

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav techniky prostředí

Disertační práce

**ZASKLENÝ KAPALINOVÝ FOTOVOLTAICKO-TEPELNÝ
KOLEKTOR**

Ing. Nikola Pokorný

Studijní obor:

Technika prostředí

Školitel:

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Praha, 2020

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 popsání 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.

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval za vedení, korigování a časté konzultace vedoucímu práce doc. Matuškovi. V oblasti testování tepelného výkonu fotovoltaicko-tepelných kolektorů bych rád poděkoval Dr. Šourkovi, s kterým jsem mohl často konzultovat postup a provedení měření. Dr. Jirkovi bych rád poděkoval zejména za konzultace týkající se optických vlastností zasklení a technologie zalévání fotovoltaických článků. Rád bych také poděkoval kolegům z Fakulty elektrotechnické, jmenovitě Dr. Wolfovi a Dr. Hrzinovi, kteří mi velmi často byli nápomocni zejména v oblasti měření elektrického přínosu fotovoltaicko-tepelných kolektorů.

Nerad bych opomenul na rodinu, bez které by tato práce nikdy nevznikla. Zejména bych rád poděkoval své partnerce a svým dvěma dcerám, které to se mnou po dobu psaní disertační práce vydržely.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem autorem disertační práce s názvem: „Zasklený kapalinový fotovoltaicko-tepelný kolektor“ a vypracoval jsem ji samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Tomáše Matušky, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé disertační práce.

V Debrně dne 31. 8. 2020

.....
Nikola Pokorný

OBSAH

SOUHRN	2
SUMMARY	3
PODĚKOVÁNÍ	4
PROHLÁŠENÍ	5
PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN	8
ÚVOD.....	12
1 STAV PROBLEMATIKY	14
1.1 Koncentrační FVT kolektor	15
1.2 Vzduchový FVT kolektor	15
1.3 Nezasklený kapalinový FVT kolektor	16
1.4 Zasklený kapalinový FVT kolektor	17
1.5 Modelování FVT kolektoru	20
1.6 Současný trh s FVT kolektory.....	21
2 FORMULACE CÍLŮ PRÁCE	24
3 MODEL ZASKLENÉHO FVT KOLEKTORU	27
3.1 Stacionární model	27
3.1.1 Vnější energetická bilance	27
3.1.2 Vnitřní energetická bilance	34
3.2 Dynamický model.....	39
3.3 Citlivostní analýza matematického modelu.....	41
3.4 Validace modelu FVT kolektoru.....	44
3.4.1 Validace modelu za ustálených podmínek.....	44
3.4.2 Nejistota měření	49
3.4.3 Validace modelu během proměnlivých venkovních podmínek.....	54
4 KONSTRUKCE FVT KOLEKTORU A JEJÍ OPTIMALIZACE.....	60
4.1 Koncept zaskleného FVT kolektoru	60

4.2	Okrajové podmínky optimalizace FVT kolektoru.....	66
4.3	Materiál a geometrie výměníku tepla (absorbéru).....	69
4.4	Mezera mezi FVT absorbérem a zasklením	71
4.5	Nízkoemisivní povlak na povrch FVT absorbéru.....	75
4.6	Izolace na zadní a boční straně kolektoru	81
4.7	Zapouzdřovací materiál pro FV články	82
5	APLIKACE FVT KOLEKTORŮ	84
5.1	Potenciální aplikace pro FVT kolektory	84
5.1.1	Zasklené FVT kolektory pro rodinný dům	84
5.1.2	Zasklené FVT kolektory pro bytový dům.....	86
5.2	Experimentální měření na konkrétních aplikacích	91
5.1.1	Solární soustava pro přípravu teplé vody s FVT kolektory.....	91
5.1.2	Soustava s FVT kolektory integrovanými do fasády budovy	95
	ZÁVĚR.....	101
6	DŮSLEDKY PRO VĚDU A PRAXI	105
6.1	Přínos pro praxi.....	105
6.2	Teoretický přínos.....	105
6.3	Návrhy pro další směřování práce.....	106
	SEZNAM LITERATURY	108
	SEZNAM LITERATURY AUTORA S VAZBOU NA DISERTAČNÍ PRÁCI.....	115
7	PŘÍLOHY	119
7.1	Příloha 1 – Vstupní data, parametry a výstupní data matematického modelu...	119
7.1.1	Vstupní data.....	119
7.1.2	Parametry	119
7.1.3	Výstupní data	121
7.2	Příloha 2 - Korelace použité pro argon	121

PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN

A_a	plocha apertury FVT kolektoru	[m ²]
A_{ab}	boční plocha FVT kolektoru	[m ²]
A_{FV}	plocha FV článků	[m ²]
A_G	hrubá plocha FVT kolektoru	[m ²]
A_{seg}	plocha jednoho segmentu FVT kolektoru	[m ²]
C_{eff}	efektivní tepelná kapacita FVT kolektoru	[J/m ² .K]
D_i	vnitřní průměr trubek	[m]
F	Účinnost teplosměnné chladicí lamely	[-]
\tilde{F}	účinnostní činitel FVT kolektoru	[-]
\tilde{F}_R	tepelný přenosový součinitel FVT kolektoru	[-]
G	celkové sluneční ozáření na plochu FVT kolektoru	[W/m ²]
Gr	Grashofovo číslo	[-]
L	délka trubek	[m]
N	počet měření	[-]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
\dot{Q}_e	elektrický výkon FVT kolektoru	[W]
\dot{Q}_{FVT}	celkový výkon FVT kolektoru	[W]
\dot{Q}_S	dopadlý sluneční výkon	[W]
$\dot{Q}_{t, stac}$	tepelný výkon stanovený stacionárním modelem	[W]
\dot{Q}_t	tepelný výkon FVT kolektoru	[W]
PF	podíl plochy FV článku ku ploše apertury (packing factor)	[-]
Ra	Rayleighovo číslo	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
T_{abs}	teplota povrchu FVT absorbéru	[K]
T_{abs-p2}	střední teplota v mezeře mezi FVT absorbérem a zasklením	[K]
T_e	teplota okolního vzduchu	[K]
$T_{m, old, i}$	střední teplota v kolektoru (v konkrétním segmentu) v předchozím časovém kroku	[K]
T_o	teplota oblohy	[K]
T_{p1}	teplota vnějšího povrchu zasklení	[K]
T_{p2}	teplota vnitřního povrchu zasklení	[K]
T_{z1}	teplota vnějšího povrchu izolace	[K]

T_{z2}	teplota vnitřního povrchu izolace	[K]
T_{b1}	teplota vnějšího povrchu bočního rámu	[K]
T_{k1}	teplota teplotonosné kapaliny na vstupu do FVT kolektoru	[K]
T_{k2}	teplota teplotonosné kapaliny na výstupu z FVT kolektoru	[K]
T_{b2}	teplota vnitřního povrchu bočního rámu	[K]
\tilde{U}	korigovaný celkový součinitel prostupu tepla FVT kolektoru	[W/m ² .K]
\tilde{U}_{kor_b}	korigovaný součinitel prostupu tepla boční stranou FVT kolektoru	[W/m ² .K]
\tilde{U}_{kor_p}	korigovaný součinitel prostupu tepla přední stranou FVT kolektoru	[W/m ² .K]
\tilde{U}_{kor_z}	korigovaný součinitel prostupu tepla zadní stranou FVT kolektoru	[W/m ² .K]
W	rozteč mezi trubkami	[m]
a	polovina šířky spoje lamela-trubka	[m]
a_1	lineární součinitel tepelné ztráty FVT kolektoru	[W/m ² .K]
a_2	kvadratický součinitel tepelné ztráty FVT kolektoru	[W/m ² .K ²]
b	tloušťka spoje	[m]
b_0	lineární součinitel modifikátoru úhlu dopadu	[-]
c	měrná tepelná kapacita teplotonosné kapaliny	[J/kg.K]
c_{vz}	měrná tepelná kapacita vzduchu	[J/kg.K].
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
h_i	součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí v trubkách	[W/m ² .K]
$h_{p,b2-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním z bočního rámu do okolí	[W/m ² .K]
$h_{p,p1-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním z povrchu zasklení do okolí	[W/m ² .K]
$h_{p,z1-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním ze zadního rámu do okolí	[W/m ² .K]
$h_{s,p1-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním z povrchu zasklení do okolí	[W/m ² .K]
$h_{s,abs-p2}$	součinitel přestupu tepla sáláním z absorbérů na zasklení	[W/m ² .K]
$h_{s,abs-z2}$	součinitel přestupu tepla sáláním z absorbérů na izolaci	[W/m ² .K]
$h_{s,b1-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním z bočního rámu do okolí	[W/m ² .K]
$h_{s,z1-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním ze zadního rámu do okolí	[W/m ² .K]
$h_{v,b1-b2}$	tepelná propustnost boční izolace FVT kolektoru	[W/m ² .K]
$h_{v,p1-p2}$	tepelná propustnost zasklení	[W/m ² .K]
$h_{v,z1-z2}$	tepelná propustnost zadní izolace	[W/m ² .K]
$h_{p,abs-p2}$	součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi povrchem FVT absorbérů a zasklením	[W/m ² .K]
$h_{p,abs-p1}$	součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi povrchem FVT absorbérů a zadní izolací	[W/m ² .K]
\dot{m}	hmotnostní průtok teplotonosné kapaliny FVT kolektorem	[kg/s]
n	počet trubek v trubkovém registru	[-]

n_{seg}	počet segmentů	[-]
t_m	střední teplota teplotnosné kapaliny ve FVT kolektoru	[°C]
u_A	nejistota typu A	[dle veličiny]
u_B	nejistota typu B	[dle veličiny]
u	kombinovaná nejistota	[dle veličiny]
w	rychlost větru	[m/s]
x	délka trubkového registru	[-]
x^*	bezrozměrný délkový parametr	[-]
α_{bas}	pohltivost FVT absorbéru	[-]
γ_{ref}	teplotní koeficient výkonu FV článku	[%]
δ_{abs}	tloušťka FVT absorbéru	[m].
δ_{z1-z2}	tloušťka izolace	[m]
δ_p	tloušťka přední vzduchové mezery	[m]
δ_{p1-p2}	tloušťka skla	[m]
δ_z	tloušťka zadní vzduchové mezery	[m]
Δt	časový krok výpočtu	[s]
$\varepsilon_{abs,p}$	emisivita přední strany FVT absorbéru	[-]
$\varepsilon_{abs,z}$	emisivita zadní strany FVT absorbéru	[-]
ε_{ok}	emisivita okolního povrchu	[-]
ε_{p1}	emisivita vnějšího povrchu zasklení	[-]
ε_{p2}	emisivita vnitřního povrchu zasklení	[-]
η	účinnost FVT kolektoru	[-]
η_0	účinnost FVT kolektoru při nulových tepelných ztrátách	[-]
$\eta_{e,e}$	elektrická účinnost FVT kolektoru vztažená k teplotě okolního vzduchu	[-]
η_{ref}	referenční elektrická účinnost FVT absorbéru při standardních testovacích podmínkách	[-]
η_t	tepelná účinnost FVT kolektoru	[-]
θ	sklon FVT kolektoru	[°]
λ_{sp}	tepelná propustnost spoje	[W/m.K]
λ_{p1-p2}	tepelná vodivost skla	[W/m.K]
λ_{abs}	tepelná vodivost kovového plechu	[W/m.K]
λ_{kap}	tepelná vodivost kapaliny	[W/m.K]
λ_{FV}	součinitel tepelné vodivosti FV článků	[W/m.K]
λ_{lam}	součinitel tepelné vodivosti vrstvy zapouzdřovacího materiálu	[W/m.K]
λ_{sklo}	součinitel tepelné vodivosti ochranného skla	[W/m.K]

λ_{sp}	tepelná vodivost spoje	[W/m.K]
λ_{vzd}	tepelná vodivost vzduchu	[W/m.K]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m ² .K ⁴]
τ	propustnost krycího zasklení pro sluneční záření	[-]
ν	kinematická viskozita vzduchu	[m ² /s]

ÚVOD

Pařížská dohoda o klimatu si stanovila cíl dosáhnout do roku 2050 uhlíkové neutrality [36]. 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 [63]. V Evropě jsou budovy zodpovědné za 40 % spotřeby neobnovitelné primární energie a 36 % emisí CO₂ [10]. 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

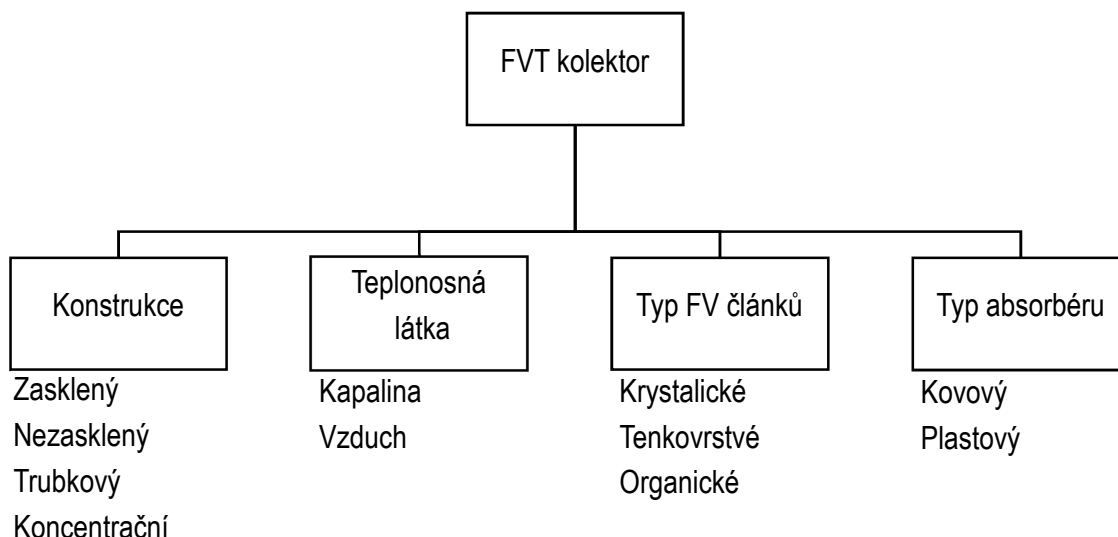
budovách jeví jako velmi výhodný kapalinový zasklený FVT kolektor, který je možné provozovat při vyšších teplotách dostačujících zejména pro přípravu teplé vody. Právě příprava teplé vody solárním tepelným systémem patří mezi nejrozšířenější aplikaci solárních tepelných kolektorů ve světě [87]. Vývoj 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) [44], 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 absorberu, zčásti se pohlcuje na povrchu FV článků a mění se v teplo a elektrickou energii. Část tepelné energie, která se neodvedla teplotou 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, teplotní látky, typu použitých FV článků nebo podle typu absorberu. 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 jsou existující velmi citované řešení výzkumu v oblasti FVT kolektorů od prof. Chowa [42], prof. Asteho [2] či prof. Zondaga [91], které se více méně věnují všem jmenovaným typům FVT kolektorů.



Obr. 1.1 Rozdělení FVT kolektorů

1.1 Koncentrační FVT kolektor

Koncentrační FVT kolektory jsou výhodné zejména v oblastech s vyššími úhrny dopadlého slunečního záření a zejména pak v lokalitách s vysokým poměrem přímého dopadlého slunečního záření. Hlavním záměrem výzkumu v oblasti koncentračních FVT kolektorů je zpravidla snížení plochy FV článků. Pro kombinaci s tepelnou produkcí je motivace zpravidla snížení teploty FV článků, které právě u koncentračních kolektorů může dosahovat velmi vysokých hodnot. Vysoké teploty FV článků pak mají za následek snižování elektrické účinnosti a kratší životnost. Vědecké publikace v oblasti koncentračních FVT se zabývají především zvýšením tepelného a elektrického výkonu [12, 60, 61]. Jiné studie jsou orientovány na optimalizaci geometrie reflektoru FVT kolektoru [48, 82].

1.2 Vzduchový FVT kolektor

Velmi častou motivací pro výzkum v oblasti vzduchových FVT kolektorů je zejména otázka integrace FV panelů do obálky budovy a s tím související přehřívání FV části [81], které může být využitím tepla z ohřátého vzduchu poníženo. Vzduchové FVT kolektory mají z hlediska aplikace v budovách značné omezení zejména kvůli využití tepla v letním období. V oblasti vzduchových FVT kolektorů lze nalézt celou řadu publikací, věnující se konstrukci kolektoru a jeho matematickému modelování [70, 73]. Kromě toho se výzkum věnuje i problematice samostatných modulů vzduchových FVT kolektorů. Vzduchový FVT kolektor může být v zimním období využit pro předehřev čerstvého vzduchu, v letním období pak pro ochlazování FV části či pro noční chlazení vzduchu v budově.

Existuje řada studií zabývajících se porovnáním různých konfigurací vzduchových FVT kolektorů [76, 32], lišící se zejména prostorem, kde proudí ohříváný vzduch. Vzduch může proudit nad absorbérem, pod absorbérem či oběma kanály. Některé publikace se zabývají problematikou testování vzduchových FVT kolektorů [70]. Kromě toho se objevují studie zaměřené například na zvyšování tepelného výkonu cíleným snižováním tepelných ztrát konvekcí [79, 80].

1.3 Nezasklený kapalinový FVT kolektor

Nezasklená varianta FVT kolektoru patří mezi nejrozšířenější konstrukční variantu na trhu. Původně byl nezasklený FVT kolektor vyvinut za účelem snižování teploty FV článků a tím zvyšování účinnosti fotoelektrické konverze [83]. Výzkum v oblasti nezasklených FVT kolektorů se věnuje zejména konstrukčnímu provedení kolektoru a vývoji solárních tepelných systémů vhodných pro tento typ FVT kolektoru. Běžná konstrukce nezaskleného FVT kolektoru se skládá z krystalického FV panelu, na který je různými způsoby připevněn zpravidla kovový absorbér. Existuje řada publikací věnujících se optimalizaci konstrukce kolektoru s různými materiály absorbéru (hliníkový [40], plastový [66], měděný [83]). Některé práce se věnují odlišné geometrii absorbéru [43, 45], případně kombinaci změny geometrie a materiálu absorbéru [35].

Výzkum v oblasti nezasklených FVT kolektorů je dále soustředěn na optimalizaci provozu a vývoj nových aplikací, kde lze kolektory nasadit. Asi nejčastější aplikací pro nezasklené FVT kolektory je ohřev bazénové vody [8] či předeřev studené vody [65]. V současné době se výzkum v oblasti aplikací pro nezasklené FVT kolektory stále více zabývá možností kombinace FVT kolektoru s primárním okruhem tepelného čerpadla. Nezasklený FVT kolektor lze využít jako zdroj nízkopotenciálního tepla přímo na výparníku tepelného čerpadla, případně je možnost využít teplo z FVT kolektoru pro regeneraci vrtů pro tepelné čerpadlo země-voda. Velmi častá varianta je kombinace využití tepla z FVT kolektoru, jak pro regeneraci vrtu, tak přímo na výparníku tepelného čerpadla či na akumulaci tepla v zásobníku. Díky instalaci nezasklených FVT kolektorů je menší požadavek na délku vrtů pro tepelné čerpadlo země-voda [7]. Pokud jsou nezasklené FVT kolektory instalovány dodatečně na aplikaci, kde je již tepelné čerpadlo země-voda, lze díky FVT kolektorům dosáhnout vyššího sezónního topného faktoru tepelného čerpadla. Výzkum v oblasti aplikací nezasklených FVT kolektorů lze rozdělit na systémy pro přípravu teplé vody [15] a kombinované systémy pro přípravu teplé vody a vytápění [4, 7]. Existují i studie zabývajících se výkonovým porovnáním odlišných systémů nezasklených a zasklených FVT kolektorů [49].

1.4 Zasklený kapalinový FVT kolektor

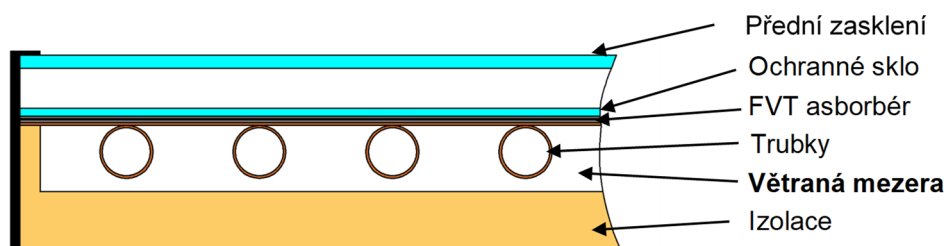
Zasklená varianta FVT kolektoru je v současné době zastoupena na trhu v omezené míře. Podle rešerše světového trhu provedené na SPF v Rapperswile z března roku 2017 [88] bylo na světovém trhu 6 výrobců zasklených FVT kolektorů z toho 5 v Evropě. V březnu 2018 vydalo SEAC (Solar Energy Application Centre) v Eindhovenu vlastní rešerši [18], 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 [90], 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. Mezi velmi často citované rešerše výzkumu v oblasti FVT kolektorů jsou od prof. Chowa [42] prof. Asteho [1] a prof. Zondaga [91]. Na významnou výzkumnou činnost prof. Zondaga v oblasti 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 [23]. Další, kdo navázal na práci Dr. Dupeyrat ve Fraunhofer ISE byl Dr. Lämmle, 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 [54]. 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 [20, 52]. 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.

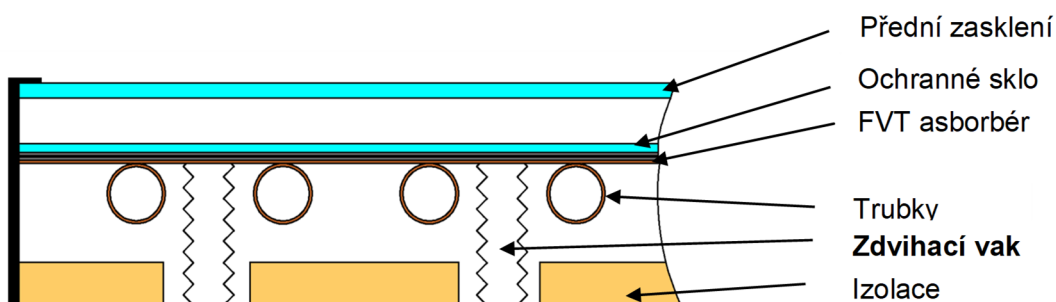
Možností jak ochránit FV část FVT kolektoru je celá řada. Společným jmenovatelem konceptů proti přehřívání kolektoru je však navýšení ceny a technické složitosti kolektoru. Jeden z možných přístupů, jak vyřešit degradaci EVA laminace během stagnace je její nahrazení za teplotně odolný materiál (polysiloxanový 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. Této 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 [9, 29]. Konkrétní testy provětrávání FVT kolektoru během stagnace jsou popsány v disertační práci Dr. Lämmleho [54].



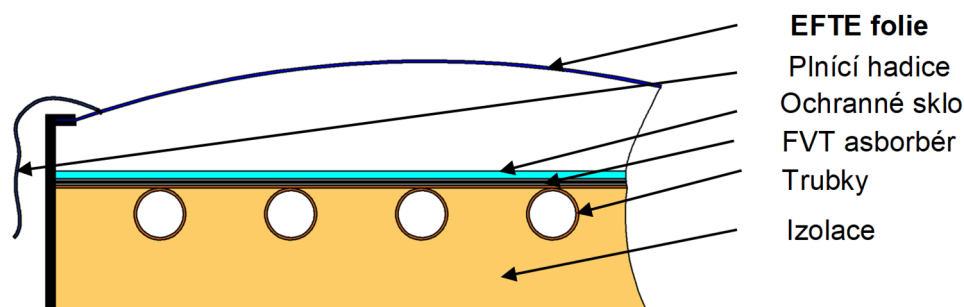
Obr. 1.2 Provětrávaný zasklený FVT kolektor během stagnace

Další možností, jak zamezit přehřívání FVT kolektoru je využití volně uloženého FVT absorbéru, který je vytlačován vakem, kde je napuštěn plyn s velkou objemovou roztažností. Plyn při vyšších teplotách zvětší svůj objem a přiblíží FVT absorbér k zasklení, a tím se zvýší tepelné ztráty kolektoru, viz obr. 1.3. Tento přístup je patentován Dr. Dupeyratem [22].



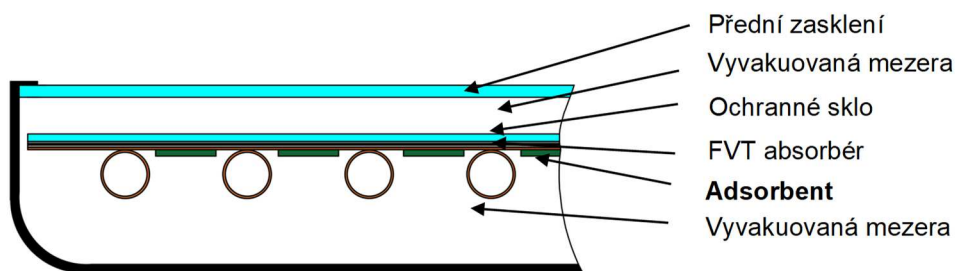
Obr. 1.3 Zasklený FVT kolektor s pohyblivým absorbérem

Jedním z dalších konceptů pro zamezení přehřívání FVT kolektoru je využití EFTE (ethylen-tetrafluorethylen) folie jako krytu kolektoru [53]. Jedná se o materiál, který našel místo v současné architektuře, folie vykazuje vysokou pevnost, trvanlivost a propustnost pro sluneční záření. Vzduch mezi absorbérem a folií je během vysokých teplot vypuštěn, aby byly zvýšeny tepelné ztráty kolektoru, viz obr. 1.4. Během provozu je pak prostor nad absorbérem 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

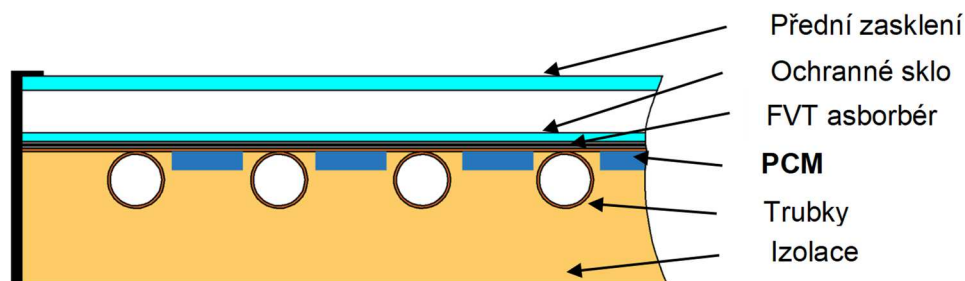
V německém městě Freiburg byly instalovány v rámci projektu na Fraunhofer ISE vakuové ploché FVT kolektory s adsorbentem jako ochrannou proti přehřátí FVT kolektoru [86]. Varianta vakuového FVT kolektoru s adsorpčním materiálem na zadní straně absorbéru byla patentována prof. Henningem [33]. Během stagnace se ze sorpčního materiálu na zadní straně absorbéru uvolňují molekuly vody, díky kterým pak narůstá tepelná ztráta kolektoru (obr. 1.5). V období, kdy teplota v kolektoru klesne, materiál na zadní straně absorbéru opět adsorbuje molekuly vody a sníží tak tepelné ztráty kolektoru.



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

Ve Španělsku byl popsán přístup ochranné FV části FVT kolektoru fixací PCM (Phase Change Material) na zadní straně FVT absorbéru [69]. 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 [16]. 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

1.5 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 [24]. Model vycházel ze známého matematického popisu solárního tepelného kolektoru podle Hottella a Whillera [38]. Model podle Florschuetze byl rozšířením o stanovení elektrického výkonu FV části. Dosud byla publikována řada analytických stacionárních [6, 19, 89] a dynamických [27, 31, 39] modelů, které byly více či méně inspirovány prací odvedenou v 70. letech. Některé z nich byly experimentálně validovány, některé nikoliv. Dynamické modely jsou zpravidla založeny na výpočtu pomocí metody konečných objemů. 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 [31]. Poslední dvě disertační práce zabývající se experimentálním vývojem FVT kolektoru [23, 54] 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

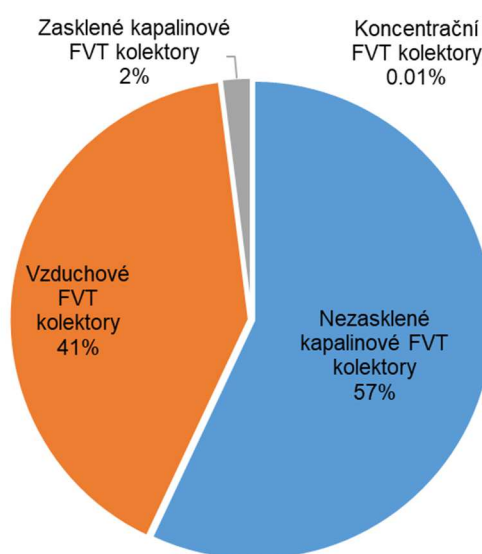
žádný experimentálně ověřený model implementován. Simulace zaskleného kapalinového FVT kolektoru lze v prostředí TRNSYS provést pomocí komponenty type 50b [84]. Model je však značně zjednodušený a nespolehlivý, některé jeho parametry (teplotní součinitel FVT kolektoru, součinitel prostupu tepla FVT kolektorem) nejsou uvažovány jako proměnné, ačkoliv by právě během proměnných provozních a klimatických podmínek měly být.

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 [14] a dle výsledků testu FV části. V posledních letech přibýly impaktované publikace věnující se právě problematice parametrického modelování FVT kolektorů [46, 55]. 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 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 [74]. 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. Vstupními daty pro tepelnou část je křivka tepelné účinnosti a křivka modifikátoru úhlu dopadu. Pro elektrickou část jsou vstupní data výsledky testu FV panelů (volt-ampérová charakteristika, referenční elektrická účinnost, atd.).

1.6 Současný trh s FVT kolektory

Podle statistiky bylo dosud ve Světě instalováno přes 1 075 247 m² FVT kolektorů [87]. Evropským lídrem v instalované ploše je Francie s plochou 442 504 m², druhé je Německo s plochou 109 380 m². Značnou část trhu představují vzduchové FVT kolektory instalované zejména ve Francii, kde to je způsobeno specificky nastavenou dotační politikou, díky které se vzduchovým kolektorům velmi dařilo i v porovnání s běžnými FV panely. Velké množství vzduchových FVT kolektorů je využito pro přitápění v zimních měsících, v letních měsících se využívá pouze produkce elektrické energie, vzduchová část kolektoru je využívána pro snižování teploty FV článků a tím zvyšování elektrické účinnosti. V roce 2017 byla publikována rešerše zaměřená na stav trhu s FVT kolektory, kde bylo evidováno 53 FVT kolektorů, z toho 38 byly nezasklené FVT kolektory [88]. V březnu 2018 vydalo SEAC (Solar Energy Application Centre) v Eindhovenu další rešerši trhu [18]. V letošním roce bylo provedeno statistické šetření FVT kolektorů na trhu v rámci projektu mezinárodní energetické agentury IEA SHC Task 60 [44], které bylo

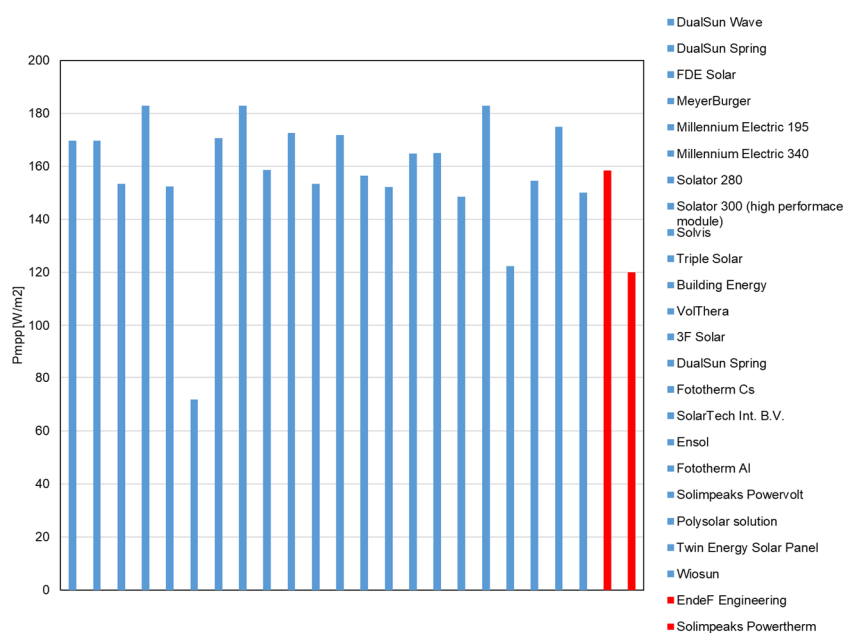
publikováno v každoročním přehledu světového trhu se solární tepelnou technikou [87]. Dotazníkové šetření vyplnilo 26 výrobců FVT kolektorů z 11 zemí. Jedná se o nový rozvíjející trh, který hledá ještě pevné zakotvení. Na obr. 1.7 je zobrazen podíl instalované plochy jednotlivých typů FVT kolektorů. Je zde vidět, že největší podíl instalované plochy zaujímá nezasklené kapalinové FVT kolektory, druhý největší podíl pak zaujímají vzduchové FVT kolektory. Podíl výrobců FVT kolektorů je však velmi odlišný. Výrobci jsou zaměřeni zejména na nezasklené kapalinové kolektory, které tvoří přibližně 48 % z počtu výrobců ostatních FVT kolektorů, 28 % výrobců se zaměřuje na zasklené kapalinové kolektory, 4 % na vakuové trubicové kolektory, 12 % na vzduchové kolektory a 8 % na koncentrační kolektory.



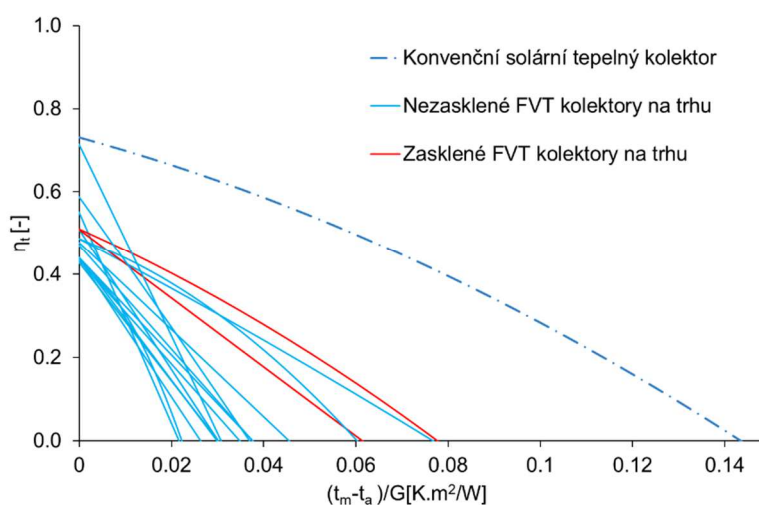
Obr. 1.7 Podíl jednotlivých typů kolektorů z celkové instalované plochy FVT kolektorů ve světě (1,1 milionu m²)

Nezasklená varianta FVT kolektoru je vhodná zejména pro aplikace, u kterých je prioritou produkce elektrické energie a využití nízkopotenciálního tepla je přidanou hodnotou. Nezasklený FVT kolektor je instalován zejména v nízkoteplotních aplikacích. Nárůst produkce elektrické energie díky chlazení FV modulů je výrazný pouze v oblastech s vyššími úhrny dopadlé sluneční energie. V oblasti střední a severní Evropy není nárůst produkce elektrické energie díky chlazení FV modulů značný. Přesto se právě ve střední a severní Evropě objevují aplikace kombinující nezasklené FVT kolektory a primární okruh tepelného čerpadla. Kromě toho jsou využívány nezasklené FVT kolektory pro přípravu teplé vody v jižní Evropě. Instalovaná plocha zasklených FVT kolektorů je oproti ostatním typům FVT kolektorů velmi malá [87]. Specifickou skupinou jsou pak koncentrační a vakuové kolektory, kde každá kategorie má jednoho výrobce,

instalovaná plocha je opět velmi malá. Cílovou aplikací koncentračních a vakuových FVT kolektorů je v obou případech zpravidla příprava teplé vody či vysokoteplotní aplikace. Na obr. 1.8 je porovnání špičkového elektrického výkonu a na obr. 1.9 je porovnání tepelné účinnosti FVT kolektorů na současném Světovém trhu. V grafech jsou zahrnuty pouze FVT kolektory, které mají dostupné výkonové parametry. Na obr. 1.9 je vidět, že zasklené FVT kolektory mají srovnatelnou tepelnou účinnost s nejlepšími nezasklenými FVT kolektory a výrazně nižší účinnost než konvenční tepelný kolektor. Z hlediska optimalizace tepelného výkonu je tedy u zasklených FVT kolektorů obrovský potenciál pro zlepšení.



Obr. 1.8 Porovnání špičkového elektrického výkonu FVT kolektorů na současném trhu (modře nezasklené, červeně zasklené)



Obr. 1.9 Porovnání tepelné účinnosti FVT kolektorů na současném trhu

2 FORMULACE CÍLŮ 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 solárním 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.

Dílčí 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 teplonosné kapaliny. 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 absorbéru za účelem snížení tepelných ztrát absorbéru 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 implementován. Simulace zaskleného kapalinového FVT kolektoru lze v prostředí TRNSYS provést pomocí komponenty typu 50b [84]. 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 měli být. Tepelnému výkonu stanovenému komponentou typu 50b nelze důvěřovat. Matematický model zaskleného FVT kolektoru vycházel z teoretického popisu popsaného v [24]. Model řeší přestup tepla mezi FVT absorberem a okolím a je rozdělen na dvě energetické bilance. Vnější energetická bilance FVT kolektoru řeší přenos tepla z povrchu FVT absorberu vodivě spojeného s chladicí lamelou do okolí. Vnitřní energetická bilance řeší přenos tepla z povrchu FVT absorberu do teplotnosné kapaliny. Princip iteračního výpočtu byl inspirován modelem solárního tepelného kolektoru [58]. V následující kapitole je představen matematický popis stacionárního a dynamického modelu zaskleného FVT kolektoru. Matematický model byl vytvořen v programovacím jazyce C++ a následně implementován do simulačního prostředí TRNSYS. V matematickém modelu byla použita řada korelací pro kritériální rovnice, které jsou v závěru této kapitoly porovnány v rámci citlivostní analýzy matematického modelu.

3.1 Stacionární model

3.1.1 Vnější energetická bilance

Funkci FVT kolektoru za stacionárních podmínek bez uvažování změny teploty ve FVT kolektoru v čase lze popsat energetickou rovnováhou dle rovnice (3.1). Existuje několik různých přístupů pro modelování zasklených FVT kolektorů, všechny však vychází ze základní podmínky, a to že celkový výkon FVT kolektoru \dot{Q}_{FVT} [W] je součtem elektrické a tepelné části dle vztahu

$$\dot{Q}_{FVT} = \dot{Q}_t + \dot{Q}_e \quad (3.1)$$

kde je

\dot{Q}_e elektrický výkon FVT kolektoru [W];

\dot{Q} tepelný výkon FVT kolektoru [W].

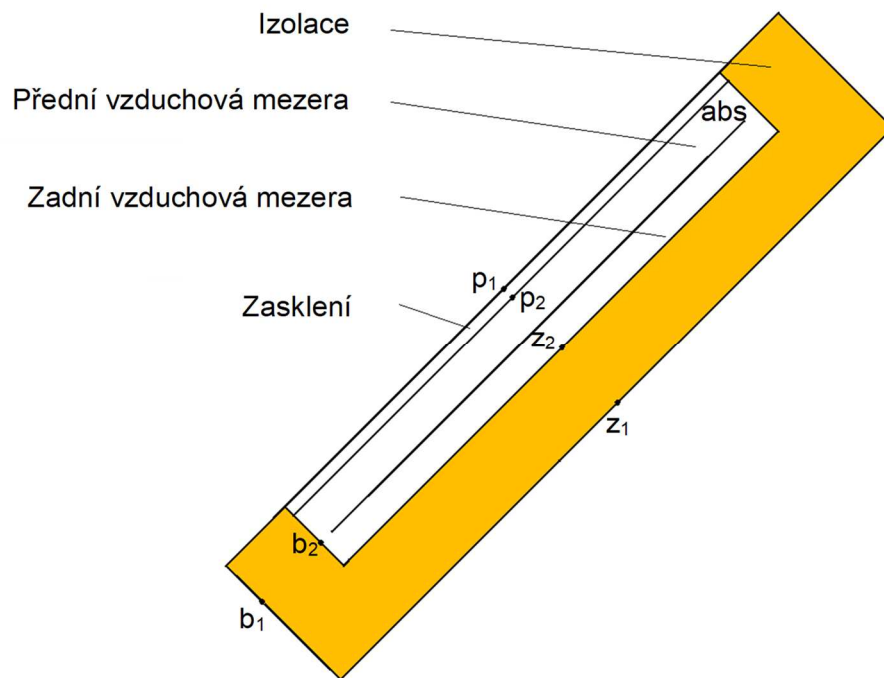
Vztah (3.1) lze dále rozepsat na více členů, kde 1. člen rovnice (3.2) je dopadající výkon slunečního ozáření. 2. člen rovnice (3.2) jsou optické ztráty FVT kolektoru reprezentující částečně odražené sluneční ozáření od zasklení a absorbérů, které nebylo pohlceno FVT absorbérem. 3. člen rovnice (3.2) je část tepla, která se neodvedla teplotnosnou kapalinou a odchází do okolního prostředí ve formě tepelné ztráty. 4. člen rovnice (3.2) je sluneční ozáření přeměněné na elektrický výkon FVT kolektoru. Rozšířený vztah pro stanovení výkonu FVT kolektoru je

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{FVT} = & G \cdot A_a \\ & - G \cdot A_a (1 - \tau \cdot \alpha) \\ & - \left[\tilde{U}_{kor_p} \cdot A_G \cdot (T_{abs} - T_e) - \tilde{U}_{kor_z} \cdot A_G \cdot (T_{abs} - T_e) - \tilde{U}_{kor_b} \cdot A_b \cdot (T_{abs} - T_e) \right] \\ & + G \cdot \tau \cdot A_{FV} \cdot \eta_e \end{aligned} \quad (3.2)$$

kde je

- A_a plocha apertury FVT kolektoru [m²];
- A_b boční plocha FVT kolektoru [m²];
- A_G hrubá plocha FVT kolektoru [m²];
- A_{FV} plocha FV článků [m²];
- G sluneční ozáření na plochu FVT kolektoru [W/m²];
- \tilde{U}_{kor_b} součinitel prostupu tepla boční stranou FVT kolektoru [W/m².K];
- \tilde{U}_{kor_p} součinitel prostupu tepla přední stranou FVT kolektoru [W/m².K];
- \tilde{U}_{kor_z} součinitel prostupu tepla zadní stranou FVT kolektoru [W/m².K];
- T_{abs} teplota povrchu FVT absorbérů [K];
- T_e teplota venkovního vzduchu [K];
- α pohltivost FVT absorbérů [-];
- η_e účinnost fotoelektrické konverze [-];
- τ propustnost krycího zasklení pro sluneční záření [-].

Na obr. 3.1 je zobrazeno zjednodušené schéma zaskleného FVT kolektoru. Model řeší vnější bilanci pro stanovení součinitele prostupu tepla z absorbérů do okolního prostředí přes přední, zadní a boční strany. FVT kolektor je pro výpočet definován základními rovinami: vnější povrch zasklení (p_1), vnitřní povrch zasklení (p_2), FVT absorbér (abs), vnitřní povrch izolace v rámu kolektoru (z_2 , b_2), vnější povrch rámu (z_1 , b_1).

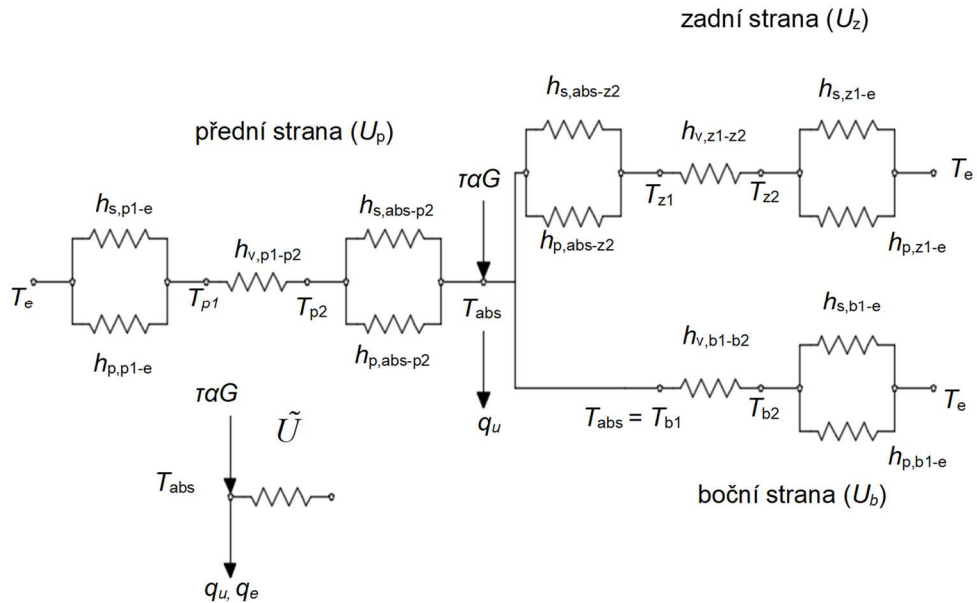


Obr. 3.1 Zjednodušené schéma FVT kolektoru

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. 3.2 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 (p_1 , p_2 , z_1 , z_2) je nutné v prvním iteračním kroku povrchové teploty odhadnout, v následujícím kroku jsou již stanoveny na základě vnější energetické bilance.



Obr. 3.2 Schéma vnější energetické bilance volně stojícího FVT kolektoru

Přestup tepla sáláním mezi zasklením a oblohou $h_{s,p1-e}$ [W/m².K] se stanoví na základě vztahu

$$h_{s,p1-e} = \varepsilon_{p1} \cdot \sigma \cdot (T_{p1}^2 + T_o^2) \cdot (T_{p1} + T_o) \quad (3.3)$$

kde je

T_{p1} teplota povrchu vnějšího zasklení [K];

T_o teplota oblohy [K];

ε_{p1} emisivita vnějšího povrchu zasklení [-];

σ Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m².K⁴].

Pro stanovení teploty oblohy existuje řada korelací vhodná pro rozdílné klimatické podmínky. V matematickém modelu byla použita korelace podle Swibanka [75], která odpovídá klimatickým podmínkám jasné oblohy, kde se teplota oblohy T_o [K] stanoví podle vztahu

$$T_o = 0,0552 \cdot (T_e)^{1,5} \quad (3.4)$$

Přestup tepla sáláním mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení se stanoví podle vztahu

$$h_{s,abs-p2} = \sigma \cdot \frac{T_{abs}^4 - T_{p2}^4}{\frac{1}{\epsilon_{p2}} + \frac{1}{\epsilon_{abs,p}} - 1} \quad (3.5)$$

kde je

- T_{p2} teplota vnitřního povrchu zasklení [K];
 $\epsilon_{abs,p}$ emisivita předního povrchu FVT absorbéru [-];
 ϵ_{p2} emisivita vnitřního povrchu zasklení [-].

Stanovení součinitele přestupu tepla sáláním mezi rámem kolektoru na zadní straně a povrchem střechy, případně sálání v mezeře mezi zadní stranou absorbéru a vnitřním povrchem izolace se stanoví analogicky jako podle vztahu (3.5). Sálání a konvekce v mezeře mezi boční stranou absorbéru a tělem kolektoru (izolace) je zanedbáno.

Přestup tepla prouděním mezi vnějším povrchem kolektoru a okolím lze stanovit na základě velkého množství korelací. Pro oblast solární tepelné techniky se velmi často používá McAdamsův vztah [59], který vyjadřuje závislost přestupu tepla prouděním na rychlosti větru

$$h_{p,p1-e} = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad (3.6)$$

kde je

- $h_{p,p1-e}$ součinitel přestupu tepla prouděním [W/m².K];
 w rychlost větru [m/s].

Součinitel přestupu tepla se v případě volně stojícího FVT kolektoru stanoví pro přední, zadní i boční stranu podle vztahu (3.6). V případě integrovaného FVT kolektoru do obálky budovy lze model upravit a stanovit součinitel přestupu tepla pouze pro přední stranu FVT kolektoru.

Součinitel přestupu tepla konvekcí ve vzduchové mezeře mezi FVT absorbérem a vnitřním povrchem zasklení se stanoví na základě znalosti kritériálních rovnic. Vztah mezi součinitelem přestupu tepla konvekcí a bezrozměrným Nusseltovým číslem je

$$Nu = \frac{h_k \cdot \delta_p}{\lambda_{vzd}} \quad (3.7)$$

kde je

- h_k součinitel přestupu tepla konvekcí [W/m².K];
 λ_{vzd} součinitel tepelné vodivosti vzduchu [W/m.K];

δ_p tloušťka vzduchové mezery mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení [m].

Pro přirozenou konvekci jsou určující kriteria Grashofovo a Prandtlovo číslo. Režim proudění se zjišťuje na základě Rayleighova čísla $Ra = Gr \cdot Pr$. Pro stanovení Nusseltova čísla byla vybrána korelace popsána v [58], kde se Nusseltovo číslo stanoví jako

$$Nu = (0,1464 - 2,602 \cdot 10^{-4} \cdot \theta - 2,064 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2) \cdot Ra^{0,29} \quad (3.8)$$

kde je

θ sklon kolektoru [°].

Pro stanovení Grashofovo čísla je nutné zvolit charakteristický rozměr dle obr. 3.3, číslo se poté stanoví podle vztahu

$$Gr = \frac{1}{T_{abs-p2}} \cdot \frac{g \cdot \delta_p \cdot (T_{abs} - T_{p2})}{\nu^2} \quad (3.9)$$

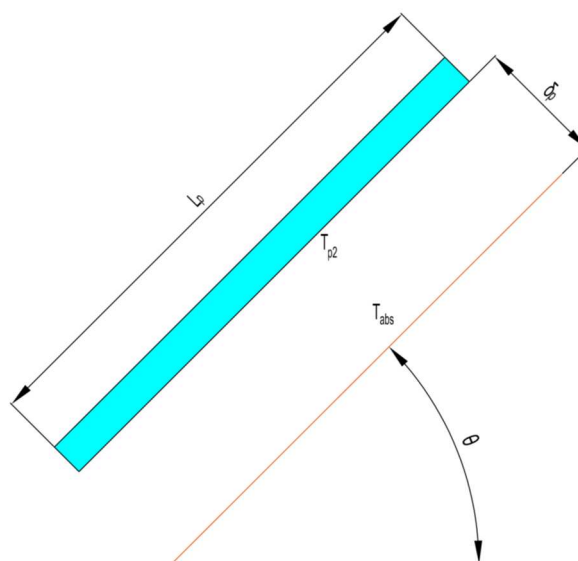
kde je

T_{abs-p2} střední teplota ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením [K];

δ_p tloušťka vzduchové mezery [m];

g gravitační zrychlení [m/s^2];

ν kinematická viskozita [m^2/s].



Obr. 3.3 Schéma pro výpočet přirozené konvekce v uzavřené vzduchové mezeře

Tepelná propustnost zasklení se stanoví podle vztahu

$$h_{v,p1-p2} = \frac{\lambda_{p1-p2}}{\delta_{p1-p2}} \quad (3.10)$$

kde je

λ_{p1-p2} součinitel tepelné vodivosti zasklení [W/m.K];

δ_{p1-p2} tloušťka zasklení [m].

Tepelná propustnost zadní a boční stěnou se stanoví analogicky. Liší se pouze součinitel tepelné vodivosti, který je v tomto případě uvažován pro izolační materiál. Dále se liší tloušťka izolace.

Poté lze stanovit součinitel prostupu tepla přední, zadní a boční stranou. Součinitel prostupu tepla přední stranou se stanoví podle vztahu

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{s,p1-e}} + \frac{1}{h_{k,p1-e}} + \frac{1}{h_{v,p1-p2}} + \frac{1}{h_{k,abs-p2}} + \frac{1}{h_{s,abs-p2}}} \quad (3.11)$$

Součinitel prostupu tepla zadní a boční stranou se stanoví analogicky jak u přední strany. Výstupem vnější energetické bilance je celkový součinitel prostupu tepla U [W/m².K] bez uvažování produkce elektrické energie FVT kolektoru, který se stanoví podle vztahu

$$U = \left(U_p + U_z + U_b \frac{A_b}{A_G} \right) \cdot \frac{A_G}{A_a} \quad (3.12)$$

Dále je nutné hodnotu součinitele prostupu tepla korigovat o člen vyjadřující tok slunečního záření odvedený FV článkem jako elektrický výkon. Výsledkem vnější energetické bilance je tedy korigovaná hodnota součinitele prostupu tepla, která se stanoví podle vztahu

$$\tilde{U} = U - PF \cdot \eta_{ref} \cdot \tau \cdot G \cdot \gamma_{ref} \quad (3.13)$$

kde je

G dopadlé sluneční záření na plochu kolektoru [W/m²];

η_{ref} referenční elektrická účinnost FVT absorberu při standardních testovacích podmínkách [-];

γ_{ref} teplotní koeficient výkonu FV článku [%];

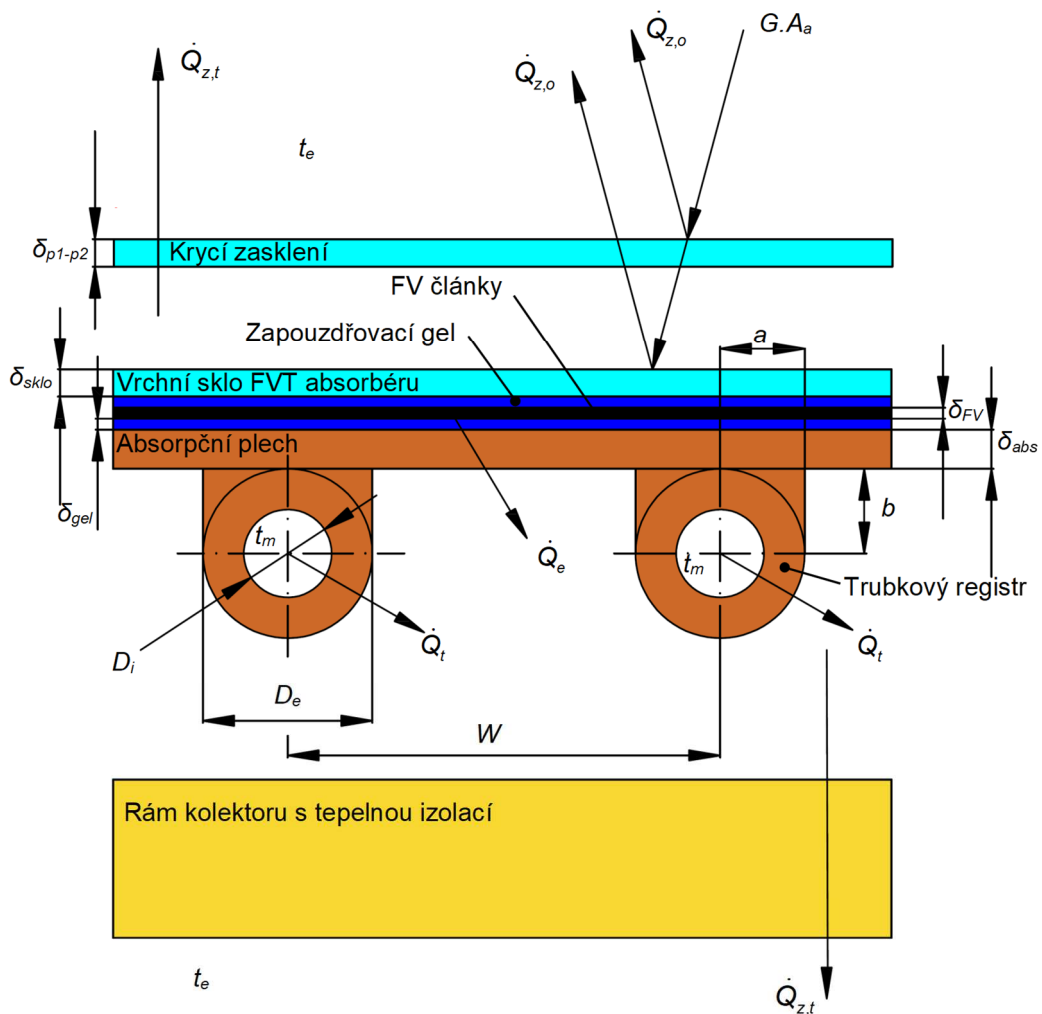
τ propustnost krycího zasklení [-];

PF podíl plochy FV článku ku ploše apertury (packing factor) [-].

Zde je nutné zmínit, že referenční elektrickou účinnost FV části je nutné uvažovat bez krycího zasklení. Jedná se tedy o účinnost spojení třech vrstev, FV článků zapouzdřených v gelu a vrchního zasklení. Oproti ostatním publikovaným matematickým popisům zaskleného FVT kolektoru je tento přístup rozdílný v neuvažování hodnoty propustnosti viditelného slunečního záření krycího zasklení.

3.1.2 Vnitřní energetická bilance

Vnitřní energetické bilance řeší přenos tepla z povrchu FVT absorbéru do teplotné kapaliny, viz obr. 3.4. 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. 3.4 Schéma vnitřní energetické bilance volně stojícího FVT kolektoru

Účinnost teplosměnné chladicí lamely F se stanoví podle vztahu

$$F = \frac{\tanh[m \cdot (W - 2a) / 2]}{m \cdot (W - 2a) / 2} \quad (3.14)$$

kde je

W rozteč trubek (šířka chladicí lamely) [m];

a polovina šířky spoje lamela-trubka [m].

Bezrozměrný parametr m zohledňující celou konstrukci FVT absorběru se v některých vědeckých pracích stanoví odlišně [23]. Pro matematický model v disertační práci byl převzat vztah pro parametr m z [35], který vykazoval dobrou shodu během validace modelu. Parametr m se stanoví podle vztahu

$$m = \sqrt{\frac{\tilde{U}}{\lambda_{abs} \cdot \delta_{abs} + \lambda_{FV} \cdot \delta_{FV} + \lambda_{lam} \cdot \delta_{lam} + \lambda_{sklo} \cdot \delta_{sklo}}} \quad (3.15)$$

kde je

λ_{abs} součinitel tepelné vodivosti kovového plechu [W/m.K];

δ_{abs} tloušťka plechu [m];

λ_{FV} součinitel tepelné vodivosti FV článků [W/m.K];

δ_{FV} tloušťka FV článků [m];

λ_{lam} součinitel tepelné vodivosti vrstvy zapouzdřovacího materiálu [W/m.K];

δ_{lam} tloušťka vrstvy zapouzdřovacího materiálu [m];

λ_{sklo} součinitel tepelné vodivosti skla [W/m.K];

δ_{sklo} tloušťka skla [m].

Účinnostní součinitel kolektoru, který zohledňuje hybridní FVT uspořádání, se stanoví podle vztahu (3.16). Vyjadřuje poměr předaného tepla z teplotnosné kapaliny do okolního vzduchu k předanému teplu z absorběru do okolního vzduchu. Účinnostní součinitel kolektoru pro danou konstrukci absorběru dle obr. 3.4 se stanoví podle vztahu

$$\tilde{F} = \frac{1/\tilde{U}}{W \cdot \left[\frac{1}{\tilde{U}[2a + (W - 2a) \cdot F]} + \frac{1}{C_{sp}} + \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i} \right]} \quad (3.16)$$

kde je

C_{sp} tepelná propustnost spoje [W/m.K]

D_i vnitřní průměr trubky [m];

h_i součinitel přestupu tepla konvekcí z vnitřního povrchu trubky do teplotnosné kapaliny [W/m².K].

Pro běžný typ spoje absorbér-trubka uvedený na obr. 3.4 se tepelná propustnost spoje stanoví jako

$$C_{sp} = \frac{\lambda_{sp} \cdot a}{b} \quad (3.17)$$

kde je

λ_{sp} součinitel tepelné vodivosti spoje [W/m.K];

b tloušťka spoje [m].

Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí z vnitřního povrchu trubky do teplotonosné kapaliny se stanoví podle vztahu

$$h_i = Nu \frac{\lambda_{kap}}{D_i} \quad (3.18)$$

kde je

λ_{kap} součinitel tepelné vodivosti teplotonosné kapaliny [W/m.K];

D_i vnitřní průměr trubky [m].

Pro stanovení Nusseltova čísla existuje značné množství korelací, které jsou přehledně popsány v [58]. Z Reynoldsova čísla a Prandtlova čísla lze stanovit převrácenou hodnotu Graetzova čísla, která vyjadřuje bezrozměrný délkový parametr podle

$$x^* = Gz^{-1} = \frac{x / D_i}{Re \cdot Pr} \quad (3.19)$$

kde je

x délka trubky trubkového registru [-].

Na základě parametru x^* lze stanovit Nusseltovo číslo v laminárním režimu proudění. Nusseltovo číslo pro laminární proudění se stanoví podle vztahů převzatých od Shaha [68], kde je jako okrajová podmínka konstantní tepelný tok. Nusseltovo číslo se pak stanoví podle vztahu

$$Nu_L = \begin{cases} 1,953 \cdot x^{*-1/3} & x^* \leq 0,03 \\ 4,364 + \frac{0,0722}{x^*} & x^* > 0,03 \end{cases} \quad (3.20)$$

V případě nuceného turbulentního proudění v trubce byl využit vztah pro stanovení Nusseltova čísla podle Colburnovi korelace [11], který je

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (3.21)$$

Parametr, který dává do poměru energii dodanou FVT kolektorem k energii, která by byla dodána v případě, že by povrchová teplota absorbérů byla rovna vstupní teplotě

teplonosné kapaliny, se nazývá tepelný přenosový součinitel. Tepelný přenosový součinitel FVT kolektoru \tilde{F}_R [-] se stanoví jako

$$\tilde{F}_R = \frac{\dot{m} \cdot c}{A_a \cdot \tilde{U}} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_a \cdot \tilde{U} \cdot \tilde{F}}{\dot{m} \cdot c}\right) \right] \quad (3.22)$$

kde je

A_a plocha apertury FVT kolektoru [m^2];

\dot{m} hmotnostní průtok teplonosné kapaliny FVT absorbérem [kg/s];

c měrná tepelná kapacita teplonosné kapaliny [J/kg.K].

Tepelný výkon FVT kolektoru se poté stanoví podle vztahu

$$\dot{Q}_{t, \text{stac}} = \tilde{F}_R \cdot A_a \left[\tilde{S} - \tilde{U} \cdot (T_{k1} - T_e) \right] \quad (3.23)$$

kde je

T_{k1} teplota teplonosné kapaliny na vstupu do FVT kolektoru [K];

\tilde{S} tepelná část výkonu z dopadlého slunečního záření [W/m^2] stanovená podle vztahu

$$\tilde{S} = G \cdot \tau \cdot \alpha - G \cdot PF \cdot \tau \cdot \eta_{e,e} \quad (3.24)$$

kde je

α pohltivost slunečního záření FVT absorbéru [-];

$\eta_{e,e}$ elektrická účinnost FVT kolektoru vztažená k teplotě okolního vzduchu [-];

τ propustnost slunečního záření zasklením [-].

Pro stanovení výkonu odvedeného tepelnou částí FVT kolektoru je nutné stanovit účinnost produkce elektrické energie $\eta_{e,e}$ vztaženou k teplotě okolního vzduchu podle vztahu

$$\eta_{e,e} = \eta_{ref} \left[1 - \gamma_{ref} (T_e - T_{ref}) \right] \cdot \left(1 + 0,03 \cdot \ln \frac{G}{1000} \right) \quad (3.25)$$

kde je

T_{ref} teplota okolního vzduchu při standardních testovacích podmínkách [$^{\circ}C$].

Celková tepelná účinnost FVT kolektoru se stanoví podle vztahu

$$\eta_{t,k} = \frac{\dot{Q}_{t, \text{stac}}}{G \cdot A_K} \quad (3.26)$$

Elektrický výkon FVT kolektoru se stanovil v závislosti na vstupní teplotě do FVT kolektoru, vztah pro výpočet elektrického výkonu vycházel z postupu podle Florschuetze [24]. Oproti původnímu popisu je však uvažováno, že ne všechna plocha FVT kolektoru je pokryta FV články. Elektrický výkon FVT kolektoru se stanoví podle vztahu

$$\dot{Q}_e = G \cdot A_a \cdot PF \cdot \tau \cdot \eta_{e,e} \left\{ 1 - \frac{Y_{ref} \cdot \eta_{ref}}{\eta_{e,e}} \cdot \left[\tilde{F}_R (T_{k1} - T_e) \frac{\tilde{S}}{\tilde{U}} (1 - \tilde{F}_R) \right] \right\} \quad (3.27)$$

V disertační práci Dr. Dupeyrata [23] je elektrický a tepelný výkon FVT kolektoru stanoven odlišným způsobem jako funkce povrchové teploty absorbéru podle vztahu (3.28) a (3.29). Bylo provedeno porovnání mezi přístupem popsáním Dr. Dupeyratem a modelem popsáný výše. Byl porovnán elektrický výkon pro pět odlišných vstupních teplot stanovený vztahem (3.27) a (3.29), dále byl porovnán tepelný výkon mezi vztahem (3.23) a (3.28). Matematický model FVT kolektoru popsáný v disertační práci vykazoval rozdíl do 0,0004 % oproti modelu popsánému Dr. Dupeyratem [23]. Jedná se tedy o dvě možnosti, jak stanovit energetický přínos zaskleného FVT kolektoru s obdobnými výsledky. Tepelný a elektrický výkon FVT kolektoru podle popisu v [23] se stanoví vztahy

$$\dot{Q}_{t, \text{stac}} = A_a \left[\tilde{S} - \tilde{U} \cdot (T_{abs} - T_e) \right] \quad (3.28)$$

$$\dot{Q}_e = G \cdot A_a \cdot PF \cdot \tau \cdot \eta_{ref} \left[1 - \gamma_{ref} (T_{abs} - T_{ref}) \right] \cdot \left(1 + 0,03 \cdot \ln \frac{G}{1000} \right) \quad (3.29)$$

Celková elektrická účinnost FVT kolektoru se stanoví u obou přístupů podle vztahu

$$\eta_{e,k} = \frac{\dot{Q}_e}{G \cdot A_k} \quad (3.30)$$

Na základě vstupní teploty do FVT kolektoru lze stanovit střední povrchovou teplotu FVT absorbéru T_{abs} [K], která je následně jako vstup v dalším iteračním kroku do vnější energetické bilance podle vztahu

$$T_{abs} = T_{k1} + \frac{\dot{Q}_{t, \text{stac}} / A_k}{\tilde{F}_R \cdot \tilde{U}} \cdot (1 - \tilde{F}_R) \quad (3.31)$$

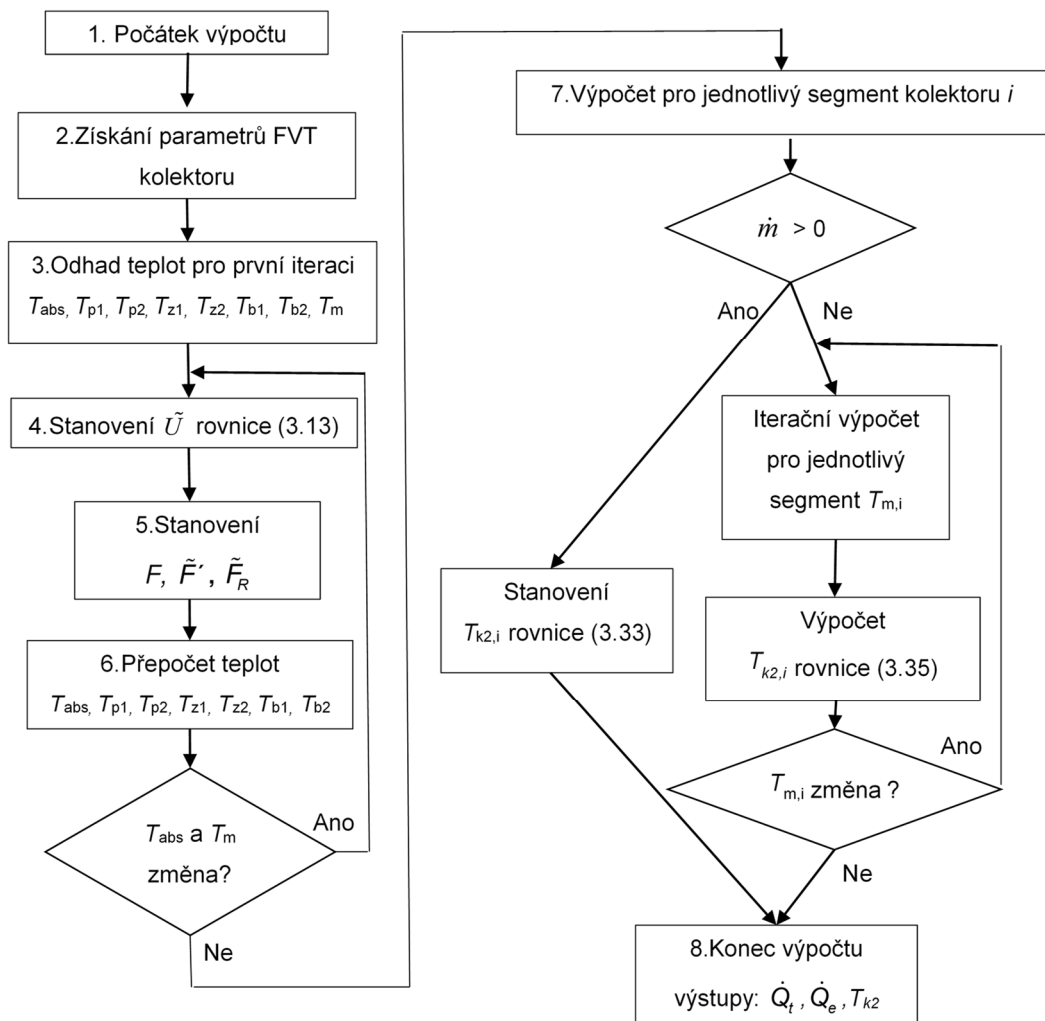
Analogicky lze stanovit také střední teplota teplotonosné kapaliny T_m [K] ve FVT kolektoru podle

$$T_m = T_{k1} + \frac{\dot{Q}_{t, \text{stac}} / A_k}{\tilde{F}_R \cdot \tilde{U}} \cdot \left(1 - \frac{\tilde{F}_R}{\tilde{F}} \right) \quad (3.32)$$

Teplota absorbéru a střední teplota v kolektoru je pak využita jako vstup pro další iterační krok, dokud výpočet nezačne konvergovat. Stacionární matematický model zaskleného FVT kolektoru byl vytvořen v programovacím jazyce C++ a následně implementován do simulačního prostředí TRNSYS jako nové komponenta type 223. Stacionární matematický model byl vykázan jako autorizovaný software [111]. Model byl validován a použit pro simulační analýzy [106, 107].

3.2 Dynamický model

V následující kapitole je popsán přístup se zohledněním tepelné setrvačnosti FVT kolektoru. Postup výpočtu byl inspirován parametrickým modelem solárního tepelného kolektoru popsaným v [28], kde jsou jako hlavní vstupy do modelu výsledky kvazidynamické 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. Na obr. 3.5 je vyznačen postup výpočtu v prostředí C++.



Obr. 3.5 Postup výpočtu v programu C++

V předchozí kapitole byl stanoven výkon při stacionárních podmínkách, který je zároveň jako vstupní údaj pro výpočet zohledňující tepelnou setrvačnost kolektoru. Pro zohlednění dynamického chování FVT kolektoru se výstupní teplota z kolektoru T_{k2} [K] stanoví jako funkce efektivní tepelné kapacity a stacionárního výkonu podle vztahu

$$T_{k2,i} = \frac{\frac{\dot{m} \cdot c \cdot T_{k1,i}}{A_{\text{seg}}} - \frac{C_{\text{eff}} \cdot T_{k1,i}}{2 \cdot \Delta \tau} + \dot{Q}_{t,\text{stac}} + \frac{C_{\text{eff}} \cdot T_{m,\text{old},i}}{\Delta \tau}}{\frac{\dot{m} \cdot c}{A_{\text{seg}}} + \frac{C_{\text{eff}}}{2 \cdot \Delta \tau}} \quad (3.33)$$

kde je

$\Delta \tau$ časový krok výpočtu [s];

C_{eff} efektivní tepelná kapacita [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$];

$T_{m,\text{old},i}$ střední teplota v kolektoru (v konkrétním segmentu) v předchozím časovém kroku [K].

Efektivní tepelná kapacitu lze stanovit na základě experimentálního měření či na základě znalosti hmotnosti a tepelné kapacity jednotlivých komponent FVT kolektoru. V období, kdy oběhové čerpadlo solární soustavy cykluje (ranní a večerní hodiny), teplota v solárním kolektoru rychle narůstá, a to má za následek značné problémy výpočetního algoritmu, zejména pak pro kratší časové kroky výpočtu či vysoké hodnoty tepelné kapacity kolektoru. Tudíž pro kratší časové kroky a větší tepelné kapacity je nutné FVT kolektor rozdělit na jednotlivé segmenty, které jsou zapojené do série. Plocha jednoho segmentu A_{seg} [m^2] se stanoví podle vztahu

$$A_{\text{seg}} = \frac{A_{\text{G}}}{n_{\text{seg}}} \quad (3.34)$$

kde n_{seg} je počet segmentů. Pokud není průtok ve FVT kolektoru a není tedy odebíráno teplo, tak se výstupní teplota z kolektoru stanoví podle vztahu

$$t_{k2} = t_m = t_{m,\text{old}} + \dot{Q}_t \cdot \frac{\Delta t}{C_{\text{eff}}} \quad (3.35)$$

Tepelný výkon FVT kolektoru \dot{Q}_t [W] zohledňující tepelnou setrvačnost kolektoru je dán vztahem

$$\dot{Q}_t = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{k2} - T_{k1}) \quad (3.36)$$

kde je

\dot{m} hmotnostní průtok [kg/s];

c měrná tepelná kapacita teplotnosné kapaliny [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$];

T_{k1} teplota teplotnosné kapaliny na vstupu do FVT kolektoru [K];

T_{k2} teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z posledního segmentu FVT kolektoru [K].

Pro konkrétní kombinace vstupních parametrů se může výpočet stát nestabilním. Proto je nutné před každou simulací zkontrolovat kritérium stability výpočtu, které je zároveň jedním z výstupů dynamického modelu. Pokud je jeho hodnota nižší než 0,5, nelze výsledkům simulace důvěřovat, pravděpodobně dojde i k zamrznutí celého

výpočtu, protože výsledek iteračního výpočtu nebude konvergovat. Kritérium stability výpočtu se stanoví podle vztahu

$$\frac{\dot{m} \cdot c \cdot n_{\text{seg}} \cdot \Delta\tau}{C_{\text{eff}} \cdot A_G} \geq 0.5 \quad (3.37)$$

Dynamický matematický model zaskleného FVT kolektoru byl vytvořen v programovacím jazyce C++ a následně implementován do simulačního prostředí TRNSYS jako nové komponenta type 224. Dynamický matematický model byl vykázán jako autorizovaný software [98]. Dynamický model FVT kolektoru byl validován za venkovních klimatických podmínek a porovnán se stacionárním modelem za určité časové období [102, 105].

3.3 Citlivostní analýza matematického modelu

Detailní matematický model FVT kolektoru bere v úvahu řadu korelací pro přestup tepla prouděním jak na vnější straně kolektoru, tak uvnitř trubek kolektoru či v mezeře mezi zasklením a FVT absorbérem. Za účelem citlivostní analýzy matematického modelu FVT kolektoru byly vybrány dva přestupy tepla, které mohou významně ovlivnit tepelný či elektrický výkon FVT kolektoru. Jedná se o přestup tepla prouděním na vnější straně zasklení, přestup tepla konvekci ve vzduchové mezeře mezi zasklením a FVT absorbérem, a přestup tepla uvnitř trubek trubkového registru.

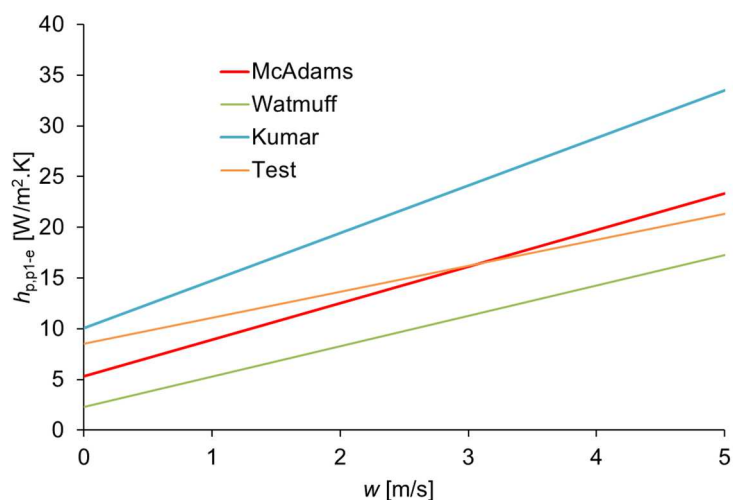
Přestup tepla prouděním mezi vnějším povrchem kolektoru a okolím lze stanovit na základě velkého množství korelací. V tab. 3.1 jsou uvedeny analyzované korelace pro přestup tepla prouděním.

Tab. 3.1 Analyzované korelace pro přestup tepla prouděním

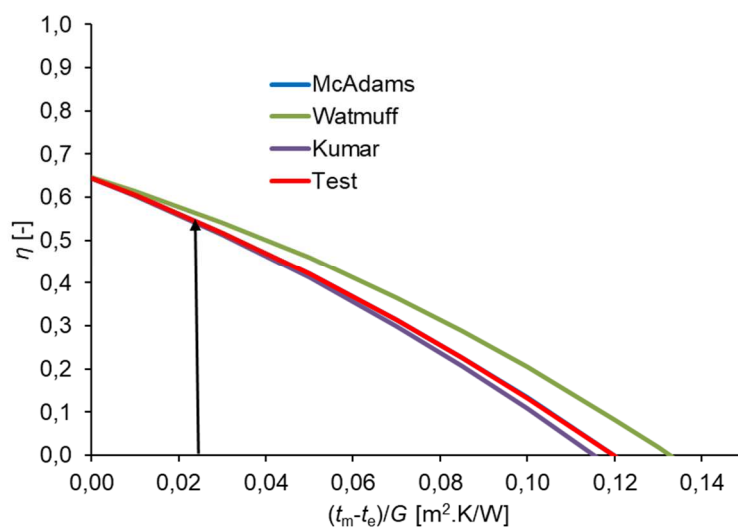
Autor	Rovnice	Okrajové podmínky
McAdams [59]	$h_{p,p1-e} = 5,7 + 3,8 \cdot w$	pro $w < 5$ m/s
Watmuff [85]	$h_{p,p1-e} = 2,3 + 3,0 \cdot w$	pro $w < 7$ m/s
Kumar [49]	$h_{p,p1-e} = 10,03 + 4,687 \cdot w$	pro $w < 5$ m/s
Test [76][77]	$h_{p,p1-e} = 8.55 + 2.56 \cdot w$	pro $w < 4$ m/s

Na obr. 3.6 je vyneseno porovnání jednotlivých korelací pro přestup tepla prouděním pro rychlosti větru 0 až 5 m/s. Z průběhu je evidentní, že součinitel přestupu tepla může dosahovat významně rozdílných hodnot. Avšak pokud se stanoví charakteristika tepelné účinnosti FVT kolektoru pro 5 vstupních teplot do kolektoru a

jedné rychlosti větru 3 m/s, je z průběhu na obr. 3.7 patrné, že rozdíl mezi jednotlivými korelacemi je minimální. Tepelná účinnost FVT kolektoru stanovena na základě korelace podle McAdamse se překrývá s tepelnou účinností stanovenou pomocí Testa. Na obr. 3.7 je šipkou vyznačen běžný provozní stav FVT kolektoru ($t_m = 40\text{ °C}$, $t_e = 40\text{ °C}$, $G = 800\text{ W/m}^2$). V tomto bodě se tři ze čtyř korelací takřka překrývají, pouze na základě korelace podle Watmuffa je stanovena tepelná účinnosti o 4,5 % (relativně) nižší oproti ostatním. Vliv jednotlivých korelací na elektrickou účinnost je minimální. Pro oblast solární tepelné techniky se velmi často používá McAdamsův vztah, který vykazuje srovnatelné výsledky s ostatními korelacemi, byl tedy zvolen do matematického modelu FVT kolektoru.



Obr. 3.6 Porovnání součinitele přestupu tepla prouděním na vnější straně zasklení



Obr. 3.7 Porovnání tepelné účinnosti FVT kolektoru pro odlišné korelace přestupu tepla prouděním na vnější straně zasklení

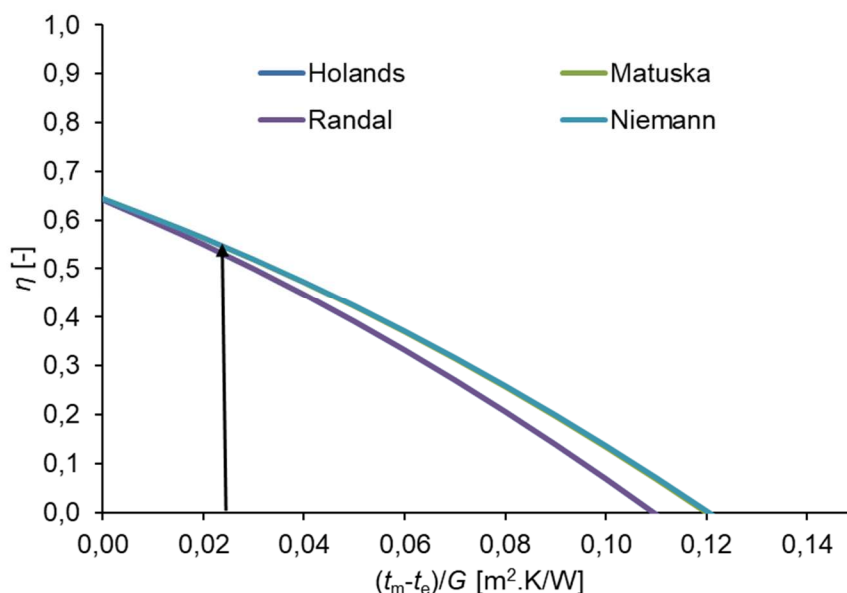
Další analyzovaný přesup tepla byl v uzavřené vzduchové mezeře, více v obr. 3.3. V tab. 3.2 jsou vybrané korelace pro stanovení Nusseltova čísla pro přirozenou konvekci v uzavřené a nakloněné mezeře. Některé korelace nejsou vhodné s ohledem na uvedené okrajové podmínky. Například korelace podle Shinkela není vhodná s ohledem na vysoká čísla Ra.

Tab. 3.2 Přehled analyzovaných korelací pro Nusseltovo číslo pro přirozenou konvekci v uzavřené nakloněné mezeře

Autor	Rovnice	Okrajové podmínky																								
			θ	L_p/δ_p																						
Holands [36]	$Nu = 1 + 1,44 \left[\left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\theta} \right]^+ \left(1 - \frac{(\sin\theta)^{1,6} \cdot 1708}{Ra \cdot \cos\theta} \right) \right]^+ + \left(\frac{Ra \cdot \cos\theta}{5830} \right)^{1/3} - 1$	$0 < Ra < 10^5$	0 až 60°																							
Randal [63]	$Nu = 0,118 [Ra \cdot \cos^2(\theta - 45^\circ)]^{0,29}$	$2,8 \cdot 10^3 < Ra \cdot \cos\theta < 2,2 \cdot 10^5$	45 až 90°	9 až 36																						
Schinkel [70]	$Nu = a(\theta)Ra^{1/3}$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>ϕ</th> <th>$a(\phi)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0°</td><td>0.080</td></tr> <tr><td>10°</td><td>0.079</td></tr> <tr><td>20°</td><td>0.075</td></tr> <tr><td>30°</td><td>0.074</td></tr> <tr><td>40°</td><td>0.074</td></tr> <tr><td>50°</td><td>0.074</td></tr> <tr><td>60°</td><td>0.072</td></tr> <tr><td>70°</td><td>0.069</td></tr> <tr><td>80°</td><td>0.068</td></tr> <tr><td>90°</td><td>0.062</td></tr> </tbody> </table>	ϕ	$a(\phi)$	0°	0.080	10°	0.079	20°	0.075	30°	0.074	40°	0.074	50°	0.074	60°	0.072	70°	0.069	80°	0.068	90°	0.062	$10^5 < Ra \cdot \cos\theta < 4 \cdot 10^6$	0 až 90°	6 až 27
ϕ	$a(\phi)$																									
0°	0.080																									
10°	0.079																									
20°	0.075																									
30°	0.074																									
40°	0.074																									
50°	0.074																									
60°	0.072																									
70°	0.069																									
80°	0.068																									
90°	0.062																									
Matuška [58]	$Nu = (0,1464 - 2,602 \cdot 10^{-4} \cdot \theta - 2,064 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2) \cdot Ra^0$																									
Niemann [66]	$Nu = 1 + \frac{m(Ra)^c}{Ra+n}$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>ϕ</th> <th>m</th> <th>n</th> <th>c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0°</td><td>0.0700</td><td>0.32x104</td><td>1.333</td></tr> <tr><td>45°</td><td>0.0430</td><td>0.41x104</td><td>1.360</td></tr> <tr><td>90°</td><td>0.0236</td><td>1.01x104</td><td>1.393</td></tr> </tbody> </table>	ϕ	m	n	c	0°	0.0700	0.32x104	1.333	45°	0.0430	0.41x104	1.360	90°	0.0236	1.01x104	1.393	$10^2 < Ra < 10^8$								
ϕ	m	n	c																							
0°	0.0700	0.32x104	1.333																							
45°	0.0430	0.41x104	1.360																							
90°	0.0236	1.01x104	1.393																							

Ostatní čtyři korelace byly využity pro stanovení tepelné účinnosti pro pět různých vstupních teplot teplotnosné kapaliny do FVT kolektoru, viz obr. 3.8. Tepelná účinnost stanovena za použití korelace podle Randala a Holandse se takřka překrývají. Stejně tak tomu je v případě tepelné účinnosti stanovené za použití korelace podle Niemann

a Matušky. Je patrné, že rozdíl mezi korelacemi je minimální. Na obr. 3.8 je šipkou vyznačen běžný provozní stav FVT kolektoru ($t_m = 40\text{ °C}$, $t_e = 40\text{ °C}$, $G = 800\text{ W/m}^2$). Ve vyznačeném bodě je rozdíl mezi účinnostmi do 4 % (relativně). Do matematického modelu byla zvolena korelace podle Matušky, která oproti ostatním uvedeným korelacím není omezena okrajovými podmínkami, je tedy výhodná pro optimalizační analýzy, kde se bude významně měnit tloušťka vzduchové mezery.



Obr. 3.8 Porovnání tepelné účinnosti FVT kolektoru pro odlišné korelace přirozené konvekce uvnitř nakloněné mezery

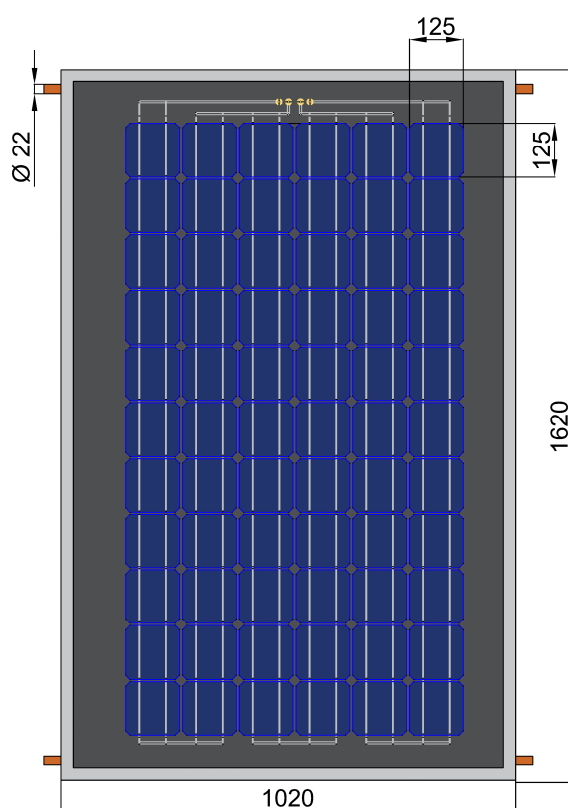
3.4 Validace modelu FVT kolektoru

Validace matematického modelu FVT kolektoru byla provedena jak pro stacionární model [106], tak pro dynamický model [102, 105]. V disertační práci je prezentována validace pro poslední prototyp zaskleného FVT kolektoru.

3.4.1 Validace modelu za ustálených podmínek

Validace modelu byla provedena na solárním simulátoru v solární laboratoři UCEEB ČVUT [114]. 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. 3.9 (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 stoličce solárního simulátoru je zobrazen na obr. 3.10.



Obr. 3.9 Výkres prototypu FVT kolektoru využitého pro validaci

Na obr. 3.11 až obr. 3.13 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. 3.10 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 absorbéru 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 absorbéru, pohltivost absorbéru, tepelná vodivost izolace) určily meze, ve kterých by se měla nacházet naměřená data z experimentálního stanovení účinnosti. V tab. 3.3 a tab. 3.4 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.

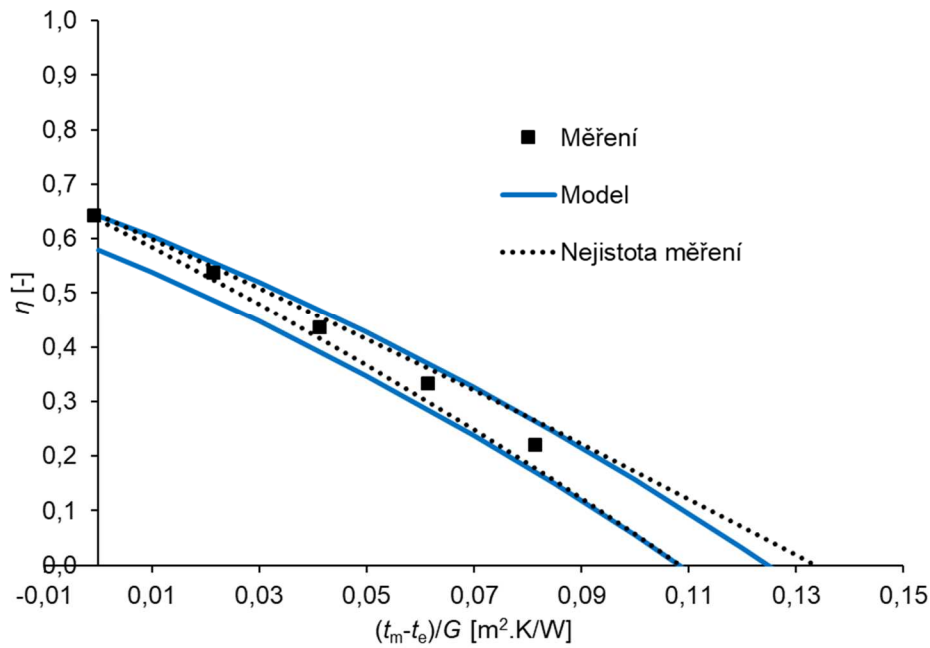
Tab. 3.3 Vybrané vstupní parametry pro meze modelu tepelné účinnosti

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Horní mez	Spodní mez	Zdroj údajů
Propustnost zasklení	τ	0,923	-	0,941	0,905	Naměřeno
Pohltivost FVT absorberu	α_{abs}	0,81	-	0,826	0,794	Naměřeno
Emisivita FVT absorberu	$\epsilon_{abs,p}$	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 absorberu vztahena k ploše FV části (bez krycího zasklení)	η_{ref}	12,9	%	12,0	13,5	Naměřeno

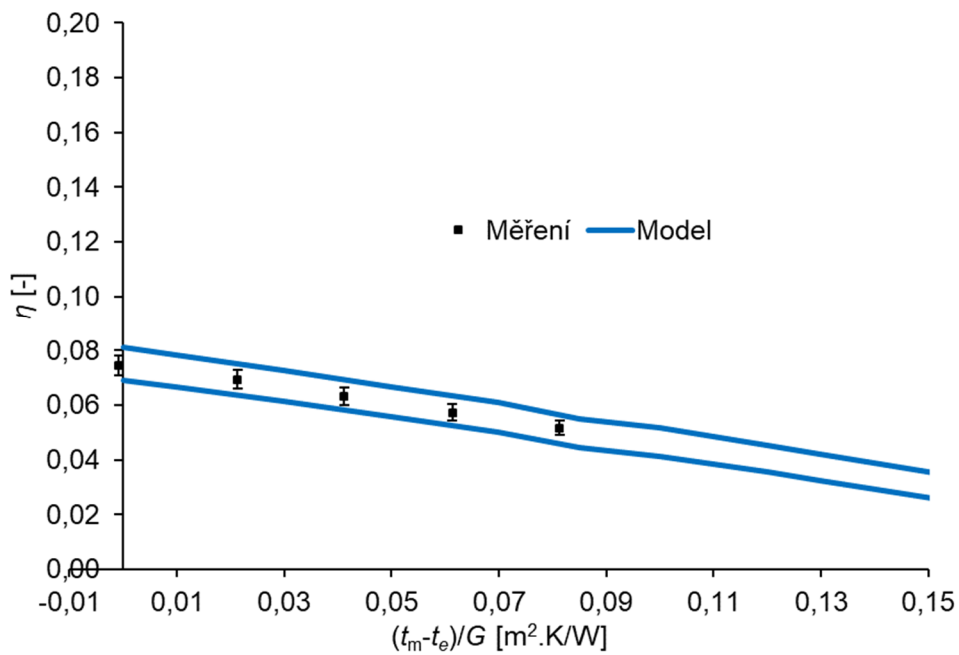
Tab. 3.4 Vybrané vstupní parametry pro meze modelu elektrické účinnosti

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	$\epsilon_{abs,p}$	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. 3.11 a obr. 3.12 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/m^2 , hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 117 kg/h , sklon kolektoru 45° , teplota okolního vzduchu $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$.



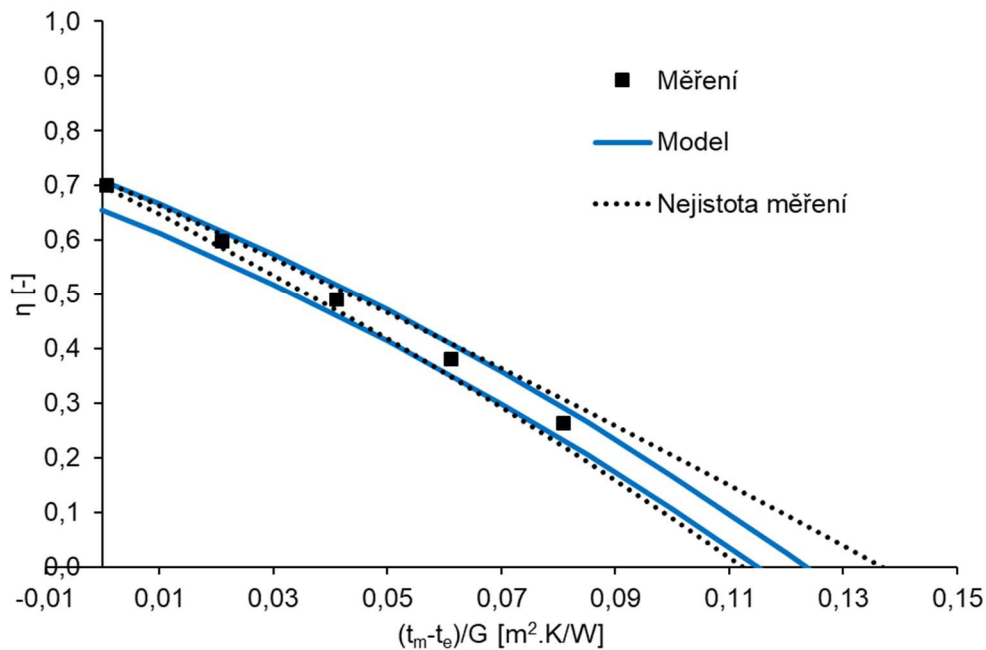
Obr. 3.11 Tepelná charakteristika FVT kolektoru při souběžném odběru elektrické energie



Obr. 3.12 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, 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 °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.



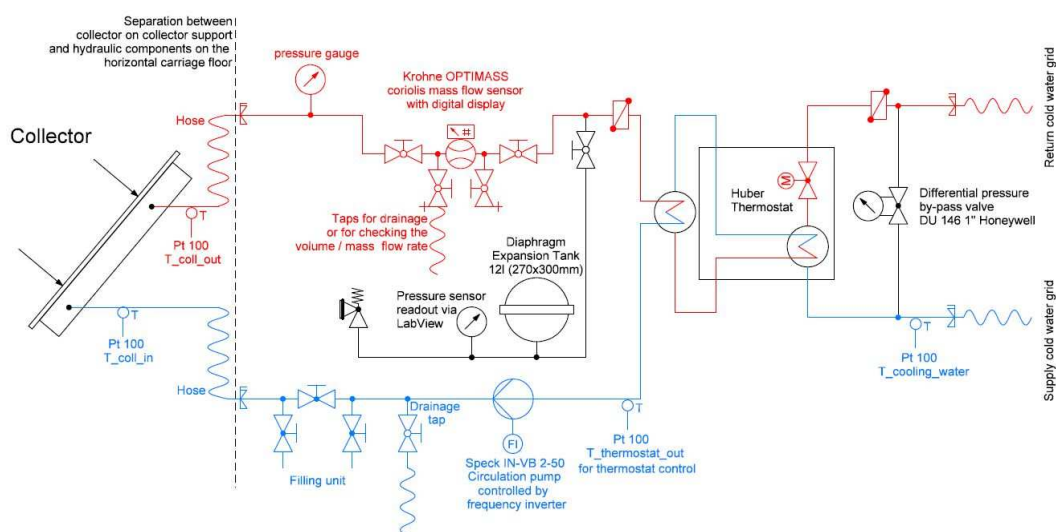
Obr. 3.13 Tepelná charakteristika FVT kolektoru v režimu bez odběru elektrické energie

3.4.2 Nejistota měření

Cílem experimentálního měření FVT kolektoru je stanovení parametrů křivky tepelné a elektrické účinnosti. Z tepelného hlediska existuje norma pro testování tepelných kolektorů EN ISO 9806, která definuje zkušební podmínky a požadavky na jednotlivé měřicí zařízení. Solární laboratoř na UCEEB ČVUT je akreditována na stanovení tepelného výkonu kapalinových solárních tepelných kolektorů podle normy EN ISO 9806, z které lze následně stanovit křivku tepelné účinnosti. Veškerým požadavkům uvedeným v normě EN ISO 9806 tedy solární laboratoř vyhovuje. FVT kolektor se zkouší zpravidla v rozsahu čtyř až pěti vstupních teplot do kolektoru, při udržování ustálených okolních (rychlost větru, sluneční ozáření a teplota okolního vzduchu) a provozních podmínek (hmotnostní průtok teplotonosné kapaliny a vstupní teplota teplotonosné kapaliny do kolektoru). V tab. 3.5 jsou uvedeny požadavky dodržení okrajových podmínek během měření ustáleného bodu. Schéma zapojení měřicí tratě je na obr. 3.14

Tab. 3.5 Požadavky na ustálené podmínky během měření dle ČSN ISO 9806

Parametr	Povolené kolísání během měření ustáleného bodu
Sluneční ozáření	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
Teplota teplotnosné kapaliny	$\pm 0,1 \text{ K}$
Hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny	$\pm 1 \%$
Rozdíl vstupní a výstupní teploty teplotnosné kapaliny	$\pm 0,05 \text{ K}$
Teplota teplotnosné kapaliny na výstupu z kolektoru	$\pm 1,5 \text{ K}$



Obř. 3.14 Schéma zapojení měřicí tratě pro stanovení tepelného výkonu FVT kolektoru v Solární laboratoři UCEED ČVUT

Pro stanovení křivky tepelné účinnosti je nutné nejprve stanovit regresní parametry křivky η_0 , a_1 , a_2 , které se zpravidla uvádí do technického listu solárních tepelných kolektorů či FVT kolektorů. Vztah pro stanovení tepelné účinnosti FVT kolektoru pomocí regresních parametrů křivky popisuje rovnice (3.38). Postup pro stanovení nejistoty za ustálených podmínek vycházel z postupu popsáního v normě EN ISO 9806 [14], porovnání dvou možností pro stanovení nejistoty regresních parametrů křivky tepelné účinnosti jsou pak v [56].

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{t_m - t_e}{G} \right) - a_2 \cdot G \cdot \left(\frac{t_m - t_e}{G} \right)^2 \quad (3.38)$$

kde je

- η_0 účinnost FVT kolektoru při nulových tepelných ztrátách;
- a_1 lineární součinitel tepelné ztráty FVT kolektoru $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;
- a_2 kvadratický součinitel tepelné ztráty FVT kolektoru $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)]$.

Měření bylo provedeno pro 5 vstupních teplot, data byla zaznamenávána každých 30 s. Data použitá pro ustálený bod byla naměřena po dobu 10 minut. Pro každou vstupní teplotu byly využita naměřená data ze dvou ustálených bodů. Standardní nejistota typu B pro všechny veličiny je uvedena v tab. 3.6. Výsledná rozšířená nejistota pro stanovení křivky tepelné účinnosti je uvedena v tab. 3.7. Základní vztahy pro stanovení nejistoty jsou popsány níže, jejich rozšíření o nejistotu regresního stanovení koeficientů je blíže popsáno v EN ISO 9806 [14]. Z hlediska stanovení elektrického výkonu norma zatím nepopisuje žádné podrobné požadavky, pouze uvádí, že tepelný i elektrický výkon by měl být měřen v maximálním bodě elektrického výkonu. Stanovení nejistoty elektrické účinnosti bylo provedeno standardním postupem, nebyla využita metoda váhové regrese jako u postupu pro tepelnou účinnost, protože zatím neexistuje žádný ověřený postup. Vyznačené nejistoty experimentálního stanovení tepelné a elektrické účinnosti jsou zobrazeny na obr. 3.11 a obr. 3.12.

Tab. 3.6 Seznam přesností měřicích přístrojů a nejistot typu B

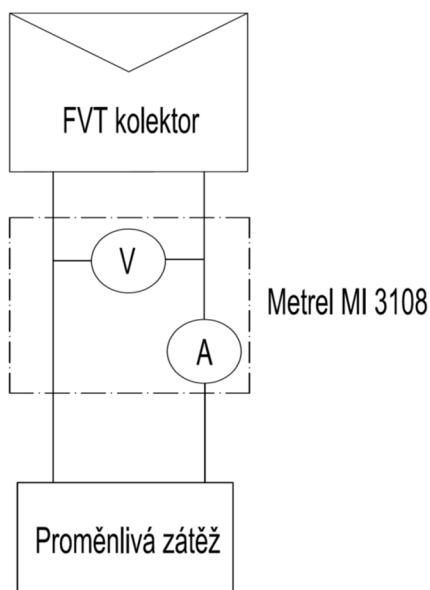
Parametr	Měřicí přístroj	Přesnost	Nejistota typu B
Sluneční ozáření	Kipp and Zonen SMP11-A	$\pm 1,35 \%$	0,008 %
Teplota kapaliny	Teplotní sonda PT100	$\pm 0,05 \text{ K}$	0,03 K
Hmotnostní průtok kapaliny	Krohne-Optimass 7000 / MFC300	$\pm 0,0035 \%$	0,002 %
Teplota vzduchu	Teplotní sonda PT100	$\pm 0,05 \text{ K}$	0,03 K
Plocha	Kalibrovaný metr	$\pm 1 \text{ mm}$	0,0008 mm
Elektrický výkon	Metrel MI 3108	$\pm 2,5 \%$	0,014 %

Tab. 3.7 Rozšířená nejistota pro křivku tepelné účinnosti

Parametr	Jednotka	η	$\eta + \sigma$	$\eta - \sigma$
η_0	-	0,639	0,644	0,634
a_1	W/m ² .K	4,644	4,395	4,894
a_2	W/ m ² .K ²	0,007	0,004	0,010

Měření elektrického výkonu bylo stejně jako u tepelné části provedeno pro pět různých teplot teplotnosné kapaliny na vstupu do FVT kolektoru. FVT kolektor byl napojen na proměnlivou zátěž (obr. 3.15 a obr. 3.16), díky které bylo možno nastavit pro každý bod maximální výkon FVT kolektoru v daném měřeném bodě. Po nastavení bodu byla

proměřena volt-ampérová charakteristika kolektoru zařízením Metrel MI 3108. Výstupem ze zařízení Metrel MI 3108 je elektrický výkon FV pole.



Obr. 3.15 Zapojení pro měření elektrického výkonu FVT kolektoru



Obr. 3.16 Elektrické zapojení FVT kolektor na zadní straně (vlevo) a elektrická zátěž ZSAC a měřicí zařízení Metrel MI 3108 (vpravo)

Nejistota měření charakterizuje interval hodnot měřené veličiny okolo výsledku měření, kde je očekáváno, že bude skutečná hodnota měřené veličiny. Nejistoty se vyhodnotily standardně jak pro chyby náhodné (standardní nejistota typu A), tak pro chyby systematické (standardní nejistota typu B). Na základě naměřených data byla stanovena standardní nejistota typu A podle vztahu

$$u_{A,x} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (3.39)$$

kde je

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot [-];

x_i jednotlivé naměřené hodnoty [-];

N počet měření [-].

Nejistota typu B pro měřicí čidlo z_i byla stanovena podle vztahu

$$u_{B,x,z_i} = \sqrt{\frac{z_i^2}{3}} \quad (3.40)$$

kde z_i je přesnost měřicích čidel. V případě, že je více zdrojů nejistoty typu A a nejistoty typu B, vztah pro standardní nejistotu typu B se stanoví podle

$$u_{B,x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{B,x,z_i}^2} \quad (3.41)$$

kde n představuje další nezávislé zdroje nejistoty typu A a B. Kombinovaná nejistota u je následně stanovena z nejistoty typu A a typu B.

$$u = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 (u_{A,x}^2 + u_{B,x}^2)} \quad (3.42)$$

Rozšířená nejistota se pak stanoví podle vztahu

$$\sigma = ku \quad (3.43)$$

kde k je součinitel rozšíření a odpovídá 95 % spolehlivosti, že naměřená hodnota leží v intervalu $(x - \sigma, x + \sigma)$. Rozšířené nejistoty jsou stanoveny pro jednotlivé body na základě naměřených hodnot. Jako příklad je zde uvedena nejistota experimentálního stanovení elektrické účinnosti v jednom měřeném bodě, viz tab. 3.8. Nejprve byl naměřena celková plocha FVT kolektoru, ke které je účinnost vztažena. Poté byl každém ustáleném bodě naměřen elektrický výkon FVT kolektoru. Proběhlo 10 odečtů v časovém intervalu přibližně 4 minuty. Vzhledem k nepopsané metodice vyhodnocení nejistot měření elektrického výkonu FVT kolektoru. Byla vyhodnocena pouze nejistota pro každý ustálený bod, nikoliv pro regresní parametry jako tomu je u tepelné účinnosti. Experimentálně stanovená elektrická účinnost pro měřený bod v tab. 3.8 byla 7,4 %. Pro hodnotu elektrické účinnosti platí tedy zápis $7,4 \pm 0,4$ %, což odpovídá relativní odchylce ± 5 %.

Tab. 3.8 Nejistota stanovení elektrické účinnosti pro jeden měřený bod

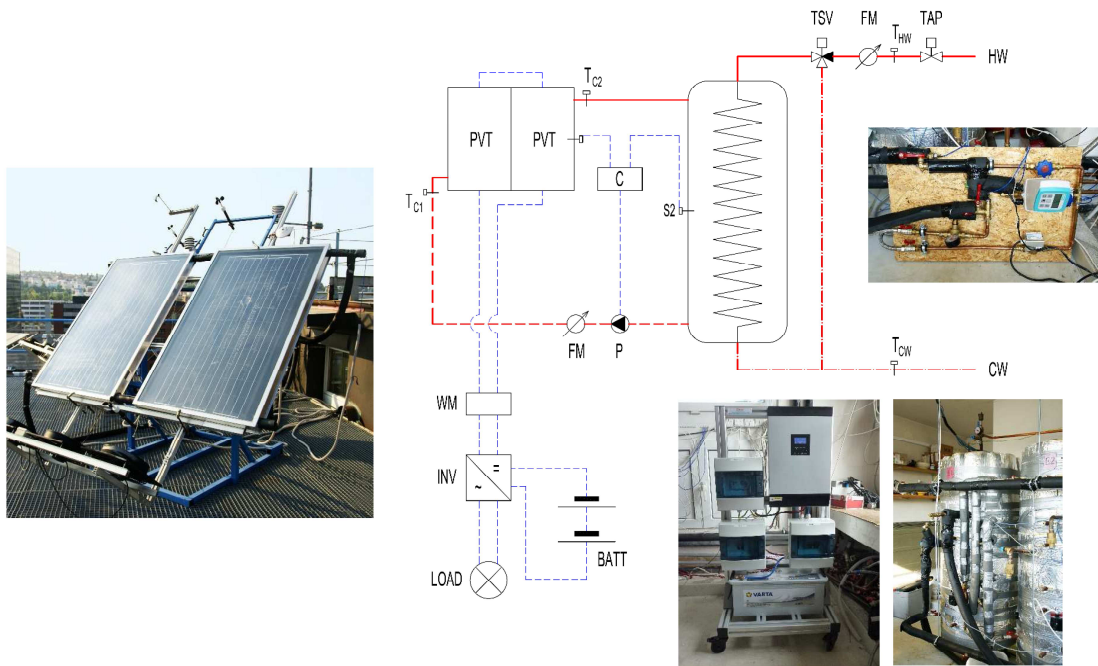
x_j	\bar{x}	u_a	u_b pro elektrický výkon	u_b pro měření plochy kolektoru	u_b	u	σ
W	W	W	W	m	%	%	%
112,42	112,61	0,17	0,01	0,001	0,01	0,2	0,4
113,32							
112,31							
112,75							
112,11							
113,27							
113,12							
111,83							
111,97							
112,96							

3.4.3 Validace modelu během proměnlivých venkovních podmínek

Vzhledem k vytvoření dynamického modelu v rámci disertační práce, bylo nezbytné provést i validaci za proměnlivých provozních a klimatických podmínek. Experimentální měření za dynamických podmínek bylo provedeno v Solární laboratoři na Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Pro tyto účely byla vybudována měřicí trať napodobující reálnou instalaci solární tepelné soustavy. Dva FVT kolektory produkují jak tepelnou energii, která se ukládá v zásobníku teplé vody, tak elektrickou energii. FVT kolektory byly elektricky zapojeny do série na hybridní střídač s akumulátory elektrické energie. Elektrická energie z akumulátorů byla odebírána kontinuálně, aby nedošlo k odstavení odběru elektrické energie z FVT kolektorů z důvodu plného nabití akumulátorů. Elektrická energie je po nabití baterií následně mařena žárovkou, jako elektrickou zátěží.

Solární soustava je určena pro přípravu teplé vody v centrálním zásobníku tepla (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 propojené se zásobníkem napřímo, což v praxi není zvykem. Nicméně pro účely testování FVT kolektorů za reálných podmínek je to dostačující. Solární soustavu tvoří dva neselektivní FVT kolektory (celková plocha je 3,42 m²), základní ovládací prvky (oběhové čerpadlo, uzavírací a pojistné armatury, snímače teploty a tlaku) a potrubní rozvody s tepelnou izolací. Solární kolektory jsou instalovány na kovové konstrukci s

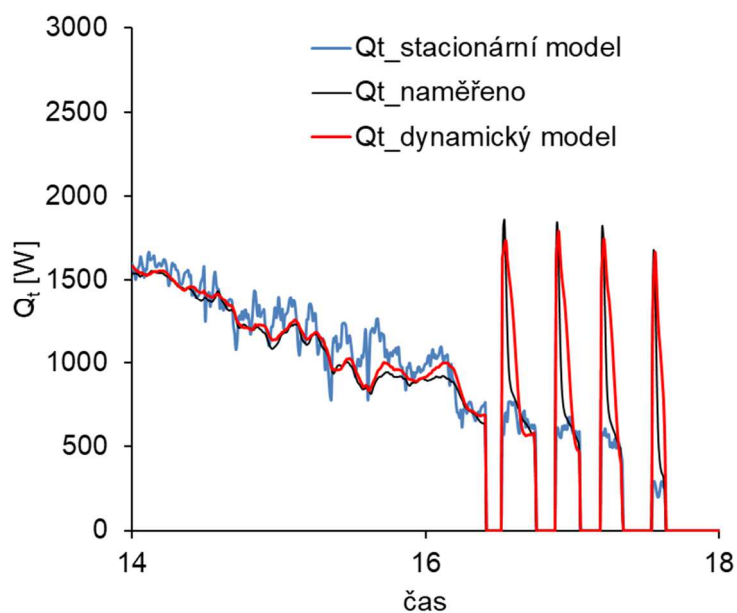
orientací na jih. Sklon FVT kolektorů je 45°. Průtok teplotnosné kapaliny (vody) solární soustavou je 180 l/h a je nastaven na seřizovacím ventilu. Provoz solární soustavy je ovládán centrálním regulátorem. Regulace pracuje na základě porovnávání teploty v zásobníku tepla a FVT kolektoru. Regulátor sepne oběhové čerpadlo, pokud teplota v kolektorech dosáhne hodnoty vyšší než v zásobníku o nastavený teplotní rozdíl. Zároveň regulátor umožňuje měnit otáčky oběhového čerpadla. Při překročení nastavené maximální teploty zásobníku, případně pokud je na snímači teploty kolektorů překročena hodnota 130 °C, je oběhové čerpadlo vypnuto. Odběr teplé vody byl uvažován 200 l/den s nastaveným průtokem 5 l/min. Vnitřním okruhem, který propojuje zásobník teplé vody a řád, je emulován odběr teplé vody v domácnosti, viz obr. 3.17. Teplá voda je následně vypuštěna do odpadu. Elektromagnetický ventil instalovaný na vnitřním okruhu otevírá okruh pro přípravu teplé vody podle zvoleného odběrového profilu. 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. Tepelný a elektrický výkon byl validován na dvou FVT kolektorech s neselektivním absorberem ($\alpha_{\text{abs}} = 0,93$, $\epsilon_{\text{abs}} = 0,85$). Byla měřena klimatická data (teplota okolního vzduchu, dopadlé sluneční ozáření na plochu FVT kolektoru, rychlost větru), objemový průtok teplotnosné kapaliny kolektorem a teploty teplotnosné kapaliny na vstupu a výstupu z FVT kolektoru. Data byla měřena s časovým krokem 30 s. Analýza naměřených dat byla provedena pro 6 dní od 18. 5. 2016 do 23. 5. 2016. Pro měření jednotlivých veličin byly využity následující přístroje: pyranometr Kipp & Zonen (type CMP 6), watmetr Hioki Power HiTester-3334, indukční objemový průtokoměr TCM 142/02/3715, anemometr a teplotní sensory PT100.



Obr. 3.17 Solární soustava s FVT kolektory (včetně fotografií)

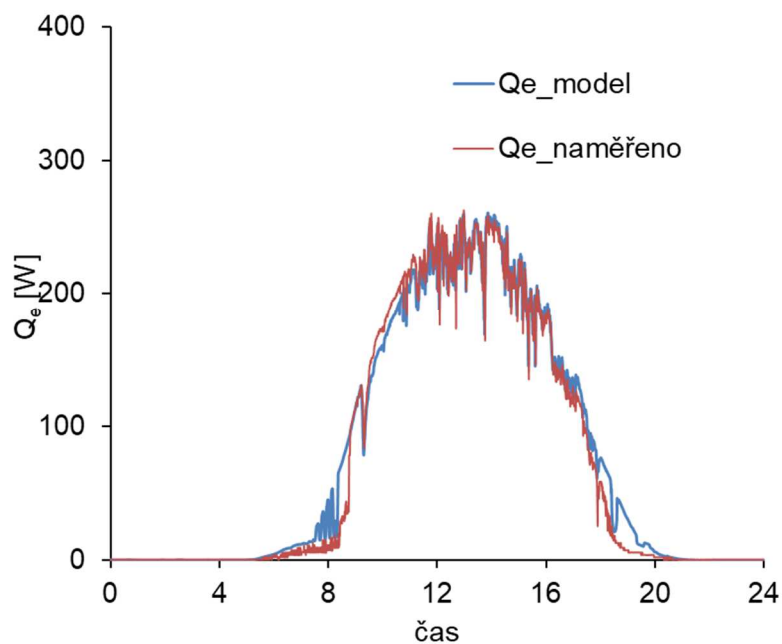
Experimentální instalace byla v provozu jako běžná solární tepelné soustava, proto docházelo k častému cyklování oběhového čerpadla. Během jasného dne (obr. 3.18) lze vidět výkonové špičky v ranních a večerních hodinách způsobené spínáním oběhového čerpadla na základě solární regulace. V případě oblačného dne oběhové čerpadlo cykluje v průběhu celého dne. Cyklování oběhového čerpadla během oblačného dne je způsobeno vlivem nízké hladiny slunečního ozáření.

Právě výkonové špičky jsou vhodné k porovnání obou modelů. Stacionární model totiž není schopen přesně stanovit změnu teploty teplotnosné kapaliny v kolektoru v období bez průtoku. Na obr. 3.18 je vyneseno porovnání průběhu dynamického a stacionárního modelu během určité části dne. Z průběhu je patrné, že rozdíl mezi dynamickým a stacionárním modelem ve chvíli, kdy sepne čerpadlo, je značný, neboť stacionární model neuvažuje tepelnou setrvačnost kolektoru. Dynamický model je schopen zohlednit výkonové špičky a přibližně odpovídá naměřeným datům. Mezi 14.00 až 16.00 je vidět, že dynamický model je v dobré shodě s naměřenými daty. Výkon stanovený stacionárním modelem v této periodě silně kolísá (silně závisí na dopadlém slunečním záření).



Obr. 3.18 Porovnání průběhu naměřeného tepelného výkonu s teoreticky stanoveným (22. 5. 2016)

Na obr. 3.19 je vyneseno porovnání teoreticky stanoveného elektrického zisku stacionárním modelem a experimentálně naměřeného. Rozdíl mezi dynamickým a stacionárním modelem je zanedbatelný. Na obr. 3.18 je vidět špatná shoda s naměřenými daty zejména v období ranních a večerních hodin. Jednou z možných příčin může být, že hybridní střídač se sledovačem maximálního bodu výkonu pracoval v ranních a večerních hodinách mimo svůj rozsah, proto byl naměřený výkon nižší než výkon teoreticky stanovený. Další možná příčina je, že docházelo k nepatrnému stínění jednoho stringu FV části. Odchyly pro stanovení elektrického zisku dosahovaly hodnot až 15 %. Dále model pro výpočet elektrického výkonu neuvažuje homogenně rozloženou teplotu FV článků po celé ploše kolektoru, což může také negativně ovlivnit přesnost výpočtu. Reálně může být teplota v okolí vstupu do kolektoru až o 5 K nižší oproti oblasti v okolí výstupu z kolektoru.



Obr. 3.19 Porovnání průběhu naměřeného elektrického výkonu s teoreticky stanoveným (22. 5. 2016)

V tab. 3.9 jsou uvedeny modelem stanovené denní energetické zisky a stanovené měřením na solární tepelné soustavě. Denní tepelný zisk Q_t byl stanoven dynamickým (dyn) i stacionárním (stac) modelem. Denní elektrický zisk Q_e byl stanoven pouze na základě stacionárního modelu. Kromě toho je v tab. 3.9 uveden naměřený denní tepelný $Q_{t,nam}$ a elektrický zisk $Q_{e,nam}$.

Tab. 3.9 Energetická bilance FVT kolektorů získaná modelem a stanovená z měření

Datum	$Q_{t,dyn}$	$Q_{t,stac}$	$Q_{e,stac}$	$Q_{e,nam}$	$Q_{t,nam}$
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
18. 5. 2016	3,2	1,8	1,0	0,9	2,9
19. 5. 2016	5,9	5,6	1,4	1,2	5,8
20. 5. 2016	5,2	4,2	1,3	1,2	5,0
21. 5. 2016	6,4	6,0	1,5	1,4	6,5
22. 5. 2016	9,0	9,2	1,8	1,8	9,1
23. 5. 2016	5,8	5,8	1,3	1,2	5,8

V tab. 3.10 jsou uvedeny odchylky tepelných a elektrických zisků stanovených modelem a stanovených z měření. Největší odchylka od naměřených dat byla 18. 5.

2016, jednalo se o oblačný den, kdy docházelo k častému spínání oběhového čerpadla. Stacionární model se liší až o 37,5 % (dynamický o 8,5 %) oproti naměřeným datům. Naopak nejmenší odchylka byla v období jasného dne (22. 5. 2016), kdy se stacionární model liší o 1,6 % (dynamický o 0,2 %) oproti naměřeným datům. Odchyly za celé období šesti dnů vycházejí následovně: $\Delta Q_{t,dyn} = 1,2 \%$, $\Delta Q_{t,stac} = 6,9 \%$, $\Delta Q_{e,stac} = 8,1 \%$. Ze srovnání vyplývá významně lepší shoda energetických bilancí mezi experimentem a dynamickým modelem v době proměnlivých klimatických podmínek, v případě jasného dne není odchylka v denních ziscích od stacionárního modelu tolik významná. 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 výpočty jsou výsledky dostačující. V rámci disertační práce byly publikovány články zabývající se právě porovnáním dynamického [102] a stacionárního modelu [105].

Tab. 3.10 Odchyly denních tepelných a elektrických zisků od naměřených dat

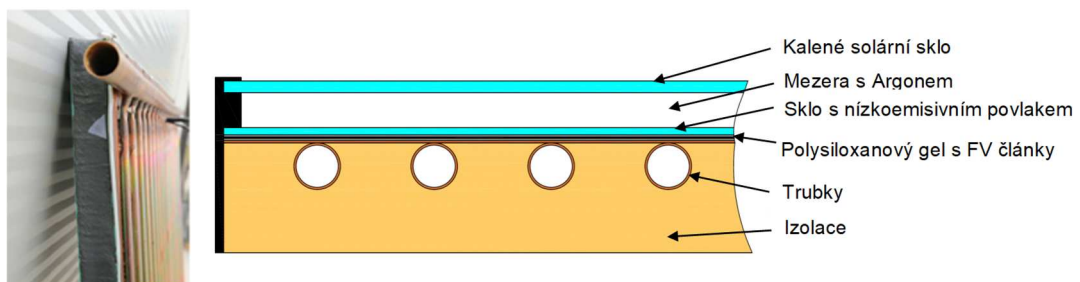
Datum	$\Delta Q_{t,dyn}$	$\Delta Q_{t,stac}$	$\Delta Q_{e,stac}$
18. 5. 2016	8,5 %	-37,5 %	12,3 %
19. 5. 2016	1,5 %	-4,2 %	15,9 %
20. 5. 2016	4,7 %	-15,2 %	11,0 %
21. 5. 2016	-1,5 %	-7,8 %	5,6 %
22. 5. 2016	0,2 %	-1,6 %	3,8 %
23. 5. 2016	-0,5 %	0,7 %	3,7 %

4 KONSTRUKCE FVT KOLEKTORU A JEJÍ OPTIMALIZACE

V následující kapitole bude nejprve představen nový koncept zaskleného FVT kolektoru. Následně bude představena zvolená metoda pro optimalizaci a její okrajové podmínky. V jednotlivých podkapitolách je optimalizován vždy jeden z vybraných konstrukčních prvků FVT kolektoru.

4.1 Koncept zaskleného FVT kolektoru

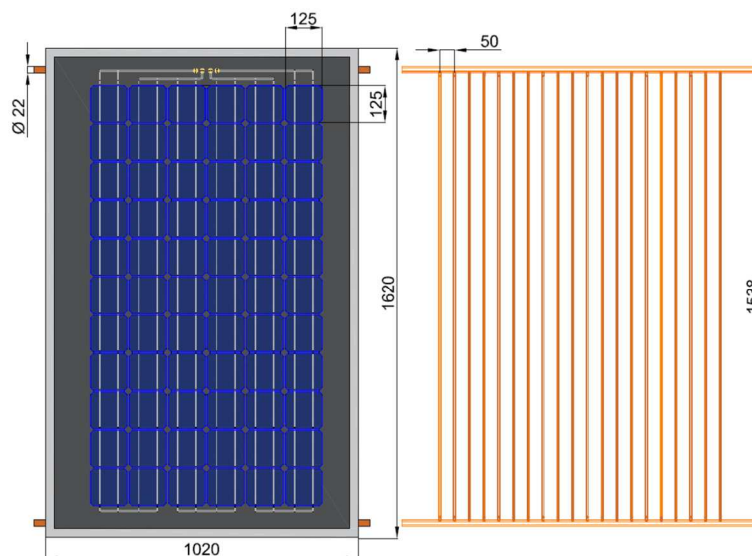
Na základě optimalizačních analýz bylo zhotoveno několik prototypů FVT kolektorů. FVT kolektory se lišily zejména rozdílnými geometrickými a optickými vlastnostmi FVT absorbéru. V této podkapitole jsou popsány a představeny dva finální prototypy FVT kolektoru, jeden jako samostatné provedení a jeden 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 [57]. Jedná se o FVT kolektor s dvojitým zasklením, přičemž jedno ze zasklení je umístěno přímo na povrchu absorbéru [112], 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 stringeru, viz obr. 4.3. 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.



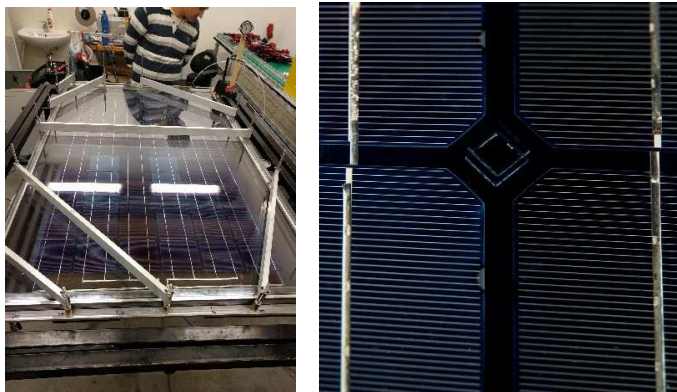
Obr. 4.2 Výkres FVT kolektoru



Obr. 4.3 Měděný plech s PVC folií (vlevo), FV stringer (uprostřed), pokládání FV stringů (vpravo)

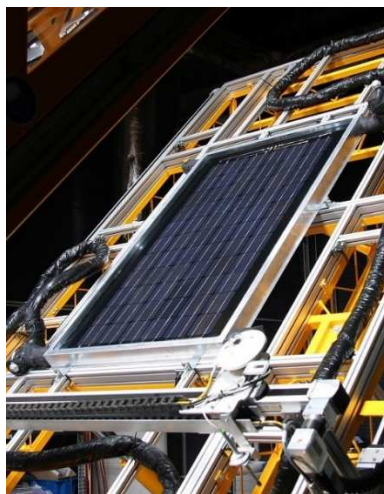
Prefabrikované dvojité zasklení vyplněné argonem bylo následně položeno na FVT absorbér s rozloženými FV články, viz obr. 4.4. Mezera mezi dvojitým zasklením a FVT absorbérem je vymezena skleněnými distančními čtverečky, viz obr. 4.4. Takto uchycené spojení dvojitého zasklení a plechu s FV články se 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. 4.4 Spojení dvojitého zasklení (vlevo), distanční element mezi zasklením a měděným plechem (vpravo)

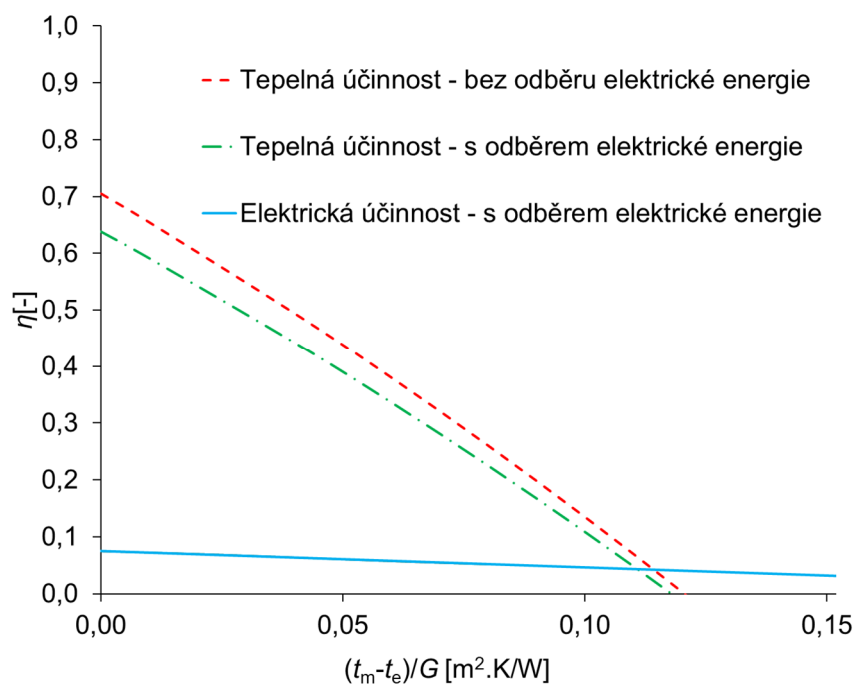
Vyrobený FVT kolektor byl následně experimentálně měřen za ustálených podmínek v Solární laboratoři UCEEB ČVUT, viz obr. 4.5. Křivky tepelné a elektrické účinnosti otestované ve dvou režimech, bez odběru elektrické energie a s odběrem elektrické energie, jsou zobrazeny na obr. 4.6.



Obr. 4.5 FVT kolektor během experimentálního měření

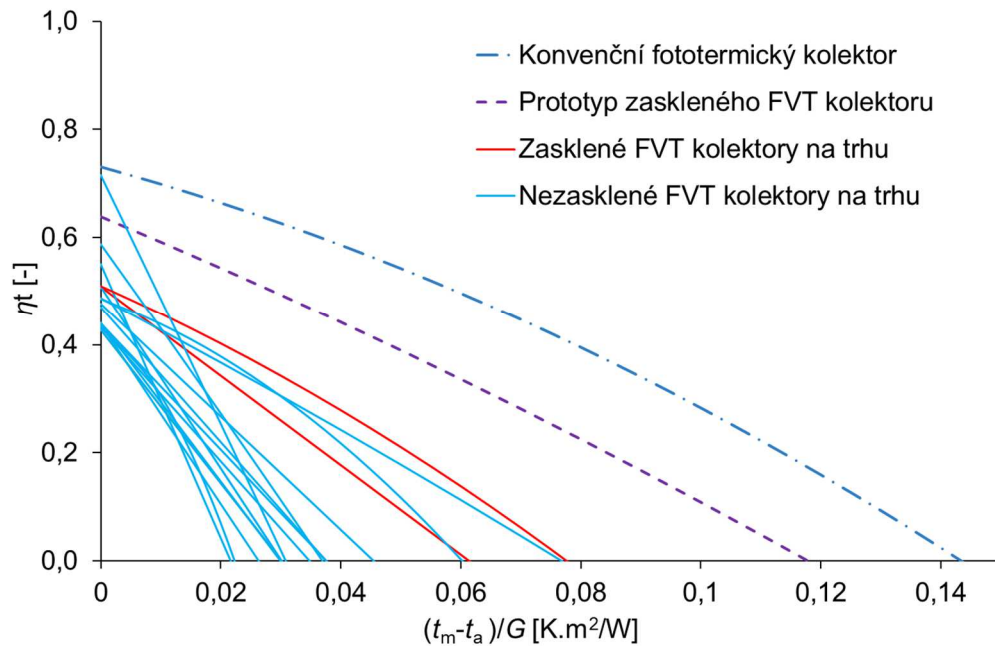
V režimu s odběrem elektrické energie byla stanovena tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách vztažena k celkové ploše 64 %. Elektrická účinnost odpovídající bodu při nulových tepelných ztrátách byla stanovena 7,5 %. Tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách v režimu bez odběru elektrické energie byla stanovena 71 %. Okrajové podmínky pro měření v režimu s odběrem elektrické energie byly následující: sluneční ozáření na plochu kolektoru 915 W/m^2 , hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 117 kg/h , sklon kolektoru 45° , teplota okolního vzduchu $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Okrajové podmínky pro měření bez odběru elektrické energie byly následující:

sluneční ozáření na plochu kolektoru 918 W/m^2 , hmotnostní průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 122 kg/h , sklon kolektoru 45° , teplota okolního vzduchu $18,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

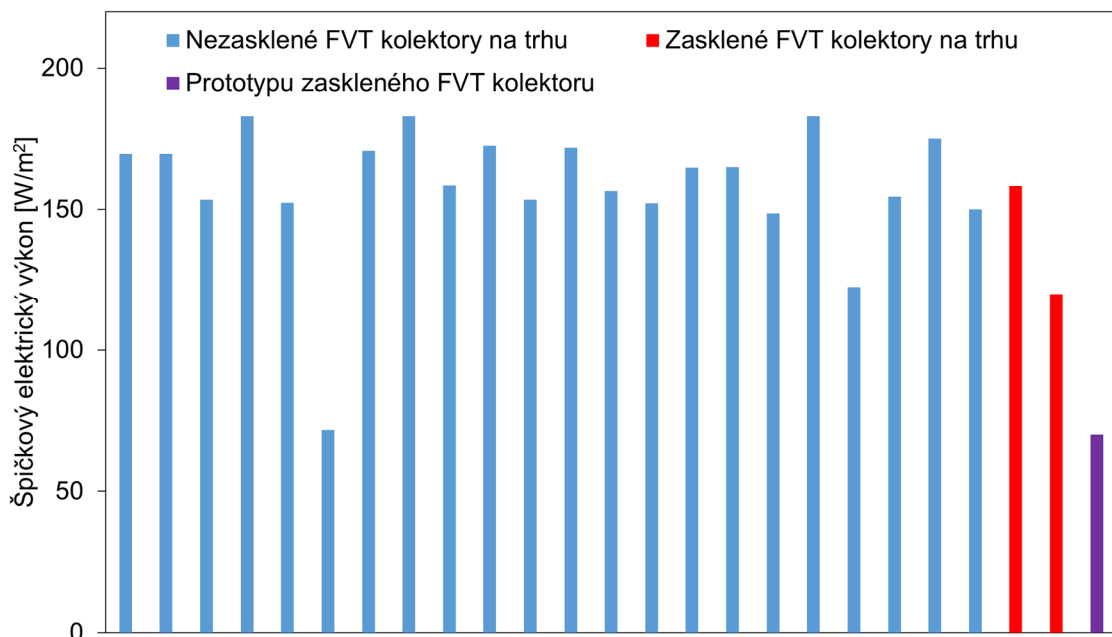


Obr. 4.6 Tepelná a elektrická účinnost FVT kolektoru vztahena k celkové ploše kolektoru

Na obr. 4.7 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. 4.8), 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. 4.7 Porovnání tepelné účinnosti prototypu FVT kolektoru s FVT kolektory na současném trhu



Obr. 4.8 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. 4.9). 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 [95]. 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).

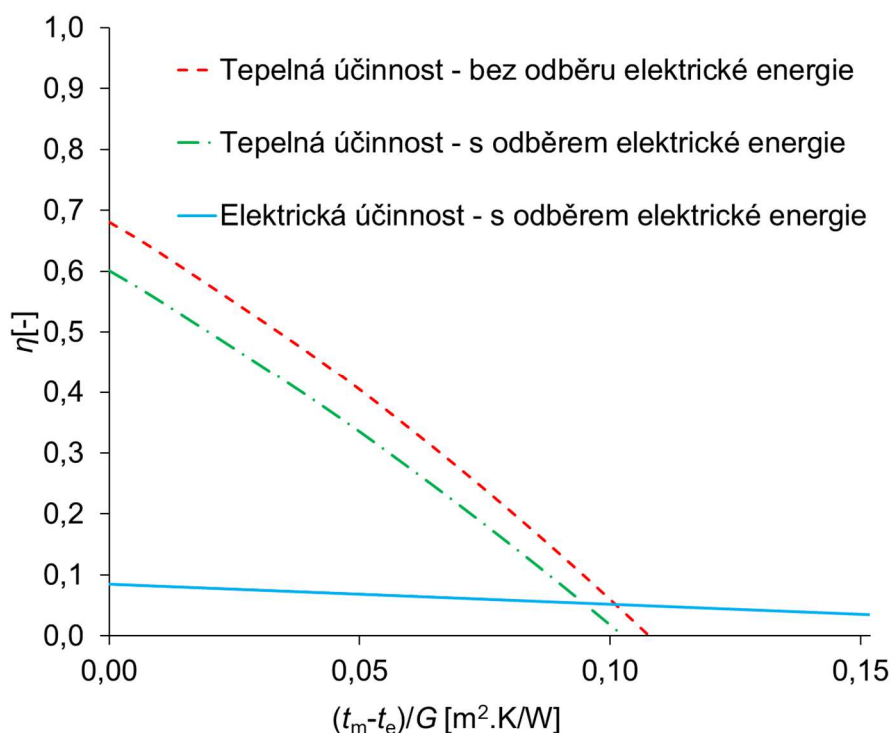


Obr. 4.9 Energeticky aktivní fasádní modul LOP s integrovaným FVT kolektorem (vlevo) a fasádní modul s integrovaným FVT kolektorem umístěným na solárním simulátoru (vpravo)

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, viz kapitola 5.1.2.

Na obr. 4.10 jsou zobrazeny křivky tepelné a elektrické účinnosti pro fasádní modul LOP s integrovaným FVT kolektorem. Hodnota tepelná účinnost při nulových tepelných ztrátách vztahena 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 teplotnosné 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 teplotnosné kapaliny kolektorem 107 kg/h , sklon kolektoru 90° , teplota okolního vzduchu $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 4.10 Tepelná a elektrická účinnost FVT kolektoru integrovaného do fasádního modulu LOP vztahovaná k celkové ploše kolektoru

4.2 Okrajové podmínky optimalizace FVT kolektoru

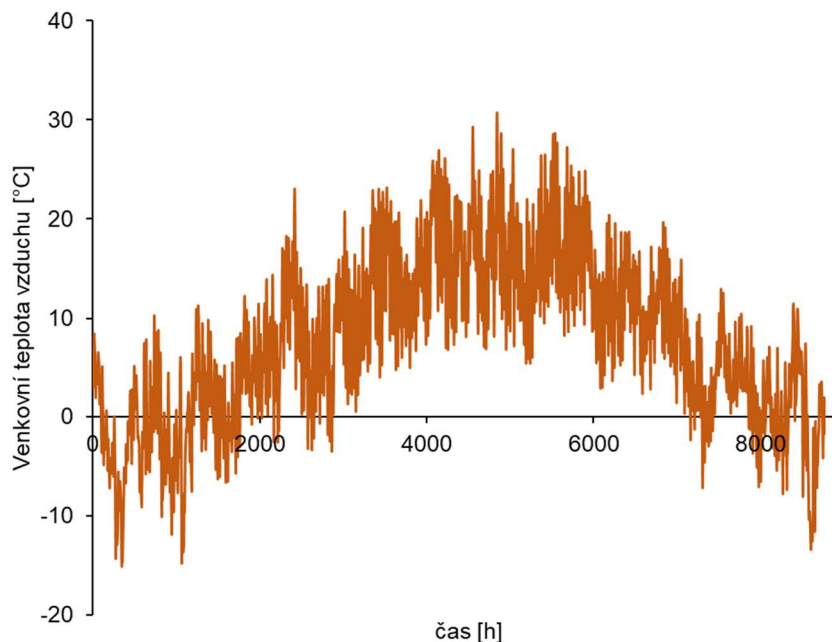
Matematický model lze výhodně využít pro analýzu vlivu konstrukčních parametrů ještě nerealizovaného prototypu FVT kolektoru na jeho výkon a účinnost a provést optimalizaci konstrukčního návrhu. Umožňuje analyzovat vliv změn jednotlivých konstrukčních parametrů kolektoru na elektrický a tepelný výkon FVT kolektoru.

Jako simulační nástroj byl zvolen TRNSYS (Transient System Simulation Tool) [84], který je v oblasti dynamických simulací energetických systémů s obnovitelnými zdroji energie velmi často využíván. Z výsledků ročních simulací je možné získat velké

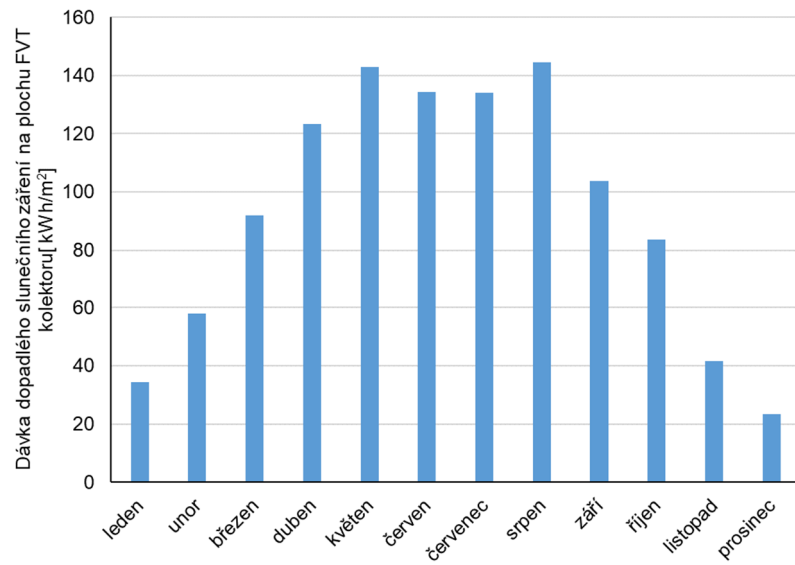
množství informací o chování celého energetického systému. Výsledky mohou sloužit nejen k optimalizaci konstrukce ale k optimalizaci jednotlivých komponent energetického systému či k regulaci energetického systému.

V následující kapitole je provedeno několik optimalizačních analýz konkrétní konstrukce FVT kolektoru. V této kapitole kromě publikovaných výsledků bude prezentována optimalizační analýza pro FVT kolektor podle parametrů uvedených v tab. 4.1. V rámci disertační práce byla uvažovány jednotné okrajové podmínky pro všechny roční simulace zaměřené na optimalizaci konstrukce FVT kolektoru. Byla uvažována konstantní provozní teplota v kolektoru $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a průtok teplotnosné kapaliny kolektorem 50 kg/hod.m^2 . Sklon FVT kolektoru byl uvažován 45° s orientací na jih. Simulace byla provedena pro klimatické podmínky Prahy. Jednalo se o typický meteorologický rok z databáze Meteororm, který je součástí knihovny simulačního prostředí TRNSYS. Na obr. 4.11 je zobrazen roční průběh venkovní teploty vzduchu a na obr. 4.12 je měsíční průběh dávky slunečního ozáření.

Dále budou v rámci optimalizační analýzy porovnány křivky tepelné a elektrické účinnosti pro odlišná konstrukční provedení FVT kolektoru. Okrajové podmínky pro stanovení křivek tepelné a elektrické účinnosti jsou následující: průtok kolektorem teplotnosné kapaliny $0,02\text{ kg/s.m}^2$, teplota okolního vzduchu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, sluneční ozáření na plochu FVT kolektoru 1000 W/m^2 , rychlost větru 3 m/s .



Obr. 4.11 Roční hodinový průběh venkovní teploty vzduchu pro klimatické podmínky v Praze (Meteororm)



Obr. 4.12 Měsíční dávky dopadlého slunečního záření na plochu FVT kolektoru

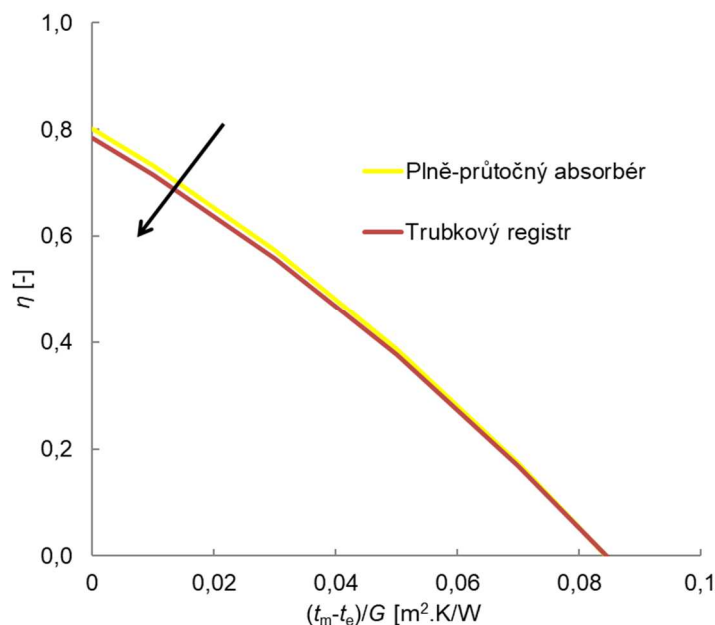
Tab. 4.1 Základní parametry optimalizované konstrukce FVT kolektoru

Označení	Hodnota	Jednotka	Název
A_G	1,65	m ²	celková plocha FVT kolektoru
A_a	1,55	m ²	plocha apertury
A_b	0,02	m ²	plocha boků kolektoru
A_{PV}	1,03	m ²	plocha FV části
δ_p	24	mm	mezera mezi zasklením a absorbérem
δ_z	5	mm	mezera mezi absorbérem a zadní izolací
δ_{p1-p2}	4	mm	tloušťka zasklení
δ_{b1-b2}	20	mm	tloušťka boční izolace
δ_{z1-z2}	30	mm	tloušťka zadní izolace
T	0,92	-	propustnost krycího zasklení
α_{abs}	0,86	-	pohltivost FVT absorbéru
$\epsilon_{abs,p}$	0,30	-	emisivita přední strany FVT absorbéru
$\epsilon_{abs,z}$	0,9	-	emisivita zadní strany FVT absorbéru
ϵ_{p1}	0,85	-	emisivita venkovní strany zasklení
ϵ_{p2}	0,85	-	emisivita vnitřní strany zasklení
ϵ_{z1}	0,5	-	emisivita vnější strany rámu kolektoru
ϵ_{z2}	0,5	-	emisivita vnitřní strany izolace
λ_{iz}	0,04	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti izolace
$\lambda_{p1/p2}$	0,8	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti zasklení
W	50	mm	rozteč
D_i	7,2	mm	vnitřní průměr trubky
δ_{abs}	0,2	mm	tloušťka plechu tepelného výměníku
a	3	mm	výška spoje trubka-plech
b	1	mm	šířka spoje trubka-plech
n	20	-	počet trubek v registru
λ_{abs}	350	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti plechu
λ_{spoje}	350	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti spoje
L_{trubky}	1,515	m	délka trubky trubkového registru
γ_{ref}	0,0044	%/K	teplotní součinitel elektrického výkonu
η_{ref}	0,14	-	referenční elektrická účinnost FVT absorbéru vztahena k ploše FV článku
λ_{gel}	0,15	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti zapouzdřovacího materiálu
d_{gel}	5	mm	tloušťka vrstvy zapouzdřovacího materiálu
λ_{FV}	150	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti FV článku
δ_{FV}	0,5	mm	tloušťka FV článků

4.3 Materiál a geometrie výměníku tepla (absorbéru)

První optimalizační analýza byla zaměřena na typ výměníku tepla FVT kolektoru. Jednou z velmi rozšířené konstrukce výměníku tepla je přivařený měděný trubkový registr na

měděnou desku. Přestože cena mědi je oproti ostatním použitelným materiálům značně vyšší, konstrukce z měděných trubek a měděné desky vykazuje dobré tepelné vlastnosti. Na základě matematického modelu bylo porovnáno použití běžného měděného výměníku skládajícího se z desky s trubkovým registrem (lamela-trubka) a plně-průtočného ocelového výměníku, viz obr. 4.13. Parametry plně-průtočného ocelového absorbéru byly: rozteč kanálků 34 mm, tloušťka absorbéru 2 mm, součinitel tepelné vodivosti absorbéru 80 W/m.K, hydraulický průměr kanálků 8 mm. Parametry absorbéru tvořeného trubkovým registrem přivařeným k měděnému plechu byly: rozteč trubek 50 mm, tloušťka absorbéru 0,2 mm, součinitel tepelné vodivosti absorbéru 350 W/m.K, průměr trubek 8 x 1 mm. Pokles křivky tepelné účinnosti FVT absorbéru s trubkovým registrem oproti plně průtočnému řešení není výrazný, viz obr. 4.13. Analýza potvrdila, že rozdíl křivky účinnosti mezi trubkovým registrem a plně smáčeným absorbérem je nepatrný, avšak hmotnost kolektoru s plně smáčeným absorbérem je výrazně vyšší [115]. První vyvinutý prototyp FVT kolektoru měl ocelový plně-průtočný výměník. Další vytvořené prototypy kolektoru byly již pouze s trubkovým registrem.



Obr. 4.13 Srovnání dvou různých druhů výměníků použitých pro FVT kolektor

Dále byla provedena analýza vlivu rozdílné konstrukce absorbéru na tepelný a elektrický zisk kolektoru. Analýza s již implementovaným modelem do TRNSYS byla zaměřena na další možné materiály výměníku. S tím, že všechny ostatní materiály výměníku byly uvažovány pro plně-průtočnou variantu. Tepelné výměníky FVT kolektorů jsou pravidla z kovových materiálů (měď, hliník, ocel), ale existují také FVT kolektory z plastových materiálů [66]. Pro analýzu byl využit referenční kolektor o parametrech, viz

tab. 4.1. Jediné parametry, které byly měněny, byla již zmíněná geometrie výměníku a tepelná vodivost jednotlivých variant, viz tab. 4.2.

Tab. 4.2 Vlastnosti analyzovaných výměníků

Materiál výměníku	Tloušťka	Rozteč	Součinitel tepelné vodivosti
	mm	mm	W/m.K
Měď	0,2	50	380
Hliník	1	35	160
Ocel	2	35	80
Polymer	2,5	35	0,5

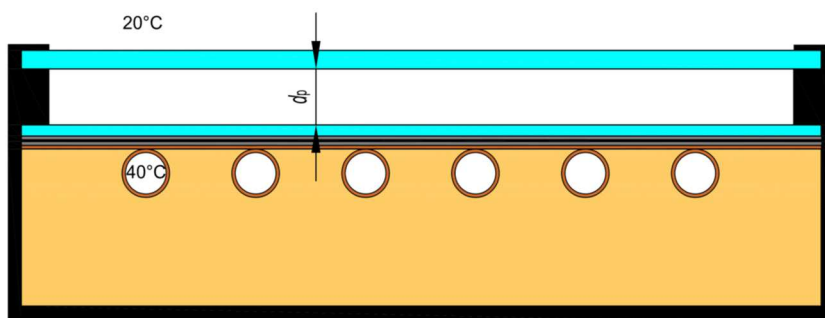
V tab. 4.3 jsou výsledky ročních simulací pro okrajové podmínky popsané v kapitole 4.2. Výsledky potvrdili předchozí závěry, že změnou materiálu a konstrukce nedosáhneme příliš velkého navýšení tepelného výkonu kolektoru. Nejvyšší nárůst by byl oproti referenční alternativě v případě hliníkového plně-průtočného výměníku, a to pouze o 1,8 %. Elektrický zisk kolektoru je mezi variantami srovnatelný.

Tab. 4.3 Výsledky analýzy různých alternativ výměníku vztažené k celkové ploše kolektoru ($A_G = 1,65 \text{ m}^2$)

Materiál výměníku	Typ výměníku	Měrný tepelný zisk	Měrný elektrický zisk
		kWh/m ² .rok	kWh/m ² .rok
Měď	lamela-trubka	333	74,4
Hliník	plně-průtočný	339	74,7
Ocel	plně-průtočný	338	74,7
Polymer	plně-průtočný	308	73,4

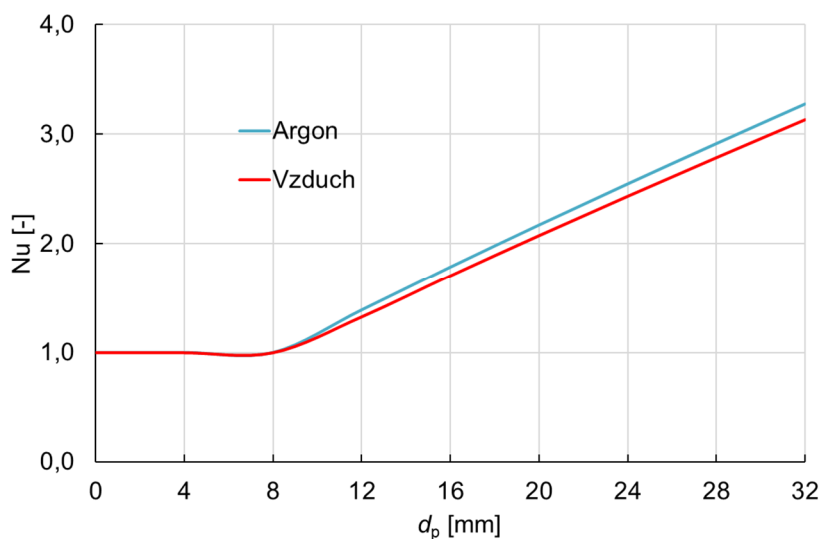
4.4 Mezera mezi FVT absorbérem a zasklením

Další optimalizační analýza konstrukce FVT kolektoru byla zaměřena na tloušťku vzduchové mezery (mezera mezi krycím zasklením a FVT absorbérem) a na druh použitého plynu v této mezeře, viz obr. 4.14. Jednou z možností, jak snížit tepelné ztráty přirozenou konvekcí je využití argonu místo vzduchu v mezeře mezi absorbérem a krycím zasklením. Byla provedena analýza průběhu Nusseltova čísla a součinitele prostupu tepla pro vstupní teplotu do kolektoru 40 °C a okrajové klimatické podmínky definované v kapitole 4.2. Parametry FVT kolektoru jsou uvedeny v tab. 4.1.

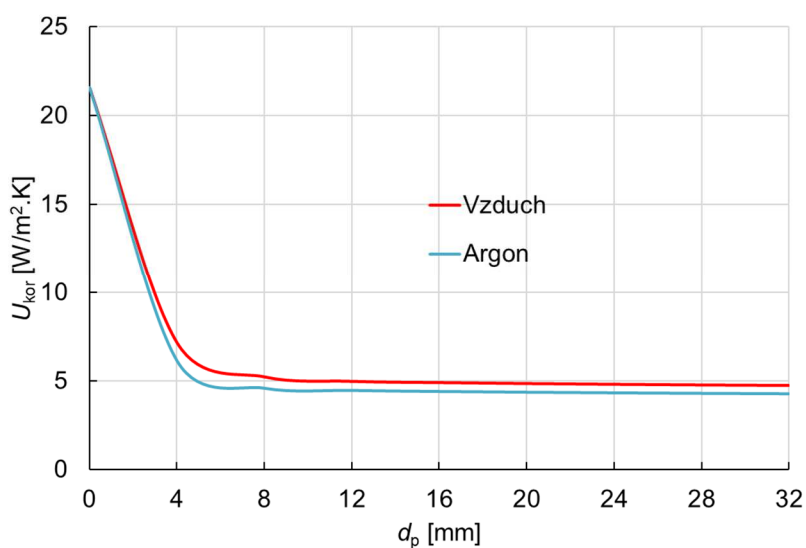


Obr. 4.14 Optimalizovaná mezera mezi FVT absorbérem a zasklením

Na obr. 4.15 je vynesena závislost Nusseltova čísla na tloušťce mezery mezi FVT absorbérem a krycím zasklením. Je zde možno vidět, že hodnota Nusseltova čísla začne narůstat až od tloušťky 8 mm, do této tloušťky je Nusseltovo číslo rovno jedné. Na obr. 4.16 je možné vidět závislost korigovaného součinitele prostupu tepla FVT kolektoru na tloušťce mezery, kde je možné vidět, že od 8 mm začíná být součinitel prostupu tepla konstantní. Přestože se zvyšující tloušťkou mezery roste Nusseltovo číslo, součinitel prostupu tepla FVT kolektoru se od určité hodnoty přestane měnit. Dále je možné vidět, že mezera s argonem vykazuje nižší součinitel prostupu tepla FVT kolektoru než vzduchová mezera, a tedy i nižší ztrátu tepla vlivem přirozené konvekce v mezeře. Součinitel prostupu tepla FVT kolektoru s argonem vykazuje pro tloušťky mezery menší než 8 mm o 14 až 16 % nižší hodnotu než mezera se vzduchem. Pro tloušťky větší než 8 mm je součinitele prostupu tepla FVT kolektoru s argonem v mezeře nižší o 10 %. Korelace termo-fyzikálních vlastností argonu byly vytvořeny na základě výpočetního nástroje CoolProp [5]. Z hlediska produkce elektrické energie je vliv tloušťky mezery zanedbatelný, což bude vidět i v ročních simulacích prezentovaných na konci této kapitoly.

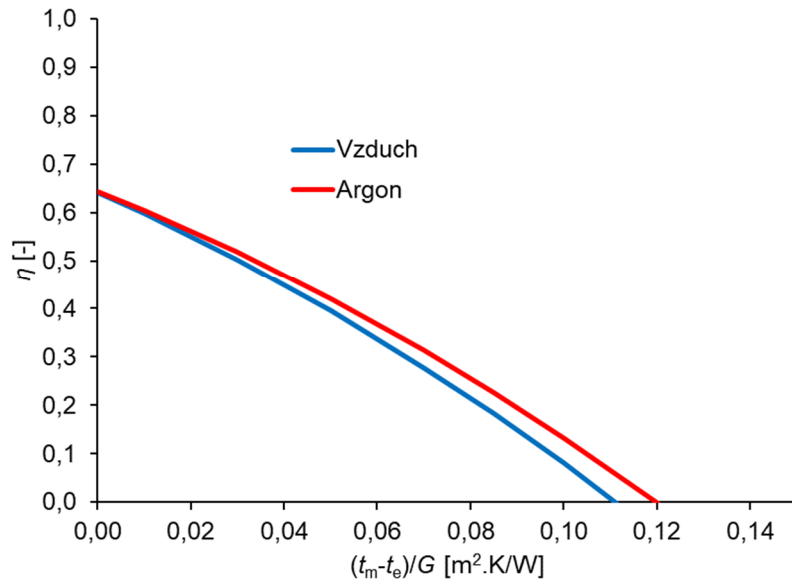


Obr. 4.15 Závislost Nusseltova čísla na tloušťce mezery

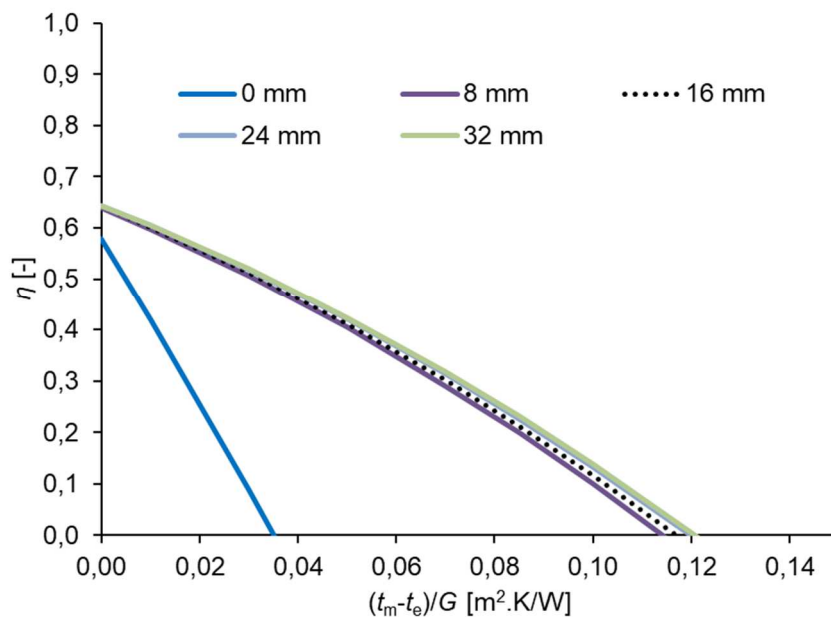


Obr. 4.16 Závislost součinitele prostupu tepla na tloušťce mezery

Bylo provedeno i porovnání tepelné účinnosti FVT kolektoru jak pro rozdílný plyn v mezeře (obr. 4.17), tak pro různé tloušťky mezery (obr. 4.18). Čím větší tloušťka mezery tím menší rozdíl mezi tepelnou účinností FVT kolektoru. Rozpoznatelný rozdíl mezi tloušťkami je do 24 mm, rozdíl mezi tloušťkou 24 mm a 32 mm je minimální.



Obr. 4.17 Porovnání tepelné účinnosti FVT kolektoru pro dva různé plyny v mezeře (tloušťka 24 mm)



Obr. 4.18 Porovnání tepelné účinnosti FVT kolektoru pro různé tloušťky mezery (uvažován argon v mezeře)

Opět byla provedena roční simulace pro klimatické podmínky Prahy s konstantní provozní teplotou na vstupu do kolektoru, aby bylo možné porovnat měrný roční tepelný a elektrický zisk. V tab. 4.4 je porovnání tepelného a elektrického zisku pro různé tloušťky mezery a pro dva různé plyny v této mezeře. U referenčního a prozatím finálního prototypu kolektoru je uvažována tloušťka mezery 24 mm. Nárůst tepelného zisku referenčního kolektoru oproti tloušťce 8 mm je 4 %, v případě 16 mm je nárůst 1,2 %.

Nižší tepelný zisk oproti tloušťce 32 mm je 0,9 %. Rozdíl mezi argonem a vzduchem v mezeře je z hlediska tepelného zisku pro referenční kolektor 9 %. Jak je možno vidět měrný elektrický roční zisk je srovnatelný jak u různých plynů v mezeře, tak z hlediska odlišné tloušťky mezery. Byla provedena obdobná optimalizační analýza, avšak pro konkrétní solární soustavu s FVT kolektory pro přípravu teplé vody v rodinné domě [107], jejíž výsledky jsou srovnatelné s hodnotami v tab. 4.4.

Tab. 4.4 Výsledky analýzy variant tlouštěk mezery (zisky jsou vztažené k celkové ploše FVT kolektoru)

Plyn v mezeře	Tloušťka mezery	Měrný tepelný zisk	Měrný elektrický zisk
		kWh/m ² .rok	kWh/m ² .rok
-	0 mm	22	76,9
Argon	8 mm	320	74,4
Argon	16 mm	329	74,4
Argon	24 mm	333	74,4
Argon	32 mm	336	74,4
Vzduch	8 mm	293	74,5
Vzduch	16 mm	305	74,5
Vzduch	24 mm	309	74,5
Vzduch	32 mm	312	74,5

4.5 Nízkoemisivní povlak na povrch FVT absorbéru

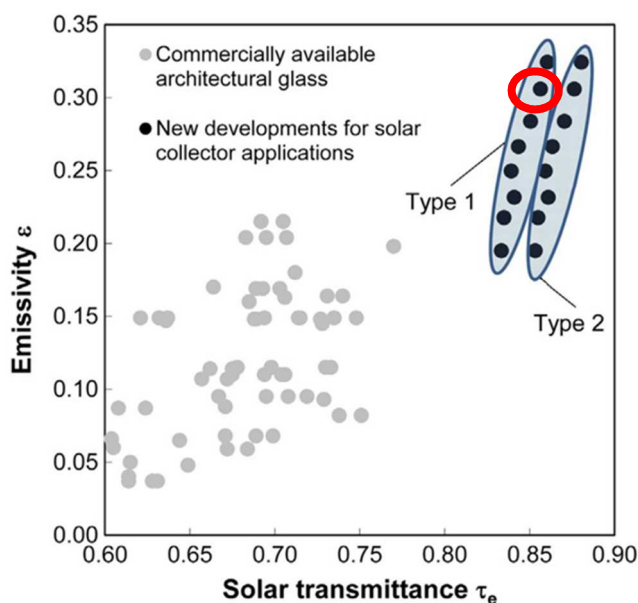
Důležitým konstrukčním prvkem z hlediska výrazného navýšení tepelného výkonu FVT kolektoru je aplikace nízkoemisivního povlaku na povrch FVT absorbéru. Nízkoemisivní povlak se uvažuje na vnitřním povrchu dvojitého zasklení, které těsně dosedá na vrstvu polysiloxanového gelu, viz obr. 4.19.



Obr. 4.19 FVT kolektor s vyznačeným (čerchovaně červeně) nízkoemisivním povrchem na horním povrchu FVT absorbéru

V současné době jsou na trhu dostupná skla s nízkoemisivním povrchem, která vykazují nízkou emisivitu, ale za cenu snížené propustnosti slunečního záření zejména pak v oblasti blízkého infračerveného záření, kde dopadá nezanedbatelné množství

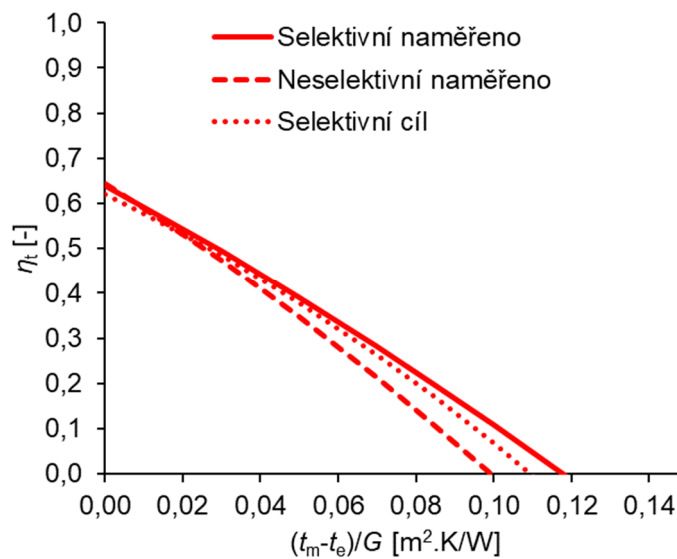
sluneční energie. Přesto existují nestandardní zasklení vhodná pro solární aplikace, která jsou výstupem současného výzkumu v této oblasti [26], viz obr. 4.20. Propustnost viditelného slunečního záření je srovnatelná se zasklením pro solární aplikace, zasklení použité má dokonce propustnost ve viditelném spektru deklarovanou dokonce i vyšší než běžná kalená solární skla. Pro selektivní variantu FVT absorbéru byl po několika testech různých zasklení vybrán nízkoemisivní povlak od firmy Euroglas o parametrech: propustnost pro viditelné záření 93 %, propustnost pro sluneční záření 85 % a emisivita povrchu 30 %, na obr. 4.20 je červeným kroužkem zasklení vyznačeno. Jedná se o nízkoemisivní povlak, který vykazuje sice vyšší emisivitu oproti běžně používaným povlakům na okna, ale je vysoce propustný pro celou oblast slunečního záření. Přestože má povlak vyšší hodnotu emisivity, má i výrazně nižší odrazivost v oblasti blízkého infračerveného záření.



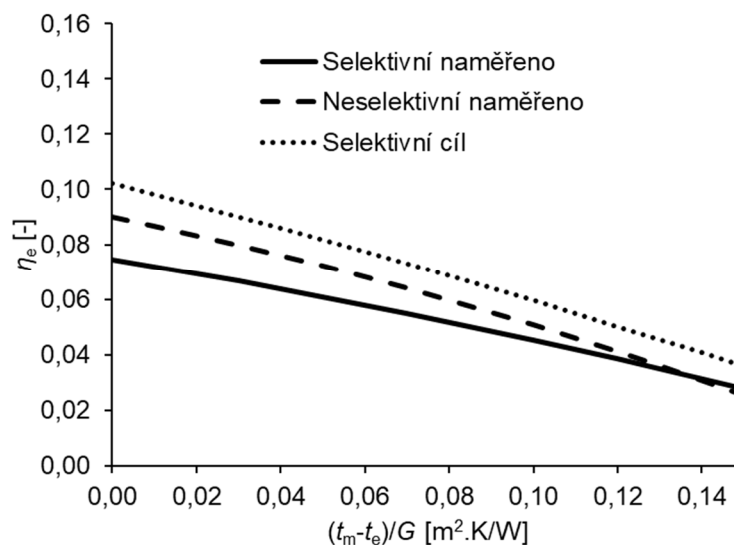
Obr. 4.20 Optické vlastnosti spektrálně selektivních zasklení vhodných pro solární aplikace [26] (červeně vyznačeno zasklení použité pro poslední prototyp FVT kolektoru)

Bylo vytvořeno dva prototypy FVT kolektorů, u kterých bylo provedeno srovnání měření stanovené tepelné a elektrické účinnosti pro neselektivní a selektivní (povrch absorbéru s nízkoemisivním povlakem) variantu je vyneseno na obr. 4.21 a obr. 4.22. Zároveň je mezi závislostmi vynesena i simulovaná varianta cíle vývoje FVT kolektoru s nízkoemisivním povlakem (očekávaný cíl). V obou případech byla elektrická produkce FV části odlišná oproti očekávání, tepelná část kolektoru přibližně odpovídala očekáváním. Avšak očekávána vyšší produkce elektrické energie způsobila že, simulovaná tepelná charakteristika FVT kolektoru je nepatrně nižší než bylo naměřeno,

viz obr. 4.21. Jinými slovy dopadá sluneční energie, která nebyla přeměněna na elektrickou energii, zvýšila produkci tepelné energie FVT kolektoru.



Obr. 4.21 Porovnání tepelné účinnosti selektivního a neselektivního FVT absorbéru



Obr. 4.22 Porovnání elektrické účinnosti selektivního a neselektivního absorbéru

Referenční elektrická účinnost modulu vztažena k ploše celého kolektoru byla naměřena při nulových tepelných ztrátách následně přepočtena pro referenční teplotu 25 °C. Pro selektivní absorbér byla naměřena 7,4 % a 8,7 % pro neselektivní, jedná se tedy o 15% pokles vlivem nízkoemisivního povlaku. Bylo očekáváno, že referenční účinnost nepatrně naroste, protože u zasklení Euroglas s nízkoemisivním povlakem byla

výrobce uváděná propustnost ve viditelném spektru 93 %, což je o 1 % vyšší propustnost než u použitého solárního zasklení u neselektivního absorberu. Z tohoto důvodu byla naměřením stanovena propustnost viditelného a celého spektra slunečního záření zasklení s nízkoemisivním povlakem, viz tab. 4.5. Naměřená data se liší od údajů od výrobce, přesto však naměřený pokles neodpovídá snížené propustnosti. Snížení elektrické produkce se tedy přisuzuje k mechanickému poškození FV části. Mohlo dojít k rozlomení FV článku nebo k nedokonalému napájení kontaktu FV článku. V tab. 4.6 je teoretický výpočet poklesu účinnosti pro selektivní a neselektivní FVT absorber. Pro FVT kolektor byly využity FV články o referenční účinnosti 18,8 %. Vzhledem k tomu, že FV články zaujímají přibližně 62 % z celkové plochy kolektoru, dojde ke snížení účinnosti přibližně o 7,1 % absolutně. Dále pak dojde k poklesu vlivem optických ztrát krycího zasklení a optických ztrát zasklení na povrchu FVT absorberu. Referenční elektrická účinnost poklesne i vlivem elektrických ztrát na spojení FV článků a stringů. Měřením stanovená referenční elektrická účinnost neselektivního FVT kolektoru byla 8,7 % a pro selektivní FVT absorber 7,4 %. Rozdíl mezi teoretickou a měřením stanovenou elektrickou účinností neselektivního FVT absorberu odpovídá nejistotě stanovení elektrické účinnosti. V případě selektivního FVT absorberu je rozdíl mezi teoretickou a měřením stanovenou elektrickou účinností větší než nejistota stanovení elektrické účinnosti. Naměřený pokles elektrické účinnosti je přisuzován vyšším elektrickým ztrátám na kontaktech FV článků, z důvodu neautomatizovaného procesu pájení kontaktů.

Tab. 4.5 Porovnání propustnosti zasklení uváděné výrobcem a naměřené

Sklo	Propustnost pro viditelné záření	Propustnost pro sluneční záření
Od výrobce	93 %	85 %
Naměřeno	91 %	80 %

Tab. 4.6 Elektrická účinnost FVT kolektoru

	Elektrická účinnost neselektivního FVT kolektoru	Pokles účinnosti	Elektrická účinnost selektivního FVT kolektoru	Pokles účinnosti
Referenční účinnost FV článků (údaj od výrobce)	18,8 %		18,8 %	
Vliv neaktivní plochy kolektoru na elektrickou účinnost FVT kolektoru (plocha FV části je 62 % celkové plochy FVT kolektoru)	11,7 %	7,1 %	11,7 %	7,1 %
Vliv krycího zasklení	10,6 %	1,1 %	10,6 %	1,1 %
Vliv zasklení na povrchu FVT absorberu	9,7 %	0,9 %	9,5 %	1,1 %
Vliv elektrických ztrát propojením mezi stringy a FV články	9,1 %	0,6 %	8,9 %	0,6 %
Teoreticky stanovená elektrická účinnost FVT kolektoru	9,1 %		8,9 %	
Měřením stanovená elektrická účinnost FVT kolektoru	8,7 ± 0,4 %		7,4 ± 0,4 %	

Dále byla provedena celoroční simulační analýza po různé optické vlastnosti FVT absorberu, viz tab. 4.7. Opět byly uvažované klimatické podmínky Prahy a konstantní provozní teplota v kolektoru 40 °C. Ve všech případech bylo uvažováno kalené solární sklo (propustnost pro sluneční záření 91 %) jako krycí zasklení. Další parametry se měnily (pohltivost, emisivita a účinnost FVT absorberu vztažena k ploše FV článků), viz tab. 4.7. Referenční účinnost FVT absorberu nebere v úvahu ztráty krycím zasklením a je vztažena k ploše zakryté FV články nikoliv k celkové ploše FVT kolektoru. Bylo porovnáno použité zasklení s údaji od výrobce s naměřenými údaji, dále pak běžně dostupné zasklení (AGC) pro aplikace na snížení tepelných ztrát okny. To vše bylo srovnáno s neselektivním absorberem, skládajícím se ze dvou kalených solárních sklech. Účinnost FV části byla stanovena teoreticky na základě optických vlastností zasklení. Referenční účinnost FV článků byla uvažována 18,8 %.

Z výsledků analýzy v tab. 4.7 je patrné, že nejvyšší tepelný a elektrický zisk vykazuje FVT absorber se zasklením Euroglas s uvažovanými údaji od výrobce, přibližně o 10 % vyšší tepelný zisk a o 2,2 % vyšší elektrický zisk než varianta s naměřenými daty zasklení Euroglas. Nejhuře dopadlo zasklení komerčně využívané pro snížení tepelných

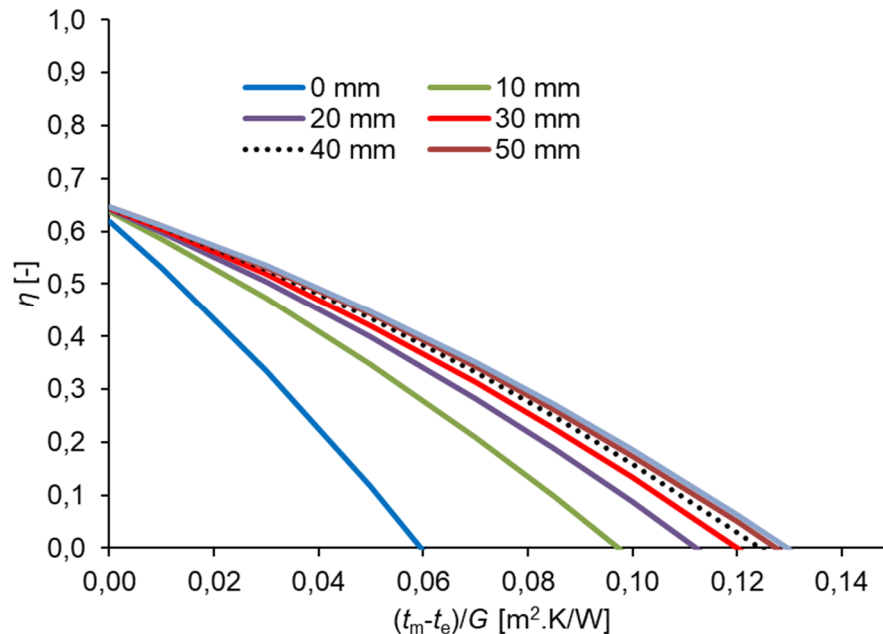
ztrát okny, tepelný i elektrický zisk je dokonce nižší než u selektivní varianty FVT absorbéru. Ve srovnání s výsledky obdobných analýz na téma optimalizace povrchu absorbéru [106, 107], jsou závěry obdobné.

Tab. 4.7 Výsledky analýzy zasklení na FVT absorbéru (zasklení na vrchním povrchu)

Typ zasklení na FVT absorbéru (výrobce)	Název zasklení	ϵ_{abs}	α_{abs}	η_{ref} FVT absorbéru vztaheno k ploše FV článků	Měrný tepelný zisk	Měrný elektrický zisk
					kWh/m ² .rok	kWh/m ² .rok
Neselektivní (Euroglas)	Clear vision	85 %	92 %	17,6 %	274	93,8
Selektivní (Euroglas) Použity údaje od výrobce	Free vision white	30 %	86 %	17,8 %	317	94,7
Selektivní (Euroglas)- použity naměřené údaje	Free vision white	30 %	81 %	17,4 %	285	92,7
Selektivní (AGC)	Planibel G	15 %	71 %	15,7 %	254	83,7

4.6 Izolace na zadní a boční straně kolektoru

Stejně jako v předchozích kapitolách bylo provedeno porovnání pro prototyp FVT kolektoru o parametrech uvedených v tab. 4.8. Na obr. 4.23 je porovnání charakteristik tepelné účinnosti pro různé tloušťky izolace na zadní straně.

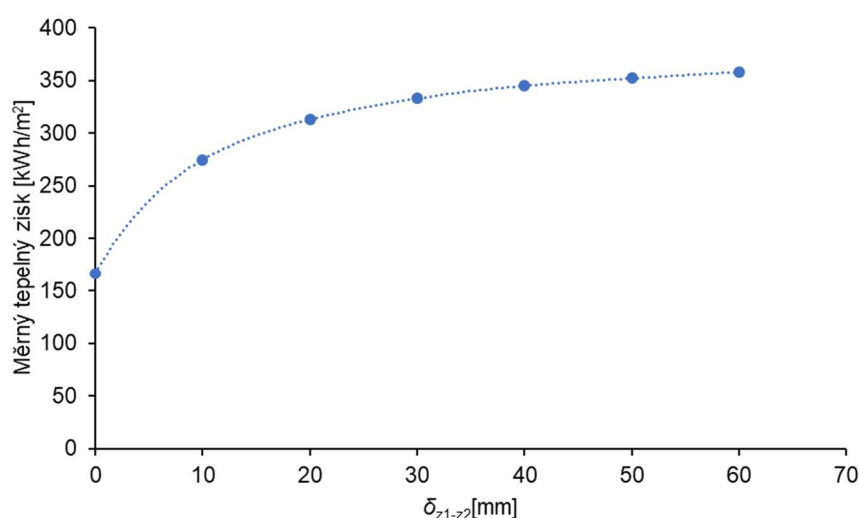


Obr. 4.23 Porovnání tepelné účinnosti pro různé tloušťky izolace na zadní straně FVT kolektoru

Zároveň bylo i provedeno porovnání tepelného a elektrického zisku pro různé tloušťky izolace. Analýza byla provedena pro okrajové podmínky definované v kapitole 4.2. Z výsledků v tab. 4.9 je patrné, že elektrický zisk není ovlivněn tloušťkou izolace, pokles produkce elektrické energie nedosahuje ani desetiny procenta. Naproti tomu tepelný zisk narůstá nepatrně více v jiných studiích věnující se obdobné problematice, které se věnovali však konkrétní simulaci solární tepelné soustavy pro přípravu teplé vody v rodinném domě [107]. Přesto lze považovat nárůst tepelného zisku od referenčního kolektoru s izolací 30 mm za nepatrný, viz obr. 4.24. Produkce elektrické energie se v případě přidání izolace takřka nezmění. Navýšením izolace nad 30 mm na zadní straně FVT kolektoru nelze tedy očekávat výrazný energetický přínos.

Tab. 4.9 Výsledky analýzy tloušťky izolace
(zisky jsou vztažené k celkové ploše kolektoru)

Tloušťka izolace	Měrný tepelný zisk	Měrný elektrický zisk	Změna tepelného zisku oproti referenční variantě
	kWh/m ² .rok	kWh/m ² .rok	
0 mm	167	75,1	-50 %
10 mm	275	74,6	-17 %
20 mm	313	74,5	-6 %
30 mm	333	74,4	0 %
40 mm	345	74,4	4 %
50 mm	352	74,3	6 %
60 mm	358	74,3	8 %



Obr. 4.24 Měrný tepelný zisk FVT kolektoru v závislosti na tloušťce zadní izolace

4.7 Zapouzdřovací materiál pro FV články

Jako zapouzdřovací materiál pro FV články je v prototypu FVT kolektoru použit polysiloxanový gel, viz kapitola 4.1. Zde je představeno porovnání se zapouzdřovacím materiálem EVA, který je využíván pro zapouzdření krystalických FV článků v běžných FV panelech. Účelem zapouzdření je v praxi zejména ochrana vůči vnějším vlivům prostředí. FV články mohou korodovat při kontaktu s vnějším prostředím. Kromě toho jsou FV články velmi křehké a potřebují tedy pružné uložení, kde nebude docházet k lámání FV článků vlivem dilatací. S použitím v zasklených FVT kolektorech přibývá další nárok na zapouzdřovací materiál, a to odolnost vůči pracovním teplotám nad 150 °C. Tyto teploty mohou být dosaženy na FVT absorbéru právě v zaskleném FVT

kolektoru během stagnace (stav bez odběru tepla). Polysiloxanový gel má vysokou teplotní odolnost, je tedy vhodný pro zasklené FVT kolektory. V tab. 4.10 jsou uvedeny vlastnosti EVA laminace a polysiloxanového gelu publikované v [62], některé vlastnosti EVA laminace jsou v jiných zdrojích uváděny nepatrně odlišně. Například v disertační práci Dr. Dupeyrata [23] je uváděn index lomu 1,45 a součinitel tepelné vodivosti 0,35 W/m.K pro EVA laminaci.

Tab. 4.10 Porovnání vlastností EVA laminace a polysiloxanového gelu [62]

Název parametru	EVA	Polysiloxanový gel
Rozsah provozních teplot	(-40 až 80) °C	(-60 až 250) °C
Index lomu	1,482	1,406
Propustnost pro sluneční záření	8 % ($\lambda = 360$ nm)	90 % ($\lambda = 360$ nm)
Propustnost pro sluneční záření	62 % ($\lambda = 400$ nm)	92 % ($\lambda = 360$ nm)
Propustnost pro sluneční záření	8 % ($\lambda = 600-1000$ nm)	90 % ($\lambda = 600-1000$ nm)
Modul pružnosti	$4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	$4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Součinitel tepelné vodivosti	0,13 W/m.K	0,18 W/m.K

Byla experimentálně ověřena tepelná vodivost polysiloxanového gelu přístrojem Isomet 21114 jehlovou sondou, viz obr. 4.25. Byl naměřen součinitel tepelné vodivosti; 0,16 W/m.K při teplotě 28 °C.



Obr. 4.25 Měření tepelné vodivosti polysiloxanového gelu

Byla provedena analýza, jak velký vliv má součinitel tepelné vodivosti zapouzdřovacího materiálu na výkon FVT kolektoru. Stejně jako v předchozí kapitole byl simulován jeden rok pro konstantní provozní teplotu, viz okrajové podmínky v kapitole 4.2. Pro variantu s gelem byla uvažována tepelná vodivost 0,16 W/m.K, pro variantu s EVA laminací 0,35 W/m.K. Závěr této kapitoly potvrzuje, že z energetického hlediska role součinitel tepelné vodivosti zapouzdřovacího materiálu je nevýznamná. Jak tepelný, tak elektrický zisk za rok se liší do 1 %.

5 APLIKACE FVT KOLEKTORŮ

5.1 Potenciální aplikace pro FVT kolektory

Problematice aplikací FVT kolektorů se věnuje úkol Mezinárodní Energetické agentury v programu solární vytápění a chlazení Task 60 [44], který je spíše zaměřen na nezasklené FVT kolektory, protože jsou většinově zastoupeny na světovém trhu [96]. 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 [99, 100]. Aplikace zasklených FVT kolektorů jsou zastoupeny v realizovaných instalacích přibližně dvěma procenty z celkové instalované kapacity ve světě [87]. Hlavním důvodem tak malého zastoupení je pravděpodobně problematika teplotní odolnosti FV části kolektoru během stagnace. Pro naznačení potenciálu zasklených FVT kolektorů jsou v této kapitole analyzovány dvě cílové aplikace, v 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, v druhém případě v bytovém domě. Právě solární příprava teplé vody patří mezi nejrozšířenější aplikaci 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 rodinný a 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 rodinný dům

Aplikace zasklených FVT kolektorů v rodinném domě bude vždy z ekonomického hlediska velmi problematická, protože v porovnání s cenami FV panelů, které stále klesají, bude velmi těžké uspět. Vždy je možné za menší investiční náklady instalovat plochu FV panelů o srovnatelném energetickém výstupu, pokud je samozřejmě dostatečně velká plocha střechy. Pokud se však na problematiku přípravu teplé vody v rodinném domě zaměříme z ekologického hlediska, FVT kolektory lze dosáhnout vyšší

úspory CO₂ na m² plochy střechy. Navíc z pohledu celkových nákladů na aplikaci (investiční a provozní náklady po dobu 15 let) mohou být zasklené FVT kolektory i ekonomicky přínosnější. To však závisí na koncové ceně energie pro zákazníka.

V rámci disertační práce nebyl kladen velký důraz na simulační analýzy zabývající se solárními tepelnými soustavami s FVT kolektory v rodinném domě. Přesto zde bude představena jedna simulační analýza původně zaměřena na optimalizaci konstrukce FVT kolektorů v aplikaci pro přípravu teplé vody v rodinném domě [107]. Pro ukázání potenciálu FVT kolektorů v aplikaci pro přípravu teplé vody v rodinném domě zde budou ukázány výsledky pro dva odlišné FVT kolektory. Budou ukázány výsledky pro neselektivní a selektivní povlak na povrchu FVT absorbéru, více k problematice povlaků je v kapitole 4.5. Hlavní parametry simulace byly následující: plocha FVT kolektorů byla 6,8 m² (1,043 x 1,642 m), orientace na jih, sklon kolektorů 45°, průtok teplotosné kapaliny kolektorem 40 kg/h.m², Objem solární zásobníku 340 l, Spotřeba studené vody 200 l/den, požadovaná teplota teplé vody 55 °C, klimatické podmínky pro Prahu (Meteonorm). Profil odběru teplé vody byl uvažován konstantně rozložený po celý rok. Vhodnost použití tohoto zjednodušujícího předpokladu byl potvrzeno na porovnávací simulační analýze solárního systému pro rodinný dům s pěti odlišnými profily odběru teplé vody, měrné zisky a solární pokrytí solární soustavy bylo pro všechny odběrové profily srovnatelné [103].

Z výsledků je patrné, že lze dosáhnout měrného tepelného zisku 242 až 265 kWh/m².rok. Hodnota měrného tepelného zisku je nicméně nižší než u konvenčních fototermických systémů, ale lze dosáhnout samozřejmě hodnot vyšších, záleží na dimenzování solárního systému. Systém v simulační analýze byl dimenzován na solární na pokrytí 50 %, což je spíše spodní hranice, která se objevuje v doporučeních pro projektanty. Na rodinném domě je možné dosáhnout v podmínkách České republiky solárního pokrytí přípravy teplé vody 40 až 70 %. Hlavní výhoda FVT kolektorů je však v produkci elektrické energie s měrným ziskem mezi 93 až 95 kWh/m².rok.

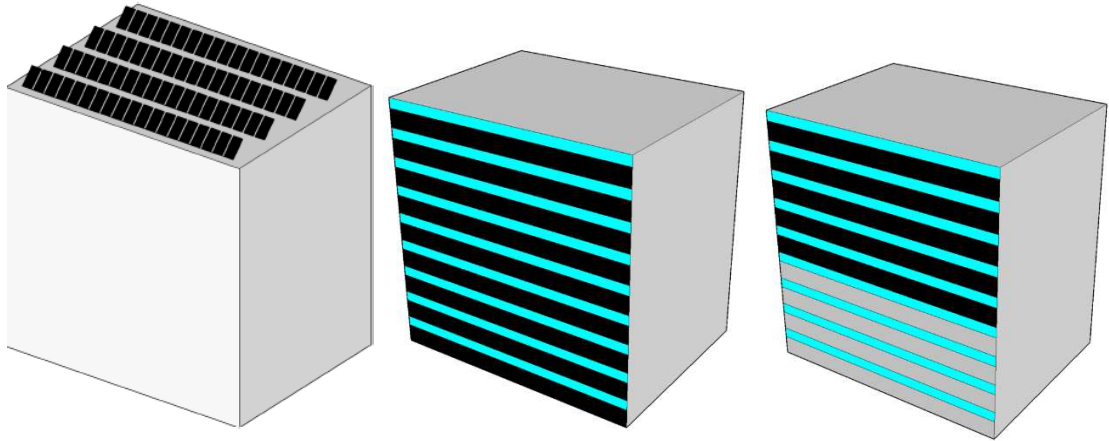
Tab. 5.1 Výsledky simulace solární soustavy s FVT kolektory pro přípravu teplé vody v rodinném domě

Typ FVT absorbéru	Tepelný zisk FVT kolektoru	Elektrický zisk FVT kolektoru
Selektivní	1803 kWh/rok	631 kWh/rok
Neselektivní	1651 kWh/rok	648 kWh/rok

5.1.2 Zasklené FVT kolektory pro bytový dům

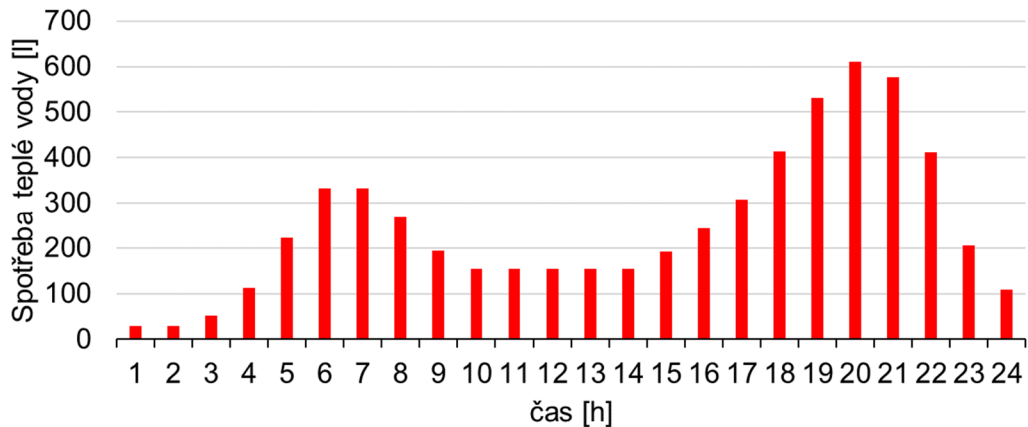
U aplikace zasklených FVT kolektorů pro přípravu teplé vody v bytovém domě se značně projeví jejich zásadní výhoda, a to současná produkce jak tepla, tak elektrické energie. Maximalizace využití dopadlého slunečního záření se projeví zejména u budov s omezenou plochou střechy a velkou potřebou tepla. Simulační analýza představená v této kapitole se zabývá porovnáním FVT kolektorů instalovaných na střeše a integrovaných FVT kolektorů v jižní fasádě budovy [92, 93]. 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

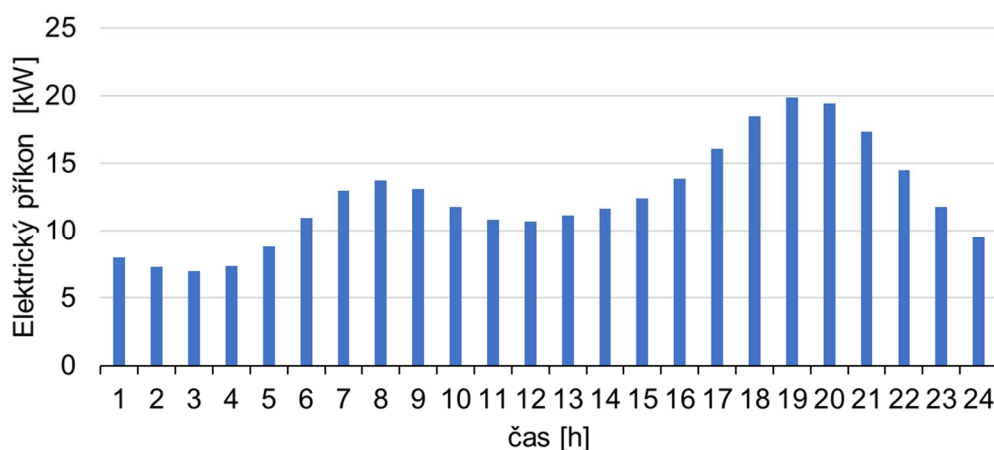


Obr. 5.1 Studované varianty instalace FVT kolektorů, zleva střešní instalace (S), fasádní instalace na 9 pater (F9) a fasádní instalace na 5 pater (F5)

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

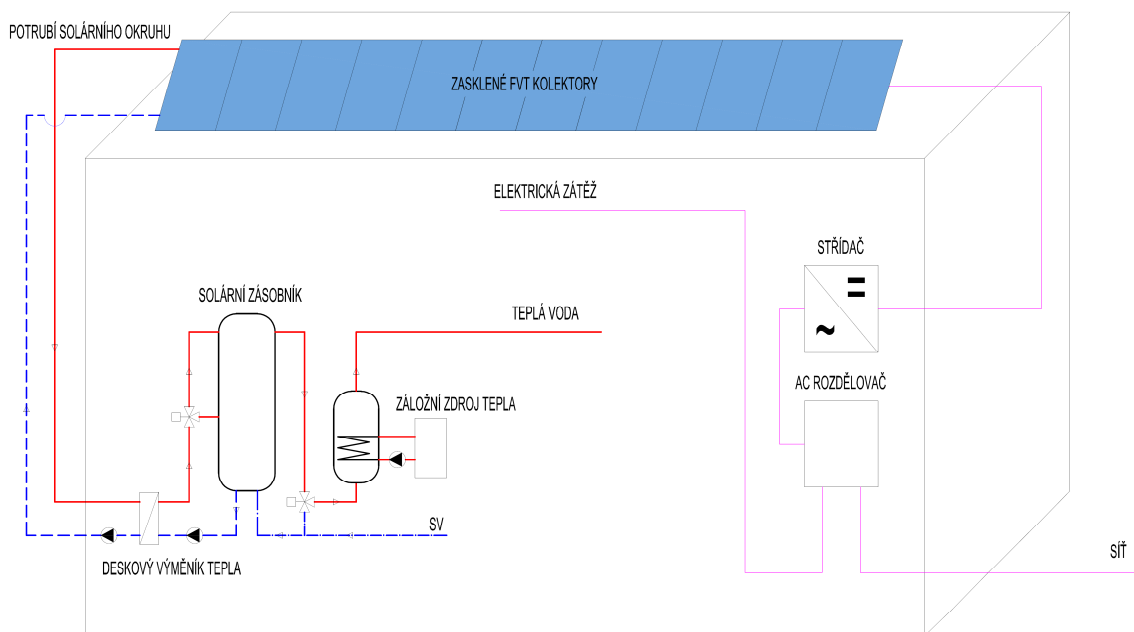


Obr. 5.3 Profil odběru elektrického příkonu v bytovém domě

Schéma solárního systému s FVT kolektory je na obr. 5.4. 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. 5.2. 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.

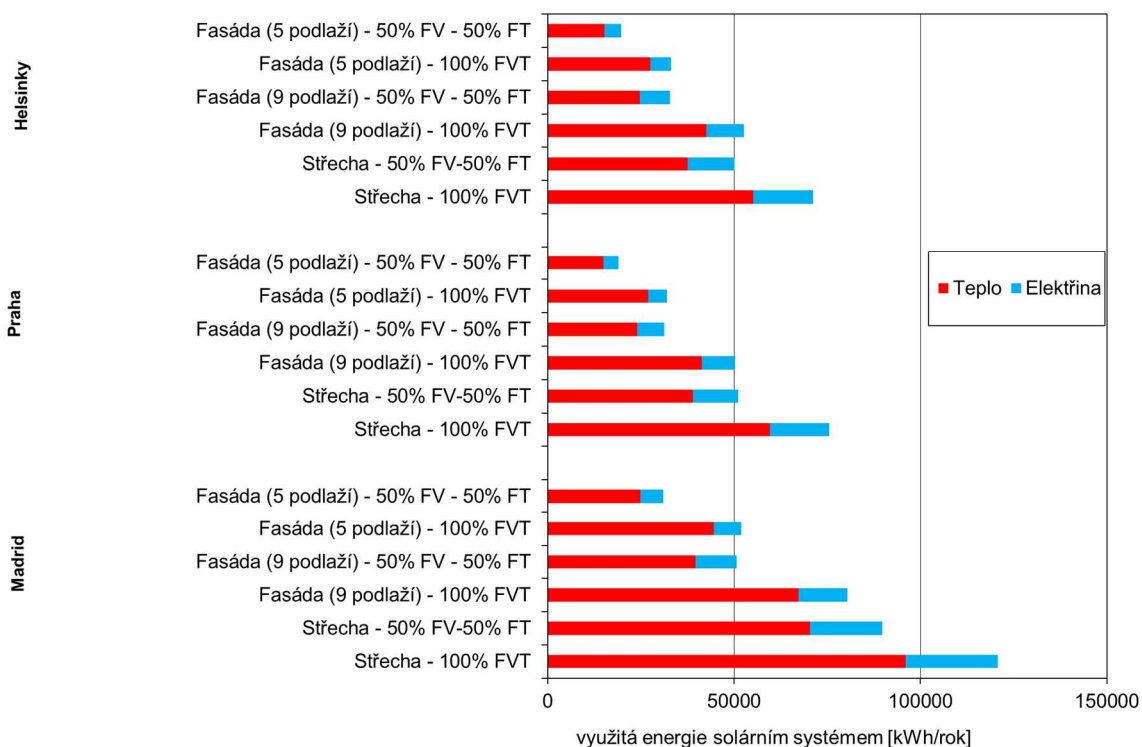
Tab. 5.2 Parametry základních komponent solárního systému

Alternativa	Plocha solárního systému	Objem solárního zásobníku	Dimenze kolektorového o potrubí	Tloušťka izolace kolektorového o 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 nejjihněji 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. 5.3 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. 5.3 Výsledky simulační analýzy pro bytový dům

Lokace	Alternativa	Nárůst využití tepelné energie díky hybridnímu řešení	Nárůst využití 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 [92, 93, 110, 112]. 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

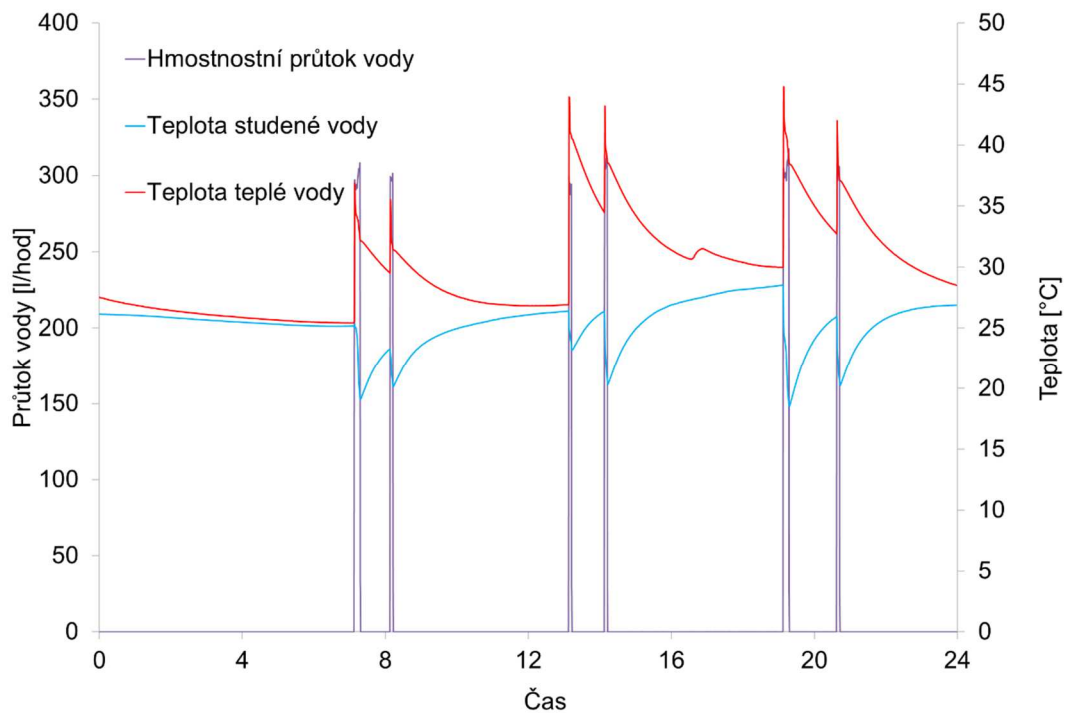
V současné literatuře není publikováno příliš prací zabývajících se experimentálním měření zasklených FVT kolektorů. Práce jsou zejména zaměřeny na experimentální měření nezasklených FVT kolektorů v kombinaci s tepelným čerpadlem [3, 4] či pro předehřev teplé vody [65]. Přesto existují měření, kde byly kratší dobu testovány i zasklené FVT kolektory [30]. 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.

5.1.1 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 [113]. Účelem instalace testovací trati je zkoušení prototypů FVT kolektorů za proměnlivých

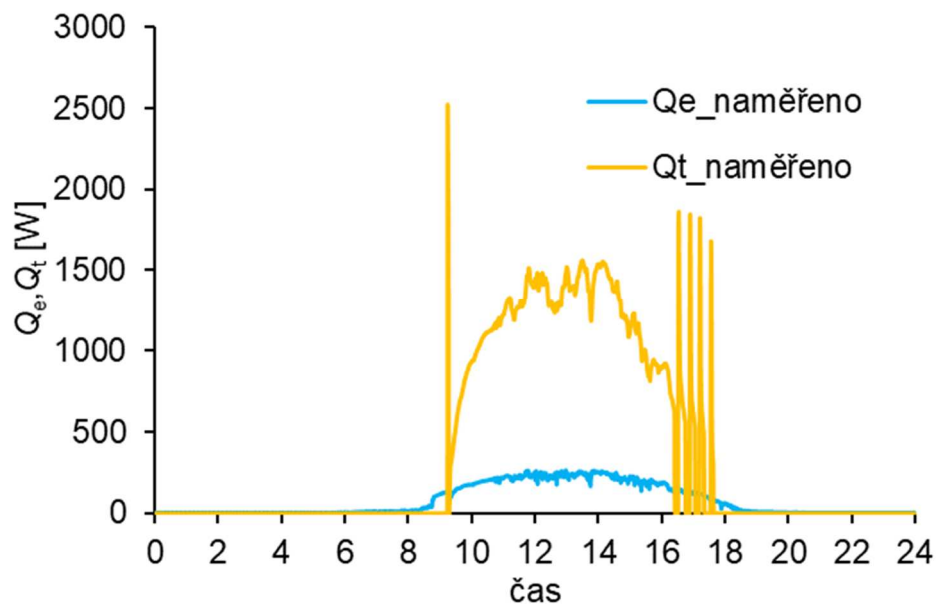
klimatických podmínek a vyhodnocení jejich potenciálního přínosu pro domácnost ve srovnání s konvenčním provedením solární soustavy. Testovací trať byla využita i pro validaci dynamického matematického modelu FVT kolektoru, viz 3.4.3. Dva FVT kolektory instalované na střeše Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze (obr. 5.8) 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. 5.9), 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 zobrazeno v 3.4.3.

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 teplotné 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, viz obr. 5.6. Je možné vidět, že teplota studené vody z řádu v době odběru dosahovala teploty přes 20 °C, což bylo způsobeno vybraným letním obdobím pro experiment, kdy může být teplota studené vody a takto vysoká. 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 Průběh odběrů teplé vody během dne (22.5.2016)

Na obr. 5.7 je průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne. Z průběhu je patrné, že v ranních a večerních hodinách dochází k cyklování oběhového čerpadla, což způsobuje výkonové špičky.



Obr. 5.7 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne (22.5.2016)



Obr. 5.8 Dva zasklené neselektivní FVT kolektory zapojené v sérii



Obr. 5.9 Zapojení pro emulaci odběru teplé vody

V tab. 5.4 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. 5.4 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

5.1.2 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 [101]. 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.

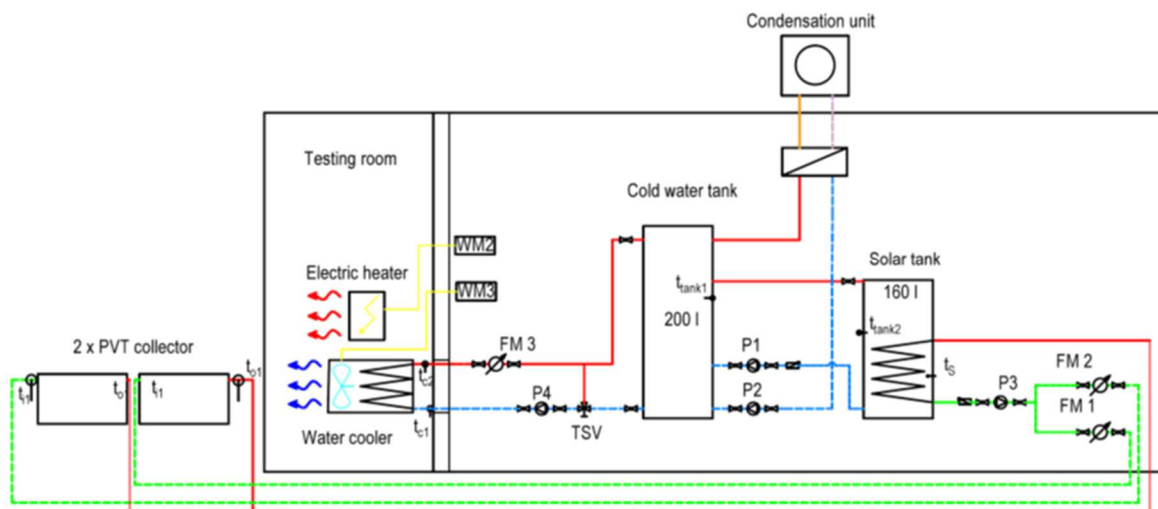
Aby bylo možné fasádní moduly dlouhodobě monitorovat za venkovních podmínek, byla vytvořena testovací buňka (obr. 5.10), která byla rozdělena na dvě části: na testovací prostor, ve kterém se udržuje požadovaná teplota a technologickou místnost, ve které je technické zázemí. Na základě dlouhodobého monitoringu fasádního modulu se vyhodnocoval nejen přínos FVT kolektorů, ale i přínos selektivně odrazivých rastrů [94]. Na buňku byly instalovány dva fasádní moduly. Hlavní rozdíl mezi moduly bylo použité zasklení na povrchu FVT absorbéru. První neselektivní absorbér, měl použité standardní solární kalené sklo o propustnosti 92 % a emisivitě 85 %. Druhý neselektivní absorbér, 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 absorbéry [97].



Obr. 5.10 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. 5.11). 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. 5.11 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 akumulována 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. 5.11 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. 5.5. V tab. 5.6 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. 5.7. Obě účinnosti jsou vztaženy k celkové ploše kolektoru. Přičemž FV část se podílí na 60 % celkové plochy FVT kolektorů.

Tab. 5.5 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

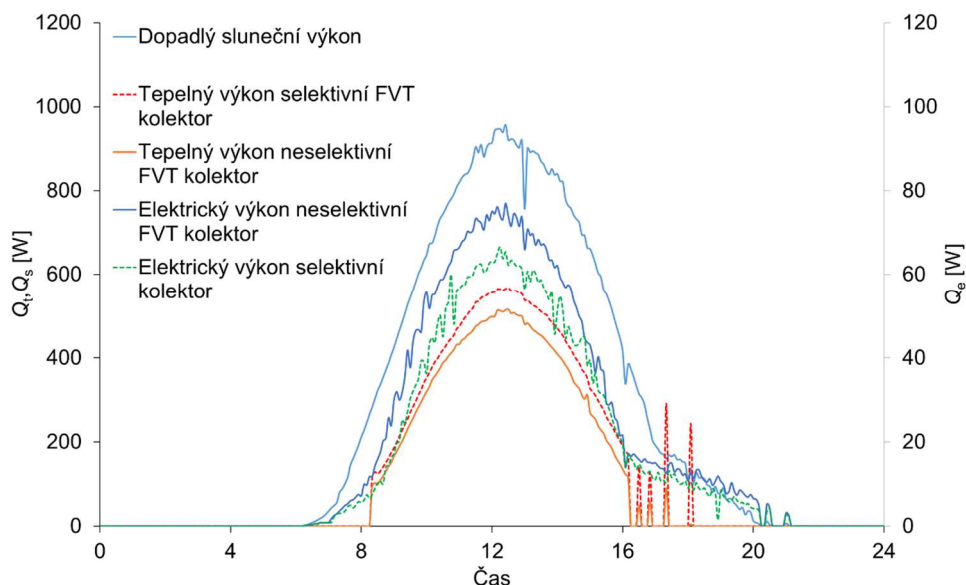
Tab. 5.6 Rozdíl mezi selektivním a neselektivním absorbérem v produkci tepelné a elektrické energie

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 %

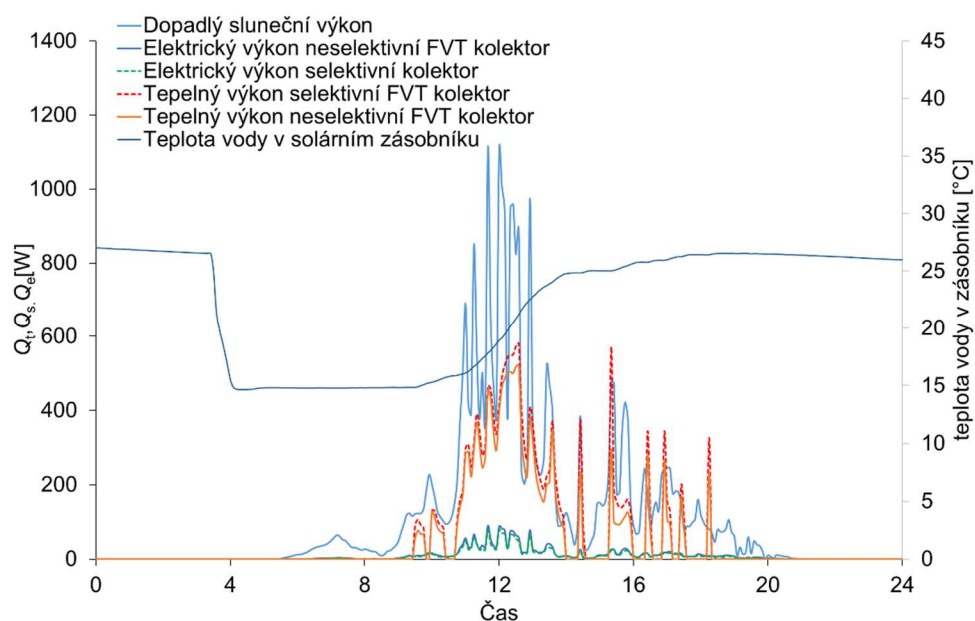
Tab. 5.7 Průměrné měsíční účinnosti selektivního a neselektivního FVT kolektoru

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. 5.12 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. 5.13 je průběh tepelného a elektrického výkonu pro oblačný den. Z průběhu lze 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.



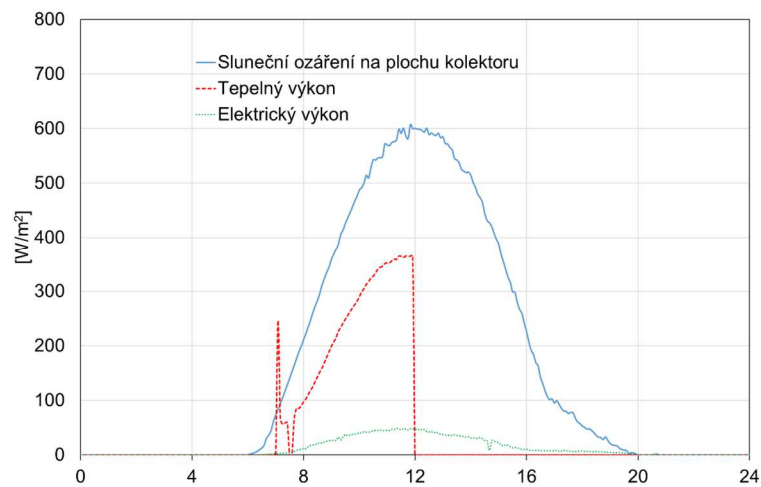
Obr. 5.12 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne (4. 7. 2019)



Obr. 5.13 Průběh tepelného a elektrického výkonu během jasného dne, dále průběh teploty vody v zásobníku (14. 7. 2019)

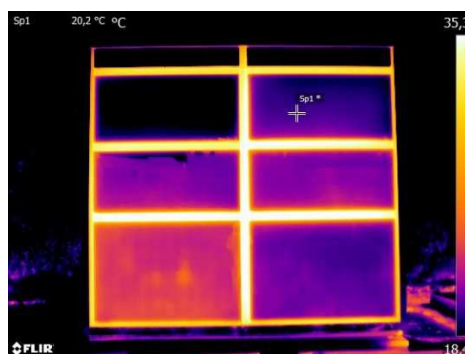
Vzhledem k teplotnímu omezení zasklených FVT kolektorů dostupných na současném trhu, bylo jedno z měření soustředěno na stagnační chování. Byla naměřena stagnační teplota a zároveň byly kolektory ponechány stagnaci přibližně 14 dní během letního období. Kromě naměřené stagnační teploty bylo sledováno, zda FVT kolektory nevykazují snížený elektrický výkon. Na obr. 5.14 je průběh tepelného a elektrického výkonu jednoho z kolektorů. Do 12.00 byl kolektor v běžném provozu, ve 12.00 bylo

vypnuto oběhové čerpadlo solárního okruhu a bylo simulováno stagnační chování. Byla naměřena stagnační teplota 110 °C během července 2019. Okrajové podmínky měření byly následující: dopadlé sluneční ozáření na plochu kolektoru bylo 600 W/m², venkovní teplota okolního vzduchu 28 °C úhel dopadu slunečního záření 61°. Přesto, že se jednalo o nižší dopadlé sluneční ozáření a nižší teplotu okolního vzduchu, než jsou jmenovité podmínky pro stanovení stagnační teploty (sluneční ozáření 1000 W/m², teplota okolního vzduchu 30 °C), stagnační teplota byla tak vysoká, že by hypotetický FVT kolektor s EVA laminací po delším čase degradoval. Maximální provozní teplota EVA laminace je běžně uváděna okolo 85 °C.



Obr. 5.14 Měření tepelného a elektrického výkonu integrovaného FVT kolektoru do fasádního modulu během stagnace (23. 7. 2019)

Na obr. 5.15 je infračervený snímek jižní stěny experimentální buňky. Je zde možné vidět rozdíl mezi selektivním a neselektivním absorberem. Neselektivní absorber je na levé straně, ztráty sáláním jsou vyšší a je tedy i vyšší povrchová teplota absorberu. Naopak na pravé straně je absorber selektivní (nižší emisivita), tedy se sníženými ztrátami sáláním; povrchová teplota FVT kolektoru je tedy nižší.



Obr. 5.15 Infračervený snímek experimentální buňky z vnější strany

ZÁVĚR

V rámci disertační práce byl vytvořen detailní stacionární model zaskleného FVT kolektoru, který vycházel z vnější a vnitřní energetické bilance FVT absorbéru. 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 type 223 a type 224 a vykázaný jako autorizovaný software [98, 111]. 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 [102, 105]. 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 [106, 107, 115]. 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 absorbéru 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 absorbéru zaručí nárůst produkce tepelné energie FVT kolektor až o 10 % a současně pokles produkce elektrické energie o 2 % [106]. 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 [112]. Bylo vytvořeno několik prototypů zasklených FVT kolektorů, které byly experimentálně naměřeny [104]. 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 [95]. 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 [113]. 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 [94], který byl z jedním z posledních výstupů mezinárodního projektu IEA SHC Task 60 [44]. 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 [97]. Pokles produkce elektrické energie vlivem selektivního povlaku byl vyšší, než se očekávalo.

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 [106, 107], v druhém případě v bytovém domě [92, 93, 110, 112]. Právě solární příprava teplé vody patří mezi nejrozšířenější aplikaci 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 %.

Do budoucna bude nezbytné FVT kolektor certifikovat. V současné době legislativa v České republice umožňuje vstup na trh tepelným kolektorům či FV panelům po získání CE označení. Bohužel však není přesně specifikováno, jaké normy musí podstoupit zejména fototermický kolektor. V současné době se tedy na trhu v České republice může objevit fototermický kolektor, který má CE označení, ale použitá norma nemusí vůbec souviset s provozem fototermického kolektoru. U takového kolektoru pak nelze důvěřovat uvedenému tepelnému výkonu, a hlavně bezpečnosti takového zařízení. U FV panelů je situace o něco přehlednější, FV panely jsou zpravidla testovány normami IEC 61215 a IEC 61730. Běžný evropský standard pro tepelné kolektory je certifikace třetí stranou, formou tzv. označení Solar Keymark. Zákazníci v jižní a severní Evropě takovou certifikaci vyžadují, v některých případech je dokonce certifikace podmínkou pro udělení dotace. Jedná se o certifikaci, která zákazníkovi zaručí, že kolektor byl otestován všemi bezpečnostními normami a tepelný výkon, který uvádí výrobce, odpovídá realitě. V současné době již existuje několik akreditovaných laboratoří, které jsou schopny testovat jak podle norem pro FV panely, tak podle normy pro fototermické kolektory. V současné době dochází k intenzivní komunikaci mezi laboratořemi pro testování FV panelů a tepelných kolektorů za účelem odebrání

některých požadavků a tím snížení ceny všech testů, což umožní snadnější vstup na trh novým FVT kolektorům. Normy je nutné upravit pro potřeby výrobců FVT kolektorů a tím usnadnění vstupu na trh. V současné době se cena za otestování FVT kolektoru podle EN ISO 9806, IEC 61215 a IEC 61730 pohybuje okolo 1 mil. Kč.

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 solárním systémem (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 kapalínového 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 teplotné 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.

6.3 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 konkurence 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] ANTONANZAS, J., DEL AMO, A., MARTINEZ-GARCIA ,A., BAYOD-RUJULA, A., ANTONANZAS-TORRES, F., Towards the optimization of convective losses in photovoltaic–thermal panels. *Solar Energy*, 2015, vol. 116, s. 323–336.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] BELL, I., WRONSKI, J., QUOILIN, S., LEMORT, V, Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, vol. 53 ,s. 2498-2508, DOI: 10.1021/ie4033999
- [6] 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.
- [7] BERTRAM, E., GLEMBIN, J., ROCKENDORF, G., Unglazed PVT collcetors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger, *Energy procedia*, 2012, vol. 30, s. 414-423.
- [8] BUONOMANO, A., DE LUCA, G.,FIGAJ, R., VANOLI, L., Dynamic simulation and thermo-economic analysis of a PhotoVoltaic/Thermal collector heating system for an indoor–outdoor swimming pool. *Energy conversion and Managemant*, 2015, vol. 99, s. 176–192.
- [9] CADAFALCH, J. , An overheating protection system for flat plat solar collectors with transparent insulation. *Proceedings of Eurosun 2002*, Lisbon, Portugal, 2002.
- [10] 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
- [11] COLBURN, A. P.: *Trans. AIChE*, 29, 174, 1933.

- [12] COVENTRY, J. S., Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 2005, vol. 78, s. 211-222.
- [13] CRISTOFARI, C., CANALETTI, JI., NOTTON, G., DARRAS, C., Innovative patented PV/TH Solar Collector: optimization and performance evaluation, *Energy procedia*, 2012, vol. 14, s. 235-240.
- [14] ČSN EN ISO 9806. Solární energie - Solární tepelné kolektory – Zkušební metody, ČNI, 2014.
- [15] DANNEMAND, M., PERERS, B., FURBO, S., Performance of a demonstration solar PVT assisted heat pump system with cold buffer storage and domestic hot water storage tanks, *Solar energy*, 2019, vol. 188-189, s. 46-57.
- [16] DI SU, J., YUTING, A., GURUPRASAD, L., LINGKUN, F., Comparative analyses on dynamic 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.
- [17] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. B. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., c2006. ISBN 978-0-471-69867-8.
- [18] 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
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] DUPEYRAT, P., MENÉZO, CH., FORTUIN, S., Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, *Energy and Buildings*, 2014, vol. 68, s. 751-755.
- [22] DUPEYRAT, P., *Thermal collector and PVT collector*, Patent, European patent office, 11007143.8. 2011.

- [23] DUPEYRAT, P., Experimental development and simulation investigation of a Photovoltaic-Thermal hybrid solar collector, Disertační práce, 2011
- [24] FLORSCHUETZ, W. L. Extension of the Hottel-Whilier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collector. *Solar energy*, 1979, vol. 22, s. 361-366.
- [25] FORTUIN, S., HERMANN, M., STRYI-HIPP, G., Hybrid PV-Thermal collector development: concepts, experiences, result and research needs, *Energy Procedia*, 2014, vol. 48, s. 37-44.
- [26] GIOVANNETTI, F., FOSTE, S., EHRMANN, N., ROCKENDORF, G., High transmittance, low emissivity glass covers for flat plate collectors: Applications and performance, *Solar energy*, 2014, vol. 104, s. 52-59.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] HEGAZY, A.A., Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and Management*, 2000, vol. 41, s. 861-881.
- [33] HENNING, H.; NUNEZ, T.; DUPEYRAT, P.; HENNINGER, S., Solarthermischer Kollektor - Patent DE102011112974 B3, 2011.
- [34] HERMANN, M., Fractherm – Fractal Hydraulic Structures for Energy Efficient Solar Absorbers and Other Heat Exchangers, *Proceedings of EuroSun 2004. Freiburg:*

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. V., 2004, s. 332-338. ISBN 3-9809656-0-0

- [35] HERRANDO, M., RAMOS, A., ZABALZA, I. MARKIDES, CH., A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors, *Solar Energy*, 2019, vol. 235, s. 1583-1602.
- [36] HOLLANDS ET AL., Free convective heat transfer across inclined air layers, *Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer*, 1976, vol. 98, s. 189-193.
- [37] HOROWITZ, C. A., Paris Agreement. International Legal Materials. <https://doi.org/10.1017/s0020782900004253>, 2016.
- [38] 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.
- [39] CHOW, T.T., Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 2003, vol. 75, 143–152.
- [40] CHOW, T., JI, J., HE, W., Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application, *Solar Energy*, 2006, vol. 80, s. 298–306.
- [41] CHOW, T., JI, J., HE, W., Photovoltaic-thermal collector system for domestic application, *Solar Energy*, 2007, vol. 129, s. 205–209.
- [42] 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
- [43] IBRAHIM, A., OTHMAN, M. Y., RUSLAN, M. H., ET AL., Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2009, vol. 5, s. 321–330.
- [44] IEA SHC Task 60 PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems. Dostupné z: <http://task60.iea-shc.org/>
- [45] JIN-HEE, K, JUN-TAE, K. The Experimental Performance of an Unglazed PVT Collector with Two Different Absorber Types, *International Journal of Photoenergy*. 2015, DOI 10.1155/2012/312168
- [46] 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.

- [47] KEARNEY, M., DAVIDSON, J., MANTELL, S., Polymeric Absorbers for Flat-Plate Collectors: Can Venting Provide Adequate Overheat Protection?, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, vol. 127, no. 3, s. 421–424.
- [48] KOSTIC, L.T., PAVLOVIC , T.M., PAVLOVIC, Z.T., Influence of reflectance from flat aluminum concentrators on energy efficiency of PV/Thermal collector. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, no. 2, s. 410-416.
- [49] KUMAR, S., SHARMA, V. B., KANDPAL, T. C., MULLICK, S. C.: Wind induced heat losses from outer cover of solar collector. *Renewable Energy*, 1997, vol. 10, no. 4, s. 613-616.
- [50] LAMMLE, M., OLIVA, A., HERMANN, M., KRAMER, K., KRAMER, W., PVT collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach. *Solar energy*, 2017, vol. 155, s. 867–879.
- [51] LAMMLE, M., KROYER, T., FORTUIN, S., HERMANN, M., Modeling Results of Covered PVT Collectors Regarding Low-E Coatings and F' , *In Proceedings of Eurosun, Aix-les-Bains*, 2014.
- [52] LAMMLE, 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
- [53] LAMMLE, 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
- [54] LAMMLE, M., Development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low-emissvity coatings and overheating protection, *Disertační práce*, 2018.
- [55] 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>
- [56] MATHIOULAKIS, E., VOROPOULOS, K., BELESSIOTIS, V. Assessment of uncertainty in solar modeling and testing. *Solar energy*, 1999, vol. 65, no. 5, s. 337-347.
- [57] 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

- [58] MATUŠKA, T., ZMRHAL V., KOLEKTOR 2.2 - Computer Program for Efficiency Calculation of Solar Flat-Plate Collectors. 2009.
- [59] MCADAMS, W. H. Heat Transmission, 3rd edition. McGraw-Hill, New York. s. 249. 1954.
- [60] NILSSON, J., HÅKANSSON, H., KARLSSON B., Electrical and thermal characterization of a PV-CPC hybrid. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, s. 917-928.
- [61] OTHMAN, M.Y.H., YATIM, B., SOPIAN, K., BAKAR, M.N.A. Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy*, 2005, vol. 30, s. 2005-2017.
- [62] POULEK, V., STREBKOV, D. S., PERSIC, I. S., LIBRA, M., Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology, *Solar energy*, 2012, vol. 86, s. 3013-3108.
- [63] RANDALL, MITCHELL, EL-WAKIL: Natural convection heat transfer characteristics of flat-plate enclosures, Transactions of ASME, *Journal of Heat Transfer*, 1979, vol.101, s. 120-125.
- [64] REN21. *Global status report 2017*, Dostupné z: https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf, 2018.
- [65] 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.
- [66] SAZIMA, M., KMONÍČEK, V., SCHNELLER, J. A KOL. Technický průvodce - Teplo. SNTL Praha 1989. ISBN 80-03-00043-2.
- [67] SANDNES, B., REKSTAD, J., A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model, *Solar Energy*, 2002, vol. 72, s. 63-73.
- [68] SHAH, R. K., LONDON, A. L.: Laminar flow forced convection in ducts. 1st edition. New York: Academic Press. 1978.
- [69] SIMÓN-ALLUÉ, R., GUEDEA, I., VILLEN, R., BRUN, G., Experimental Investigation of PV/T Collectors with Phase Change Material, *EuroSun 2018*, 2018.
- [70] SCHINKEL, W. M. M., Natural convection in inclined air-filled enclosures. *Dutch Efficiency Bureau*, 1980, ISBN 90-6231-079-6.

- [71] SOLANKI, S.C., DUBEY, S., TIWARI, A., Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, s. 2421-2428.
- [72] SOPIAN, K., YIGIT, K. S., LIU, H. T., KAKAÇ, S., VEZIROGLU, T. N., Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energy Conversion and Management*, 1996, vol. 37, pp. 1657-1670.
- [73] SOPIAN, K., YIGIT, K. S., LIU, H. T., KAKAÇ, S., VEZIROGLU, T. N., Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems. *Energy Conversion and Management*, 2000, vol. 41, s. 353-365.
- [74] 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.
- [75] SWINBANK, W., C.: Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1963, vol 89, s. 339-348.
- [76] TEST, F. L., LESSMANN, R. C.: An experimental study of heat transfer during forced convection over a rectangular body. *Transactions of ASME – Journal of Heat Transfer*, 1980, vol. 102, s. 146-151.
- [77] TEST, F. L, LESSMANN, R. C., JOHARY, A.: Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in the natural environment. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1981, vol. 103, s. 262-267.
- [78] TIWARI, A., SODHA, M.S., CHANDRA, A., JOSHI, J.C., Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, s. 175-189.
- [79] TONUI, J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, s. 623-637.
- [80] TONUI, J.K., TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy*, 2008, vol. 82, s 1-12.
- [81] TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., NOUSIA, T., SOULIOTIS, M. Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-Thermal systems. *In: Proceeding of 16th European PV Solar Energy Conference*, Glasgow, U.K., 2000.
- [82] TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, *Solar energy*, 2007, vol. 81, s. 1117-1131.

- [83] TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y., NOUSIA, T., SOULIOTIS, M., YIANOULIS, P., Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar energy*, 2002, vol. 72, s. 217-232.
- [84] TRNSYS Manual, TRNSYS 16 a TRaNsient SYstem Simulation program. In: Mathematical Reference, vol. 5. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison, 2006.
- [85] WATMUFF J.H., CHARTERS, W.W.W, PROCTOR, D., Solar and wind induced external coefficients for solar collectors, *Int. Revue d'Hellio-technique*, 1977, vol. 2, s. 56.
- [86] 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.
- [87] WEISS, W., SPÖRK-DÜR M., Solar Heat Worldwide 2019, IEA-Solar Heating and Cooling Programme <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>
- [88] ZENHAHAUSNER, D., BAMBERGER, E., BAGGENSTOS, A. *PVT Wrap-Up; Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors*, Rapperswil: SPF., 2017.
- [89] 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.
- [90] ZONDAG, H. A., VAN HELDEN W. G. J., Stagnation temperature in PVT collectors, *In: PV in Europe*, Rome (Italy), 2002.
- [91] 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

- [92] 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>
- [93] 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.
- [94] BAGGENSTOS, A. et al. Existing PVT Systems and Solutions. [Elektronický dokument se vzdáleným přístupem (web)] Paris: International Energy Agency, 2020.
- [95] 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.
- [96] 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>
- [97] 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>
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Aplikace pro hybridní fotovoltaicko-tepelné kolektory. *Energie 21*. 2018, vol. 11, s. 20-21. ISSN 1803-0394.
- [101] POKORNÝ, N. et al. *Testovací buňka pro energeticky aktivní fasádní moduly*. [Funkční vzorek] 2017.

- [102] 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.
- [103] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Efektivita solárních termických systémů v závislosti na odběru teplé vody. In: BAŠTA, J., ed. *Konference Vytápění Třeboň 2017*. Třeboň, 2017-05-23/2017-05-25. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017. s. 123-127. ISBN 978-80-02-02712-6.
- [104] POKORNÝ, N. et al. Vývoj hybridního fotovoltaickotepelného solárneho kvapalinového kolektora. *TZB HAUSTECHNIK SK*. 2017, vol. 25, s. 18-21. ISSN 1210-356X.
- [105] 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.
- [106] 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>
- [107] 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
- [108] POKORNÝ, N. a T. MATUŠKA. Provozní analýza solární soustavy s hybridními FVT kolektory. In: *Sborník konference Alternativní zdroje energie 2016*. Alternativní zdroje energie 2016, Kroměříž, 2016-06-21/2016-06-22. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2016. s. 133-140. 1. vydání. ISBN 978-80-02-02666-2.
- [109] POKORNÝ, N., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. Ověřování tepelného výkonu solárních kolektorů v laboratoři a v provozu. *Vytápění, větrání, instalace*. 2016, vol. 25, no. 2, s. 88-90. ISSN 1210-1389.

- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] POKORNÝ, N., T. MATUŠKA a B. ŠOUREK. *Solární soustava pro přípravu teplé vody s fotovoltaicko-tepelnými kolektory*. [Funkční vzorek] 2015.
- [114] ŠOUREK, B. a N. POKORNÝ. Nová laboratoř pro zkoušení solárních kolektorů. *Energie 21*. 2015, vol. 8, no. 1, s. 24-25. ISSN 1803-0394.
- [115] 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.

7 PŘÍLOHY

7.1 Příloha 1 – Vstupní data, parametry a výstupní data matematického modelu

7.1.1 Vstupní data

Č.	Symbol	Název	Jednotka
1	G	Sluneční ozáření na plochu kolektoru	W/m ²
2	t_e	Venkovní teplota	°C
3	w	Rychlost větru	m/s
4	\dot{m}	Hmotnostní průtok	kg/h
5	t_{in}	Vstupní teplota do kolektoru	°C
6	θ	Úhel dopadu slunečního ozáření	°
7	$\Delta\tau$	Časový krok	s

7.1.2 Parametry

Č.	Symbol	Název	Jednotka
1	β	Sklon kolektoru	°
2	ε_z	Emisivita povrchu za kolektorem (zpravidla střechy)	-
3	p	Tlak ve vzduchové mezeře mezi zasklením a FVT absorbérem	kPa
4	H_g	Celková výška	m
5	L_g	Celková délka	m
6	H_a	Výška apertury	m
7	L_a	Délka apertury	m
8	δ_p	Tloušťka mezery mezi zasklením a FVT absorbérem	m
9	δ_z	Tloušťka mezery mezi FVT absorbérem a rámem kolektoru	m
10	λ_{abs}	Součinitel tepelné vodivosti FVT absorbéru	W/m.K
11	δ_{abs}	Tloušťka absorbéru	m
12	α	Pohltivost slunečního záření FVT absorbéru	-

13	$\varepsilon_{\text{abs}_p}$	Emisivita přední strany FVT absorbéru	-
14	$\varepsilon_{\text{abs}_z}$	Emisivita zadní strany FVT absorbéru	-
15	L	Délka trubek	m
16	n	Počet trubek	-
17	W	Rozteč mezi trubkami	m
18	D_i	Vnitřní průměr trubky	m
19	a	Šířka spoje	m
20	b	Tloušťka spoje	m
21	λ_{sp}	Součinitel tepelné vodivosti spoje	W/m.K
22	Ξ	Poměr směsi propylenglykolu s vodou	-
23	δ_{p12}	Tloušťka zasklení	m
24	λ_{p12}	Součinitel tepelné vodivosti zasklení	W/m.K
25	τ	Propustnost slunečního záření zasklení	-
26	ε_{p1}	Emisivita vnější strany zasklení	-
27	ε_{p2}	Emisivita vnitřní strany zasklení	-
28	δ_{z12}	Tloušťka izolace na zadní straně	m
29	λ_{z12}	Součinitel tepelné vodivosti izolace na zadní straně	W/m.K
30	ε_{z1}	Emisivita venkovní strany rámu kolektoru	-
31	ε_{z2}	Emisivita vnitřní strany rámu kolektoru	-
32	δ_{b12}	Tloušťka izolace na boční straně	m
33	λ_{b12}	Součinitel tepelné vodivosti izolace na boční straně	W/m.K
34	η_{ref}	Účinnost FVT absorbéru při referenčních podmínkách	-
35	γ_{ref}	Teplotní součinitel účinnosti FV článků	-
36	T_{ref}	Referenční teplota FV modulu	°C
37	λ_{lam}	Součinitel tepelné vodivosti laminační vrstvy	W/m.K
38	δ_{lam}	Tloušťka laminační vrstvy	m
39	λ_{FV}	Součinitel tepelné vodivosti FV článků	W/m.K
40	δ_{FV}	Tloušťka FV článků	m
41	b_0	součinitel modifikátoru úhlu dopadu	-

42	<i>gas_layer</i>	Typ plynu mezi zasklením a FVT absorbérem	-
43	<i>n_col</i>	Počet kolektorů	-
44	<i>PF</i>	Plocha FV části k ploše apertury FVT kolektoru	-
45	<i>C</i>	Účinná tepelná kapacita	J/m ² .K
46	<i>n_seg</i>	Počet segmentů	-

7.1.3 Výstupní data

Č.	Symbol	Název	Jednotka
1.	\dot{m}	Výstupní hmotnostní průtok	kg/h
2.	Q_t	Tepelný výkon	W
3.	Q_e	Elektrický výkon	W
4.	T_{out}	Výstupní teplota z kolektoru	°C
5.	T_{abs}	Povrchová teplota absorbéru	°C

7.2 Příloha 2 - Korelace použité pro argon

