České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav techniky prostředí

Disertační práce

KOMBINOVANÝ SOLÁRNÍ KOLEKTOR VZDUCH-KAPALINA

Ing. Viacheslav Shemelin

Studijní obor:

Technika prostředí

Školitel:

doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

Praha, 2020

SOUHRN

V našich klimatických podmínkách je stále nejrozšířenější formou využití přímé fototermální přeměny sluneční energie přeměna pomocí plochých kapalinových solárních kolektorů. Nicméně se stále častěji lze setkat se snahou o využití ohřevu vzduchu v teplovzdušných kolektorech slunečním zářením, ať již pro účely vytápění nebo pro ohřev větracího vzduchu. Myšlenka kombinovat oba druhy technologie pro konstrukci kolektoru pro ohřev dvojice teplonosných látek kapalina/vzduch vyplynula z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizaci doby provozu solárního systému. Ani na tuzemském ani na zahraničním trhu nejsou v současné době k dispozici kombinované solární kolektory a to zejména ze dvou důvodů. První důvod souvisí se složitou konstrukcí absorbéru, složitým solárním systémem a vysokou cenou kolektorů. Druhým důvodem je nedostatečné množství výzkumu v oblasti potenciálu využití kombinovaných kolektorů pro přípravu teplé vody a vytápění.

Práce je založena na vývoji detailního matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru, implementaci vyvinutého modelu do simulačního prostředí TRNSYS a validaci modelu v kapalinovém a vzduchovém provozním režimu. Pro experimentální validaci modelu byl vytvořen funkční vzorek kombinovaného kolektoru se třemi různými konstrukcemi absorbéru. Dále byla provedena detailní analýza nejistoty experimentálního měření, detailní analýza nejistoty matematického modelu a parametrická analýza modelu. Následně byl validovaný model kombinovaného kolektoru použit pro analýzu potenciálu využití kombinovaných solárních kolektorů pro různé klimatické podmínky, pro různé druhy solárních systémů a pro rodinné domy s různou energetickou náročností. Kromě toho byla uskutečněna optimalizace konstrukce kolektoru pro konkrétní klimatické podmínky a pro určitou aplikaci.

SUMMARY

Flat plate liquid solar collectors are predominantly used as solar to thermal energy conversion technology in Czech Republic climatic conditions. However, there is a growing tendency to use solar air collectors either for space heating purposes or for preheating of fresh air. The idea of combining both types of technology in a dual air/liquid solar collector is not new. It has emerged from the demand to increase the annual energy yield of a solar system and to maximize the operating time of the solar system. Currently dual solar air/liquid collectors are not commercially available, mainly for two reasons. Firstly, the solar dual collector design and the whole design of solar system are relatively complex, in addition to high prices. Secondly, insufficient research conducted in its potential application in the hot water preparation and in space heating.

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

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Tomášovi Matuškovi, Ph.D., za odborné vedení práci, přínosné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří rovněž přispěli cennou radou a zkušenostmi.

Kromě toho bych rád poděkoval své rodině a kolegům, kteří mě během studia podporovali.

Viacheslav Shemelin

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 31. 08. 2020

…….....

Viacheslav Shemelin

SOUHRN 2

SUMMARY 3

PODĚKOVÁNÍ 4

PROHLÁŠENÍ 5

PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN 9

1. ÚVOD 13

2. REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY 15

2.1 Současný stav problematiky v oboru kapalinových solárních kolektorů 15

2.1.1 Transparentní tepelné izolace 15

2.1.2 Selektivní absorbéry 16

2.1.3 Nové materiály absorbéru 18

2.2 Současný stav problematiky v oboru vzduchových solárních kolektorů 19

2.2.1 Vzduchový solární kolektor s pórovitou látkou 20

2.2.2 Vzduchový solární kolektor s pletivovým absorbérem 21

2.2.3 Vzduchový solární kolektor s průchodem vzduchu 22

2.2.4 Vzduchový solární kolektor s plochým absorbérem, s rovnými žebry a se zalomenými žebry 22

2.2.5 Vzduchový solární kolektor s příčnými žebry 23

2.3 Koncept kombinovaného kolektoru 24

2.4 Vývoj nových konstrukcí a matematických modelů kombinovaného kolektoru 25

2.4.1 Kombinovaný kolektor se žebrovaným absorbérem a dolním obtékáním absorbéru 25

2.4.2 Kombinovaný kolektor s pórovitou látkou a oboustranným obtokem vzduchu 28

2.4.3 Kombinovaný kolektor integrovaný do fasády s dolním obtékáním plochého absorbéru 29

2.4.4 Kombinovaný kolektor s žebrovaným absorbérem a oboustranným obtokem vzduchu 30

2.4.5 Kombinovaný kolektor s horním krytem ve tvaru střešní krytiny 31

2.5 Současná situace na trhu kombinovaných solárních kolektorů 33

3. FORMULACE CÍLŮ PRÁCE A STRUKTURA PRÁCE……..35

3.1 Cíle práce.....35

3.2 Struktura práce.....36

4. NÁVRH A POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ.....37

4.1 Matematický model kombinovaného kolektoru – kapalinová část.....38

4.1.1 Vnější energetická bilance 38

4.1.2 Vnitřní energetická bilance 46

4.2 Matematický model kombinovaného kolektoru – vzduchová část.....53

4.2.1 Vnější energetická bilance 54

4.2.2 Vnitřní energetická bilance 57

4.3 Implementace modelu kombinovaného kolektoru kapalina/vzduch do simulačního prostředí TRNSYS 61

5 VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ.....64

5.1 Experimentální ověření matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru 64

5.2 Experimentální ověření kapalinové části kombinovaného kolektoru 65

5.2.1 Vyhodnocování účinnosti kapalinové části kombinovaného solárního kolektoru.65

5.2.2 Zkušební trať.....66

5.2.3 Měřicí přístroje 66

5.2.4 Postup měření.....68

5.2.5 Nejistota naměřených bodů účinnosti.....68

5.2.6 Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti.....70

5.2.7 Validace kapalinové části modelu kombinovaného solárního kolektoru.....75

5.2.8 Analýza nejistoty zvoleného modelu výpočtu součinitele přestupu tepla 80

5.2.9 Porovnání již existujících modelů kapalinového solárního kolektoru s nově vyvinutým modelem 82

5.3 Experimentální ověření vzduchové části kombinovaného kolektoru 89

5.3.1 Vyhodnocování účinnosti vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru.89

5.3.2 Zkušební trať.....91

5.3.3 Měřicí přístroje 92

5.3.4 Průběh měření 93

5.3.5 Nejistota stanovených bodů účinnosti 94

5.3.6 Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti....94

5.3.7 Validace vzduchové části modelu kombinovaného solárního kolektoru....95

6 ANALÝZA VYUŽITÍ KOMBINOVANÝCH SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ 100

6.1 Detailní energetický model rodinného domu....100

6.1.1 Solární systémy na bázi kombinovaných kolektorů 102

6.1.2 Výsledky analýzy využiti kombinovaných solárních kolektorů....105

6.2 Parametrická analýza vlivu hlavních konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru 107

6.2.1 Vliv konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru na jeho účinnost 108

6.2.2 Vliv konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru na jeho výkonnost....113

7 ZÁVĚR....114

7.1 Porovnání dosažených výsledků s uvedenými cíli 115

7.2 Přínos pro praxi....118

7.3 Teoretický přínos....119

7.4 Návrhy pro další směřování práce....119

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY....121

PUBLIKACE AUTORA – SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRÁCÍ……131

PUBLIKACE AUTORA – PŘÍMO NESOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRÁCÍ....133

PŘEHLED POUŽITÝCH VELIČIN

A_{abs}	plocha absorbéru	[m^2]
A_c	plocha kolektoru zvolená jako referenční plocha	[m^2]
A_G	hrubá plocha solárního kolektoru	[m^2]
C	účinná tepelná kapacita kolektoru	[J/K]
D_i	vnitřní průměr trubek	[m]
D_h	hydraulický průměr	[m]
E_L	dlouhovlnné záření dopadající na plochu absorbéru	[W/m^2]
F	účinnost žebra	[-]
F'	účinnostní činitel kolektoru	[-]
F_R	tepelný přenosový součinitel kolektoru	[-]
G	celkové sluneční ozáření	[W/m^2]
G_b	přímé sluneční ozáření	[W/m^2]
G_d	difúzní sluneční ozáření	[W/m^2]
G_r	odražené sluneční ozáření	[W/m^2]
Gr	Grashofovo číslo	[-]
K	celkový modifikátor úhlu dopadu	[-]
K_{50}	modifikátor úhlu dopadu pro úhel 50°	[-]
K_b	modifikátor úhlu dopadu pro přímé sluneční záření	[-]
K_d	modifikátor úhlu dopadu pro difúzní sluneční záření	[-]
K_r	modifikátor úhlu dopadu pro odražené sluneční záření	[-]
L	délka trubek	[m]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
O	smáčený obvod	[m]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
$\dot{Q}_s$	tok sluneční energie dopadající na vztažnou plochu kolektoru	[W]
$\dot{Q}_k$	tepelný výkon solárního kolektoru	[W]
R	tepelný odpor proti přenosu tepla z absorbéru do okolního vzduchu	[m^2.K/W]
R_0	tepelný odpor proti přenosu tepla z tekutiny do okolního vzduchu	[m^2.K/W]
Ra	Rayleighovo číslo	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	průřez	[m^2]
T_{abs}	absolutní teplota absorbéru	[K]
T_e	absolutní teplota okolního vzduchu	[K]

T_o	absolutní ekvivalentní teplota oblohy	[K]
T_{p1}	absolutní teplota vnitřního povrchu zasklení	[K]
T_{p2}	absolutní teplota vnějšího povrchu zasklení	[K]
T_s	absolutní povrchová teplota samolepicího štítku	[K]
T_{z1}	absolutní teplota vnitřního povrchu izolace	[K]
T_{z2}	absolutní teplota vnějšího povrchu izolace	[K]
T_{b1}	absolutní teplota vnitřního povrchu bočního rámu	[K]
T_{b2}	absolutní teplota vnějšího povrchu bočního rámu	[K]
U	celkový součinitel prostupu tepla kolektoru	[W/m^2.K]
U_b	součinitel prostupu tepla boční stranou kolektoru	[W/m^2.K]
U_p	součinitel prostupu tepla přední stranou kolektoru	[W/m^2.K]
U_z	součinitel prostupu tepla zadní stranou kolektoru	[W/m^2.K]
W	rozteč mezi trubkami	[m]

a	šířka spoje	[m]
a_1	lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru	[W/m^2.K]
a_2	kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru	[W/m^2.K^2]
b	tloušťka spoje	[m]
b_0	lineární součinitel modifikátoru úhlu dopadu	[-]
b_1	kvadratický součinitel modifikátoru úhlu dopadu	[-]
c_{vz}	měrná tepelná kapacita vzduchu	[J/kg.K].
c_k	měrná tepelná kapacita proudící kapaliny	[J/kg.K]
c_p	výška přední vzduchové mezery	[m]
c_z	výška zadní vzduchové mezery	[m]
c_3	součinitel tepelných ztrát závislý na rychlosti proudění okolního vzduchu	[J/m.K]
c_4	součinitel tepelných ztrát závislý na sálání vůči okolí	[-]
c_5	účinná měrná tepelná kapacita kolektoru	[J/m^2.K]
c_6	součinitel účinnosti při nulové tepelné ztrátě závislý na rychlosti větru	[s/m]
d_s	tloušťka skla	[m]
d_{abs}	tloušťka absorbéru	[m].
d_{iz}	tloušťka izolace	[m]
d_p	tloušťka přední vzduchové mezery	[m]
d_z	tloušťka zadní vzduchové mezery	[m]
g	tíhové zrychlení	[m/s^2]
h_i	součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí v trubkách absorbéru	[W/m^2.K]

$h_{k,b2-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním z bočního rámu do okolí	[W/m^2.K]
$h_{k,p2-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním z povrchu zasklení do okolí	[W/m^2.K]
$h_{k,z2-e}$	součinitel přestupu tepla prouděním ze zadního rámu do okolí	[W/m^2.K]
$h_{s,p2-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním z povrchu zasklení do okolí	[W/m^2.K]
$h_{s,abs-p1}$	součinitel přestupu tepla sáláním z absorbéru na zasklení	[W/m^2.K]
$h_{s,abs-z1}$	součinitel přestupu tepla sáláním z absorbéru na izolaci	[W/m^2.K]
$h_{s,b2-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním z bočního rámu do okolí	[W/m^2.K]
$h_{s,z2-e}$	součinitel přestupu tepla sáláním ze zadního rámu do okolí	[W/m^2.K]
$h_{v,b1-b2}$	tepelná propustnost bočního rámu	[W/m^2.K]
$h_{v,p1-p2}$	tepelná propustnost zasklení	[W/m^2.K]
$h_{v,z1-z2}$	tepelná propustnost izolace	[W/m^2.K]
$h_{pk,abs-p1}$	součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchově mezeře mezi povrchem absorbéru a zasklením	[W/m^2.K]
$h_{pk,abs-z1}$	součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchově mezeře mezi povrchem absorbéru a zadní izolací	[W/m^2.K]
k	šířka vzduchového kanálu	[m]
l	délka vzduchového kanálu	[m]
$\dot{m}_{kap}$	celkový hmotnostní průtok teplonosné kapaliny	[kg/s]
$\dot{m}_{vz}$	průměrný hmotnostní průtok vzduchu	[kg/s]
$\dot{m}_{vz1}$	hmotnostní průtok vzduchu na vstupu do kolektoru	[kg/s]
$\dot{m}_{vz2}$	hmotnostní průtok vzduchu na výstupu z kolektoru	[kg/s]
t_{abs}	povrchová teplota absorbéru	[°C]
t_{b1}	teplota vnitřního povrchu bočního rámu	[°C]
t_{b2}	teplota vnějšího povrchu bočního rámu	[°C]
t_e	teplota venkovního vzduchu	[°C]
t_{k1}	teplota kapaliny na vstupu do kolektoru	[°C]
t_{k2}	teplota kapaliny na výstupu z kolektoru	[°C]
$t_{k,m}$	průměrná teplota kapaliny	[°C]
t_m^*	střední redukovaný teplotní rozdíl	[m^2.K/W]
t_o	ekvivalentní teplota oblohy	[°C]
t_{p1}	teplota vnitřního povrchu zasklení	[°C]
t_{p2}	teplota vnějšího povrchu zasklení	[°C]
t_{vz1}	teplota na vzduchu vstupu do kolektoru	[°C]
t_{vz2}	teplota na vzduchu na výstupu z kolektoru	[°C]
$t_{vz,m}$	průměrná teplota proudícího vzduchu	[°C]
t_{z1}	teplota vnitřního povrchu izolace	[°C]
t_{z2}	teplota vnějšího povrchu izolace	[°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^*	bezrozměrná podélná souřadnice	[-]

α	pohltivost absorbéru kolektoru	[-]
β	součinitel teplotní objemové roztažnosti vzduchu	[1/K]
$\varepsilon_{abs,p}$	emisivita přední strany absorbéru	[-]
$\varepsilon_{abs,z}$	emisivita zadní strany absorbéru	[-]
ε_r	emisivita rámu	[-]
ε_{iz}	emisivita izolace	[-]
ε_{ok}	emisivita okolního povrchu	[-]
ε_{zas1}	emisivita vnitřního povrchu zasklení	[-]
ε_{zas2}	emisivita vnějšího povrchu zasklení	[-]
η	účinnost solárního kolektoru	[-]
$\eta_0(\theta)$	optická účinnost při obecném úhlu dopadu θ	[-]
$\eta_0(0°)$	optická účinnost při kolmém úhlu dopadu (θ = 0°)	[-]
$\theta_{eff,d}$	efektivní úhel dopadu pro difuzní záření	[°]
$\theta_{eff,d}$	efektivní úhel dopadu pro odrazené záření	[°]
Λ_{sp}	tepelná propustnost spoje	[W/m.K]
λ_s	tepelná vodivost skla	[W/m.K]
λ_{abs}	tepelná vodivost absorbéru	[W/m.K]
λ_k	tepelná vodivost kapaliny	[W/m.K]
λ_{sp}	tepelná vodivost spoje	[W/m.K]
λ_{vz}	tepelná vodivost vzduchu	[W/m.K]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m^3]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m^2.K^4]
σ_i	rozšířená nejistota	[dle veličiny]
τ	propustnost zasklení kolektoru	[-]
ν	kinematická viskozita vzduchu	[m^2/s]

1. ÚVOD

Spotřeba energie trvale a exponenciálně roste a podle prognózy z roku 2018 lze očekávat v období 2018 až 2040 nárůst světové spotřeby energie až o 25 % [1]. V následujících letech bude tedy energie stále žádanějším a dražším zbožím. Zcela nereálná je prognóza předpovídající snížení absolutní spotřeby energie, což je ověřená historická zkušenost.

V současné době jsou největším spotřebitelem energie v Evropě právě budovy. Během svého ročního provozu vytápění, klimatizace, větrání, úpravy vzduchu, přípravy teplé vody či osvětlení spotřebují až 40 % celkové energetické spotřeby evropského společenství. Segment budov výrazně expanduje, což bude mít v budoucnu za následek zvýšení energetické spotřeby EU jako celku. Snižování energetické náročnosti je cíl, který si Evropské společenství dalo již na počátku tohoto tisíciletí. V návaznosti na tento cíl byla v květnu 2018 schválena v pořadí již 3. směrnice o energetické náročnosti budov – tzv. EPBD III.

V souvislosti s aktuálním zněním Evropské směrnice o energetické náročnosti budov je nutné do roku 2030 projektovat budovy s výrazně nižší energetickou spotřebou budov. Podle strategie Evropské unie by to do roku 2030 mělo přinést významné snížení emisí skleníkových plynů o 40 % oproti roku 1990, zvýšení využité energie z obnovitelných zdrojů za celkového snížení spotřeby energie budov až o 32,5 % a navýšit podíl využití obnovitelné energie na 32 %. Evropská unie stanovila také dlouhodobý cíl do roku 2050.

Potom, na konce roku 2019 Evropská komise představila Evropskou zelenou dohodu (European Green Deal), která zahrnuje seznam konkrétních plánů s cílem dosáhnout v EU do roku 2050 klimatické neutrality. V březnu roku 2020 byla Evropskou komisí přijata evropská průmyslová strategie zahrnující větší ambici ve snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030, z původních 40 % má být nyní 50 až 55 %. Základním předpokladem dosažení tohoto cíle je dekarbonizace energetického systému, a to na základě několika zásad. Jednou z hlavních zásad je upřednostnit energetickou účinnost a vytvořit odvětví energetiky, které bude z velké části založeno na obnovitelných zdrojích.

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

V našich podmínkách je stále nejrozšířenější formou využití přímé fototermální přeměny sluneční energie přeměna pomocí plochých kapalinových solárních kolektorů. Nicméně stále častěji se lze setkat se snahami o využití ohřevu vzduchu v teplovzdušných kolektorech slunečního záření, ať již pro účely vytápění nebo pro ohřev větracího vzduchu. Myšlenka kombinovat oba druhy technologie pro konstrukci

kombinovaného kolektoru pro ohřev dvojice teplonosných látek kapalina/vzduch vyplynula z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizace doby provozu solárního systému. Kombinovaný kolektor s použitím dvou teplonosných látek vychází v principu ze situace typické pro mírné a chladné klimatické pásmo, kde sluneční záření v letním období je dostatečné pro přípravu teplé vody (50 až 60 °C), zatímco v zimním období výstupní teploty ze solárních kolektorů zpravidla nedosahují hodnot vyšších než 30 °C, nicméně mohou být dostatečné např. pro ohřev chladného větracího vzduchu.

2. REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Vzhledem k tomu, že kombinovaný solární kolektor, ve své podstatě kombinuje dva různé typy solárních kolektorů (kapalinový a vzduchový) je nezbytně nutné začít kritickou literární rešerší v oboru vývoje plochých kapalinových solárních kolektorů a plochých vzduchových solárních kolektorů. Dále je vysvětlen koncept kombinovaného kolektoru. Ve druhé části této kapitoly je prezentována kritická literární rešerše kombinovaných kolektorů a jejích modelů. Na konce kapitoly je uveden současný stav trhu kombinovaných solárních kolektorů v České republice a v zahraničí.

2.1 Současný stav problematiky v oboru kapalinových solárních kolektorů

V oboru vývoje plochých solárních kolektorů lze sledovat trend zvyšování jejich energetické kvality různou konstrukcí a použitím nových materiálů. Zlepšování účinnosti plochého kolektoru vede vždy v zásadě dvěma cestami: zlepšováním procesu pohlcení slunečního záření a odvodu tepla z absorbéru a snižováním tepelné ztráty celého kolektoru. Zvyšování „optické“ účinnosti je možné zajistit vyšší propustností zasklení kolektoru - například aplikací skel s antireflexními povlaky, vyšší pohltivost absorbéru - například pohltivějším povlakem, nebo případně lepším odvodem tepla z povrchu absorbéru - například použitím plně smáčivého registru namísto konstrukce trubka-lamela. Snížení tepelné ztráty kolektoru se dosahuje především nízkou emisivitou povrchu absorbéru a tloušťkou tepelné izolace (zadní strany a boků). Méně se používají nízkoemisivní povlaky na zasklení kolektoru, neboť sebou přinášejí i snížení propustnosti slunečního záření. Tepelnou ztrátu přední části kolektoru je možné snížit například použitím transparentní izolace nebo vakuovým zasklením.

Na druhé straně, v dnešní době jsou solární kolektory prodávané na trhu drahé a nezlevňují. Tudíž lze sledovat i určitý vývoj v oblasti nahrazení tradičních materiálů levnějšími, například použití plastových (nebo dokonce i bio-polymerových) absorbérů namísto tradičních měděných či hliníkových absorbérů.

Následující rešerše se zaměřuje na tři konkrétní témata, která jsou považována za nejzajímavější a nejslibnější v oboru vývoje plochých kapalinových solárních kolektorů.

2.1.1 Transparentní tepelné izolace

V posledních 20 letech lze sledovat snahu snížit tepelné ztráty solárního kolektoru pomocí transparentních tepelných izolací [2–5]. Použití transparentních tepelných izolací jako zasklení solárních kolektorů umožňuje výrazně snížit tepelné

ztráty zasklením, zvýšit celkovou účinnost kolektorů a dosáhnout vyšších provozních teplot. Na druhou stranu se do určité míry zhorší optická účinnost (s poklesem propustnosti slunečního záření).

Jako transparentní tepelná izolace budoucnosti se bezesporu jeví zasklení na bázi křemičitého aerogelu. Využití aerogelu v plochých solárních kolektorech bylo široce popsáno v 90. letech minulého století v pracích Nordgaarda a Beckmana [6], Benza a kol. [7], Svendsena [8] atd. Aerogel je porézní materiál s otevřenou strukturou s velice malými rozměry pórů od 2 do 50 μm (nanoporézní struktura), proto je někdy označován jako kvazi-homogenní struktura. Jednou ze skutečně mimořádných vlastností aerogelu je jeho velmi nízká tepelná vodivost. Jelikož velikost pórů struktury je menší než střední volná dráha molekul vzduchu, vlastní struktura aerogelu omezuje přenos tepla vzájemnými kolizemi molekul vzduchu. Díky této skutečnosti, hodnoty součinitele tepelné vodivosti aerogelu jsou nižší než u samotného vzduchu v klidném stavu za běžných teplot (hodnoty λ = 0,015 až 0,020 W/m.K oproti běžným 0,026 W/m.K při 20 ºC). Výsledky výzkumu v oblasti použití aerogelu v konstrukci kolektoru ukazují, že pro aplikace s vyššími provozními teplotami (soustavy pro vytápění a chlazení, CZT, technologické teplo v průmyslu) mají aerogelové kolektory vysoký potenciál.

Principiálně odlišným typem transparentní tepelné izolace jsou voštinové struktury. Jejich výraznou výhodou je vysoká propustnost slunečního záření. Při dopadu paprsku na strukturu pod krycím zasklením nedochází k výrazným optickým ztrátám odrazem, paprsek se odráží vždy směrem k absorbéru. Jako materiál pro výrobu voštinových struktur se ve většině případů používá polymethylmethakrylát (PMMA), který vzhledem ke své nízké teplotní odolnosti omezuje použití voštinových struktur v konstrukcích solárních kolektorů. Toto omezení může být odstraněno například použitím větracího kanálu mezi absorbérem a zadní izolací [9]. Martinez a kol. [10] představili termoelektrický systém chlazení, který je navržen tak, aby odvedl přebytečné teplo ze solárního kolektoru. Použití termotropních vrstev jako ochrana voštinové struktury proti přehřátí také ukázalo dobré výsledky pro omezení teploty stagnace s nepatrným dopadem na účinnost [11–13]. Dále Giovanetti a kol. [14] představili nový typ voštinové struktury na bázi triacetátu celulosy, který vykazuje dobrou teplotní stabilitu a odolnost vůči UV záření.

2.1.2 Selektivní absorbéry

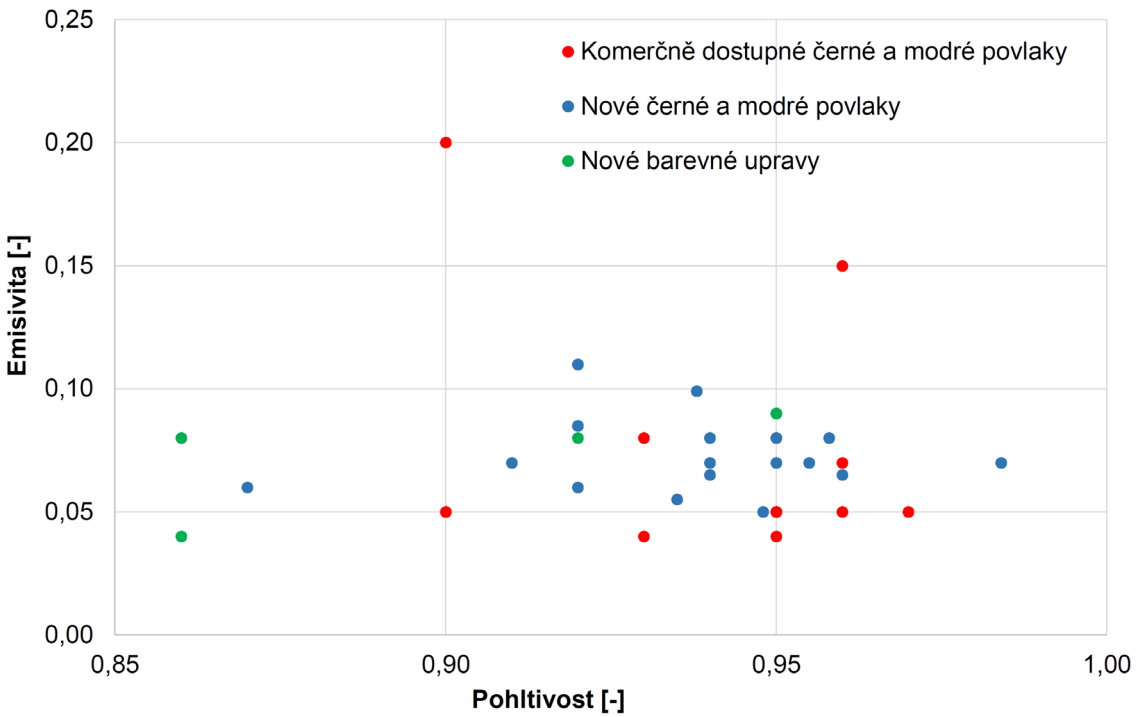
Absorbéry pokročilých solárních kolektorů se vyznačují spektrálně selektivními optickými vlastnostmi povrchu. Selektivní povlaky mají velmi nízkou odrazivost (vysokou pohltivost $\alpha = \alpha_{Sol}$) slunečního záření v oblasti vlnových délek 0,3 až 3 μm, ve kterých přichází 95 % energie slunečního záření, a zároveň velmi vysokou odrazivost (nízkou pohltivost α_{IR}, nízkou zářivost $\varepsilon = \varepsilon_{IR} = \alpha_{IR}$) v oblasti infračerveného záření 3 až 50 μm. Kvalitní spektrálně selektivní povlaky (sunselect, TiNOx) mají v současné době parametry, které se zdají být již praktickou limitou v oboru: pohltivost kvalitních povrchů absorbérů α = 0,95, emisivita ε = 0,05. Přesto vývoj selektivních povlaků dále pokračuje,

především v oblasti „barevných“ povlaků. Jedná se o to, že v současné době ve většině případů absorbéry s vrstvou selektivního povlaku mají černou nebo modrou barvu. Aby se zabránilo monotonii černých a modrých absorbérů, byly vyvinuty a zkoumány barevné povlaky jako potenciální perspektiva pro moderní architekturu [15, 16]. Souhrn nově vyvinutých barevných povrchů je uveden v *Tab. 2.1*. Jak vyplynulo z průzkumu [17], 85 % architektů by dalo přednost jinému zabarvení kolektorů než tradičnímu černému nebo tmavě modrému, i kdyby to mělo znamenat snížení účinnosti a ročních solárních zisků.

Kromě toho neustále pokračuje vývoj ve snaze zlepšit tepelné, mechanické a optické vlastností již existujících černých a modrých povlaků. Přímé porovnání aktuálně dostupných černých a modrých povlaků a nových černých a modrých povlaků potvrzuje tuto tendenci, protože pohltivost a emisivita nových povlaků je téměř stejná ve srovnání s běžně dostupnými kvalitními selektivními povrchy (viz *Obr. 2.1*). Co se týče barevných úprav absorbéru, lze očekávat nižší účinnost solárních kolektorů na bázi barevných absorbérů, protože pohltivost takových absorbérů je nižší a emisivita obvykle vyšší nežli u běžně dostupných modrých a černých kvalitních selektivních absorbérů.

Tab. 2.1 *Optické vlastnosti barevných uprav absorbéru a povlaků*

Struktura	Metoda	Barva		α_{Sol}	ε_{IR}
Silikonový nátěr [18]	postřik	zelená, modrá		> 0,85	< 0,25
TiAlN [19]	naprašování (ve vakuu)	purpurová		0,94	0,05
		zelená		0,88	0,26
		červená		0,82	0,27
		žlutá		0,92	0,06
TiAlN [20]		červená		0,86	0,04
		žlutá		0,81	0,06
		modrá		0,86	0,08
TiAlN/TiAlON [20]		zelená		0,92	0,08
TiAlN/TiAlON/AR [20]		kaštanová		0,95	0,09
TiMEMO paint + Al [21]	postřik	červená, zelená, modrá		> 0,9	< 0,3
Fe_2O_3 + Al [22]		červená		0,90	0,52
Al pigment [22]		zelená		0,88	0,47
		modrá		0,91	0,49
$Al/Al_2O_3/Fe_2O_3/Au$ [23]		červená		0,62	0,05
$Al/Al_2O_3/Fe_2O_3/Au/TiO_2$ [23]		červená		0,65	0,07
$Al/Al_2O_3/V_2O_5/Au$ [23]		žlutá		0,52	0,17
$Al/Al_2O_3/V_2O_5/Au/TiO_2$ [23]		žlutá		0,53	0,14
$Al/Al_2O_3/CuS/Au$ [23]		zelená		0,75	0,23
$Al/Al_2O_3/CuS/Au/TiO_2$ [23]		zelená		0,69	0,20



Obr. 2.1 *Porovnání optických vlastností aktuálně dostupných povlaků a nových povlaků*

2.1.3 Nové materiály absorbéru

V současné době je absorbér běžného plochého solárního kolektoru vyráběn z mědi nebo hliníku. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena. Lze proto sledovat určitý vývoj v oblasti nahrazení těchto tradičních materiálů lehkými a levnějšími plasty (polymery). Polymerní absorbér musí odolat zvýšeným teplotám (do 150 °C), vystavení slunečnímu ozáření (zejména UV), dlouhodobému kontaktu s teplonosnou kapalinou a mít dostatečnou tloušťku, aby tak splňoval požadavky na dlouhodobou pevnost a tuhost.

Rešerše výzkumných prací ukazuje, že existuje několik komerčních a vývojových příkladů polymerních absorbérů vytvořených ze standardních termoplastů, technických termoplastů a vysoce výkonných termoplastů [24]. Standardní termoplasty se běžně používají v komerčně dostupných nezasklených kolektorech jako hlavní součásti bazénového systému ohřevu vody s provozními teplotami 25 až 35 °C [25]. Technické termoplasty se používají pro výrobu absorbéru plochých zasklených kolektorů jako hlavní součásti systému přípravy teplé vody. Hlavním problémem zasklených solárních kolektorů s plastovým absorbérem je stav bez odběru tepla – stagnace. Pro omezení vysokých stagnačních teplot v zasklených kolektorech se uvádí několik přístupů k ochraně před přehřátím [26]. Vysoce výkonné polymery jsou v podstatě schopny splnit výše uvedené požadavky i bez použití ochrany proti přehřátí, avšak jejich zatím vysoká cena znemožňuje jejich rozsáhlou implementaci v solární tepelné technice [27].

I přestože praktické pokusy o použití polymerních materiálů jsou zásadní a někdy také úspěšné, použití plastového absorbéru v konstrukci zaskleného kolektoru je

stále v nedohlednu [28]. Příznivou alternativou, která nebyla dosud uvažována, je použití bio-polymerních absorbérů. Jejich hlavní výhodou, kromě nízké ceny a hmotnosti, je samozřejmě i šetrnost k přírodě. Klein a kol. [29] ve své práci analyzovali existující bio-polymery na trhu na základě tepelných a mechanických vlastností, čímž přišli k závěru, že tradiční materiály absorbéru (měď a hliník) mohou být nahrazeny Bio-PA a Bio-CA plastem se současným omezením provozní teploty na 100 °C.

Další zajímavou alternativou tradičních materiálů absorbéru mohou být absorbéry vyrobené z keramických materiálů. Keramika je v současné chvíli nejpoužívanějším materiálem ve stavebnictví a má velký potenciál při použití v konstrukci solárních kolektorů, protože kombinuje dobré termo-fyzikální vlastnosti a dlouhou životnost [30, 31]. Na druhou stranu, existuje i několik nevýhod použití keramického absorbéru. První nevýhodou je vysoká emisivita, obvykle v rozmezí 0,84 až 0,92, což snižuje účinnost solárního kolektoru [32]. Další nevýhodou je nižší tepelná vodivost keramického materiálu (150 až 200 W/m.K) v porovnání s tradičními materiály, (400 W/m.K u mědi a 250 W/m.K u hliníku) což může být vyřešeno například použitím silnějšího absorbéru nebo dokonce i použitím plně smáčeného absorbéru namísto absorbéru lamela-trubka [33]. Třetí nevýhodou je, že hmotnost keramického absorbéru je několikrát větší než hmotnost typického kovového absorbéru.

2.2 Současný stav problematiky v oboru vzduchových solárních kolektorů

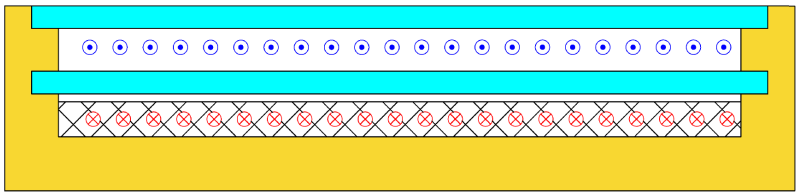
Vzduchové solární kolektory vykazují řadu předností v porovnání s kapalinovými kolektory. Vzduchové solární kolektory, zejména pokud jsou určené pro větrání, pracují s relativně nízkými provozními teplotami (nasávají venkovní vzduch) a proto mají vysokou energetickou účinnost. Síť vzduchových kanálů nemusí být absolutně těsná. Důsledkem netěsností je ztracený teplý vzduch, avšak žádné poškození budovy kapalinou jako v případě konvenčních solárních kolektorů. Vzduchové solární kolektory nevyžadují ani ochranu proti mrazu, ani ochranu proti přehřátí. Vzduchová solární zařízení jsou také méně napadána korozí, a tudíž životnost vzduchových kolektorů a rozvodů je mnohem vyšší než u kapalinových soustav.

Při porovnání s kapalinovými kolektory však existuje i řada nevýhod. Vzduchové solární systémy vyžadují kvůli nízké tepelné kapacitě vzduchu, jakožto teplonosné látky, (0,0003 kWh/m^3.K oproti 1,16 kWh/m^3.K u vody či 1,11 kWh/m^3.K u nemrznoucí směsi) poměrně velké průřezy potrubní sítě pro přenos tepla. Při přenosu tepla na jiné teplonosné látky potřebuje vzduch pro svou nízkou tepelnou vodivost (0,026 W/m.K oproti 0,6 W/m.K u vody či 0,38 W/m.K u nemrznoucí směsi) velkou teplosměnnou plochu.

Právě zvětšení teplosměnné plochy v současné chvíli věnováno nejvíc pozornosti v oboru vývoje zasklených vzduchových solárních kolektorů.

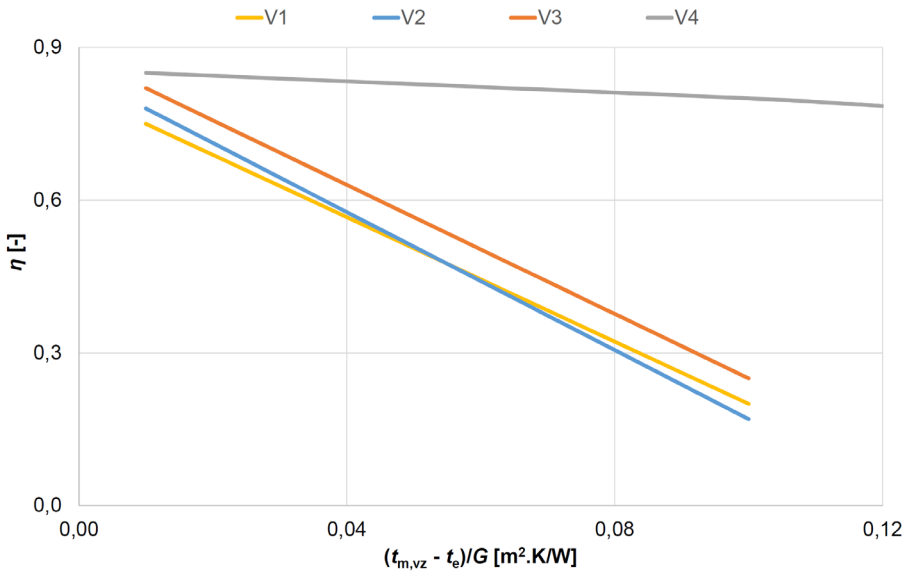
2.2.1 Vzduchový solární kolektor s pórovitou látkou

Mohamad [34] provedl teoretickou analýzu energetického chování vzduchového solárního kolektoru s pórovitou látkou a oboustranným protiproudovým prouděním vzduchu, kdy vzduch na začátku proudí ve vzduchovém kanálu mezi horním a dolním sklem a potom proudí v kanálu mezi dolním sklem a zadní izolací (*Obr. 2.2*). V tomto případě pro zvětšení teplosměnné plochy plochý absorbér byl nahrazen pórovitou látkou.



Obr. 2.2 *Konstrukce vzduchového solárního kolektoru s protiproudovým prouděním vzduchu [34]*

Byl vytvořen matematický model vzduchového solárního kolektoru, který byl potom použit pro porovnání energetického chování solárního kolektoru se čtyřmi druhy proudění vzduchu: jednokanálové proudění vzduchu mezi absorbérem a zadní izolací (V1), jednokanálové proudění vzduchu mezi absorbérem a zasklením (V2), dvoukanálové oboustranné protiproudové proudění vzduchu s plochým absorbérem (V3) a dvoukanálové oboustranné protiproudové proudění vzduchu s pórovitou látkou (V4). Výsledky modelování poukázaly na výrazný potenciál využití absorbéru s pórovitou látkou a oboustranným protiproudovým prouděním vzduchu v porovnání s ostatními režimy proudění (*Obr. 2.3*).

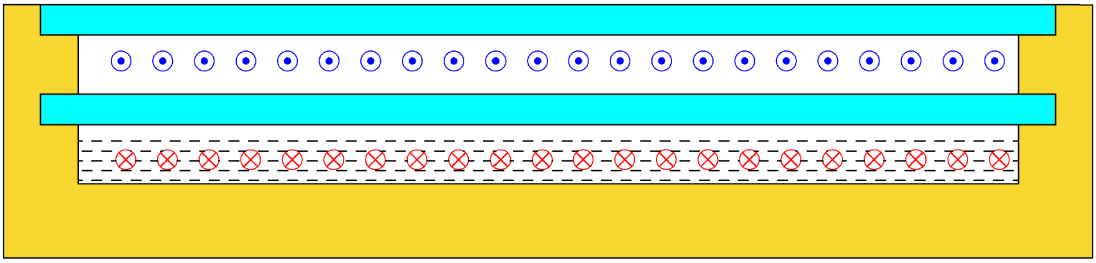


Obr. 2.3 *Porovnání účinnosti uvažovaných variant vzduchového kolektoru [34]*

Maximální účinnost takového kolektoru (účinnost při nulových tepelných ztrátách nebo optická účinnost) dosahuje 88 %. K výsledkům také patří, že pokud se používá vysoce porézní látka, pokles tlaku v kolektoru není tak významný. Není však jasné, jaký druh porézní látky byl uvažován v simulační analýze. Nevýhodou takové konstrukce kolektoru je vysoká váha kolektoru z důvodu použití dvou skel.

2.2.2 Vzduchový solární kolektor s pletivovým absorbérem

Aldabbagh a kol. [35] představili konstrukci vzduchového kolektoru s oboustranným protiproudovým prouděním vzduchu a pletivovým absorbérem. Cílem jejich experimentálního výzkumu bylo stanovit energetickou účinnost dvou druhů vzduchových kolektorů s pletivovým absorbérem: jednokanálové proudění vzduchu mezi horním sklem a zasklením a dvoukanálové oboustranné protiproudové proudění vzduchu. Funkci absorbéru v tomhle případě tvořilo několik vrstev pletiva (*Obr. 2.4*). Dalším cílem bylo porovnat experimentálně stanovenou účinnost dvou druhů kolektorů s již publikovanými výsledky jiných výzkumných prací. Výsledky experimentu potvrzují, že použití pletivového absorbéru výrazně zvyšuje účinnost vzduchového kolektoru, v porovnání s plochou konstrukcí absorbéru. Maximální účinnost konstrukce kolektoru s dvoukanálovým oboustranným protiproudovým prouděním vzduchu se pohybuje kolem 84 %. Kromě toho, bylo experimentálně prokázáno, že s rostoucím průtokem se zvyšuje účinnost kolektoru.



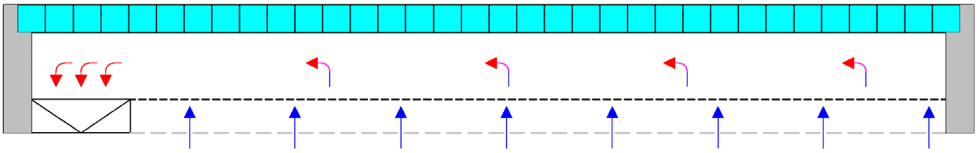
Obr. 2.4 *Konstrukce vzduchového solárního kolektoru s protiproudovým prouděním vzduchu [35]*

Později se Omojaro a Aldabbagh [36] snažili vylepšit konstrukci předchozího kolektoru přidáním podélných žeber v obou vzduchových kanálech. Nicméně se ukázalo, že zavedení žeber ve výsledku snižuje o 20 % provozní účinnost kolektoru s dvoukanálovým oboustranným protiproudovým prouděním vzduchu. Důvodem je, že zavedení žeber zvyšuje průměrnou teplotu vzduchu v horním kanálu (část dopadlé sluneční energie se absorbuje na povrchu žeber), a tudíž zvyšuje teplené ztráty kolektoru.

K výhodám obou výše uvedených konstrukcí samozřejmě patří vysoká provozní účinnost. Nicméně se jedná o mnohem složitější konstrukci kolektoru – s použitím dvou skel a pletivového absorbéru.

2.2.3 Vzduchový solární kolektor s průchodem vzduchu

Wang a kol. [37] ve své práci popisují principiálně jinou konstrukci vzduchového kolektoru (*Obr. 2.5*). Jedná se o speciální konstrukci perforovaného absorbéru s průchodem vzduchu. Takový kolektor se skládá z průhledného polykarbonátového krytu, černého textilního absorbéru a perforované zadní strany. Takže venkovní vzduch se nasává do kolektoru přes perforovanou zadní stranu kolektoru, dále vzduch proudí skrz perforovaný textilní absorbér, kde se ohřívá, a vystupuje z kolektoru přes vzduchový otvor.



Obr. 2.5 *Schématické znázornění vzduchového solárního kolektoru s průchodem vzduchu [37]*

Výsledky experimentálního měření ukazují, že maximální tepelné účinnosti 75 % bylo dosaženo při následujících klimatických a provozních podmínkách: průtok vzduchu 0,057 kg/s, teplota okolního vzduchu 17,5 °C a sluneční ozáření 901 W/m^2. Tudíž, ve srovnání se vzduchovými kolektory s pórovitou látkou nebo se vzduchovými kolektory s pletivovým absorbérem, vyvinutý kolektor má podobnou účinnost.

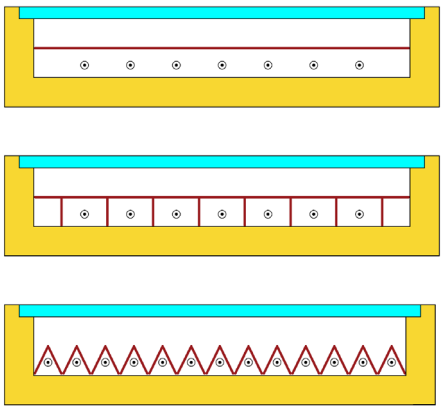
K výhodám takového kolektoru patří použití levnějších a lehčích materiálů (polykarbonátový, textilní absorbér). K nevýhodám této konstrukce také patří vysoké tlakové ztráty. Kromě toho, otázkou zůstává tepelná odolnost polykarbonátového krytu v případě stagnace.

2.2.4 Vzduchový solární kolektor s plochým absorbérem, s rovnými žebry a se zalomenými žebry

Azharul a Hawlader [38] představili srovnávací analýzu energetického chování vzduchového solárního kolektoru s použitím tří různých druhů absorbérů: plochého, s rovnými žebry a se zalomenými žebry (*Obr. 2.6*). Byl vytvořen matematický model vzduchového kolektoru, který byl poté experimentálně ověřen. Bylo modelováno energetické chování kolektoru se třemi různými absorbéry a byl zkoumán vliv použití oboustranného protiproudového proudění vzduchu namísto jednokanálového proudění.

Výsledky modelování ukazují, že kolektor se zalomenými žebry má nejvyšší provozní účinnost (optickou účinnost) – 75 % v případě jednokanálového proudění a 82 % v případě oboustranného protiproudového proudění. Na druhou stranu kolektor s plochým absorbérem má provozní účinnost nejnižší – 65 % v případě jednokanálového proudění a 78 % v případě oboustranného protiproudového proudění. Ve všech výše uvedených případech bylo maximální účinnosti dosáhnuto při měrném průtoku vzduchu

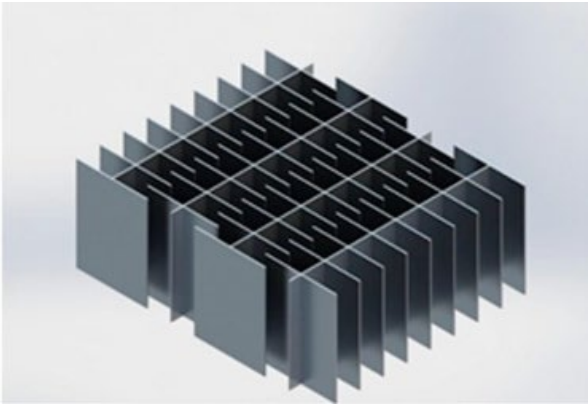
kolektorem 0,056 kg/m^2.s. Kromě toho, bylo znovu experimentálně prokázáno, že s rostoucím průtokem se zvyšuje účinnost vzduchového kolektoru.



Obr. 2.6 *Konstrukce zkoumaných kolektorů: plochý absorbér (nahoře), s rovnými žebry (uprostřed) a se zalomenými žebry (dole) [38]*

2.2.5 Vzduchový solární kolektor s příčnými žebry

Kabeel a kol. [39] provedli experimentální analýzu energetického chování vzduchového solárního kolektoru s příčnými žebry (s překážkami). Cílem jejich analýzy bylo stanovit účinnost vzduchového solárního kolektoru s příčnými zebry a stanovit vliv počtu příčných žeber na energetickou účinnost kolektoru. Dalším cílem bylo porovnat výsledky zkoumané konstrukce kolektoru se vzduchovým kolektorem s plochým absorbérem při stejných klimatických a provozních podmínkách. Zkoumaný kolektor se skládá ze solárního skla, absorbéru slunečního záření, příčných žeber (*Obr. 2.7*) umístěných ve vzduchovém kanálu mezi absorbérem a zasklením a zadní izolací.



Obr. 2.7 *Konstrukce příčných žeber (překážek) [39]*

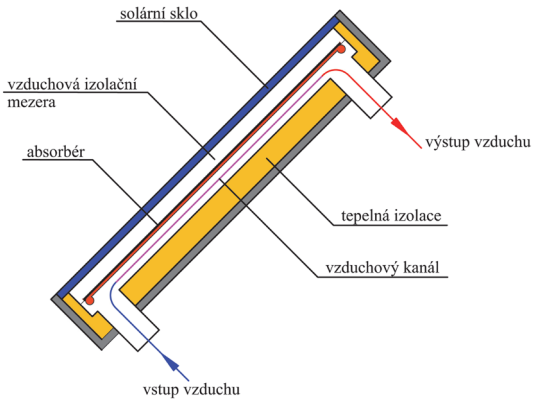
Výsledky experimentu ukázaly, že při stejných klimatických a provozních podmínkách (průtok 0,04 kg/s) vzduchový kolektor s příčnými žebry vykazuje vyšší optickou účinnost (účinnost při nulových tepelných ztrátách) než vzduchový kolektor s plochým absorbérem (84 % oproti 32 %). Důvodem je zvětšená teplosměnná plocha kolektoru, vyšší množství odváděného tepla do teplonosné látky (vzduchu) a tudíž i vyšší

účinnost kolektoru. Dalším závěrem je, že se zvýšením počtu příčných žeber se zvyšuje účinnost kolektoru. Není však jasné, jaký vliv má použití příčných žeber na tlakovou ztrátu kolektoru.

2.3 Koncept kombinovaného kolektoru

Myšlenka kombinovat oba druhy technologie pro konstrukci kombinovaného kolektoru pro ohřev dvojice teplonosných látek kapalina/vzduch vyplynula z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizace doby provozu solární soustavy. Kombinovaný kolektor s použitím dvou teplonosných látek vychází v principu ze situace typické pro mírné a chladné klimatické pásmo, kde sluneční záření v letním období je dostatečné pro přípravu teplé vody (50 až 60 °C), zatímco v zimním období výstupní teploty ze solárních kolektorů zpravidla nedosahují hodnot vyšších než 30 °C, nicméně mohou být dostatečné např. pro ohřev chladného větracího vzduchu.

Kombinovaný kolektor na bázi dvou teplonosných látek se obvykle skládá z jednoduchého zasklení solárním sklem v čirém nebo texturovaném provedení, kapalinového absorbéru slunečního záření se selektivním povrchem, vzduchového kanálu, tepelné izolace a rámu (*Obr. 2.8*).



Obr. 2.8 *Konstrukce kombinovaného kolektoru na bázi dvou teplonosných látek vzduch/kapalina*

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

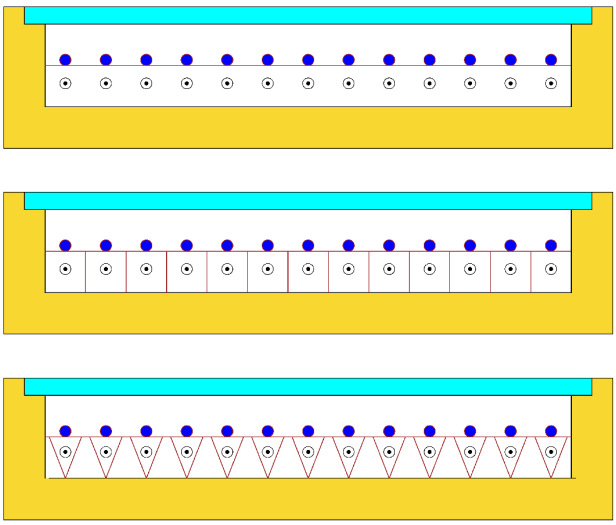
- Kapalinový provozní režim: absorbérem protéká kapalina jako teplonosná látka a odebírá veškerou tepelnou energii z absorbéru slunečního ozáření. Vzduchový kanál je v tomhle případě zavřený a tvoří uzavřenou vzduchovou mezeru mezi absorbérem a zadní izolací, čím zvětšuje tepelný odpor zadní strany kolektoru.

- Vzduchový provozní režim: v tomto případě vzduch jako teplonosná látka neproudí v absorbéru, ale kolem něj. Vzduch obtéká absorbér a odnímá z něj teplo. Kapalina absorbérem neprotéká a neodvádí teplo.
- Kombinovaný provozní režim: tento případ představuje současné protékání dvou teplonosných látek (kapalina a vzduch) současně odebírajících teplo.

2.4 Vývoj nových konstrukcí a matematických modelů kombinovaného kolektoru

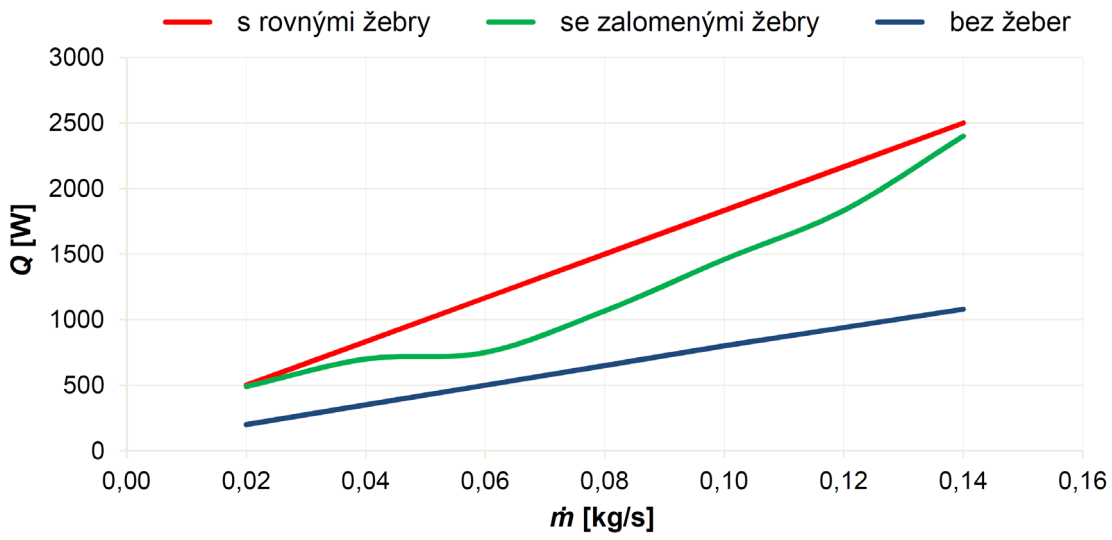
2.4.1 Kombinovaný kolektor se žebrovaným absorbérem a dolním obtékáním absorbéru

Assari [40] provedl analýzu energetického chování kombinovaných solárních kolektorů s různými konstrukcemi vzduchových kanálů. Kapalinovou část tvořil trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Vzduchová část se skládala ze vzduchových kanálů různého tvaru, umístěných pod absorbérem. Byl vytvořen zjednodušený matematický model kombinovaného kolektoru s dolním obtékáním absorbéru, který byl poté experimentálně ověřen. Podstatou vyvinutého modelu je použití ε – NTU metody. Bylo modelováno energetické chování kolektoru se třemi různými druhy vzduchového kanálu: a) bez žeber; b) s rovnými žebry; c) se zalomenými žebry (viz *Obr. 2.9*). Konstrukce kolektorů umožnuje provoz kombinovaného kolektoru ve třech režimech – pouze ohřev vzduchu (air-mode), pouze ohřev vody (water-mode) a kombinovaný ohřev vzduchu a vody (dual-mode).



Obr. 2.9 *Konstrukce zkoumaných kolektorů: bez žeber (nahoře), s rovnými žebry (uprostřed) a se zalomenými žebry (dole) [40]*

Výsledky modelování poukázaly na výrazný potenciál využití absorbéru s rovnými žebry v porovnání s absorbérem se zalomenými žebry a absorbérem bez žeber (viz *Obr. 2.10*). Z obrázku je patrné, že tepelný výkon kolektoru s absorbérem s rovnými žebry je větší než u absorbéru se zalomenými žebry nebo absorbérem bez žeber. Tyto výsledky byly získány při konstantní teplotě absorbéru 80 °C.



Obr. 2.10 *Výkon kombinovaného kolektoru v závislosti na hmotnostním průtoku vzduchu (air-mode) [40]*

K výsledkům také patří, že v kombinovaném režimu je vzduchová část kolektoru schopna odvést teplo, které kapalinová část už nemá možnost odvést. Například při teplotě vstupní vody 90 °C je účinnost kapalinové části přibližně 1 %, zatímco účinnost vzduchové části dosahuje okolo 27 %.

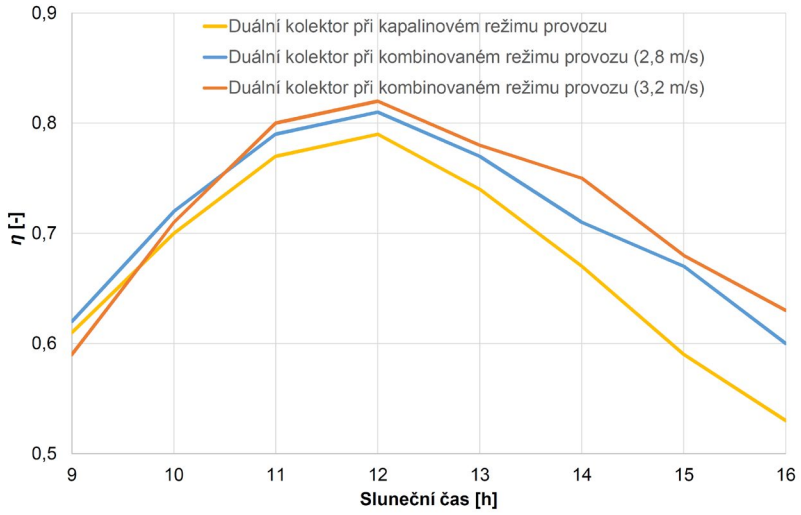
Podstatnou nevýhodou vyvinutého modelu je předpoklad, že teplota absorbéru a teplota zadní strany vzduchového kanálu (vzduchových kanálů) se rovnají, což neodpovídá realitě a muže způsobit patrnou nepřesnost vypočtu (zejména v případě použití konstrukce absorbéru bez žeber). Kromě toho je další nevýhodou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

Potom Jafari a kol. [41] pokračovali ve vývoji konceptu kombinovaného provozu kombinovaného solárního kolektoru se zalomenými žebry. Cílem jejich teoretické analýzy bylo stanovit energetickou a exergetickou účinnost kombinovaného solárního kolektoru v kombinovaném režimu a porovnat tyto účinnosti s kapalinovým režimem provozu kombinovaného kolektoru. Analýza byla provedena pomocí ε – NTU metody. Simulace energetického chování kolektoru byla provedena při následujících klimatických a provozních podmínkách: průtok vzduchu 0,01 – 0,02 kg/s, teplota vody na vstupu do kolektoru 40 až 90 °C, průtok vody 0,01 kg/s, teplota venkovní vzduchu 45 °C a sluneční ozáření 1000 W/m^2. Výsledky simulace potvrzují závěry předchozí práce, že při

kombinovaném provozu kombinovaného kolektoru je množství odvedeného tepla a účinnost kolektoru vyšší nežli u pouze kapalinového provozního režimu.

Hlavní nevýhodou prezentovaného modelu je použití ε – NTU metody pro modelování energetického chování solárního kolektoru a z toho vyplývající zjednodušení výpočtu.

Později Nematollahi a kol. [42] provedli experimentální analýzu využití kombinovaného solárního kolektoru se zalomenými žebry v kombinovaném režimu. Výsledky byly porovnány s kapalinovým režimem provozu. Kombinovaný kolektor byl vyzkoušen během šesti dnů (10. až 15. června). Denní účinnost kolektoru se stanovila jako podíl denního tepelného zisku kolektoru k denní sluneční energii dopadlé na plochu kolektoru. Kromě toho byly během tohoto období téměř stejné klimatické podmínky (teplota, rychlost větru, oblačnost a vlhkost). Provozní podmínky byly během zkoušení následující: průtok kapalinové části 0,01 kg/s, rychlost proudění vzduchu uvnitř vzduchového kanálu 2,8 a 3,2 m/s. Výsledky zkoušky poukázaly, že průměrná účinnost systému na bázi kapalinového režimu provozu byla 67,8 %, zatímco v kombinovaném režimu provozu byla průměrná účinnost 71,6 % pro rychlost proudění vzduchu 2,8 m/s a 72,3 % pro rychlost proudění vzduchu 3,2 m/s. Na *Obr. 2.11*. je uveden denní průběh účinnosti kombinovaného kolektoru v kombinovaném režimu provozu (2,8 a 3,2 m/s) a v kapalinovém režimu provozu.



Obr. 2.11 *Porovnaní hodinové účinnosti pro kapalinový a kombinovaný provoz [42]*

Tomuto tématu také věnoval svoji práci Mohajer a kol. [43]. Kombinovaný solární kolektor se zalomenými žebry byl použit v kombinovaném režimu pro přípravu teplé vody a ohřev vzduchu. Ohřátý vzduch byl dále využit na sušení zeleniny. Výsledky experimentu potvrdily, že systém na bázi kombinovaných kolektorů snižuje náklady a požadovaný prostor pro instalaci (přibližně o 50 %) ve srovnání se dvěma samostatnými systémy pro ohřev vody a vzduchu.

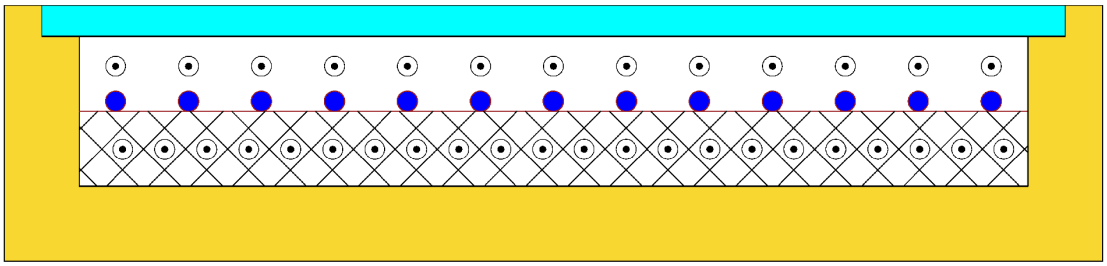
Samozřejmě k výhodám kombinovaného provozu kombinovaného kolektoru patří možnost dosažení většího zisku solárního systému, protože vzduchová část

kolektoru je schopná odvést teplo, které kapalinová část již nemá možnost odvést. K dalším výhodám patří snížení nákladů a požadovaného prostoru pro instalaci ve srovnání se dvěma samostatnými systémy.

Na druhou stranu systém na bázi kombinovaných kolektorů v kombinovaném režimu provozu má smysl pouze v subtropických a tropických klimatických pásmech, kde je dostatečné množství sluneční energie. Jak již bylo uvedeno, systém v kombinovaném režimu provozu má vyšší účinnost když se provozní teplota kapaliny pohybuje okolo 60 až 90 °C. V klimatických podmínkách České republiky dosahuje běžný systém přípravy teplé vody takových provozních teplot pouze v létě, kdy ohřátý vzduch již není potřeba. Takže další podmínkou využití kombinovaného režimu provozu je odběr tepelné energie ve formě ohřátého vzduchu (například za účelem sušení).

2.4.2 Kombinovaný kolektor s pórovitou látkou a oboustranným obtokem vzduchu

Arun a Arun [44] ve své práci popisují principiálně jinou konstrukci kombinovaného kolektoru. V tomto kolektoru se vzduchový proud dělí při vstupu do kolektoru na dvě části. Část vzduchu proudí v horní části kolektoru mezi absorbérem a krycím zasklením. Druhá část proudí pórovitou látkou pod absorbérem. Na výstupu z kolektoru se proudy opět spojí. Kapalinovou část tvoří trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Nákres tohoto kolektoru je uveden na *Obr. 2.12*.

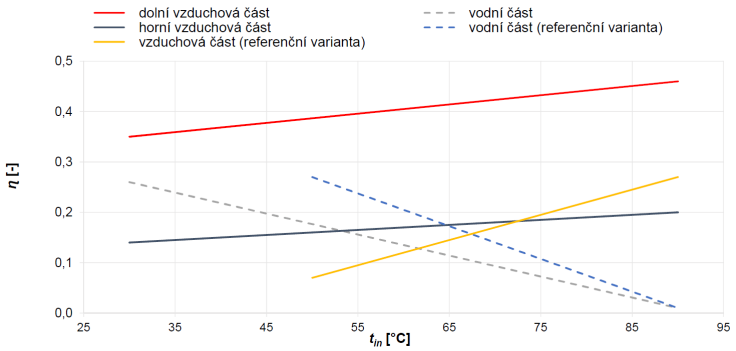


Obr. 2.12 *Konstrukce kombinovaného kolektoru s pórovitou látkou [44]*

Pro další analýzy byla provedena simulace kolektoru v simulačním softwaru ANSYS ve třech pracovních režimech: pouze ohřev vzduchu, pouze ohřev vody a kombinovaný ohřev vzduchu a vody. Pro porovnání vyvinutého kolektoru byla vybrána konstrukce kombinovaného kolektoru se zalomenými žebry [40]. Simulace byla prováděna pro stejné klimatické i provozní podmínky a pro stejnou plochu kolektoru. Výsledky simulace v režimu ohřevu vzduchu ukázaly, že při stejných klimatických a provozních podmínkách kombinovaný solární kolektor s pórovitou látkou a oboustranným průtokem vzduchu vykazuje větší výkon než kombinovaný kolektor se zalomenými žebry (1611 W oproti 1428 W).

Dále byla provedena simulace energetického chování kolektoru v kombinovaném provozu při stejných klimatických a provozních podmínkách jako v předchozí práci:

průtok vzduchu 0,01 kg/s, teplota vody na vstupu do kolektoru 30 až 90 °C, průtok vody 0,02 kg/s a sluneční ozáření 900 W/m^2. Výsledky simulace v kombinovaném režimu ukazují mírný pokles množství tepla odvedeného kapalinovou (vodní) částí kolektoru a zvýšení množství tepla odvedeného vzduchovou částí kolektoru v porovnání s referenční variantou. Důvodem je, že ve vyvinuté konstrukci proudí vzduch jak pod absorbérem tak i nad ním, a tudíž je k dispozici zvětšená teplosměnná plocha pro vzduchovou část kombinovaného kolektoru. Účinnost nové konstrukce kombinovaného kolektoru a referenčního kolektoru při stejných klimatických a provozních podmínkách je znázorněna na *Obr. 2.13*.



Obr. 2.13 *Porovnání účinnosti navrženého a referenčního kolektoru v kombinovaném provozu v závislosti na teplotě na vstupu do kolektoru [44]*

K výhodám použití pórovité látky patří samozřejmě možnost dosažení většího tepelného zisku než u konstrukce kolektoru se zalomenými žebry. Nicméně se jedná o mnohem složitější konstrukci kolektoru. Nicméně, pro dosažení většího tepelného zisku musí být zajištěn dobrý kontakt mezi absorbérem slunečního záření a pórovitou látkou. K dalším připomínkám patří, že kombinovaný provoz kombinovaného kolektoru v našich klimatických podmínkách není z energetického pohledu vhodný.

Co se tyká matematického modelování kombinovaného kolektoru, model nebyl validován, takže se nedá posoudit přesnost a správnost modelu. Kromě toho je modelování kombinovaného kolektoru v simulačním softwaru ANSYS dost omezující z pohledu dalšího využiti modelu v případě zapojení modelu kombinovaného kolektoru do energetického systému nebo změny konstrukce kolektoru.

2.4.3 Kombinovaný kolektor integrovaný do fasády s dolním obtékáním plochého absorbéru

Jie a kol. [45] ve své práci představili studii využití kombinovaných solárních kolektorů na bázi dvou teplonosných látek. V tomto případě byl kombinovaný kolektor využit pro přípravu teplé vody v létě. Schéma popisovaného kolektoru je znázorněno na *Obr. 2.14*.

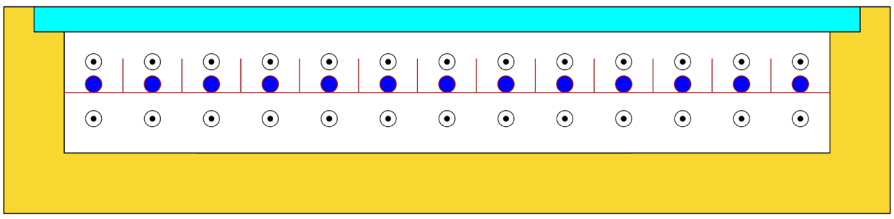
Obr. 2.14 *Kombinovaný solární kolektor s dolním obtékáním absorbéru [45]*

V režimu teplovzdušného vytápění se větrací otvory nacházejí na zadní straně kolektoru a jsou otevřeny. Vzduch z místnosti je přiváděn přes spodní větrací otvor do vzduchové mezery. Ve vzduchové mezeře se vzduch ohřeje a proudí dál do horního větracího otvoru. Přičemž během režimu teplovzdušného vytápění zůstává kapalinový okruh uzavřený. Naopak v režimu přípravy teplé vody zůstávají větrací otvory uzavřené a kapalinový okruh je otevřený. Voda je ohřívána v měděných trubkách a přirozeným vztlakem proudí nahoru.

Byl prezentován matematický model kapalinové části kombinovaného kolektoru, který byl následně validován na základě experimentu. Model byl dále spojen s matematickým modelem budovy. Výsledky simulace v kapalinovém provozním režimu poukázaly, že v letě kombinovaný kolektor integrovaný do fasády snižuje tepelnou zátěž budovy o 2 % v porovnání s běžným kapalinovým kolektorem. Není však jasné proč nebyl prezentován matematický model vzduchové části kolektoru a nebyla provedena simulace celoročního provozu kombinovaného solárního kolektoru.

2.4.4 Kombinovaný kolektor s žebrovaným absorbérem a oboustranným obtokem vzduchu

Ma a kol. [46] představili konstrukci kombinovaného kolektoru zobrazenou na *Obr. 2.15*. Kapalinovou část tvoří trubkový registr, který se nachází nad absorbérem. Vzduchový proud je rozdělen na dvě části, část vzduchu proudí nad absorbérem a část vzduchu proudí pod ním. Žebra jsou umístěna mezi krycím sklem a absorbérem a jsou pokryta spektrálně selektivním povlakem stejně jako zbytek absorbéru.



Obr. 2.15 *Schématické znázornění kombinovaného kolektoru s žebry nad absorbérem a oboustranným průtokem vzduchu [46]*

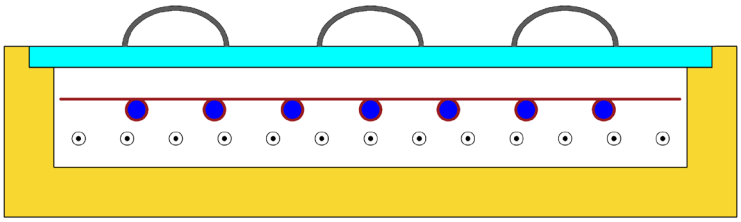
Kombinovaný kolektor byl vyzkoušen ve venkovním prostředí ve dvou provozních režimech – pouze ohřev vody a pouze ohřev vzduchu. V případě ohřevu vody byl kombinovaný kolektor napojen na solární zásobník o objemu 100 l. Kombinovaný kolektor byl vyzkoušen během několika dnů a denní účinnost kolektoru se stanovila jako podíl denního tepelného zisku kolektoru k denní sluneční energii dopadlé na plochu kolektoru. Výsledky zkoušky ukázaly, že denní účinnost kombinovaného kolektoru v režimu ohřevu vody se pohybuje kolem 50 %. Zkouška kombinovaného kolektoru v režimu ohřevu vzduchu byla provedena při konstantním průtoku 0,025 kg/s během několika dnů a denní účinnost kolektoru byla stanovena stejným způsobem. Výsledky zkoušky kombinovaného kolektoru v režimu ohřevu vzduchu ukázaly, že denní účinnost se pohybuje podobně mezi 40 a 55 % v závislosti na klimatických podmínkách.

V rámci této práce byla stanovena průměrná denní účinnost vzduchového a kapalinového provozního režimu. Nicméně jedna zásadní věc v této práci chybí, a to je roční simulace účinnosti systému na bázi kombinovaného kolektoru. Z práce není vůbec jasné, zdali je provoz kolektoru v těchto dvou režimech výhodnější oproti kapalinovému kolektoru.

2.4.5 Kombinovaný kolektor s horním krytem ve tvaru střešní krytiny

He a kol. [47] provedli analýzu využití kombinovaných solárních kolektorů s horním krytem ve tvaru střešní krytiny (viz *Obr. 2.16*), která zvyšuje estetickou a energetickou (minimalizují tepelné ztráty) kvalitu kolektoru. Krytina je vyrobená z PMMA (polymethylmethakrylát) a aplikovaná přímo na horní kryt kolektoru z kaleného skla. Cílem této práce bylo poukázat na potenciál využití PMMA v konstrukci kolektoru.

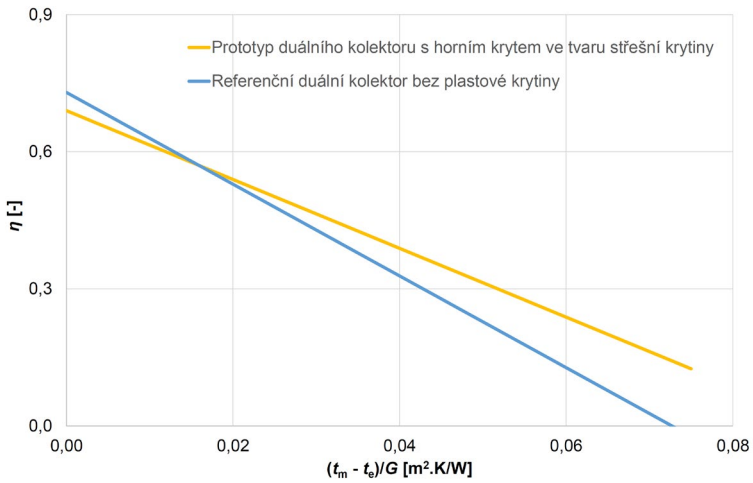
Kombinovaný kolektor byl vyzkoušen ve venkovním prostředí v kapalinovém provozním režimu. Pro porovnání vyvinutého kolektoru byl vybrán kombinovaný kolektor se stejnou konstrukcí, avšak bez použití plastové krytiny.



Obr. 2.16 *Schématické znázornění kombinovaného kolektoru s horním krytem ve tvaru střešní krytiny [47]*

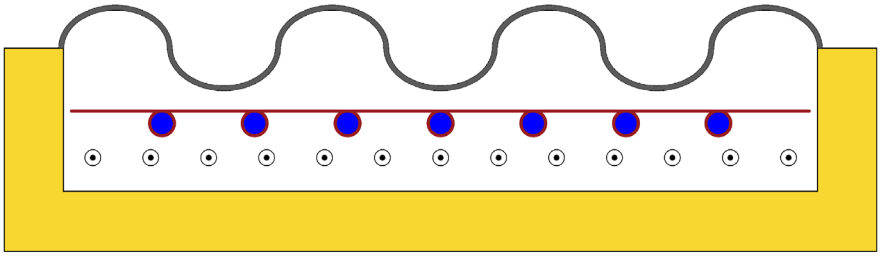
Výsledky experimentální zkoušky ukazují na mírný narůst účinnosti při vysokých provozních teplotách (viz *Obr. 2.17*). Důvodem je zvýšení tepelného odporu přední stranou kolektoru, který byl dosažen aplikací plastové krytiny. Na druhou stranu, tato aplikace má i negativní následky – snížení propustnosti slunečního záření. Z tohoto

důvodu je účinnost vyvinutého kolektoru při nulových tepelných ztrátách (optická účinnost) nižší nežli u plochého solárního kolektoru.



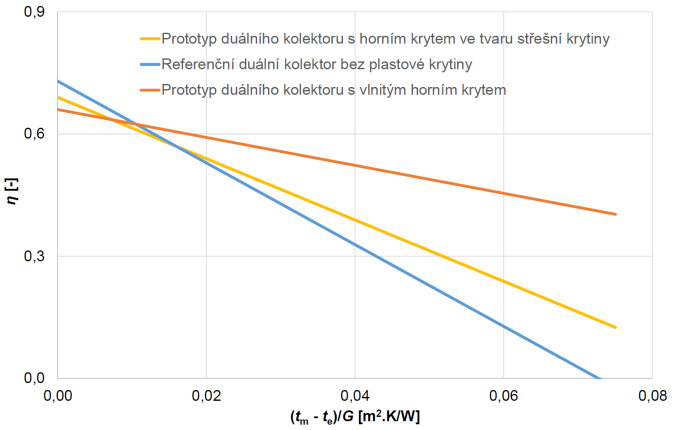
Obr. 2.17 *Porovnání účinnosti navrženého a referenčního kolektoru [47]*

Zhongting a kol. [48] ve své práci pokračovali ve vývoji potenciálu využití PMMA v konstrukci kolektoru. Jejich kombinovaný kolektor se skládá z vlnitého horního krytu vyrobeného přímo z PMMA, vzduchové mezery, absorbéru, vzduchového kanálu a zadní izolace. Nákres tohoto kolektoru je uveden na *Obr. 2.18*.



Obr. 2.18 *Schématické znázornění vyvinutého kombinovaného kolektoru s vlnitým horním krytem [48]*

Pro analýzu tepelných toků uvnitř kolektoru byl zaveden matematický model kapalinové části kombinovaného kolektoru, který se skládá z vnější a vnitřní bilance. Model byl validován na základě experimentálního měření. Není však jasné, proč nebyl prezentován matematický model vzduchové části kolektoru. Výsledky experimentálního měření poukázaly na nižší optickou účinnost vyvinutého kolektoru (z důvodu nižší propustnosti slunečního záření) oproti kombinovanému kolektoru prezentovanému He a kol. [47]. Na druhou stranu, použití PMMA krytu namísto solárního skla umožňuje zvýšit účinnost při vysokých provozních teplotách. Důvodem je nízká tepelná vodivost PMMA krytu (0,2 W/m.K). Charakteristiky účinnosti nové konstrukce kombinovaného kolektoru a dvou referenčních kolektorů představených He a kol. [47] při stejných klimatických a provozních podmínkách jsou znázorněny na *Obr. 2.19*.



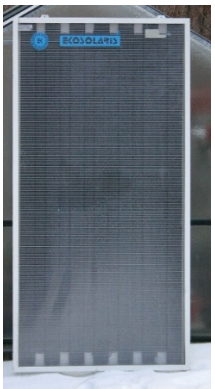
Obr. 2.19 *Porovnání účinnosti vyvinutého kolektoru a referenčních kolektorů [48]*

Lze vidět, že nová konstrukce kombinovaného kolektoru vykazuje významné zlepšení účinnosti v porovnání s referenčními kolektory. Účinnost kolektoru při nulových tepelných ztrátách je však o několik procent nižší nežli u referenčních kolektorů. Důvodem je nižší propustnost slunečního záření PMMA oproti sklu.

Nicméně otázkou zůstává tepelná odolnost PMMA v případě stagnace (typická hodnota stagnační teploty pro zasklený selektivní kolektor 180 °C). Předchozí práce neobsahují žádnou teoretickou analýzu vzduchové části kolektoru. Není tedy zjevné, jaký vliv má použití PMMA na účinnost vzduchové části kombinovaného kolektoru.

2.5 Současná situace na trhu kombinovaných solárních kolektorů

Ani na tuzemském ani zahraničním trhu nejsou v současné době k dispozici kombinované solární kolektory, ačkoliv v minulosti existovaly dva typy těchto kolektorů. Jedním z nich byl kolektor Mistral DUO od české společnosti Ekosolaris, druhým byl kolektor od dánské společnosti SolarVenti ve dvou provedeních SV30 AWX a SV14 AWX (viz *Obr. 2.20*).



a)

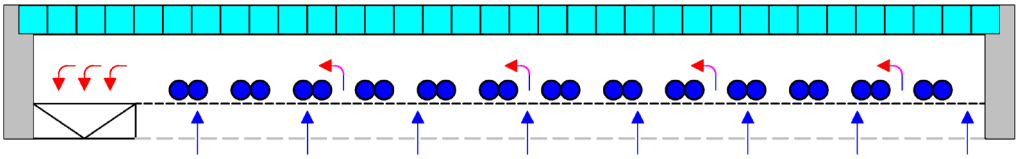
b)

Obr. 2.20 *Kombinovaný kolektor a) Mistral Duo b) SV30 AWX*

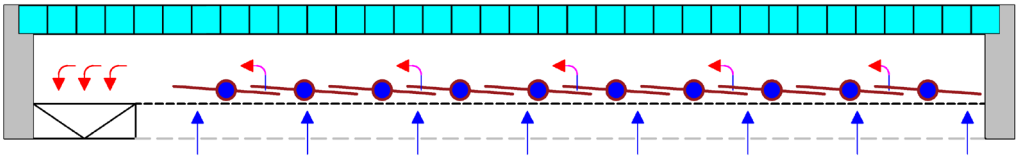
Jednalo se o kolektory navržené bez podrobnější analýzy vlivu tvaru absorbéru na provozní výkonové charakteristiky daných kolektorů. První kolektor využíval přednostně oběhový vzduch z budovy, i když při malých konstrukčních změnách mohl využívat i vzduchu venkovního. Druhý typ kolektoru nasával venkovní vzduch přes perforovaný zadní kryt a sloužil tak zároveň ke kontrolovanému větrání interiéru budovy. Jako krycí zasklení používaly oba kolektory polykarbonátovou komůrkovou desku.

Detaily o konstrukci kolektoru MISTRAL DUO nejsou v dostupné literatuře k dispozici a nebylo tedy možné získat žádné podrobné informace o vývoji nebo testech tohoto kolektoru. V podstatě se jednalo o vývojový prototyp.

Co se týče kolektoru SolarVenti, v odborné literatuře je dostatečné množství informací jak o konstrukci kolektoru, tak principu jeho funkce. Venkovní vzduch se nasává do kolektoru přes perforovanou zadní stranu kolektoru, fungující také jako primární filtr. Vzduch proudí dále skrz perforovaný textilní absorbér, kde se ohřívá a je následně veden do budovy. Kapalinovou část kolektoru tvoří buď celoměděné lamely (modifikace SV 14) nebo polypropylenové trubky (modifikace SV 30) nacházející se nad textilním absorbérem. Dalším konstrukčním prvkem kombinovaného solárního kolektoru SolarVenti je fotovoltaický článek, který pohání ventilátor v zimním období nebo oběhové čerpadlo v letním období. Konstrukce kombinovaných solárních kolektorů SV 14 a SV 30 jsou znázorněny na *Obr. 2.21* a *Obr. 2.22*.



Obr. 2.21 *Konstrukce kombinovaného kolektoru SolarVenti SV30 AWX*



Obr. 2.22 *Konstrukce kombinovaného kolektoru SolarVenti SV14 AWX*

Existuje několik důvodů absence kombinovaných kolektorů na tuzemském a zahraničním trhu. První důvod je spojen se složitou konstrukcí absorbéru, složitým solárním systémem a vysokou cenou kolektorů. Druhým důvodem je nedostatečné množství výzkumu v oblasti potenciálu využití kombinovaných kolektorů pro přípravu teplé vody a vytápění.

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

3. FORMULACE CÍLŮ PRÁCE A STRUKTURA PRÁCE

3.1 Cíle práce

Kombinované solární kolektory jsou relativně novým prvkem v oblasti solární tepelné techniky, který již prošel určitým vývojem. Požadavek na vývoj kombinovaných kolektorů pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina vyplynul z potřeby vysokého využití energetických zisků ze slunečního záření. Snahou je docílit vysokou účinnost v průběhu celého roku, resp. v průběhu doby využití a zároveň maximalizovat dobu provozu solárního systému. Nicméně vzhledem ke složitosti konstrukce, vysoké ceně a nedostatečnému množství výzkumu potenciálu využití, nebylo prozatím nalezeno většího uplatnění kombinovaných kolektorů na českém ani na zahraničním trhu.

Aby bylo možné jejich širší uplatnění a tím zvýšení možností využití alternativních zdrojů energie v budovách, je nutné vytvořit dostatečné podklady pro výpočet energetické bilance kombinovaného kolektoru, s možností volby provozního režimu na základě navržených geometrických charakteristik daného kolektoru a použitých materiálů. Je také potřeba ukázat na konkrétních příkladech výhody využití kombinovaných kolektorů.

Vzhledem k tomu, že v současné době neexistuje žádný validovaný detailní matematický model kombinovaného solárního kolektoru, je nutné v rámci disertační práce vytvořit detailní matematický model kombinovaného solárního kolektoru pro různé druhy proudění vzduchu a experimentálně ověřit vyvinutý model.

Vzhledem k absenci kombinovaných solárních kolektorů na tuzemském a zahraničním trhu bude postaven v rámci disertační práce funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru s možností změny konstrukce kolektoru.

Disertační práce tak navazuje na některé teoretické i experimentální práce, které se zabývaly popisem energetických bilancí absorbérů vzduchových, kapalinových a kombinovaných kolektorů. Cílem práce je řešení následujících úkolů:

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

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

3.2 Struktura práce

Práce se zabývá teoretickým a experimentálním výzkumem kombinovaného kolektoru na bázi dvou teplonosných látek (vzduch/kapalina).

V kapitole 2 je provedena kritická literární rešerše. Cílem této rešerše bylo vytvořit kritický přehled současných znalostí na téma kombinovaného solárního kolektoru na bázi dvou teplonosných látek – vzduch/kapalina. Znalosti získané v rámci kritické rešerše posloužily jako poklad pro stanovení cílů disertační práce.

Kapitola 4 se věnuje vývoji matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru založeného na detailním popisu jednotlivých režimů přenosu tepla v jednotlivých částech kolektoru. Model řeší iteračně vnitřní a vnější energetickou bilanci kolektoru při jednotlivých provozních režimech (ohřev kapaliny/ohřev vzduchu). Hlavními výstupy jsou tepelný tok odváděný z kolektoru, teplota na výstupu z kolektoru a účinnost přeměny slunečního záření na využitelné teplo při daných okrajových podmínkách (klimatické a provozní podmínky) v jednotlivých provozních režimech (ohřev kapaliny/ohřev vzduchu).

Kapitola 5 se zabývá experimentálním ověřením a validací vyvinutého modelu kombinovaného kolektoru. V úvodu kapitoly je popsána metodika validace modelu ve dvou provozních režimech – kapalinový provozní režim a vzduchový provozní režim. Pro experimentální validace byl vytvořen funkční vzorek kombinovaného kolektoru se třemi různými konstrukcemi absorbéru. Dále byla provedena detailní analýza nejistoty experimentálního měření, detailní analýza nejistoty matematického modelu a parametrická analýza modelu.

V kapitole 6 je provedena analýza potenciálu využití kombinovaných kolektorů vzduch/kapalina. V rámci teto analýzy byla provedena energetická analýza čtyř různých systémů pro rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických (Stockholm, Praha a Milan) a stejných provozních podmínek: systém pro přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů v režimu ohřevu vody, dva systémy pro přípravu teplé vody a ohřev větracího vzduchu na bázi kombinovaných solárních kolektorů a následně systém přípravy teplé vody a cirkulačního vytápění také na bázi kombinovaných solárních kolektorů.

Na závěr jsou shrnuty výsledky práce, nové poznatky a způsoby využití výsledků.

4. NÁVRH A POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ

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

Funkci solárního kolektoru lze popsat obecnou energetickou rovnováhou. Solární kolektor přijímá sluneční záření, které je částečně odraženo a částečně přeměněno na teplo pohlcením na povrchu absorbéru. Část tepla je z absorbéru odvedena teplonosnou látkou, část odchází zpět do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát a část tepla se akumuluje v těle kolektoru. Pro modelování chování kolektoru se provádí "vnější bilance", tzn. modelování tepelných toků z povrchu absorbéru do okolí a "vnitřní bilance" modelování toků z povrchu absorbéru do teplonosné látky (vzduch/kapalina). Model neuvažuje tepelnou kapacitu jednotlivých částí kolektoru. Jedná se o řešení v ustáleném stavu popsané základní rovnicí pro výkonu solárního kolektoru [49] ve tvaru

$$\dot{Q}_k = F_R \cdot A_{abs} \cdot \left[G \cdot \tau \cdot \alpha - U \cdot (t_{vz1/k1} - t_e)\right] \qquad [W] \qquad (4.1)$$

kde je:

F_R tepelný přenosový součinitel kolektoru [-],

A_{abs} plocha absorbéru [m^2],

τ propustnost zasklení kolektoru [-],

G sluneční záření dopadající na plochu kolektoru [W/m^2],

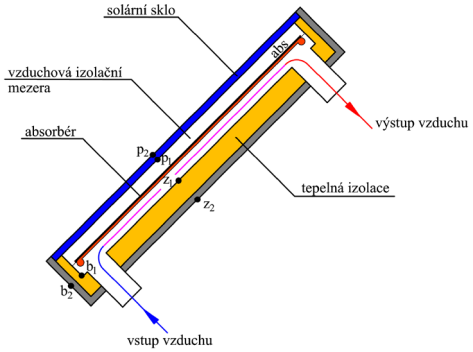
α pohltivost absorbéru kolektoru [-],

U celkový součinitel prostupu tepla kolektoru [W/m^2.K],

$t_{vz1/k1}$ teplota teplonosné látky na vstupu do kolektoru (vzduchu/kapaliny) [°C],

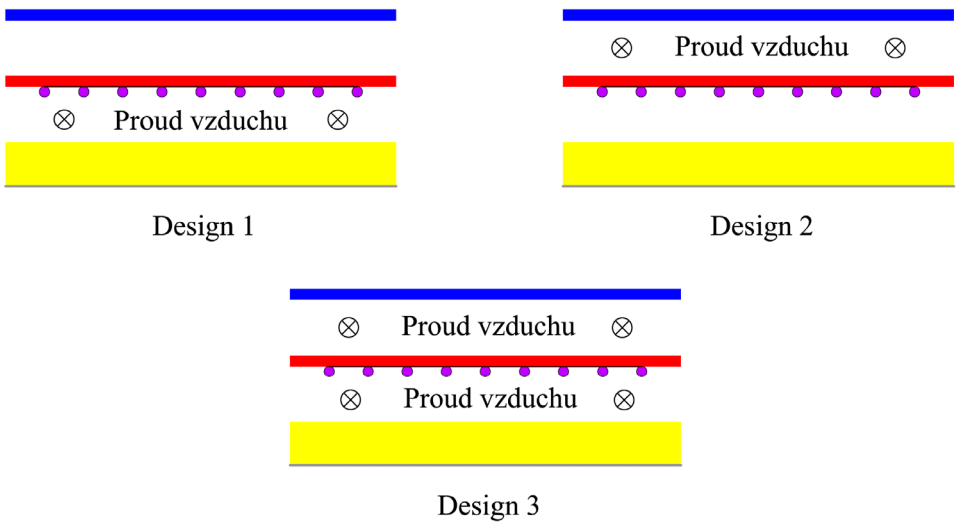
t_e teplota venkovního vzduchu [°C].

Ve své podstatě jde o jednorozměrný model, u kterého jsou v iteračních cyklech určovány střední teploty v základních rovinách kolektoru (*Obr. 4.1*): zasklení – vnější (p2), vnitřní (p1) povrch, absorbér (abs), zadní izolace – vnější (z2), vnitřní (z1) povrch a boční izolace – vnější (b2), vnitřní (b1) povrch.



Obr. 4.1 *Znázornění základních rovin kolektoru*

Pro simulaci kombinovaného kolektoru v simulačním prostředí TRNSYS byl nově vytvořen Type 207, který se ve své podstatě skládá z dílčích modelů vyvinutých v rámci disertační práce, a to modelu kapalinového kolektoru (Type 205) [50, 51] a modelu vzduchového kolektoru (Type 206) [52, 53]. Model nabízí výběr ze tří konstrukcí: kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s prouděním vzduchu mezi absorbérem a tepelnou izolací; kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s prouděním vzduchu mezi absorbérem a zasklením; kombinovaný kolektor s absorbérem s horním spojem a s oboustranným prouděním vzduchu (viz *Obr. 4.2*).



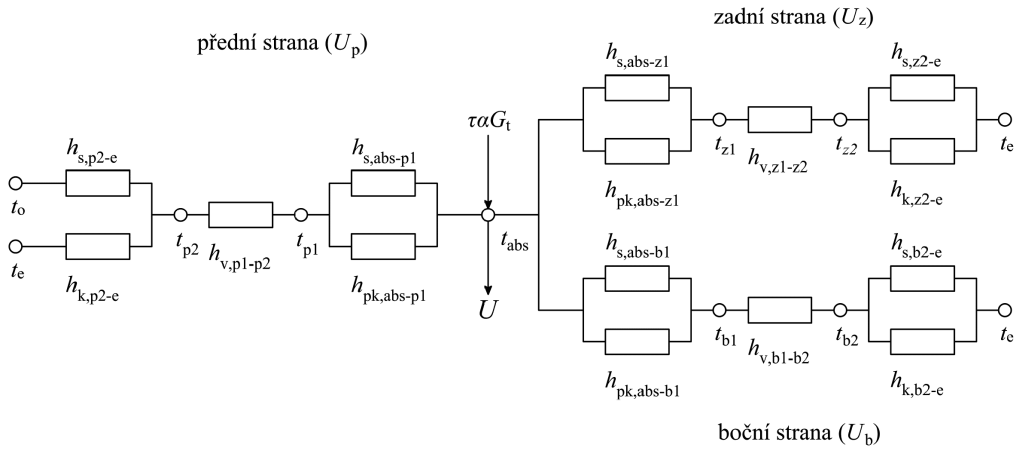
Obr. 4.2 *Konstrukce kombinovaného kolektoru*

Zde je třeba zdůraznit, že vyvinutý model neuvažuje společné využití kapalinové a vzduchové části kolektoru. V podstatě to znamená, že model kombinovaného kolektoru funguje buď jako kapalinový, nebo jako vzduchový kolektor, kde zaleží na jednom ze vstupních údajů – Operating Mode. Pokud Operating mode je roven 0, model funguje jako kapalinový kolektor. Jestliže je Operating model roven 1, model funguje jako vzduchový kolektor.

4.1 Matematický model kombinovaného kolektoru – kapalinová část

4.1.1 Vnější energetická bilance

V rámci vnější energetické bilance (*Obr. 4.3*) se řeší přenos tepla z povrchu absorbéru do okolí, a to přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi povrchem absorbéru a zasklením (resp. zadní izolací, boční izolací), sáláním mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení (resp. zadní izolací, boční izolací), vedením tepla zasklením (resp. zadní izolací, boční izolací) a přenos tepla (prouděním, sáláním) z vnějšího povrchu zasklení (resp. zadního rámu, bočního rámu) do okolí [54].



Obr. 4.3 *Schéma vnější bilance absorbéru*

Pro stanovení jednotlivých součinitelů přestupu tepla je nutná znalost teplot v jednotlivých rovinách kolektoru, které jsou zpětně závislé na hodnotách součinitelů přestupu tepla. Vnější bilance se proto řeší ve vlastním iteračním cyklu na základě předem odhadnuté teploty absorbéru t_{abs} [°C] a teploty okolí t_e [°C]. Pro výpočet součinitelů přestupu tepla v základních rovinách kolektoru (p1, p2, z1, z2, b1, b2) jsou potřebné povrchové teploty, které však na začátku procesu výpočtu nejsou známy. V prvním iteračním kroku jsou povrchové teploty odhadnuty z rozdílu teplot mezi absorbérem a okolním prostředím. Potom lze vypočítat součinitele prostupu tepla pro přední U_p, zadní U_z, boční strany U_b a celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U pro předem odhadnuté teploty.

4.1.1.1 Sálání mezi vnějším povrchem zasklení a oblohou

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi vnějším povrchem zasklení a okolím se obecně stanoví podle vztahu

$$h_{s,p2\text{-}e} = \varepsilon_{zas2} \cdot \sigma \cdot \frac{\left(T_{p2}^4 - T_o^4\right)}{T_{p2} - T_e} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.2)$$

kde je:

σ Stefan-Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5{,}67\times10^{-8}$ W/m^2.K^4,

ε_{zas2} emisivita vnějšího povrchu zasklení [-],

T_{p2} absolutní teplota vnějšího povrchu zasklení [K],

T_o absolutní ekvivalentní teplota oblohy [K],

T_e absolutní teplota okolního vzduchu [K].

4.1.1.2 Přirozená a nucená konvekce z vnějšího povrchu zasklení do okolí

Stanovení přenosu tepla konvekcí z vnějšího povrchu zasklení solárního kolektoru do okolního prostředí je velmi problematické. V odborné literatuře je možné

najít nepřehledné množství vztahů odvozených z experimentů více či méně napodobujících okrajové podmínky solárního kolektoru. Většina autorů uvádí jednoduché korelace ve formě lineární funkce (*Tab. 4.1*), kde *w* je rychlost větru [m/s]. V oblasti solárních kolektorů je nejvíce používán model podle McAdamse.

Tab. 4.1 *Korelace pro přestup tepla konvekcí z vnějšího povrchu zasklení do okolí*

M_1	Autor	Rovnice	Podmínky
1	McAdams [55]	$h_{k,p2\text{-}e} = 5{,}7 + 3{,}8 \cdot w$ $h_{k,p2\text{-}e} = 6{,}47 \cdot w^{0{,}78}$	pro $w < 5$ m/s pro $w > 5$ m/s
2	Watmuff [56]	$h_{k,p2\text{-}e} = 2{,}3 + 3{,}0 \cdot w$	$0 < w < 7$ m/s
3	Test [57, 58]	$h_{k,p2\text{-}e} = 8{,}55 + 2{,}56 \cdot w$	$0 < w < 5$ m/s
4	Kumar [59]	$h_{k,p2\text{-}e} = 10{,}03 + 4{,}687 \cdot w$	$0 < w < 4$ m/s

4.1.1.3 Tepelná propustnost zasklení

V případě použití jednoduchého skla jako krycího zasklení, lze stanovit tepelnou propustnost zasklení podle vztahu

$$h_{v,p1-p2} = \frac{\lambda_s}{d_s} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.3)$$

kde je

λ_s tepelná vodivost skla [W/m.K],

d_s tloušťka skla [m].

V případě použití pokročilé konstrukce zasklení (transparentní tepelná izolace nebo vakuové zasklení [60]) lze tepelnou propustnost zasklení stanovit jako funkci střední teploty zasklení:

$$h_{v,p1-p2} = f\left(t_{p1-p2}\right) = f\left(\frac{t_{p1} + t_{p2}}{2}\right) \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.4)$$

4.1.1.4 Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením

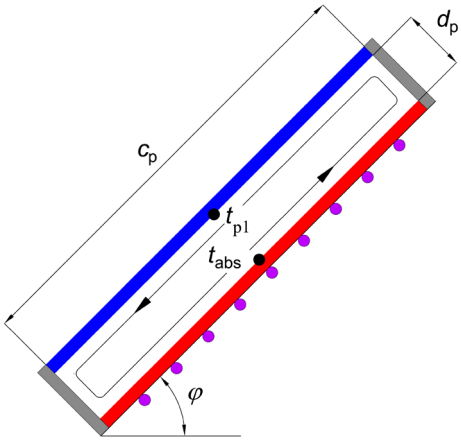
Přenos tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením je charakterizován Nusseltovým číslem Nu_d vztaženým k charakteristickému rozměru vzduchové vrstvy, tloušťce d_p. Geometrické parametry vzduchové vrstvy a charakter přenosu tepla (směr toku nahoru) jsou uvedeny na *Obr. 4.4*. Vztah mezi součinitelem přestupu tepla $h_{pk,abs\text{-}p1}$ ve vrstvě a Nu_d je určen definicí Nusseltova čísla

$$\mathrm{Nu_d} = \frac{h_{\mathrm{pk,abs\text{-}p1}} \cdot d_\mathrm{p}}{\lambda_{\mathrm{vz}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.5)$$

kde je:

λ_{vz} tepelná vodivost vzduchu ve vrstvě při střední teplotě $t_{abs\text{-}p1}$ vzduchu [W/m.K],

d_p tloušťka vzduchové mezery [m].



Obr. 4.4 *Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře (tepelný tok směrem nahoru)*

Nusseltovo číslo je při přirozené konvekci závislé především na Rayleighově čísle (kritériu) $\mathrm{Ra_d}$, tj. součinu Grashofova čísla $\mathrm{Gr_d}$ a Prandtlova čísla Pr

$$\mathrm{Ra_d} = \mathrm{Gr_d} \cdot \mathrm{Pr} \qquad [-] \qquad (4.6)$$

Prandtlovo číslo lze získat z vlastností vzduchu při střední teplotě vzduchové vrstvy $t_{abs\text{-}p1}$, jak je uvedeno

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu_{\mathrm{vz}} \cdot \rho_{\mathrm{vz}} \cdot c_{\mathrm{vz}}}{\lambda_{\mathrm{vz}}} \qquad [-] \qquad (4.7)$$

kde je:

ν_{vz} kinematická viskozita vzduchu [m²/s],

ρ_{vz} hustota vzduchu [kg/m³],

c_{vz} měrná tepelná kapacita vzduchu [J/kg.K].

Grashofovo číslo se stanoví podle vztahu

$$\mathrm{Gr_d} = \frac{\beta_{\mathrm{vz}} \cdot g \cdot d_\mathrm{p}^3 \cdot \Delta t}{\nu_{\mathrm{vz}}^2} = \frac{1}{T_{\mathrm{abs-p1}}} \cdot \frac{g \cdot d_\mathrm{p}^3 \cdot \left(t_{\mathrm{abs}} - t_{\mathrm{p1}}\right)}{\nu_{\mathrm{vz}}^2} \qquad [-] \qquad (4.8)$$

kde je:

β_{vz} součinitel teplotní roztažnosti vzduchu [1/K],

g tíhové zrychlení [m/s²].

Pro Nusseltovo číslo při přirozené konvekci lze v odborné literatuře najít velký počet vztahů a korelací získaných z experimentů (*Tab. 4.2*).

Tab. 4.2 *Vybrané korelace pro přirozenou konvekci ve vzduchové mezeře*

M_3	Autor	Rovnice	Podmínky		
			Ra	φ	c_p/d_p
1	Hollands [61]	$\mathrm{Nu_d} = 1 + 1{,}44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{\mathrm{Ra_d} \cdot \cos\varphi}\right]^+ \left(1 - \frac{(\sin\varphi)^{1.6} \cdot 1708}{\mathrm{Ra_d} \cdot \cos\varphi}\right) + \left[\left(\frac{\mathrm{Ra_d} \cdot \cos\varphi}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^+$	0< Ra <10^5	0°- 60°	cca 48
2	Buchberg [62]	$\mathrm{Nu_d} = 1 + 1{,}44\left[1 - \frac{1708}{\mathrm{Ra}_d \cdot \cos\varphi}\right]^+$ $\mathrm{Nu_d} = 0{,}229 \cdot (\mathrm{Ra_d} \cdot \cos\varphi)^{0{,}252}$ $\mathrm{Nu_d} = 0{,}157 \cdot (\mathrm{Ra_d} \cdot \cos\varphi)^{0.285}$	1708< Ra·cosφ<10^5 5900< Ra·cosφ<9,2x10^4 9,2x10^4< Ra·cosφ<10^6	0°-60°	
3	Randal [63]	$\mathrm{Nu_d} = 0{,}118\left[\mathrm{Ra_d} \cdot \cos^2(\varphi - 45)\right]^{0{,}29}$	2,8x10^3< Ra·cosφ<2,2x10^5	45°-90°	9-36
4	Schinkel [64]	$\mathrm{Nu_d} = a(\varphi) \cdot \mathrm{Ra_d}^{1/3}$ φ / $a(\varphi)$: 0° 0,080; 10° 0,079; 20° 0,075; 30° 0,074; 40° 0,074 φ / $a(\varphi)$: 50° 0,074; 60° 0,072; 70° 0,069; 80° 0,068; 90° 0,062	10^5< Ra·cosφ<4x10^6	0°-90°	6-27
5	Niemann [65]	$\mathrm{Nu_d} = 1 + \frac{m \cdot (\mathrm{Ra_d})^c}{\mathrm{Ra_d} + n}$ φ / m / n / c: 0° 0,0700 0,32x10^4 1,333; 45° 0,0430 0,41x10^4 1,360; 90° 0,0236 1,01x10^4 1,393	10^2< Ra<10^8		
6	Matuška [66]	$\mathrm{Nu_d} = \left(0{,}1464 - 2{,}602 \times 10^{-4} \cdot \varphi - 2{,}046 \times 10^{-6} \cdot \varphi^2\right)\mathrm{Ra_d}^{0{,}29}$	univerzální korelace		
horní index + značí, že obsah závorek se uvažuje pouze při kladných hodnotách, při záporných je roven 0.					

Následně lze stanovit součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením podle vztahu

$$h_{\mathrm{pk,abs-p1}} = \frac{\mathrm{Nu_d} \cdot \lambda_{\mathrm{vz}}}{d_{\mathrm{p}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.9)$$

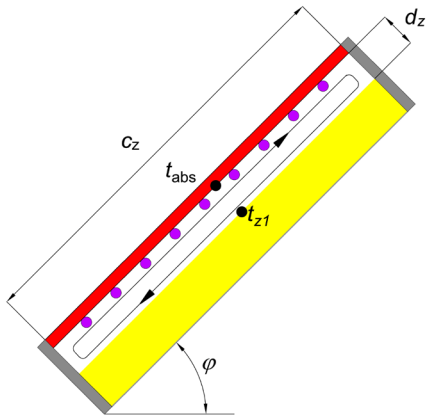
4.1.1.5 Sálání mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi povrchem absorbéru a vnitřním povrchem zasklení se stanoví podle vztahu

$$h_{\mathrm{s,abs-p1}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{abs,p}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{zas1}}} - 1} \cdot \frac{T_{\mathrm{abs}}^4 - T_{\mathrm{p1}}^4}{T_{\mathrm{abs}} - T_{\mathrm{p1}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.10)$$

4.1.1.6 Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře mezi povrchem absorbéru a zadní izolací

Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zadní izolací se stanovuje stejným způsobem jako v 4.1.1.4. Geometrické parametry vzduchové mezery a směr tepelného toku (směrem dolů) jsou uvedeny na *Obr. 4.5*.



Obr. 4.5 *Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře (tepelný tok směrem dolů)*

$$h_{pk,abs\text{-}z1} = \frac{Nu_d \cdot \lambda_{vz}}{d_z} \qquad [W/m^2.K] \tag{4.11}$$

kde je:

λ_{vz} tepelná vodivost vzduchové vrstvy při střední teplotě vzduchu $t_{abs\text{-}z1}$ [W/m.K].

V odborné literatuře byla nalezena pouze jedna obecná rovnice pro případ přirozeného proudění vzduchu v uzavřené mezeře (při tepelném toku směrem dolů). Arnold et al. [67] naznačují korelaci na základě Nusseltovo čísla zjištěného pro vertikální plynovou vrstvu (90°) jako funkce sinus v rozmezí 90 < φ <180 °, podle vztahu

$$Nu_d = 1 + \left[Nu_d \left(\varphi = 90^\circ \right) - 1 \right] \cdot \sin\varphi \qquad [-] \tag{4.12}$$

4.1.1.7 Sálání mezi absorbérem a vnitřním povrchem izolace

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi absorbérem a vnitřním povrchem izolace se stanoví podobně jako v 4.1.1.5

$$h_{s,abs-z1} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{abs,z}} + \frac{1}{\varepsilon_{iz}} - 1} \cdot \frac{T_{abs}^4 - T_{z1}^4}{T_{abs} - T_{z1}} \qquad [W/m^2.K] \tag{4.13}$$

kde je:

$\varepsilon_{abs,z}$ emisivita zadního povrchu absorbéru [-],

ε_{iz} emisivita povrchu izolace [-].

4.1.1.8 Tepelná propustnost izolace

Tepelná propustnost izolace je závislá na teplotě izolace. Z tohoto důvodu by měl být součinitel prostupu tepla zadní izolace stanoven jako funkce střední teploty izolace $t_{z1\text{-}z2}$.

Tepelná vodivost izolace v závislosti na střední teplotě izolace lze vyjádřit polynomem druhého stupně jako

$$\lambda = \lambda\left(t_{z1-z2}\right) = f\left(\frac{t_{z1}+t_{z2}}{2}\right) = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot t_{z1-z2} + \lambda_2 \cdot t_{z1-z2}^2 \qquad \text{[W/m.K]} \qquad (4.14)$$

Potom lze stanovit tepelnou propustnost izolace jako funkci střední teploty izolace $t_{z1\text{-}z2}$.

$$h_{v,z1-z2} = \frac{\lambda}{d_{iz}} = \frac{\lambda_0}{d_{iz}} + \frac{\lambda_1}{d_{iz}} \cdot t_{z1-z2} + \frac{\lambda_2}{d_{iz}} t_{z1-z2}^{\cdot 2} = h_{iz0} + h_{iz1} \cdot t_{z1-p2} + h_{iz2} \cdot t_{z1-z2}^2 \quad \text{[W/m}^2\text{.K]} \qquad (4.15)$$

4.1.1.9 Sálání mezi rámem kolektoru a okolními plochami

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi vnějším povrchem rámu kolektoru a okolními plochami se obecně stanoví podle vztahu

$$h_{s,z2\text{-}e} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_{op}} - 1} \cdot \frac{T_{z2}^4 - T_{op}^4}{T_{z2} - T_e} \qquad \text{[W/m}^2\text{.K]} \qquad (4.16)$$

kde je:

ε_r emisivita rámu [-],

ε_{op} emisivita okolního povrchu [-].

4.1.1.10 Přirozená a nucená konvekce z vnějšího povrchu rámu do okolí

Součinitel přestupu tepla konvekcí z vnějšího povrchu rámu do okolí se stanoví podobným způsobem jako v 4.1.1.2.

4.1.1.11 Sálání a konvekce mezi absorbérem a vnitřním povrhem boční izolací

Stanovení tepelných ztrát boční stranou kolektory je příliš složité. Avšak tyto ztráty jsou tak malé, že je není nutné počítat s velkou přesností. Podle Duffie a Beckman [68], jsou velikosti součinitelů přestupu tepla prouděním a sáláním mezi absorbérem a boční izolace mnohem větší, než součinitele přestupu tepla vedením, sáláním a prouděním z bočního rámu do okolí. Proto lze předpokládat, že povrchová teplota boční izolace t_{b1} se rovná teplotě absorbéru t_{abs}.

4.1.1.12 Tepelná propustnost boční izolace

Tepelná propustnost boční izolace se stanoví podobným způsobem jako v 4.1.1.8.

4.1.1.13 Přirozená a nucená konvekce z bočního rámu do okolí

Součinitel přestupu tepla konvekcí z bočního rámu do okolí se stanoví podobným způsobem jako v 4.1.1.2.

4.1.1.14 Sálání mezi bočním rámem kolektoru a okolím

Součinitel přestupu tepla sáláním z bočního rámu do okolí se obecně stanoví podle vztahu

$$h_{\mathrm{s,b2\text{-}e}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{r}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{ok}}} - 1} \cdot \frac{T_{\mathrm{b2}}^4 - T_{\mathrm{e}}^4}{T_{\mathrm{b2}} - T_{\mathrm{e}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.17)$$

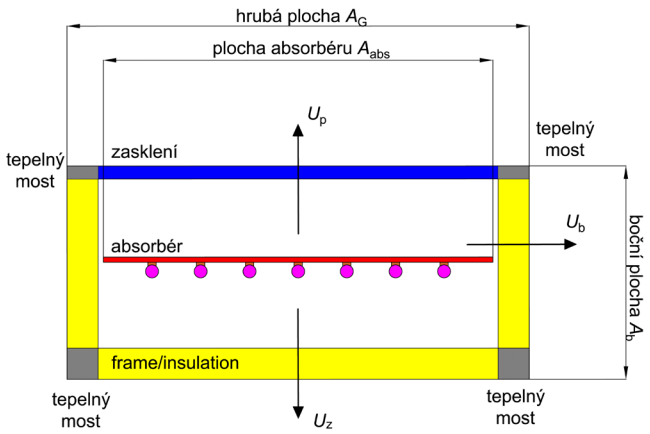
4.1.1.15 Prostup tepla kolektorem

Potom lze vypočítat součinitele prostupu tepla přední stranou U_{p}, zadní stranou U_{z} a boční stranou U_{b} kolektoru.

$$U_{\mathrm{p}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{s,p2-e}} + h_{\mathrm{k,p2-e}}} + \frac{1}{h_{\mathrm{ved,p1-p2}}} + \frac{1}{h_{\mathrm{s,abs-p1}} + h_{\mathrm{pk,abs-p1}}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.18)$$

$$U_{\mathrm{z}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{s,z2-e}} + h_{\mathrm{k,z2-e}}} + \frac{1}{h_{\mathrm{ved,z1-z2}}} + \frac{1}{h_{\mathrm{s,abs-z1}} + h_{\mathrm{pk,abs-z1}}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.19)$$

$$U_{\mathrm{b}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{s,b2-e}} + h_{\mathrm{k,b2-e}}} + \frac{1}{h_{\mathrm{ved,b1-b2}}}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.20)$$



Obr. 4.6 *Tepelné ztráty kolektoru s ohledem na plochu absorbéru a hrubou plochu*

Pro zohlednění vlivu tepelných mostů se celkový součinitel prostupu tepla U vztahuje k hrubé ploše solárního kolektoru A_G (*Obr. 4.6*). Vzhledem k tomu, že tepelný výkon solárního kolektoru se obecně vztahuje k ploše absorbéru A_{abs}, celkový součinitel prostupu tepla musí být také vztažen k ploše absorbéru A_{abs}.

$$U = \left(U_p + U_z + U_b \cdot \frac{A_b}{A_G} \right) \cdot \frac{A_G}{A_{abs}} \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.21)$$

4.1.1.16 Přepočet povrchových teplot

Vzhledem k tomu, že součinitele přestupu tepla a součinitelé prostupu tepla byly vypočteny pro odhadnuté teploty (první iterační krok), je potřeba pokračovat dalším iteračním krokem. Ze součinitelů přestupu tepla a součinitelů prostupu tepla přes přední, zadní a boční části kolektoru lze získat rozložení teplot zpětným výpočtem.

$$t_{p1} = t_{abs} - \frac{U_p \cdot (t_{abs} - t_e)}{h_{s,abs-p1} + h_{pk,abs-p1}} \qquad [°C] \qquad (4.22)$$

$$t_{p2} = t_e + \frac{U_p \cdot (t_{abs} - t_e)}{h_{s,p2-e} + h_{k,p2-e}} \qquad [°C] \qquad (4.23)$$

$$t_{z1} = t_{abs} - \frac{U_z \cdot (t_{abs} - t_e)}{h_{s,abs-z1} + h_{pk,abs-z1}} \qquad [°C] \qquad (4.24)$$

$$t_{z2} = t_{amb} + \frac{U_z \cdot (t_{abs} - t_e)}{h_{s,z2-e} + h_{k,z2-e}} \qquad [°C] \qquad (4.25)$$

$$t_{b1} = t_{abs} \qquad [°C] \qquad (4.26)$$

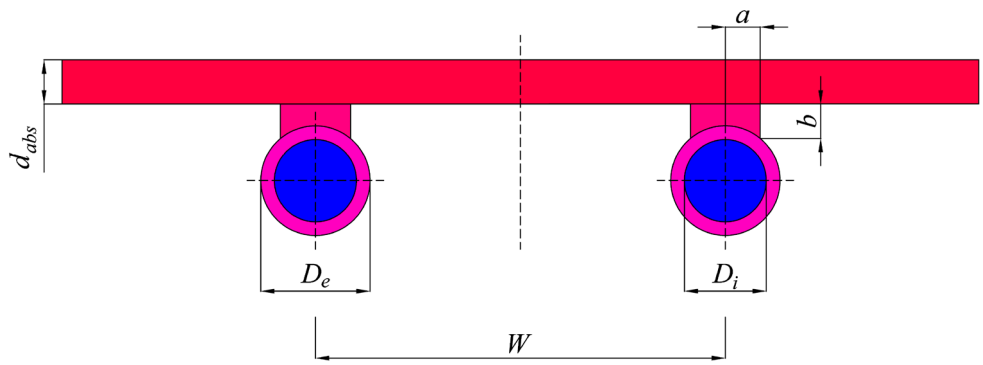
$$t_{b2} = t_e + \frac{U_b \cdot (t_{abs} - t_e)}{h_{s,b2-e} + h_{k,b2-e}} \qquad [°C] \qquad (4.27)$$

Nové hodnoty povrchových teplot jsou následně použity v dalších iteračních krocích pro výpočet jednotlivých součinitelů přestupu tepla a tím nové a správnější hodnoty součinitele prostupu tepla. Výsledkem vnější bilance je celkový součinitel prostupu tepla kolektoru U a tudíž i celková teplena ztráta solárního kolektoru.

4.1.2 Vnitřní energetická bilance

Konstrukce plochých kolektorů je zpravidla založena na trubce protékané teplonosnou kapalinou, na které je připevněna lamela s povrchem určeným k absorpci slunečního záření (*Obr. 4.7*). Přenos tepla z povrchu absorbéru do kapaliny protékající uvnitř trubek může být popsán pomocí vnitřní energetické bilance absorbéru. Vnitřní energetická bilance absorbéru řeší přenos tepla vedením z povrchu absorbéru do místa spoje absorbéru a trubky, vedením vlastním spojem trubka-absorpční povrch a nucenou

konvekcí z vnitřního povrchu trubky do kapaliny. Výpočty vnitřní energetické bilance jsou provedeny na základě odhadované průměrné teploty teplonosné kapaliny.



Obr. 4.7 *Konfigurace absorbéru s horním spojem*

Potom lze vypočítat účinnostní činitel *F´*, tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R a tepelný výkon kolektoru $\dot{Q}_k$ pro odhadovanou průměrnou teplotu teplonosné kapaliny.

4.1.2.1 Účinnost žebra

Základem teoretického řešení tepelného chování absorbéru je výpočet teplotního pole na lamele (technicky známého žebra s dopadem slunečního záření:

$$F = \frac{\tanh\left[m \cdot (W - 2 \cdot a)/2\right]}{m \cdot (W - 2 \cdot a)/2} \quad [-] \tag{4.28}$$

kde je:

$$m = \sqrt{\frac{U}{\lambda_{abs} \cdot d_{abs}}} \quad [-] \tag{4.29}$$

kde je:

U celkový součinitel prostupu tepla kolektoru [W/m^2.K],

λ_{abs} tepelná vodivost absorbéru [W/m.K],

d_{abs} tloušťka absorbéru [m],

W rozteč mezi trubkami [m],

a šířka spoje [m].

4.1.2.2 Účinnostní činitel kolektoru

Účinnostní činitel kolektoru, jenž určuje schopnost kolektoru převést teplo z povrchu do teplonosné látky, představuje poměr dvou tepelných odporů. Ve jmenovateli je obsažen odpor proti přenosu tepla z kapaliny do okolního vzduchu, v čitateli je odpor proti přenosu tepla z absorbéru do okolního vzduchu. Účinnostní činitel je ovlivňován především geometrií absorbéru (tloušťka d_{abs}, rozteč W) stejně tak, jako jeho tepelnými vlastnostmi (tepelná vodivost λ_{abs}) a přestupem tepla z trubky do

teplonosné látky. Pro různá konstrukční řešení absorbéru se výpočtové vztahy účinnostního činitele liší.

Pro konfiguraci absorbéru s horním spojem (*Obr. 4.7*) se účinnostní činitel *F´* stanoví podle vztahu:

$$F' = \frac{R}{R_0} = \frac{1/U}{W \cdot \left[\frac{1}{U \cdot \left[2 \cdot a + (W - 2 \cdot a) \cdot F \right]} + \frac{1}{\Lambda_{sp}} + \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_i} \right]} \quad [-] \tag{4.30}$$

kde je:

R tepelný odpor proti přenosu tepla z absorbéru do okolního vzduchu [m^2.K/W],

R_0 tepelný odpor proti přenosu tepla z kapaliny do okolního vzduchu [m^2.K/W],

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

$$\Lambda_{sp} = \frac{\lambda_{sp} \cdot a}{b} \quad [\text{W/m.K}] \tag{4.31}$$

kde je:

λ_{sp} tepelná vodivost materiálu spoje [W/m.K],

b tloušťka spoje [m].

h_i součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí v trubkách absorbéru [W/m^2.K],

D_i vnitřní průměr trubek [m].

4.1.2.3 Nucená konvekce z vnitřního povrchu trubky do kapaliny

Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí mezi tekutinou a stěnami v trubkách absorbéru se stanoví z Nusseltova čísla

$$h_i = \text{Nu}_D \cdot \frac{\lambda_k}{D_i} \quad [\text{W/m}^2\text{.K}] \tag{4.32}$$

kde je:

λ_k tepelná vodivost kapaliny [W/m.K].

Přenos tepla v kruhových trubkách při laminárním proudění teplonosné kapaliny je podrobně popsán v odborné literatuře (*Tab. 4.3*). V případě laminárního proudění v náběhové oblasti je nutné zavést bezrozměrnou podélnou souřadnici x^*, charakterizující laminární proudění v potrubí.

$$x^* = \frac{L/D_i}{\text{Re}_D \cdot \text{Pr}} \quad [-] \tag{4.33}$$

kde je:

L délka trubky absorbéru [W/m.K].

Tab. 4.3 *Rovnice pro přenos tepla v potrubí při laminárním proudění*

M_7	Autor	Rovnice	Podmínky
1	Shah [67]	$\mathrm{Nu_D} = 4{,}364$	plně vyvinutý rychlostní a teplotní profil, konstantní tepelný tok
2	Shah [67]	$\mathrm{Nu_D} = 1{,}953 \cdot x^{*-1/3}$ $\quad x^* \le 0{,}03$ $\mathrm{Nu_D} = 4{,}364 + \frac{0{,}0722}{x^*}$ $\quad x^* > 0{,}03$	vstupní oblast s délkou *L*, rozvojové proudění, konstantní tepelný tok
3	Hausen [69]	$\mathrm{Nu_D} = 3{,}66 + \frac{0{,}668 \cdot (D/L) \cdot \mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr}}{1 + 0{,}04 \cdot \left[(D/L) \cdot \mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr}\right]^{2/3}}$	vstupní oblast s délkou *L*, rozvojové proudění
4	Sieder-Tate [70]	$\mathrm{Nu_D} = 1{,}86 \left(\frac{1}{x^*}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)$	vstupní oblast - rozvojové rychlostní a teplotní profil, 0,48 < Pr < 16700
5	Churchill and Ozoe [71]	$\mathrm{Nu_D} = \frac{2 \cdot 0{,}6366 \cdot \left[(4/\pi) \cdot x^*\right]^{-1/2}}{\left[1 + (\mathrm{Pr}/0{,}0468)^{2/3}\right]^{1/4}}$	vstupní oblast - rozvojové rychlostní a teplotní profil Pr > 2 $10^{-7} < x < 10^{-3}$

Vzhledem k tomu, že jako teplonosná kapalina se nejčastěji využívá nemrznoucí směs na bázi vody a glykolů, je turbulentní proudění velmi vzácné. Vybrané vztahy pro výpočet Nusseltova čísla v případě turbulentního proudění jsou uvedeny v *Tab. 4.4*.

$$\mathrm{Nu_D} = A \cdot \mathrm{Re_D^m} \cdot \mathrm{Pr^n} \quad [-] \tag{4.34}$$

Tab. 4.4 *Rovnice pro přenos tepla v potrubí při turbulentním proudění*

M_8	Autor	Rovnice	Podmínky
1	Dittus-Boelter [72]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}023 \cdot \mathrm{Re_D^{4/5}} \cdot \mathrm{Pr}^{0.4}$ pro ohřev $\mathrm{Nu_D} = 0{,}023 \cdot \mathrm{Re_D^{4/5}} \cdot \mathrm{Pr}^{0.3}$ pro chlazení	0,7 < Pr < 120 2500 < $\mathrm{Re_D}$ < 124000 *L/D* > 60
2	Petukhov-Kirillov-Popov [73]	$\mathrm{Nu_D} = \frac{(f/8) \cdot \mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr}}{1{,}07 + 12{,}7 (f/8)^{1/2} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}$ $f = \left(1{,}82 \cdot \log_{10} \mathrm{Re_D} - 1{,}64\right)^{-2}$	0,5 < Pr < 2000 $10^4 < \mathrm{Re_D} < 5 \cdot 10^6$
3	Gnielinski [74]	$\mathrm{Nu_D} = \frac{(f/8) \cdot (\mathrm{Re_D} - 1000) \cdot \mathrm{Pr}}{1 + 12{,}7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}$ $f = \left(0{,}79 \cdot \ln \mathrm{Re_D} - 1{,}64\right)^{-2}$	0,5 < Pr < 2000 $10^4 < \mathrm{Re_D} < 5 \cdot 10^6$
4	Sleicher, Rouse [75]	$\mathrm{Nu_D} = 5 + 0{,}015 \cdot \mathrm{Re_D^a} \cdot \mathrm{Pr}^b$ $a = 0{,}88 - \frac{0{,}24}{4 + \mathrm{Pr}}$ $\quad b = 0{,}333 + 0{,}5 e^{-0{,}6\mathrm{Pr}}$	0,1 < Pr < 10^4 $10^4 < \mathrm{Re_D} < 10^6$
f – koeficient tření podle Moodyho diagramu pro hladké trubky			

4.1.2.4 Tepelný přenosový součinitel kolektoru

Při hodnocení provozu solárních kolektorů je výhodné pracovat s veličinou, která vztahuje energii dodanou solárním kolektorem (okamžitý využitelný tepelný zisk) k energii, která by byla dodána za předpokladu, že by teplota celého absorbéru byla rovna vstupní teplotě vstupující teplonosné látky. Tato veličina se nazývá tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R [-] a stanoví se podle vztahu:

$$F_R = \frac{\dot{m}_{\text{kap}} \cdot c_{\text{kap}}}{A_{\text{abs}} \cdot U} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_{\text{abs}} \cdot U \cdot F'}{\dot{m} \cdot c_{\text{kap}}} \right) \right] \quad [-] \tag{4.35}$$

kde je:

c_{kap} měrná tepelná kapacita kapaliny [J/kg.K],

$\dot{m}_{\text{kap}}$ celkový hmotnostní průtok teplonosné kapaliny solárním kolektorem [kg/s].

Tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R je svým významem ekvivalentní účinnosti tepelného výměníku, definovanou jako poměr okamžitého přeneseného tepelného výkonu k maximálnímu možnému tepelnému výkonu. V solárním kolektoru dochází k maximálnímu možnému využitelnému výkonu v případě, že teplota celého kolektoru je rovna teplotě vstupující látky.

4.1.2.5 Modifikátor úhlu dopadu

Vzhledem k tomu, že propustnost slunečního záření zasklením kolektoru τ [-] i pohltivost α [-] absorpčního povrchu jsou optické vlastnosti závislé na úhlu dopadu slunečního záření θ [°], je nutné zavést parametr vyjadřující změnu optické účinnosti kolektoru $\tau\alpha$ s úhlem dopadu slunečního záření oproti kolmému dopadu. Modifikátor úhlu dopadu se počítá zvlášť pro přímé sluneční záření K_b, difúzní (oblohové) K_d a odražené K_r. Celkový modifikátor úhlu dopadu se pak počítá podle vztahu:

$$K = \frac{G_b \cdot K_b + G_d \cdot K_d + G_r \cdot K_r}{G_b + G_d + G_r} \quad [-] \tag{4.36}$$

Modifikátor úhlu dopadu pro přímé sluneční záření K_b se stanoví v závislosti na úhlu dopadu přímého slunečního záření podle vztahu:

$$K_b = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) - b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)^2 \quad [-] \tag{4.37}$$

kde je:

b_0 lineární součinitel modifikátoru úhlu dopadu [-],

b_1 kvadratický součinitel modifikátoru úhlu dopadu [-].

V matematickém modelu je oblohové a odražené záření považované za difuzní izotropické záření. To znamená, že tyto složky nejsou závislé na úhlu dopadu.

Modifikátory úhlu dopadu pro difúzní K_d a odražené K_r záření, lze stanovit podle rovnice Brandemuehla a Beckmana [76] v závislosti na efektivním úhlu dopadu:

$$K_d = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_{eff,d}} - 1 \right) - b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_{eff,d}} - 1 \right)^2 \qquad [-] \qquad (4.38)$$

$$K_r = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_{eff,r}} - 1 \right) - b_1 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_{eff,r}} - 1 \right)^2 \qquad [-] \qquad (4.39)$$

kde je:

$\theta_{eff,d}$ efektivní úhel dopadu pro difuzní záření [-],

$\theta_{eff,r}$ efektivní úhel dopadu pro odražené záření [-].

Efektivní úhel dopadu pro difuzní a odražené záření se stanoví podle vztahů:

$$\theta_{eff,d} = 59,68 - 0,1388 \cdot \varphi + 0,001497 \cdot \varphi^2 \qquad [°] \qquad (4.40)$$

$$\theta_{eff,r} = 90 - 0,5788 \cdot \varphi + 0,002693 \cdot \varphi^2 \qquad [°] \qquad (4.41)$$

kde je:

φ sklon kolektoru [°].

Pokud kvadratický součinitel modifikátoru úhlu dopadu b_1 je roven nule, modifikátory úhlu dopadu musí být vypočtené pomocí jiných vztahů:

$$K_b = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\max(0,5, \cos\theta)} - 1 \right) - \frac{(1 - b_0) \cdot (\max(60, \theta) - 60)}{30} \qquad [-] \qquad (4.42)$$

$$K_d = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\max(0,5, \cos\theta_{eff,d})} - 1 \right) - \frac{(1 - b_0) \cdot (\max(60, \theta_{eff,d}) - 60)}{30} \qquad [-] \qquad (4.43)$$

$$K_r = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\max(0,5, \cos\theta_{eff,r})} - 1 \right) - \frac{(1 - b_0) \cdot (\max(60, \theta_{eff,r}) - 60)}{30} \qquad [-] \qquad (4.44)$$

4.1.2.6 Výkon solárního kolektoru

Výkon solárního kolektoru může být vypočítán třemi různými způsoby: na základě teploty absorbéru t_{abs}, střední teploty kapaliny $t_{k,m}$ a teploty kapaliny na vstupu do kolektoru t_{k1}. Matematický model využívá rovnice (4.47) pro výpočet tepelného výkonu kolektoru.

$$\dot{Q}_k = A_{abs} \cdot \left[\tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K - U \cdot (t_{abs} - t_e) \right] \qquad [W] \qquad (4.45)$$

$$\dot{Q}_k = A_{abs} \cdot F' \cdot \left[\tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K - U \cdot (t_{k,m} - t_e) \right] \qquad [W] \qquad (4.46)$$

$$\dot{Q}_k = A_{abs} \cdot F_R \cdot \left[\tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K - U \cdot (t_{k1} - t_e) \right] \qquad [W] \qquad (4.47)$$

Účinnost solárního kolektoru η je za ustálených podmínek definována jako poměr tepelného výkonu odváděného teplonosnou látkou z kolektoru k "příkonu" slunečního záření (zářivému toku) dopadajícího na kolektor. Vztažnou plochou pro vyhodnocení účinnosti je hrubá plocha A_G [77]. Rozlišují se tři účinnosti. Účinnost může být vypočítána na základě: teploty absorbéru, střední teploty kapaliny a teploty kapaliny na vstupu do kolektoru. Matematický model využívá rovnice (4.50) pro výpočet účinnosti kolektoru.

$$\eta = \frac{A_{\mathrm{abs}}}{A_{\mathrm{G}}} \cdot \left[\tau \cdot \alpha - \frac{U \cdot \left(t_{\mathrm{abs}} - t_{\mathrm{e}}\right)}{G \cdot K} \right] \qquad [-] \qquad (4.48)$$

$$\eta = F' \cdot \frac{A_{abs}}{A_{\mathrm{G}}} \cdot \left[\tau \cdot \alpha - \frac{U \cdot \left(t_{\mathrm{k,m}} - t_{e}\right)}{G \cdot K} \right] \qquad [-] \qquad (4.49)$$

$$\eta = F_{\mathrm{R}} \cdot \frac{A_{\mathrm{abs}}}{A_{\mathrm{G}}} \cdot \left[\tau \cdot \alpha - \frac{U \cdot \left(t_{\mathrm{k1}} - t_{\mathrm{e}}\right)}{G \cdot K} \right] \qquad [-] \qquad (4.50)$$

4.1.2.7 Přepočet střední teploty a teploty absorbéru

Vzhledem k tomu, že účinnostní činitel F', tepelný přenosový činitel kolektoru F_R a tepelný výkon kolektoru $\dot{Q}_{\mathrm{k}}$ byly stanoveny pro odhadnuté teploty, tak následuje další iterační krok.

Pro výpočet součinitelů přestupu tepla mezi hlavními plochami a součinitele prostupu tepla U (ve vnější bilanci) v dalším iteračním kroku, musí být teplota absorbéru vypočítána ze vstupní teploty podle vztahu:

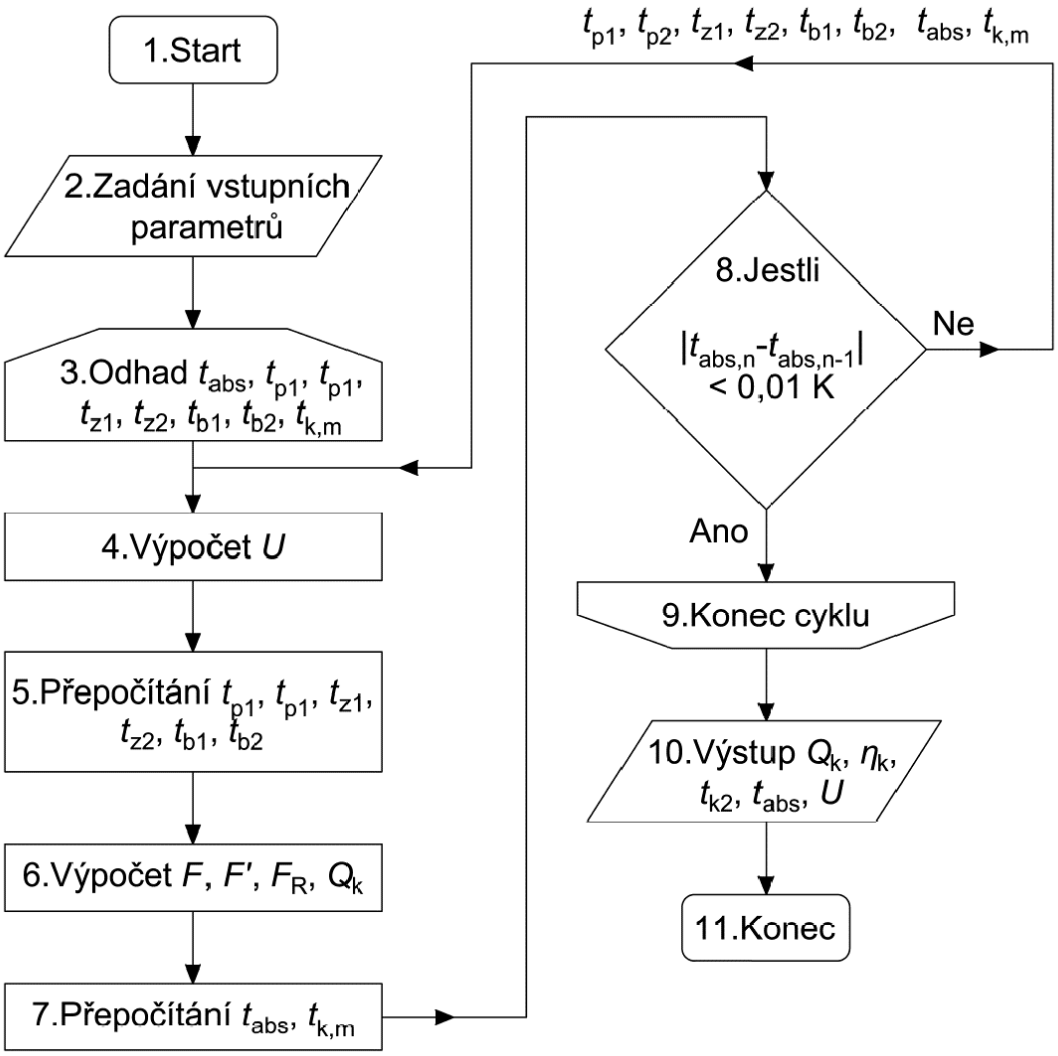
$$t_{\mathrm{abs}} = t_{\mathrm{k1}} + \frac{\dot{Q}_{\mathrm{k}}}{F_{\mathrm{R}} \cdot U \cdot A_{\mathrm{abs}}} \cdot \left(1 - F_{\mathrm{R}}\right) \qquad [°\mathrm{C}] \qquad (4.51)$$

Dále je potřeba stanovit střední teplotu kapaliny pro výpočet součinitele přestupu tepla nucenou konvekcí v dalším iteračním kroku podle vztahu:

$$t_{\mathrm{k,m}} = t_{\mathrm{k1}} + \frac{\dot{Q}_{\mathrm{k}}}{F_{\mathrm{R}} \cdot U \cdot A_{\mathrm{abs}}} \cdot \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right) \qquad [°\mathrm{C}] \qquad (4.52)$$

4.1.2.8 Iterační proces

Jelikož obě bilance jsou vzájemně propojené a na sobě závislé, tak nadřazený iterační cyklus předává výsledky z vnější bilance do vnitřní (součinitel prostupu tepla U) a výsledky vnitřní do vnější (povrchová teplota absorbéru t_{abs}). Ustáleného stavu modelu se dosahuje po několika iteracích. Iterační výpočet trvá až do té doby, dokud rozdíl mezi vypočtenou teplotou absorbéru ve dvou po sobě jdoucích krocích je větší, než 0,01 K [78, 79]. Schéma iteračního cyklu je uvedeno na *Obr. 4.8*.



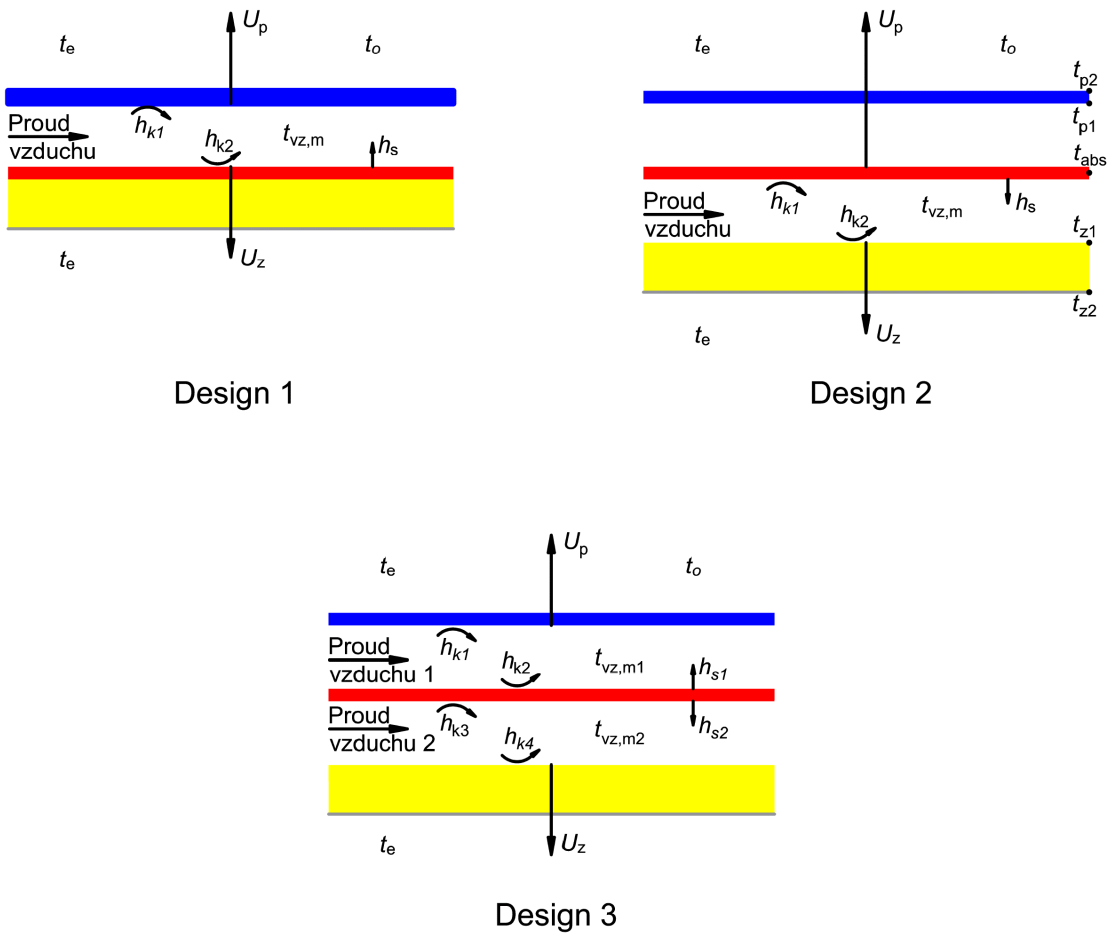
Obr. 4.8 *Schéma iteračního cyklu (Operating Mode 0)*

4.2 Matematický model kombinovaného kolektoru – vzduchová část

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

Matematický model umožňuje modelování následujících druhů vzduchových kolektorů (*Obr. 4.9*): Design 1 – jednokanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu nad absorbérem; Design 2 – dvoukanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu pod absorbérem; Design 3 – vzduchový kolektor s oboustranným prouděním.

Je zřejmé, že modelování vzduchové části kombinovaného kolektoru se bude lišit v závislosti na konstrukce kolektoru. Níže je uveden popis matematického modelu pro nejběžnější konstrukce kombinovaného kolektoru (*Obr. 4.9*, Design 2).



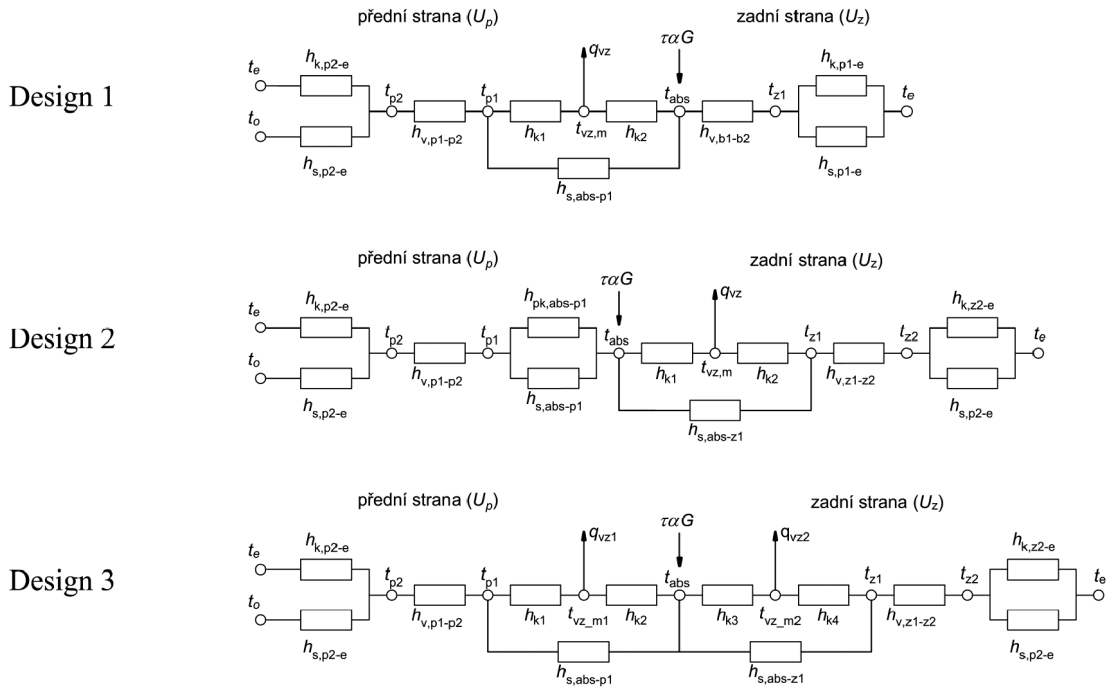
Obr. 4.9 *Druhy kombinovaných kolektorů* [80]

4.2.1 Vnější energetická bilance

Vnější energetická bilance absorbéru (*Obr. 4.10*) řeší přenos tepla:

- Konvekcí a sáláním z povrchu absorbéru;
- Vedením tepla zasklením nebo izolací;
- Konvekcí a sáláním z vnějšího povrchu zasklení a zadní strany do okolí.

Pro správný výpočet součinitelů přestupu tepla je nutné znát teploty hlavních povrchů (zasklení, izolace). Zároveň rozložení teplot v kolektoru je závislé na hodnotách součinitelů přestupu tepla (poměru tepelných odporů). Proto je vnější energetická bilance absorbéru řešena v iteračním cyklu. Na začátku iteračního procesu se teplota absorbéru odhaduje z teploty vzduchu na vstupu do kolektoru. Dále dochází k odhadu povrchové teploty na základě rozdílu teplot mezi absorbérem a okolním prostředí [81].



Obr. 4.10 *Schéma vnější bilance absorbéru*

4.2.1.1 Sálání mezi vnějším povrchem zasklení a oblohou

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi vnějším povrchem zasklení a oblohou se stanoví stejným způsobem jako v 4.1.1.1.

4.2.1.2 Přirozená a nucená konvekce z vnějšího povrchu zasklení do okolí

Součinitel přestupu tepla přirozenou a nucenou konvekcí z vnějšího povrchu zasklení do okolí se stanoví stejným způsobem jako v 4.1.1.2.

4.2.1.3 Tepelná propustnost zasklení

Tepelná propustnost zasklení se stanoví stejným způsobem jako v 4.1.1.3.

4.2.1.4 Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením

Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí ve vzduchové mezeře absorbérem a zasklením se stanovuje stejným způsobem jako v 4.1.1.4.

4.2.1.5 Sálání mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi absorbérem a vnitřním povrchem zasklení se stanovuje stejným způsobem jako v 4.1.1.5.

4.2.1.6 Nucené proudění ve vzduchové mezeře mezi povrchem absorbéru a zadní izolací

Pro stanovení součinitele přestupu tepla nucenou konvekcí ve vzduchové mezeře mezi povrchem absorbéru a zadní izolací lze použít jak korelace stanovené speciálně pro proudění mezi dvěma paralelními desky, tak i velké množství korelací vyvinutých pro kruhové potrubí. Přičemž v obou případech se hydraulický průměr používá jako charakteristický rozměr:

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad [\mathrm{m}] \tag{4.53}$$

kde je

S průřez [m^2],

O smáčený obvod [m].

Dále lze stanovit součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí podle vztahu:

$$h_k = \mathrm{Nu_D} \cdot \frac{\lambda_{vz}}{D_h} \quad [\mathrm{W/m^2.K}] \tag{4.54}$$

kde je

λ_{vz} tepelná vodivost vzduchu [W/m.K].

Přenos tepla při turbulentním proudění ($\mathrm{Re_D}$ > 10000) teplonosné látky je široce popsán v odborné literatuře (*Tab. 4.5*).

Tab. 4.5 *Rovnice pro přenos tepla při turbulentním proudění*

M_9	Autor	Rovnice	Podmínky
	Korelace vyvinuté speciálně pro proudění mezi 2 deskami		
1	Kays and Crawford [82]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}0158 \cdot \mathrm{Re_D^{0,8}}$	$\mathrm{Re_D} > 3000$
2	Tan a Charters [83]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}018 \cdot \mathrm{Re_D^{0,8}} \cdot \mathrm{Pr^{0,4}}$	$9500 < \mathrm{Re_D} < 22000$
	Korelace vyvinuté pro proudění v kruhovém potrubí		
3	Nusselt [84]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}023 \cdot \mathrm{Re_D^{4/5}} \cdot \mathrm{Pr^{1/3}}$	$2 \cdot 10^4 < \mathrm{Re_D} < 10^6$
4	Sieder a Tate [70]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}027 \cdot \mathrm{Re_D^{0,8}} \cdot \mathrm{Pr^{1/3}} \cdot \left(\mu/\mu_w\right)^{0,14}$	$\mathrm{Re_D} > 10^6$
5	Dittus-Boelter [72]	$\mathrm{Nu_D} = 0{,}0243 \cdot \mathrm{Re_D^{4/5}}$ · pro ohřev $\mathrm{Nu_D} = 0{,}0265 \cdot \mathrm{Re_D^{4/5}}$. pro chlazení	$\mathrm{Re_D} > 10^6$
6	Petukhov-Kirillov-Popov [73]	$\mathrm{Nu_D} = \frac{(f/8) \cdot \mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr}}{1{,}07 + 12{,}7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}$ $f = \left(1{,}82 \cdot \log_{10} \mathrm{Re_D} - 1{,}64\right)^{-2}$	$3000 < \mathrm{Re_D} < 5 \cdot 10^6$
7	Gnielinski [74]	$\mathrm{Nu_D} = \frac{(f/8) \cdot (\mathrm{Re_D} - 1000) \cdot \mathrm{Pr}}{1 + 12{,}7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot \left(\mathrm{Pr}^{2/3} - 1\right)}$ $f = \left(0{,}79 \cdot \ln \mathrm{Re_D} - 1{,}64\right)^{-2}$	$3000 < \mathrm{Re_D} < 5 \cdot 10^6$
f – koeficient tření podle Moodyho diagramu pro hladké trubky			

V přechodné oblasti (2300 < Re < 10000) se používá korelace od Hausena [69]:

$$\mathrm{Nu_D} = 0{,}116 \cdot \left(\mathrm{Re_D^{2/3}} - 125\right) \cdot \mathrm{Pr}^{1/3} \cdot \left[1 + \left(D_\mathrm{h}/L\right)^{2/3}\right] \cdot \left(\mu/\mu_\mathrm{w}\right)^{0{,}14} \quad [-] \tag{4.55}$$

Při laminárním proudění (Re < 2300) se použití korelace pro kruhové potrubí nedoporučuje z důvodu nízké přesnosti. V takovém případě se používá empirická korelace stanovená pro laminární proudění mezi dvěma deskami:

$$\mathrm{Nu_D} = 5{,}4 + \frac{0{,}0019 \cdot \left[\mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr} \cdot \left(D_\mathrm{h}/L\right)\right]^{1{,}71}}{1 + 0{,}00563 \cdot \left[\mathrm{Re_D} \cdot \mathrm{Pr} \cdot \left(D_\mathrm{h}/L\right)\right]^{1{,}17}} \quad [-] \tag{4.56}$$

Je zřejmé, že součinitele přestupu tepla h_k pro horní a dolní povrchy kanálu se nerovnají. Nicméně v rámci optimalizace výpočtové metodiky je zde předpoklad přibližně stejných hodnot pro horní a dolní povrchy kanálu $h_{\mathrm{k1}} \approx h_{\mathrm{k2}}$.

4.2.1.7 Tepelná propustnost izolace

Tepelná propustnost izolace se stanovuje stejným způsobem jako v 4.1.1.8.

4.2.1.8 Sálání mezi rámem kolektoru a okolními plochami

Součinitel přestupu tepla sáláním mezi rámem kolektoru a okolními plochami se stanovuje stejným způsobem jako v 4.1.1.9.

4.2.1.9 Přirozená a nucená konvekce z vnějšího povrchu rámu do okolí

Součinitel přestupu tepla přirozenou a nucenou konvekcí se stanovuje podobným způsobem jako v 4.1.1.2.

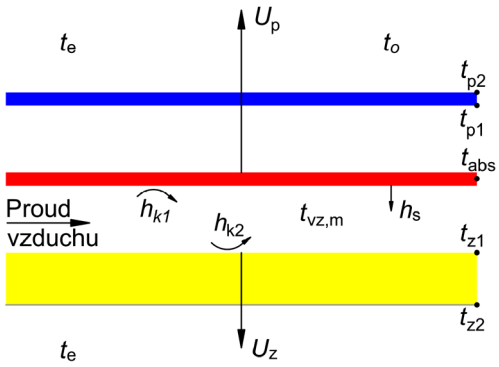
4.2.2 Vnitřní energetická bilance

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

Modelování přenosu tepla z horního a dolního povrchu kanálu do teplonosné látky je možné provést dvěma následujícími způsoby. Prvním způsobem je přímá metoda popsaná Duffie a Beckmanem [68]. Metoda spočívá v postupném stanovení celkového součinitele prostupu tepla U, účinnostního činitele F', průtokového činitele F'', přenosového součinitele F_R a využitelného tepelného výkonu $\dot{Q}_\mathrm{vz}$. Druhá metoda je založena na rovnicích tepelné bilance sestavených pro teplotně různé povrchy kolektoru a inverzní způsob řešení maticových rovnic.

4.2.2.1 Přímá metoda

Jako první je potřeba vypočítat součinitel prostupu tepla přední stranou U_p, zadní stranou U_z a celkový součinitel prostupu tepla U kolektoru (*Obr. 4.11*) [81, 85].



Obr. 4.11 *Schéma kombinovaného solárního kolektoru (Design 2)*

$$U = U_p + U_z \qquad [\mathrm{W/m^2.K}] \qquad (4.57)$$

$$F' = \frac{1}{1 + \dfrac{U}{h_{k1} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{h_{k2}} + \dfrac{1}{h_{s,abs\text{-}z2}}}}} = \frac{R}{R_0} \qquad [-] \qquad (4.58)$$

Účinnostní činitel kolektoru F' ve své podstatě vyjadřuje poměr mezi dvěma tepelnými odpory, kde ve jmenovateli je obsažen odpor proti přenosu tepla z teplonosné látky (vzduch) do okolního vzduchu, v čitateli pak odpor proti přenosu tepla z absorbéru do okolního vzduchu.

Dalším výpočtovém krokem je stanovení průtokového činitele kolektoru, který vyjadřuje poměr energie dodané solárním kolektorem k energii, která by byla dodána za předpokladu, že průměrná teplota teplonosné látky v kolektoru je rovna vstupní teplotě.

$$F'' = \frac{\dot{m}_{vz} \cdot c_{vz}}{A_{abs} \cdot U \cdot F'} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A_{abs} \cdot U}{\dot{m}_{vz} \cdot c_{vz} \cdot F'}\right)\right] \qquad [-] \qquad (4.59)$$

V další fázi je nutné stanovit tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R jako součin F' a F''.

$$F_R = F'' \cdot F' \qquad [-] \qquad (4.60)$$

Ve své podstatě tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R koriguje maximální možný tepelný výkon solárního kolektoru na okamžitý využitelný tepelný výkon (skutečně dodanou energii) podle vztahu:

$$\dot{Q}_{vz} = A_{abs} \cdot F_R \cdot \left[\tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K - U \cdot \left(t_{vz1} - t_e\right)\right] \qquad [\mathrm{W}] \qquad (4.61)$$

Vzhledem k tomu, že účinnostní činitel *F´*, průtokový činitel *F''*, tepelný přenosový součinitel kolektoru F_R a tepelný výkon kolektoru $\dot{Q}_{vz}$ byly stanoveny pro odhadnuté teploty, následuje další iterační krok.

Pro výpočet součinitelů přestupu tepla mezi hlavními plochami a součinitele prostupu tepla *U* (vnější bilance) se v dalším iteračním kroku stanoví nové hodnoty výstupní teploty vzduchu, teploty absorbéru a rozložení teplot v kolektoru:

$$t_{vz2} = t_{vz1} + \frac{\dot{Q}_{vz}}{\dot{m}_{vz} \cdot c_{vz}} \quad [°C] \tag{4.62}$$

$$t_{abs} = t_{vz1} + \frac{\dot{Q}_{vz}}{F_R \cdot U \cdot A_{abs}} \cdot \left(1 - F_R\right) \quad [°C] \tag{4.63}$$

$$t_{p1} = \frac{t_{abs} \cdot \left(h_{s,abs\text{-}p1} + h_{pk,abs\text{-}p1}\right) - U_p \cdot \left(t_{abs} - t_e\right)}{h_{s,abs\text{-}p1} + h_{pk,abs\text{-}p1}} \quad [°C] \tag{4.64}$$

$$t_{p2} = \frac{t_{p1} \cdot h_{ved,p1\text{-}p2} - U_p \cdot \left(t_{abs} - t_e\right)}{h_{ved,p1\text{-}p2}} \quad [°C] \tag{4.65}$$

$$t_{z1} = \frac{t_{vz,m} \cdot h_{k2} + t_{abs} \cdot h_{s,abs\text{-}z1} + U_z \cdot t_e}{h_{k2} + h_{s,abs\text{-}z1} + U_z} \quad [°C] \tag{4.66}$$

$$t_{z2} = \frac{t_{z1} \cdot h_{ved,z1\text{-}z2} - U_z \cdot \left(t_{z1} - t_e\right)}{h_{ved,z1\text{-}z2}} \quad [°C] \tag{4.67}$$

4.2.2.2 Inverzní metoda

Inverzní metoda výpočtu výkonu vzduchové části kombinovaného kolektoru se principiálně liší od přímé metody. Základem inverzní metody výpočtu je sada rovnic tepelné bilance získaných z vnější bilance pro jednotlivé uzly kolektoru [81, 85]:

$$t_{p2}: \; h_{s,p2\text{-}e} \cdot \left(t_{p2} - t_o\right) + h_{k,p2\text{-}e} \cdot \left(t_{p2} - t_e\right) = h_{ved,p1\text{-}p2} \cdot \left(t_{p1} - t_{p2}\right) \tag{4.68}$$

$$t_{p1}: \; h_{ved,p1\text{-}p2} \cdot \left(t_{p1} - t_{p2}\right) = h_{s,abs\text{-}p1} \cdot \left(t_{abs} - t_{p1}\right) + h_{pk,abs\text{-}p1} \cdot \left(t_{abs} - t_{p1}\right) \tag{4.69}$$

$$t_{abs}: \tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K = \left(h_{s,abs\text{-}p1} + h_{pk,abs\text{-}p1}\right) \cdot \left(t_{abs} - t_{p1}\right) + h_{s,abs\text{-}z1} \cdot \left(t_{abs} - t_{z1}\right) + h_{k1} \cdot \left(t_{abs} - t_{vz,m}\right) \tag{4.70}$$

$$t_{vz,m}: \; h_{k1} \cdot \left(t_{abs} - t_{vz,m}\right) = h_{k2} \cdot \left(t_{vz,m} - t_{z1}\right) + \frac{2 \cdot \dot{m}_{vz} \cdot c_{vz}}{k \cdot l} \cdot \left(t_{vz,m} - t_{vz1}\right) \tag{4.71}$$

$$t_{z1}: \; h_{s,abs\text{-}z1} \cdot \left(t_{abs} - t_{z1}\right) + h_{k2} \cdot \left(t_{vz,m} - t_{z1}\right) = h_{ved,z1\text{-}z2} \cdot \left(t_{z1} - t_{z2}\right) \tag{4.72}$$

$$t_{z2}: \; h_{ved,z1\text{-}z2} \cdot \left(t_{z1} - t_{z2}\right) = h_{s,z2\text{-}e} \cdot \left(t_{z2} - t_e\right) + h_{k,z2\text{-}e} \cdot \left(t_{z2} - t_e\right) \tag{4.73}$$

kde je

$t_{vz,m}$ průměrná teplota vzduchu [°C],

k šířka vzduchového kanálu [m],

l délka vzduchového kanálu [m].

Přeskupením získáme soustavu lineárních rovnic ve tvaru matice:

$$\begin{bmatrix} h_{\text{s,p2-e}} + h_{\text{k,p2-e}} + h_{\text{ved,p1-p2}} & -h_{\text{ved,p1-p2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{\text{ved,p1-p2}} & h_{\text{ved,p1-p2}} + h_{\text{s,abs-p1}} + h_{\text{pk,abs-p1}} & -h_{\text{s,abs-p1}} - h_{\text{pk,abs-p1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -h_{\text{s,abs-p1}} - h_{\text{pk,abs-p1}} & h_{\text{s,abs-p1}} + h_{\text{pk,abs-p1}} + h_{\text{s,abs-z1}} + h_{\text{k1}} & -h_{\text{k1}} & -h_{\text{s,abs-z1}} & -h_{\text{k1}} - h_{\text{k2}} - \dfrac{2 \cdot \dot{m}_{\text{vz}} \cdot c_{\text{vz}}}{k \cdot l} \\ 0 & 0 & h_{\text{k1}} & h_{\text{s,abs-z1}} & h_{\text{k2}} & -h_{\text{s,abs-z1}} - h_{\text{c2}} - h_{\text{ved,z1-z2}} \\ 0 & 0 & h_{\text{s,abs-z1}} & h_{\text{k2}} & h_{\text{ved,z1-z2}} & h_{\text{ved,z1-z2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{\text{ved,z1-z2}} & h_{s,z2-e} + h_{k,z2-e} + h_{\text{ved,z1-z2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{\text{p2}} \\ t_{\text{p1}} \\ t_{\text{abs}} \\ t_{\text{vz}} \\ t_{\text{z1}} \\ t_{\text{z2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{\text{s,p2-e}} \cdot t_{\text{o}} + h_{\text{k,p2-e}} \cdot t_{\text{e}} \\ 0 \\ \tau \cdot \alpha \cdot G \cdot K \\ \dfrac{2 \cdot \dot{m}_{\text{vz}} \cdot c_{\text{vz}}}{k \cdot l} \cdot t_{\text{vz1}} \\ 0 \\ h_{\text{s,z2-e}} \cdot t_{\text{e}} + h_{\text{k,z2-e}} \cdot t_{\text{e}} \end{bmatrix} \tag{4.74}$$

Výše uvedené matice mohou být obecně zobrazeny jako

$$[A] \cdot [T] = [B] \tag{4.75}$$

Potom lze stanovit rozložení teplot v kolektoru na základě rovnice:

$$[T] = [A]^{-1} \cdot [B] \tag{4.76}$$

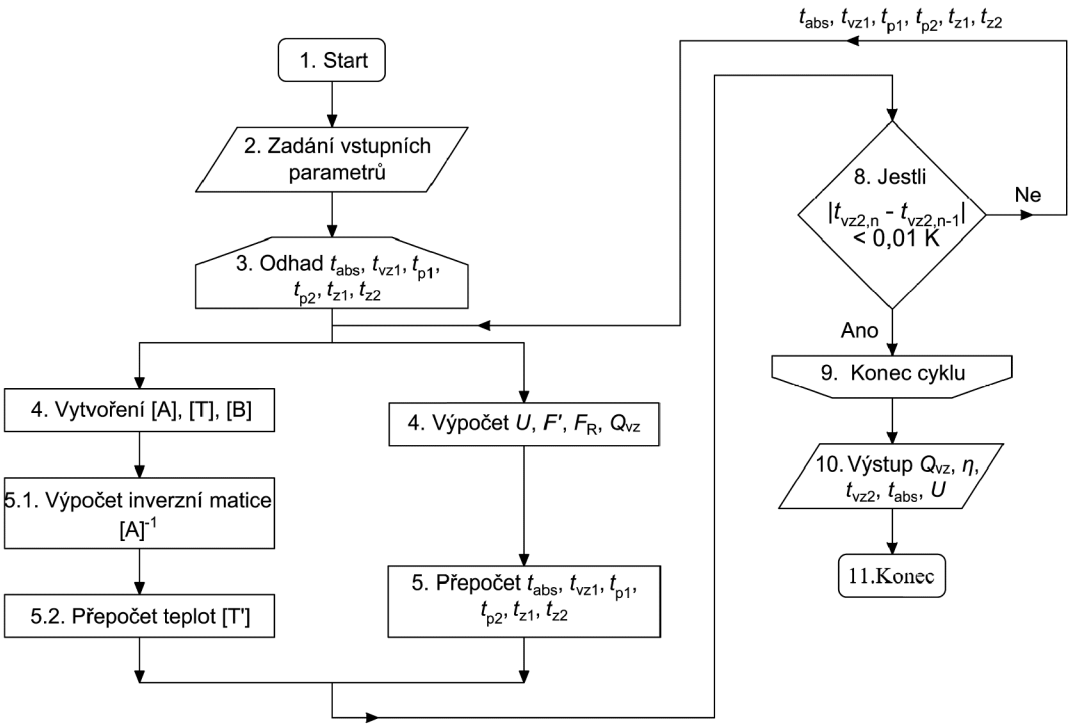
Dalším krokem je stanovení teploty vzduchu na výstupu z kolektoru a výkonu kolektoru

$$t_{\text{vz2}} = 2 \cdot t_{\text{vz,m}} - t_{\text{vz1}} \qquad [°\text{C}] \tag{4.77}$$

$$\dot{Q}_{\text{vz}} = \dot{m}_{\text{vz}} \cdot c_{\text{vz}} \cdot \left(t_{\text{vz2}} - t_{\text{vz1}}\right) \qquad [\text{W}] \tag{4.78}$$

4.2.2.3 Iterační proces

Vzhledem k tomu, že tepelný výkon kolektoru $\dot{Q}_{\text{vz}}$ byl stanoven pro odhadnuté teploty, tak by měl následovat další iterační krok. Ustáleného stavu modelu se dosahuje po několika iteracích. Iterační výpočet trvá až do té doby, dokud rozdíl mezi vypočtenou teplotou vzduchu na výstupu z kolektoru t_{vz2} ve dvou po sobě jdoucích krocích je větší, než 0,01 K. Schéma iteračního cyklu je uvedeno na *Obr. 4.12*.



Obr. 4.12 *Schéma iteračního cyklu*

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

Simulačním prostředí TRNSYS (Transient System Simulation Program) je simulační nástroj umožňující sledovat dynamické chování jednotlivých zařízení různých energetických systémů (příprava teplé vody, vytápění, ohřev vzduchu, alternativní zdroje energie). Jednotlivá zařízení energetických systémů (kapalinový solární kolektor, vzduchový solární kolektor, tepelné čerpadlo atd.) jsou popsána pomocí matematických modelů (komponent, Typu). Každý model má vstupní parametry (klimatické, provozní a výkonové), vlastní parametry zařízení (rozměry, výkon, optické vlastnosti atd.), volitelné parametry (způsob výpočtu) a výstupní parametry (výkonové a provozní). Energetický systém se potom vytváří propojením těchto matematických modelů (komponent, Typu) – propojením vstupů a výstupů jednotlivých modelů. Energetické systémy lze potom napojit na model budovy a sledovat dynamické chování jak energetického systému, tak i energetické chování budovy. Kromě toho, simulační prostředí obsahuje i komponentu meteorologických dat, která umožňuje načítat hodinové průměrné hodnoty z databáze Meteonorm a přepočítávat tyto hodnoty pro definovaný krok výpočtu (hodinový krok, minutový krok atd.).

Jednou z hlavních výhod simulačního prostředí TRNSYS je možnost vytváření nových modelů zařízení (komponent), které v knihovnách chybí. Tudíž, na základě vyvinutého matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru byl nově

vytvořen software (komponenta) Type 207 ([81, 85, 86]) v simulačním prostředí TRNSYS, za účelem provedení celoroční simulace kombinovaného kolektoru zapojeného do solární soustavy.

Vstupními parametry Type 207 jsou:

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

Vlastními parametry Type 207 jsou:

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

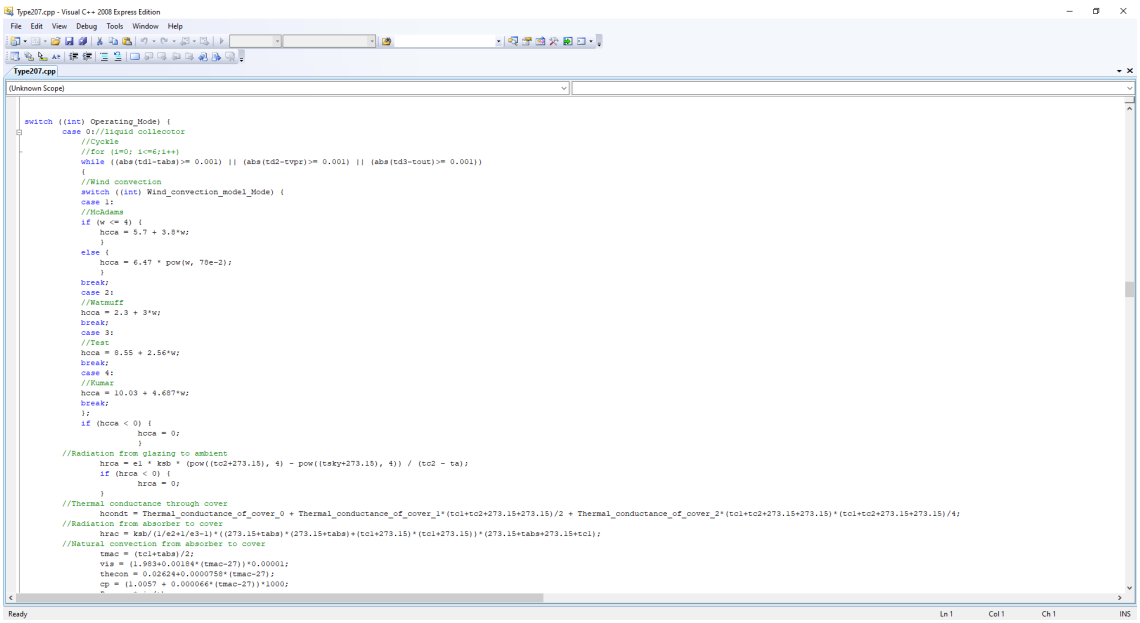
Volitelnými parametry Type 207 jsou:

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

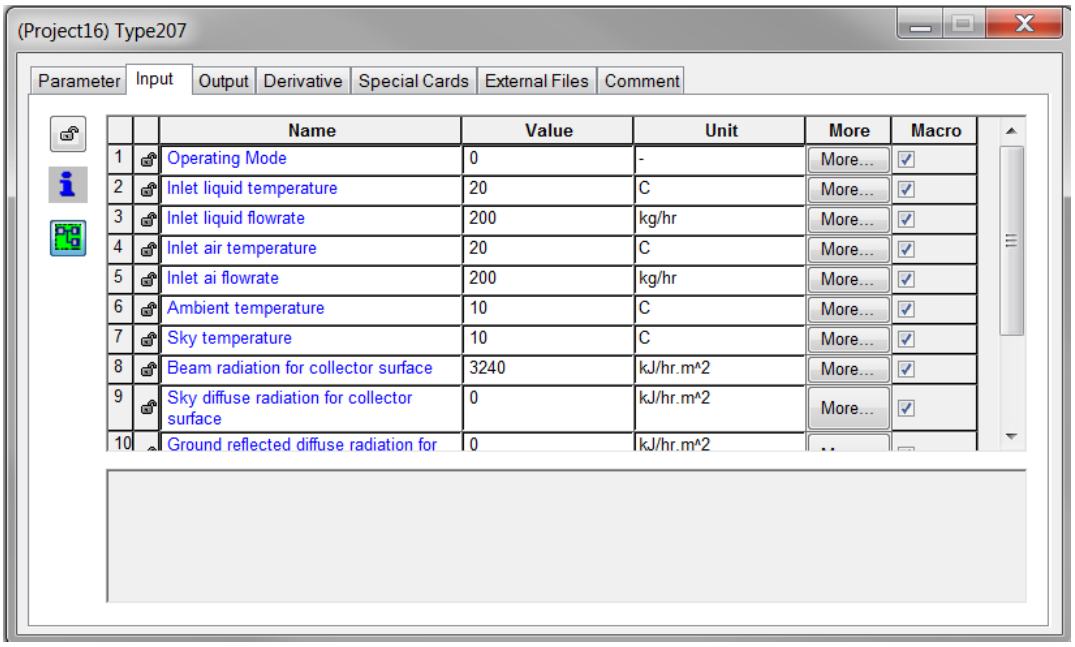
Výstupními parametry Type 207 jsou:

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

Část zdrojového kódu vyvinutého softwaru (komponenty) Type 207 a dialogové okno pro zadaní vstupních parametrů jsou znázorněné na následujících obrázcích (*Obr. 4.13* a *Obr. 4.14*).



Obr. 4.13 *Část zdrojového kódu vyvinutého softwaru Type 207*



Obr. 4.14 *Dialogové okno pro zadaní vstupních parametrů Type 207*

Kromě toho do simulačního prostředí TRNSYS byly implementovány dílčí modely kombinovaného kolektoru vyvinuté v rámci disertační práce, a to model kapalinového kolektoru (software Type 205 [50, 51]) a model vzduchového solárního kolektoru (software Type 206 [52, 53]).

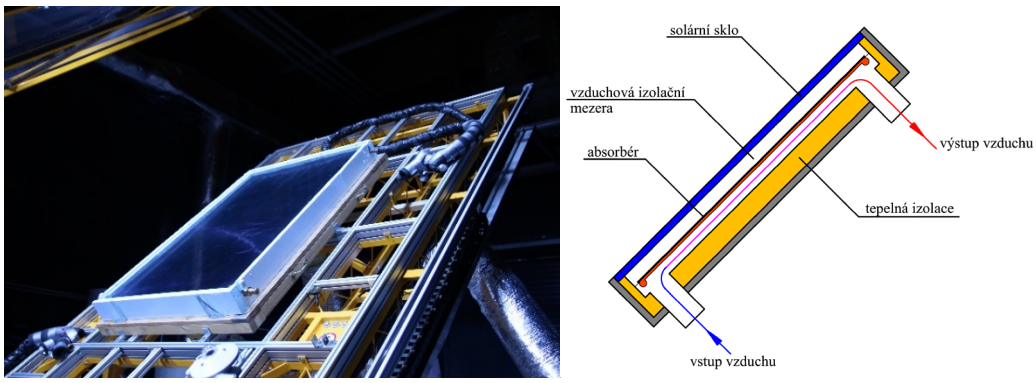
5 VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ

5.1 Experimentální ověření matematického modelu kombinovaného solárního kolektoru

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

Vzhledem k absenci kombinovaných solárních kolektorů na tuzemském a zahraničním trhu byl pro účely validace vytvořen funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru [87]. Kormě toho funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru umožňuje měnit konstrukční parametry solárního kolektoru: tloušťka tepelné izolace (10 až 50 mm), různé zasklení, tloušťka vzduchové mezery mezi zasklením a absorbérem (10 až 30 mm), změna typu a parametrů absorbéru.

Funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru se skládá ze solárního skla, měděného absorbéru slunečního záření s nízkoemisivním povlakem, boční a zadní tepelné izolace a vzduchového kanálu vytvořeného mezi absorbérem a zadní izolace (*Obr. 5.1*). Detailní parametry kombinovaného kolektoru jsou uvedeny v *Tab. 5.1*.



Obr. 5.1 *Funkční vzorek kombinovaného kolektoru*

Tab. 5.1 *Parametry kombinovaného solárního kolektoru*

Parametr	Hodnota
Rozměry (šířka x výška x hloubka)	1 x 1,6 x 0,087 m
Plocha (apertura/absorbér)	1,52 m^2 / 1,49 m^2
Kryt	solární sklo 4 mm
Absorbér	měď 0,4 mm
Připojovací potrubí	Cu 22 x 1 mm
Počet trubek	22
Rozteč mezi trubkami	50 mm

Tab. 5.1 *Pokračovaní*

Povrch absorbéru (pohltivost/emisivita)	0,95 / 0,05
Tloušťka vzduchové izolační mezery	30 mm
Tloušťka vzduchového kanálu	20 mm
Způsob proudění vzduchu	absorbér s dolním obtékáním

Kapalinová i vzduchová část kolektoru byla testována za ustálených podmínek v souladu s ČSN EN ISO 9806 [77]. Kombinovaný kolektor byl testován v Solární laboratoři SOLAB[2] v UCEEB ČVUT.

5.2 Experimentální ověření kapalinové části kombinovaného kolektoru

5.2.1 Vyhodnocování účinnosti kapalinové části kombinovaného solárního kolektoru

Účinnost solárního kolektoru η za ustálených podmínek, je definována jako poměr vlastního získaného užitečného výkonu k toku sluneční energie dopadající na kolektor. Vlastní získaný užitečný výkon $\dot{Q}_k$ je dán vztahem

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_k \cdot c_k \cdot \left(t_{k2} - t_{k1}\right) \qquad [W] \qquad (5.1)$$

kde je

$\dot{m}_k$ hmotnostní průtok kapaliny solárním kolektorem [kg/s],

c_k měrná tepelná kapacita proudící kapaliny [J/kg.K],

t_{k2} teplota kapaliny na výstupu z kolektoru [°C],

t_{k1} teplota kapaliny na vstupu do kolektoru [°C].

Tok sluneční energie dopadající na vztažnou plochu kolektoru je dán součinem

$$\dot{Q}_s = A_c \cdot G \qquad [W] \qquad (5.2)$$

kde je

A_c plocha kolektoru zvolená jako referenční plocha pro stanovení účinnosti (hrubá plocha) [m^2],

G sluneční ozáření [W/m^2].

Účinnost solárního kolektoru je potom

$$\eta_{exp} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_s} = \frac{\dot{m}_k \cdot c_k \cdot \left(t_{k2} - t_{k1}\right)}{A_c \cdot G} \qquad [-] \qquad (5.3)$$

Stanovení teplotně závislých parametrů teplonosné látky (hustota, měrná tepelná kapacita) pro výpočet účinnosti je prováděno pro střední teplotu teplonosné látky v kolektoru

$$t_{k,m} = \frac{t_{k2} + t_{k1}}{2} \qquad [°C] \qquad (5.4)$$

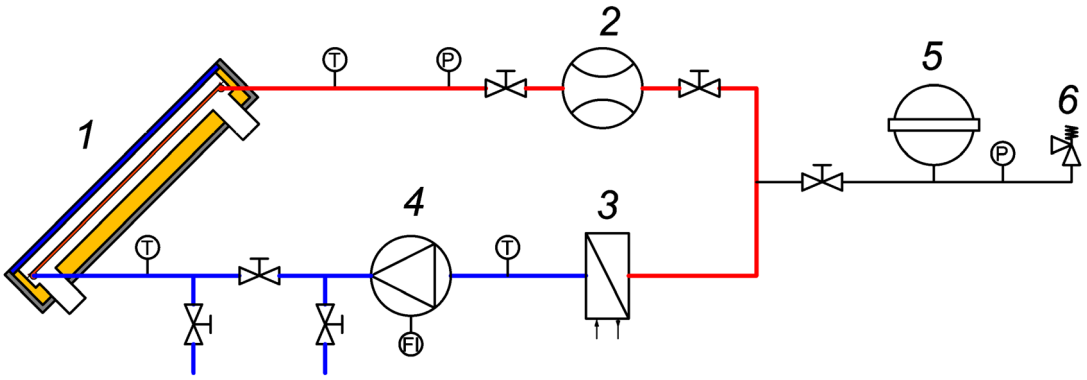
Experimentálně stanovená účinnost solárního kolektoru η je zpravidla uváděna ve vztahu k okrajovým podmínkám, vyjádřeným středním redukovaným teplotním rozdílem, stanoveným pro střední teplotu teplonosné látky

$$t^*_{k,m} = \frac{t_{k,m} - t_e}{G} \qquad [m^2.K/W] \qquad (5.5)$$

5.2.2 Zkušební trať

Kapalinová část kolektoru byla experimentálně zkoumána za ustálených podmínek s využitím simulátoru slunečního záření v akreditované Solární laboratoři SOLAB[2] v UCEEB ČVUT.

Schéma zkušební tratě je uvedeno na *Obr. 5.2*. Zkušební okruh je složen ze zkoušeného solárního kolektoru (1), hmotnostního průtokoměru (2), lázňového cirkulačního termostatu pro regulaci teploty teplonosné látky (3), oběhového čerpadla s frekvenčním měničem (4) a zabezpečovacích prvků (expanzní nádoba - 5 , pojistný ventil - 6). Jako teplonosná látka v okruhu byla použita voda. Odvzdušnění zkušebního okruhu se provádí proplachováním. Potrubní rozvod zkušebního okruhu je opatřen tepelnou izolací.



***Obr. 5.2** – Schéma zkušební tratě*

5.2.3 Měřicí přístroje

Pro stanovení účinnosti solárního kolektoru je nutné měřit hmotnostní průtok teplonosné látky $\dot{m}_k$, teploty na vstupu t_{k1} a výstupu kolektoru t_{k2} a celkové sluneční ozáření kolektoru G. Pro vyjádření okrajových podmínek zkoušky je nezbytné také měřit teplotu okolního vzduchu t_e a rychlost proudění vzduchu w v rovině kolektoru.

5.2.3.1 Měření hmotnostního průtoku

Hmotnostní průtok kolektorem $\dot{m}_k$ byl měřen Coriolisovým průtokoměrem Krohne Optimass 7000 T10 s digitálním výstupem. Průtokoměr se vyznačuje vysokou přesností v širokém rozsahu průtoků (0,0035 %).

5.2.3.2 Měření teplot

Pro měření teploty na vstupu t_{k1} a výstupu t_{k2} kolektoru byla použita odporová teplotní čidla Pt100 (TMG) v třídě přesnosti A se čtyřvodičovým zapojením. Čidla byla upevněna v jímkách umístěných v ohybech vstupního a výstupního potrubí kolektoru pro zajištění dobrého styku s proudící teplonosnou látkou. Teplota okolního vzduchu t_e byla měřena odporovým teplotním čidlem Pt100 (TMG) v třídě přesnosti A se čtyřvodičovým zapojením. Čidlo bylo umístěno ve stínícím krytu s odrazivým povrchem pro omezení vlivu slunečního ozáření na měřenou teplotu čidla.

5.2.3.3 Měření slunečního ozáření kolektoru

U slunečního ozáření *G* byla měřena jeho celková hodnota, tzn. součet přímé a difúzní složky záření. Pro účely měření byl použit pyranometr 1. třídy, typ SMP 11-A (Kipp&Zonen). Diskrétní měření slunečního ozáření *G* v bodech rastru ozářené testovací plochy se provádělo v rámci zkoušky homogenity a byla vyhodnocována průměrná hodnota slunečního ozáření pro celý kolektor.

5.2.3.4 Ostatní měřené veličiny

Pro jasnou definici okrajových podmínek, za nichž bylo experimentální stanovení účinnosti solárních kolektorů prováděno, bylo nutné určovat i rychlost proudění okolního vzduchu *w*. Pro účely měření byl použit termický anemometr D12-65V s integrovaným drátkem, který je vystaven zchlazujícímu účinku větru. Diskrétní měření rychlosti větru *w* se provádělo v rámci zkoušky homogenity a byla vyhodnocována průměrná hodnota rychlosti větru pro celý kolektor. Plocha solárního kolektoru byla stanovena kalibrovaným svinovacím metrem s rozlišením 1 mm.

Seznam všech snímaných veličin, použitých čidel a jejich přesnost je uveden v *Tab. 5.2*.

Tab. 5.2 Seznam čidel použitých při vyhodnocování účinnosti solárních kolektorů

Měřená veličina	Použitý snímač	Přesnost
Teplota kapaliny na vstupu do kolektoru	odporové čidlo Pt100, třída A (TMG)	0,05 K
Teplota kapaliny na výstupu z kolektoru	odporové čidlo Pt100, třída A (TMG)	0,05 K
Průtok kapaliny kolektorem	Coriolisův průtokoměr Optimass 7000 T10 (Krone)	0,0035 %
Celkové sluneční ozáření	pyranometr 1. třídy, typ SMP 11-A (Kipp&Zonen)	1,4 %
Teplota okolního vzduchu (stíněná)	stíněné odporové čidlo Pt100 (TMG), třída A	0,05 K
Rychlost větru v okolí kolektoru	anemometr D12-65V	0,3 m/s

5.2.4 Postup měření

Kombinovaný kolektory byl umístěn na zkušebním stolu se sklonem 45°od horizontální roviny (*Obr. 5.1*) a vystaven účinkům slunečního záření. Větrací otvory při vyhodnocování účinností kapalinové částí kolektoru byly uzavřeny. Před samotnou zkouškou účinností solárního kolektoru byla provedena zkouška homogenity a byla vyhodnocena průměrná hodnota slunečního ozáření pro celý kolektor. Společně se zkouškou homogenity bylo provedeno měření a vyhodnocení průměrné hodnoty rychlosti větru v rovině paralelní s rovinou kolektoru. Po splnění podmínek homogenity (max. ±15 %) a dosažení průměrné hodnoty rychlosti větru v rovině paralelní s rovinou kolektoru 3 m/s ± 1 m/s bylo možné přistoupit ke zkoušce tepelného výkonu solárního kolektoru (účinností).

Zkoušení bylo provedeno pro 5 různých teplot kapaliny na vstupu do kolektoru v rozmezí 10 až 70 °C. Přičemž, nejnižší vstupní teplota kapaliny (10 °C) byla vybrána tak, aby průměrná teplota kapaliny v kolektoru $t_{k,m}$ byla v rozmezí ± 3 K od teploty okolního vzduchu t_e. Následně, bylo stanovena účinnost (s určitou přesnosti) solárního kolektoru při nulových tepelných ztrátách (optická účinnost). Nejvyšší vstupní teplota kapaliny, s ohledem na bezpečnostní důvody, byla stanovena na 70 °C (při výrobě kombinovaného kolektoru byl použit EPS a XPS polystyren).

5.2.5 Nejistota naměřených bodů účinnosti

Nejistota měření se obecně skládá z nejistoty typu A a nejistoty typu B.

Nejistoty typu A jsou stanoveny statistickou analýzou naměřených hodnot. Z *N* hodnot veličiny naměřených v dané sekvenci je stanovena průměrná hodnota měřené veličiny a je určena příslušná standardní odchylka aritmetického průměru ze souboru naměřených hodnot veličiny *x*

$$u_{A,x} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N}\left(x_j - \overline{x}\right)^2}{N \cdot (N-1)}} \tag{5.6}$$

Nejistota typu A závisí ve své podstatě na konkrétních podmínkách zkoušky. Tudíž zahrnuje kolísání měřených veličin a kolísání zkušebních podmínek během zkoušky (např. rychlost větru, podíl difúzního záření atd.).

Metoda vyhodnocování nejistot typu B je založena na jiných než statistických metodách analýzy série pozorování. Standardní nejistota typu B se určuje pomocí racionálního úsudku na základě všech dostupných informací, například pomocí údajů výrobce měřící techniky, zkušeností z předchozích sérií měření, údajů získané kalibrací a z certifikátů nebo nejistot referenčních údajů převzatých z příruček. V našem případě nejistoty typu B jsou stanoveny z udávané přesnosti čidel α_x (*Tab. 5.2*), přičemž se

používá model rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti. Nejistota typu B se poté určí podle následujícího vztahu:

$$u_{B,x} = \sqrt{\frac{\alpha_x^2}{3}} \tag{5.7}$$

Pokud je více než jeden nezávislý zdroj nejistoty typu A nebo B pro danou veličinu, je nejistota stanovena podle obecného zákona hromadění nejistot

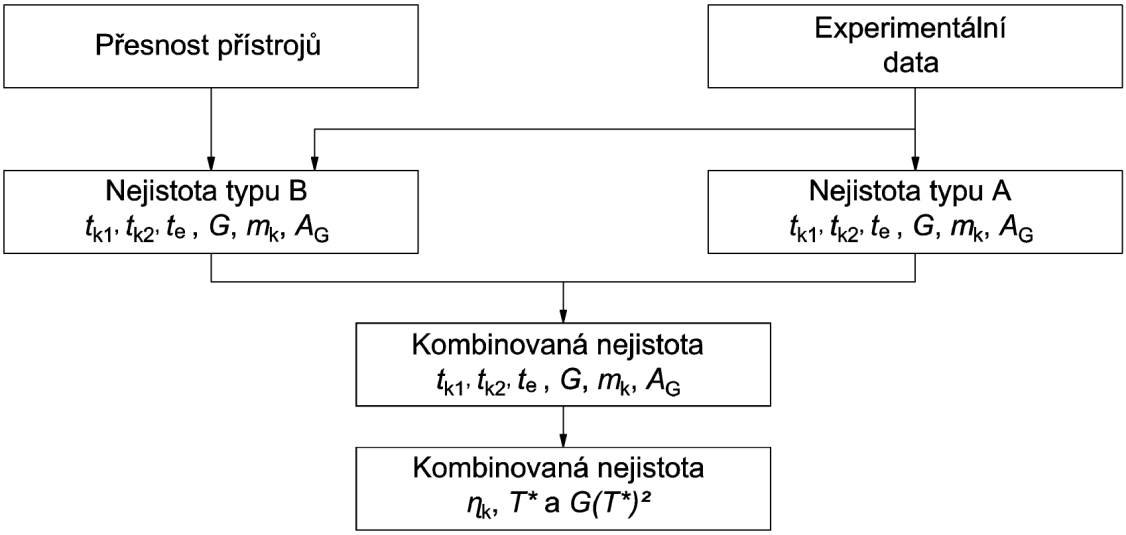
$$u = \sqrt{\sum_i u_i^2} \tag{5.8}$$

kde u_i jsou nejistoty typu A i B.

Kombinovaná nejistota experimentálního stanovení účinnosti solárního kolektoru je vypočtena z nejistot typu A a z nejistot typu B podle vztahu:

$$u = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot \left(u_{A,x}^2 + u_{B,x}^2\right)} \tag{5.9}$$

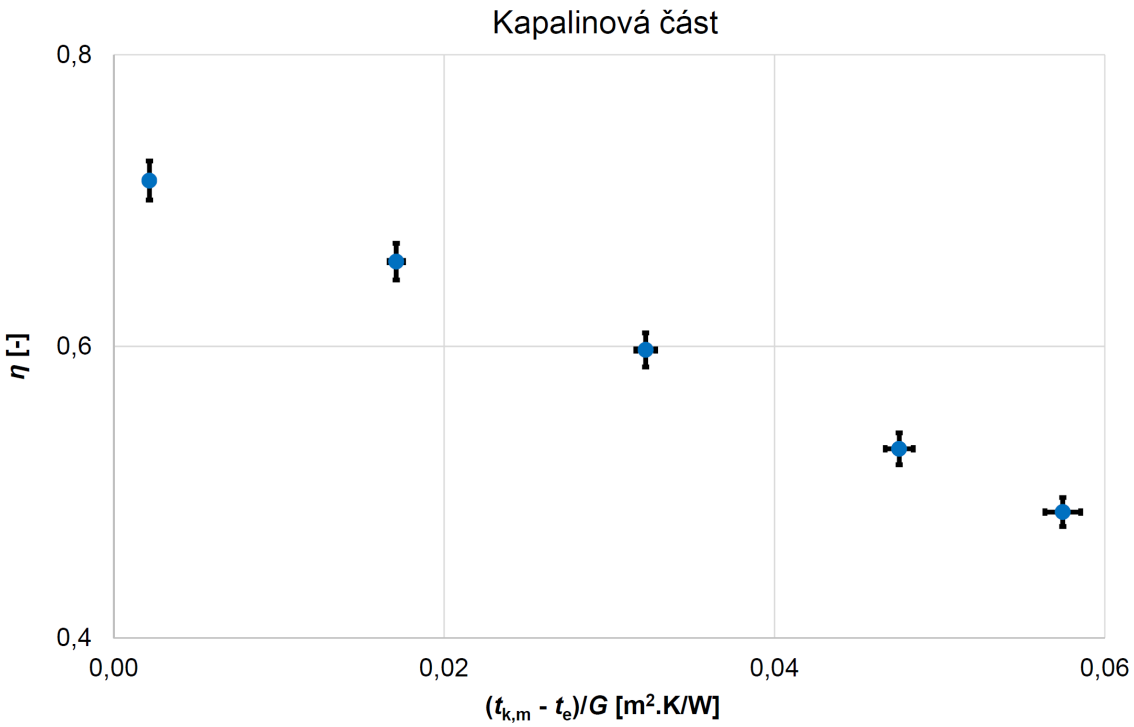
V případě stanovení účinnosti solárního kolektoru se počítá kombinovaná nejistota účinnosti η a redukovaného teplotního spadu T^* jako funkce teploty na vstupu do kolektoru t_{k1}, teploty na výstupu z kolektoru t_{k2}, rozdílu teplot Δt, teploty okolního vzduchu t_e, hmotnostního průtoku $\dot{m}_k$, slunečního ozářeni G a hrubé plochy kolektoru A_G. Výpočet se provádí podle kroků popsaných ve vývojovém diagramu na *Obr. 5.3*.



Obr. 5.3 *- Šíření nejistoty naměřených hodnot*

Obr. 5.4 ukazuje experimentálně stanovené body účinnosti solárního kolektoru společně s vypočtenou rozšířenou nejistotou pro každý pracovní bod, přičemž svislé úsečky odpovídají rozšířené nejistotě účinnosti σ_η a vodorovné odpovídají rozšířené nejistotě redukovaného teplotního rozdílu σ_{T^*}. Navzdory skutečnosti, že tyto nejistoty se týkají specifického kolektoru, výsledky jiných kolektorů jsou ve stejném rozsahu. Příčinou

je fakt, že kolektory se testují za stejných provozních podmínek popsaných v normě (odpovídá nejistotě typu A) a používají se měřicí přístroje s požadovanou přesností (nejistota typu B).



Obr. 5.4 *Stanovené body účinnosti solárního kolektoru společně s nejistotou měření*

Rovněž je nutné poznamenat, že hodnoty nejistoty uvedené na *Obr. 5.4* jsou hodnoty rozšířené nejistoty. Rozšířená nejistota se stanovuje jako

$$\sigma_i = k \cdot u_i \tag{5.10}$$

kde součinitel rozšíření k = 2 odpovídá 95 % spolehlivosti, že naměřená hodnota leží v intervalu (x - σ; x + σ). Rozšířené nejistoty jsou stanoveny pro jednotlivé body na základě naměřených hodnot. Pro stanovení nejistoty účinnostních parametrů solárního kolektoru je potřeba na základě zákonu šíření nejistoty stanovit nejistotu hodnoty $G(T^*)^2$.

5.2.6 Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti

Na základě stanovených bodů účinnosti se provádí aproximace naměřených bodů a vyhodnocují se účinnostní parametry solárního kolektoru. Základním úkolem každé aproximace je zjistit funkci s M parametry a_i odpovídající sérii naměřených hodnot N s největší přesností:

$$\eta(x)_{\exp} = y(x; a_1 ... a_M) \tag{5.11}$$

Ve výše uvedené rovnici proměnná y může být funkce buď jedné proměnné x, nebo vektoru x v případě několika proměnných:

$$\eta(T^*, G(T^*)^2)_{\exp} = \eta(T^*, G(T^*)^2; \eta_0, a_1, a_2) \tag{5.12}$$

V současné době se účinnostní parametry solárního kolektoru vyhodnocují pomocí metody nejmenších čtverců. Základní metodika je vždy stejná - vybírá se účelová funkce, která vyhodnocuje rozdíl mezi reálnými daty a modelem [88]. Poté se vybírají parametry modelu tak, aby hodnota účelové funkce byla minimalizována. Přičemž odchylky modelu od experimentálně získaných dat lze zdůvodnit jak experimentální chybou, tak ale i nedostatkem modelu.

$$\sum_{i=1}^{N}\left[\eta_i - \eta(T_i^*, G(T^*)_i^2; \eta_0, a_1, a_2)\right]^2 \to \min \tag{5.13}$$

Běžně se používá aproximace naměřených hodnot účinnosti parabolou (kvadratickou funkcí, polynomem druhého řádu) s rovnicí:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot T^* - a_2 \cdot G \cdot \left(T^*\right)^2 \quad [-] \tag{5.14}$$

kde optimální parametry η_0, a_1, a_2 se stanovují řešením soustavy rovnic:

$$A^T \cdot A \cdot x = A^T \cdot b \tag{5.15}$$

kde A a b jsou matice a vektor skládající se z experimentálně stanovených hodnot $T_i^*, G(T^*)_i^2$ a z experimentálně stanovených hodnot účinnosti $\eta_{\exp}$:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & T_1^* & G(T^*)_1^2 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ . & . & . \\ 1 & T_N^* & G(T^*)_N^2 \end{vmatrix} \tag{5.16}$$

$$b = \begin{vmatrix} \eta_1 \\ . \\ . \\ . \\ \eta_N \end{vmatrix} \tag{5.17}$$

Poté se na základě maticové rovnice (5.15) stanovují nové hodnoty účinnostních parametrů solárního kolektoru η_0, a_1, a_2:

$$x = \left(A^{\mathrm{T}} \cdot A\right)^{-1} \cdot \left(A^{\mathrm{T}} \cdot b\right) \tag{5.18}$$

Metoda nejmenších čtverců uvažuje, že každý naměřený bod je spojen se stejnou a zároveň pro všechny body normálně rozdělenou chybou měření, což neodpovídá realitě. Standardní odchylka σ není téměř nikdy konstantní ale různá pro všechny body. Tento fakt sebou nese dva základní následky: žádný druh kontroly kvality aproximace nemůže být uskutečněn, a dále na základě této metody nelze provést

výpočet nejistoty účinnostních parametrů kolektoru. Kromě toho nepřímým důsledkem výše uvedeného je, že nemůže být provedeno efektivní porovnání výsledků standardizovaných zkoušek mezi různými zkušebnami. Obecně platí, že absence analýzy nejistot výsledků zkoušky vede ke snížení jejich spolehlivosti a následně ke snížení spolehlivosti modelu s použitím těchto výsledků. Avšak tyto nedostatky mohou být překonány v případě použití metody váhové regrese minima čtverců.

Metoda váhové regrese minima čtverců, která na rozdíl od předchozí metody uvažuje různou hodnotu standardní odchylky pro každý naměřený bod a také umožnuje vyhodnocovat účinnostní parametry společně s jejich nejistotami. Na základě stanovených nejistot účinnostních parametrů kolektoru lze zároveň provést kvalitativní vyhodnocení aproximace. Přičemž maximalizace pravděpodobnosti, že nalezené parametry jsou správné, se dosahuje minimalizací následující funkce:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left[\eta_i - \eta(T_i^*, G(T^*)_i^2; \eta_0, a_1, a_2)\right]^2}{u_i^2} \rightarrow \min \tag{5.19}$$

kde u_i^2 je rozptyl rozdílu $\eta_i - \eta(T_i^*, G(T^*)_i^2; \eta_0, a_1, a_2)$.

$$u_i^2 = \mathrm{var}\left(\eta_i - \eta(T_i^*, G(T^*)_i^2; \eta_0, a_1, a_2)\right) = \left(u\left(\eta_i\right)\right)^2 + \left(a_1 \cdot u\left(T_i^*\right)\right)^2 + \left(a_2 \cdot u\left(G(T^*)_i^2\right)\right)^2 \tag{5.20}$$

kde a_1 a a_2 jsou účinnostní parametry stanovené metodou nejmenších čtverců podle (5.18).

Nalezení nových koeficientů η_0, a_1, a_2 a jejich standardní nejistoty $u(\eta_0), u(a_1), u(a_2)$ pomocí minimalizace χ^2 funkcí je komplikované vzhledem k nelinearitě funkce (5.19). Alternativou komplikovaného výpočtu je numerické stanovení účinnostních parametrů a jejich nejistot [89].

Nechť K je matice skládající z experimentální stanovených hodnot $T_i^*, G(T^*)_i^2$ zvážených celkovou nejistotou u_i, přičemž pro vypočet nejistoty lze použít účinnostní parametry solárního kolektoru stanovené na základě metody nejmenších čtverců:

$$K = \begin{vmatrix} \frac{1}{u_1} & \frac{T_1^*}{u_1} & \frac{G \cdot (T^*)_1^2}{u_1} \\ . & . & . \\ . & . & . \\ . & . & . \\ \frac{1}{u_N} & \frac{T_N^*}{u_N} & \frac{G \cdot (T^*)_N^2}{u_N} \end{vmatrix} \tag{5.21}$$

Nechť se vektor L skládají z experimentálně stanovených hodnot účinností zvážených celkovou nejistotou u_i:

$$L = \begin{vmatrix} \frac{\eta_1}{u_1} \\ . \\ . \\ . \\ \frac{\eta_N}{u_N} \end{vmatrix} \tag{5.22}$$

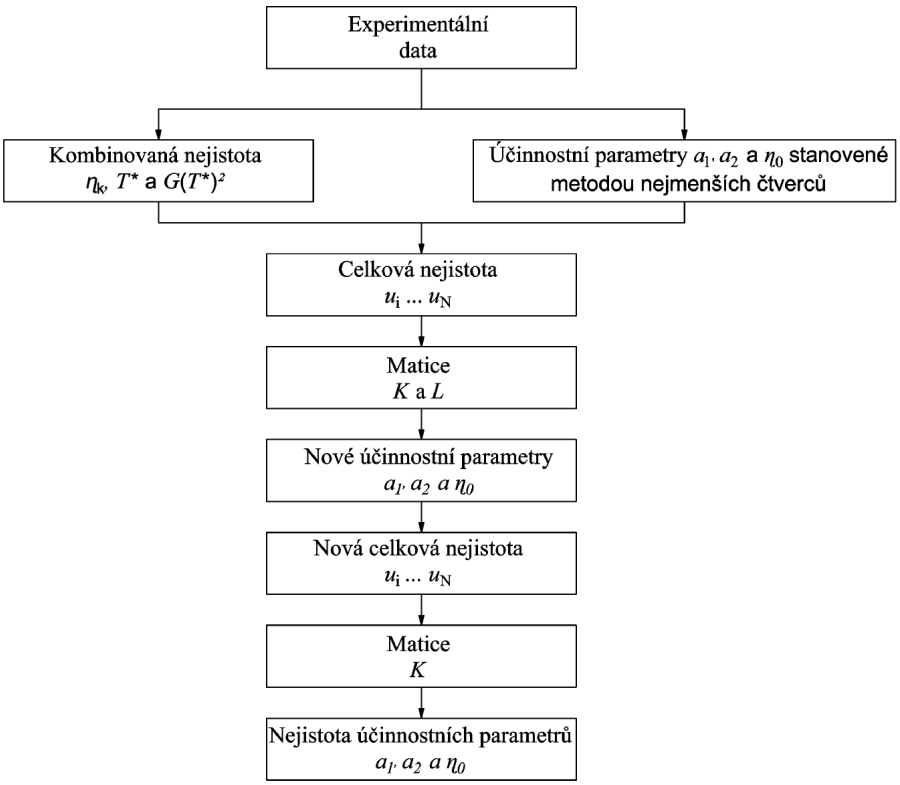
Dále se na základě maticové rovnice stanovují nové hodnoty účinnostních parametrů solárního kolektoru η_0, a_1, a_2, které se však nemají výrazně lišit od hodnot vypočítaných metodou nejmenších čtverců.

$$x = \left(K^{\mathrm{T}} \cdot K\right)^{-1} \cdot \left(K^{\mathrm{T}} \cdot L\right) \tag{5.23}$$

Poté se přepočítává nejistota u_i s použitím nových hodnot účinnostních parametrů a následně se přepočítává matice *K*. Potom pomocí upravené matice *K* lze vypočítat nejistoty účinnostních parametrů, které se nachází na hlavní diagonále matice *Z*:

$$Z = \left(K^{\mathrm{T}} \cdot K\right)^{-1} \tag{5.24}$$

Výpočet se provádí podle kroků popsaných ve vývojovém diagramu na *Obr. 5.5*.



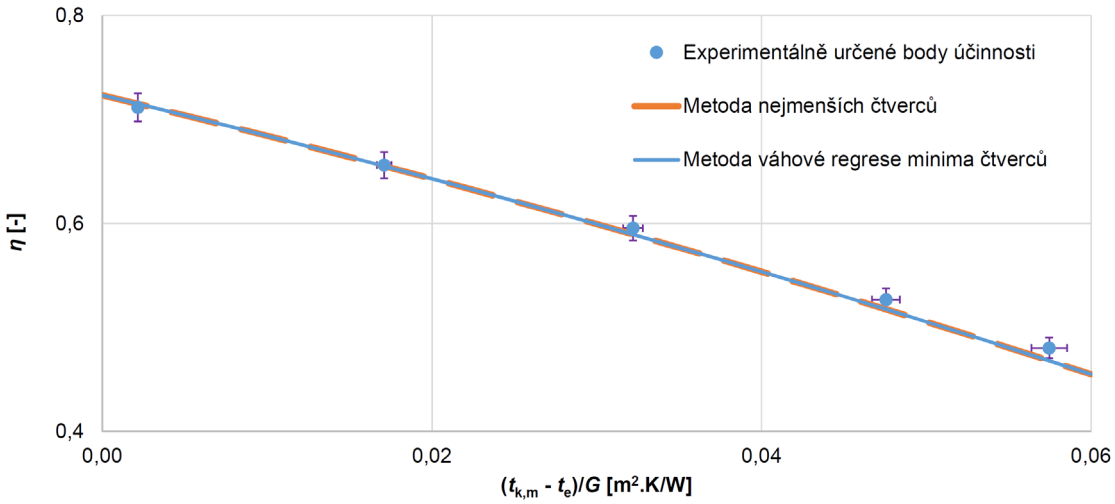
Obr. 5.5 *Výpočet nejistoty účinnostních parametrů metodou váhové regrese minima čtverců*

Obě výše popsané metody byly použity pro stanovení účinnostních parametrů kapalinové části kombinovaného kolektoru. Metoda váhové regrese minima čtverců byla zároveň použita pro stanovení nejistoty účinnostních parametrů. Výsledky výpočtu jsou uvedeny v *Tab. 5.3*.

Tab. 5.3 Porovnání účinnostních parametrů kapalinové části kombinovaného kolektoru a stanovená nejistota účinnostních parametrů

Parametr	**Metoda**	
	Nejmenších čtverců	Váhové regrese minima čtverců
η_0	0,7232	0,7232
a_1	3,7857	3,7844
a_2	0,0114	0,0114
$\sigma_{\eta 0}$		0,0048
σ_{a1}		0,3894
σ_{a2}		0,0070

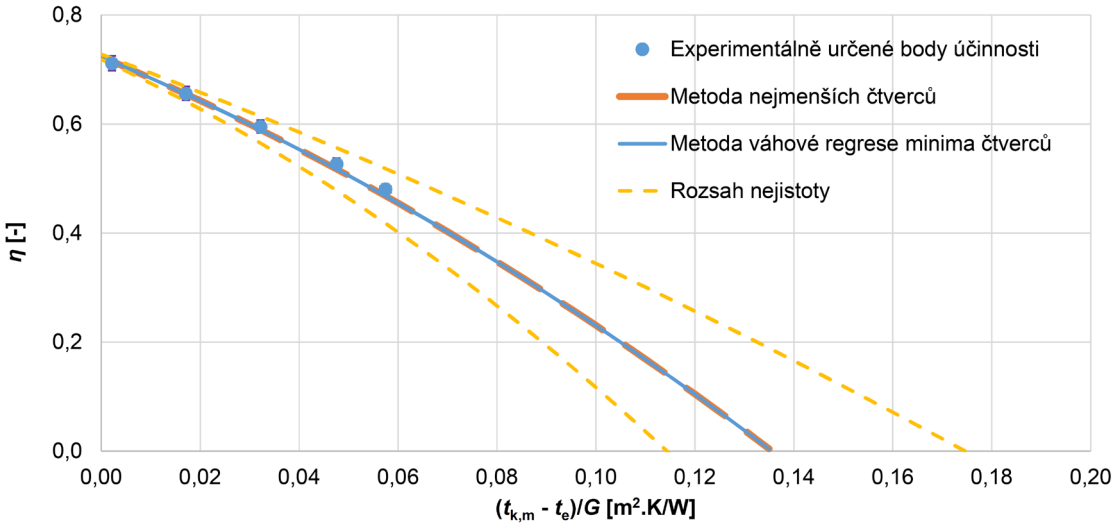
Výsledky aproximace stanovených hodnot účinnosti kapalinové části kombinovaného kolektoru parabolou (polynomem druhého řádu) jsou znázorněny na *Obr. 5.6*. Z výsledků je zřejmé, že účinnostní křivka v rozsahu naměřených hodnot popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností, a to v podstatě v rámci chyby experimentálního měření. Druhým závěrem je skutečnost, křivky účinnosti stanovené aproximací metodou nejmenších čtverců a metodu váhové regrese minima čtverců jsou téměř totožné.



Obr. 5.6 *Aproximace stanovených hodnot účinností metodou nejmenších čtverců a metodou váhové regrese minima čtverců*

Výsledky aproximace mohou být rovněž prezentovány ve tvaru křivek účinnosti v celém rozsahu provozních podmínek (*Obr. 5.7*). Zároveň na obrázku jsou znázorněné dvě omezující křivky reprezentující rozšířenou nejistotu měření (k = 2). Skutečná hodnota účinností leží s jistou pravděpodobností 96 % v určitém „tolerančním pásmu“ okolo výsledku měření - rozsah tohoto pásma charakterizuje nejistota měření. Z grafu je

zřejmé, že v oblasti testování solárního kolektoru má rozsah nejistoty nepatrný vliv na účinnost solárního kolektoru. Na druhou stranu v oblasti vysokých hodnot středního redukovaného teplotního rozdílu má rozsah nejistoty značný vliv na účinnost solárního kolektoru. Důvodem je malý rozsah teplot testování kombinovaného solárního kolektoru od 20 °C do 70 °C (z bezpečnostních důvodů – při výrobě kombinovaného kolektoru byl použit EPS a XPS polystyren), což odpovídá střednímu redukovanému teplotnímu rozdílu 0,002 až 0,057 m^2.K/W. Běžný plochý solární kolektor je testován ve větším rozsahu teplot 17 °C až 90 °C, což odpovídá většímu rozsahu středního redukovaného teplotního rozdílu 0,002 až 0,07 m^2.K/W. Nicméně v oblasti vysokých hodnot středního redukovaného teplotního rozdílu má rozsah nejistoty u běžného plochého solárního kolektoru značný vliv na účinnost solárního kolektoru.



Obr. 5.7 *Rozsah nejistoty křivky účinností testovaného kombinovaného kolektoru*

Z obou obrázků je patrné, že křivka účinnosti stanovená metodou váhové regrese minima čtverců se shoduje s křivkou účinnosti stanovenou metodou nejmenších čtverců. Z toho vyplývá, že použití komplikované metody váhové regrese místo jednoduché metody nejmenších čtverců není nutné. Na druhou stranu právě metoda váhové regrese umožňuje zohlednit vliv nejistoty měření na výslednou křivku účinnosti, kde lze vidět patrný vliv.

5.2.7 Validace kapalinové části modelu kombinovaného solárního kolektoru

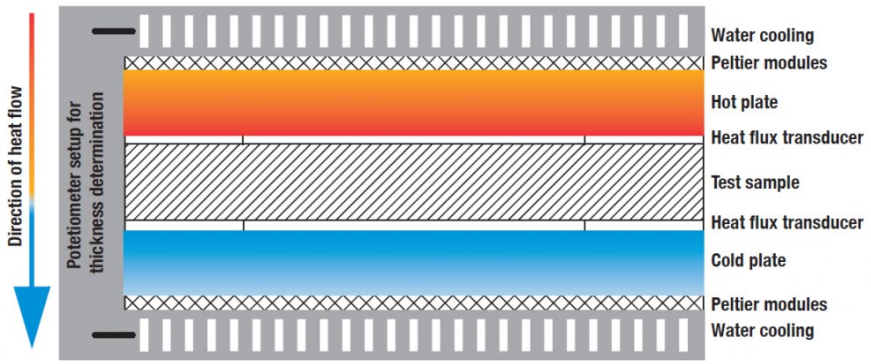
Pro další použití matematického modelu k analýzám chování solárních kolektorů je nezbytné stanovit, do jaké míry je matematický model schopen reprodukovat reálné chování kolektoru. Z výsledků předchozí práce [90] je patrné, že šířka tolerančního pásma matematického modelu je přímo závislá na nejistotě parametrů vstupujících do modelu. Nejistota parametrů vyplývá z prosté nemožnosti určit přesnou hodnotu daného parametru dílčí části kolektoru. Geometrické parametry kolektoru se stanovují s relativně

vysokou přesností (±1 %), nicméně existuje celá řada vstupních parametrů s širokým rozsahem nejistot (např. tepelná vodivost izolace, ±10 % podle podkladů výrobce, emisivita absorbéru, ±10 % podle podkladů výrobce atd.) Pro snížení nejistoty vstupujících parametrů byly experimentálně stanoveny následující dílčí parametry:

- Tepelná vodivost izolace (rámu) kolektoru
- Emisivita přední strany absorbéru
- Propustnost zasklení

Tepelná vodivost izolace (rámu) kolektoru

Měření tepelné vodivosti tepelné izolace bylo provedeno pomocí přístroje Linseis HFM 300 (UCEEB ČVUT) a v souladu s normou ISO 8301. Schematické znázornění uspořádání hlavních částí přístroje na naznačuje jeho měřicí princip. Ten spočívá ve zjišťování tepelného toku procházejícího měřeným materiálem při definovaném teplotním rozdílu na měřeném materiálu. Výsledky měření tepelné vodivosti izolace společně se stanovenou nejistotou měření jsou uvedeny v *Tab. 5.4*.



Obr. 5.8 *Schematické znázornění hlavních částí měřicího zařízení HFM Linseis 300*

Tab. 5.4 *Experimentálně stanovená tepelná vodivost izolace použité v kolektoru*

Druh tepelné izolace	Tepelná vodivost [W/m.K]
XPS – 50 mm	0,032 + 0,00007·t_m
EPS – 50 mm	0,0367 + 0,0002·t_m
EPS – 30 mm	0,0346 + 0,0002·t_m
EPS – 20 mm	0,0367 + 0,0001·t_m
Nejistota měření 3 %	

Emisivita absorbéru kolektoru

Emisivitu absorbéru lze zjistit z tabulek pro různé povrchové úpravy absorbéru nebo z deklarace dodavatele absorbéru, avšak tyto údaje mohou být značně nespolehlivé. Navíc je obecně známou skutečností, že emisivita absorbéru může být v různých částech plochy odlišná (není rovnoměrná).

Pro určení emisivity byla použita jednoduchá srovnávací metoda využívající referenčního materiálu se známou emisivitou [91]. Pro eliminaci okolních jevů bylo

měření provedeno v zatemněné chladné místnosti a pro teplotu absorbéru vyšší o 40 K než teplota okolního vzduchu. Metoda spočívá v tom, že se na absorbér nalepí speciální samolepící štítek Thermaspot se známou emisivitou ($\varepsilon_{š}$ = 0,96). Termokamerou se změří povrchová teplota samolepicího štítku T_{s1} a povrchová teplota absorbéru T_{abs1}. Dále se zvýší teplota absorbéru o cca 10 °C a opět se změří povrchová teplota samolepicího štítku T_{s2} a povrchová teplota absorbéru T_{abs2}. Emisivita se následně stanoví podle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_{b2} - T_{b1}} \qquad [-] \qquad (5.25)$$

Vyhodnocení emisivity absorbéru bylo provedeno v deseti bodech plochy absorbéru. Výsledky měření společně se stanovenou nejistotou měření jsou uvedeny v *Tab. 5.5*.

Tab. 5.5 *Výsledky měření emisivity absorbéru*

Bod	T_{s1} [°C]	T_{abs1} [°C]	T_{s2} [°C]	T_{abs2} [°C]	Emisivita [-]
1	56,4	26,1	65,2	26,7	0,068
2	54,0	25,8	62,2	26,2	0,049
3	55,5	25,9	63,2	26,5	0,078
4	54,0	25,7	62,1	26,1	0,049
5	54,3	26,0	63,0	26,5	0,057
6	54,7	26,1	62,2	26,6	0,067
7	54,5	25,7	63,1	26,4	0,081
8	54,5	25,8	62,7	26,3	0,061
9	56,1	26,0	65,0	26,5	0,056
10	56,4	26,1	65,1	26,7	0,069
Průměr					0,064
Nejistota měření 5 %					

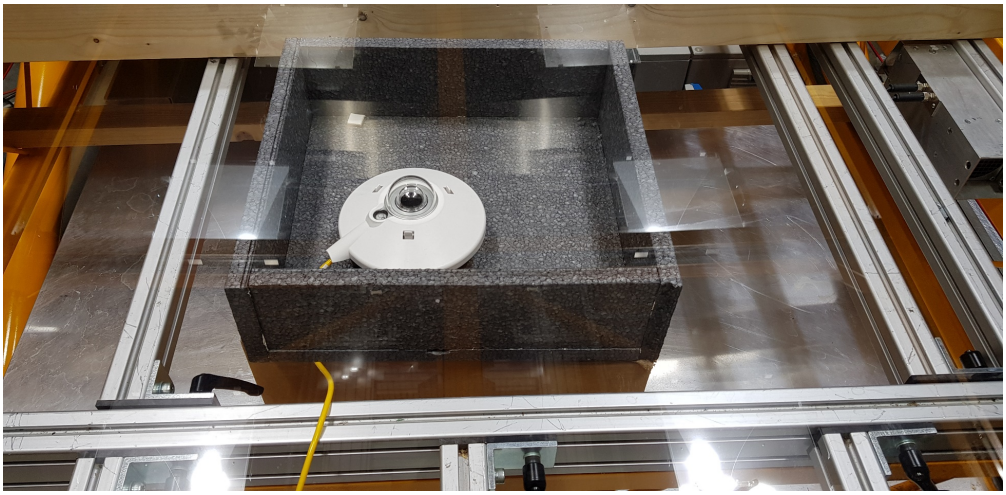
Propustnost zasklení kolektoru

Propustnost slunečního záření zasklení se v zásadě zjišťuje dvěma metodami, obecně popsanými v normě ASTM E 424-71, Standard Test Methods for Solar Energy Transmittance and Reflectance (Terrestrial) of Sheet Materials [92]. První metoda (metoda A) se používá v laboratoři a využívá spektrofotometru s integrační sférou. Je použitelná pro měření propustnosti a odrazivosti a je referenční metodou. Pro účely našeho měření byla použita metoda B uvedená v normě, která je založena na měření propustnosti pomocí pyranometru, přičemž jako zdroj energie byl použit simulátor slunečního záření. Propustnost je určována jako poměr slunečního ozáření měřeného pyranometrem zastíněným vzorkem zasklení a slunečního ozáření měřeného pyranometrem nezastíněným

$$\tau_n = \frac{G_{\text{procházející}}}{G_{\text{dopadající}}} \qquad [°C] \qquad (5.26)$$

Vzhledem k tomu, že zkoušení kolektoru se provádí při kolmém úhlu dopadu slunečního záření na rovinu kolektoru, byla stanovena pouze normálová propustnost

slunečního záření zasklení. Pro účely zjišťování propustnosti slunečního záření zasklení bylo navrženo a postaveno jednoduché měřicí zařízení (*Obr. 5.9*), principiálně založené na uvedené metodě B. Měření propustnosti bylo provedeno pro čiré sklo a pro solární sklo. Výsledky měření společně se stanovenou nejistotou měření jsou uvedeny v *Tab. 5.6*.



Obr. 5.9 *Měřicí zařízení pro měření propustnosti skel*

Tab. 5.6 *Výsledky měření propustnosti*

Sklo	$G_{\text{procházející}}$ [W/m^2]	$G_{\text{dopadající}}$ [W/m^2]	Propustnost [-]
čiré	651	761	0,855
čiré	832	973	0,855
solární	702	761	0,922
solární	907	973	0,922
Nejistota měření 1 %			

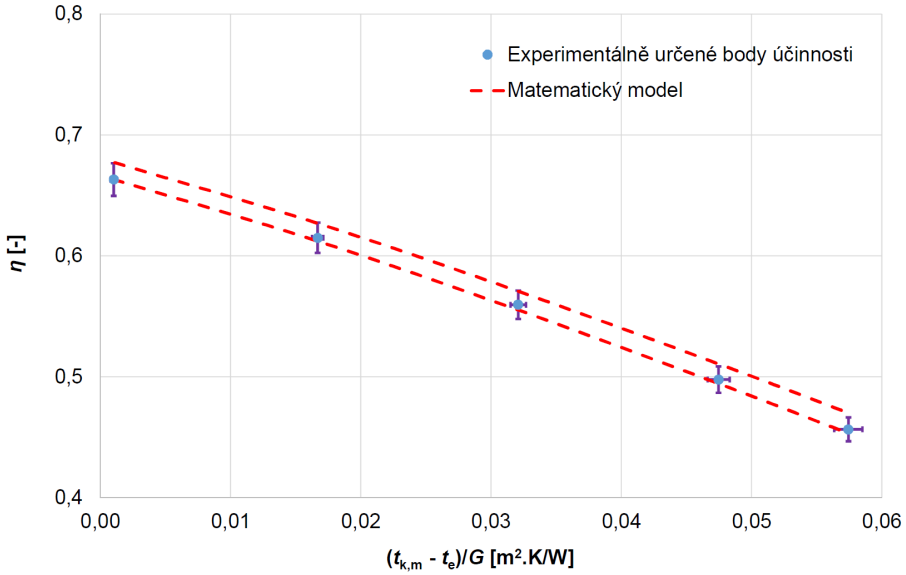
Pro validaci matematického modelu solárního kolektoru byla využita metoda konfrontace experimentálně stanovené účinnosti a účinnosti stanovené matematickým modelem. Konstrukce kolektoru umožňuje řadu konstrukčních změn: tloušťka zadní tepelné izolace, tloušťka přední vzduchové mezery, tloušťka zadní vzduchové mezery a výměnu zasklení kolektoru (*Tab. 5.7*). Díky této skutečností, byly vyzkoušeny různé konstrukce kombinovaného solárního kolektoru.

Tab. 5.7 *Měnitelné parametry kombinovaného kolektoru*

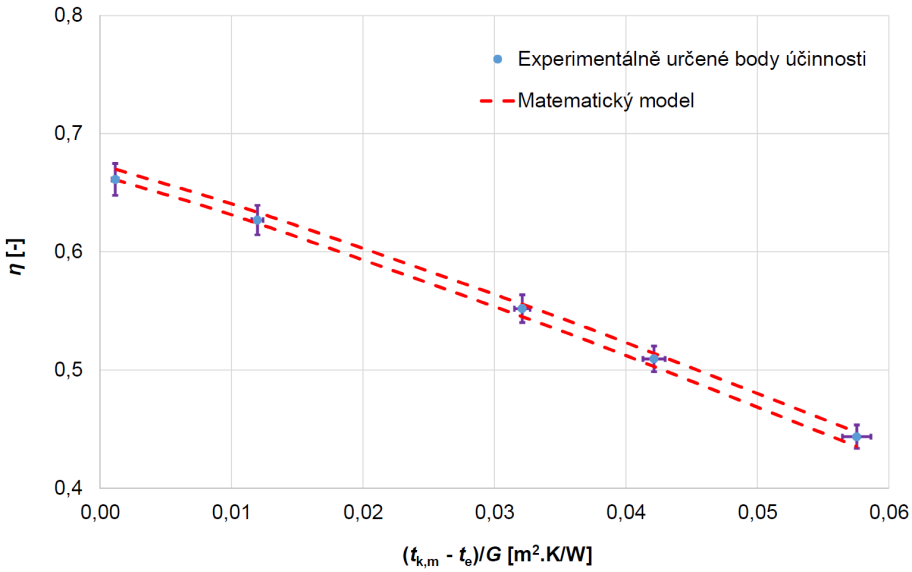
Parametr	Hodnota
Kryt	čiré (č) / solární sklo (s)
Tloušťka přední vzduchové mezery (*P*)	0 až 30 mm
Tloušťka zadní vzduchové mezery (*Z*)	22 až 72 mm
Tloušťka zadní izolace (*D*)	0 až 50 mm

Na *Obr. 5.10* až *Obr. 5.12* jsou porovnány výsledky modelování a experimentů. Tečky s chybovými úsečkami odpovídají experimentálně stanoveným bodům účinnosti solárního kolektoru a vypočtené rozšířené nejistotě měření pro každý pracovní bod.

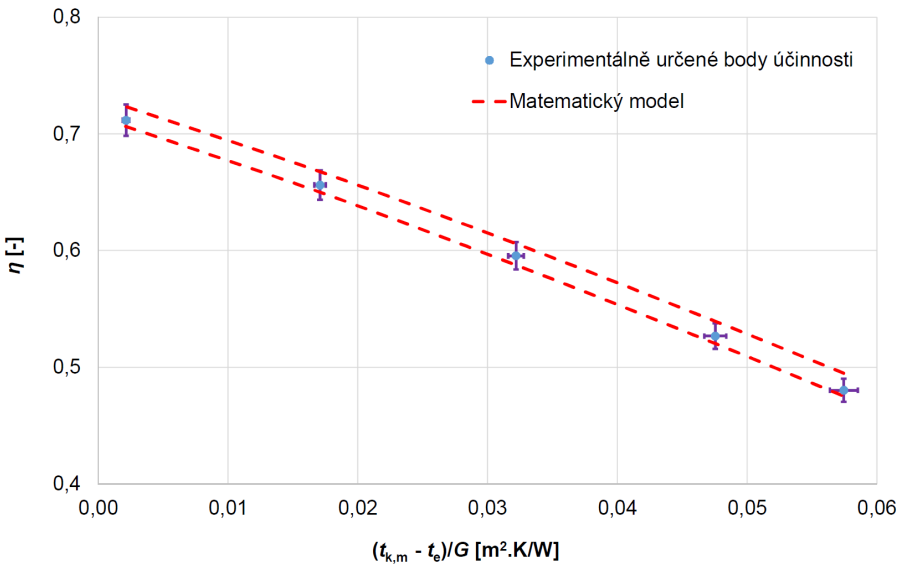
Křivka účinnosti stanovená matematickým modelem je znázorněna jako dvě limitní křivky pro mezní nejistoty uvažované u zadávaných detailních parametrů kolektorů. Z obrázků je patrné, že detailní zadání experimentálně ověřených parametrů kolektoru do matematického modelu (tepelná vodivost izolace rámu, emisivita absorbéru, propustnost zasklení) umožňuje zúžit šířku tolerančního pásma a relativně přesně stanovit charakteristiku účinnosti, případně výkonu a hodnot teplot při zadaných okrajových (provozních podmínkách). Ve všech případech se experimentálně stanovené body účinnosti nachází mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma. Model v podstatě popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností v rámci nejistoty experimentální metody [81, 85].



Obr. 5.10 *Detailní validace (čiré sklo, P = 30 mm, Z = 22 mm, D = 50 mm)*



Obr. 5.11 *Detailní validace (čiré sklo, P = 30 mm, Z = 22 mm, D = 30 mm)*



Obr. 5.12 *Detailní validace (solární sklo, P = 20 mm, Z = 32 mm, D = 50 mm)*

5.2.8 Analýza nejistoty zvoleného modelu výpočtu součinitele přestupu tepla

Jednou z možných nejistot výpočtu je volba konkrétního modelu pro výpočet součinitelů přestupu tepla v energetické bilanci kolektoru. V matematickém modelu kombinovaného solárního kolektoru lze použít řadu korelací (modelů) pro stanovení součinitelů přestupu tepla konvekcí vlivem větru ze zasklení do okolí, přirozenou konvekcí v uzavřené vzduchové vrstvě mezi absorbérem a zasklením a dále nucenou konvekcí v trubkách absorbéru. Proto byla proto provedena citlivostní analýza volby těchto modelů dostupných v literatuře [90].

Konvekce vlivem větru ze zasklení do okolí

Stanovení přestupu tepla konvekcí z vnějšího povrchu zasklení solárního kolektoru ve venkovním prostředí je velmi problematické. V odborné literatuře je možné najít nepřeberné množství vztahů odvozených z experimentů více či méně napodobujících okrajové podmínky solárního kolektoru. Do výsledné hodnoty součinitele přenosu tepla se promítá vliv rozměrů kolektoru, jeho sklonu a úhlu náběhu proudícího vzduchu, intenzity turbulence či podílu přirozené konvekce. V *Tab. 5.8* jsou porovnány výsledky modelování účinností solárního kolektoru pro různé modely konvekce vlivem větru (proudění okolného vzduchu).

Tab. 5.8 *Vliv modelu výpočtu konvekce vlivem*

Model	η_0 [-]	a_1 [W/m².K]	a_2 [W/m².K²]
McAdams [55]	0,7232 (0,0041)	3,7857 (0,3254)	0,0114 (-0,0020)
Watmuff [56]	0,7239 (0,0048)	3,6124 (0,1521)	0,0102 (-0,0032)
Test [58]	0,7233 (0,0042)	3,7735 (0,3132)	0,0113 (-0,0021)
Kumar [59]	0,7243 (0,0054)	3,9123 (0,4520)	0,0124 (-0,0010)
Experiment	0,7191	3,4603	0,0134

Na výsledcích porovnání charakteristik účinnosti si lze povšimnout, že všechny modely velmi dobře odpovídají výsledkům experimentu. Je to především z důvodu malého vlivu konvekce vlivem větru na účinnost kolektoru při rychlostech proudění vzduchu používaných při zkoušení kolektorů (> 3 m/s). Největší neshodu vykazuje Kumarův model, protože tento model byl získán z experimentů ve venkovním prostředí s vysokou turbulencí. Ostatní modely byly získány z experimentů buď v aerodynamických tunelech, nebo ve venkovním prostředí s nízkou turbulencí, což nejvíc odpovídá podmínkám zkoušení kolektoru na simulátoru slunečního záření.

Přirozená konvekce ve vzduchové mezeře

Z velkého množství publikovaných experimentů a získaných korelací pro přenos tepla uzavřené vzduchové mezeře bylo vybráno 6 modelů, které splňují podmínky pro použití v oblasti solárních kolektorů. V *Tab. 5.9* jsou uvedeny součinitele křivky účinnosti solárního kolektoru stanovené s použitím různých modelů.

Tab. 5.9 *Vliv modelu výpočtu volné konvekce v uzavřené vzduchové vrstvě mezi absorbérem a zasklením*

Model	η_0 [-]	a_1 [W/m^2.K]	a_2 [W/m^2.K^2]
Hollands [61]	0,7232 (0,0074)	3,7857 (0,1284)	0,0114 (-0,0031)
Buchberg [62]	0,7239 (0,0048)	3,6124 (0,1521)	0,0102 (-0,0032)
Randall [63]	0,7258 (0,0067)	3,2373 (-0,2230)	0,0102 (-0,0032)
Schinkell [64]	0,7267 (0,0076)	3,1435 (-0,3168)	0,0107 (-0,0027)
Niemann [65]	0,7253 (0,0062)	3,3697 (-0,0906)	0,0107 (-0,0027)
Matuška [93]	0,725 (0,0059)	3,4083 (-0,0520)	0,01063 (-0,0028)
Experiment	0,7191	3,4603	0,0134

Všechny modely vykazují rozdíly účinnostních součinitelů v rámci chyby experimentálního měření. Nejvíce odpovídají realitě modely Buchberga, Niemana a Matušky. Je to způsobeno tím, že tyto modely nemají omezení štíhlosti (poměr délky vzduchové mezery k tloušťce) kolektoru. Ostatní modely mají jak omezení štíhlosti kolektoru, tak i omezení sklonu kolektoru.

Laminární proudění teplonosné látky v trubkách absorbéru

Přenos tepla při proudění v kruhových trubkách při laminárním proudění teplonosné kapaliny je široce popsán v odborné literatuře. V *Tab. 5.10* jsou porovnány výsledky modelování účinností solárního kolektoru pro různé modely výpočtu nucené konvekce v trubkách absorbéru.

Tab. 5.10 *Vliv modelu výpočtu nucené konvekce v trubkách absorbéru*

Model	η_0 [-]	a_1 [W/m^2.K]	a_2 [W/m^2.K^2]
Shah [67]	0,7239 (0,0048)	3,6124 (0,1521)	0,0102 (-0,0032)
Hausen [69]	0,7210 (0,0019)	3,6145 (0,1542)	0,0099 (-0,0035)
Kreith-Kays [94]	0,7142 (-0,0049)	3,6323 (0,1720)	0,0096 (-0,0038)
Churchill-Ozoe [95]	0,7136 (-0,0055)	3,6348(0,1745)	0,0093 (-0,0041)
Experiment	0,7191	3,4603	0,0134

Z výsledků je patrné, že všechny modely přestupu tepla nucenou konvekcí v trubkách vykazují výsledky v charakteristice účinnosti v rámci chyby experimentálního měření. Nicméně Shahův a Haunsenův model nejlépe odpovídají výsledkům experimentu. Opět je to způsobeno podmínkami, pro které byly modely získány, tj. pro konstantní tepelný tok odpovídající situaci v solárních kolektorech.

Tudíž, citlivostní analýza prokázala relativně nízký vliv jak pro konvekci vlivem větru, přirozenou konvekci mezi absorbérem a zasklením, tak i pro nucenou konvekci v trubkách absorbéru.

5.2.9 Porovnání již existujících modelů kapalinového solárního kolektoru s nově vyvinutým modelem

Matematické modelování solárních kolektorů má velký význam pro výrobce, dodavatele, projektanty i hodnotitele solárních kolektorů a systémů. Výrobcům umožňuje detailní matematické modelování a zároveň ekonomicky optimalizovat konstrukci kolektoru pro danou oblast aplikací nebo hodnotit dopad konstrukčních změn kolektorů na roční bilance. Dodavatelům solárních kolektorů mohou výpočtové analýzy s využitím modelů poskytnout podklad pro prezentaci zisků nebo porovnat kolektory s konkurenčními dodávkami. Projektanti využívají matematické modelování ve výpočtových programech pro dokladování předpokládaných zisků (a úspor) navržených solárních systémů konečným uživatelům, případně státní správě při dokladování splnění podmínek programů podpory.

Tepelné zisky solárních systémů za dané časové období (rok), resp. úspora tepla dodávaného nahrazovaným zdrojem energie, se stanovují výpočtovými metodami nejčastěji pro zatím nerealizované instalace, nejlépe podrobnou počítačovou simulací solárního systému výpočtovými programy, např. Polysun, T*SOL, GetSolar aj. [96]. Výpočtové hodnocení má své opodstatnění ve fázi návrhu solárního systému, výsledky jsou však vždy závislé na kvalitě vstupních parametrů, tj. do jaké míry odpovídají skutečnosti, a dále na kvalitě použitých modelů. Matematické modelování má své místo i při ověřování chování již realizovaných solárních systémů, např. v případě pochybností o kvalitě již instalovaného solárního kolektoru.

Matematické modelování je vždy určitým zjednodušením skutečnosti. Příliš složitý model vyžaduje značnou potřebu strojního (počítačového) času pro výpočet, příliš jednoduchý model často nepostihuje významné vlivy různých parametrů a může vykazovat značnou nepřesnost výpočtu. Následující analýza je zaměřena na stanovení rozdílu výsledků různých modelů výpočtu tepelného výkonu solárního kolektoru při jeho provozu od modelů zjednodušených až po detailní. V analýze jsou popsány čtyři modely plochého kapalinového solárního kolektoru. Cílem je stanovit, jaký stupeň zjednodušení popisu solárního kolektoru lze použít v rámci hodnocení solárních systémů [97].

Prvním modelem je stacionární model uvažující pouze křivku účinnosti solárního kolektoru stanovenou na základě zkoušky v ustáleném stavu. Druhý model uvažuje jak

křivku účinnosti, tak i modifikátor úhlu dopadu slunečního záření. Oproti prvnímu modelu je navíc uvažována optická charakteristika. Třetím modelem je dynamický model stanovený na základě kvazi-dynamické zkoušky solárního kolektoru, kdy je navíc uvažována především tepelná kapacita kolektoru. Čtvrtým modelem je vyvinutý model kombinovaného kolektoru – kapalinový provozní režim , který v každém časovém kroku výpočtu řeší detailní přenos tepla sáláním, prouděním a vedením v různých částech kolektoru, teplotní rozložení v kolektoru apod.

- Model 1 - Stacionární model (např. Type 1a v TRNSYS)

Model využívá křivku účinnosti stanovenou na základě zkoušky za ustáleného stavu v souladu s ČSN EN 12975-2 (do roku 2014) [98] nebo ČSN EN ISO 9806 (od roku 2014) [77]. Zkouška probíhá za jasného dne (difuzní ozáření musí být menší než 30 %) pro kolmý dopad slunečního záření a pro rychlost proudění okolního vzduchu větší než 3 m/s. Kolektor je zkoušen v rozsahu provozních teplot pro minimálně 4 různé vstupní teploty. Jeden zkušební bod je vybrán tak, aby střední teplota teplonosné látky byla v blízkosti teploty okolního vzduchu pro stanovení účinnosti kolektoru bez vlivu tepelných ztrát. Na základě stanovených hodnot výkonu se vyhodnocuje křivka účinnosti kolektoru v závislosti na redukovaném teplotním spádu (rozdílu mezi střední teplotou kapaliny v kolektoru $t_{k,m}$ a teplotou okolí t_e poděleném slunečním ozářením G) ve tvaru polynomu 2. řádu:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{\left(t_{k,m} - t_e\right)}{G} - a_2 \cdot \frac{\left(t_{k,m} - t_e\right)^2}{G} \qquad [-] \qquad (5.27)$$

kde je:

η_0 účinnost kolektoru při nulovém rozdílu teplot, tzv. optická účinnost [-],

a_1 lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru [W/m^2.K],

a_2 kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru [W/m^2.K^2].

Koeficienty jsou vztaženy buď k ploše apertury A_a (ČSN EN 12975-2), nebo k hrubé ploše A_G (ČSN EN ISO 9806), a je vždy nutné je uvádět společně s uvedením vztažné plochy (index a nebo G). Tepelný výkon solárního kolektoru se stanoví:

$$\dot{Q}_k = A_G \cdot \left[G \cdot \eta_{0,G} - a_{1,G} \cdot \left(t_{k,m} - t_e\right) - a_{2,G} \cdot \left(t_{k,m} - t_e\right)^2 \right] \quad [W] \qquad (5.28)$$

Tento nejjednodušší model neuvažuje chování kolektoru za jiných podmínek, než jsou podmínky zkoušky (kolmý dopad, jasno, ustálený stav bez vlivu dynamiky kolektoru). Je zřejmé, že takový model nemůže postihnout reálné chování kolektoru během roku: nekolmý dopad, dynamické stavy vlivem proměnlivých klimatických podmínek. Tento model reprezentuje např. Type1a v simulačním prostředí TRNSYS.

- Model 2 - Stacionární model vč. optické charakteristiky kolektoru (např. Type 1b v TRNSYS)

Stacionární model daný charakteristikou účinnosti kolektoru může být rozšířen o optickou charakteristiku, která zohledňuje chování kolektoru při nekolmém dopadu slunečního záření. Podobně jako v Modelu 1 je křivka účinnosti výsledkem zkoušky v ustáleném stavu. Optické chování je popsáno tzv. modifikátorem úhlu dopadu K_θ (někdy značeném také IAM: incidence angle modifier). Křivka modifikátoru úhlu dopadu se stanovuje zkouškou v souladu s ČSN EN 12975-2 [98] nebo ČSN EN ISO 9806 [77]. Zkouškou se stanovuje optická účinnost pro různé úhly dopadu slunečního záření (za podmínky jasného dne) na kolektor a modifikátor je poměrem těchto hodnot s hodnotou optické účinnosti pro kolmý dopad podle vztahu:

$$K_\theta = \frac{\eta_0(\theta)}{\eta_0(0°)} \qquad [-] \qquad (5.29)$$

kde je:

$\eta_0(\theta)$ optická účinnost při obecném úhlu dopadu θ [-],

$\eta_0(0°)$ optická účinnost při kolmém úhlu dopadu (θ = 0°) [-].

Modifikátor úhlu dopadu je bezrozměrná křivka, která zohledňuje závislost propustnosti slunečního záření zasklením a pohltivosti slunečního záření absorbérem na úhlu dopadu θ. Optická charakteristika se u různých druhů i typů kolektorů obecně liší. Ploché solární kolektory mají symetrické optické vlastnosti v obou hlavních rovinách kolektoru (příčné, podélné) a mezi různými typy plochých kolektorů není tedy výrazný rozdíl. Tvar křivky modifikátoru úhlu dopadu je snadno předvídatelný a lze jej vyjádřit jednoduchou rovnicí:

$$K_\theta = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \qquad [-] \qquad (5.30)$$

Pro stanovení součinitele b_0 postačuje pouze experimentálně stanovit hodnotu modifikátoru K_θ pro úhel 50°. V protokolech o zkoušce plochých solárních kolektorů se proto pouze uvádí hodnota modifikátoru K_{50}. U osově nesymetrických kolektorů (např. trubkové kolektory) je nutné rozlišovat různé charakteristiky v podélné a příčné rovině. Především v příčné rovině je křivka modifikátoru velice odlišná v závislosti na typu kolektoru.

Ze své podstaty platí modifikátor pro přímé úhlově závislé sluneční záření s výrazně vyšší intenzitou v jednom směru než v ostatních. Pro difuzní a odražené sluneční záření se všesměrovým charakterem (intenzita záření ve všech směrech stejná) se uvažuje souhrnně jedinou hodnotou, která vyjadřuje integrál křivky modifikátoru v oblasti předpokládaného rozsahu úhlů (směrů) dopadu v závislosti na úhlu sklonu solárního kolektoru [68]. Rozlišují se tak tři modifikátory úhlu dopadu: pro přímé

záření $K_{\theta,b}$, pro difuzní $K_{\theta,d}$ a pro odražené sluneční záření $K_{\theta,r}$. Výkon solárního kolektoru s vlivem úhlu dopadu slunečního záření na jeho vlastnosti se stanoví podle vztahu:

$$\dot{Q}_k = A_G \cdot \left[\left(K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d + K_r \cdot G_r \right) \cdot \eta_0 - a_1 \cdot \left(t_{k,m} - t_e \right) - a_2 \cdot \left(t_{k,m} - t_e \right)^2 \right] \text{ [W]} \qquad (5.31)$$

kde je:

G_b přímé sluneční ozáření v rovině kolektoru [W/m^2],

G_d difuzní (oblohové) sluneční záření v rovině kolektoru [W/m^2],

G_r odražené sluneční záření v rovině kolektoru [W/m^2].

Člen zohledňující odražené záření je možné s ohledem na jeho hodnotu zcela zanedbat, pokud se nejedná o svislé orientace kolektoru. Výše uvedený model se objevuje v naprosté většině simulačních nástrojů pro modelování výkonu solárního kolektoru v solárních systémech a lze ho považovat za referenční. V simulačním prostředí TRNSYS je tento model reprezentován např. modelem Type1b.

- Model 3 - Dynamický model vč. optické charakteristiky kolektoru (např. Type 832 v TRNSYS)

Třetím modelem je dynamický model, který vychází z kvazi-dynamické zkoušky solárního kolektoru. Tento model uvažuje kromě účinnostní a optické charakteristiky také dynamické chování kolektoru. Metoda kvazi-dynamické zkoušky využívá pro vyhodnocení tepelného výkonu solárního kolektoru naměřené údaje v neustáleném stavu při měnících se provozních a klimatických podmínkách. Zkouška nevyžaduje podmínku jasné oblohy v okolí slunečního poledne a využívá mnohem větší část dne pro měření. Je proto výhodná především pro venkovní zkoušení v oblastech s proměnlivými klimatickými podmínkami. Zahrnuje navíc vliv úhlu dopadu slunečního záření, vliv difuzního záření, vliv proudění okolního vzduchu, vliv teploty oblohy a vliv tepelné kapacity kolektoru, což umožňuje popsat chování solárního kolektoru podrobněji a komplexněji (díky mnohem širší oblasti zkušebních podmínek), než u zkoušky za ustáleného stavu. Výkon solárního kolektoru se stanoví podle vztahu:

$$\dot{Q}_k = A_G \cdot \left[\left(K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d + K_r \cdot G_r \right) \cdot \eta_0 - a_1 \cdot \left(t_{k,m} - t_e \right) - a_2 \cdot \left(t_{k,m} - t_e \right)^2 - c_3 \cdot w \cdot \left(t_{k,m} - t_e \right) + c_4 \cdot \left(E_L - \sigma \cdot T_e^4 \right) - c_5 \cdot \frac{dt_{k,m}}{d\tau} - c_6 \cdot w \cdot G \right] \text{ [W]} \qquad (5.32)$$

kde je:

w rychlost proudění vzduchu [m/s],

E_L dlouhovlnné záření dopadající na plochu absorbéru [W/m^2],

τ čas [s],

c_3 součinitel tepelných ztrát závislý na rychlosti proudění okolního vzduchu [J/m.K],

c_4 součinitel tepelných ztrát závislý na sálání vůči okolí (především vůči obloze) [-],

c_5 účinná tepelná kapacita [J/m^2.K],

c_6 součinitel účinnosti při nulové tepelné ztrátě závislý na rychlosti větru [s/m].

Základním rozdílem oproti zkoušce za ustáleného stavu je měření a sběr dat během celého dne (od rána do odpoledne). Interval snímání hodnot je 1 až 6 sekund se stanovením průměrných hodnot za 5 až 10 minut. Požadavky na zkušební podmínky jsou redukovány na konstantní průtok (identické jako u metody v ustáleném stavu), konstantní teplotu na vstupu do kolektoru ± 1 K během dne (zkušebního období) a na požadavek na rychlost okolního vzduchu mezi 1 a 4 m/s (pokud je to nezbytné, jsou použity generátory umělého větru). Pro zkoušku jsou požadovány periody jak jasného dne pro určení modifikátoru pro přímé sluneční záření, tak dne s proměnným slunečním ozářením pro zachycení vlivu difuzního záření a tepelné kapacity kolektoru. Norma předepisuje, jakým způsobem vyhodnotit použitelnost zkušebních podmínek ke stanovení spolehlivých nezávislých parametrů – kvazi-dynamických součinitelů výkonu kolektoru.

Vzhledem k tomu, že u zasklených solárních kolektorů je zpravidla vliv větru a sálání vůči obloze zanedbatelný, je možné součinitele c_3, c_4 a c_6 nestanovovat [99], na rozdíl od nezasklených kolektorů, kde je nutné použít úplný model. Účinná tepelná kapacita c_5 se stanovuje podle postupu uvedeném ve zkušební normě.

Pro modelování výkonu solárního kolektoru dynamickým modelem potom lze použít rovnici ve tvaru:

$$\dot{Q}_\mathrm{k} = A_\mathrm{G} \cdot \left[\left(K_\mathrm{b}(\theta) \cdot G_\mathrm{b} + K_\mathrm{d} \cdot G_\mathrm{d} + K_\mathrm{r} \cdot G_\mathrm{r} \right) \cdot \eta_0 - a_1 \cdot \left(t_\mathrm{k,m} - t_\mathrm{e} \right) - a_2 \cdot \left(t_\mathrm{k,m} - t_\mathrm{e} \right)^2 - \frac{c_5}{A_G} \cdot \frac{dt_\mathrm{k,m}}{d\tau} \right] \quad \text{[W]} \qquad (5.33)$$

kde je:

c_5 účinná měrná tepelná kapacita kolektoru [J/K],

τ čas [s].

Člen odraženého záření je možné podobně jako v Modelu 2 zanedbat. Dynamický model se používá v detailních matematických simulacích chování kolektorů s velmi krátkým časovým krokem, kdy se např. porovnává výpočet výstupní teploty kolektoru s naměřenými hodnotami při zkoušení různých způsobů regulace a odezvy na teplotním čidle za kolektorem. Model umožňuje podchytit zpožděný náběh teploty na výstupu kolektoru. V simulačním prostředí TRNSYS je tento model dostupný v knihovně nestandardních komponent jako Type832 [100].

- Model 4 – Vyvinutý model kombinovaného kolektoru – kapalinový provozní režim

Posledním porovnávaným modelem je detailní model kombinovaného solárního kolektoru – kapalinový provozní režim.

Výše popsané modely byly porovnány výpočtem výkonnosti konkrétního plochého solárního kolektoru za stejných klimatických a provozních podmínek během roku v simulačním prostředí TRNSYS s využitím uvedených modelů. Výkonností se rozumí roční měrný tepelný zisk solárního kolektoru provozovaného při definované konstantní teplotě. Byl uvažován plochý solární kolektor s parametry stanovenými experimentální zkouškou. Parametry kolektoru jsou uvedeny v *Tab. 5.11*. Model 4 je založen na teoretickém vypočtu výkonnosti solárního kolektoru, a proto vstupními parametry do modelu jsou geometrické vlastnosti (rozměry, plochy apod.), tepelné vlastnosti (tepelné vodivosti materiálů) a optické vlastnosti části kolektoru. Tyto parametry jsou nastaveny tak, aby křivka účinnosti daného kolektoru stanovená modelem souhlasila s charakteristikou používanou v modelech 1 až 3.

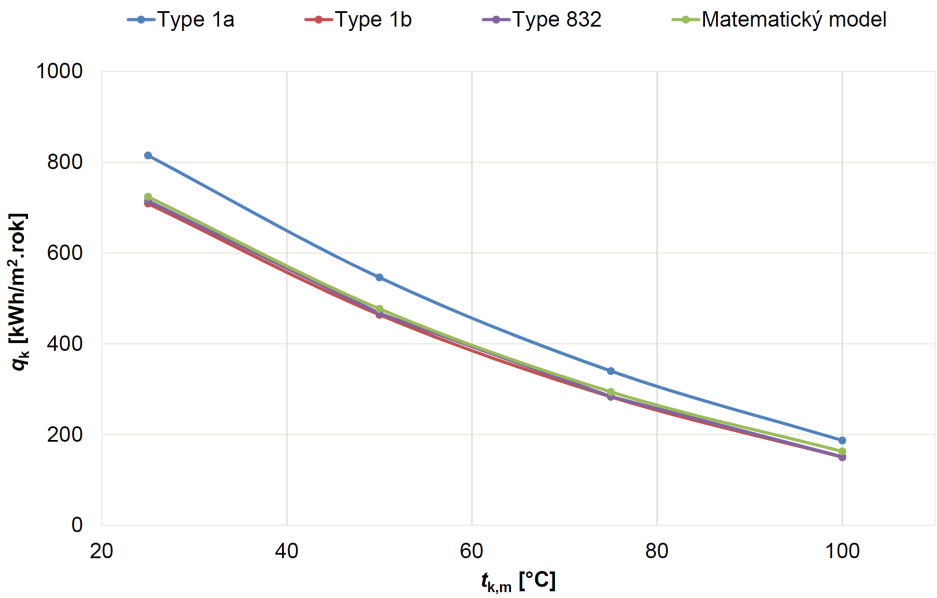
Tab. 5.11 Parametry *hodnoceného* solárního kolektoru

Parametr	**Model 1**	**Model 2**	**Model 3**	**Model 4**
η_0 [-]	0,782	0,782	0,782	počítá se
a_1 [W/m^2.K]	3,663	3,663	3,663	počítá se
a_2 [W/m^2.K^2]	0,0085	0,0085	0,0085	počítá se
$K_{50,b}$ [-]	-	0,920	0,920	0,920
$K_{\theta,d}$ [-]	-	0,876	0,876	0,876
c_5 [J/m^2.K]	-	-	3746	-

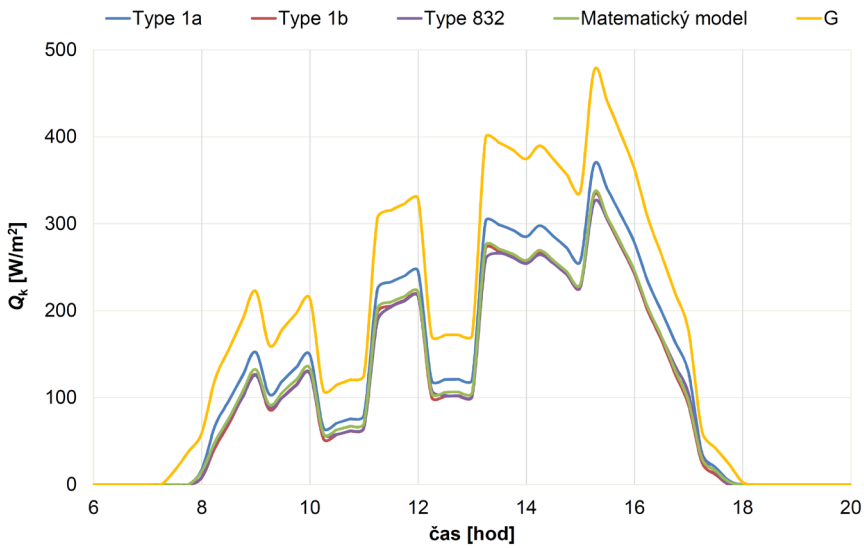
Výkonnost solárního kolektoru byla jednotlivými modely simulována při provozní teplotě 25, 50, 75 a 100 °C. Solární kolektor je uvažován se sklonem 45° a orientací na jih. Pro simulaci byly použity klimatické údaje typického meteorologického roku pro Wuerzburg (roční úhrn energie slunečního záření na plochu kolektoru 1230 kWh/m^2). Výsledky modelování jsou uvedeny v *Tab. 5.12* a graficky na *Obr. 5.13*. Pro porovnání byly jako reference použity výsledky z Modelu 2. U hodnot v závorce uvedených v *Tab. 5.12* jsou uvedeny odchylky vypočteného zisku vzhledem k výsledku referenčního modelu. Na *Obr. 5.14* je uveden příklad denního průběhu výkonu kolektoru stanoveného srovnávanými modely.

Tab. 5.12 *Porovnání* výkonnosti *plochého kolektoru stanovené různými modely*

q_k [kWh/m^{2}rok]	**t_m [°C]**			
	25 °C	**50 °C**	**75 °C**	**100 °C**
Model 1 (Type 1a)	815 (+ 15 %)	546 (+ 18 %)	340 (+ 20 %)	187 (+ 25 %)
Model 2 (Type 1b)	709	464	283	150
Model 3 (Type 832)	715 (+ 1 %)	467 (+ 1 %)	284 (+ 0 %)	151 (+ 1 %)
Model 4 (Matematický model)	724 (+ 2 %)	477 (+ 3 %)	294 (+ 4 %)	163 (+ 9 %)



Obr. 5.13 *Porovnání měrných tepelných zisků stanovených různými modely*



Obr. 5.14 *Výkon srovnávaných modelů solárního kolektoru v závislosti na čase za proměnlivých klimatických podmínek*

Z výsledků je zřejmé, že Model 1 (bez vlivu optické charakteristiky) vykazuje výrazně vyšší zisk o 15 až 25 % v uvedeném rozsahu provozních teplot. V případě odklonu uvažovaného kolektoru od jihu se odchylka zvětšuje. Je to logické z důvodu, že model neuvažuje změnu optických vlastností kolektoru s úhlem dopadu slunečního záření a zároveň uvažuje, že záření dopadá celý rok kolmo na zasklení. Takový model nelze doporučit pro výpočty, zvláště pokud má být výpočet podkladem pro smluvní záruky. Rozdíl mezi Modelem 2 a Modelem 3 je v podstatě zanedbatelný a nepřesahuje 1 %. Zohlednění dynamiky solárního kolektoru nepřináší výrazně jiný výsledek, což je mj. dáno obecně nízkou tepelnou kapacitou kolektoru plochého solárního kolektoru a z

toho vyplývající velice krátkou časovou konstantou (v řádu minut). Z toho důvodu nebyla do vyvinutého matematického modelu tepelná kapacita zahrnuta.

Rozdíl mezi referenčním Modelem 2 a detailním Modelem 4 se v běžném rozsahu provozních teplot pohybuje v řádu procent. Pouze pro vysoké provozní teploty (100 °C) se výpočet teoretickým podrobným modelem liší o 9 %. To může být dáno řadou okolností. Odchylka může být na straně Modelu 2 např. již v omezeném rozsahu vlastní normové zkoušky výkonu solárního kolektoru, která se neprovádí v oblasti takto vysokých teplot a křivka jako výsledek proložení hodnot účinnosti je tím zkreslena. Na druhou stranu může být odchylka dána i nepřesností Modelu 4 v oblasti vysokých teplot vlivem snížené platnosti použitých modelů konvekce ve mezeře, závislosti použité tepelné vodivosti izolace na teplotě, skutečné hodnoty použité emisivity absorbéru, která významně ovlivňuje sálání projevující se při zvýšených teplotách apod.

5.3 Experimentální ověření vzduchové části kombinovaného kolektoru

5.3.1 Vyhodnocování účinnosti vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru

Účinnost vzduchové částí kombinovaného solárního kolektoru η za ustálených podmínek, stejně jako ve případě kapalinové části kolektoru, je definována jako poměr vlastního získaného užitečného výkonu k toku sluneční energie dopadající na kolektor. Na druhou stranu, na rozdíl od kapalinové části kolektoru, u vzduchové části solárního kolektoru je nutné počítat s možnými úniky vzduchu z kolektoru.

Pro stanovení účinnosti se solární kolektor vystaví účinkům slunečního záření a měří se vstupní teplota t_{vz1} a výstupní teplota t_{vz2} teplonosné látky spolu s jejím hmotnostním průtokem $\dot{m}_{vz1}$ *a* $\dot{m}_{vz2}$. Externě se měří sluneční ozáření G v rovině kolektoru, venkovní teplota t_e a rychlost vzduchu w proudícího v okolí kolektoru. Dále se na základě naměřených hodnot stanoví užitečný tepelný výkon kolektoru z bilance [101]:

$$\dot{Q}_{vz} = \dot{m}_{vz2} \cdot c_{vz2} \cdot t_{vz2} - \dot{m}_{vz1} \cdot c_{vz1} \cdot t_{vz1} - \left(\dot{m}_{vz2} - \dot{m}_{vz1}\right) \cdot c_e \cdot t_e \qquad [W] \qquad (5.34)$$

Potom okamžitou účinnost vzduchové části kolektoru lze vyjádřit pomocí rovnice

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{vz}}{A_G \cdot G} = \frac{\dot{m}_{vz2} \cdot c_{vz2} \cdot t_{vz2} - \dot{m}_{vz1} \cdot c_{vz1} \cdot t_{vz1} - \left(\dot{m}_{vz2} - \dot{m}_{vz1}\right) \cdot c_e \cdot t_e}{A_G \cdot G} \qquad [-] \qquad (5.35)$$

Účinnost vzduchové částí kombinovaného kolektoru nebo kteréhokoliv vzduchového kolektoru, na rozdíl od běžného kapalinového kolektoru, je významně závislá na průtoku teplonosné látky kolektorem. Tato závislost vyplývá z teoretického vyjádření rovnice účinnosti solárního kolektoru

$$\eta\left(\dot{m}_{vz}\right)=F'\left(\dot{m}_{vz}\right)\cdot\left[\tau\cdot\alpha-U\cdot\frac{\left(t_{vz,m}-t_{e}\right)}{G}\right] \quad [-] \qquad (5.36)$$

kde je

F' účinnostní činitel kolektoru [-],

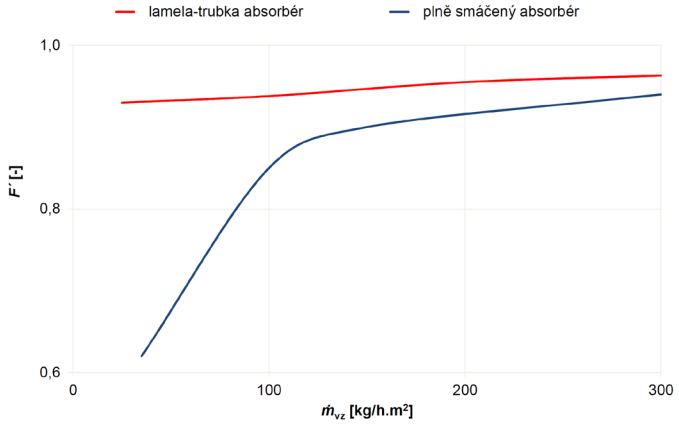
τ propustnost slunečního záření zasklením kolektoru [-],

α pohltivost slunečního záření absorbérem kolektoru [-],

U součinitel prostupu tepla kolektoru [W/m^2.K],

$t_{vz,m}$ střední teplota vzduchu v kolektoru [°C].

U běžných absorbérů kapalinových solárních kolektorů typu lamela-trubka je přenos tepla z povrchu absorbéru do kapaliny dán tepelnými odpory proti vedení lamelou (poměrově největší), vedení spoje a přestupu tepla konvekcí do teplonosné látky proudící v trubce. Vzhledem k relativně vysoké hodnotě tepelného odporu proti toku tepla lamelou, nevede změna tepelného odporu proti přestupu tepla konvekcí z trubky do teplonosné látky k významné změně účinnostního činitele kolektoru *F'* (viz *Obr. 5.15*), a tím křivky účinnosti solárního kolektoru [102].



Obr. 5.15 *Účinnostní činitel kolektoru v závislosti na průtoku teplonosné látky*

U plně smáčených absorbérů, obtékaných zcela teplonosnou látkou jako v případě vzduchových kolektorů (a některých kapalinových), odpadá jak tepelný odpor lamely, tak i spoje. Přestup tepla z povrchu absorbéru do teplonosné látky tak závisí pouze na přestupu tepla z povrchu absorbéru do teplonosné látky konvekcí (a zanedbatelném odporu tloušťky stěny kovového absorbéru). Právě průtok vzduchu jako teplonosné látky, resp. rychlost proudění vzduchu kolem absorbéru, má potom zásadní vliv na přestup tepla konvekcí, na účinnostní činitel kolektoru *F'* a tedy i na účinnost kolektoru. Účinnostní činitel *F´* je funkcí pouze tepelného odporu vůči přestupu tepla z povrchu absorbéru do proudícího vzduchu. S rostoucím průtokem se zvyšuje součinitel přestupu nucené konvekce a tím roste účinnostní činitel kolektoru *F'* (viz *Obr. 5.15*).

Z výše uvedeného důvodu se účinnost kolektoru stanovuje při různých průtocích. Pokud výrobce určuje pracovní rozsah průtoku vzduchu, vzduchový kolektor se zkouší

při maximálním (Mmax), minimálním (Mmin) a středním průtoku vzduchu (Mmean). V případě, že výrobce neuvádí rozsah pracovního průtoku, zkouška se provádí pro 3 hodnoty průtoku rovnoměrné rozložené mezi 30 až 300 kg/h.m^2 hrubé plochy kolektoru. Zkoušení probíhá v rozsahu teplot vzduchu na vstupu do kolektoru od teploty okolí až do maximálního teplotního rozdílu +30 K s krokem 10 K.

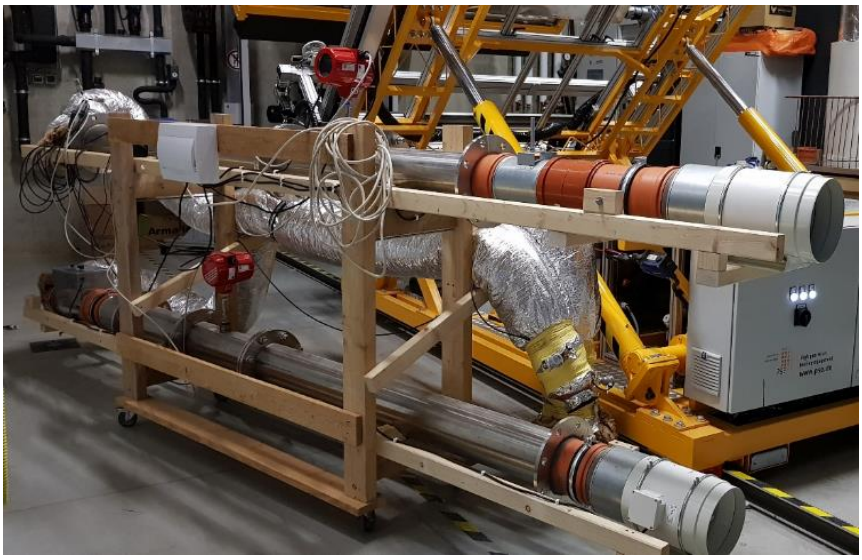
Z hodnot účinnosti stanovených z měření v závislosti na redukovaném rozdílu teplot se získá metodou nejmenších čtverců (nebo metodou váhové regrese minima čtverců) křivka okamžité účinnosti ve tvaru polynomu 2. řádu

$$\eta\left(\dot{m}_{\mathrm{vz}}\right)=\eta_0\left(\dot{m}_{\mathrm{vz}}\right)-a_1\left(\dot{m}_{\mathrm{vz}}\right)\cdot\left(\frac{t_{\mathrm{vz,m}}-t_{\mathrm{e}}}{G}\right)-a_2\left(\dot{m}_{\mathrm{vz}}\right)\cdot G\cdot\left(\frac{t_{\mathrm{vz,m}}-t_{e}}{G}\right)^2 \qquad [-] \qquad (5.37)$$

Výsledkem zkoušky jsou 3 křivky účinnosti vzduchového kolektoru získané pro jednotlivé průtoky.

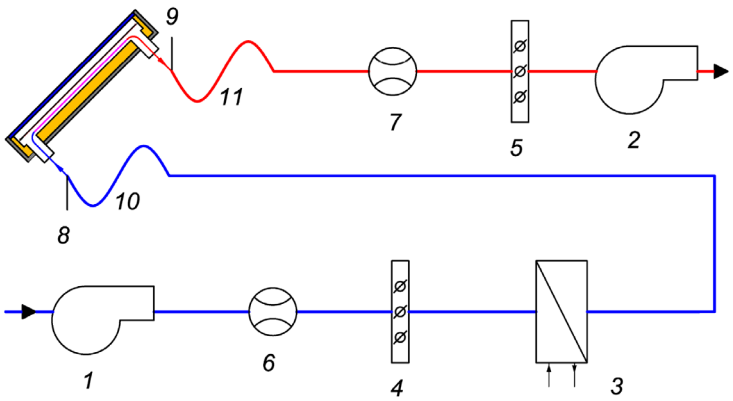
5.3.2 Zkušební trať

Pro posouzení energetické efektivity a přínosů vzduchové částí kombinovaného solárního kolektoru byla navržena a zrealizována zkušební trať (*Obr. 5.16*) pro testování vzduchových kolektorů (poloprovoz [103]). V současné době neexistuje jiné pracoviště v ČR, které by využívalo obdobné zařízení.



Obr. 5.16 *Zkušební trať pro testování vzduchových solárních kolektorů*

Zkušební trať pro testování vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru se skládá ze dvou ventilátorů (1,2), teplovodního výměníku napojeného na ultra-termostat pro nastavení vstupní teploty (3), škrticích klapek pro regulaci průtoku (4,5), průtokoměrů (6,7), čidel teploty na vstupu a na výstupu z kolektoru (8,9) a vzduchotechnického pružného potrubí pro připojení kolektoru (10,11) (viz *Obr. 5.17*).



Obr. 5.17 *Schéma zkušební tratě pro testování uzavřených vzduchových solárních kolektorů*

5.3.3 Měřicí přístroje

Pro stanovení účinnosti solárního kolektoru je nutné měřit hmotnostní průtok teplonosné látky $\dot{m}_{vz}$, teploty na vstupu t_{vz1} do kolektoru, teploty na výstupu z kolektoru t_{vz2}, celkové sluneční ozáření kolektoru G, teplotu okolního vzduchu t_e a rychlost proudění vzduchu w v okolí kolektoru.

5.3.3.1 Měření hmotnostního průtoku

Hmotnostní průtoky $\dot{m}_{vz1}$ a $\dot{m}_{vz2}$ byly měřeny průtokoměry QuadraRherm 640i s digitálním výstupem. Průtokoměr se vyznačuje vysokou přesností v širokém rozsahu průtoků (0,75 %).

5.3.3.2 Měření teploty teplonosné látky

Pro měření teploty na vstupu t_{vz1} a výstupu t_{vz2} kolektoru byla použita odporová teplotní čidla Pt100 v třídě přesnosti A se čtyřvodičovým zapojením (ZPA). Čidla jsou upevněna v jímkách umístěných ve vzduchotechnickém pružném potrubí na vstupu a výstupu z kolektoru pro zajištění dobrého styku s proudící teplonosnou látkou.

Teplota okolního vzduchu t_e byla měřena odporovým teplotním čidlem Pt100 v třídě přesnosti A se čtyřvodičovým zapojením (ZPA). Čidlo bylo umístěno ve stínicím krytu s odrazivým povrchem pro omezení vlivu slunečního ozáření na měřenou teplotu čidla.

5.3.3.3 Měření slunečního ozáření kolektoru

U slunečního ozáření G byla měřena jeho celková hodnota, tzn. součet přímé a difúzní složky záření. Pro účely měření byl použit pyranometr 1. třídy, typ SMP 11-A (Kipp&Zonen). Diskrétní měření slunečního ozáření G v bodech rastru ozářené testovací

plochy se provádělo v rámci zkoušky homogenity a byla vyhodnocována průměrná hodnota slunečního ozáření pro celý kolektor.

5.3.3.4 Ostatní měřené veličiny

Pro jasnou definici okrajových podmínek, za nichž bylo experimentální stanovení účinnosti solárních kolektorů prováděno, bylo nutné určovat i rychlost proudění okolního vzduchu *w*. Pro účely měření byl použit termický anemometr D12-65V s integrovaným drátkem, který je vystaven zchlazujícímu účinku větru. Diskrétní měření rychlosti větru *w* se provádělo v rámci zkoušky homogenity a byla vyhodnocována průměrná hodnota rychlosti větru pro celý kolektor. Plocha solárního kolektoru byla stanovena kalibrovaným svinovacím metrem s rozlišením 1 mm.

Soupis všech snímaných veličin a použitých čidel je uveden v *Tab. 5.13*.

Tab. 5.13 *Seznam čidel použitých při stanovení účinnosti kolektoru*

Měřená veličina	Použitý snímač	Přesnost
Teplota vzduchu na vstupu do kolektoru	odporové čidlo Pt100 (ZPA), třída A	0,05 K
Teplota vzduchu na výstupu z kolektoru	odporové čidlo Pt100 (ZPA), třída A	0,05 K
Průtok vzduchu kolektorem	průtokoměr QuadraRherm 640i	0,75 %
Celkové sluneční ozáření	pyranometr 1. třídy (Kipp&Zonen), 1. třída	1,4 %
Teplota okolního vzduchu (stíněná)	stíněné odporové čidlo Pt100 (ZPA), třída A	0,05 K
Rychlost větru v okolí kolektoru	anemometr D12-65	0,3 m/s

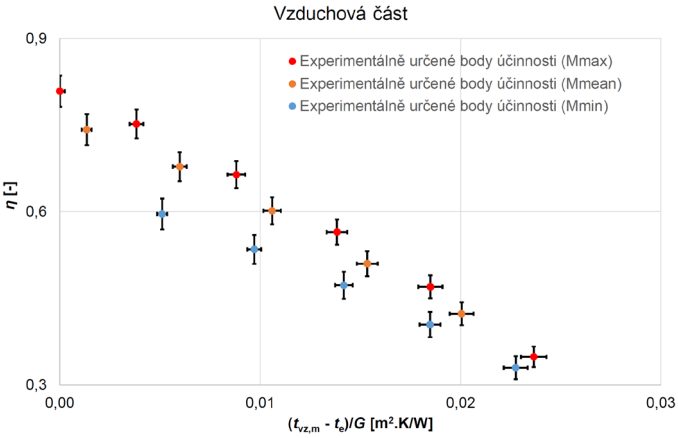
5.3.4 Průběh měření

Experimentální stanovení účinnosti vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru bylo prováděno ve vnitřním prostředí v Solární laboratoři SOLAB[2] v UCEEB ČVUT. Vzduchová část kolektoru byla testována za ustálených podmínek v souladu s ČSN EN ISO 9806. Kombinovaný kolektor byl umístěn na zkušebním stole se sklonem 45° od horizontální roviny (viz *Obr. 5.18*). Výsledkem zkoušky je 5 bodů účinností pro tři různé průtoky vzduchu získané v rozmezí teplot vzduchu na vstupu do kolektoru od 10 °C do 50 °C s krokem 10 °C.

Obr. 5.18 *Kombinovaný kolektor během zkoušení vzduchové části kolektoru*

5.3.5 Nejistota stanovených bodů účinnosti

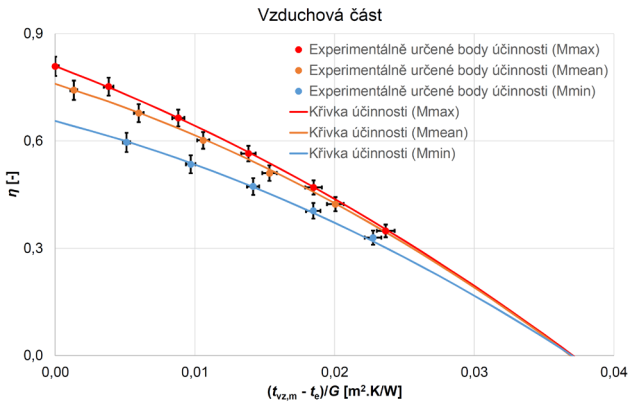
Výpočet nejistoty stanovených bodů účinnosti se provádí stejným způsobem, jak bylo uvedeno v 5.2.5. Experimentálně stanovené body účinnosti vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru společně s vypočtenou rozšířenou nejistotou pro každý pracovní bod jsou znázorněny na *Obr. 5.19*, přičemž svislé úsečky odpovídají rozšířené nejistotě účinnosti σ_η a vodorovné odpovídají rozšířené nejistotě redukovaného teplotního rozdílu σ_{T^*}.



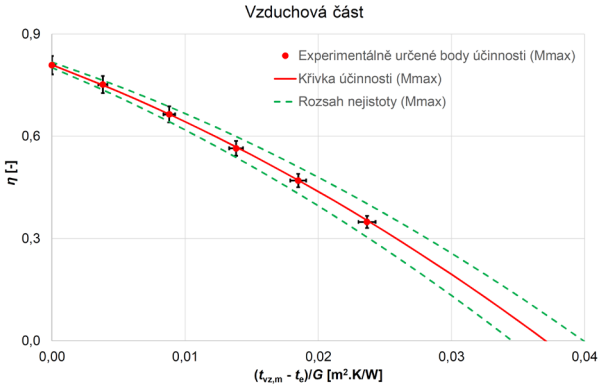
Obr. 5.19 *Stanovené body účinnosti vzduchové části solárního kolektoru pro tři různé průtoky (maximální, minimální a střední) společně s nejistotou měření*

5.3.6 Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti

Analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti se provádí stejným způsobem, jak je uvedeno v 5.2.6. Výsledkem analýzy jsou tři křivky účinnosti vzduchové části kombinovaného kolektoru stanovené pro tři různé průtoky vzduchu (viz *Obr. 5.20*). Zároveň byl v rámci analýzy nejistoty vyhodnocovaných hodnot účinnosti stanoven rozsah nejistoty pro různé průtoky. Na *Obr. 5.21* je znázorněn rozsah nejistoty pro maximální průtok. Rozsah nejistoty je pro průměrný i nejmenší průtok podobný [81, 85].



Obr. 5.20 *Aproximace stanovených hodnot účinnosti metodou váhové regrese minima čtverců pro tři různé průtoky*



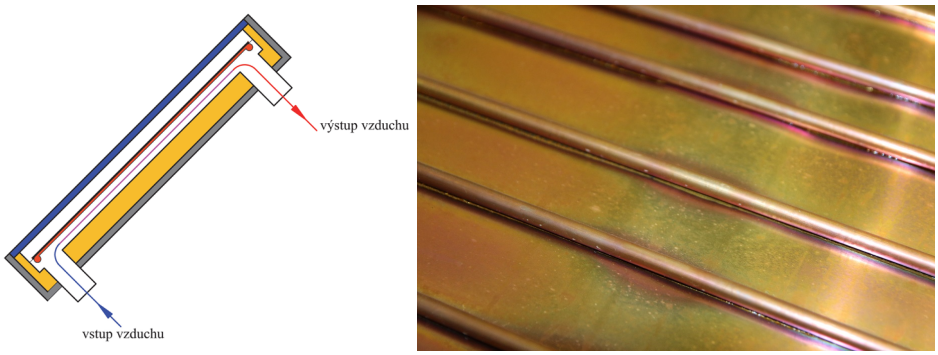
Obr. 5.21 *Rozsah nejistoty křivky účinností vzduchové části kombinovaného kolektoru*

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

5.3.7 Validace vzduchové části modelu kombinovaného solárního kolektoru

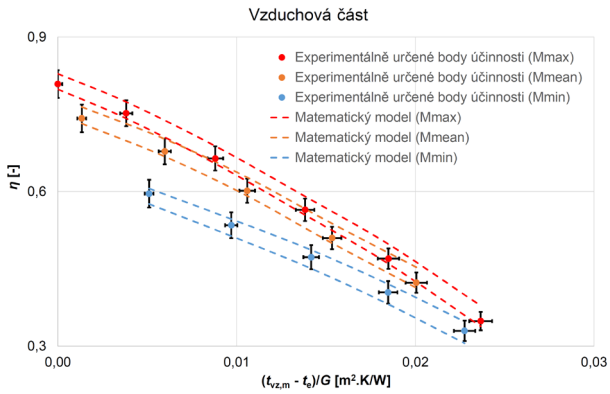
Matematický model vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru byl experimentálně ověřován v rámci testování solárních kolektorů podle evropské normy EN ISO 9806 [77] v Solární laboratoři UCEEB (ČVUT) v Buštěhradě. Vzhledem k tomu, že řada parametrů funkčního vzorku kombinovaného kolektoru, které vstupují do matematického modelu byla již ověřena v rámci detailní validace kapalinové části kombinovaného kolektoru (viz 5.2.7), lze rovnou přistoupit k detailní validaci vzduchové části kombinovaného kolektoru.

V první fázi ověření modelu bylo využito experimentálního stanovení účinnosti pro nejběžnější konstrukci vzduchového kolektoru (jednokanálové proudění vzduchu s dolním obtokem absorbéru) při ustálených provozních a klimatických podmínkách. Konstrukce absorbéru a druh proudění vzduchu jsou znázorněné na *Obr. 5.22*.



Obr. 5.22 *Konstrukce absorbéru a druh proudění vzduchu*

Jak již bylo uvedeno v popisu modelu vzduchové části solárního kolektoru, v případě jednokanálového proudění vzduchu může být použita jak přímá metoda výpočtu, tak i inverzní metoda výpočtu. Nicméně na *Obr. 5.23* jsou uvedeny výsledky validace pouze pro přímou metodu výpočtu. Výsledky validace pro inverzní metodu výpočtu budou prezentovány později.

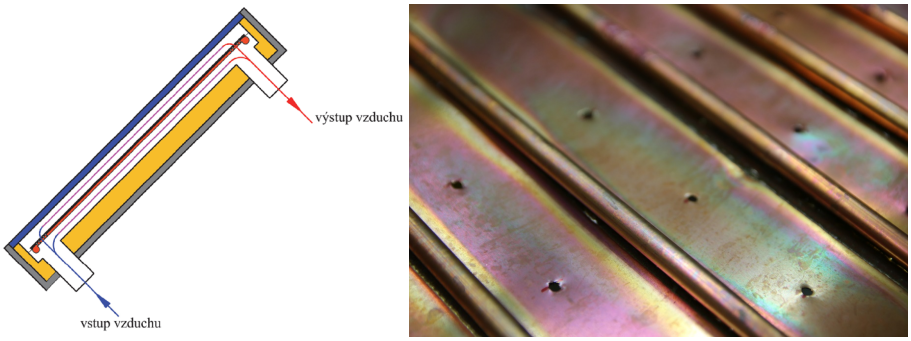


Obr. 5.23 *Výsledky validace modelu v režimu jednokanálového proudění vzduchu s dolním obtékaným absorbéru (přímá metoda vypočtu)*

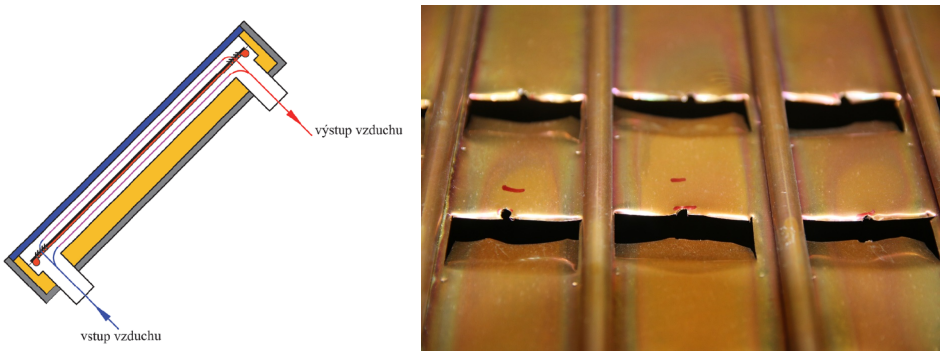
Z výsledků detailní validace je patrné, že ve všech případech se experimentálně stanovené body účinnosti nachází mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma. Model tedy popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností v rámci chyby experimentálního měření.

V druhé fázi ověření modelu bylo využito experimentálního stanovení účinnosti pro složité konstrukce vzduchového kolektoru. K takovým konstrukcím patří především kolektory s dvoukanálovým oboustranným prouděním vzduchu. V tomto případě je přesné stanovení účinnostního součinitele kolektoru F' velice obtížné a z tohoto důvodu se používá pouze inverzní metoda výpočtu popsaná v 4.2.2.2.

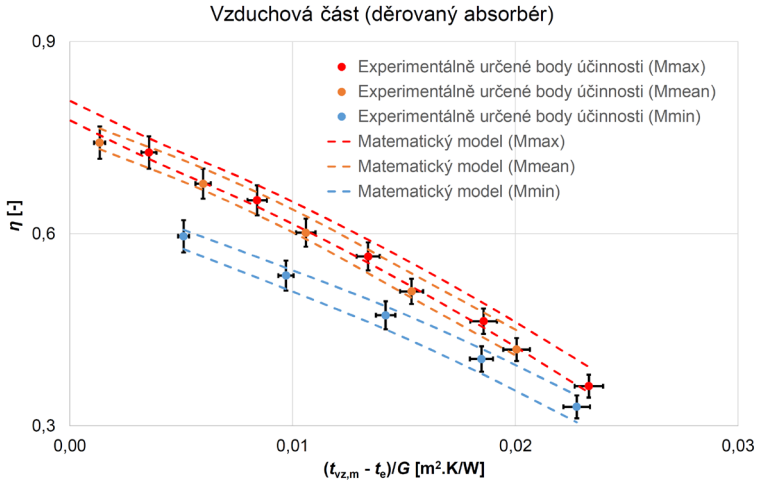
Za účelem validace modelu kombinovaného kolektoru pro režim oboustranného proudění vzduchu, byly vyrobeny dvě složité konstrukce absorbéru (děrovaný a lamelový) na bázi rozebíratelného kombinovaného kolektoru. Konstrukce obou absorbérů jsou znázorněny na *Obr. 5.24* a *Obr. 5.25*. Výsledky validace pro tyto konstrukce jsou uvedeny na *Obr. 5.26* a *Obr. 5.27*.



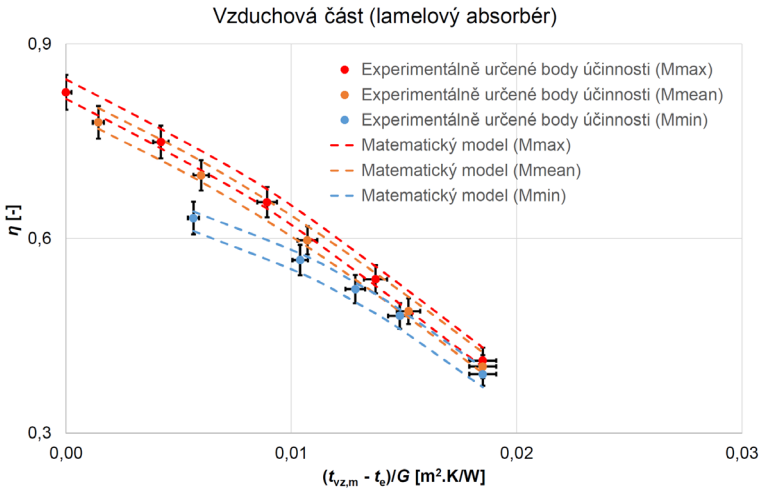
Obr. 5.24 *– Konstrukce kombinovaného kolektoru s děrovaným absorbérem*



Obr. 5.25 *– Konstrukce kombinovaného kolektoru s lamelovým absorbérem*



Obr. 5.26 *Výsledky validace modelu v režimu dvoukanálového proudění vzduchu (inverzní metoda výpočtu)*

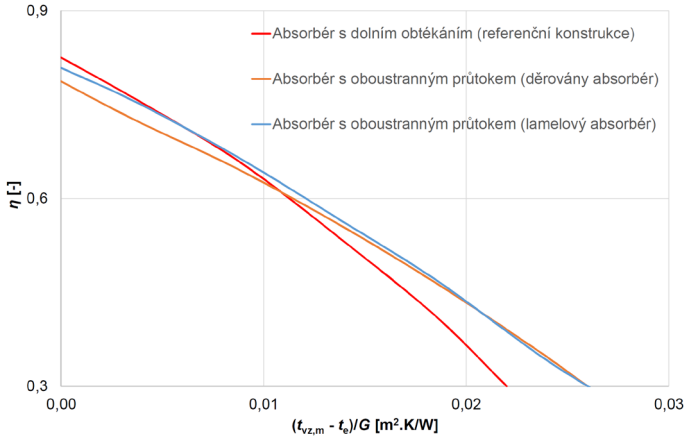


Obr. 5.27 *Výsledky validace modelu v režimu dvoukanálového proudění vzduchu (inverzní metoda výpočtu)*

Z výsledků validace je zřejmé, že i v případě složité konstrukce absorbéru je model kombinovaného kolektoru (vzduchová část) správný a přesný. Všechny

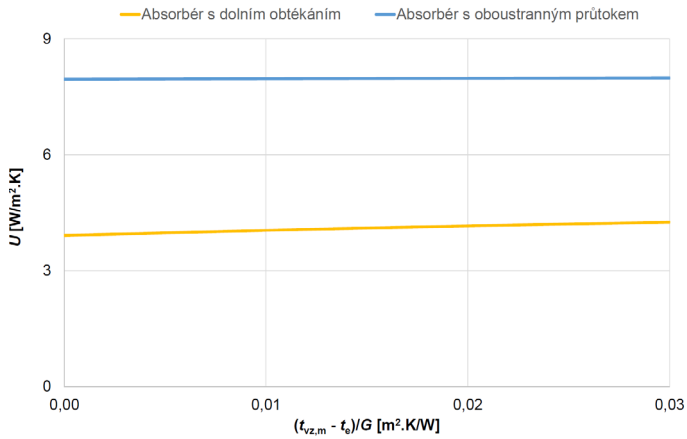
stanovené body účinnosti se nachází mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma, i když některé body (zejména při vysokých průtocích) se nachází na hranici tolerančního pásma.

Co se týče porovnání účinnosti kolektorů na bázi jednotlivých konstrukcí absorbéru, je z výsledků experimentálního zkoušení patrné, že konstrukce s oboustranným obtékáním absorbéru (děrovány a lamelový absorbér) při nízkých hodnotách středného redukovaného teplotního rozdílu mají vyšší účinnost oproti referenční konstrukci s dolním obtékáním absorbéru (viz *Obr. 5.28*). Na druhou stranu, při vyšších hodnotách středního redukovaného teplotního rozdílu má referenční konstrukce s jednokanálovým prouděním vyšší účinnost oproti složité konstrukci s oboustranným obtékáním absorbéru.



Obr. 5.28 *Srovnání účinnosti jednotlivých konstrukcí absorbéru při maximálním průtoku*

Důvodem vyšší účinnosti při oboustranném proudění a nízkých provozních teplotách je zvětšení teplosměnné plochy kolektoru rozdělením proudu vzduchu (horní a dolní obtékaní absorbéru). Rozdělení proudu vzduchu má nicméně také negativní následky. Především se jedná o přibližně dvojnásobné zvýšení součinitele prostupu tepla *U* kolektorem (viz *Obr. 5.29*), a tedy jeho tepelné ztráty.



Obr. 5.29 *Srovnání součinitelů prostupu tepla U kolektorem při maximálním průtoku (výsledky modelování za předpokladu homogenního proudění)*

Právě při nízkých provozních teplotách není vliv součinitele prostupu tepla tak patrný a vzhledem k zvětšení teplosměnné plochy, mají kolektory s oboustranným průtokem vyšší účinnost. Při zvýšení provozní teploty v kolektoru se zvyšuje vliv součinitele prostupu tepla kolektorem *U* na výslednou účinnost a účinnosti obou druhů kolektorů (s dolním obtékáním a oboustranným průtokem) se postupně vyrovnávají. Při dalším zvýšení provozní teploty v kolektoru hraje součinitel prostupu tepla dominantní roli, a proto mají kolektory s oboustranným průtokem nižší účinnost.

6 ANALÝZA VYUŽITÍ KOMBINOVANÝCH SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

V rámci teoretické analýzy využití kombinovaných solárních kolektorů byla provedena energetická analýza čtyř různých systémů pro rodinné domy s různou energetickou náročností za různých klimatických podmínek (Stockholm, Praha a Milan). Byly porovnány následující systémy: systém pro přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů (celoroční provoz v režimu ohřevu vody), dva systémy pro přípravu teplé vody a ohřev větracího vzduchu na bázi kombinovaných solárních kolektorů a systém přípravy teplé vody a cirkulačního vytápění na bázi kombinovaných solárních kolektorů. Cílem srovnávací analýzy je porovnat energetické zisky uvedených solárních systémů za srovnatelných podmínek odběru tepla a poukázat na případný potenciál využití kombinovaných solárních kolektorů [81, 85, 106, 107].

6.1 Detailní energetický model rodinného domu

Pro analýzu využití kombinovaných solárních kolektorů byly uvažovány tři rodinné domy s různou energetickou náročností. Geometricky se jedná o jeden rodinný dům se třemi variantami kvality obvodového pláště budovy. Budova A má odvodový plášť navržený podle doporučených hodnot součinitelů prostupu tepla pro pasivní budovy dle ČSN 73 0540-2 [104]. Budova B má odvodový plášť navržený podle doporučených hodnot součinitelů prostupu tepla a Budova C má odvodový plášť navržený podle požadovaných hodnot součinitelů prostupu tepla dle ČSN 73 0540-2 [104]. Geometrický model rodinného domu (*Obr. 6.1*) byl vytvořen v softwaru pro tvorbu 3D modelů SketchUp a následně integrován do simulačního softwaru TRNSYS a TRNBuild.

***Obr. 6.1** – 3D model rodinného domu uvažovaného v analýze*

Odběr teplé vody ve všech variantách rodinného domu byl uvažován 160 l/den. Požadovaná teplota teplé vody byla 55 °C. Teplota studené vody byla převzata z typického meteorologického roku (TMY) pro uvažované lokality. Odběr teplé vody byl

uvažován s profilem charakteristickým pro rodinný dům s letním poklesem o 30 % oproti ročnímu průměru. Průtok větracího vzduchu je 100 m^3/h (odpovídá intenzitě větrání 0,3 1/h vztažené k objemu obytné místností podle ČSN 15 665/Z1 [105]). Způsob vytápění je konvenční otopnými tělesy.

Detailní parametry uvažovaných rodinných domů jsou uvedeny v *Tab. 6.1*.

Tab. 6.1 *Detailní parametry budov použitých v analýze*

Parametr	Budova A	Budova B	Budova C
	Obecné údaje		
Počet obyvatel	4 osoby		
Zdroj klimatických údajů	TMY, Meteonorm		
Požadovaná teplota vnitřního vzduchu (den/noc)	20 °C (6.00-22.00 hod.) / 18 °C (22.00-6.00 hod.)		
Průtok větracího vzduchu	100 m^3/h		
Účinnost zpětného získávání tepla (ZZT)	75 %		
Vnitřní zisky (osoby + spotřebiče)	2 W/m^2		
Průměrný součinitel prostupu tepla	0,187 W/m^2.K	0,375 W/m^2.K	0,489 W/m^2.K
	Geometrické údaje		
Energeticky vztažná plocha	286 m^2		
Vnitřní podlahová plocha	246 m^2		
Vnitřní objem vzduchu	607 m^3		
	Spotřeba teplé vody		
Teplota studené vody	TMY		
Požadovaná teplota teplé vody	55 °C		
Profil odběru	160 l/den (7.00: 65 l; 12.00: 30 l; 19.00: 65 l)		

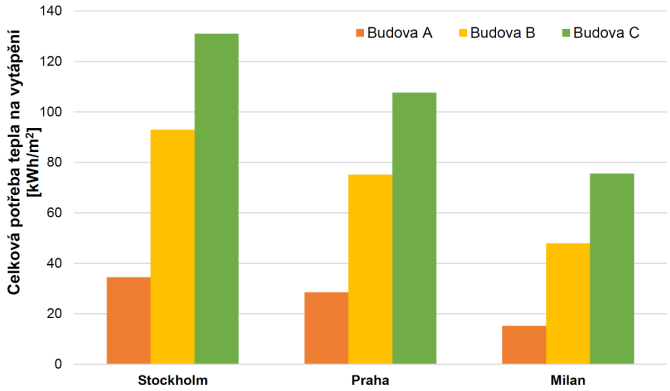
Hodinové klimatické údaje použité v simulační analýze byly převzaty z typického meteorologického roku TMY (Meteonorm) pro Stockholm, Prahu a Milán. Klimatické údaje pro uvažované lokality vykazují relativně odlišné úhrny dopadající sluneční energie na vodorovnou rovinu a odlišné hodnoty roční průměrné teploty venkovního vzduchu (viz *Tab. 6.2*).

Tab. 6.2 *Klimatické udají pro vybrané lokality*

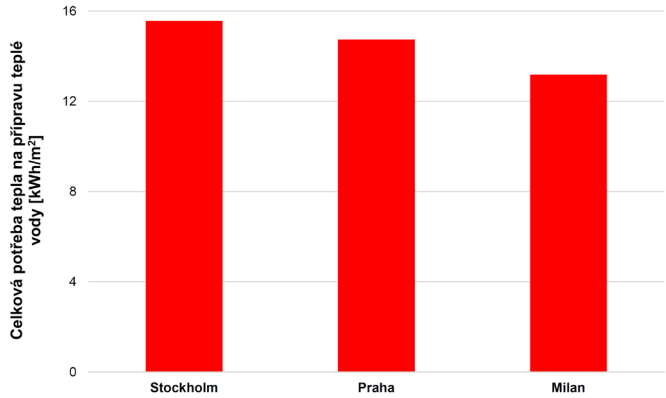
Parametr	Stockholm	Praha	Milan
Zeměpisná šířka	59,65° N	50,10° N	45,43° N
Průměrná roční teplota vzduchu	5,3 °C	7,9 °C	11,7 °C
Minimální teplota vzduchu	-19,9 °C	-15,2 °C	-7,7 °C
Maximální teplota vzduchu	28,3 °C	30,7 °C	45,1 °C
Úhrn sluneční energie na vodorovnou plochu	981 kWh/m^2	999 kWh/m^2	1255 kWh/m^2
Úhrn sluneční energie na šikmou plochu (jih, 45°)	1231 kWh/m^2	1114 kWh/m^2	1392 kWh/m^2

Výsledky simulace celkové roční potřeby tepla na vytápění a celkové roční potřeby tepla na přípravu teplé vody pro uvažované budovy a uvažované lokality jsou znázorněné na *Obr. 6.2* a na *Obr. 6.3*. Odlišná potřeba tepla na vytápění je dána

odlišnými klimatickými podmínkami. Co se tyká přípravy teple vody, odlišná potřeba tepla na přípravu teplé vody je dána odlišnou teplotou studené vody, převzatou z typického meteorologického roku (TMY) pro Stockholm, Prahu a Milán [85].



Obr. 6.2 *Celková roční potřeba tepla na vytápění pro uvažované budovy a uvažované lokality*



Obr. 6.3 *Celková roční potřeba tepla na přípravu teplé vody pro uvažované lokality*

6.1.1 Solární systémy na bázi kombinovaných kolektorů

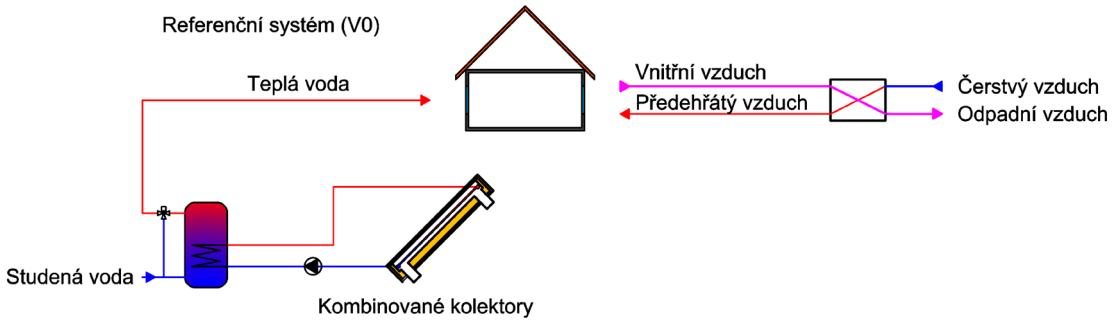
V rámci analýzy využití kombinovaných solárních kolektorů byly zkoumány následující varianty:

- Solární systém pro přípravu teplé vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů, které celoročně fungují v režimu ohřevu vody – referenční varianta V0;
- Solární systém na bázi kombinovaných kolektorů pro přípravu teplé vody a pro ohřev větracího vzduchu před rekuperační jednotkou – varianta V1;
- Solární systém na bázi kombinovaných kolektorů pro přípravu teplé vody a pro ohřev větracího vzduchu za rekuperační jednotkou – varianta V2;
- Solární systém pro přípravu teplé vody a pro cirkulační vytápění na bázi kombinovaných kolektorů – varianta V3.

Jako referenční varianta (V0) byl zvolen systém solárního ohřevu vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů se solárním pokrytím 60 %. Přičemž tato variantu uvažuje celoroční provoz kombinovaných solárních kolektoru v režimu ohřevu vody (schéma viz *Obr. 6.4*). V podstatě se jedná o systém ohřevu vody na bázi kapalinových solárních kolektorů, který je běžně nabízen na trhu pro rodinu se 3 až 4 členy. Konstrukční parametry uvažovaného kombinovaného kolektoru jsou uvedeny v *Tab. 5.1*. Detailní parametry referenčního solárního systému (V0) jsou uvedené v *Tab. 6.3*.

Tab. 6.3 *Detailní parametry referenčního systému (V0)*

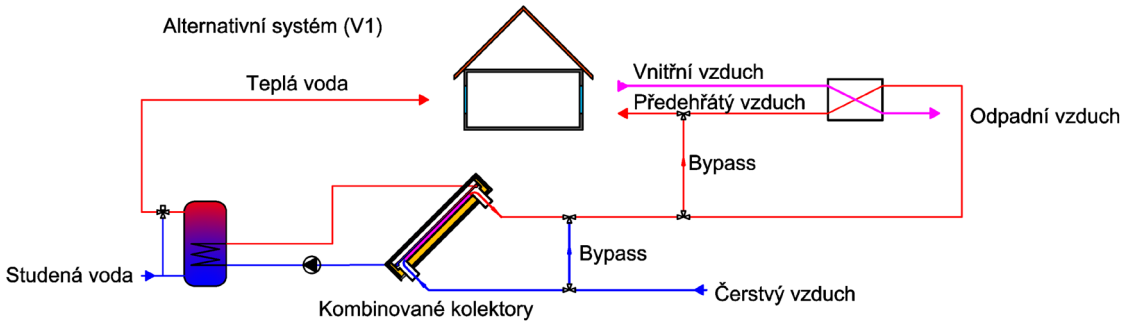
Parametr	Popis
Orientace kolektorů	Jih, 45° (podle sklonu střechy)
Plocha kolektorů	Stockholm a Praha 4,8 m^2, Milán 3.2 m^2
Průtok kolektorem	50 l/hod.m^2
Teplonosná látka	30% směs propylenglykolu s vodou
Řízení čerpadla	Spínaní čerpadla při rozdílu teplot ΔT = 2 K mezi výstupem z kolektoru a teplotou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



Obr. 6.4 *Principiální schéma referenčního systému (V0)*

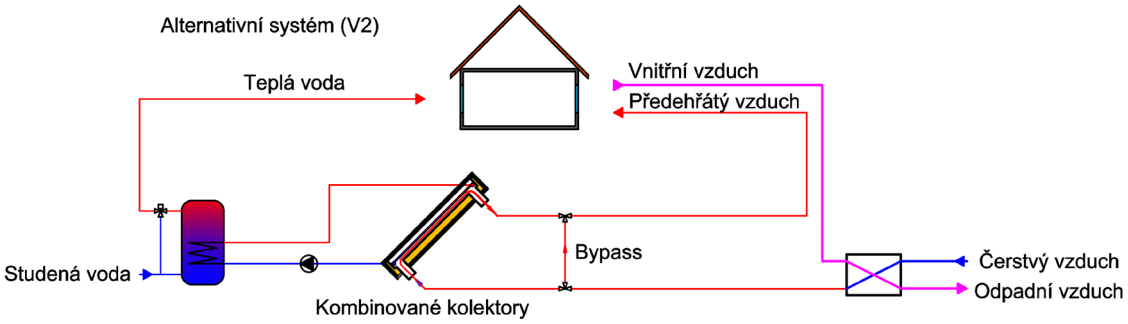
Varianta V1 uvažuje namísto celoročního provozu kombinovaných solárních kolektoru v režimu ohřevu vody použití střídavého provozního režimu (ohřev vzduchu/ohřev vody) (schéma viz *Obr. 6.5*). Kombinované solární kolektory pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina fungují takovým způsobem, že během zimního a přechodného období fungují jako vzduchové solární kolektory pro ohřev větracího vzduchu. Ve variantě V1 je kombinovaný kolektor zapojen před rekuperační jednotkou. Venkovní vzduch se v kolektoru předehřeje před vstupem do zařízení pro rekuperaci tepla. Pokud není dostatečný výkon slunečního záření (ve dnech s vysokou oblačností nebo v noci), vzduch kolektorem neproudí a dostává se do budovy přes bypass kolektoru a výměník ZZT. Teplota vystupujícího větracího vzduchu z kolektoru může v provozu dosahovat i teplot vyšších, než je teplota vzduchu v interiéru, a proto kromě snížení potřeby tepla na větrání může tato varianta hradit i část tepelných ztrát

prostupem. Zbytek roku kombinované kolektory fungují v režimu přípravy teplé vody. Volba provozního režimu kombinovaného solárního kolektoru (ohřev kapaliny/ohřev vzduchu) je založená na porovnání měsíčního tepelného zisku kombinovaného kolektoru v obou provozních režimech a výběru maximálního měsíčního tepelného zisku.



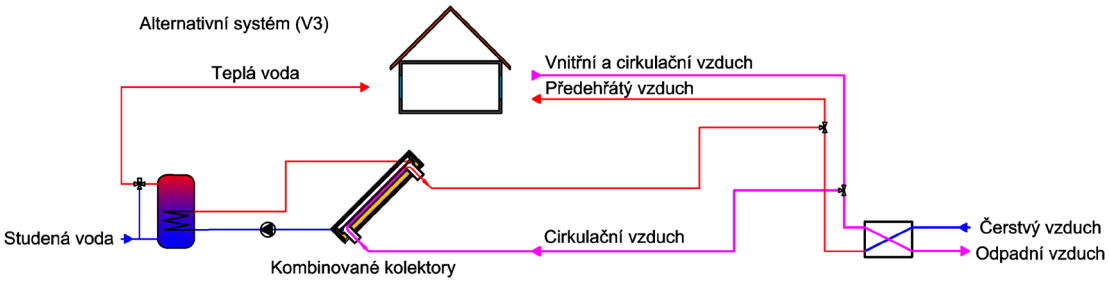
Obr. 6.5 *Principiální schémata první alternativní varianty (V1)*

Varianta V2 funguje podobným způsobem jako varianta V1 s tím rozdílem, že kombinované kolektory jsou zapojeny až za rekuperační jednotkou (schéma viz *Obr. 6.6*). Venkovní vzduch předehřátý v rekuperační jednotce je veden přes kolektor a takto ohřátý je veden do vnitřního prostoru. Přiváděný vzduch je veden kolektorem pouze v době, kdy má kolektor potenciál vzduch ohřát, jinak by naopak teplo ztrácel.



Obr. 6.6 *Principiální schémata druhé alternativní varianty (V2)*

Varianta V3 uvažuje využití kombinovaných kolektorů během zimního a přechodného období pro cirkulační teplovzdušné vytápění (ohřev cirkulačního vzduchu), zbytek roku kombinované kolektory fungují jako kapalinové kolektory pro přípravu teplé vody (schéma viz *Obr. 6.7*). Cirkulační vzduch odsávaný z místností se v kolektoru ohřívá a vede zpět do budovy. Přívodní větrací vzduch je po předehřátí v rekuperační jednotce smíchán se vzduchem cirkulačním a přiveden do obytných místností. Vzduch kolektorem neproudí ve dnech s podmračenou oblohou a v noci. Výhodou této varianty je možnost zvýšení účinnosti kolektorů pomocí zvýšení průtoku cirkulačního vzduchu.



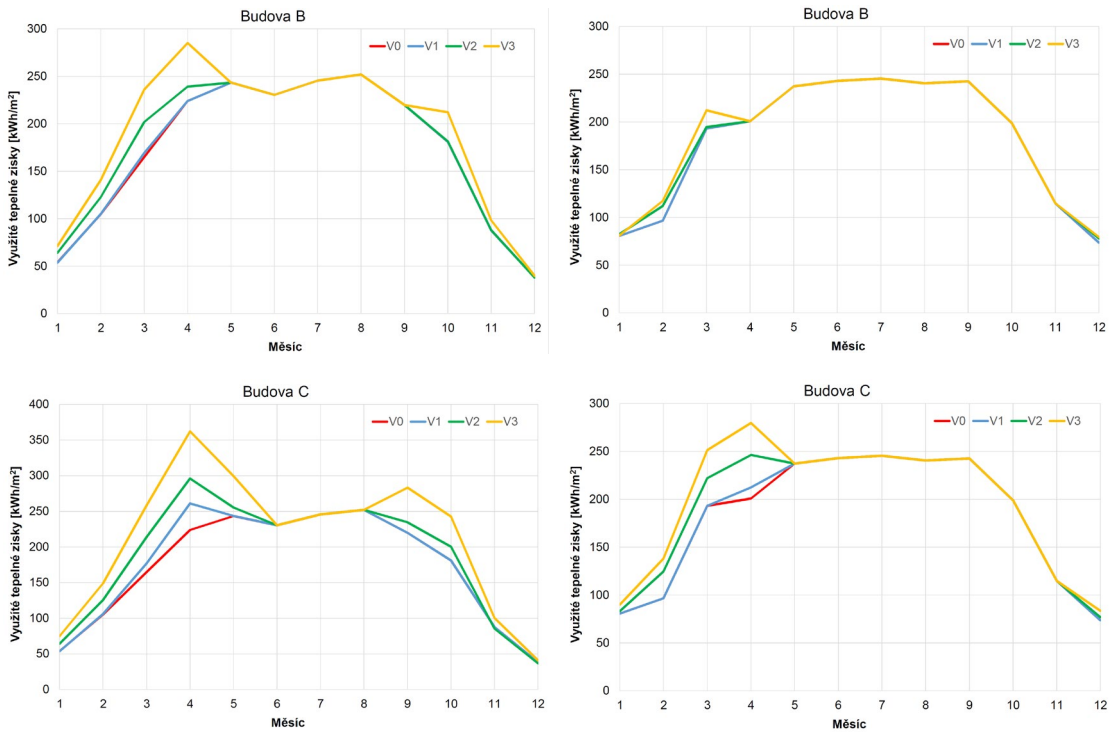
Obr. 6.7 *Principiální schémata třetí alternativní varianty (V3)*

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

Přestože součástí všech uvažovaných solárních zásobníků teplé vody jsou elektrická topná tělesa napojená na elektrickou síť, pro účely tohoto porovnání nebylo uvažováno jejich použití jako dodatkového zdroje tepla. Množství potřebné dodatkové energie (energie na dohřev vody) bylo stanoveno na základě odebíraného aktuálního průtoku a rozdílu mezi požadovanou teplotou a teplotou vody dosaženou na výstupu ze zásobníku. Pro modelování kombinovaného solárního kolektoru byl použit vyvinutý model kombinovaného solárního kolektoru integrovaný do simulačního prostředí TRNSYS (Type 207). Pro všechny varianty byla uvažována maximální teplota v zásobníku teplé vody 85 °C. Byly uvažovány jak tepelné ztráty zásobníku, tak jeho tepelné zisky v případě, že teplota v zásobníku je nižší než teplota okolí (15 °C). Pro modelování zásobníku v TRNSYS byl zvolen pokročilý model Type 340 v simulačním prostředí TRNSYS, který umožňuje modelovat jak zásobníky s elektrickými topnými tělesy, tak i s výměníky tepla.

6.1.2 Výsledky analýzy využiti kombinovaných solárních kolektorů

Vyhodnocování energetického zisku uvažovaných solárních systémů bylo provedeno v simulačním prostředí TRNSYS. Na *Obr. 6.8* jsou v grafické formě znázorněny příklady výsledků simulovaných variant pro Prahu a Milán a pro budovy B a C [81]. V *Tab. 6.4* jsou uvedeny roční hodnoty pro všechny simulované varianty. V závorkách je uveden procentuální rozdíl v porovnání s referenčním systémem (V0).



a) b)

Obr. 6.8 *Průběh zisků solárních systémů během roku pro Prahu (a) a Milán (b)*

Tab. 6.4 *Výsledky celoročního modelování solárních systémů*

	V0 (kWh/m²)	**V1 (kWh/m²)**	**V2 (kWh/m²)**	**V3 (kWh/m²)**
Stockholm				
Budova A	418	418 (0 %)	439 (5 %)	460 (9 %)
Budova B	418	424 (1 %)	461 (10 %)	494 (16 %)
Budova C	418	456 (9 %)	511 (20 %)	582 (32 %)
Praha				
Budova A	426	426 (0 %)	432 (1 %)	448 (5 %)
Budova B	426	427 (0 %)	443 (4 %)	474 (11 %)
Budova C	426	437 (2 %)	467 (9 %)	529 (22 %)
Milán				
Budova A	677	677 (0 %)	677 (0 %)	680 (0 %)
Budova B	677	677 (0 %)	684 (1 %)	692 (2 %)
Budova C	677	681 (1 %)	711 (5 %)	739 (9 %)

Zaprvé, výsledky simulace naznačují, že použití kombinovaného solárního kolektoru namísto kapalinového kolektoru (kombinovaného kolektoru s celoročním provozem v režimu ohřevu vody) umožňuje zvýšit využitelný tepelný zisk solárního systému. Lze to vysvětlit tím, že v zimním a přechodném období není výkon slunečního záření dostatečný pro ohřev kapaliny v kolektoru na teplotu použitelnou pro přípravu teplé vody, ale na druhé straně je dostatečný k ohřevu chladného čerstvého okolního vzduchu nebo cirkulujícího vzduchu. Kromě toho je patrné, že vyšší energetický úhrn

solárních zisků vždy koreluje s vyšší potřebou tepelné energie. To znamená, že kombinované solární kolektory v režimu ohřevu čerstvého vzduchu nejen snižují tepelné ztráty větráním, ale také přispívají ke snížení potřeby tepla na vytápění.

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

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

Z výsledků vyplývá, že solární systém na bázi kombinovaných kolektorů je výhodnější v chladných a mírných klimatických zónách než v teplých klimatických zónách. Důvodem je fakt, že v teplých klimatických zónách je venkovní teplota vyšší a potřeba tepla na vytápění nižší než v chladných klimatických zónách, a tím pádem i nižší hodnota potenciálního zisku kombinovaných solárních kolektorů [81, 85, 106–108].

6.2 Parametrická analýza vlivu hlavních konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru

Kombinovaný solární kolektor je sestaven z dílčích prvků, které mohou svými vlastnostmi či konstrukcí více či méně ovlivňovat jeho výkon a energetické zisky. Tato analýza má za cíl ukázat, jak hlavní konstrukční parametry kombinovaného kolektoru ovlivňuji účinnost solárního kolektoru, případně výkonnost celého solárního systému. Na následujících stranách budou rozebrány jednotlivé otázky:

- Jaký vliv má tloušťka tepelné izolace?
- Jaký vliv má tloušťka přední vzduchové mezery?
- Má smysl snažit se o dosažení extrémně nízké emisivity absorbéru?
- Jaký vliv má optimalizace konstrukce vzduchového kanálu?

Analýza vlivu konstrukce kolektoru na energetické přínosy musí vždy vycházet z konkrétních podmínek a z plánovaného využití kombinovaného solárního kolektoru. Následující analýza je provedena nejprve obecně a potom až detailněji pro výše uvedený systém s využitím kombinovaných kolektorů V3, klimatických podmínek Prahy (TMY), a to pro Budovu C.

Referenční variantou kolektoru RV je kombinovaný kolektor použitý v analýze využití (viz *Tab. 5.1*). V případě analýzy vlivu tloušťky tepelné izolace, tloušťky přední vzduchové mezery a druhu povlaku, budou výsledky modelování prezentovány pouze pro kapalinový režim provozu, i když tyto konstrukční změny budou mít vliv i na vzduchový režim provozu. Na druhou stranu, v případě optimalizace konstrukce vzduchového kanálu budou výsledky prezentované pouze pro vzduchovou část kolektoru.

6.2.1 Vliv konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru na jeho účinnost

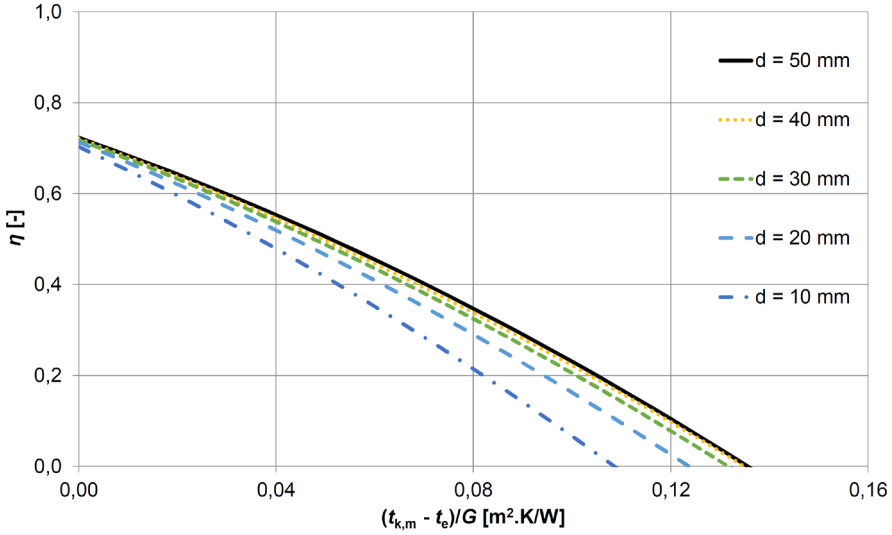
6.2.1.1 Tloušťka tepelné izolace (10 až 50 mm s krokem 10 mm)

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

Boční izolace není pro svou omezenou plochu tak podstatná jako izolace na zadní straně kolektoru, a proto zpravidla postačuje tloušťka 15 až 20 mm. Větší tloušťka boční tepelné izolace nepřinese výrazné zlepšení tepelných vlastností [68], ale naopak by zbytečně narostl hrubý rozměr kolektoru.

Tepelná izolace zadní strany má vliv větší, nicméně může nastat právě otázka, jaká tloušťka izolace ještě dává smysl a jaká už nikoliv? Na *Obr. 6.9* je porovnána účinnost pro 5 různých kombinovaných solárních kolektorů (v kapalinovém provozním režimu) se stejnými geometrickými a fyzikálními vlastnostmi, avšak s různou tloušťkou tepelné izolace zadní části.

Z výsledků simulace je patrné, že optimální hodnota tloušťky izolace se pohybuje mezi 30 a 40 mm. Další navyšování tloušťky izolace až do 50 mm vede pouze k nepatrnému zvyšování účinnosti solárního kolektoru v řádu jednotek procent. Snižování tloušťky tepelné izolace pod 20 mm vede k významnému snižování účinnosti, zejména při vysokých provozních teplotách.

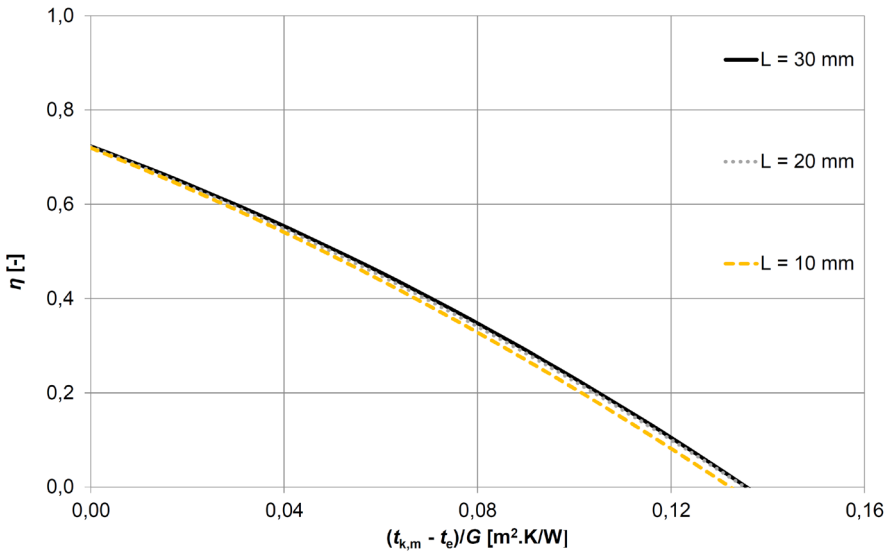


Obr. 6.9 *Účinnost kombinovaného kolektoru pro uvažované tloušťky izolace v kapalinovém provozním režimu*

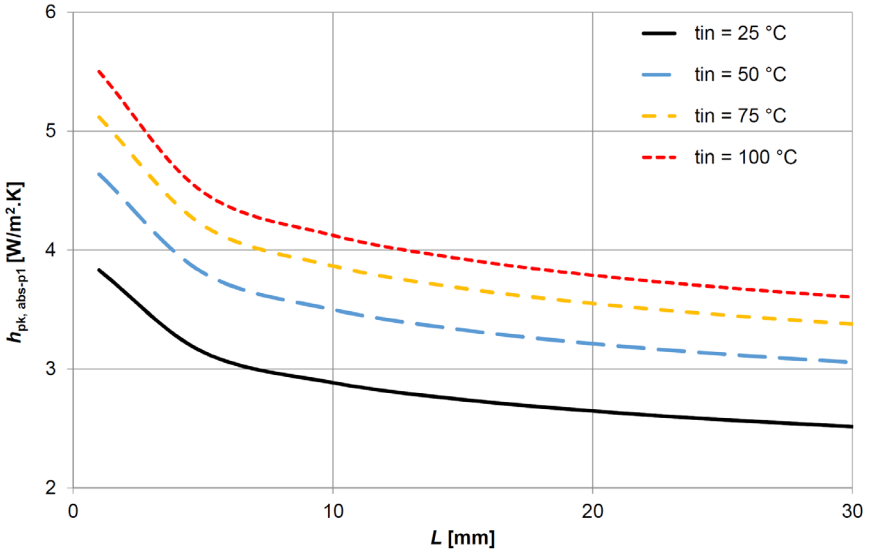
6.2.1.2 Tloušťka vzduchové mezery (10, 20 a 30 mm)

Důležitou roli v energetickém chování solárního kolektoru hraje vzduchová mezera mezi absorbérem a krycím sklem, neboť definuje tepelný odpor přední stranou kolektoru a tím pádem zajišťujte určitou účinnost kolektoru (zabraňuje tepelným ztrátám). Otázkou je, jestli opravdu dává smysl mít tloušťku vzduchové vrstvy 30 mm, nebo v našich klimatických podmínkách postačuje tloušťka menší?

Výsledky modelování účinnosti v kapalinovém provozním režimu jsou uvedeny na *Obr. 6.10*. Varianty kolektorů mají stejnou konstrukci. Liší se pouze tloušťkou vzduchové mezery: 10, 20 a 30 mm. Z výsledků analýzy vlivu tloušťky vzduchové mezery je patrné, že není skoro žádný rozdíl účinnostní charakteristiky kolektoru pro tloušťku vzduchové mezery 20 a 30 mm. Na druhou stranu existuje určitý rozdíl účinnosti (v řádu procent) pro vysoké provozní teploty a pro tloušťku vzduchové mezery 10 a 30 mm. Na *Obr. 6.11* je znázorněn součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí v uzavřené vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením v závislosti na tloušťce vzduchové mezery. Zaprvé, výsledky simulace naznačují, že kritická hodnota tloušťky vzduchové mezery se nachází v rozmezí od 5 do 10 mm. Tudíž, lze předpokládat, že snižování tloušťky tepelné izolace pod 10 mm vede k významnému snižování účinnosti. Zadruhé lze potvrdit, že rozdíl není skoro žádný rozdíl součinitele přestupu tepla přirozenou konvekcí pro tloušťku vzduchové mezery 20 a 30 mm.



Obr. 6.10 *Porovnání účinnosti kombinovaného kolektoru pro uvažované tloušťky vzduchové mezery (kapalinový režim provozu)*



Obr. 6.11 *Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí v uzavřené vzduchové mezeře mezi absorbérem a zasklením v závislosti na tloušťce vzduchové mezery*

6.2.1.3 Emisivita absorbéru

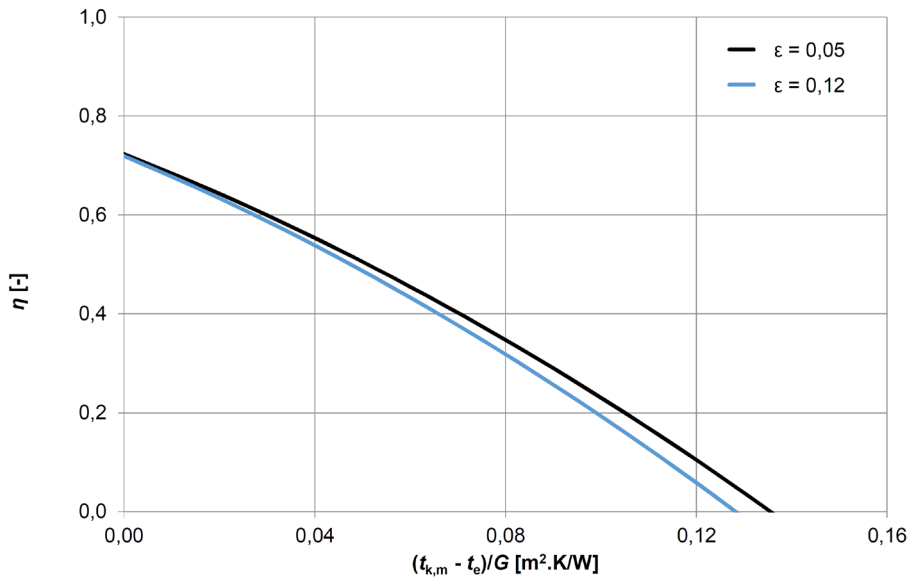
Absorbéry mohou mít různý typ povlaku. Ten potom určuje možnosti využití kolektoru, ale také jeho cenu. Kvalitu povlaku určuje nanesená vrstva a její optické vlastnosti. Pro využití v solární technice je určující spektrální závislost pohltivosti α_{Sol} v oblasti slunečního záření a emisivity ε_{IR} v oblasti IR záření resp. jejich poměr $\alpha_{Sol}/\varepsilon_{IR}$. Absorpční povlaky, který účinně pohlcují sluneční záření v oblasti krátkých vlnových délek (oblast vlnových délek slunečního záření) a minimálně vyzařují IR záření v oblasti dlouhých vlnových délek, se nazývají spektrálně selektivní a jsou využívány ve většině

solárních kolektorů pro celoročně provozované solární soustavy. V *Tab. 6.5* je uveden přehled různých druhů selektivních povrchů.

Tab. 6.5 *Pohltivost a emisivita různých druhu selektivních povlaků*

Selektivní povlak	Materiál absorbéru	Metoda	Pohltivost [-]	Emisivita [-]
Nikl, oxidy niklu	hliník	naprašování	0,96	0,05
Optický aktivní třívrstvový povlak	hliník	vakuové napařování	0,94	0,05
Keramicko-kovová struktura CERMET	měď	naprašování	0,95	0,05
Černý chrom na niklu	měď	galvanická	0,95	0,12
Vrstva titan-nitrid-oxid	měď	vakuové napařování	0,95	0,05
Pigmentovaný nikl, oxid hlinitý	hliník	galvanická	0,90-0,96	0,15-0,20
Nikl, oxidy niklu	hliník	naprašování	0,96	0,05

V rámci teoretické analýzy byl uvažován povrch ve dvou variantách: moderní napařovaný PVD povlak s emisivitou 0,05 nebo starší a levnější elektrochemický (galvanický) povlak s emisivitou 0,12, avšak se stejnou pohltivostí 0,95. *Obr. 6.12* ukazuje křivky účinnosti variant kolektoru jako výsledek komplexního modelování kombinovaného kolektoru v kapalinovém provozním režimu. Z výsledku simulace vyplývá, že rozdíl účinnosti uvázaných variant kolektoru nepřesahuje 2 % v oblasti nízkých provozních teplot. Na druhou stranu je patrné, že rozdíl účinnosti uvažovaných variant kolektoru se zvětšuje s rostoucí provozní teplotou a v oblastí vysokých provozních teplot dosahuje 8 %.



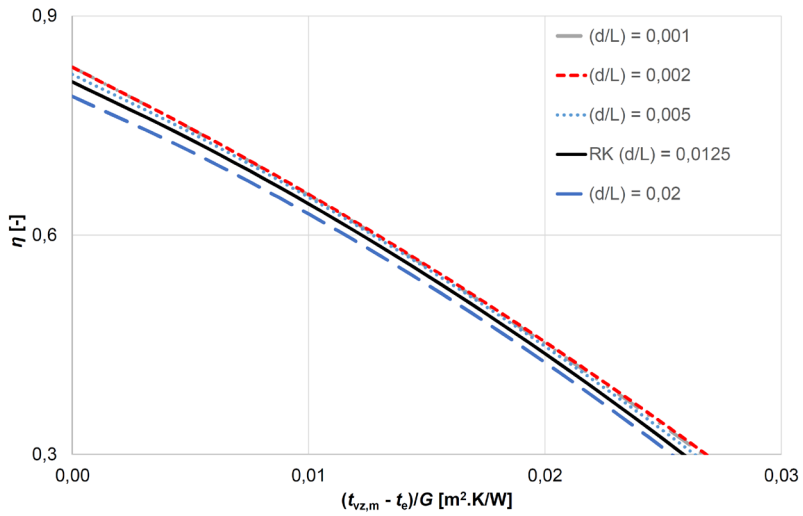
Obr. 6.12 *Účinnost kolektoru pro varianty kolektoru s emisivitou absorbéru ε = 0,05 a ε = 0,12 (výsledky modelování pro kapalinový provozní režim)*

6.2.1.4 Optimalizace vzduchového kanálu

Při výrobě kombinovaného kolektoru se jako nejjednodušší řešení naskýtá použití standardního plochého kapalinového absorbéru. Při řešení optimalizace tohoto typu absorbéru mohou nastat tři základní režimy provozu: jednokanálové proudění vzduchu v mezeře mezi absorbérem a zasklením, jednokanálové proudění vzduchu v mezeře mezi absorbérem a tepelnou izolací, dvoukanálové proudění se současným prouděním vzduchu v mezeře nad i pod absorbérem.

První varianta, kdy by bylo nucené proudění pouze nad absorbérem, je z energetického hlediska nevýhodná, protože nejteplejší vzduch pod absorbérem by zůstal nevyužitý – tato varianta nebyla řešena.

Pro druhou variantu je cílem optimalizace nalezení optimálního poměru tloušťka vzduchového kanálu / délka vzduchového kanálu $(d_z/L)_{opt}$., při kterém má kolektor nejvyšší využitelný energetický zisk pro dané provozní podmínky. Za účelem stanovení optimálního poměru $(d_z/L)_{opt}$ bylo provedeno matematické modelování účinnosti kombinovaného solárního kolektoru pro vzduchový provozní režim a pro různé hodnoty poměru $(d_z/L)_{opt}$. Výsledky modelování znázorněny na *Obr. 6.13*.



Obr. 6.13 *Účinnost vzduchové části kombinovaného kolektoru pro různé poměry (d_z/L)*

Z výsledků je patrné, že optimální poměr $(d_z/L)_{opt}$ se pohybuje okolo 0,002. Další snižování tohoto poměru nezpůsobuje zvýšení účinnosti. Při zvýšení tohoto poměru klesá účinnost vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru.

Pro třetí variantu konstrukce je potřeba provést vícekriteriální optimalizace konstrukce kanálu, a tudíž je nutné stanovit optimální rozdělení průtoku pro horní a dolní vzduchové kanály a stanovit optimální poměry $(d_p/L)_{opt}$ a $(d_z/L)_{opt}$. Optimalizace konstrukce předního vzduchového kanálu bude $(d_p/L)_{opt}$ výrazně ovlivňovat účinnost kombinovaného kolektoru v kapalinovém provozním režimu směrem ke snížení účinnosti. V tomto případě se nedá provést obecná optimalizace konstrukce, protože

změna konstrukce výrazně ovlivňuje účinnost obou částí kombinovaného kolektoru, a to v různých směrech.

6.2.2 Vliv konstrukčních parametrů kombinovaného kolektoru na jeho výkonnost

Pro zohlednění vlivu konstrukčních změn na celoroční tepelný zisk kombinovaného solárního kolektoru byl uvažován solární systém pro přípravu teplé vody a cirkulační teplovzdušné vytápění (varianta V3, viz 6.1.1). Parametry solárního systému a okrajové podmínky jsou uvedeny v *Tab. 6.3*. Analýza byla provedená pro klimatické podmínky Prahy a pro Budovu C. Referenční variantou (RK) použitou v analýze je vytvořeny funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru (*Tab. 5.1*). Výsledky simulace jsou uvedeny v *Tab. 6.6*.

Tab. 6.6 *Výsledky parametrické analýzy*

Varianty	**Měrný tepelný zisk kolektoru [kWh/m^2.rok]**
RK (tloušťka tepelné izolace d_{iz} = 50 mm, emisivita absorbéru $\varepsilon_{abs,p}$ = 0,05, tloušťka přední vzduchové mezery d_p = 30 mm, poměr $(d_z/L)_{opt}$ = 0,0125)	529
Změna tloušťky izolace [mm]	
40	524 (-1 %)
30	518 (-2 %)
20	508 (-4 %)
10	481 (-9 %)
Změna emisivity absorbéru [-]	
0,12	518 (-2 %)
Změna tloušťky přední vzduchové mezery [mm]	
20	517 (-2 %)
10	513 (-3 %)
Optimalizace konstrukce vzduchového kanálu	
$(d_z/L)_{opt}$ = 0,02	545 (+3 %)

Z výsledků simulace je patrné, že optimální hodnota tloušťky izolace se pohybuje mezi 30 a 40 mm. Další navyšování tloušťky izolace až do 50 mm vede pouze k nepatrnému zvyšování zisků. Snižování tloušťky tepelné izolace pod 20 mm vede k významnému snižování tepelných zisků. Rozdíl ve výsledcích v uvažované oblasti tloušťky vzduchové mezery je pouze v řádu procent. V případě zvyšování emisivity nepřesahuje rozdíl ve výsledcích 2 %. Optimalizace konstrukce vzduchového kanálu vede k zvyšování tepelných zisků o 3 %.

Nicméně tyto výsledky nelze uvádět jako obecné, protože optimalizace konstrukce kombinovaného kolektoru byla provedena pro konkrétní kolektor a pro určitou aplikaci kombinovaného kolektoru.

7 ZÁVĚR

Solární tepelné systémy pro energetické zásobování budov mají velký aplikační potenciál. Takové systémy jsou založeny na přímé přeměně nevyčerpatelné sluneční energie dostupné všem a všude. V současné době jsou v podmínkách ČR využívány především systémy s kapalinovými kolektory. Vedle kapalinových solárních kolektorů, které mají své pevné místo na trhu a slouží k ohřevu vody a podpoře vytápění, existují na trhu také solární vzduchové kolektory, které mohou v uzavřeném okruhu nebo ve spojení s větráním zásobovat budovy teplem jako podpora provozu otopných soustav zejména v přechodném a zimním období. V minulosti bylo jejich využití v našich podmínkách vázáno především na zemědělství pro účely sušení plodin a píce. V současnosti se vzduchové solární kolektory využívají spíše jako demonstrační instalace u nízkoenergetických a pasivních rodinných domů pro vytápění a ohřev větracího vzduchu nebo částečně u administrativních objektů (dvojité fasády) pro větrací účely. Zásadní nevýhodou vzduchových solárních kolektorů pro použití v obytných budovách je nerovnováha mezi jejich využitím během roku. Zatímco v zimním období je využití vysoké, avšak přínos nízký, v letním období, kdy solární zisky jsou největší, nemá ohřátý vzduch v budově využití. Za účelem zvýšení využití energetických zisků ze slunečního záření v průběhu celého roku a maximalizace doby provozu solárního systému se vyskytla myšlenka kombinovat oba druhy technologie - ohřev kapaliny a ohřev vzduchu. Takový kombinovaný solární kolektor s použitím dvou teplonosných látek vychází ze situace typické pro mírné a chladné klimatické pásmo, kde je sluneční záření v letním období dostatečné pro přípravu teplé vody, zatímco v zimním období výstupní teploty ze solárních kolektorů nedosahují zpravidla hodnot vyšších než 30 °C, nicméně mohou být stále dostatečné např. pro ohřev chladného větracího vzduchu.

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

7.1 Porovnání dosažených výsledků s uvedenými cíli

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

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

Poté byl vytvořen detailní matematický model vzduchového solárního kolektoru. V současné době model umožňuje modelování následujících druhů vzduchových kolektorů: jednokanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu nad absorbérem, dvoukanálový vzduchový kolektor s prouděním vzduchu pod absorbérem, vzduchový kolektor s oboustranným prouděním.

Model vzduchového kolektoru, stejně jako model kapalinového kolektoru, řeší vnější a vnitřní bilance absorbéru. Výpočet se také provádí iteračním způsobem, přičemž je zřejmé, že modelování vzduchového kolektoru se bude lišit v závislosti na druhu kolektoru. Na začátku iteračního procesu se střední teplota absorbéru odhaduje z teploty na vstupu do kolektoru. Dále se řeší přenos tepla z povrchu absorbéru do okolí. Vzhledem k tomu, že součinitele přestupu tepla a součinitele prostupu tepla byly vypočteny pro odhadnuté teploty, následuje přepočet povrchových teplot. Dále následuje vnitřní bilance, která řeší přenos tepla z povrchu absorbéru do teplonosné tekutiny (proudícího vzduchu). Vzhledem ke složité konstrukci vzduchového kolektoru nabízí model dva způsoby výpočtu – přímá metoda a inverzní metoda. Vstupní, vlastní, volitelné a výstupní parametry vyvinutého modelu vzduchového solárního kolektoru jsou podobné matematickému modelu kapalinového kolektoru (viz 4.2).

V dalším kroku byly vyvinuté modely kapalinového solárního kolektoru a vzduchového solárního kolektoru sloučeny do modelu kombinovaného solárního kolektoru. Je třeba však zdůraznit, že vyvinutý model neuvažuje společné využití kapalinové a vzduchové části kolektoru. V podstatě to znamená, že model kombinovaného kolektoru funguje buď jako kapalinový, nebo jako vzduchový kolektor. Tudíž, kromě výše uvedených vstupních, vlastních, volitelných a výstupních parametrů,

model kombinovaného kolektoru má ještě jeden vstupní parametr – a to je Operating Mode (provozní režim). Pokud Operating mode je roven 0, tak model funguje jako kapalinový kolektor. V případě, že Operating mode je roven 1, model funguje jako vzduchový kolektor.

Na závěr byl vyvinutý model kombinovaného solárního kolektoru implementován do simulačního prostředí TRNSYS. Implementace do simulačního prostředí umožňuje provést celoroční simulace kombinovaného kolektoru zapojeného do solárního systému (vzduchotechnický rozvod, kapalinový rozvod, akumulace atd.)

Experimentální ověření a validace navrženého modelu

Validace vyvinutého matematického modelu kombinovaného kolektoru byla provedena konfrontací experimentálně stanovené účinnosti a účinnosti stanovené matematickým modelem (viz 5.1). Pro validaci byl vytvořen funkční vzorek rozebíratelného kombinovaného kolektoru s přesně definovanými parametry. Konstrukce kolektoru umožňuje řadu konstrukčních změn: tloušťka zadní tepelné izolace, tloušťka přední vzduchové mezery, tloušťka zadní vzduchové mezery a výměna zasklení kolektoru. Díky tomu bylo možné výrazně snížit nejistotu vstupních parametrů jednotlivých částí kolektoru (tepelná vodivost izolace, emisivita přední části absorbéru, propustnost zasklení) zadávaných do modelu a tím zúžit šířku tolerančního pásma. Ve všech případech se experimentálně stanovené body účinnosti nacházely mezi horní a dolní hranicí tolerančního pásma. Model tím popisuje reálné chování solárního kolektoru s dostatečnou přesností v podstatě v rámci chyby experimentálního měření. Kromě toho v rámci detailní validace modelu byla uskutečněna citlivostní analýza volby modelů přestupů tepla dostupných v literatuře.

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

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

Jako referenční varianta (V0) byl zvolen systém solárního ohřevu vody na bázi kombinovaných solárních kolektorů. Přičemž tato variantu uvažuje celoroční provoz kombinovaných kolektorů v režimu ohřevu vody. Ve variantě V1 kombinované solární kolektory pro ohřev dvojice teplonosných látek vzduch/kapalina fungují tak, že v letním období jsou využity pro přípravu teplé vody, zatímco během zimního a přechodného období jsou v provozu jako vzduchové solární kolektory pro ohřev větracího vzduchu.

Ve variantě V1 jsou kombinované kolektory zapojeny před rekuperační jednotkou. Varianta V2 funguje podobný způsobem jako varianta V1 s tím rozdílem, že kombinované kolektory jsou zapojeny až za rekuperační jednotkou. Varianta V3 uvažuje využití kombinovaných kolektorů během zimního a přechodného období pro cirkulační teplovzdušné vytápění (ohřev cirkulačního vzduchu). Vyhodnocování energetických zisků solárních systémů bylo provedeno v simulačním prostředí TRNSYS.

Porovnání variant na bázi kombinovaných kolektorů ukazuje, že použití kombinovaného solárního kolektoru namísto kapalinového kolektoru (kombinovaného kolektoru s celoročním provozem v režimu ohřevu vody) umožňuje zvýšit využitelný tepelný zisk solárního systému. Dalším závěrem je, že tepelný zisk varianty V3 je vyšší než varianty V1 a varianty V2. Svou roli zde hraje skutečnost, že rekuperační jednotka a kombinované kolektory si během zimního a přechodného období navzájem konkurují. Předehříváním vzduchu v kolektoru (V1) se omezuje výkon rekuperační jednotky, protože do ní buď proudí vzduch s vyšší teplotou než je teplota venkovního vzduchu, nebo neproudí vzduch vůbec (bypass), když je teplota vzduchu na výstupu z kolektoru vyšší než 18 °C. Co se týká varianty V2, tak předehříváním vzduchu v rekuperační jednotce se snižuje účinnost kombinovaného kolektoru tím, že do něj proudí vzduch s vyšší teplotou, čímž se zvyšují tepelné ztráty kolektoru. Kromě toho průtok vzduchu ve variantě V3 je čtyřikrát větší než ve variantách V1 a V2 (400 m3/h oproti 100 m3/h). Vzhledem k významné závislosti účinnosti vzduchových kolektorů na průtoku vzduchu kolektorem, provozní účinnost kombinovaných kolektorů ve variantě V3 je vyšší než ve variantách V1 a V2.

Pro daný konkrétní případ a dané klimatické podmínky bylo zjištěno:

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

7.2 Přínos pro praxi

Jednoznačným přínosem pro praktické využití je vytvořený matematický model kombinovaného kolektoru, matematický model kapalinového kolektoru a matematický model vzduchového kolektoru (viz 4). Vytvořené modely jsou následně implementovány do simulačního prostředí TRNSYS a jsou k dispozici na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Modely je možné využít pro provedení citlivostních analýz vlivu základních parametrů kolektoru na jeho celoroční provoz v různých provozních podmínkách a různých klimatech. Jde především o analýzy vlivu použitého materiálu a geometrie absorbéru (plastové x kovové), optimálního průtoku systémem (low-flow x high-flow systémy) či vlivu sklonu solárního kolektoru na velikost a průběh celoročních zisků (střešní x fasádní kolektory).

Nezanedbatelným praktickým přínosem je i funkční vzorek modulárního kombinovaného solárního kolektoru (viz 5.1). Ani na tuzemském ani na zahraničním trhu nejsou v současné době k dispozici kombinované solární kolektory. Vzhledem k absenci kombinovaných solárních kolektorů ani na tuzemském ani na zahraničním trhu byl pro účely disertační práce vytvořen funkční vzorek kombinovaného solárního kolektoru. V současné době kombinovaný kolektor nabízí dva různé režimy proudění vzduchu. Prvním režimem proudění je proudění vzduchu ve vzduchové mezeře mezi absorbérem a zadní izolací kolektoru (plochý absorbér). Druhým režimem je oboustranné proudění vzduchu podél absorbéru ve dvou variantách absorbéru: děrovaný a lamelový. Kromě toho, funkční vzorek kombinovaného kolektoru může být využit pro detailní validace jakéhokoli dalšího matematického modelu kombinovaného, kapalinového nebo vzduchového solárního kolektoru. Toto zařízení umožňuje měnit konstrukční parametry solárního kolektoru: tloušťka zadní tepelné izolace (10 až 50 mm), výměna zasklení kolektoru, tloušťka vzduchové mezery mezi zasklením a absorbérem (10 až 30 mm), změna typu a parametrů absorbéru. Testováním výkonu jednotlivých nastavených variant solárního kolektoru je možné sledovat vliv konstrukčních parametrů na výkonnost solárního kolektoru. Zároveň, vzhledem ke znalosti vlastností použitých materiálů s nízkou nejistotou bylo dosáhnuto výrazného snížení nejistoty vstupních parametrů.

Praktickým přínosem je také vybudovaná testovací trať na zkoušení vzduchových kolektorů (poloprovoz) (viz 5.2.2). V současné době existuje na tuzemském a zahraničním trhu velké množství solárních vzduchových kolektorů, kde dodavatelé ke každému z nich musí uvádět technické parametry. Na rozdíl od kapalinových kolektorů však dlouhou dobu v Evropě neexistovala standardizovaná metoda zkoušení vzduchových kolektorů. V roce 2014, v rámci přechodu ze zkušební normy ČSN EN 12975-2 na ČSN EN ISO 9806, došlo k zavedení metod zkoušení i pro vzduchové kolektory. Testovací trať může tudíž posloužit pro zkoušení vzduchových solárních kolektorů, které jsou na trhu a nemají vyzkoušené technické parametry. Kromě toho v současné době neexistuje jiné pracoviště v ČR, které by mělo k dispozici obdobné zařízení. Na trhu v ČR se takové zařízení nevyskytuje. Zároveň, zkoušky solárních kolektorů v Solární laboratoři SOLAB^2 v UCEEB ČVUT jsou akreditované.

7.3 Teoretický přínos

Byl jednoznačně určen potenciál využití kombinovaných solárních kolektorů. Bylo prokázáno, že při různých klimatických podmínkách i různé energetické náročnosti, mají systémy na bázi kombinovaných solárních kolektorů větší využitelný solární zisk ve srovnání s referenčním systémem na bázi kombinovaných solárních kolektorů s celoročním provozem v režimu ohřevu vody (viz 6.1.2).

Podstatným teoretickým přínosem je analýza nejistoty stanovených hodnot účinnosti, viz kapitola 5.2.6, pro zohlednění vlivu nejistoty měření na skutečný zisk solárního systému. Jedná se o to, že v současné době technický protokol o zkoušce solárního kolektoru neobsahuje vypočtenou nejistotu účinnostních parametrů solárního kolektoru (norma pouze doporučuje uvádět vypočtenou nejistotu účinnostních parametrů solárního kolektoru). Nicméně analýza poukázala na zásadní vliv nejistoty naměřených hodnot účinnosti na reálný zisk vysokoteplotních solárních systémů.

Kromě toho, teoretickým přínosem je i teoretická analýza vlivu konstrukčních parametrů kombinovaného solárního kolektoru na jeho výkonnost (viz 6.2.2). Výsledky pro uvažované varianty poukázaly na možnost navrhování kombinovaného solárního kolektoru s nižšími investičními náklady, avšak s prakticky stejnou energetickou kvalitou.

Dalším nezanedbatelným teoretickým přínosem je inverzní metodika výpočtu výkonu vzduchové části kombinovaného solárního kolektoru. V případě složité konstrukce vzduchové části solárního kolektoru (děrovaný nebo lamelový absorbér) neumožňuje přímá metoda výpočtu přesné stanovení výkonu solárního kolektoru. V tomto případě lze využít inverzní metodu stanovení výkonu vzduchové části kombinovaného kolektoru (viz 4.2.2.2).

7.4 Návrhy pro další směřování práce

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

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

Model kombinovaného solárního kolektoru může být dále rozšířen a použit pro noční chlazení. V současné době se věnuje značná pozornost výzkumu nočního

chlazení jako nízkoenergetickému způsobu zajištění pokrytí potřeby chladu v budovách. Systém na bázi kombinovaných kolektorů umožní efektivní snížení spotřeby energie na chlazení a u některých budov mohou dokonce za jistých podmínek zcela zastoupit konvenční chladicí systémy. Zvýšení provozní doby kombinovaného solárního kolektoru a následné zvýšení využitelného tepelného zisku může přispět k jejich konkurenceschopnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] World Energy Outlook 2018 [online]. IEA, 2018 [cit. 2020-07-25]. World Energy Outlook, IEA, Paris. DOI: 10.1787/weo-2018-en. ISBN 9789264064522.

[2] ROMMEL, M. a A. WAGNER. Application of transparent insulation materials in improved flat-plate collectors and integrated collector storages. Solar Energy [online]. 1992, **49**(5), 371-380 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0038-092X(92)90109-N. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X9290109N.

[3] REDDY, K.S. a N.D. KAUSHIKA. Comparative study of transparent insulation materials cover systems for integrated-collector-storage solar water heaters. Solar Energy Materials and Solar Cells [online]. 1999, **58**(4), 431-446 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00018-5. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024899000185

[4] HUM, J.E.Y., K.G.T. HOLLANDS a J.L. WRIGHT. Analytical model for the thermal conductance of double-compound honeycomb transparent insulation, with validation. Solar Energy [online]. 2004, **76**(1-3), 85-91 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2003.07.034. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X03003517

[5] ABDULLAH, A.H., H.Z. ABOU-ZIYAN a A.A. GHONEIM. Thermal performance of flat plate solar collector using various arrangements of compound honeycomb. Energy Conversion and Management [online]. 2003, **44**(19), 3093-3112 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00013-X. ISSN 01968904. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019689040300013X

[6] NORDGAARD, A. a W.A. BECKMAN. Modelling of flat-plate collectors based on monolithic silica aerogel. *Solar Energy* [online]. 1992, **49**(5), 387-402 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0038-092X(92)90111-M. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X9290111M

[7] BENZ, N., T. BEIKIRCHER a B. AGHAZADEH. Aerogel and krypton insulated evacuated flat-plate collector for process heat production. *Solar Energy* [online]. 1996, **58**(1-3), 45-48 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0038-092X(96)00007-2. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X96000072

[8] SVENDSEN, S. Solar collector with monolithic silica aerogel. *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 1992, **145**, 240-243 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/S0022-3093(05)80464-8. ISSN 00223093. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309305804648.

[9] KESSENTINI, H., J. CASTRO, R. CAPDEVILA a A. OLIVA. Development of flat plate collector with plastic transparent insulation and low-cost overheating protection system. *Applied Energy* [online]. 2014, **133**, 206-223 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.093. ISSN 03062619. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914007843

[10] MARTÍNEZ, A., D. ASTRAIN, A. RODRÍGUEZ a P. ARANGUREN. Thermoelectric Self-Cooling System to Protect Solar Collectors from Overheating. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2014, **43**(6), 1480-1486 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1007/s11664-013-2743-4. ISSN 0361-5235. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11664-013-2743-4

[11] RESCH, K. a G. M. WALLNER. Thermotropic layers for flat-plate collectors—A review of various concepts for overheating protection with polymeric materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2009, **93**(1), 119-128 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.09.004. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024808002766

[12] WEBER, A. a K. RESCH. Thermotropic glazings for overheating protection. *Energy Procedia* [online]. 2012, **30**, 471-477 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.056. ISSN 18766102. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187661021201572X

[13] NITZ, P. a H. HARTWIG. Solar control with thermotropic layers. *Solar Energy* [online]. 2005, **79**(6), 573-582 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2004.12.009. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X05000277

[14] GIOVANNETTI, F., M. KIRCHNER, G. ROCKENDORF a O. KEHL. Cellulose Triacetate Honeycomb Compounds for Improved Flat-Plate Collectors: Performance and Reliability. In: *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2011* [online]. Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2011, 2011, s. 1-8 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.18086/swc.2011.19.15. ISBN 978-3-9814659-0-7. Dostupné z: http://proceedings.ises.org/citation?doi=swc.2011.19.15

[15] KALOGIROU, S., Y. TRIPANAGNOSTOPOULOS a M. SOULIOTIS. Performance of solar systems employing collectors with colored absorber. *Energy and Buildings* [online]. 2005, **37**(8), 824-835 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.10.011. ISSN 03787788. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778804003445

[16] BANESHI, M., S. MARUYAMA a A. KOMIYA. Comparison between aesthetic and thermal performances of copper oxide and titanium dioxide nano-particulate coatings. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [online]. 2011, **112**(7), 1197-1204 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.08.032. ISSN 00224073. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002240731000350X

[17] WEISS, W. a I. Stadler. Facade integration - A new and promissing oportunity for thermal solar collectors.In:Proceedings of *IEA-SHC Task 26 - Industry Workshop* [online]. Delft, Netherlands: IEA, 2011, s. 59-63 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: http://www.task7.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task26-proceedings-delft.pdf#page=59

[18] OREL, Z. C., M. K. GUNDE a M. G. HUTCHINS. Spectrally selective solar absorbers in different non-black colours. *Solar energy materials and solar cells*. 2005, **85**(1), 41–50 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2004.04.010. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024804002016

[19] WU, Y., W. ZHENG, L. LIN, Y. QU a F. LAI. Colored solar selective absorbing coatings with metal Ti and dielectric AlN multilayer structure. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2013, **115**, 145-150 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.03.041. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024813001621

[20] ZHU, D. a S. ZHAO. Chromaticity and optical properties of colored and black solar–thermal absorbing coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2010, **94**(10), 1630-1635 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.05.019. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024810003016

[21] JAPELJ, B., A. Š. VUK, B. OREL, L. S. PERŠE, I. JERMAN aj. KOVAČ. Preparation of a TiMEMO nanocomposite by the sol–gel method and its application in coloured thickness insensitive spectrally selective (TISS) coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2008, **92**(9), 1149-1161 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.04.003. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024808001396

[22] OREL, B., H. SPREIZER, A. Š. VUK, M. FIR, D. MERLINI, M. VODLAN a M. KÖHL. Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II). *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2007, **91**(2-3), 108-119 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.07.012. ISSN 09270248. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024806003473

[23] DUTA, A., L. ISAC, A. MILEA, E. IENEI a D. PERNIU. Coloured Solar-thermal Absorbers – A Comparative Analysis of Cermet Structures. *Energy Procedia* [online]. 2014, **48**, 543-553 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.02.064. ISSN 18766102. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214003269

[24] CHEN, G., K. SHESTOPALOV, A. DOROSHENKO a P. KOLTUN. Polymeric Materials for Solar Energy Utilization: A Comparative Experimental Study and Environmental Aspects. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* [online]. 2015, **54**(8), 796-805 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1080/03602559.2014.974185. ISSN 0360-2559. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03602559.2014.974185

[25] RHODES, Richard O. Polymer Thin-Film Design Reduces Installed Cost of Solar Water Heater. In: *Proceedings of the 39th ASES national Solar Conference*. 2010. s. 17-22.

[26] HARRISON, S. a C. A. CRUICKSHANK. A review of strategies for the control of high temperature stagnation in solar collectors and systems. *Energy Procedia* [online]. 2012, **30**, 793-804 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.090. ISSN 18766102. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212016062

[27] KÖHL, M. et al. (ed.). *Polymeric materials for solar thermal applications*. John Wiley & Sons, 2012.

[28] MEIR, M., et al. Polymeric solar collectors - state of the art. In: *1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EUROSUN 2008)*. Portugal: Sociedade Portuguesa De Energia Solar (SPES), 2008. s. 1-10.

[29] KLEIN, A., G. ORESKI a K. RESCH-FAUSTER. Applicability of technical biopolymers as absorber materials in solar thermal collectors. *Solar Energy* [online]. 2017, **153**, 276-288 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2017.05.069. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17304668

[30] YANG, Y., S. CAO, J. XU a B. CAI. All-ceramic solar collectors. *Ceramics International* [online]. 2013, **39**(5), 6009-6012 [cit. 2020-08-28]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.01.011. ISSN 02728842. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884213000424

[31] SUN, X., X.-D. SUN, X.-G. LI, Z.-Q. WANG, J. HE a B.-S. WANG. Performance and building integration of all-ceramic solar collectors. *Energy and Buildings* [online]. 2014, **75**, 176-180 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.01.045. ISSN 03787788. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814000942

[32] XU, J., Y. YANG, B. CAI, Q. WANG a D. XIU. All-ceramic solar collector and all-ceramic solar roof. *Journal of the Energy Institute* [online]. 2014, **87**(1), 43-47 [cit. 2020-08-28]. DOI: 10.1016/j.joei.2014.02.005. ISSN 17439671. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1743967114000075

[33] KALOGIROU, S. A. *Solar energy engineering: processes and systems*. Second edition. Academic Press, 2013.

[34] MOHAMAD, A.A. High efficiency solar air heater. *Solar Energy* [online]. 1997, **60**(2), 71-76 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/S0038-092X(96)00163-6. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X96001636

[35] ALDABBAGH, L.B.Y., F. EGELIOGLU a M. ILKAN. Single and double pass solar air heaters with wire mesh as packing bed. *Energy* [online]. 2010, **35**(9), 3783-3787 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.energy.2010.05.028. ISSN 03605442. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210002987

[36] OMOJARO, A.P. a L.B.Y. ALDABBAGH. Experimental performance of single and double pass solar air heater with fins and steel wire mesh as absorber. *Applied Energy* [online]. 2010, **87**(12), 3759-3765 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.020. ISSN 03062619. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261910002473

[37] WANG, Y., M. BOULIC, R. PHIPPS, M. PLAGMANN a C. CUNNINGHAM. Experimental Performance of a Solar Air Collector with a Perforated Back Plate in New Zealand. *Energies* [online]. 2020, **13**(6) [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.3390/en13061415. ISSN 1996-1073. Dostupné z: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/6/1415

[38] KARIM, M. a M. HAWLADER. Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors. *Energy* [online]. 2006, **31**(4), 452-470 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.energy.2005.03.007. ISSN 03605442. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544205000605

[39] KABEEL, A.E., M..H. HAMED, Z.M. OMARA a A.W. KANDEL. On the performance of a baffled glazed-bladed entrance solar air heater. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2018, **139**, 367-375 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.141. ISSN 13594311. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431117363718

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

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

[42] NEMATOLLAHI, O., P. ALAMDARI a M. R. ASSARI. Experimental investigation of a dual purpose solar heating system. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, **78**, 359-366 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.10.046. ISSN 01968904. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019689041300681X

[43] MOHAJER, Alireza, Omid NEMATOLLAHI, Mahmood Mastani JOYBARI, Seyed Ahmad HASHEMI a Mohammad Reza ASSARI. Experimental investigation of a Hybrid Solar Drier and Water Heater System. *Energy Conversion and Management* [online]. 2013, **76**, 935-944 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.047. ISSN 01968904. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890413005219

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

[45] JI, J., C. LUO, T.-T. CHOW, W. SUN a W. HE. Thermal characteristics of a building-integrated dual-function solar collector in water heating mode with natural circulation. *Energy* [online]. 2011, **36**(1), 566-574 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.004. ISSN 03605442. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210005633

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

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

[48] HU, Z., B. LUO, W. HE, D. HU, J. JI a J. MA. Performance study of a dual-function roof solar collector for Chinese traditional buildings application. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2018, **128**, 179-188 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.019. ISSN 13594311. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431117314655

[49] HOTTEL, H. a B. WOERTZ. Performance of flat-plate solar-heat collectors. *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.).* 1942, **64**, 91–104.

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

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

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

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

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

[55] MCADAMS, W. H. *Heat Transmission 3d Ed*. New York: McGraw-Hill, 1954.

[56] Watmuff, J. H., W. W. S. Charters a D. Proctor. Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Cooperation Mediterraneenne pour l'Energie Solaire, Revue Internationale d'Heliotechnique*. 1977, **2**, 56.

[57] TEST, F. L. a R. C. LESSMANN. An Experimental Study of Heat Transfer During Forced Convection over a Rectangular Body. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1980, **102**(1), 146-151 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1115/1.3244226. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/102/1/146/413696/An-Experimental-Study-of-Heat-Transfer-During

[58] TEST, F. L., R. C. LESSMANN a A. JOHARY. Heat Transfer During Wind Flow over Rectangular Bodies in the Natural Environment. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1981, **103**(2), 262-267 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1115/1.3244451. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/103/2/262/410101/Heat-Transfer-During-Wind-Flow-over-Rectangular

[59] KUMAR, S., V.B. SHARMA, T.C. KANDPAL a S.C. MULLICK. Wind induced heat losses from outer cover of solar collectors. *Renewable Energy* [online]. 1997, **10**(4), 613-616 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/S0960-1481(96)00031-6. ISSN 09601481. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148196000316

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

[61] HOLLANDS, K. G. T., T. E. UNNY, G. D. RAITHBY a L. KONICEK. Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1976, **98**(2), 189-193 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1115/1.3450517. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/98/2/189/382531/Free-Convective-Heat-Transfer-Across-Inclined-Air

[62] BUCHBERG, H., I. CATTON a D. K. EDWARDS. Natural Convection in Enclosed Spaces—A Review of Application to Solar Energy Collection. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1976, **98**(2), 182-188 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1115/1.3450516. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/98/2/182/382495/Natural-Convection-in-Enclosed-SpacesA-Review-of

[63] RANDALL, K. R., J. W. MITCHELL a M. M. EL-WAKIL. Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Enclosures. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1979, **101**(1), 120-125 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1115/1.3450901. ISSN 0022-1481. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/101/1/120/413202/Natural-Convection-Heat-Transfer-Characteristics

[64] SCHINKEL, W. *Natural concection in inclined air-filled enclosures*. Delft, Netherlands: Dutch Efficiency Bureau - Pijnacker, 1980. ISBN 90 6231 079 6.

[65] NIEMANN, H. Die Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in spaltförmigen Hohlräumen. *Gesundheits-Ingenieur*. 1948, **69**, 224–228.

[66] MATUSKA, T. a V. ZMRHAL. *A mathematical model and design tool KOLEKTOR 2.2 reference handbook*. Praha: Czech Technical Universtity in Prague, 2009.

[67] SHAH, R. K. a A. L. LONDON. *Lanimar flow forced convection in duts: a source book for compact heat exchanger analytical data*. USA, New York: Academic press, 1978.

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

[69] HAUSEN, H. Darstellung des Warmeuberganges in Rohren durch verallgemeinerte Potenzbeziehungen. *Z. VDI Beih. Verfahrenstech*. 1943, **4**, 91–98.

[70] SIEDER, E. N. a G. E. TATE. Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. *Industrial & Engineering Chemistry* [online]. 1936, **28**(12), 1429-1435 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1021/ie50324a027. ISSN 0019-7866. Dostupné z: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50324a027

[71] CHURCHILL, S. W. a H. H. S. CHU. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1975, **18**(11), 1323-1329 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90243-4. ISSN 00179310. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0017931075902434

[72] DITTUS, F. W. a L. M. K. BOELTER. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1985, **12**(1), 3-22.

[73] PETUKHOV, B S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties. *Advances in heat transfer*. 1970, **6**, 503–564.

[74] GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *Int. Chem. Eng.* 1976, **16**(2), 359–368.

[75] SLEICHER, C.A. a M.W. ROUSE. A convenient correlation for heat transfer to constant and variable property fluids in turbulent pipe flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1975, **18**(5), 677-683 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0017-9310(75)90279-3. ISSN 00179310. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0017931075902793

[76] BRANDEMUEHL, M.J. a W.A. BECKMAN. Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings. *Solar Energy* [online]. 1980, **24**(5), 511-513 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0038-092X(80)90320-5. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X80903205

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

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

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

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

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

[82] KAYS, W. M. a M. E. CRAWFORD. *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd edition. USA, New York: McGraw-Hill, 1980.

[83] TAN, H.M. a W.W.S. CHARTERS. Effect of thermal entrance region on turbulent forced-convective heat transfer for an asymmetrically heated rectangular duct with uniform heat flux. *Solar Energy* [online]. 1969, **12**(4), 513-516 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/0038-092X(69)90072-3. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0038092X69900723

[84] NUSSELT, W. Der Wärmeaustausch zwischen Wand und Wasser im Rohr. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* [online]. 1931, **2**(9), 309-313 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1007/BF02583210. ISSN 0015-7899. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF025832100

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

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

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

[88] DIETRICH, C. *Uncertainty, Calibration and Probability: The Adam Hilger Series on Measurement Science and Technology* [online].Great Britain: Taylor & Francis Group, 2017 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1201/9780203734759. ISBN 978-0-7503-0060-5.

[89] PRESS, W. H., S. A. TEUKOLSKY, B. P. FLANNERY a W. T. VETTERLING. *Numerical recipes in Fortran 77: volume 1, volume 1 of Fortran numerical recipes: the art of scientific computing*. Great Britain: Cambridge university press, 1992.

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

[91] JIS A 1423:1983. *Simplified Test Method for Emissivity by Infrared Radio Meter*. Japanese Standards Association, 1983.

[92] ASTM E 424-71:2007. *Standard Test Methods for Solar Energy Transmittance and Reflectance (Terrestrial) of Sheet Materials.* ASTM Internationa, 2007.

[93] MATUŠKA, T., V. ZMRHAL a J. METZGER. Detailed Modeling Of Solar Flat-Plate Collectors With Design Tool Kolektor 2.2. In: *BUILDING SIMULATION 2009*. Glasgow, 2009-07-27/2009-07-30. Glasgow: IBPSA - Glasgow, 2009. s. 2289-2296. ISBN 978-0-947649-40-1.

[94] KREITH, F., R. M. MANGLIK a M. S BOHN. *Principles of heat transfer*. 7th edition. USA, Stamford: Cengage learning, 2012.

[95] CHURCHILL, S. W. a H. OZOE. Correlations for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in an isothermal tube. *Journal of Heat Transfer*. 1973, **95**(3), 416–419.

[96] MATUŠKA, T. a B. ŠOUREK. Revize TNI 73 0302 pro zjednodušené hodnocení solárních tepelných soustav. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, **23**(4), 184-188. ISSN 1210-1389.

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

[98] ČSN EN 12975-2. *Tepelné solární soustavy a součásti-Solární kolektory-Část 2: Zkušební metody*. ČNI, 2006.

[99] FISCHER, S., W. HEIDEMANN, H. MÜLLER-STEINHAGEN, B. PERERS, P. BERGQUIST a B. HELLSTRÖM. Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. *Solar Energy* [online]. 2004, **76**(1-3), 117-123 [cit. 2020-07-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2003.07.021. ISSN 0038092X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X03002901

[100] HALLER, M. et al. *TRNSYS Type 832 v5.00 „Dynamic Collector Model by Bengt Perers “: Updated Input-Output Reference*. Denmark: DTU, 2012.

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

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

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

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

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

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

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

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

PUBLIKACE AUTORA – SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRÁCÍ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

PUBLIKACE AUTORA – PŘÍMO NESOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRÁCÍ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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