y., CHOW, T. T., DUPEYRAT, P., MENÉZO, C., Analysis of Hybrid PV/Thermal Solar-Assisted Heat Pump System for Sports Center Water Heating Application, *International Journal of Photoenergy*, 2012, vol. 2012, s. 13.
- [3] BAKKER, M.; ZONDAG, H.A.; ELSWIJK, M.J.; STROOTMAN, K.J.; JONG, M.J.M. Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump., *Solar energy*, 2005, vol. 78, s. 331-339.
- [4] BERGENE, T., LOVVIK, O., Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, 1995, vol. 55, s. 453–462.
- [5] CADAFALCH, J., An overheating protection system for flat plat solar collectors with transparent insulation. *Proceedings of Eurosun 2002*, Lisbon, Portugal, 2002.
- [6] Clean energy for all Europeans package, Energy. European Commission [online], dostupné z: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
- [7] ČSN EN ISO 9806. Solární energie - Solární tepelné kolektory – Zkušební metody, ČNI, 2014.
- [8] DI SU, J., YUTING, A., GURUPRASAD, L., LINGKUN, F., Comparative analyses on dynam-ic performances of photovoltaic–thermal solar collectors integrated with phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 131, s. 79–89. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.11.002, 2017.
- [9] DE KEIZER, C., BOTTSE, J., DE JONG, M., FOLKERTS, W., *PVT Benchmark; An overview of PVT modules on the European market and the barriers and opportunities for the Dutch Market*, Eindhoven: SEAC., dostupné z https://www.seac.cc/wpcontent/uploads/2018/04/PVTinSHaPeBenchmark_final_update19_3_2018.pdf
- [10] DUPEYRAT, P., MENÉZO, CH., ROMMEL, M., HENNING, H-M., Efficient single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system, *Solar energy*, 2011, vol. 85, s. 1457-1468.
- [11] DUPEYRAT, P., MENÉZO, CH., ROMMEL, M., WIRTH, Improvement of PV module optical properties for PV-thermal hybrid collector application, *Solar energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95, s. 2028-2036.
- [12] DUPEYRAT, P., *Thermal collector and PVT collector*, Patent, European patent office, 11007143.8. 2011.
- [13] DUPEYRAT, P., Experimental development and simulation investigation of a Photovoltaic-Thermal hybrid solar collector, Disertační práce, 2011
- [14] FLORSCHUETZ, W. L. Extension of the Hottel-Whilier model to the analisis of combined photovoltaic/thermal flat plate collector. *Solar energy*, 1979, vol. 22, s. 361-366.
- [15] GUARRACINO, I., MELLOR, A., EKINS-DAUKES, N., J., MARKIDES CH., N., Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 101, s. 778-795.

- [16] HALLER, M., PAAVILAINEN, J., DALIBARD, A., PERERS, B., *TRNSYS Type 832 v3.07 dynamic collector model by Bengt Perers*, Technical document, University of Graz, 2009.
- [17] HARRISON, S. J.; LIN, Q.; MESQUITA, L. C.; VALLETTA, D. A., Method and apparatus for solar collector with integral stagnation temperature control - WO 2004070289 A1. Patent. 2004
- [18] HAURANT, P., MÉNÉZO, CH., DUPEYRAT, P., The PHOTOTHERM project: full scale experimentation and modelling of a photovoltaic – thermal (PV-T) hybrid system for domestic hot water applications, *Energy Procedia*, 2014, vol. 48, s. 581-587.
- [19] HAURANT, P., MÉNÉZO, CH., GAILARD, L. DUPEYRAT, P., Dynamic numerical model of a high efficiency PV-T collector integrated into a domestic hot water system, *Solar Energy*, 2015, vol. 111, s. 68-81.
- [20] HENNING, H.; NUNEZ, T.; DUPEYRAT, P.; HENNINGER, S., Solarthermischer Kollektor - Patent DE102011112974 B3, 2011.
- [21] HOROWITZ, C. A., Paris Agreement. International Legal Materials. <https://doi.org/10.1017/s0020782900004253>, 2016.
- [22] HOTTEL, H. C, WHILIER, A., Evaluation of flat plate collector performance. *Trans. the Conference on the Use of Solar Energy University of Arizona*, s. 1-74, 1958.
- [23] CHOW, T.T., Performance analysis of photovoltaic–thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 2003, vol. 75, 143–152.
- [24] CHOW, T., A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, no. 2, s. 365–379. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037
- [25] IEA SHC Task 60 PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems. Dostupné z: <http://task60.iea-shc.org/>
- [26] JONAS, D., LÄMMLE, M., THEIS, D., SCHNEIDER, S., FREY, G., Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS. *Solar Energy*, 2019, vol. 193, s. 51-64, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.047>, 2019.
- [27] LÄMMLE, M., KROYER, T., FORTUIN, S., HERMANN, M., Development and modelling of highly-efficient PVT collectors with low-emissivity coatings. *Solar Energy*, 2016, vol 130, s. 161–173. DOI: 10.1016/j.solener.2016.02.007
- [28] LÄMMLE, M., THOMA, CH., HERMANN, M., A PVT Collector Concept with Variable Film Insulation and Low-emissivity Coating. *Energy Procedia*, 2016, vol. 91, s. 72–77. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.174
- [29] LÄMMLE, M., Development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low-emissivity coatings and overheating protection, Disertační práce, 2018.
- [30] MAGALHÃES, P.L., Extension of the Perers model for photovoltaic-thermal (PV-T) collectors. *Solar Energy*, 2018, vol. 174, s. 455-462, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.012>
- [31] MATUŠKA, T., ŠOUREK, B., JIRKA, V., KUDLÁČEK, J., *Solární kolektor pro transformaci slunečního záření na teplo a elektrickou energii s poddajným absorbérem*, Patent, Úřad průmyslového vlastnictví, 307178. 2018
- [32] MATUŠKA, T., ZMRHAL V., KOLEKTOR 2.2 - Computer Program for Efficiency Calculation of Solar Flat-Plate Collectors. 2009.
- [33] REN21. *Global status report 2017*, Dostupné z: https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf, 2018.

- [34] ROMMEL, M., ZENHAUSERN, D., BAGENSTOS, A., Application of unglazed PVT collectors for domestic hot water pre/heating in a development and testing system, *Energy Procedia*, 2014, vol. 48, s. 638-644.
- [35] SIMÓN-ALLUÉ, R., GUEDEA, I., VILLEN, R., BRUN, G., Experimental Investigation of PV/T Collectors with Phase Change Material, *EuroSun 2018*, 2018.
- [36] STEGMAN, M., BERTRAM, E., ROCKENDORF, G., Model of an unglazed photovoltaic thermal collector based on standard test procedures, *In Proceedings of ISES Solar World Congress*, Kassel, Germany, 2011.
- [37] TRNSYS Manual, TRNSYS 16 a TRaNsient SYstem Simulation program. In: Mathematical Reference, vol. 5. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison, 2006.
- [38] WENDKER, K., JÄGER, H., DOLEZAL, A., STRYI-HIPP, G., FORTUIN, S.; HÄDRICH, I. et al. Photovoltaisch-thermische Kollektorsysteme mit maximiertem Gesamtertrag. *Projekt gefördert durch Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) Förderzeichen: 28569*. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2012.
- [39] WEISS, W., SPÖRK-DÜR M., Solar Heat Worldwide 2019, IEA-Solar Heating and Cooling Programme <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>
- [40] ZENHAHAUSNER, D., BAMBERGER, E., BAGGENSTOS, A. *PVT Wrap-Up; Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors*, Rapperswil: SPF., 2017.
- [41] ZONDAG, H.A., DE VRIES, D.D., VAN HELDEN, W.G.J., VAN ZOLINGEN, R.J.C., VAN STEENHOVEN, A.A.. The thermal and electrical yield of a PV–thermal collector, *Solar Energy*, 2002, vol. 72, s. 113–128.
- [42] ZONDAG, H. A., VAN HELDEN W. G. J., Stagnation temperature in PVT collectors, *In: PV in Europe*, Rome (Italy), 2002.
- [43] ZONDAG, H. A., Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, s. 891–959.

SEZNAM LITERATURY AUTORA S VAZBOU NA DISERTAČNÍ PRÁCI

- [44] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Glazed Photovoltaic-thermal (PVT) Collectors for Domestic Hot Water Preparation in Multifamily Building. *SUSTAINABILITY*. 2020, vol. 12, no. 15, ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su12156071. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su12156071>
- [45] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Performance analysis of glazed PVT collectors for multifamily building. In: KURNITSKI, J. a T. KALAMEES, eds. *E3S Web of Conferences Volume 172 (2020) - 12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020)*. NSB 2020, Tallinn, 2020-09-07/2020-09-09. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences, 2020. E3S Web Conf.. sv. 172. ISSN 2555-0403. DOI 10.1051/e3sconf/202017212003.
- [46] BAGGENSTOS, A. et al. Existing PVT Systems and Solutions. [Elektronický dokument se vzdáleným přístupem (web)] Paris: International Energy Agency, 2020.
- [47] POKORNÝ, N. et al. Design and Monitoring of Energy-Active Facade Module. In: KURNITSKI, J. a T. KALAMEES, eds. *E3S Web of Conferences Volume 172 (2020) - 12th Nordic Symposium on Building Physics (NSB 2020)*. NSB 2020, Tallinn, 2020-09-07/2020-09-09. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences, 2020. E3S Web Conf.. sv. 172. ISSN 2555-0403. DOI 10.1051/e3sconf/202017224005.

- [48] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Hybridní fotovoltaicko-tepelné kolektory ve světle nové statistiky. *TZB info*. 2019, vol. 21, ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/20002-hybridni-fotovoltaicko-tepelne-kolektory-ve-svetle-nove-statistiky>
- [49] POKORNÝ, N. et al. Glazed PVT collector integrated into façade module. In: HÄBERLE, 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: International Solar Energy Society, 2018. s. 850-858. ISBN 978-3-9820408-0-6. DOI 10.18086/eurosun2018.02.04. Dostupné z: <http://proceedings.ises.org/?mode=list&conference=eurosun2018>
- [50] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. *TRNSYS Type 224 v0.1 Dynamický model zaskleného kapalinového fotovoltaicko-tepelného kolektoru založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci*. [Software splňující podmínky RIV] 2018.
- [51] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Potenciální aplikace pro nezasklené fotovoltaicko-tepelné kolektory. 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. 159-166. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02805-5.
- [52] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Aplikace pro hybridní fotovoltaicko-tepelné kolektory. *Energie 21*. 2018, vol. 11, s. 20-21. ISSN 1803-0394.
- [53] POKORNÝ, N. et al. *Testovací buňka pro energeticky aktivní fasádní moduly*. [Funkční vzorek] 2017.
- [54] POKORNÝ, N. et al. Monitoring of Solar Domestic Hot Water System with Glazed Liquid PVT Collectors. In: *Proceedings of the ISES EuroSun 2016 Conference*. 11th ISES EuroSun Conference 2016, Palma de Mallorca, 2016-10-11/2016-10-14. Freiburg: International Solar Energy Society, 2017. s. 1273-1282. ISBN 978-3-9814659-6-9. DOI 10.18086/eurosun.2016.08.20.
- [55] POKORNÝ, N. et al. Vývoj hybridního fotovoltaicko-tepelného solárneho kvapalinového kolektora. *TZB HAUSTECHNIK SK*. 2017, vol. 25, s. 18-21. ISSN 1210-356X.
- [56] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Simulace solární soustavy s hybridními FVT kolektory. 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. 45-50. ISBN 978-80-270-0772-1.
- [57] POKORNÝ, N., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Modeling of Glazed Liquid PV-T Collector with Use of Detail Model. In: MATHUR, Jyotirmay a Vishal GARG, eds. *Proceedings of the 14th International IBPSA Conference Building Simulation 2015*. 14th International IBPSA Conference Building Simulation 2015, Hyderabad, 2015-12-07/2015-12-09. Hyderabad: IBPSA, 2015. s. 2554-2560. ISBN 978-93-5230-118-8. Dostupné z: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2254.pdf>
- [58] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Performance Analysis of Glazed Liquid Photovoltaic-thermal Collector with Use of Detail Model. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2016*. Konference studentské tvůrčí činnosti 2016, Praha, 2016-04-19. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. ISBN 978-80-01-05929-6. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/pdf16/6525.pdf?_=1460324210

- [59] MATUŠKA, T., N. POKORNÝ a P. SLANINA. Glazed Photovoltaic-Thermal Component for Building Envelope Structures. In: *Conference Proceedings of the 10th ENERGY FORUM*. 10th Conference on Advanced Building Skins, Bern, 2015-11-03/2015-11-04. Wilen: Advanced Building Skins GmbH, 2015. s. 28-35. ISBN 978-3-9812053-8-1.
- [60] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. *TRNSYS Type 223 v0.1 - Model zaskleného kapalinového fotovoltaicko-tepelného kolektoru založeného na detailních parametrech konstrukce a energetické bilanci*. [Software splňující podmínky RIV] 2015.
- [61] MATUŠKA, T. et al. Glazed PVT Collector with Polysiloxane Encapsulation of PV Cells: Performance and Economic Analysis. *International Journal of Photoenergy*. 2015, vol. 2015, no. 718316, s. 1-7. ISSN 1110-662X. DOI 10.1155/2015/718316.
- [62] POKORNÝ, N., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. *Solární soustava pro přípravu teplé vody s fotovoltaicko-tepelnými kolektory*. [Funkční vzorek] 2015.
- [63] ŠOUREK, B. a N. POKORNÝ. Nová laboratoř pro zkoušení solárních kolektorů. *Energie 21*. 2015, vol. 8, no. 1, s. 24-25. ISSN 1803-0394.
- [64] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Model hybridního fotovoltaicko-tepelného zaskleného kapalinového kolektoru. 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. 19-22. ISBN 978-80-260-7209-6.