

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**HYBRIDNÍ SOLÁRNÍ FOTOVOLTAICKO-TEPELNÉ
KOLEKTORY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tímto děkuji doc. Ing. Tomáši Matuškovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.

ANOTACE

Hybridní fotovoltaicko-tepelné solární kolektory se vyznačují schopností přeměny slunečního záření na elektrickou a tepelnou energii zároveň. Vzhledem k nízkému dopadu jejich provozu na životní prostředí a schopnosti získávat z jednotky plochy více energie než samostatné fototermické nebo fotovoltaické kolektory, představují FVT kolektory v současnosti slibnou alternativu na poli energetiky. Účelem této práce je představení technologie FVT kolektorů a porovnání dostupných technických provedení s ohledem na jejich efektivitu, cenovou dostupnost a praktickou proveditelnost. Koncentrační kolektory nejsou v této práci vůbec diskutovány.

Obecný princip funkce FVT kolektorů a jejich konstrukce je vysvětlen v úvodu. Porovnání mezi zaskleným a nezaskleným typem kolektorů a možné způsoby odvodů tepla z kolektorů jsou diskutovány na základě dostupné literatury. Zvláštní pozornost je věnována ztrátovým mechanismům každé z konstrukcí a jejich vlivu na účinnost. Současná nabídka trhu s hybridními FVT kolektory je uvedena v závěru.

SUMMARY

The main feature of hybrid photovoltaic-thermal solar collectors is their ability to convert solar radiation to both electric and thermal energies. PVT collectors have low impact on the environment and yield more energy per unit area compared to conventional photothermal and photovoltaic collectors. Therefore, they are a promising technology in the field of renewable energy. The aim of this work is to describe the technology of PVT collectors and to compare the available technical solutions with respect to their effectivity, price and practical feasibility. Concentrating collectors are not discussed here.

First, the general principle of PVT collectors and their construction are explained in the introduction. Differences between glazed and unglazed collectors and the possible ways of heat transfer from the collectors are discussed based on a literature review. Particular attention is paid to the energy loss mechanisms of each design and their effect on efficiency. Finally, an overview of current market is provided in the last chapter.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Hybridní solární fotovoltaicko-tepelné kolektory“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Tomáše Matušky, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 5. 6. 2015

Pavel Kačírek

OBSAH

1	Úvod.....	2
2	Konstrukce kolektorů.....	3
2.1	Kolektor zasklený vs. nezasklený	3
2.2	Vzduchové FVT kolektory.....	7
2.2.1	Jednoduchý průchod	8
2.2.2	Dvojitý průchod	9
2.3	Kapalinový FVT kolektor	9
2.3.1	Trubkový rastr.....	10
2.3.2	Kanálový průtok	12
2.3.3	Volný průtok	13
2.4	Chladivo jako pracovní látka	13
2.4.1	FVT kolektor s tepelnou trubicí.....	13
2.4.2	Absorbér jako výparník tepelného čerpadla	15
2.5	Aplikace různých konstrukcí FVT kolektorů.....	17
3	Konstrukční vlivy na účinnost kolektorů.....	19
3.1	Optická účinnost.....	19
3.2	Účinnost termické části kolektoru.....	20
3.3	Účinnost fotovoltaické části kolektoru.....	21
3.4	Vyhodnocení účinností různých konstrukcí kolektorů	23
4	Výrobky dostupné na trhu.....	26
5	Závěr	29
6	Literatura.....	30

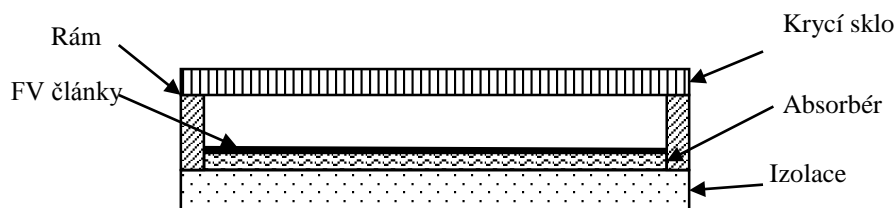
SOUPIS POUŽITÝCH ZNAČENÍ

W	[mm]	Rozteč trubek v absorběru s trubkovým rastrem
D	[mm]	Průměr trubek v absorběru s trubkovým rastrem
STC	[-]	Standardní testovací podmínky fotovoltaických článků
COP	[-]	Topný faktor tepelného čerpadla
$COP_{p/t}$	[-]	Kombinovaný topný faktor tepelného čerpadla
α	[-]	Pohltivost
ρ	[-]	Odrazivost
τ	[-]	Propustnost
η	[-]	Termická účinnost kolektoru
F'	[-]	Účinnostní součinitel kolektoru
U	[W/m ² .K]	Součinitel prostupu tepla kolektorem
G	[W/m ²]	Ozáření
T_e	[°C]	Teplota okolí kolektoru
t_m	[°C]	Střední teplota teplonosné kapaliny v kolektoru
t_{k1}	[°C]	Teplota pracovní látky vstupující do kolektoru
t_{k2}	[°C]	Teplota pracovní látky vystupující z kolektoru
t	[°C]	Teplota fotovoltaických článků
η_{ref}	[-]	Referenční účinnost článku při standardních testovacích podmínkách
β	[-]	Teplotní koeficient účinnosti článku
U_{MPP}	[V]	MPP napětí fotovoltaického panelu
I_{MPP}	[A]	MPP proud fotovoltaického panelu
A	[m ²]	Plocha panelu

1 ÚVOD

Celospolečenský zájem o ekologii vede k hledání čistších zdrojů energie. V tomto ohledu patří využití solární energie mezi velmi zajímavé možnosti. Konvenčně se používají fotovoltaické nebo fototermické kolektory na přeměnu dopadajícího slunečního záření na energii elektrickou, respektive tepelnou.

Solární kolektor fotovoltaicko-tepelný (FVT) kolektor, někdy též hybridní kolektor, je zařízení schopné přeměňovat dopadající sluneční záření na využitelnou energii elektrickou a zároveň tepelnou. Těto vlastnosti je dosaženo překrytím tepelného absorbéru fotovoltaickými články. Schéma uspořádání panelu je zobrazeno na Obr. 1. Tyto kolektory vynikají především tím, že je díky nim možno z jednotky plochy získat větší množství energie, než při použití samostatného fototermického nebo fotovoltaického panelu.



Obr. 1: Schématický řez FV/T kolektorem

První výzkumy této technologie se odehrávaly na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let 20. století na Bostonské MIT v USA, kde byly také navrženy první prototypy dnešních hybridních solárních panelů.

V té době byly ještě konstruovány jednoduchým spojením termického kolektoru, tepelně dobře vodivým adhezivem, s vrstvou fotovoltaických článků.

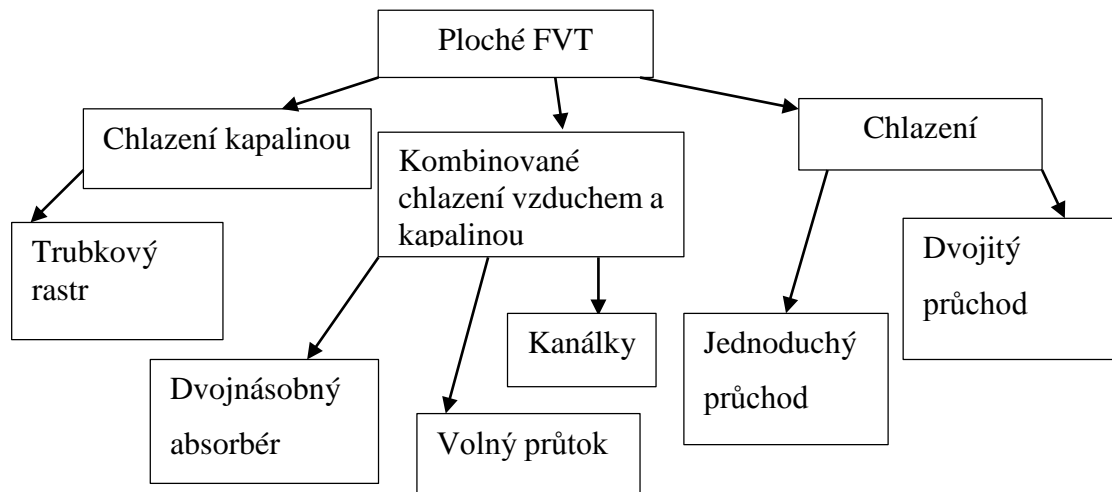
S postupným zlevňováním FV článků se situace změnila. Hlavním úkolem hybridních kolektorů již není získávat pouze elektrickou energii, ale snažit se o co největší celkový výkon z jednotky plochy, přičemž je důraz kladen na využitelnou energii tepelnou.

Tato práce si klade za cíl představit různé konstrukce hybridních fotovoltaických kolektorů a ukázat některé možnosti jejich aplikace, včetně porovnání jejich účinnosti s konvenčními typy kolektorů.

2 KONSTRUKCE KOLEKTORŮ

Za účelem odvodu tepla z panelu bylo navrženo mnoho druhů konstrukcí. Jednotlivé přístupy se od sebe liší jak použitou teplotonosnou látkou (někdy i kombinací několika druhů), tak tvarováním a pozicí tepelných výměníků vůči fotovoltaickým článkům.

Na Obr. 2 je znázorněno hlavní dělení typů hybridních solárních kolektorů. Jak je obrázkem ilustrováno, konstrukci zásadně ovlivňuje druh pracovní látky, která obíhá v tepelném okruhu kolektoru.



Obr. 2: Základní dělení plochých FVT kolektorů

Druhým významným faktorem, také zásadně ovlivňujícím režim fungování výrobku, je dělení kolektorů na zasklené a nezasklené. Jak znázorňuje Obr. 3, konstrukční rozdíl spočívá v existenci mezery mezi krycím sklem a FV článkem. Využití vzniklého prostoru pak záleží na použité teplotonosné látce a koncepci kolektoru.

2.1 Kolektor zasklený vs. nezasklený

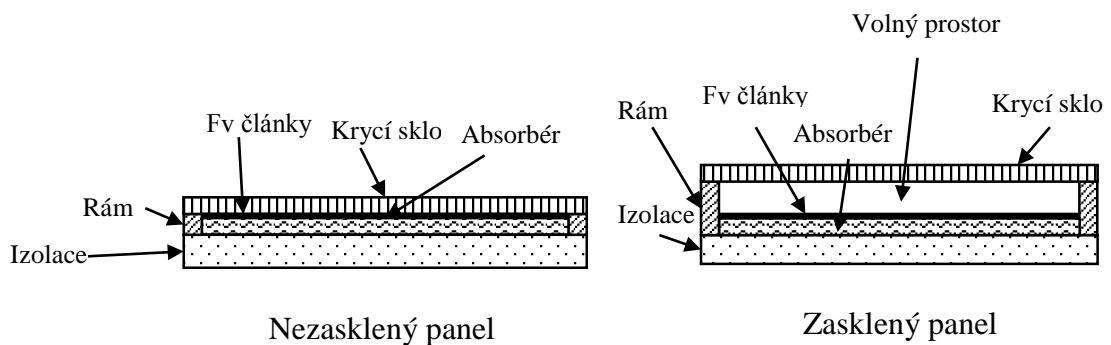
Rozsáhlou práci na porovnání pracovních podmínek zasklených a nezasklených FVT kolektorů provedli Sandnes a Rekstad [1]. Sestavili vlastní FVT kolektor připevněním křemíkových FV článků na černý plastový absorbér. Postupným zapínáním oběhu teplotonosné látky a následnou instalací zasklení, získali možnost mezi sebou porovnat pracovní podmínky různých konstrukcí kolektoru.

Použitý absorbér byl z polyfenylenoxidu (PPO) s přímými čtvercovými kanálky, vyplněnými keramickými granulemi. Jako pracovní látka sloužila voda, byla přiváděna do horní části kolektoru, kde byla rovnoměrně rozdělena do jednotlivých rovnoběžných

kanálků, odkud pomocí gravitace stékala směrem ke spodní části absorberu. Voda zcela vyplnila volné místo v kanálcích a dostala se tak do přímého kontaktu s teplosměnnou plochou. Prostor s kanálky byl po celé zadní ploše absorberu, což vyústilo v rovnoměrné teplotní rozložení po šířce absorberu. Rozměr absorberu byl 0,59 m na šířku a 0,82 m na výšku.

V příslušných měřeních bylo použito 4 mm tlusté sklo, které bylo umístěno ve vzdálenosti 12 mm od absorberu.

Kvůli křehkosti FV článků a velikému rozdílu v teplotních roztažnostech použitých materiálů, museli použít dostatečně elastické silikonové adhezivum. Jeho vrstva musela být kvůli dobrému vedení tepla co nejtenčí a zároveň spojení muselo být co nejtěsnější.



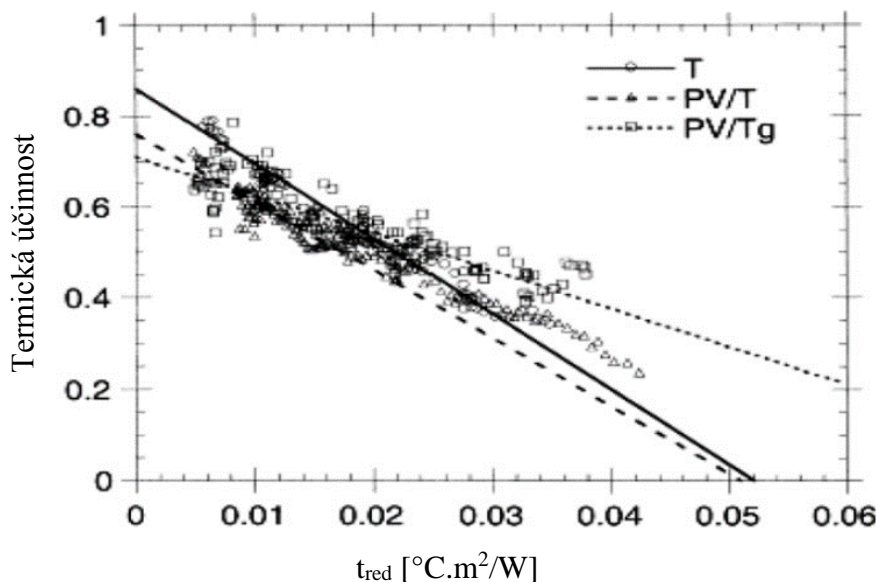
Obr. 3: Rozdíl v konstrukci zaskleného a nezaskleného kolektoru

Nejdříve proběhlo měření čistě termického kolektoru, které bylo provedeno vystavením samotného kolektoru záření.

Jako další byl testován termický kolektor, překrytý fotovoltaickými články o celkové ploše 0,32 m². Jako poslední konfigurace byl již sestavený hybridní kolektor překryt sklem, čímž se docílilo zasklené konstrukce se vzduchovou mezerou. Při všech měřeních byla zadní strana absorberu izolována 5 cm tlustou vrstvou minerální vlny.

Hodnoty účinnosti byly získány za stavu energetické rovnováhy systému, ve kterém byla pro měření získaného tepla zapojena izolovaná akumulační nádoba o objemu 30 l.

Obr. 4 znázorňuje naměřenou tepelnou účinnost pro tři konfigurace kolektorů: termického absorbéru bez použití zasklení (T), termického absorbéru s aplikací FV článků bez zasklení (PV/T) a zaskleného termického absorbéru s FV články (PV/Tg).



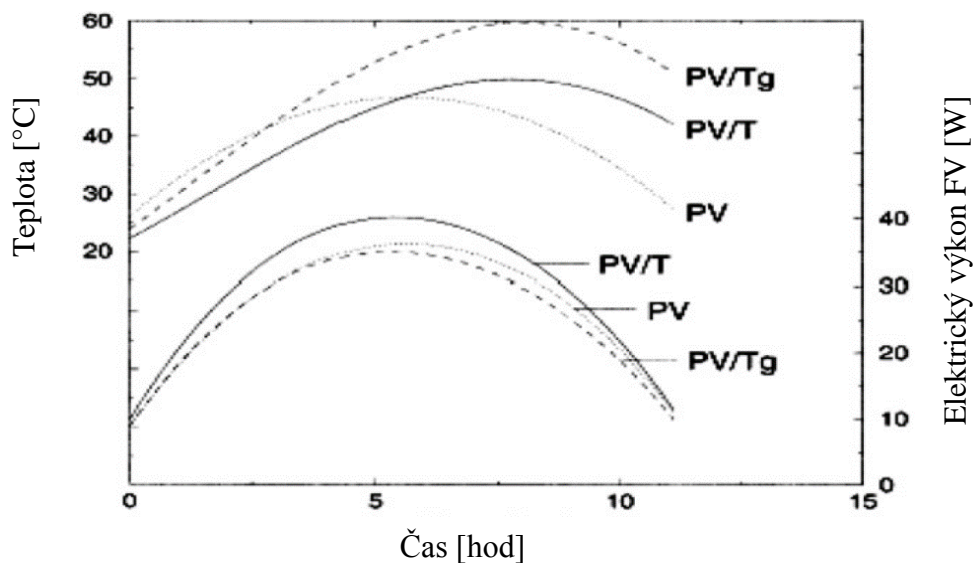
Obr. 4: Termická účinnost v závislosti na redukované teplotě pro termický absorbér (T), nezasklený (PV/T) absorbér a zasklený (PV/Tg) absorbér [1]

Obr. 5 znázorňuje simulovanou závislost teploty článků na výstupním výkonu. Byly použity tři konfigurace panelů. Samotný FV panel (PV) bez další tepelné izolace, FVT kolektor s odvodem tepla absorbérem a zasklený FVT (PV/Tg) systém. Použité součásti byly stejné jako v předchozím odstavci.

Podmínky byly stanoveny pro letní den s čistou oblohou a maximálním osvitem 1 kW/m^2 a konstantní okolní teplotou $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Stejnou teplotu měla i pracovní látka na začátku měření.

Z průběhů křivek plyne, že maximální teplota ($46,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) FV modulů se časově kryje s jejich nejvyšším naměřeným výkonem. Maximální naměřené teploty článků u FVT a zaskleného FVT kolektoru ($49,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respektive $59,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) jsou posunuty mimo úsek maximálního elektrického výkonu kvůli akumulaci tepla v teplosměnné látce.

Celkové množství dodané elektrické energie testovaných panelů bylo za dobu simulace (1 den) následující: 307 Wh pro FV, 339 Wh pro FV/T a 296 Wh pro zasklený FVT. Nezasklený FVT kolektor tedy dodal nejvíce energie. Ačkoliv to autoři původní práce neuvedli, je z hlediska vyrobené elektrické energie pravděpodobné, že je to kvůli velkému množství dopadajícího záření a zároveň díky aktivnímu chlazení elektrické části. Nejhorší elektrický výkon u zaskleného panelu je tedy způsoben relativním přehříváním FV článků, respektive jejich fungováním při teplotách, které jsou vyšší než teploty optimální pro tento typ provozu (reálný letní den a využitelný tepelný spád pracovní látky).

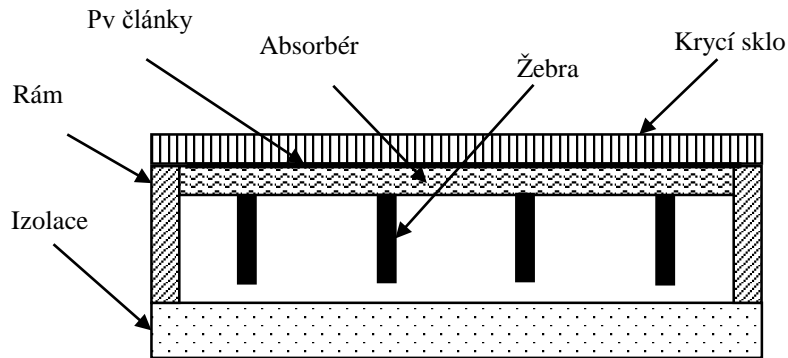


Obr. 5: Simulace průběhu pracovní teploty a odevzdávaného výkonu pro různé konfigurace kolektorů, při jasném letním dni [1]

V práci bylo uvedeno, že přidáním zasklení na FVT kolektor se snižují, kvůli existenci skleníkového efektu, tepelné ztráty do okolí. Celkový energetický příkon je snížen odrazem záření od zasklení do okolí a právě menším množstvím záření dopadajícího na články. Vlivy na účinnost získávání obou druhů energií budou rozebrány dále, v samostatné kapitole této práce.

2.2 Vzduchové FVT kolektory

Hybridní solární kolektory, které používaly jako pracovní látku vzduch, byly zkonstruovány dříve než hybridní kolektory s kapalnou pracovní látkou. Tehdy bylo chlazení vzduchem často používáno pouze pro chlazení solárních článků a ohřátý vzduch se dále nevyužíval.



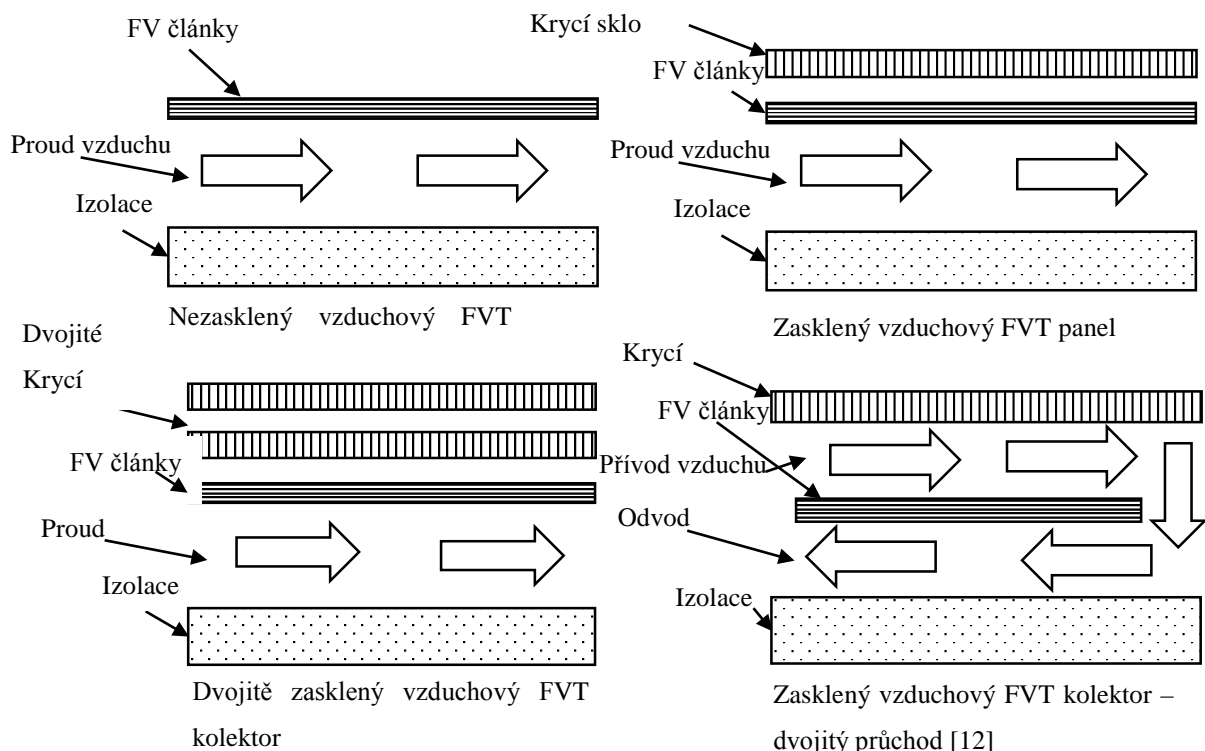
Obr. 6: Umístění usměrňovacích žeber v kolektoru.

Počet způsobů využití vzduchových hybridních solárních kolektorů mírně převyšuje druhý, kapalinový typ panelů. Jak bude diskutováno v kapitole 2.5, mnoho z těchto způsobů naráží na limitovanou skutečnou využitelnost ohřátého vzduchu při reálných podmínkách.

Proudění vzduchu kolem teplosměnné plochy bývá kvůli jejímu zvětšení někdy usměrňováno pomocí žeber (viz Obr. 6). Dvě významné konstrukce vzduchových FVT kolektorů jsou jednoduchý a dvojitý průchod vzduchu absorbérem. Principy těchto konstrukcí budou rozebrány dále.

2.2.1 Jednoduchý průchod

Jednoduchý průchod znamená, že vzduch proudí skrz celý kolektor pouze jednou, tedy se nevrací jako u dvojitého průchodu (viz Obr. 7). Další přístupy ke zlepšení funkce hybridních kolektorů byly nacházeny v úpravách průřezu cest, kudy má proudit ohříváný vzduch. Cílem těchto pokusů bylo samozřejmě navrhnout teplosměnnou plochu tak, aby teplosměnná látka získávala co nejvíce energie a dostala se tak na využitelnou výstupní teplotu. Termická účinnost kolektoru by tak nemusela být pouze v teoretické rovině, způsobené vysokým objemovým průtokem pracovní látky.



Obr. 7: Schématické znázornění konstrukcí vzduchového hybridního kolektoru

Prvním experimentálním návrhem se staly jednoduché lamely, nainstalované přímo pod FV články. U těch bylo dosaženo pro ozáření 600 W/m^2 , vstupní teplotu pracovní látky $35 \text{ }^\circ\text{C}$, ploše kolektoru $1,85 \text{ m}^2$ a hmotnostním průtokem $0,05 \text{ kg/s}$ termické účinnosti 62% .

Zajímavý koncept představoval průchozí otvor s trojúhelníkovým průřezem, který díky kondukcí tepla z absorberu stranami trojúhelníka disponuje větší teplosměnnou plochou. Tento tvar otvorů byl aplikován jako druhá část citovaného experimentu provedeného na vzduchovém hybridním kolektoru s žebry. Předpoklad o výhodnosti větší teplosměnné plochy byl potvrzen relativním zlepšením termické účinnosti kolektoru o 25% .

2.2.2 Dvojitý průchod

Sopian et al. ve své studii [2] popisuje vývoj hybridního solárního kolektoru s dvojitým průchodem takovým, jako je zobrazeno na Obr. 7. Dvojitý průchod v tomto případě znamená, že vzduch vstupuje ze směru jedné hrany obdélníkového kolektoru a projde celou plochou nadvakrát. Poprvé nad FV články, a poté zpět podél jejich spodní strany. Tato studie byla zaměřena na posouzení vlivu typu proudění vzduchu na celkovou účinnost, tedy jak je energeticky výhodné nechat vzduch se „vracet“ a dále ohřívat, místo přivádění většího množství chladného vzduchu, který by byl rozváděn po obou stranách absorberu.

Pro experiment byl použit fotovoltaický panel o rozměrech 660 mm na šířku a 1476 mm na výšku. Fotovoltaické články zabíraly 0,85 m², tedy 87 % plochy panelu. Účinnost použitých fotovoltaických článků byla 14 %, při teplotě panelu 25 °C.

Mezery mezi krycím sklem, články a zadní deskou, s 45 mm silnou vrstvou minerální vlny jako izolace, tvořily dva kanály pro proudění vzduchu a měly výšku 50 mm. Kanály pro proudění vzduchu nebyly v tomto případě vybaveny žádnými žebry.

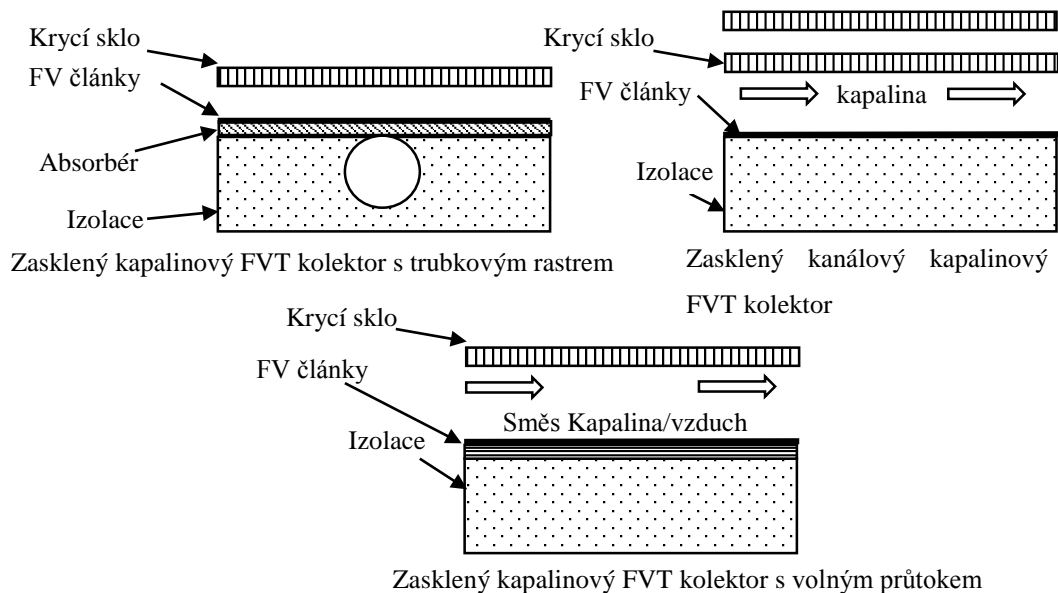
Při ozáření panelu 800 W/m², průtoku vzduchu absorberem 0,036 kg/s a teplotní diferencí pracovní látky 18 °C bylo dosaženo termické účinnosti 60 %.

V závěru této práce bylo řečeno, že vzhledem k tvaru použitého absorberu bude nutné pro zlepšení termické i fotovoltaické účinnosti použít žebra pro lepší odvod tepla z článků a jeho předání do pracovní látky.

2.3 Kapalinový FVT kolektor

Hybridní solární kolektory, které používají jako teplonosnou látku kapalinu, vynikají vyšší termickou účinností proti vzduchovým kolektorům. Na Obr. 8 jsou schématické řezy základních druhů kapalinových FVT kolektorů.

Mezi sebou je pomocí numerických simulací porovnával Zondag et al. [3]. V dalších odstavcích proto budou popsány různé typy konstrukcí hybridních kolektorů, které ve výpočtech použil. Popis podmínek simulací, bude společně s výsledky všech konstrukcí kolektorů rozebíraných v této práci uveden v kapitole 4.3.



Obr. 8: Schématické znázornění typů kapalinových hybridních kolektorů

2.3.1 Trubkový rastr

Trubkový rastr sestává z průtočných trubek připevněných na tepelně vodivý plech. Teplo přechází z povrchu absorbéru vedením lamelou a přes stěnu trubek do teplonosné látky.

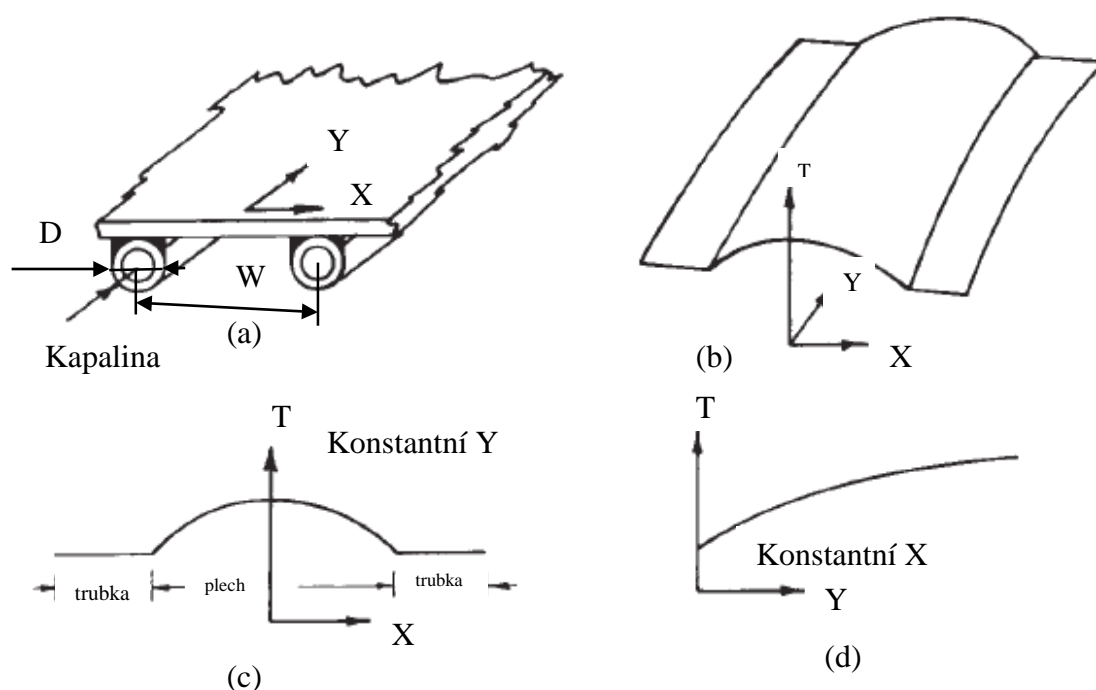
Sestrojit hybridní kolektor s trubkovým rastrem bylo v počátcích vývoje hybridních FVT kolektorů nejjednodušší řešení, protože tato technologie je již dobře prověřená z dlouhodobého používání v termických kolektorech a v této oblasti značně rozšířená. Zároveň ohřev kapaliny dává větší praktický smysl než ohřev vzduchu, jak bude diskutováno v kapitole 2.5.

Vzhledem k tomu, že se jedná o velice efektivní typ absorbéru (tento fakt bude doložen v kapitole 3.3) je dobré probrat jeho fungování do větší hloubky.

Pro přenos tepla je nezbytná existence rozdílu teplot. Lze tedy předpokládat, že teplota absorbéru nebude na celém jeho povrchu konstantní. Schematický řez prostorem mezi dvěma trubkami je znázorněn na Obr. 9 a). Určité množství tepelné energie z dopadajícího záření musí být přeneseno vedením do oblasti, kde se nacházejí trubky. Tudíž bude teplota

v uprostřed mezi sousedními trubkami (v uvažovaném směru x) mnohem vyšší než teplota v blízkosti trubek. Teplota absorbéru přímo nad trubkami bude konstantní, kvůli přítomnosti trubek samotných, doplněných o přídavný materiál použitý na jejich přichycení k desce absorbéru.

Energie předaná do teplonosné látky samozřejmě způsobí její ohřátí, což zapříčiní existenci teplotního gradientu ve směru toku kapaliny. Protože teplota absorbéru v libovolném bodě bude určena mimo jiné teplotou pracovní látky v příslušném bodě, rozložení teploty bude přibližně takové, jako je znázorněno na Obr. 9 b). Detailní pohledy na průběhy prostorového průběhu teplot při konstantní souřadnici X a Y jsou zobrazeny na Obr. 9 c) respektive d).



Obr. 9: Rozložení teploty v absorbéru s trubkovým rastrem [4]

Snahou při konstrukci takového absorbéru je dosažení co „nejplošších“ průběhů křivek teplot, respektive nízkou průměrnou teplotu teplonosné látky (viz 3.2). Toho můžeme kromě volby materiálu docílit úpravou rozměrů W a D . Rozměry mají přímý efekt na účinnostní součinitel kolektoru.

Pro realizaci v hybridním kolektoru nepotřebuje absorbér s trubkovým rastrem speciální povrchové úpravy. Nachází se totiž přímo pod fotovoltaickou částí kolektoru, takže sledovaným parametrem je pouze tepelný odpor spojení těchto dvou vrstev, nikoliv schopnost absorbéru pohlcovat dopadající energii ze záření.

Fyzická konstrukce absorberu nepotřebuje žádné úpravy oproti použití v termických kolektorech. Je tu tedy možnost pro výrobce, jak snížit výrobní náklady použitím standardizovaných absorberů pro termické i hybridní kolektory.

2.3.2 Kanálový průtok

Kanálem průtočný kolektor se odlišuje od ostatních konstrukcí ničím neusměrňovaným proudem teplotně nosné látky nad nebo pod FV články po celé ploše panelu. Dokonce by se v tomto případě dalo hovořit o hybridním kolektoru bez absorberu, protože teplo je do pracovní látky předáváno jejím přímým kontaktem s FV články.

Na Obr. 8 je vyobrazeno řešení, kdy je kanál umístěn nad články. Taková konfigurace vyžaduje opatrný výběr kolektorové kapaliny. Absorpční spektrum kapaliny se musí v tomto případě co nejméně překrývat s absorpčním spektrem fotovoltaických článků, které se nacházejí přímo pod proudící kapalinou.

Nevýhodou této konstrukce je použití pracovní látky v prostoru nad FV články, kde nejsou žádoucí žádné výztuhy rámu. Oběhový okruh kolektoru je provozován jako přetlakový, vůči tlaku atmosférickému. Kapalina tak svým tlakem působí na celou plochu zasklení, čímž ho značně mechanicky namáhá. Použité sklo pak musí být patřičně tlusté, čímž dostaneme velice těžkou a značně křehkou konstrukci. U této konstrukce je nutné dbát zvýšené pozornosti na vodotěsnost fotovoltaických článků.

Variací tohoto řešení kolektoru je umístění průtočného kanálu pod FV články. V takovém případě není potřeba kontrolovat přesah absorpčních spekter fotovoltaických článků a pracovní látky. Použít můžeme dva různé druhy fotovoltaických článků.

Konvenční neprůhledný typ FV článků, jejichž vrchní stranu se přímo dotýká krycího skla. Jejich zadní stranu pak můžeme kvůli vylepšení tlakové odolnosti konstrukce vyztužit kovovou deskou.

Alternativou jsou zatím méně používané průhledné FV články. Jejich zadní stranu nemůžeme vyztužit kovovou deskou, takže musíme pečlivě kontrolovat, zda nebudou zmiňovaným mechanickým namáháním poškozeny. Na spodní stranu průtočného kanálu můžeme v tomto případě umístit plochý černý absorber, který dále vylepší získávání tepelné energie ze záření.

2.3.3 Volný průtok

Použitím konstrukce kolektoru s volným průtokem lze oproti systému kanálového průtoku snížit výrobní náklady tím, že je možné použít o jednu vrstvu skla méně. Spočívá ve volném toku kapaliny přes vrstvu zapouzdřených fotovoltaických článků.

Důležitým parametrem teplotnosné látky je, stejně jako u předcházejícího typu, nutnost malého překryvu absorpčního spektra s fotovoltaickými články.

Použití vody však skýtá nevýhodu v tom, že má velice nízký tlak nasycených par. Prostor průtoku tak při použití vody často vyplňuje směs vody a vodní páry. Tepelná účinnost pak klesá o hodnotu výparného tepla vody. Ztráty dopadajícího záření odrazem pak neprobíhají pouze o vnější stranu krycího skla kolektoru, ale i o kondenzáty na jeho vnitřní straně.

Ze své podstaty tato konstrukce pracuje jako netlaková, není proto potřeba čelit problému s mechanickým namáháním vrstvy krycího skla.

2.4 Chladivo jako pracovní látka

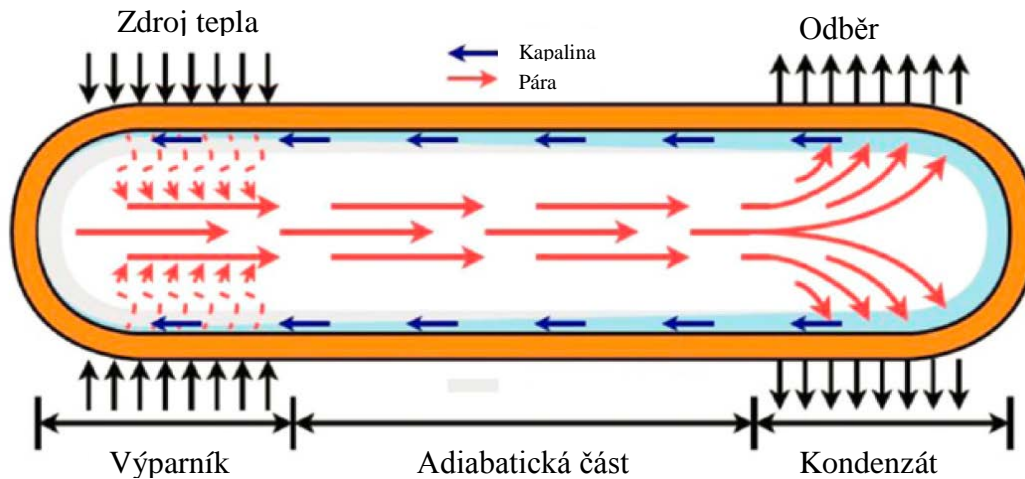
Bylo doloženo, pomocí Obr. 5, že zapojení kolektorů do jednoho okruhu s určitým objemem pracovní látky, snižuje jejich účinnost kvůli akumulaci tepla v zásobníku zvyšující se teplotě teplotnosné látky, vstupující do absorberu. Je tedy žádoucí dosáhnout stavu, kdy by byl absorber ochlazován pracovní látkou na nízkou teplotu, která by se v průběhu času pouze minimálně měnila. K tomuto účelu se s výhodou používají jako pracovní látky chladiva, která mají výparnou teplotu relativně nízkou, v závislosti na použitém typu je možno dosáhnout i hodnot 0 – 20 °C. Rozdíl teplot pracovní látky na vstupu a výstupu do kolektoru je díky fázové změně pracovní látky, která probíhá v kolektoru, zcela minimální.

2.4.1 FVT kolektor s tepelnou trubicí

Použití tepelných trubic je považováno za jeden z nejúčinnějších způsobů přenosu tepla. Využívá přenos tepla vedením a změnu skupenství pracovní látky. Typické uspořádání tepelné trubice je na Obr. 10.

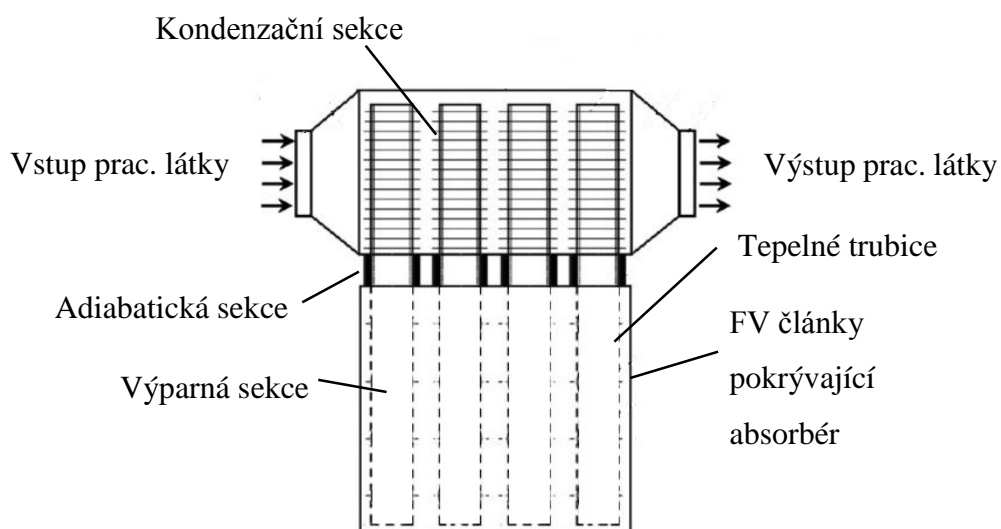
Tepelná trubice se skládá ze tří hlavních sekcí. Ve výparné sekci pracovní látka získává tepelnou energii (chlazením FV článků) a tím přechází z kapalného stavu do stavu plynného.

Po vypaření prochází adiabatickou částí do sekce kondenzační. Kondenzační sekce je z vnější strany tepelné trubice ochlazována (pracovní látkou ze systému pro odvod tepelné energie z FVT kolektorů k dalšímu zužitkování). Po ochlazení pracovní látka tepelné trubice zkondenzuje, adiabatickou částí se dostává zpět do části výparné, kde se celý proces opakuje. Schéma celého kolektoru s tepelnými trubicemi je na Obr. 11.



Obr. 10: Schéma tepelné trubice [5]

Návrhem modelu hybridního solárního kolektoru s tepelnými trubicemi, jeho simulací a verifikací modelu se ve své práci zabýval Shuang-Ying [6]. Předmětem výzkumu byl hlavně výstup pro porovnání dosahovaných účinností přeměny dopadajícího záření na energii pomocí FVT kolektoru s tepelnými trubicemi proti kolektoru s odvodem tepla pomocí trubkového rastru.



Obr. 11: Schéma kolektoru s absorbérem s tepelnými trubicemi [6]

Byl uvažován zasklený kolektor o rozměrech 0,76 m na výšku a 1,9 m na šířku. FV články byly rozmístěny na absorbéru po ploše 1,8 m na šířku a 0,75 m na výšku. Použité tepelné trubice měly celkovou délku 0,92 m a byly rozmístěny rovnoběžně po délce spektrálně selektivního hliníkového absorbéru s roztečí 0,135 m. Kondenzační konce tepelných trubic byly umístěny v kanále s vodou o délce 1,9 m, šířce 0,288 m a hloubce 0,1 m. Byla použita modelová hodnota ozáření 750 W/m^2 , FV články měly laboratorní účinnost (STC) 12 %. Okolní teplota byla $32 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota vstupní pracovní látky $37 \text{ }^\circ\text{C}$ a její průtok $0,05 \text{ kg/s}$.

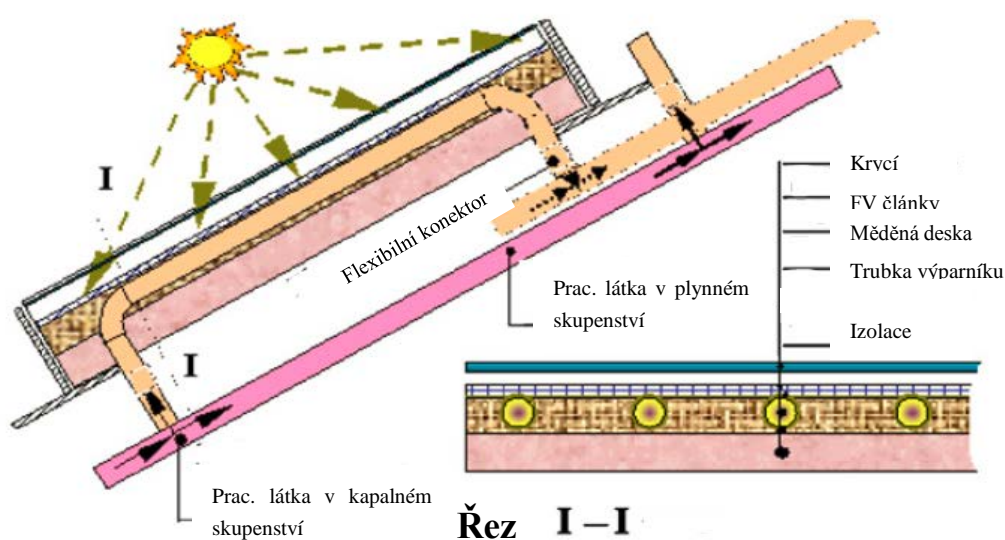
Výsledná elektrická účinnost dosahovala hodnot 10 %, účinnost termická 65 %. Největší předností tepelných trubic je fakt, že dokáží udržovat teplotní spád mezi svými konci zhruba $2,5 \text{ K}$.

2.4.2 Absorbér jako výparník tepelného čerpadla

Kombinací hybridního solárního kolektoru a výparníku tepelného čerpadla můžeme získat lepší pracovní podmínky pro obě zařízení než jejich odděleným použitím. Kolektor v tomto případě pracuje jako výparník tepelného čerpadla.

Z pohledu tepelného čerpadla je výparná teplota pracovní látky relativně vysoká (může být o $0\text{-}10 \text{ }^\circ\text{C}$ vyšší než teplota okolí), což je velice přínosné pro koeficient účinnosti tepelného čerpadla (COP). Pro kolektor je zas výparná teplota pracovní látky z hlediska ochlazování FV článků relativně nízká, což pomáhá zlepšovat jejich účinnost přeměny záření na elektrickou energii. Příklad použití hybridního kolektoru jako výparníku tepelného čerpadla, je na Obr. 12.

Experimentální měření tohoto provedení provedli ve své práci Jie Ji et al. [7]. Použili zapojení celkem devíti kolektorů najednou o celkové ploše 5,49 m², z toho 4,59 m² bylo zakryto samotnými FV články. Každý z devíti použitých kolektorů měl rozměry 1,01 m na šířku a 0,73 m na výšku. Absorbér z trubkového rastru byl vyroben ze serpentinovitě uložených měděných trubek o průměru 6 mm. V systému byla použita chladicí směs R22 a použité čerpadlo mělo výrobcem uváděný COP=3. Autoři nepopisují žádnou dodatečnou izolaci zadní strany kolektorů, která by byla přidána do hliníkového rámu. Z kolektorů bylo odebráno zasklení. Použité FV články mají při laboratorních podmínkách (sluneční ozáření 1000 W/m² a okolní teplota 25 °C) účinnost 15,4 %.



Obr. 12: Schéma zapojení tepelného čerpadla s hybridním solárním kolektorem [5]

Test probíhal po dobu čtyř dní v reálných podmínkách při průměrném slunečním ozáření 606 W/m², rychlosti větru 3,2 m/s a okolní teplotě 13,7 °C.

Pro vyhodnocení účinnosti celé instalace zavedli autoři kombinovaný topný faktor tepelného čerpadla COP, který zohledňoval fakt, že veškerá elektřina vyrobená pomocí fotovoltaických článků byla vždy spotřebována k provozu tepelného čerpadla. Zavedený koeficient tedy uvažoval za energii spotřebovanou čerpadlem pouze tu, kterou bylo potřeba odebrat ze sítě, nikoliv veškerou elektrickou energii, kterou čerpadlo spotřebovalo na svůj provoz. Tento upravený topný faktor označili jako COP_{p/t}.

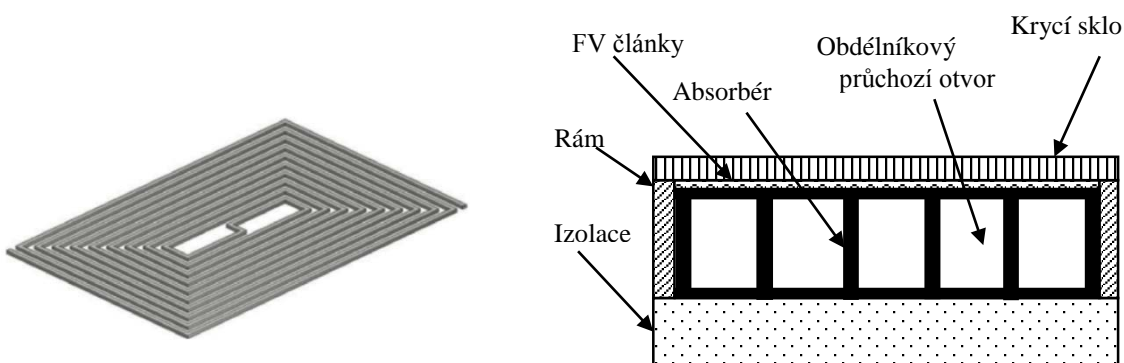
Maximální dosažený COP, maximální COP_{p/t}, průměrné COP, průměrné COP_{p/t} a průměrná fotovoltaická účinnost byla: 10,4, 16,1, 5,4, 8,3 a 13,4 %. Při průměrném elektrickém výkonu 380 W.

Z hodnot vyplývá, že použitím kombinace těchto dvou technologií došlo ke zvýšení účinnosti tepelného čerpadla, proti jeho použití konvenčním způsobem. A minimálnímu snížení fotovoltaické účinnosti článků proti laboratorním hodnotám (STC podmínkám).

2.5 Aplikace různých konstrukcí FVT kolektorů

Byla provedena srovnávací studie [8], která měla za úkol zodpovědět otázku, zda je z hlediska účinnosti lepší použít jako pracovní látku vodu nebo vzduch.

Absorbér pro ohřev vody byl tvořen z nerezových trubek, svařených do tvaru spirály (viz Obr. 13 a). Plocha spirálového absorbéru byla 915 mm na výšku a 628 mm na šířku. Absorbér pro ohřev vzduchu, ve tvaru obdélníkových průchozích otvorů, vytvořený z hliníkových profilů, ukazuje Obr. 13 b). Jeho rozměry byly 1000 mm na výšku a 650 mm na šířku



Obr. 13 a): Spirálovitá cesta pro ohřev vody

Obr. 13 b): Schématický řez panelu s obdélníkovými průchozími otvory

Oba druhy absorbérů byly zakryty soustavou FV článků. Články sestavené do panelu o rozměrech 1000 mm na výšku a 650 mm na šířku, byly zaskleny, připevněny stejným adhezivem a zespu od izoloány 50 mm tlustou vrstvou minerální vlny. Pokus byl prováděn při konstantní okolní teplotě 25 °C a ozáření 800 W/m².

Výsledky experimentu jsou následující. Kolektor s vodou jako pracovní látkou měl kombinovanou FV/T účinnost 64 %, z toho 11 % účinnost elektrickou, při teplotě FV článků 55 °C, průtokem 0,011 kg/s a maximálním elektrickým výstupním výkonem 25 W. Kolektor s obdélníkovými průchozími otvory měl při teplotě článků 39 °C a průtoku 0,0754 kg/s kombinovanou FV/T účinnost 55 % a z toho 10 % účinnost elektrickou. Maximální elektrický výstupní výkon činil v tomto případě 22 W.

Za těchto podmínek tedy experiment prokázal mírně lepší výsledky pro kolektor s kapalnou pracovní látkou. Nebral v úvahu energii spotřebovanou na čerpání pracovních látek, která by kvůli zhruba tisíckrát nižší hustotě vzduchu vůči vodě znamenala zhoršení celkové energetické bilance vzduchového kolektoru.

Teplu získané hybridním vzduchovým kolektorem lze využít na ohřev větracího vzduchu přiváděného do místnosti přes kolektor, teplovzdušné vytápění objektu pomocí řízeného rozvodu cirkulačního vzduchu nebo přípravu teplé vody použitím výměníku vzduch-voda.

Další možnost využití je použití teplého vzduchu na sušení zemědělských plodin [9]. Nestabilní horké a vlhké klima, zejména tropických států, může totiž značně ovlivnit jejich hospodářské výsledky, které závisí na pěstování nejrůznějších plodin a jejich prodej v sušené formě. Teplovzdušné FVT kolektory mohou zajistit stabilní vnitřní prostředí v halách na sušení plodin a větší jistotu profitu pro potravinové producenty, kteří mohou ovlivnit proces sušení a nemusejí se spoléhat na nestálé přírodní podmínky, které by proces sušení ohrožovaly ve venkovních prostorách.

V současnosti platí, že vzduchem chlazené kolektory ustupují do pozadí, případně se používají pouze ve formě pasivně provětrávaných fasád. Tento trend má několik hlavních důvodů

Zprvé, protože měrná tepelná kapacita vzduchu je více než čtyřnásobně menší než měrná tepelná kapacita vody a zároveň jeho hustota je zhruba tisíckrát nižší, je pro zachování stejného teplotního spádu nutný mnohonásobně větší objemový průtok vzduchu, než jaký by musel být realizován u oběhu s vodou (za předpokladu stejně výkonných tepelných absorbérů v kolektoru). Neúměrně tak narůstá potřebná pomocné energie pro provoz ventilátorů, čímž se zhoršuje celková energetická bilance vzduchového hybridního kolektoru.

Druhý, velice významný důvod ústupu vzduchových hybridních kolektorů vychází z praxe. Vzduchové kolektory samozřejmě poskytují nejvíce teplého vzduchu při vysokém slunečním ozáření – při slunečných, dá se předpokládat, že teplých, dnech. V takové situaci nemá uživatel pravděpodobně zájem o vytápění interiéru. Protože akumulace teplého vzduchu je velice nepraktická, zbývá pouze možnost převádět získané teplo přes výměník do jiné teplosměnné látky. Tím narážíme na fakt, že v takové situaci je výhodnější používat přímo kolektory s kapalnou pracovní látkou.

Pracovní látka kolektorů, většinou směs glykolu s vodou, předává teplo vodě v zásobníku tepla přes výměník tepla. Zásobník tepla je spojovacím článkem mezi okruhem spotřebičů a okruhem kolektorů. Až ze zásobníku je teplo pomocí pracovní látky odebíráno a využíváno.

V našich zeměpisných šířkách se bohužel období největších tepelných zisků z kolektorů neshoduje s obdobím největší potřeby tepla. Teplo z kolektorů se tedy nejčastěji používá přes léto pro přípravu teplé vody a v ostatních měsících k přehřevu pracovní látky v zásobníku tepla. Šetří se tak energie potřebná k ohřevu pracovní látky v systému jiným zdrojem.

3 KONSTRUKČNÍ VLIVY NA ÚČINNOST KOLEKTORŮ

Celková účinnost hybridních FVT kolektorů je dána elektrickou a termickou účinností, vycházející z jejich výkonu. Podobně jako u konvenční FV a FT technologie je účinnost, respektive výkon závislý na teplotní úrovni a slunečním ozáření. V konceptu hybridního kolektoru se elektrický a tepelný výkon navíc vzájemně ovlivňují.

U plochých hybridních kolektorů, kterými se zabývá tato práce, prochází záření zasklením na fotovoltaické články, kde je jeho část přeměněna na elektrickou energii. Část z energie, která dopadla na fotovoltaické články je přenesena do absorbéru, odkud jí ve formě tepla odvádí proudící pracovní látka.

V následujících kapitolách bude nejdříve rozebrána optická účinnost kolektoru, tedy poměr množství záření dopadajícího na povrch kolektoru a záření, které je pohlceno absorbérem nebo fotovoltaickými články. Optická účinnost přímo určuje relativní množství energie, které je do hybridního kolektoru dodáváno. Přímo tak ovlivňuje obě jeho dílčí účinnosti. V druhé kapitole této části práce bude probrána termická účinnost kolektoru. Problematiku uzavře kapitola pojednávající o účinnosti elektrické.

3.1 Optická účinnost

Tělesa z reálných materiálů vystavená záření mohou dopadající záření propustit, odrazit nebo pohltit. Přičemž součet vyjmenovaných složek se rovná jedné, jak popisuje rovnice (1)

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (1)$$

kde τ je propustnost, ρ je odrazivost a α je pohltivost daného materiálu. Tato rovnice je platná pro jakoukoliv vlnovou délku, ale pro různé vlnové délky mohou jednotlivé koeficienty nabývat různých hodnot.

Solární sklo (s nízkým obsahem oxidů železa), které se používá nejčastěji, odráží od každého svého povrchu 4,4 % kolmo dopadajícího slunečního záření. V případě zaskleného kolektoru je tedy celková ztráta záření odrazem na zasklení 8,8 %. Ztrátu záření odrazem na zasklení lze použitím antireflexivních povlaků snížit až na 5,6 %.

Pohltivost slunečního záření běžného skla se pohybuje mezi 5 a 10 %, což je pro použití v solární technice nevýhodné. Nižší pohltivosti dosahujeme snížením množství oxidů železa ve skle. Při obsahu nečistot ve skle 0,05 % je již pohltivost 2,5 % a použitím vysoce čistého skla s 0,01 % nečistot je možno dosáhnout pohltivosti pouze 1 %.

Velmi důležitou úlohu hrají i optické vlastnosti povrchu absorbéru, nebo v případě hybridních solárních kolektorů povrch fotovoltaických článků. Ideální povrch termického absorbéru by měl mít vysokou pohltivost, která mu dovolí získat co největší množství energie z dopadajícího záření. Zároveň by měl mít nízkou emisivitu, která přímo určuje případné ztráty tepla radiací do okolí.

3.2 Účinnost termické části kolektoru

Tepelný výkon hybridních kolektorů značně převyšuje jejich výkon elektrický. Zvýšení termické účinnosti tak bude mít významný dopad na množství získávané energie, respektive na celkovou účinnost kolektoru. Termickou účinnost kolektoru lze určit dle vztahu (2)

$$\eta = F' \left[\tau\alpha - \frac{U(t_m - t_e)}{G} \right] = F' [\tau\alpha - U \cdot \Delta t_{red}] \quad (2)$$

kde je U [W/m².K] součinitel prostupu tepla kolektoru, který je odvozen z rovnic tepelné rovnováhy a je roven součtu součinitelů prostupu tepla zakrytím, zadní stěnou a boční stěnou kolektoru. Účinnostní součinitel kolektoru F' , závisí na geometrii a tepelných vlastnostech absorbéru, proudění uvnitř trubek absorbéru a celkovém součiniteli prostupu tepla absorbéru. Tento součinitel reprezentuje poměr množství skutečně získávané energie a energie, kterou by bylo možné získat, pokud by měl povrch absorbéru zcela stejnou teplotu jako teplota okolní kapaliny proudící ve vyšetřovaném místě. Kde G [W/m²] ozáření, t_e [°C] je teplota okolí kolektoru a t_m [°C] je střední teplota teplotonosné kapaliny v kolektoru podle rovnice (3)

$$t_m = \frac{(t_{k1} + t_{k2})}{2} \quad (3)$$

ve které je t_{k1} [°C] teplota pracovní látky vstupující do kolektoru a t_{k2} [°C] je teplota pracovní látky vystupující z kolektoru.

3.3 Účinnost fotovoltaické části kolektoru

Zasklený hybridní kolektor má vůči solárnímu panelu nižší elektrickou účinnost. Elektrická účinnost je snížena především kvůli odrazu dopadajícího slunečního záření od krycího skla, které může i při použití kvalitního skla s nízkým obsahem železa vyústit v pokles optické účinnosti o 8 %. Použitím skla vysoce propustného pro záření, lze ztráty snížit až na 4 %, jak bylo detailně popisováno v kapitole věnované optické účinnosti celého kolektoru. Účinnost fotovoltaické přeměny je ovlivňována pracovní teplotou článků. Vliv pracovní teploty v závislosti na aktuálních pracovních podmínkách kolektoru, jak popisuje vztah (4)

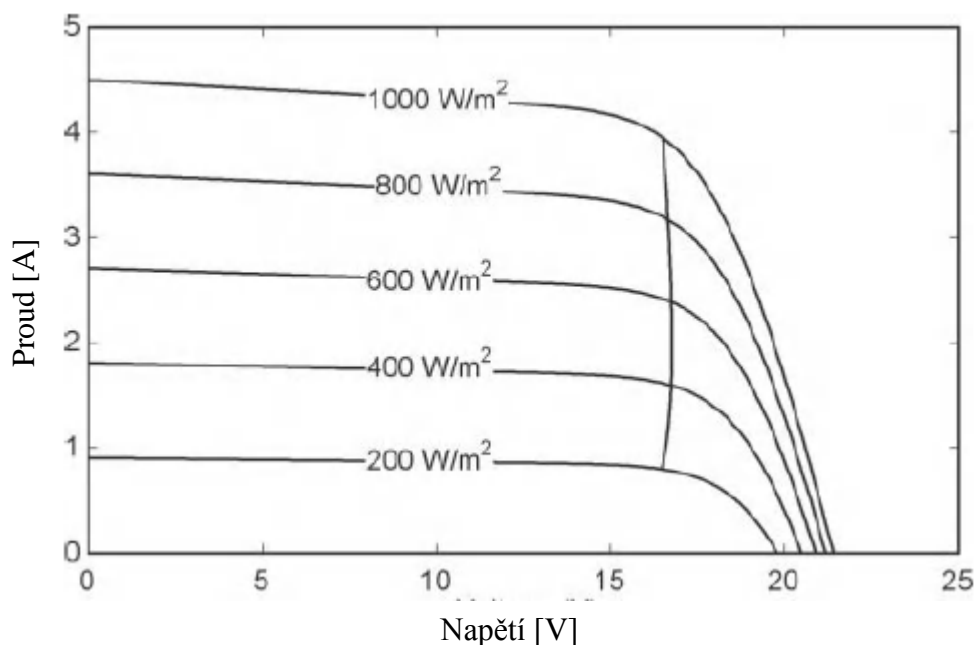
$$\eta_{el} = [1 + \beta(t - 25)] \cdot \eta_{ref} \quad (4)$$

v něm je t [°C] teplota článků, η_{ref} je referenční účinnost článku při standardních testovacích podmínkách (STC) a β teplotní koeficient výkonu (nabývá záporných hodnot). Koeficient β má typické hodnoty -0,0045 [1/K] pro monokrystalický křemík a 0,002 [1/K] pro křemík amorfni.

Právě rozbor této rovnice vedl k prvním pokusům o sestavení hybridních solárních kolektorů, protože ochlazováním FV článků jasně narůstá jejich účinnost při výrobě elektrické energie z dopadajícího slunečního záření. Tento efekt bývá pro nezasklené hybridní kolektory uvažován jako benefiční proti čistému FV panelu, kvůli aktivnímu chlazení článků teplotnosnou látkou. Rovnice (5) představuje obecný vztah pro zjištění účinnosti fotovoltaických článků. Členy U_{MPP} [V] a I_{MPP} [A] představují MPP (bod maximálního výkonu) napětí, respektive proud z článků a A [m²] je plocha panelu.

$$\eta_e = \frac{(U \cdot I)_{MPP}}{G \cdot A} \quad (5)$$

Pro každou kombinaci stáří článku a provozních podmínek, jako ozáření, teplota článku a další, existuje ve výstupní charakteristice fotovoltaického článku jeden bod, při kterém je výkon článku nejvyšší. Příklad takové charakteristiky je na Obr. 16.



Obr. 14: V-I charakteristiky FV článků při různých hodnotách ozáření s vyznačenými MPP [4]

Referenční elektrická účinnost fotovoltaického článku dobře slouží k rychlému porovnání dvou typů článků mezi sebou. Od skutečné provozní účinnosti však může být značně vzdálená.

Určením odchylky skutečné a referenční elektrické účinnosti fotovoltaických článků použitých v hybridních FVT kolektorech se ve své práci věnoval Ji [10]. Pro porovnání sestavil numerický model. Konfigurace modelu vycházela z představy hybridních solárních kolektorů integrovaných ve fasádě o celkových rozměrech 4 m na šířku a 10 m na výšku. Uvažovaná fasáda měla sestávat ze čtyřiceti kapalinových kolektorů s trubkovým rastroem, zasklených 3mm sklem s propustností 94 %. Na zadní straně kolektorů byla izolace o tloušťce 20 mm, s tepelnou vodivostí 0,036 W/m K. Referenční (STC) účinnost fotovoltaických článků byla uvedena 14 %. Kvůli reálné simulaci ročního provozu kolektorů byla do modelu zadána skutečná data o povětrnostních podmínkách v Hongkongu, naměřená v roce 1989. Stěna byla orientována na západ. Simulovaná provozní elektrická účinnost monokrystalických fotovoltaických článků 10,3 %, což představuje proti referenční účinnosti snížení téměř o třetinu.

U zasklených FVT kolektorů musíme brát v úvahu stín vrhaný okrají kolektoru na články. Sledování tohoto jevu je důležité proto, že i zastíněním pouze jednoho FV článku může dojít k výraznému snížení elektrického výkonu celého kolektoru.

Objevují se proto snahy zmenšit tloušťku vzduchové vrstvy mezi zasklením a fotovoltaickými články tak, aby ke stínění docházelo v co nejmenší míře. Jako optimální bývá v literatuře uváděn rozměr 12-15 mm [4].

3.4 Vyhodnocení účinností různých konstrukcí kolektorů

V již citované práci [3] provedl Zondag jednu z nejrozsáhlejších srovnávacích analýz, různých konstrukcí hybridních solárních kolektorů, dostupných v literatuře. Vzhledem k velkému počtu velice rozdílných konstrukcí, což by vedlo k nákladnému testování, provedl numerickou simulaci, jejíž vstupní hodnoty byly již popsány v kapitole 3.1, a výsledky jsou uvedeny v Tabulkách 1 a 2. Validaci vypočtených hodnot pak provedl měřením na skutečném zaskleném kolektoru s trubkovým rastrem.

Tabulka 1 prezentuje hodnoty účinností, jaké jsou v modelu dosahovány pro $t_{red}=0$. Nezasklený kolektor s trubkovým rastrem vykazuje nejnižší tepelnou účinnost ze sledovaných konstrukcí, kvůli konstrukčně nízké hodnotě F' .

Nezasklená konstrukce kolektoru zajišťuje vysokou elektrickou účinnost, protože nedochází ke ztrátám záření na zasklení (viz kapitola 3.1).

Obě zasklené varianty kolektoru s trubkovým rastrem dosahují při daných podmínkách relativně podobných účinností. U dvojité zaskleného kolektoru se potvrzuje předpoklad snížení elektrické účinnosti, která je způsobena vyššími optickými ztrátami.

Ze simulací vycházejí nejlépe konstrukce kolektorů s kanálovými průtoky. Obě jejich účinnosti jsou totiž nejbližší etalonům v podobě termického kolektoru a fotovoltaického panelu. Příčinou těchto výsledků je malý tepelný odpor mezi FV články a pracovní látkou.

Tab. 1: Účinností hybridních solárních kolektorů různých konstrukcí při $t_{red}=0$ [3]

Konstrukce	Termická účinnost	Elektrická účinnost
FV panel	–	0,097
Nezasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,52	0,097
Zasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,58	0,089
Dvojitě zasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,58	0,081
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem nad FV články	0,65	0,084
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem pod neprůsvitnými FV články	0,60	0,090
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem pod průsvitnými FV články	0,63	0,090
Hybridní kolektor s volným průtokem	0,64	0,086
Termický kolektor s trubkovým rastrem	0,83	-

K těmto zjištěním je však nutné podotknout, že v reálném systému je zmiňovaná podmínka platnosti měřených hodnot $t_{red} = 0$ značně vzdálená. Respektive bude platit pouze ve výjimečných situacích a konfiguracích, kdy je teplota pracovní látky protékající kolektorem na úrovni teploty okolí.

Cílem této studie bylo nalézt typ FVT hybridního kolektoru, který bude mít nejvyšší provozní účinnost při reálných podmínkách. Pro srovnání ročních tepelných zisků solárního systému s různými konstrukcemi hybridních FVT kolektorů byla provedena další simulace, na jejímž základě byly určeny průměrné roční provozní účinnosti.

Systém sestával ze dvou paralelně zapojených hybridních kolektorů, o ploše 1,75 m². Ty byly napojeny do nádrže na přípravu teplé vody o objemu 175 l, s nastaveným průtokem pracovní látky na 175 l/h. Koeficienty tepelných ztrát pro nádobu a instalační potrubí byly stanoveny na 0,4 W/K m², respektive 3 W/K m. Výsledky této simulace jsou uvedeny v Tabulce 2.

Při dlouhodobých reálných podmínkách jsou rozdíly v účinnostech mezi jednotlivými konstrukcemi znatelně menší, než tomu bylo u podmínek v případě popsaném Tabulkou 1.

Tab. 2: Průměrné roční provozní účinnosti hybridních solárních kolektorů [3]

Konstrukce	Termická účinnost	Elektrická účinnost
FV panel	–	0,072
Nezasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,24	0,076
Zasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,35	0,066
Dvojitě zasklený FVT kolektor s trubkovým rastrem	0,38	0,058
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem nad FV články	0,38	0,061
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem pod neprůsvitnými FV články	0,35	0,067
Hybridní kolektor s kanálovým průtokem pod průsvitnými FV články	0,37	0,065
Hybridní kolektor s volným průtokem	0,34	0,063
Termický kolektor s trubkovým rastrem	0,51	-

Pokud by byla výhodnost konstrukce posuzována pouze na základě dosažených účinností, pravděpodobně by byla zvolena jedna z variant s kanálovým průtokem pod FV články. Jako výhodný pro reálné použití se jeví jednou zasklený hybridní kolektor s trubkovým rastrem. Jeho výroba je totiž významně jednodušší než u kanálových kolektorů a využívá komponent běžně používaných u stávajících termických kolektorů. Odpadají potíže spojené s vyztužováním FV článků proti jejich mechanickému poškození, případně finanční náklady na pořízení průhledných fotovoltaických článků.

Za upozornění stojí silný pokles termické účinnosti kolektoru s volným průtokem. Je to způsobeno především odparem pracovní látky, který odvádí teplo.

Kvůli značným rozdílům mezi hodnotami účinností z Tabulky 1 a 2, byla provedena další simulace se zaměřením na jednotlivé mechanismy ztrát, s cílem zjistit jejich dopady. Jako referenční byl zvolen zasklený kolektor s trubkovým rastrem. Simulované hodnoty lze nalézt v Tabulce 3. Z tepelných ztrát je nejvýznamnější pokles termické účinnosti

kolektorů při vyšších redukováných teplotách spolu s tepelnými ztrátami potrubí s 5% vlivem. Elektrickou účinnost nejvíce ovlivňují ztráty odrazem záření na krycím skle (0,8 %). Překvapivě nízký je vliv zvýšené teploty fotovoltaických článků na elektrickou účinnost, který činí pouze 0,2 %. Toto číslo je zatíženo faktem, že průměrná výstupní teplota pracovní látky z kolektoru byla 28 °C, což není dostatečné pro běžnou přípravu teplé vody.

Tab. 3: Vlivy různých mechanismů ztrát na průměrnou účinnost solárního systému s FVT hybridním kolektorem s trubkovým rastrem [3]

Omezení	Termická účinnost	Omezení	Elektrická účinnost
Reálný stav	0,35	Reálný stav	0,066
Bez zohlednění částečného ozáření	0,37	Bez zohlednění vlivu teploty na účinnost	0,068
Bez zohlednění tepelné ztráty z nádrže	0,38	Bez zohlednění neúplného nebo nepřímého osvětlení	0,074
Bez zohlednění tepelné ztráty z potrubí	0,43	Bez zohlednění částečného ozáření	0,078
Bez zohlednění snížení účinnosti zvýšením redukováné teploty	0,58	Bez zohlednění ztrát v měniči napětí	0,087
		Bez zohlednění ztrát při vzorkování PP	0,089
		Bez zohlednění odrazu na krycím skle	0,097

4 VÝROBKY DOSTUPNÉ NA TRHU

V současnosti nejsou hybridní fotovoltaicko-tepelné solární kolektory na trhu velmi rozšířené. Výroba hybridního FVT kolektoru je komplikovanější než výroba konvenčního termického kolektoru nebo fotovoltaického panelu. Kvůli nízké poptávce po této technologii tak mnoho začínajících výrobců relativně rychle zkrachuje.

Průkopníky na poli komerčního vývoje a prodeje se tak stávají malé společnosti, pro které jsou nosnými produkty kolektory fototermické nebo fotovoltaické. Pro tyto výrobce jsou hybridní solární kolektory vzhledem k objemům jejich prodeje zatím spíše okrajovým zbožím. Vývoj hybridních FVT kolektorů nicméně může těmto společnostem

přinést v dlouhodobém horizontu technologický náskok. Přehled vybraných komerčně dostupných hybridních FVT kolektorů je uveden v Tab. 4.

Při současné cenové hladině hybridních FVT kolektorů je jejich instalace na omezené ploše střech rodinných domů ekonomicky nevýhodná proti instalaci konvenčních kolektorů. Očekává se využívání přednosti hybridních FVT kolektorů, kterou je relativně vysoký energetický zisk z jednotky plochy. Proto by mohly vznikat solární parky, fungující jako centrální zdroje elektrické a tepelné energie pro menší města.

Podle zprávy Evropské federace průmyslu solární a tepelné techniky [11] směřovalo v roce 2003 zhruba 90 % nově prodaných solárních kolektorů na rezidenční umístění. Podíl průmyslových instalací vykazuje vysoké tempo růstu, které je bezpochyby v posledních letech snahou Evropské unie o zvyšování podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu.

Tab. 4: Přehled hybridních FVT kolektorů od vybraných výrobců

Výrobce, země původu a obchodní název	Anaf – It H-NRG	Fototherm – It Serie CS	Solink – It HYBRID BLU POWER	Tezeus – Gr Teszeus PV- T 250	Solimpex – Tr Volther PowerVolt	RES – De Res- PV++	Wiosun – De PV-Therm
Rozložení FV článků a plocha panelu [mm]	6 x 10 156 x 156	6 x 10 156 x 156	6 x 10 156 x 156	6 x 10 156 x 156	6 x 12 125 x 125	6 x 10 156 x 156	6 x 8 156 x 156
PV výkon, STC	230W	240W	240W	240W	170W	240W	185W
Zasklení	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Rozměry [mm]	165x100x5	164x98x4	165x100x4	165x99x5	160x82x9	163x99x4	131x100x5
Hmotnost [kg]	34	27	32	27	24	24	40
Materiál tepelného výměníku	Al	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Ocel
Maximální termický výkon při STC	800 W 500 W/m ²	890 W 560 W/m ²	850 W 530W/m ²	650 W 370 W/m ²	600 W 480W/m ²	870 W 540W/m ²	720 W 550 W/m ²
Cena €/ ks	325	680	700	665	750	700	650

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala hybridním fotovoltaickým solárním kolektorem, který v sobě spojuje konstrukční prvky fotovoltaického a fototermického kolektoru. Bylo představeno několik druhů konstrukcí kolektorů, které se od sebe liší používanou pracovní látkou a provedením tepelného absorbéru.

Pro různé druhy tepelných absorbérů byly v literatuře nalezeny simulace nebo experimenty, které pomohly lépe určit jejich vlastnosti, které se týkají přenosu získávaného tepla do pracovní látky. Jako velice perspektivní možnost přenosu tepelné energie z absorbéru do topného systému, byly představeny konstrukce kolektorů, které využívají jako pracovní látku chladivo.

V kapitole věnované aplikacím hybridních FVT kolektorů byly vyjmenovány možnosti využívání získaného tepla. Díky studii nalezené v literatuře bylo stanoveno, že pro využití v rezidenční sféře je vhodnější kapalná pracovní látka kolektorů proti vzduchu jako pracovní látce.

Důkladně byly probrány účinnosti elektrická i termická. Byly představeny základní vztahy pro jejich výpočet. Dále byl v souvislosti s účinnostmi diskutován vliv a význam členů v rovnicích pro jejich stanovení.

Předposlední část práce obsahovala porovnání několika konstrukcí hybridních fotovoltaických kolektorů z hlediska jejich účinností za provozu při reálných podmínkách. Jako nejvýhodnější byl určen zasklený kolektor s trubkovým rastrem.

Poslední část této práce obsahuje přehled vybraných kapalinových hybridních FVT kolektorů dostupných na evropském trhu. Zároveň je citována statistika shrnující prodeje solárních kolektorů v evropské unii, která předpovídá stálý růst prodeje.

6 LITERATURA

- [1] SANDNES, B., REKSTAD J.: A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy* [online]. 2002, roč. 72, č. 1, s. 63–73. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/S0038-092X(01)00091-3
- [2] OTHMAN, M., YATIM B., SOPIAN K., ABU BAKAR M.: Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy* [online]. 2005, roč. 30, s. 2005–2017. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2004.10.007
- [3] ZONDAG, H., DE VRIES D. W., VAN HELDEN W., VAN ZOLINGEN R. VAN STEENHOVEN J. :The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* [online]. 2003, roč. 74, s. 253–269. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/S0038-092X(03)00121-X
- [4] DUFFIE, J., BECKMAN W., WOREK W. M.: *Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed.* [online]. 1994. ISBN 1118418123. Dostupné z: doi:10.1115/1.2930068
- [5] ZHANG, X., ZHAO, X., SMITH S., XU J., YU, X.: Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, roč. 16, č. 1, s. 599–617. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.08.026
- [6] WU, S., ZHANG, Q., XIAO, L., GUO, F.: A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation. *Energy and Buildings* [online]. 2011, roč. 43, č. 12, s. 3558–3567. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.017
- [7] JI, J., PEI, G., CHOW, T., LIU, K., HE, H., LU J., HAN C.: Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system. *Solar Energy* [online]. 2008, roč. 82, s. 43–52. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2007.04.006
- [8] IBRAHIM, A., JIN, G. L. J., DAGHIGH, R., SALLEH, M. H. M., OTHMAN, M. Y., RUSLAN, M. H., SOHIF, M., SOHIF, K.: ENERGY, Solar. Hybrid Photovoltaic Thermal (PV / T) Air and Water Based Solar Collectors Suitable for Building Integrated Applications 2009, roč. 5, č. 5, s. 618–624.

- [9] OTHMAN, M. Y H, SOPIAN, K., YATIM, B., DAUD, W. R. W.: Development of advanced solar assisted drying systems. *Renewable Energy* [online]. 2006, roč. 31, s. 703–709. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2005.09.004
- [10] JI, J., CHOW, T. T., HE, W.: Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong. *Building and Environment* [online]. 2003, roč. 38, s. 1327–1334. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1323(03)00115-X
- [11] SOLAR, European, Thermal INDUSTRY a Market OVERVIEW. Sun in Action II – A Solar Thermal Strategy for Europe. *Growth (Lakeland)*. 2003, roč. 1, č. April, s. 1–79.
- [12] SOPIAN, K., LIU H. T., KAKAC, S., VEZIROGLU, T. N.: Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems. *Energy Conversion and Management* [online]. 2000, roč. 41, s. 353–365. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(99)00115-6
- [13] IBRAHIM, A., OTHMAN, M. Y., RUSLAN, M. H., MAT, S., SOPIAN, K.: Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, roč. 15, č. 1, s. 352–365. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2010.09.024