



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**Porovnání solárních tepelných kolektorů a
tepelného čerpadla poháněného solární
fotovoltaikou z hlediska produkce tepelné energie**

Comparison of solar thermal collectors and a heat pump powered by solar photovoltaics in terms of thermal energy production

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Oksana Kuznetsova

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Charvát,
Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Bc. Oksana Kuznetsova
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Porovnání solárních tepelných kolektorů a tepelného čerpadla poháněného solární fotovoltaikou z hlediska produkce tepelné energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Solární tepelné kolektory se ve velkém měřítku používají už desítky let. Mezinárodní energetická agentura odhaduje, že na konci roku 2019 bylo na celém světě instalováno 684 milionů metrů čtverečních solárních tepelných kolektorů, které za rok vyprodukovaly 389 TWh tepelné energie a tím přispěly ke snížení emisí oxidu uhličitého o 135 milionů tun. V posledním desetiletí se místo solárních tepelných kolektorů dostala do popředí zájmu konverze slunečního záření na elektrickou energii pomocí fotovoltaických panelů. Elektrická energie má mnohem univerzálnější použití než tepelná energie produkovaná tepelnými solárními kolektory. Elektrickou energii z fotovoltaických panelů lze však v případě potřeby přeměnit na teplo pomocí tepelných čerpadel.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je pomocí počítačové simulace porovnat množství tepelné energie produkované solárními tepelnými kolektory s produkcí tepelné energie pomocí tepelného čerpadla poháněného elektrickou energií z fotovoltaických panelů. Porovnání bude provedeno pro stejnou plochu solárních kolektorů a fotovoltaických panelů s uvažováním různých provozních podmínek.

Seznam doporučené literatury:

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley, 1980.

VOS, A. Thermodynamics of solar energy conversion. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-40841-2.

GEVORKIAN, P. Solar power in building design: the engineer's complete design resource. New York: McGraw-Hill, c2008. ISBN 0-07-148563-5.

TERESA PINTANEL, M., MARTÍNEZ-GRACIA, A., UCHE, J., DEL AMO, A., BAYOD-RÚJULA, A., USÓN, S., ARAUZO, I. Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2022, 213. ISSN 13594311.

WANG, Q., ZHANG, X., ZHANG, H., MA, Y., ZHAO, S. Optimization of solar-assisted GWHP system based on the Tmsys model in cold regions. *Renewable Energy* [online]. 2022, 196, 1406-1417. ISSN 09601481.

ALSHIBIL, A.M.A., FARKAS, I., VÍG, P. Multi-aspect approach of electrical and thermal performance evaluation for hybrid photovoltaic/thermal solar collector using TRNSYS tool. *International Journal of Thermofluids* [online]. 2022, 16. ISSN 26662027.

MAHJOOB, A., AHMADI, P., AFSANEH, H., VOJDANI M., MORTAZAVI, M. System sizing and transient simulation of a solar photovoltaic off-grid energy system in various climates with air heat pumps. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [online]. 2022, 54. ISSN 22131388.

TRNSYS v. 18 user's manual.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V poslední době narůstá tlak na snížení energetické náročnosti budov. Jedním způsobem, jak se dá omezit výroba energie z fosilních zdrojů je využití obnovitelných zdrojů. Cílem této práce je porovnat 2 systémy pro výrobu teplé vody. Jedná se o porovnání tepelných zisků ze solárních kolektorů se zisky tepelného čerpadla, poháněného fotovoltaickými panely.

Tyto systémy budou porovnány za pomoci simulačního programu TRNSYS. Bude provedena parametrická studie. Na simulačních modelech se ukáže vliv jednotlivých faktorů pro zmíněné systémy.

Klíčová slova

Solární kolektory, fotovoltaika, tepelné čerpadlo, TRNSYS

ABSTRACT

Lately there is a growing pressure on reducing energy demand of households. One way to limit energy production from fossil fuels is using sustainable energy sources. Aim of this paper is to compare 2 systems for production of hot water. It involves comparison of energy gains from solar collectors with gains from heat pump powered by photovoltaic pannels.

These systems will be compared by using simulation programm TRNSYS. Parametric study will be done. Effect of each factor for these systems will be shown on simulation models

Key words

Solar collectors, photovoltaic, heat pump, TRNSYS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUZNETSOVA, Oksana. Porovnání solárních tepelných kolektorů a tepelného čerpadla poháněného solární fotovoltaikou z hlediska produkce tepelné energie [online]. Brno. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150002>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Charvát.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Porovnání solárních tepelných kolektorů a tepelného čerpadla poháněného solární fotovoltaikou z hlediska produkce tepelné energie** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji doc. Charvátovi za jeho cenné připomínky k tématu a zpětnou vazbu na konzultacích.

Děkuji škole za vyslání mě na Erasmus, kde jsem poznala Alessandra Rossi, jehož šílené nápady tvoří úsměv na lidech okolo, ať už z radosti nebo z děsu. Tak podobně, jak jeho poděkování, delší než závěr, ve svých závěrečných pracích, zanechalo stopy na mně.

Děkuji své rodině, díky které nemusím schovávat své názory v obavách o život. Že můžu žít ve svobodné zemi, baštit bun bo nam bo, vařit pivo a běhat po horách v sandálech s ponožkami. Za to, že o mně mají starost a snaží se být nejlepší.

Děkuji společnosti BRES, která mě přijala v době nejhorší do své rodiny a obzvlášť Ondřeji Matušů, který mě neustále nutí přemýšlet a zlepšovat se ve směrech, které se mi zdají nemožné.

Děkuji Alexandře Sladkové za dopování kávou a vytvoření zvyků, kvůli kterému jsem byla schopna psát diplomovou práci. Děkuji, že je mým vzorem a stále mě motivuje k větším věcem.

Děkuji budoucí Ing. Julči za její odvalu dělat všechno naráz a nikdy se nevzdávat. Za její schopnost najít zkratku do cíle, která nikdy kratší není, zato veselejší je vždycky.

Největší poděkování patří Ing. Michalovi za nekonečnou podporu v kritizování TRNSYSu za tečky, které se objevovali neustále při změně časového kroku. Děkuji, že v době mých nejednodenních bitev s nastavováním zásobníku v TRNSYSu, bavit Rannyho, i přes to, že psí návrat bývá často velmi bolestivý. Děkuji, za víru v to, že zvládnou překonat jakoukoliv překážku a jen tak se před něčím nevzdám.

Musíme vytvářet to nejlepší, co umíme, i přes to, že v tom bude rebelství. Když se toho budeme bát, vrchol existence zůstane v nedohlednutí.

„Raději budu optimistou a bláznem než pesimistou, který se nemýlí.“ Albert Einstein

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Solární energie a její využití	12
1.1 Solární kolektory.....	12
1.1.1 Druhy solárních kolektorů.....	13
1.1.2 Výkon a účinnost solárního kolektoru.....	14
1.1.3 Závislost na průtoku	15
1.2 Fotovoltaické panely	15
1.2.1 Druhy fotovoltaických článků a jejich účinnost.....	16
1.2.2 Výkon a účinnost fotovoltaických systému	17
1.3 Teoretický potenciál.....	18
1.4 Orientace a úhel solárních kolektorů a fotovoltaických panelů.....	19
2 Tepelná čerpadla	20
2.1 Druhy tepelných čerpadel	20
2.2 Topný faktor	21
3 Příklady.....	22
3.1 Drake Landing, Canada	22
3.2 Silkeborg, Dánsko	23
3.3 Vojens, Dánsko	24
3.4 Odense, Dánsko.....	24
3.5 SAKO, Brno.....	25
3.6 Helsinky, Finsko	26
4 Faktory hodnocení	27
5 TRNSYS model.....	28
5.1 Zvolené technologie.....	28
5.1.1 Solární kolektor Regulus.....	28
5.1.2 Fotovoltaický solární panel.....	29
5.1.3 Tepelné čerpadlo vzduch voda.....	30
5.2 Zvolené moduly	31
6 Parametrická studie.....	32
6.1 Závislost parametrů kolektoru na vstupní teplotě vody.....	33
6.2 Závislost parametrů na průtoku	33
6.3 Závislost parametrů na intenzitě slunečního záření	34
6.4 Závislost parametrů na venkovní teplotě.....	35
7 Simulace.....	39
7.1 Počasí	39
7.2 Časový krok	39
7.3 Obecný popis simulace	39
7.3.1 Soustava solárních kolektorů.....	39

7.3.2	Soustava fotovoltaika-tepelné čerpadlo.....	40
7.4	Zatížení.....	41
7.5	Zásobník.....	42
7.5.1	Vliv počáteční teploty zásobníku	42
7.5.2	Vliv objemu zásobníku.....	43
7.6	Zhodnocení.....	45
7.7	Změna počtu lidí v domácnosti.....	50
8	Ztráty	52
8.1	Porovnání soustavy se ztrátami a bez ztrát pro 16 osob	53
8.2	Simulace ztráty 16 osob	54
	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
	SEZNAM TABULEK.....	65

ÚVOD

Vytápění a ohřev teplé vody mají největší podíl na spotřebě energie v domácnostech Česku. Podle údajů Českého statistického úřadu z roku 2022 tvoří vytápění 67 % a ohřev teplé vody 16 % celkové spotřeby energie (celkem 83 %) [1]. V Evropě, podle dat z roku 2020, představuje spotřeba energie na vytápění a ohřev vody 62,8 % a 15,1 % (celkově 77,9 %) [2].

Trend využívání obnovitelných zdrojů energie stále roste, což se odráží i v prodeji solárních kolektorů. V roce 2021 se prodej solárních kolektorů zvýšil o 3 % a celková solární tepelná kapacita dosáhla 522 GWth, což odpovídá 746 milionům metrů čtverečních kolektorové plochy. V roce 2020 byly nejčastěji instalovaným typem solárních kolektorů evakuované trubkové kolektory (60 % nově instalovaného výkonu). Následovaly je ploché kolektory s podílem 34 %. Celosvětové výnosy solární tepelné energie ze všech instalovaných solárních tepelných systémů v roce 2021 odpovídaly úspoře 45,7 milionů tun ropy a snížení emisí CO₂ o 147,5 milionů tun, což ukazuje významný přínos solárního tepla k snížení globálních skleníkových plynů. Solární tepelné systémy byly zodpovědné za dodání 425 TWh tepla v roce 2021. [3]

Podle mezinárodní energetické agentury IEA (International Energy Agency) se výroba energie z fotovoltaických panelů v roce 2021 zvýšila o rekordních 179 TWh (o 22 %) a dosáhla 1 002,9 TWh. Solární fotovoltaika se na celosvětové výrobě elektřiny podílela 3,6 % a zůstává třetí největší technologií výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů po vodní a větrné energii. Pro dosažení uhlíkové neutrality je v 2030 plánována celková instalovaná kapacita PV na 7414 TWh, což je víc než sedminásobný nárůst oproti současnému stavu. [4]

Tepelná čerpadla jsou stále více považována za klíčovou technologii pro uhlíkově neutrální vytápění a v posledních letech se jim dostává stále větší politické podpory. V roce 2021 byl zaznamenán rekordně vysoký růst prodeje tepelných čerpadel zejména v Evropě, Číně a Spojených státech [5]. V roce 2021 se prodeje tepelných čerpadel celosvětově zvýšily o více než 13 % [5]. V Evropské unii prodej meziročně vzrostl o přibližně 35 % a přesáhl 2,2 milionu kusů [5]. V České republice bylo v roce 2021 dodáno 6 tisíc tepelných čerpadel, což znamená nárůst o 25 % oproti roku 2020. Většina z nich byla typu vzduch-voda (94 %) [6]. Tepelná čerpadla pokrývají přibližně 10 % celosvětové potřeby tepla v budovách [5]. Podle scénáře pro uhlíkovou neutralitu dosáhne celosvětový počet tepelných čerpadel do roku 2030 přibližně 600 milionů kusů, což pokryje nejméně 20 % celosvětové potřeby tepla [5]. Navíc se efektivita tepelných čerpadel neustále zlepšuje a výroba elektřiny je čím dál méně uhlíkově náročná [5].

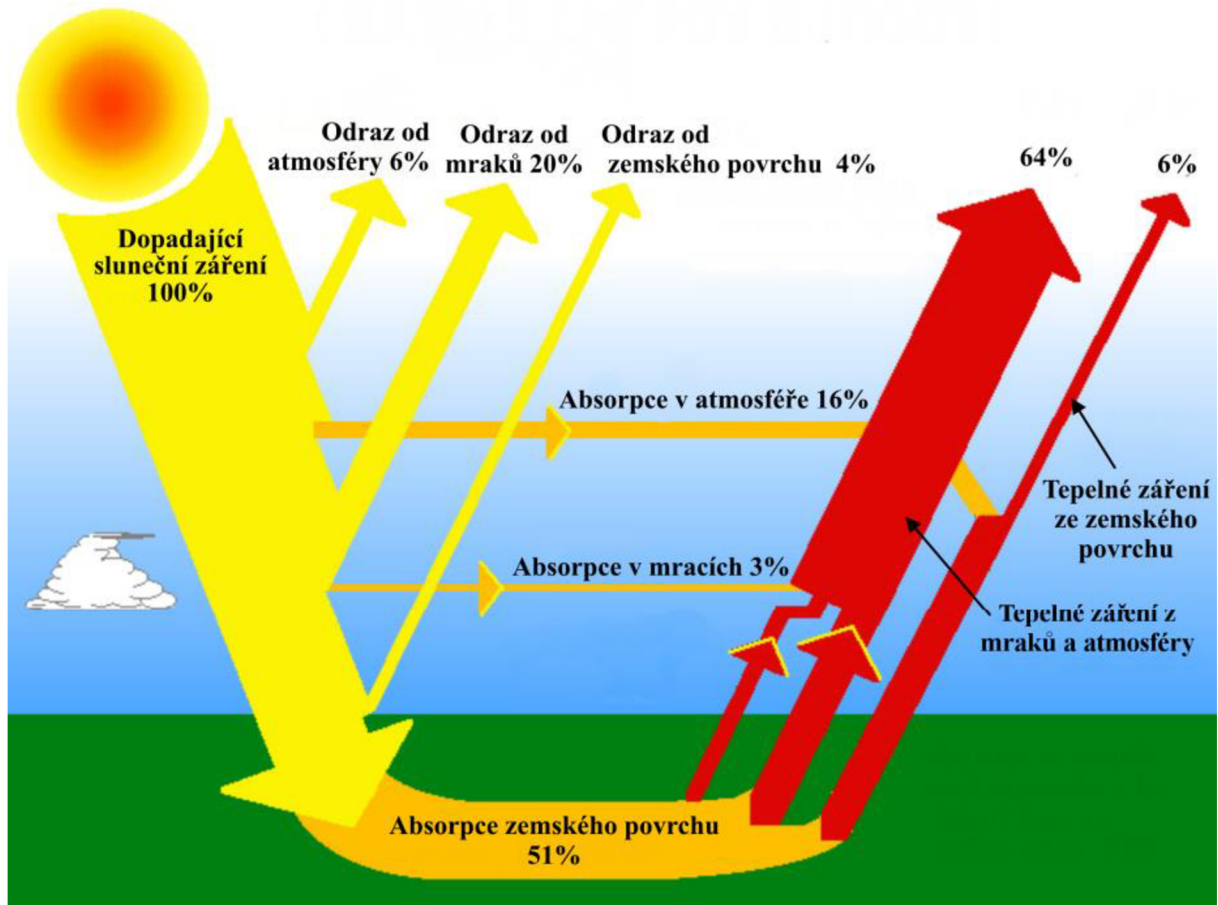
V diplomové práci je provedeno srovnání dvou systémů pro výrobu tepelné energie. Hlavním cílem je porovnat tepelné zisky ze solárních kolektorů se zisky z tepelného čerpadla, poháněného fotovoltaickými panely.

První část práce je zaměřena na teoretickou rešerší, která slouží k představení řešené problematiky. Jsou v ní představeny jednotlivé technologie použité v praktické části, jako jsou solární kolektory, fotovoltaické panely, tepelná čerpadla a použití těchto systému v současné době.

Druhá část zahrnuje praktickou část práce, kde jsou pomocí simulačního programu TRNSYS porovnány tepelné zisky ze solárních kolektorů a z tepelného čerpadla poháněného fotovoltaickými panely. Je zde prezentována parametrická studie a na simulačních modelech ukázán vliv jednotlivých faktorů pro zmíněné systémy.

1 Solární energie a její využití

Jedním z obnovitelných zdrojů energie je energie slunečního záření. Slunce uvolňuje do svého okolí obrovské množství energie zářením. Před dopadem na povrch Země, je sluneční energie přibližně 2krát zeslabená atmosférou (6 % odrazem a 16 % absorpcí) a mraky (20 % odrazem a 3 % absorpcí) jak ukazuje obr. 1. Dalších 51 % celkového dopadajícího slunečního záření je absorbováno pevninou a oceány. Nejpresnější hodnota celkového slunečního záření v období slunečního minima je $1360,8 \pm 0,5 \text{ W m}^{-2}$ [7].



Obrázek 1 Solární energie na zemi [8]

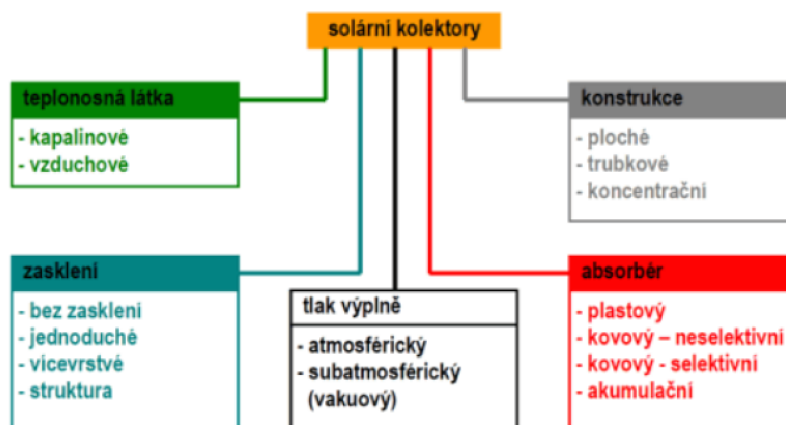
Solární technologie přeměňují sluneční energii buď na tepelnou energii pomocí solárních kolektorů nebo na elektrickou energii například prostřednictvím fotovoltaických (PV) panelů.

1.1 Solární kolektory

Solární kolektor přeměňuje energii slunečního záření na energii tepelnou. Sluneční záření je absorbováno solárním kolektorem jako teplo, které je následně předáno pracovnímu médiu (vzduchu, vodě nebo oleji). Přenášené teplo lze využít buď k ohřevu teplé vody/topení v domácnosti, nebo k nabíjení zásobníku tepelné energie, z něhož lze teplo odebírat pro pozdější použití (v noci nebo při zatažené obloze) nebo pro teplovzdušné vytápění [9].

1.1.1 Druhy solárních kolektorů

Solární kolektory je možné rozdělit dle druhu teplotnosné látky, typu zasklení, tlaku výplně, typu absorberu a konstrukce. Tyto kategorie umožňují kombinaci konstrukčních prvků a v praxi se s nimi můžeme setkat v různých kombinacích. Na obrázku 2 je grafický znázorněno rozdělení solárních kolektorů dle různých faktorů.



Obrázek 2: Rozdělení solárních kolektorů [11]

Podle druhu teplotnosné látky:

- **Kapalínové** (voda nebo nemrznoucí směs vody a propylenglykolu) – nejčastěji používány pro vytápění a ohřev vody v budovách [11]
- **Vzduchové** – pro předehřev čerstvého vzduchu nebo pro cirkulační vytápění [11]

Solární kolektory se dále dělí podle **konstrukce kolektorů**:

Ploché zasklené kolektory se skládají z ploché obdélníkové krabice se skleněným krytem a absorpční deskou uvnitř. Absorpční deska je obvykle natřena černým pohltivým nátěrem nebo pokryta spektrálně selektivním povlakem (nejběžnější druh), aby se maximalizovalo množství absorbovaného slunečního záření [11]. Ploché selektivní kolektory jsou tepelně izolovány na boční a zadní straně kolektorové skříně pro snížení tepelných ztrát prostupem tepla. Proto se ploché selektivní kolektory využívají pro solární ohřev vody a vytápění celoročně a tvoří naprostou většinu zasklených kolektorů na trhu [11].

Dalším typem je **plochý vakuový zasklený deskový kolektor** v těsném provedení s kovovým absorberem se spektrálně selektivním povlakem a tlakem uvnitř kolektoru nižším než atmosférický tlak v okolí kolektoru (absolutní tlak cca 1 až 10 kPa) pro zajištění nízké celkové tepelné ztráty; ploché vakuové kolektory jsou určeny pro celoroční solární ohřev vody a vytápění, případně pro průmyslové aplikace s provozními teplotami okolo 100 °C [11].

Existují také **ploché nekryté kolektory** z plastové rohoži bez zasklení. Tento typ kolektoru má vysoké tepelné ztráty závislé na venkovních podmínkách, proto je určen hlavně pro sezónní ohřev bazénové vody [11].

Trubkové kolektory se spektrálně selektivním absorberem (plochým nebo válcovým absorberem) se skládají z řady skleněných trubek, z nichž každá obsahuje absorpční desku/válec, který je obklopen vakuem. Vakuum pomáhá minimalizovat tepelné ztráty a zvyšuje účinnost kolektoru. Evakuované trubkové kolektory se nejčastěji používají pro ohřev vody nebo vytápění prostor. Kolektory se používají

především pro kombinované soustavy pro vytápění či průmyslové vysokoteplotní aplikace (provozní teploty nad 100 °C) [11].

Koncentrační kolektor má obvykle konkávní odraznou plochu, kterou zachycuje a soustřeďuje sluneční záření na mnohem menší přijímací plochu. U solárních výtopen taková konstrukce zvyšuje tepelný tok, umožňuje cyklu pracovat při vyšších teplotách, a tak dosáhnout vyšší Carnotovy účinnosti [9].

1.1.2 Výkon a účinnost solárního kolektoru

Výkon kolektoru \dot{Q}_k [W] se experimentálně určí z hmotnostního toku \dot{M} [m³·hod⁻¹] teplotnosné kapaliny a rozdílem teplot na vstupu t_{k1} a výstupu t_{k2} kolektoru [12]:

$$\dot{Q}_k = \dot{M} \cdot c \cdot (t_{k2} - t_{k1}) \quad (1)$$

Účinnost solárního kolektoru η [-] je za ustálených podmínek definována jako poměr energie odváděné teplotnosnou látkou z kolektoru k celkové solární energii dopadající na kolektor [14].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{A \cdot G} \quad (2)$$

kde

\dot{Q}_k [W] je množství energie získané z kolektoru,

A [m²] je plocha kolektoru a

G [W·m⁻²] je celkové záření dopadající na jednotku plochy kolektoru.

Účinnost solárního kolektoru je ovlivněna venkovním slunečním zářením G , venkovní teplotou t_e a střední teplotou teplotnosné kapaliny t_m . Pro vyhodnocení účinnosti se používá experimentální zkouška podle normy ČSN EN 12975, která popisuje vztah mezi účinností a uvedenými faktory pomocí křivky druhého řádu [15].

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_e}{G} - a_2 \frac{(t_m - t_e)^2}{G} \quad (3)$$

kde

η_0 [-] je účinnost solárního kolektoru při nulových tepelných ztrátách, zjednodušeně označována jako "optická účinnost";

a_1 [W·m⁻² K⁻¹] je lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru,

a_2 [W·m⁻² K⁻²] je kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru,

t_m [°C, K] je střední teplota teplotnosné látky v kolektoru a

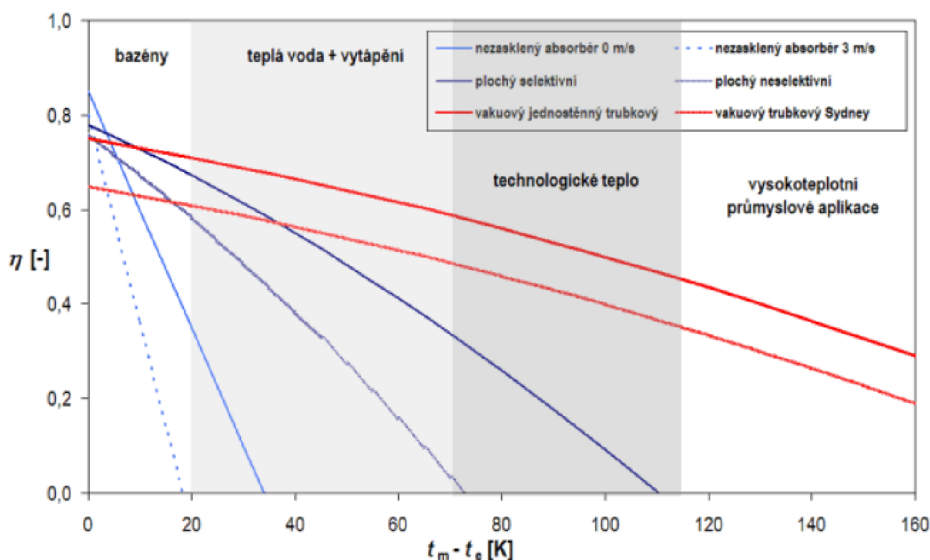
t_e [°C, K] je teplota okolí.

Ztráty kolektoru lze rozdělit do dvou kategorií:

- **Tepelné ztráty** vznikají při úniku tepla z kolektoru do okolního prostředí. Snížení tepelných ztrát je možné dosáhnout použitím izolace na bočních a zadní straně kolektoru, použitím selektivních povlaků absorberu na přední straně kolektoru, případně snížení tlaku v prostoru kolektoru (vakuové kolektory) [17].
- **Optické ztráty** vznikají, když část sluneční energie dopadající na kolektor není absorbována absorpční plochou kolektoru. K tomu může dojít z několika důvodů, jako je odrazivost povrchu absorpční desky, úhel a orientace kolektoru a kvalita zasklení nebo krycího materiálu [17]. Snížení optických ztrát je možné dosáhnout použitím vysoce propustného zasklení s nízkým obsahem oxidů železa a pohltivého absorberu nejčastěji na bázi keramicko-kovových povlaků (cer-met), případně využívají antireflexní povlaky [17]. Hodnota skutečné

optické účinnosti je pro ploché kolektory obvykle 0,83 a pro vakuové kolektory bez odrazných ploch 0,81 [16].

Z obrázku 3 je patrná nižší optická účinnost solárních trubkových kolektorů, ale i jejich vyšší účinnost při větších rozdílech teplot mezi střední teplotou teplosnosné látky a teplotou okolí (menší tepelná ztráta), oproti plochým kolektorům [14].



Obrázek 3 Typické křivky účinnosti různých druhů solárních kolektorů [14]

1.1.3 Závislost na průtoku

Solární soustavy se rozdělují podle průtoku v litrech za hodinu na metr čtvereční plochy kolektoru [18]:

- s nízkým průtokem - "low flow" soustavy, 10 až 15 l·hod⁻¹·m⁻²;
- s vysokým průtokem - "high flow" soustavy, 50 až 75 l·hod⁻¹·m⁻²;
- s proměnným průtokem - "matched flow", 10 až 75 l·hod⁻¹·m⁻².

V soustavách s nízkým průtokem dochází k ohřátí kapaliny v kolektorech o 30-50 K. Výhodou těchto soustav je, že teplosnosná látka je použitelná pro okamžitou spotřebu tepla bez nutnosti dodatečného ohřevu. Tyto soustavy jsou méně ekonomicky náročné. Podmínkou je však použití zásobníků s řízeným teplotním vrstvením [18].

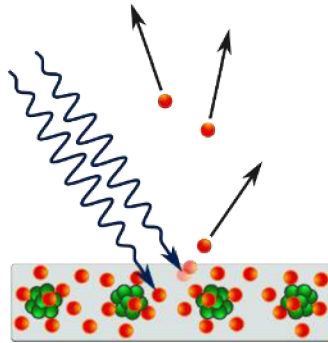
Soustavy s vysokým průtokem jsou obvykle používány pro malé solární systémy v rodinných domech. Tyto systémy mají vysoký průtok, což umožňuje ohřátí teplosnosné kapaliny o 6 až 10 stupňů [18].

Soustavy s proměnným průtokem optimalizují průtok solární soustavou a zvyšují využitelnost solárních zisků pro pokrytí potřeby tepla. Tyto soustavy využívají dvou výměníků (horní a dolní) a přepínají mezi "high" a "low" režimem v závislosti na využitelné teplotě [18].

1.2 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely přeměňují solární záření na elektrickou energii využitím fotoelektrického jevu. Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při kterém dochází k uvolňování elektronů z povrchu atomu a následnému vyzařování z materiálu, při dopadu elektromagnetického záření (světla) [12]. Fotovoltaické články, tvoří polovodičové diody s P-N přechodem. Osvětlením článku na přechodu P-N se vytvoří

elektrické napětí přibližně 0,5 V a v polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat elektrony [10].



Obrázek 4 Fotoelektrický jev [12]

1.2.1 Druhy fotovoltaických článků a jejich účinnost

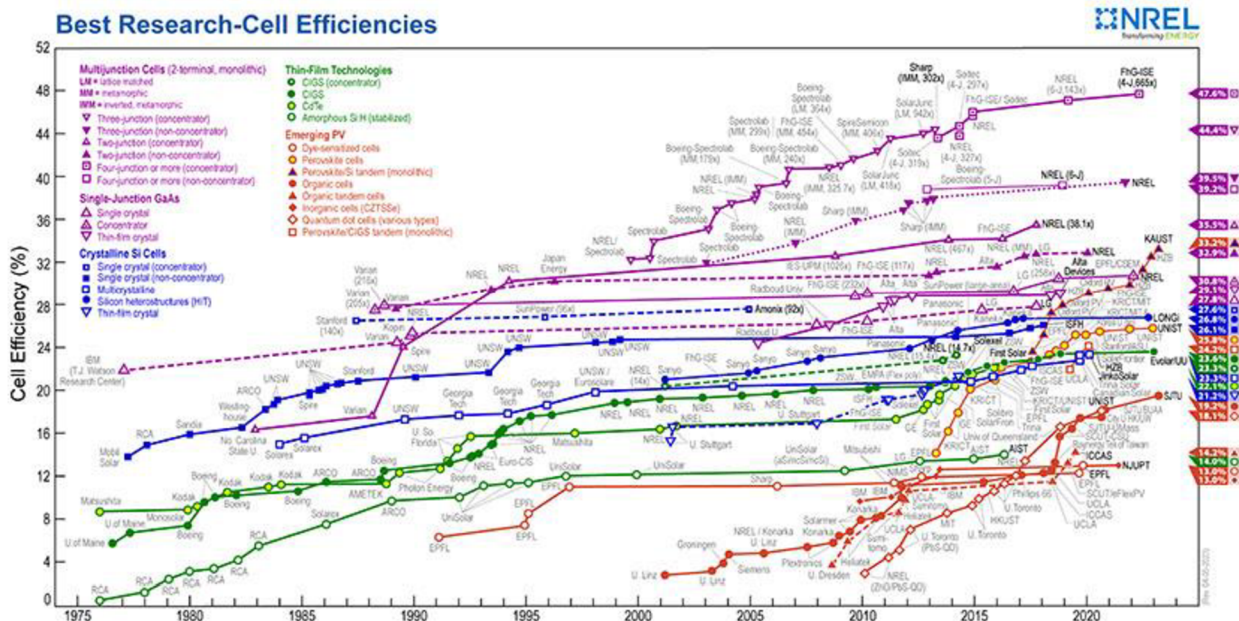
Monokrystalické články jsou vyrobeny z křemíku, který je nakrájen na plátky. Jsou vysoce účinné, s účinností konverze 15-24 %, ale jsou také drahé na výrobu [19].

Polykrystalické křemíkové články: Polykrystalické články jsou vyrobeny z více krystalů křemíku, které jsou roztaveny dohromady a tvoří jeden plátek [19]. Jsou méně účinné než monokrystalické články, typicky dosahují účinnosti 13-20 %, jsou ale levnější na výrobu [19].

Amorfni články jsou tvořeny velmi tenkými vrstvami křemíku nanesenými na podložku ze skla, pružného plastu nebo kovu. Jsou méně účinné než krystalické křemíkové články, typicky dosahují účinnosti od 6 % do teoretického limitu 15 % [19,20]. Pracují se špatným nebo rozptýleným osvětlením (i za zataženého počasí, včetně umělého osvětlení od 2 do 3000 lx) [19].

Organické solární články jsou články s organickým polymerním materiálem jako vrstvou absorbující světlo. Jejich výhody jsou nízké ceny, nízké hmotnosti a flexibilitě použití. Hlavní nevýhodou jsou problémy se stabilitou pro dlouhodobé výkony [21 ,22].

V grafu na obrázku 5 je znázorněn vývoj účinnosti různých druhů fotovoltaických článků.



Obrázek 5 Vývoj účinnosti fotovoltaických článků

1.2.2 Výkon a účinnost fotovoltaických systému

Maximální výkon, který fotovoltaický panel dodává v bodu maximálního výkonu je označován MPP (maximum power point). Tento bod se může měnit v závislosti na intenzitě slunečního záření a teplotě panelu [23].

P_{MPP} [W] je jmenovitý výkon panelu, uvádí se hodnota změřená v bodě maximálního výkonu:

$$P_{MPP} = U_{MPP} \times I_{MPP} \quad (4)$$

kde

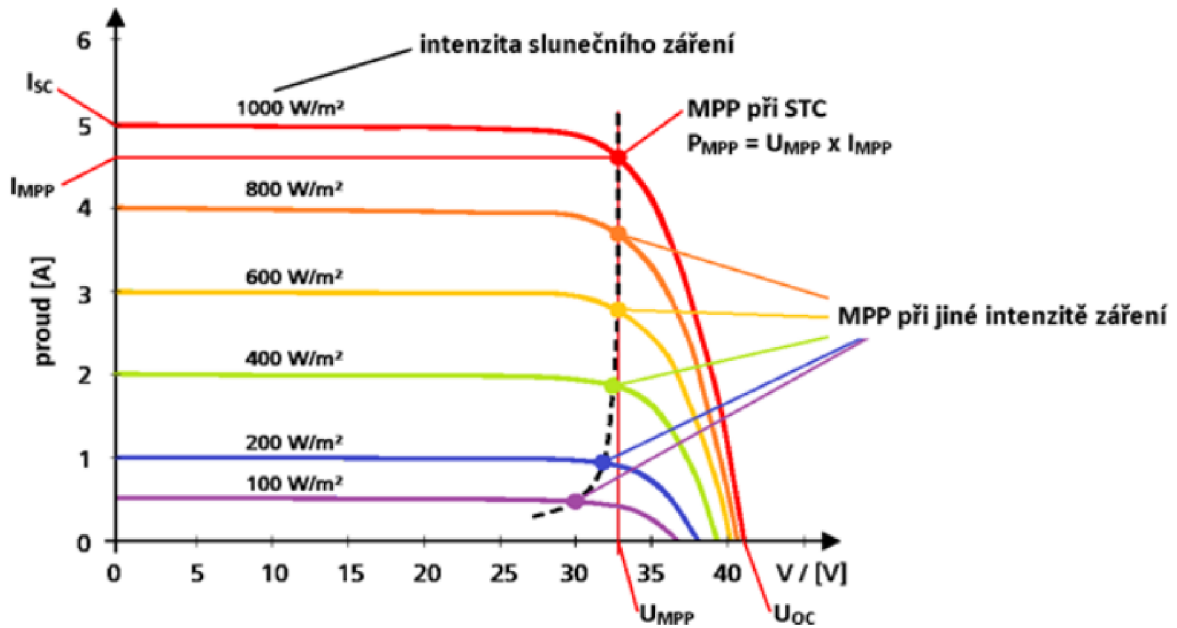
U_{MPP} [V] – napětí při jmenovitém výkonu a

I_{MPP} [A] – proud při jmenovitém výkonu.

Na štítku k fotovoltaickým panelům jsou také uváděny následující parametry [23]:

U_{OC} [V] – napětí naprázdno – napětí na fotovoltaickém panelu bez připojené zátěže a
 I_{SC} [A] – proud nakrátko – největší proud, který je panel schopen dodat

Na obrázku 5 je zobrazena poloha MPP při různých hodnotách intenzity slunečního záření dopadajícího na panel.



Obrázek 6 Poloha MPP [23]

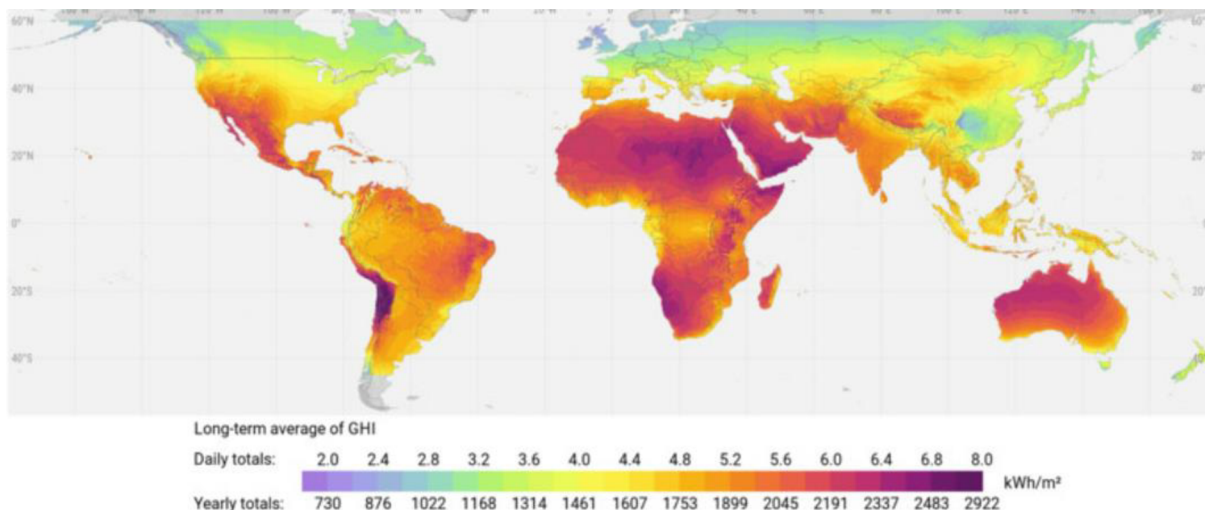
Důležitou součástí fotovoltaického systému je střídač. Střídač transformuje stejnosměrné napětí z fotovoltaických panelů na střídavé napětí sítě, které je vhodné pro napájení běžných elektrických spotřebičů v domácnosti [24]. Maximální účinnost střídačů se pohybuje v rozmezí 90-98 % a mění se v závislosti na okamžitém výkonu [24].

K dalšímu snížení účinnosti systému může docházet při ukládání energie do baterie a sklonem a orientací PV panelu.

1.3 Teoretický potenciál

Teoretický energetický potenciál slunečního záření ilustruje fyzikální veličina globální horizontální záření (GHI). GHI je celkové množství krátkovlnného záření, které dopadá shora na povrch v horizontální poloze vůči zemi. Tato hodnota zahrnuje přímé normálové záření (DNI) a difuzní horizontální záření (DIF) [26].

GHI se měří v kilowatthodinách na metr čtvereční ($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$) a průměruje se na roční, měsíční nebo denní součet globálního horizontálního ozáření. GHI závisí především na zeměpisné šířce, jak je vidět na obr. 7. Na daném místě je GHI ovlivněn místní teplotou vzduchu, větrem a sněhem, znečištěním atmosféry, prašností a některými dalšími geografickými faktory [25]. GHI poskytuje pouze hrubý odhad a nepopisuje úplně přesně skutečný potenciál pro výrobu energie z fotovoltaických panelů [25].

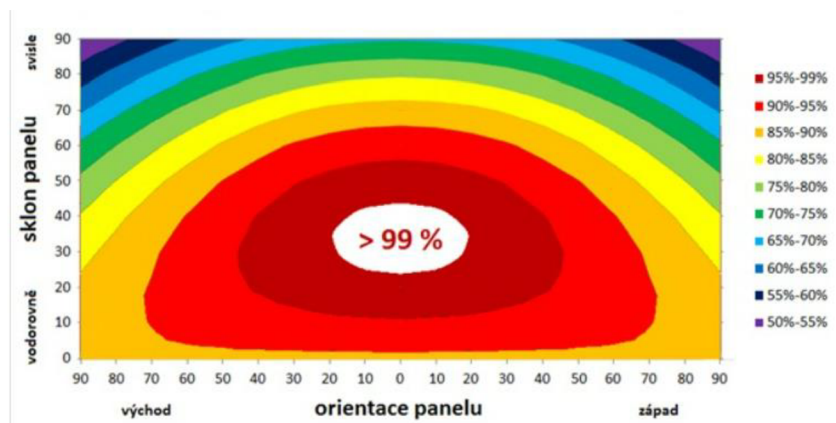


Obrázek 7 Globální horizontální záření [25]

1.4 Orientace a úhel solárních kolektorů a fotovoltaických panelů

Orientace a úhel kolektoru mohou výrazně ovlivnit jeho účinnost. Kolektory by měly být orientovány směrem k rovníku, aby se maximalizovalo množství slunečního záření, které dopadá na plochu absorbéru [27].

Instalace solárních panelů s vyšším sklonem 35 ° umožňuje získat v zimních měsících vyšší výkon a zajistil rovnoměrnější produkci elektrické energie po celý rok [28].



Obrázek 8 Orientace a úhel kolektoru pro ČR [27]

2 Tepelná čerpadla

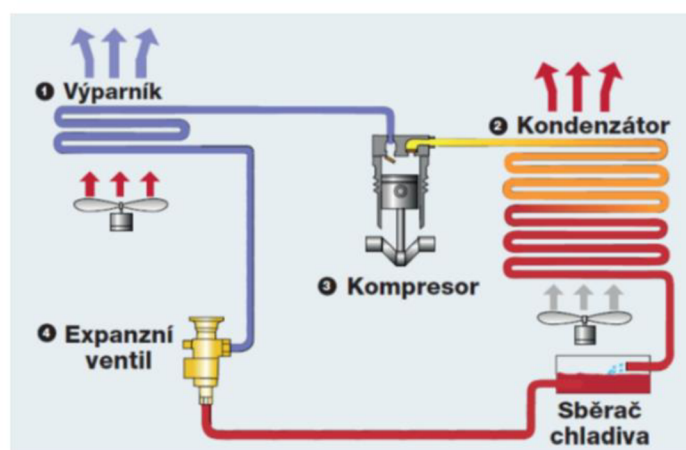
Tepelné čerpadlo (TČ) je určeno k přenosu tepla z jednoho místa na druhé za pomoci práce. V případě TČ pro vytápění nebo ohřev vody v budovách, venkovní jednotka absorbuje teplo ze zdroje o nízké teplotě, jako je vzduch, voda nebo země. Do místa určení o vyšší teplotě, jako je budova nebo zásobník teplé vody, předává teplo vnitřní jednotka. Během letních měsíců se tepelné čerpadlo může používat pro chlazení vnitřních prostorů.

2.1 Druhy tepelných čerpadel

Tepelná čerpadla se dělí podle druhu a funkčního uspořádání ochlazovaného a ohřívaného média [29]:

- **TČ vzduch-vzduch/vzduch-voda** – odebírá teplo z venkovního vzduchu a předává ho do topného systému. TČ využívající jako zdroj tepla vzduch je nejprodávanější druh TČ v České republice z důvodu nižší pořizovací ceny, rychlého návratu investice a snadné instalace. Nevýhodou tohoto druhu TČ je nestálá venkovní teplota vzduchu a v důsledku toho výrazné snížení topného faktoru v zimě.
- **TČ voda-voda** – odebírá teplo z povrchové nebo podzemní vody. Čerpadlo voda-voda má stálý topný faktor. Omezením použití tohoto druhu čerpadla je v podmínkách ČR omezený přístup k vodě jako zdroji tepla.
- **TČ země-voda** – odebírá teplo z půdy, a to buď pomocí plošného uspořádání (trubky s médiem jsou umístěné na velké ploše v malé hloubce) nebo vrtu do hloubky 80-250 m [30]. Výhodou TČ země-voda je poměrně stabilní topný výkon. Omezením jsou zemní práce a větší náklady s tím spojené.

Základní součásti systému tepelného čerpadla pro domácí použití zahrnují venkovní jednotku, která obvykle obsahuje kompresor, výměník tepla a ventilátor, a vnitřní jednotku, která obsahuje výparník, druhý výměník tepla a ventilátor nebo čerpadlo (v závislosti na typu teplotnosné látky na vnitřní straně)



Obrázek 9 Schéma kompresorového tepelného čerpadla [31]

Existují také další typy tepelných čerpadel jako například absorpční tepelná čerpadla, která využívají odpadního tepla, a termoelektrická tepelná čerpadla, založená na termoelektrickém jevu.

2.2 Topný faktor

Topný faktor (COP – Coefficient of Performance) je bezrozměrné číslo udávající, jak efektivně tepelné čerpadlo využívá spotřebovanou elektrickou energii k produkci tepla. Čím vyšší je COP tepelného čerpadla, tím vyšší je jeho výkon a levnější provoz. Topný faktor běžně nabývá hodnot až 5 pro různé druhy tepelných čerpadel a různé podmínky: teplota výstupní vody, kapacita zdrojového tepla (vzduch, voda nebo země) [32].

3 Příklady

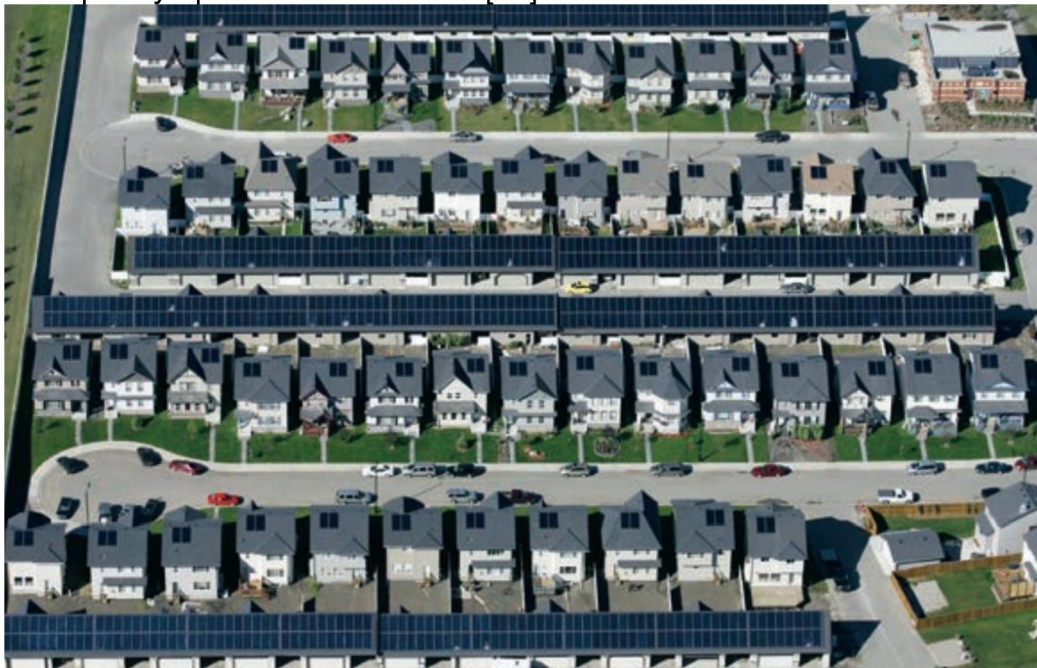
Podle mezinárodní agentury pro energii IEA (International energy agency) výroba energie z fotovoltaických panelů v roce 2021 dosáhla **1 003 TWh** [4]. Tepelná čerpadla pokrývají přibližně 10 % celosvětové potřeby tepla v budovách [5]. V budoucích energetických systémech se očekává významný přínos kombinace dálkového vytápění a tepelných čerpadel [36]. Podle scénářů by mohlo až 50 % území s poptávkou po vytápění v Evropě být pokryto dálkovým vytápěním, z čehož by přibližně 25 % energie pocházelo z tepelných čerpadel [36]. Flexibilní práce tepelného čerpadla by mohla umožnit integraci nestálých obnovitelných zdrojů energie.

Celková spotřeba tepla ve světě v roce 2020 dosáhla 93,7 EJ (26 028 TWh) [38], přičemž tepelná čerpadla dodává 10 % (**2 603 TWh**) [37]. Solární kolektory se využívají jak pro lokální vytápění, tak i pro centrální zásobování teplem. Solární tepelné systémy byly zodpovědné za dodání **425 TWh** tepla v roce 2021 [3].

Tyto systémy se používají jak pro lokální vytápění, tak i při centrálním zásobování teplem. V této kapitole jsou uvedeny příklady některých používaných systémů.

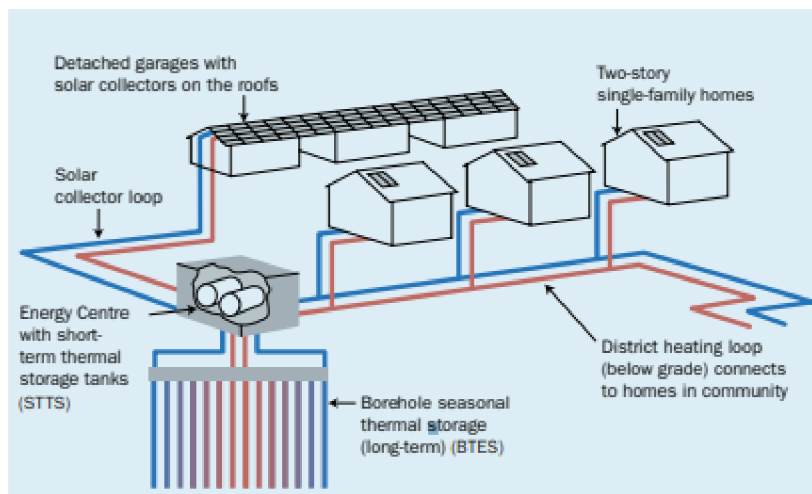
3.1 Drake Landing, Canada

Solární tepelnou soustavu (obr. 10) tvoří 768 kolektorů o celkové ploše 2295 m². Tepelná energie je pak uložena pod zemí v půdě a později je extrahována a distribuována pro vytápění 52 domácností [50].



Obrázek 10 Solární výtopna, Drake Landing, Canada [50]

Soustava je opatřena dvěma zásobníky tepla, a to sezónním podzemním zásobníkem (144 vrtů, hloubka 35 m, celkový objem 34 000 m³), a krátkodobou tepelnou akumulací (240 m³), která se používá k propojení sběrných, distribučních a sezónních subsystémů akumulace tepla a slouží jako vyrovnávací paměť pro přijímání a uvolňování tepla při mnohem vyšších rychlostech, než jsou dostupné prostřednictvím podzemního zásobníku [50]. Pro provoz čerpadel pro sběr a akumulaci solární energie je instalován fotovoltaický systém o výkonu 22 kW. Schéma solární soustavy je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11 Schéma solární výtopny, Drake Landing, Canada [50]

3.2 Silkeborg, Dánsko

V dánském Silkeborgu byla koncem roku 2016 vybudována největší solární tepelná výtopna na světě s plochou kolektorů 156 694 m², špičkovým výkonem 110 MW a kapacitou zásobníku 4 x 16 000 m³. Na městský systém dálkového vytápění je napojeno 12 436 plochých kolektorů, které při ročním výnosu 80 000 MWh pokryjí potřebu tepla pro 4 400 průměrných domácností, tedy 20 % roční potřeby (maximum je omezeno kapacitou zásobníků) [40, 42]. Ve slunečných dnech systém dodává až 100 % potřeby tepla. Přebytečné teplo se ukládá do čtyřech zásobníků pro pozdější využití [39].



Obrázek 12 Solární výtopna, Silkeborg, Dánsko [41]

Za slunečného letního dne cirkuluje systémem, který je připojen k síti dálkového vytápění prostřednictvím 1,2 kilometrů potrubí, 2,7 milionu litrů vody za hodinu [39]. V roce 2017 proběhla v Silkeborgu další důležitá modernizace technologií pro zvětšení výkonu systému, která zahrnovala absorpční tepelné čerpadlo a systém kondenzace spalin z kogenerační jednotky [39]. Tepelné čerpadlo zvýšilo produkci tepla z kogenerační jednotky (+30 MW tepla) snížením teploty vody (z 65 °C na 23 °C) a účinnost solárních kolektorů díky nízkým provozním teplotám [41].

3.3 Vojens, Dánsko

Druhá největší solární tepelná plantáž byla postavena v roce 2014 ve Vojensu. Teplo z plochých solárních kolektorů o ploše 70 000 m² zajišťuje vytápění pro 2 000 domácností a pokryje 45 % spotřeby [43]. Ke skladování tepla se používá sezónní zásobník o objemu 200 000 m³, jehož doba nabíjení je 5 měsíců [43]. Tento projekt by měl přinést spotřebitelům úsporu nákladů 10 až 15 procent na vytápění a životnímu prostředí ušetří 6 000 tun CO₂ ročně [43]. Zbytek tepla budou vyrábět 3 plynové motory, elektrický kotel o výkonu 10 MW, absorpční tepelné čerpadlo a plynové kotle [43].

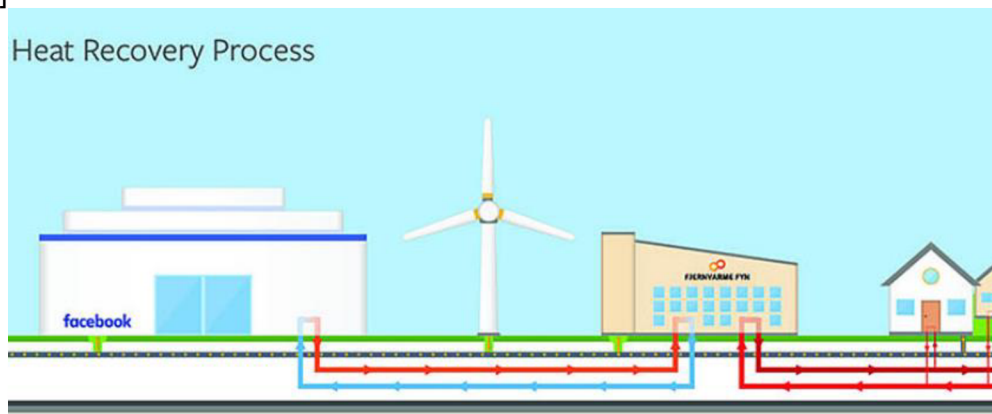


Obrázek 13 Solární výtopna, Vojens, Dánsko [43]

3.4 Odense, Dánsko

Teplem z datového centra se přes vodní výměník ohřívá voda, která putuje do strojovny. V zařízení využívají elektrická tepelná čerpadla (o celkovém výkonu 42 MW_{th}) teplo z přiváděné teplé vody k efektivnímu zvyšování teploty vodní smyčky, která dodává teplou vodu do radiátorů v celé obci k vytápění domácností. Elektřina pro tepelná čerpadla je vyrobena 100 % z obnovitelných zdrojů. [45]

Tepelná čerpadla ohřívají vodu na požadovaných 70 °C. Roční výroba tepelné energie tohoto systému je 100 000 MWh, což zajišťuje zásobování 6 900 domácností. [45, 46]



Obrázek 14 Odense, Dánsko

3.5 SAKO, Brno

Společnost SAKO Brno využívá odpadní teplo z chlazení generátoru a ložisek turbíny k provozu absorpčního tepelného čerpadla, které umožňuje rekuperaci tepla k dosažení teploty vody 80-87 °C. Tato voda se následně využívá k vytápění prostřednictvím systému centrálního zásobování teplem. Absorpční tepelné čerpadlo je poháněno pomocí nízkotlaké páry z turbíny a je schopno vyrobit ročně až 29 000 GJ tepla, což je dostatečné k pokrytí roční spotřeby asi 1 000 brněnských domácností napojených na centrální zásobování teplem. Tento systém umožňuje současné chlazení a vytápění v rámci jednoho procesu a díky využití odpadního tepla dosahuje absorpční jednotka účinnosti přesahující 165 %. [47]



Obrázek 15 Tepelné čerpadlo SAKO, Brno [47]

3.6 Helsinky, Finsko

Finská společnost Helen postavila největší zařízení na výrobu tepla a chladu pomocí tepelných čerpadel. Tepelné čerpadlo recykluje odpadní teplo z vyčištěné odpadní vody a také přebytečné teplo z budov (např. datová centra). Skalní jeskyně pro teplárnu byla vyhloubena pod parkem Katri Vala, několik kilometrů od centra Helsinek. V roce 2017 se výroba zvýšila na celkových 570 000 MWh, což představuje 8 % tepla potřebného pro město. V roce 2021 by mělo být uvedeno do provozu šesté tepelné čerpadlo, které umožní zvýšit objem výroby v elektrárně až o 30 % oproti roku 2017.



Obrázek 16 Tepelné čerpadlo Helen [48]

4 Faktory hodnocení

Vhodnost použití solárních kolektorů nebo tepelného čerpadla poháněného PV panely se dá posoudit z následujících hledisek:

- **Účinnost**

Solární termické kolektory jsou obecně účinnější při přeměně solární energie na tepelnou (max. 83 % při nulové tepelné ztrátě [16]), než fotovoltaické panely (max. 24 % [19]) při přeměně na elektrickou energii. Použití tepelného čerpadla může zvýšit účinnost fotovoltaického systému násobkem topného faktoru (až 5krát [32]).

- **Sezonnost**

Při snížení teploty okolí se zvyšuje tepelná ztráta solárních kolektorů do okolí. Snižuje se COP tepelného čerpadla.

- **Životnost**

Životnost systémů obecně závisí na provozních podmínkách, například vlivem vysokých teplot, jejich výkyvem nebo mechanickým poškozením.

U solárních kolektorů se uvádí životnost v rozsahu 25-35 let [33].

Životnost PV panelů garantovaná výrobcem je 25 let, avšak odhaduje se delší doba životnosti [34]. Účinnost panelů klesá až o 0,5 % ročně a po dosažení ztráty účinnosti o 20 % by měly být PV panely vyměněny [34]. Dalším prvkem který, se podílí na životnosti PV systému je invertor, který má přibližnou životnost 10 let [34].

Tepelná čerpadla mají minimální životnost 15 let, která záleží na servisu, správném zapojení a zejména výběrem tepelného čerpadla. [35]

- **Náklady**

Pořízení a instalace solárních termických kolektorů je obecně levnější než pořízení a instalace fotovoltaických panelů s tepelným čerpadlem. Při použití tepelného čerpadla země-voda by navíc bylo nutné provést zemní práce, což by zvýšilo celkové náklady na instalaci.

Pomocí kalkulačky od WOLTAIR [64]

se dají spočítat přibližná cenová nabídka na PV elektrárnu a tepelné čerpadlo. Například instalace PV o výkonu 5 kWp s baterii s kapacitou 17,75 kWh s dotací vychází 227 tis. Kč, bez dotace 401 tis. Kč. Předpokládaná návratnost dané PV je přibližně 14 let. Avšak je nutné také započítat pravděpodobnou výměnu invertoru – 60 tis. Kč [65] a možnou výměnu baterie (172 tis. Kč) [66]

Tepelné čerpadlo o výkonu 5,6 kW vychází vč. montáží s dotací na 218 tis Kč (bez dotace 318 tis. Kč). Dohromady by to vycházelo 445 tis. Kč s dotací.

Kompletní sestava pro solární ohřev vody se solárním zásobníkem Dražice OKC 300 NTRR/SOL a 2 ks kolektory FPC2.0M (max. výkon 2x1470 W) vychází na 62.900,- Kč [67].

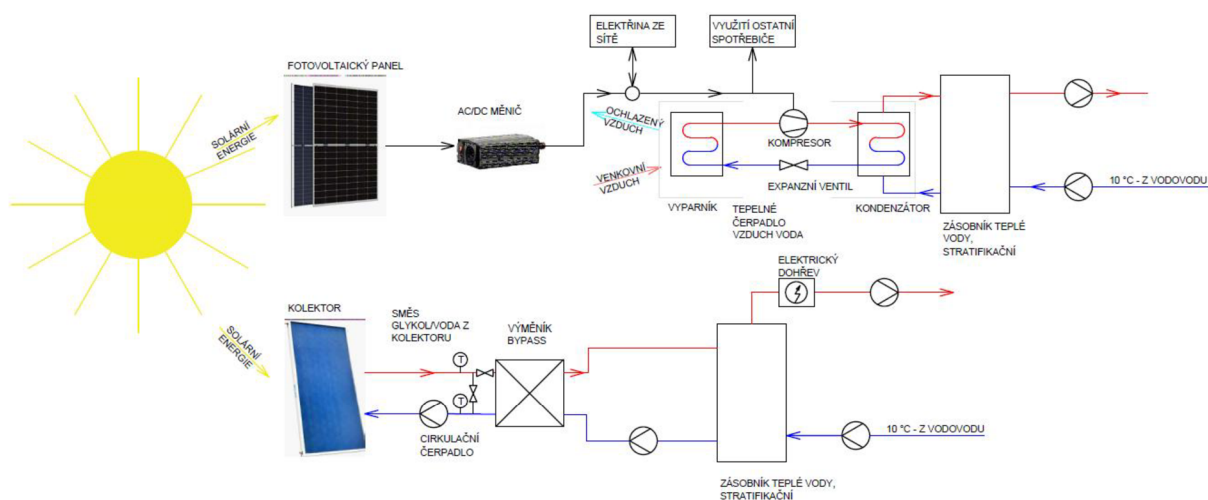
5 TRNSYS model

TRNSYS je grafický software, který se používá k modelování energetických systémů. Lze jej použít k simulaci výkonnosti široké škály energetických systémů, včetně systémů HVAC, solárních tepelných systémů, fotovoltaických systémů, geotermálních systémů a dalších. TRNSYS využívá modulární přístup, kdy se k simulaci energetického systému připojují různé typy modulů [49].

V praktické části diplomové práce je provedeno srovnání dvou systémů pro výrobu tepelné energie. Hlavním cílem je porovnat tepelné zisky ze solárních kolektorů se zisky z tepelného čerpadla, poháněného fotovoltaickými panely. Tepelné zisky z obou systémů jsou porovnány za pomoci simulačního programu TRNSYS. Na obrázku 15 je zobrazeno schéma obou systémů.

Solární energie se pomocí fotovoltaického panelu přemění na stejnosměrný elektrický proud. Pro použití v systému je stejnosměrný proud přeměněn na střídavý a následně je využit pro pohon kompresoru tepelného čerpadla vzduch-voda nebo pro další spotřebiče. Pro případ nedostatku nebo přebytku elektrické energie v systému s rozvodnou elektrickou soustavou. Ohřátá voda z tepelného čerpadla se uskládá v zásobníku na teplou vodu odkud se odvádí dle potřeby voda o teplotě 55 °C. Voda do zásobníku se dopouští z vodovodu o uvažované teplotě 10 °C.

V tepelném kolektoru se mění solární energie na tepelnou energii a ta přes výměník zahřívá zásobník teplé vody. Pokud je výstupní teplota ze zásobníku nižší než 55 °C, spustí se doplňkový ohřivač, který dohřeje vodu na požadovaných 55 °C. Voda do zásobníku se, jako v předchozím případě, dopouští z vodovodu při teplotě 10 °C.



Obrázek 17: Schéma simulace

5.1 Zvolené technologie

Pro jednodušší porovnání byly zvoleny solární kolektor a fotovoltaický panel o přibližně stejné ploše. Tepelné čerpadlo bylo zvoleno typu vzduch-voda, protože se jedná o nejběžnější typ používaný v ČR.

5.1.1 Solární kolektor Regulus

Tento plochý kolektor se selektivním povrchem TiNO_x a 40 mm izolací minerální vaty může produkovat 1481 W tepelné energie při osvětlení o intenzitě 1000 W·m⁻². Důležité technické parametry daného solárního kolektoru jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 18: Solární kolektor Regulus KPS1 [51]

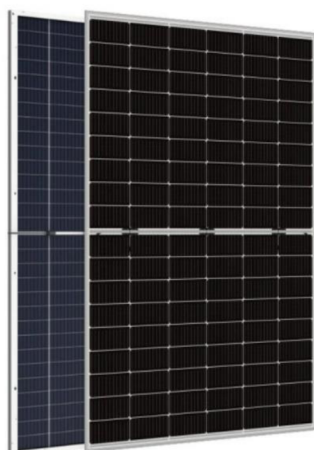
Tabulka 1: Parametry solárního kolektoru

Rozměry	2037×1036×90	mm
Plocha absorbéru	1,887	m ²
Objem pracovní kapaliny	1,4	l
Doporučený průtok	60-120	l·hod ⁻¹
Účinnost kolektoru	0,785	-
Lineární součinitel	4,4	W·m ⁻² ·K
Kvadratický součinitel	0,0074	W·m ⁻² ·K ⁻²
Modifikátor úhlu dopadu	0,91	-

Pro solární kolektor je výrobcem definována teplotněstabilní látka, což je směs vody a glykolu, jejichž poměr nepřesahuje 1:1. V simulaci byl zvolen roztok vody s propylenglykolem o koncentraci 30 %. Tento roztok lze použít pro teploty až do -12 °C (což umožňuje použití kolektoru i v zimě) a má průměrnou tepelnou kapacitu 3,9 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ [52].

5.1.2 Fotovoltaický solární panel

Bifaciální solární panel přeměňuje sluneční světlo na elektrickou energii jak přední, tak i zadní stranou. Přední strana panelu zachytává přímé sluneční záření, zatímco zadní strana zachytává ostatní světlo, které se odráží od okolí nebo je rozptýlené. Typ článku – monokrystalický. Důležité technické parametry daného PV panelu jsou uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 19: Fotovoltaický solární panel Jolywood Ntype 415Wp [53]

Tabulka 2: Parametry PV panelu

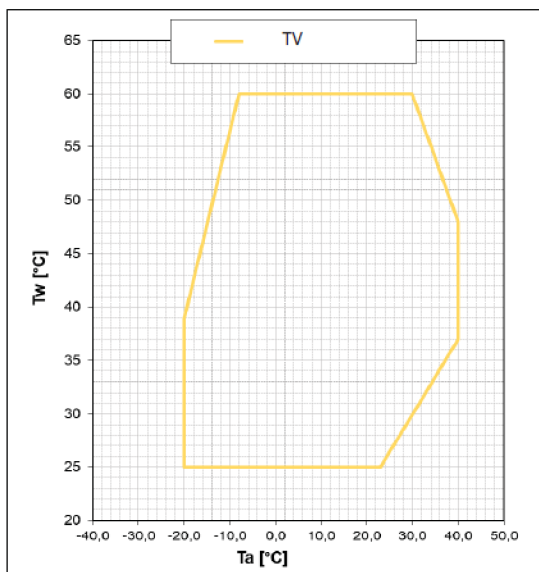
Napětí MPP	32,1	V
Proud MPP	13,24	A
Napětí naprázdno	38,1	V
Maximální zkratový proud	14,05	A
Maximální výkon	425	W
Maximální účinnost	21,69	%
Rozměry článku	182×91	mm
Počet buněk	108	ks
Rozměr panelu	1728×1134×30	mm

5.1.3 Tepelné čerpadlo vzduch voda

Vybrané tepelné čerpadlo (zkratka TČ) je vzduch-voda 100-A06 [54]. TČ může produkovat vodu o teplotě až 60 °C při venkovně teplotě od -8 °C (viz. obr. 21) a může být použito pro přípravu teplé vody, pro vytápění a chlazení. Teplonosnou látkou je chladivo R32. Průtok vody 1000 l·hod⁻¹.



Obrázek 20 Tepelné čerpadlo Viessman [53]



Obrázek 21 Pracovní oblast přípravy TV [54]

5.2 Zvolené moduly

Pro modelování solárního kolektoru byl zvolen Type 1289. Účinnost se v Type 1289 počítá dle EN12975-2, která byla již zrušená, nicméně metoda výpočtu účinnosti je totožná s metodou v normě ČSN EN 12975 účinné od 1.10.2022. Více o výpočtu účinnosti dle ČSN EN 12975 v kapitole 1.1.2.

Pro modulování fotovoltaického panelu byl zvolen Type 103b se sledováním bodu MPP (Maximum Power Point viz kapitola 1.2.2). Znamená to, že PV panel pracuje v maximálním bodě výkonu.

Pro modelování tepelného čerpadla byl použit Type 42c. Do Type 42c byl nahrán datový soubor s jednou nezávislou proměnnou – venkovní teplotou a dvěma závislými parametry – výkon a COP. Výkon tepelného čerpadla v dané simulaci bude záviset pouze na venkovní teplotě.

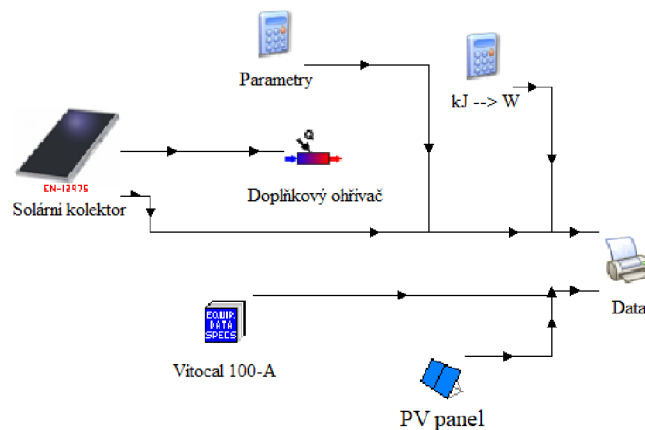
Pro modelování zásobníku byl použit Type 60n. Ten modeluje stratifikační válcový zásobník vody se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Umožní to odběr teplejší vody do systému a zvýší účinnost solárních kolektorů.

Všechny údaje byly pořízené z technických listů od použitých technologií.

6 Parametrická studie

Jako první krok bylo provedeno porovnání solárních kolektorů s tepelným čerpadlem poháněným fotovoltaikou při konstantních podmínkách. Sledovala se závislost změny statických parametrů na výkonu.

Systémy byly nastaveny na konstantní výstupní teplotu teplonosného média 55 °C. V případě nedostatku tepelné energie ze solárního kolektoru byl zapnut pomocný systém, který zahrnoval doplňkový elektrický dohřev. Tím byla zajištěna dostatečná úroveň vytápění i v období s menším množstvím slunečního záření. Simulační TRNSYS model je zobrazen na obr. 19.



Obrázek 22 Schéma pro parametrickou studii TRNSYS

Množství vyráběné energie záleží na více faktorech:

- Intenzitě slunečního záření
- Orientaci: Směr k rovníku a sklon 30° solárních kolektorů a fotovoltaických panelů budou uvažována stejně
- Venkovní teplotě (vysoké teploty mohou snížit účinnost fotovoltaických panelů, naopak s teplotou se zvyšuje účinnost solárních kolektorů)
- Průtoku vody v kolektoru
- Vstupní teplota teplonosné látky do kolektoru

Tabulka 3: Parametry pro parametrickou studii

Parametry:		Referenční bod:	Min.	Max.	Jednotka
Venkovní teplota	t_{amb}	20	20	35	[°C]
Vstupní média do kolektoru	t_{in}	20	20	45	[°C]
Intenzita slunečního záření	I_g	1000	0	1000	[W·m ⁻²]
Průtok	\dot{Q}	120	60	120	[l·hod ⁻¹]

Sledované závislé parametry:

- Teplota na výstupu z kolektoru
- Výkon kolektoru
- Výkon PV panelu
- Výkon tepelného čerpadla
- COP tepelného čerpadla

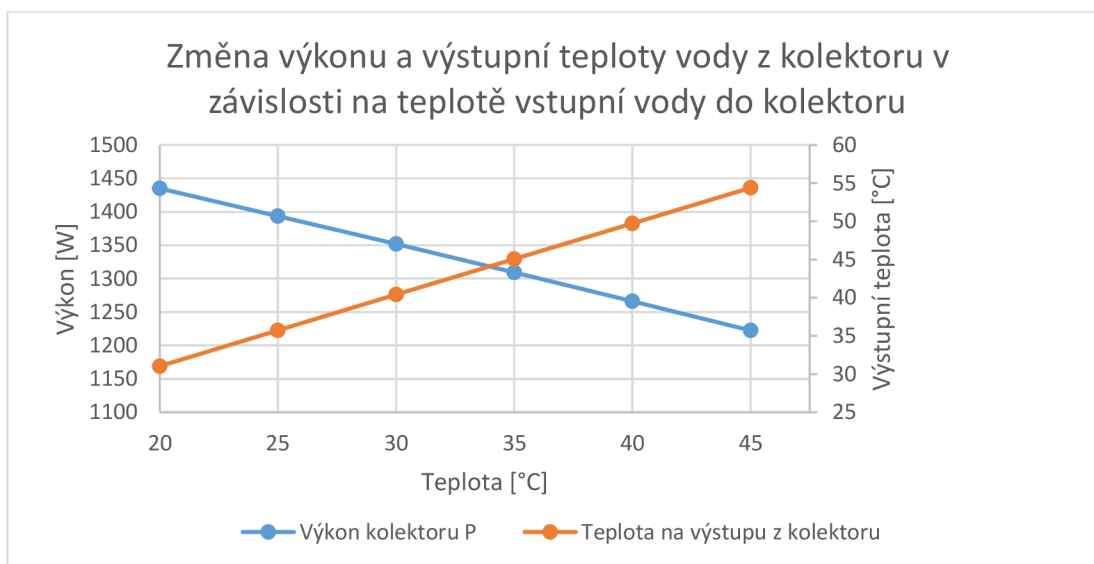
6.1 Závislost parametrů kolektoru na vstupní teplotě vody

V první analýze byla měněná vstupní teplota teplotnosné látky. Čím nižší je teplota teplotnosné látky na vstupu do kolektoru, tím vyšší je předaný výkon. Při zvýšení teploty o 25 °C od referenční teploty se sníží výkon kolektoru o 14,8 % (213 W). Z toho vyplývá, že účinnost solárního kolektoru, při použití nepřímo ohříváného zásobníku na teplou vodu, se zvyšující se teplotou klesá. Pro snížení ztráty na výkonu vlivem vstupní teploty je užitečné použití stratifikačního zásobníku.

Na obrázku 20 je znázorněn průběh výstupní teploty a výkonu kolektoru. Výsledné křivky jsou téměř lineární. Při vyšší teplotě média jsou větší ztráty tepla do okolí, což se podílí na snížení výkonu kolektoru.

Tabulka 4: Závislost parametrů kolektoru na vstupní teplotě teplotnosné látky (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Vstupní teplota	Teplota na výstupu z kolektoru	Výkon kolektoru P	Rozdíl výkonů (P _(i) -P _(ref))	Rozdíl výstupní a vstupní teploty	Procentuální rozdíl výkonů
[°C]	[°C]	[W]	[W]	[W]	[%]
20	31,0	1435	0,0	11,0	0
25	35,7	1394	-41	10,7	-2,9
30	40,4	1352	-83	10,4	-5,8
35	45,1	1309	-126	10,1	-8,8
40	49,7	1266	-169	9,7	-11,8
45	54,4	1222	-213	9,4	-14,8



Obrázek 23: Závislost parametrů kolektoru na vstupní teplotě vody

6.2 Závislost parametrů na průtoku

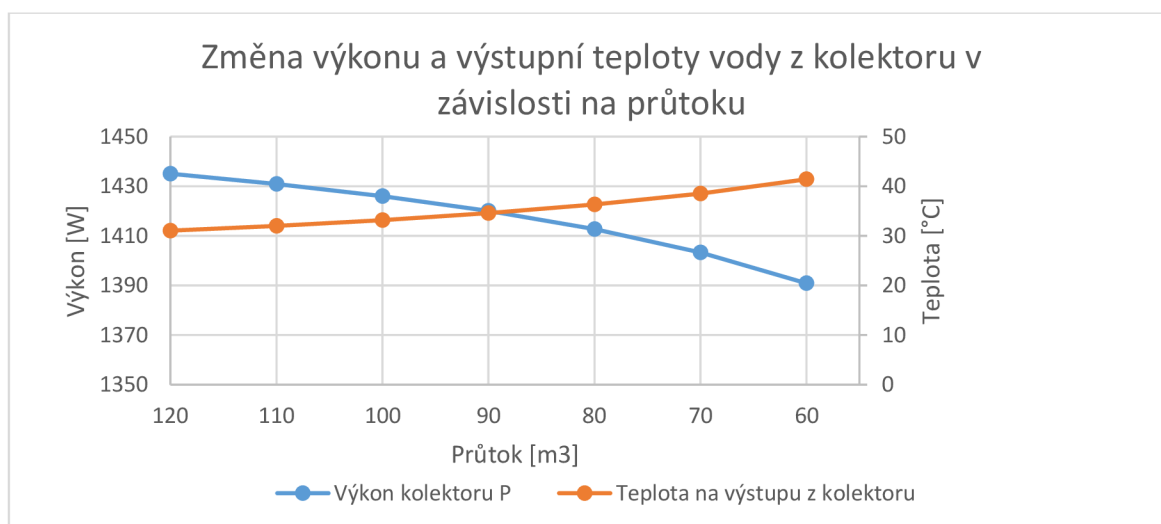
Výrobce doporučený průtok teplotnosné látky byl u zvoleného tepelného solárního kolektoru 60–120 l·hod⁻¹, čemuž odpovídá rozsah zkoušených hodnot. Z tabulky 5 a z obrázku 21 je patrné, že se snižujícím se průtokem se snižuje výkon kolektoru až o 3,1 % (44,2 W). Při nižším průtoku, však dochází ke zvýšení teploty teplotnosné látky

na výstupu z kolektoru až o 21,4 °C, což se může jevit jako výhoda při použití stratifikačního zásobníku.

Průtok teplotnosné látky pro tepelné čerpadlo je dan výrobce 1000 l·hod⁻¹. Proto je parametrická studie provedena jenom pro solární kolektor a PV panel.

Tabulka 5: Závislost parametrů kolektoru na průtoku (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Vstupní teplota	Teplota na výstupu z kolektoru	Průtok	Výkon kolektoru P	Rozdíl výkonů (P _(i) -P _(ref))	Procentuální rozdíl výkonů
[°C]	[°C]	[m ³ ·hod ⁻¹]	[W]	[W]	[%]
20	31,0	120	1435	44,2	0,0
20	32,0	110	1431	40,1	-0,3
20	33,2	100	1426	35,2	-0,6
20	34,6	90	1420	29,2	-1,0
20	36,3	80	1413	21,8	-1,6
20	38,5	70	1403	12,4	-2,2
20	41,4	60	1391	0,0	-3,1



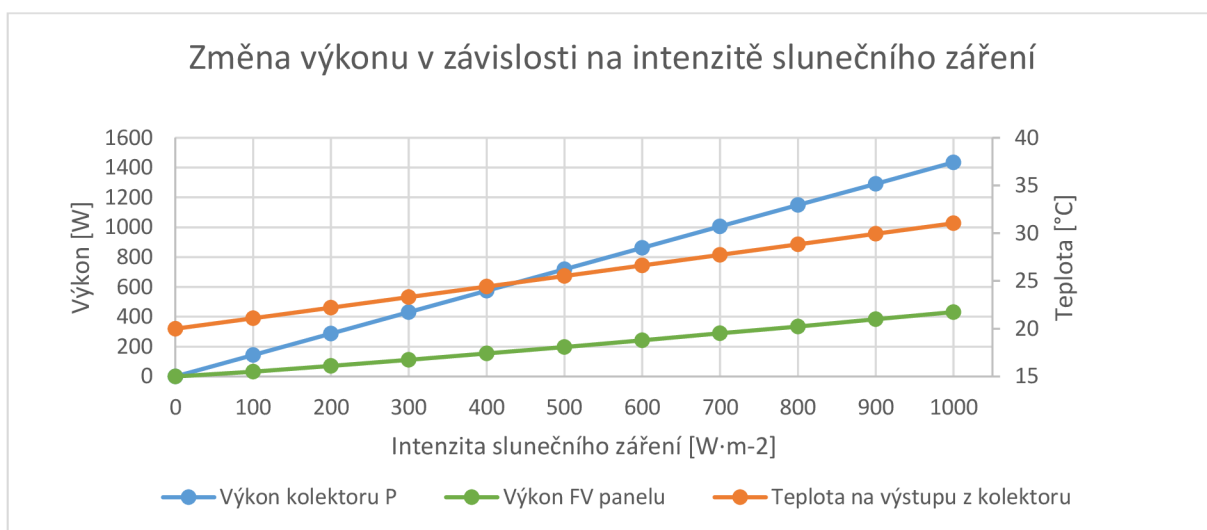
Obrázek 24: Závislost parametrů kolektoru na průtoku

6.3 Závislost parametrů na intenzitě slunečního záření

Z tabulky 6 a grafu na obrázku 22 je patrné, že při zvýšení intenzity slunečního záření narůstá výkon kolektoru a výkon fotovoltaického panelu. Výkon tepelného solárního kolektoru je oproti výkonu fotovoltaického panelu více než trojnásobný.

Tabulka 6: Závislost parametrů kolektoru a PV panelu na intenzitě záření (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Intenzita slunečního záření	Teplota na výstupu z kolektoru	Výkon kolektoru	Výkon PV panelu
[W·m ⁻²]	[°C]	[W]	[W]
0	20	0	0
100	21	144	33
200	22	287	71
300	23	431	112
400	24	574	154
500	26	718	198
600	27	861	243
700	28	1005	288
800	29	1148	335
900	30	1292	383
1000	31	1435	432



Obrázek 25: Závislost parametrů na intenzitě slunečního záření

6.4 Závislost parametrů na venkovní teplotě

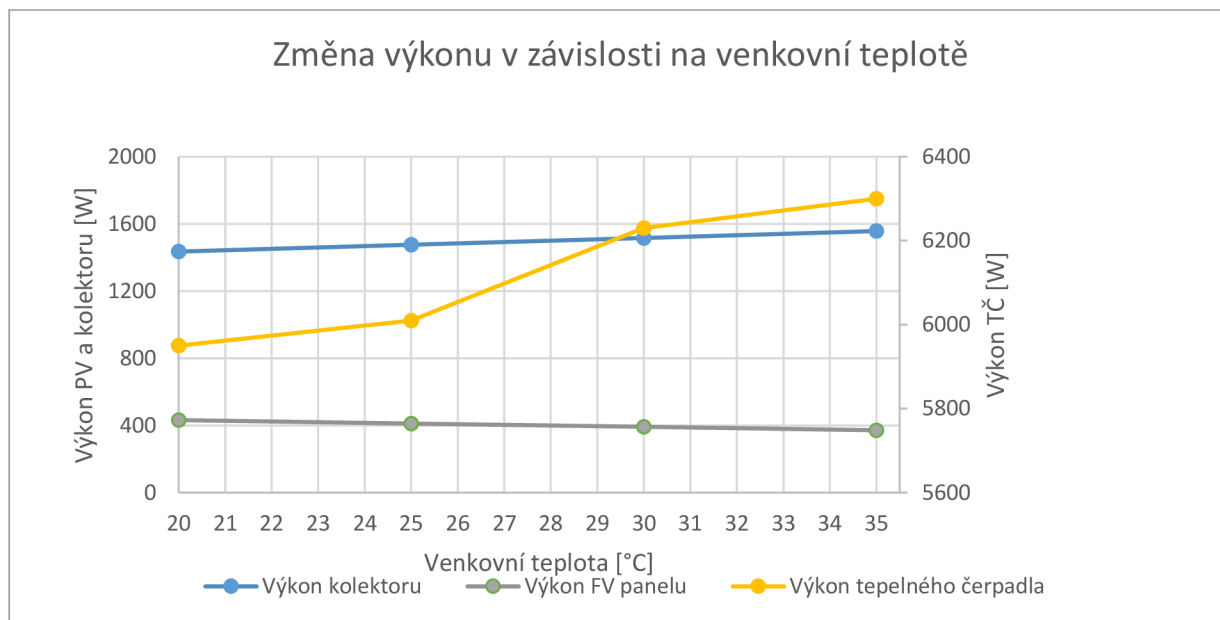
Z tabulky 7 a 8 a obrázku 23 je patrné zvýšení výkonu solárního kolektoru o 8,5 % a COP tepelného čerpadla až o 25,3 %. Se zvýšením COP je také spojené zvýšení výkonu tepelného čerpadla (až o 5,9 %). Naopak výkon PV panelu se snižuje až o 14 %. Při spojení systému PV panelu a tepelného čerpadla zastoupení obnovitelné energie při konstantním odběru narůstá, tudíž se kompenzuje snížení účinnosti PV panelu.

Tabulka 7: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplosměnné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

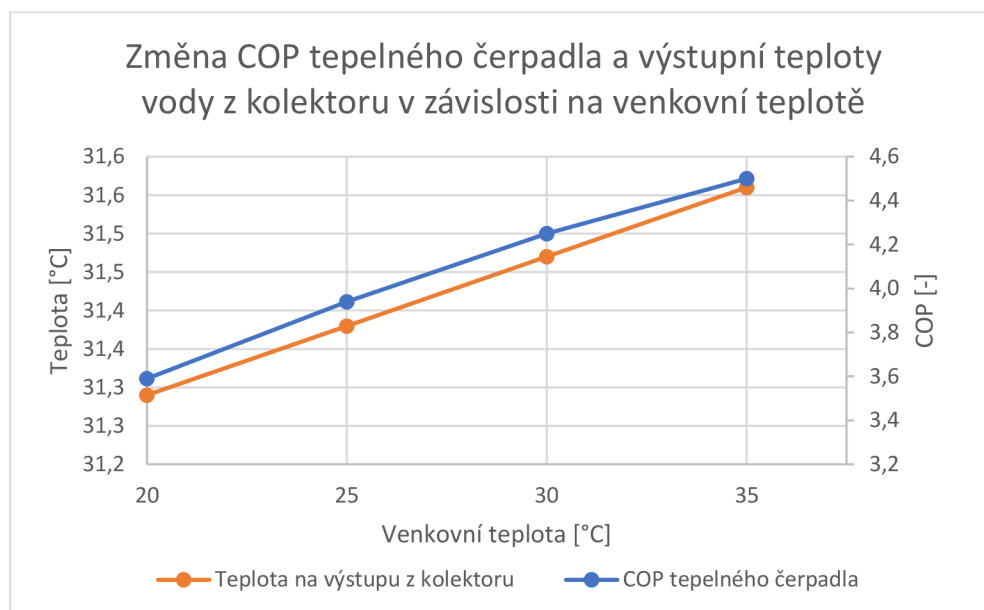
Venkovní teplota	Teplota na výstupu z kolektoru	Výkon kolektoru	Výkon PV panelu	Výkon tepelného čerpadla	COP tepelného čerpadla
[°C]	[°C]	[W]	[W]	[W]	[-]
20	31,3	1435	432	5950	3,6
25	31,4	1476	411	6010	3,9
30	31,5	1516	391	6230	4,3
35	31,6	1557	371	6300	4,5

Tabulka 8: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě – výpočet

Venkovní teplota	Teplota na výstupu z kolektoru	Výkon kolektoru	Výkon PV panelu	Výkon tepelného čerpadla	COP tepelného čerpadla	Potřeba EE pro tepelné čerpadlo	Procentuální zastoupení PV
[°C]	[°C]	[W]	[W]	[W]	[-]	[W]	[%]
20	31,3	1435	432	5950	3,6	1657	25,4
25	31,4	1476	411	6010	3,9	1525	27,2
30	31,5	1516	391	6230	4,3	1466	27,6
35	31,6	1557	371	6300	4,5	1418	27,4



Obrázek 26: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě



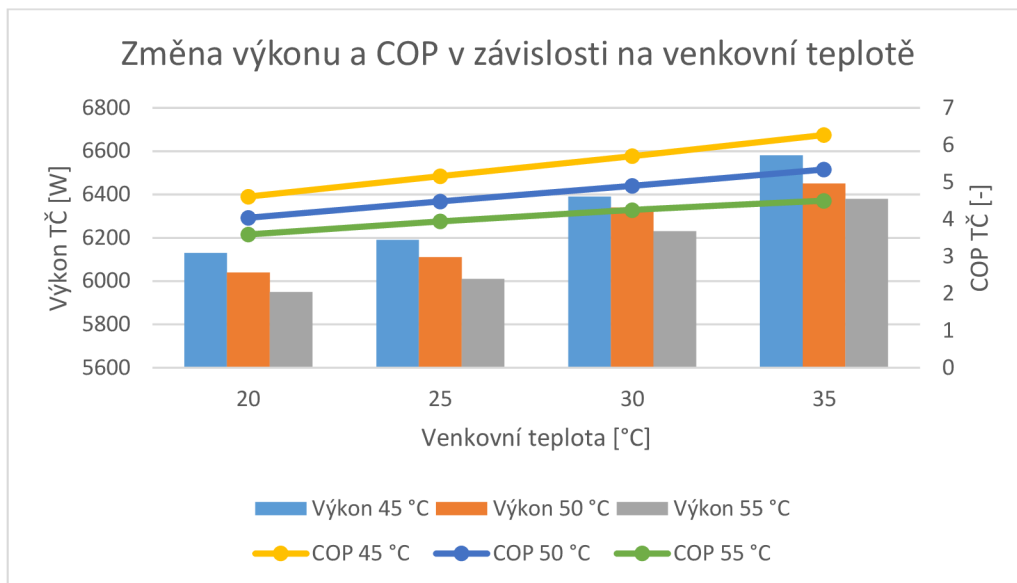
Obrázek 27: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě

Výkon a COP tepelného čerpadla závisí na požadované teplotě vody na výstupu. Pro zvolené čerpadlo jsou výrobcem uvedené hodnoty výkonů a COP pro výstupní teploty 45, 50 a 55 °C. Z tabulky 9 a obrázku 25 je patrné, že snížením výstupní teploty se dosáhne vyššího COP a tím zvýšení výkonu čerpadla až o 3 %.

Tabulka 9: Výkon a COP tepelného čerpadla v závislosti na požadované výstupní teplotě ohřevu vody

Venkovní teplota [°C]	Výkon 45 °C [W]	Výkon 50 °C [W]	Výkon 55 °C [W]	COP 45 °C [-]	COP 50 °C [-]	COP 55 °C [-]
20	6130	6040	5950	4,61	4,04	3,59
25	6190	6110	6010	5,16	4,48	3,94
30	6390	6340	6230	5,70	4,90	4,25
35	6580	6450	6380 ¹	6,27	5,34	4,50 ¹

¹ Předpoklad

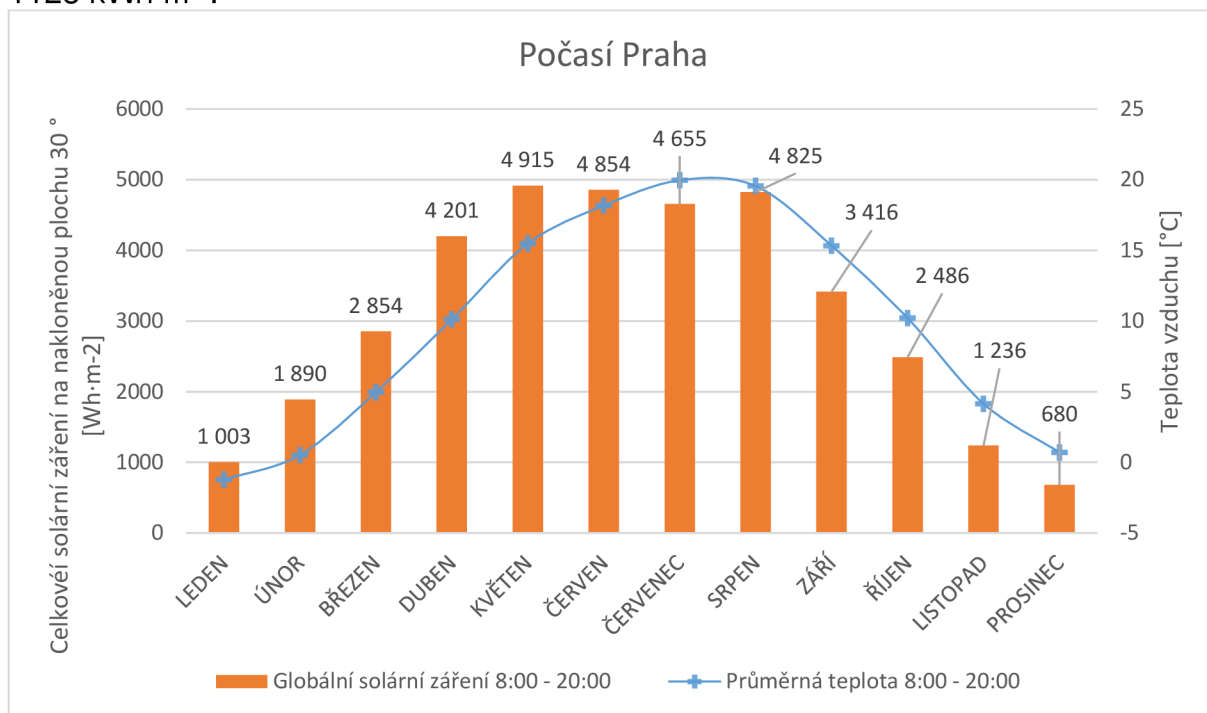


Obrázek 28: Výkon a COP tepelného čerpadla v závislosti na požadované výstupní teplotě ohřevu vody

7 Simulace

7.1 Počasí

Počasí v TRNSYSu je simulováno pomocí Type 15. Pro danou simulaci bylo zvoleno počasí pro Prahu z Meteonormu. Na obrázku 29 je znázorněné celkové solární záření na povrch nakloněný pod úhlem 30° (za průměrný den v měsíci) a průměrná teplota v době od 8 do 20 hodin. Celkové roční solární záření na tento nakloněný povrch je $1128 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obrázek 29 Celkové solární záření na nakloněnou plochu 30° a průměrná teplota v období 8:00 – 20:00

7.2 Časový krok

V předchozích studiích byl zkoumán dopad časového rozlišení na analýzy generování [55]. Ze studií vyplývá, že pro jednotlivé simulace jsou potřeba sub hodinová data, zejména pro zachycení chování vysokých špičkových výkonů. V uvedených simulacích v [55] byl časový krok nastaven na 1-15 minut.

Pro následující simulaci byl zvolen časový krok 3 min (0,05 h).

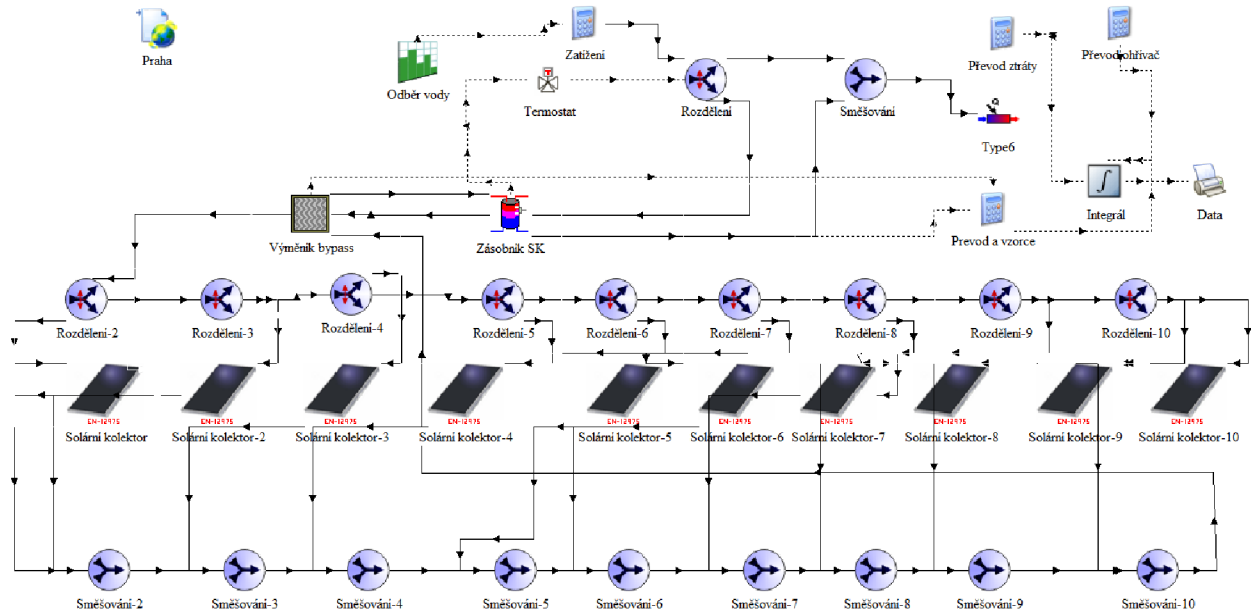
7.3 Obecný popis simulace

Byla provedena simulace s užitím modulu počasí. Pro simulaci bylo použito 10 solárních kolektorů a 10 fotovoltaických panelů. Aby se zajistily stejné podmínky pro všechny testy, nastavil se průtok teplotonosné látky pro solární kolektory na 1000 litrů za hodinu. V případě TČ, je 1000 litrů za hodinu jmenovitý průtok teplotonosné látky v okruhu.

7.3.1 Soustava solárních kolektorů

V soustavě solárních kolektorů (SK) je deset paralelně zapojených solárních kolektorů o celkové ploše $18,87 \text{ m}^2$, které jsou natočené pod úhlem 30 stupňů vůči horizontální rovině směrem na jih, aby co nejlépe zachytily solární energii. Schéma soustavy SK v TRNSYS je zobrazeno na obrázku 30. Soustava SK pracuje s průtokem 1000 litrů

teplonosné látky za hodinu. Průtok je rovnoměrně rozdělen do deseti kolektorů (100 litrů za hodinu jedním kolektorem). Proud z každého kolektoru je následně spojen a prochází bypassovým deskovým výměníkem tepla (Type 650), který má nastavenou účinnost 100 %. Průtok na studené straně výměníku je nastaven na 1000 l·hod⁻¹. Pokud kolektory poskytují užitečný výkon, teplo je předáváno přes výměník do stratifikovaného zásobníku (typ 60, 3 teplotní úrovně). Pokud je výkon kolektorů záporný, ventily do výměníku se uzavřou a teplonosná látka je převedena do obtokového režimu. Pokud výstupní teplota vody po směšování nedosahuje požadované hodnoty, dochází ke spuštění elektrického ohřevu (nastavená účinnost 100 %).

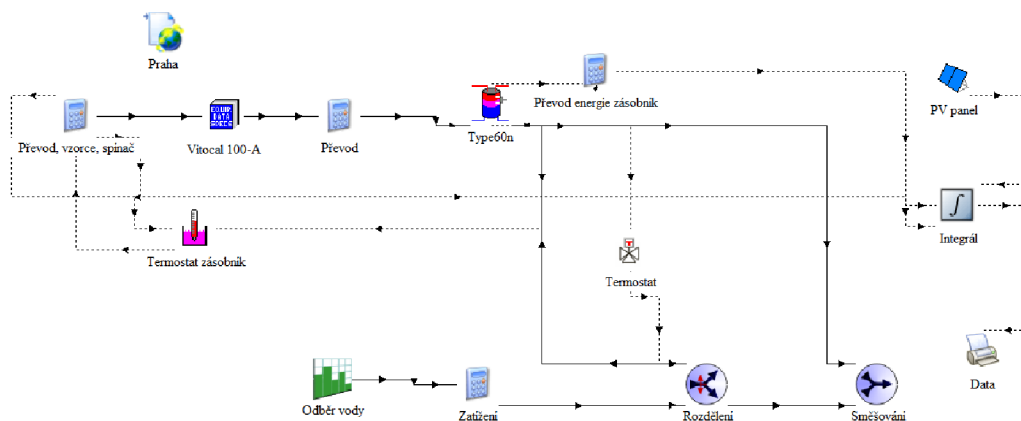


Obrázek 30 Schéma zapojení soustavy SK v TRNSYS

Teplota vody v zásobníku může dosahovat teplot až 90 °C (maximální teplota TUV předepsaná výrobcem [56]), proto byl do systému přidán rozdělovač a směšovač proudu s regulátorem výstupní teploty. V případě ohřátí zásobníku na 90 °C se systém ohřevu vypne.

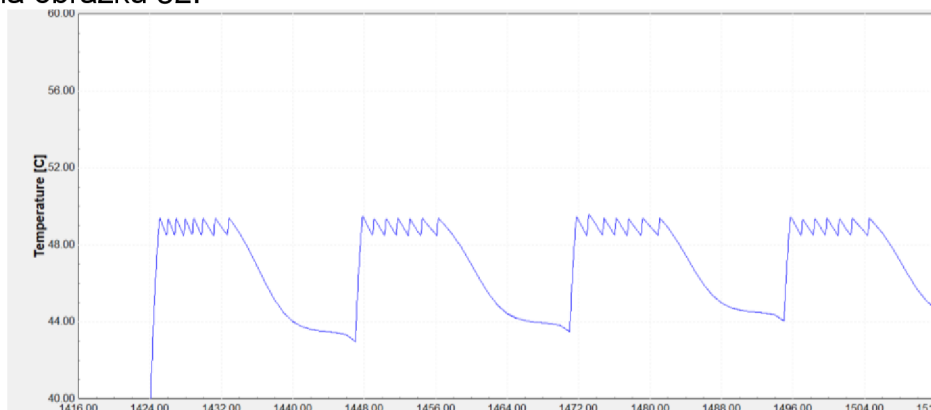
7.3.2 Soustava fotovoltaika-tepelné čerpadlo

Schéma soustavy fotovoltaika-tepelné čerpadlo (PVTČ) v TRNSYSu je zobrazeno na obrázku 31. Systém se skládá z 10 fotovoltaických panelů, které vyrábějí elektrickou energii nezávisle na tepelném čerpadle.



Obrázek 31 Schéma zapojení PVTČ v TRNSYS

Logický operátor GT(,;) v TRNSYSu umožňuje zajistit, že tepelné čerpadlo je zapnuté pouze v případě, že výroba elektrické energie je větší, než nula. V opačném případě je tepelné čerpadlo vypnuto. Termostat oscilující mezi 48,5 a 49,5 °C řídí zapínání a vypínání tepelného čerpadla. Logický operátor AND(,;) v TRNSYSu umožňuje kombinaci těchto dvou funkcí. Tepelné čerpadlo je spuštěno jen v případě, pokud oba vstupy mají hodnotu 1 (tj. fotovoltaický panel produkuje elektrickou energii a teplota vody v zásobníku je nižší než 48,5 °C). Průběh teplot v zásobníku je znázorněn na obrázku 32.



Obrázek 32 Průběh teplot v zásobníku soustavy PVTČ

Účinnost tepelného čerpadla (COP) závisí v provedené simulaci pouze na venkovní teplotě, což znamená, že čím nižší je venkovní teplota, tím méně účinné je tepelné čerpadlo. Pokud výkon z fotovoltaických panelů není dostatečný k napájení tepelného čerpadla, je potřeba dodat elektrickou energii z elektrické sítě.

Teplota vody na výstupu ze systému je regulována pomocí rozdělovače a směšovače proudu s regulátorem výstupní teploty.

7.4 Zatížení

Dle ČSN EN 12831-3 [59] pro rodinný dům je spotřeba teplé vody (60 °C) 36 až 67 litrů na obyvatele.

Potřebu tepla pro přípravu teplé vody za den lze určit ze vztahu:

$$Q_W = 4,182 \cdot V_{W,den} \cdot (t_{OUT} - t_{IN}) [MJ \cdot den^{-1}] \quad (5)$$

kde

$V_{W,den}$ [$m^3 \cdot den^{-1}$] – objem teplé vody potřebný za den,

t_{OUT} [$^{\circ}C$] – výstupní teplota ze zásobníku a

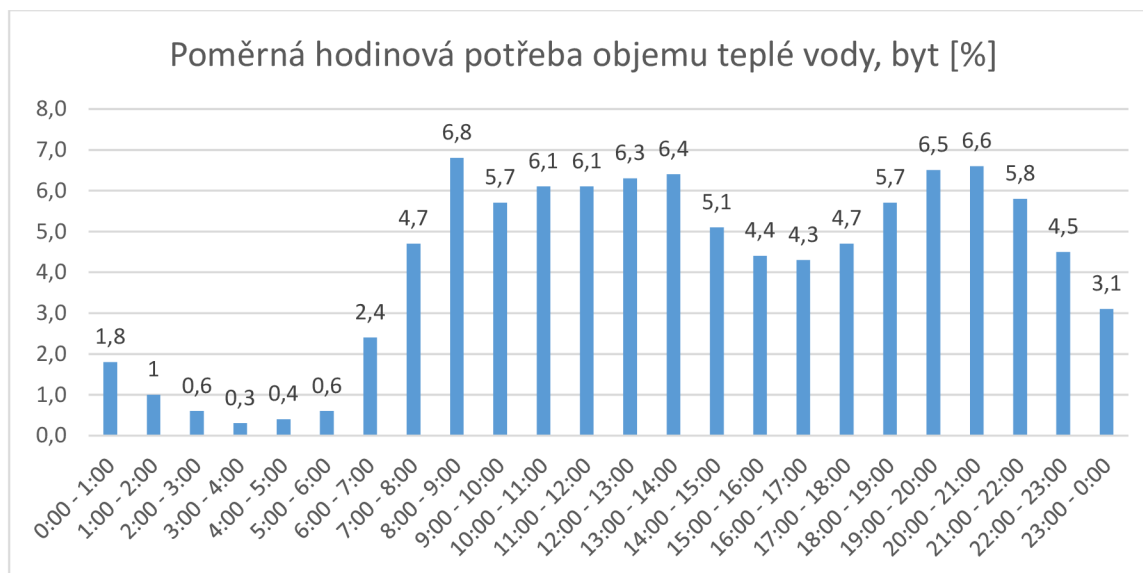
t_{IN} [$^{\circ}C$] – teplota vstupní vody do zásobníku.

Pro simulaci se předpokládá potřeba vody pro 4 osoby s uvažovanou spotřebou 50 litrů ($0,05 m^3$) pro jednu osobu za den. Průměrná teplota vody ve vodovodu je $9-10^{\circ}C$ [58], v různých místech a v závislosti na lokalitě, dodavateli a počasí se může lišit. Pro simulaci byla zvolena teplota studené vody $10^{\circ}C$. Výstupní teplota byla zvolena $45^{\circ}C$.

$$Q_W = 4,182 \cdot 4 \cdot 50 \cdot (45 - 10) = 29,27 [MJ \cdot den^{-1}]$$

$$Q_Q = \frac{29,3}{3,6} = 8,13 [kWh \cdot den^{-1}] = 2,97 [MWh \cdot rok^{-1}]$$

Během dne spotřeba teplé vody kolísá dle tabulky B.2 ČSN EN 12831-3 znázorněné v grafu na obrázku 33. Procentuální zastoupení bylo do TRNSYSu zadáno pomocí Type 14 (viz. schéma „Odběr vody“).



Obrázek 33 Graf dle tabulky B.2, ČSN EN 12831-3 [59]

7.5 Zásobník

Ohřátá voda z tepelného čerpadla nebo z výměníku proudí do stratifikovaného zásobníku (typ 60), který má tři teplotní úrovně.

7.5.1 Vliv počáteční teploty zásobníku

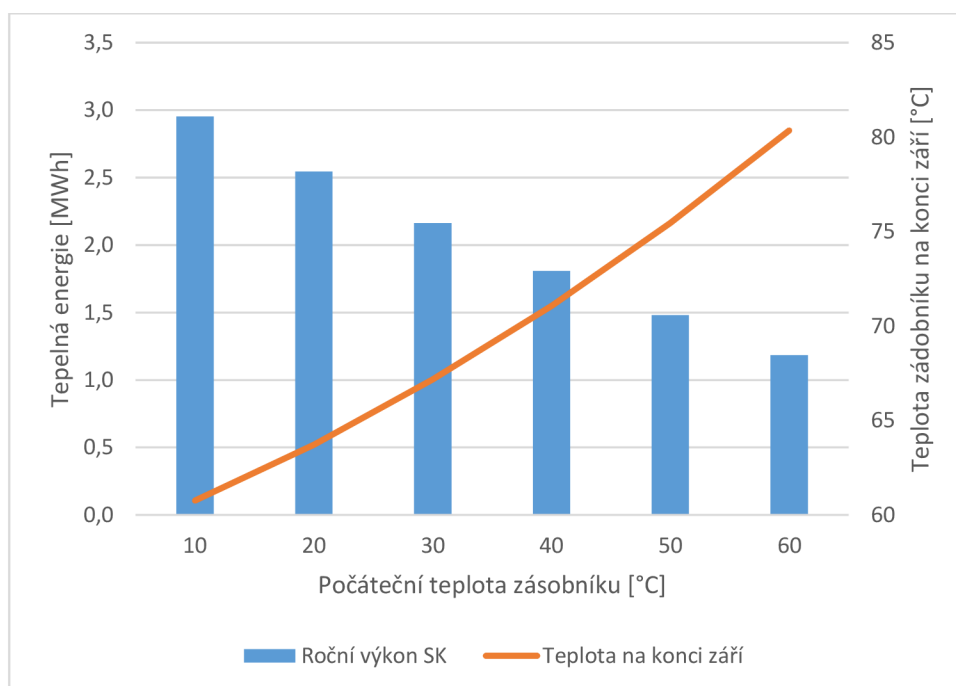
Pro zjištění vlivu počáteční teploty teplotnosné látky byla provedena simulace, ve které nebyl zásobník po celou dobu simulace využíván, a docházelo tak k jeho postupnému nabíjení. Simulace byla prováděna v období od dubna do září včetně. Jako referenční hodnota byla zvolena počáteční teplota zásobníku $10^{\circ}C$. Objem zásobníku činil v každé simulaci $50 m^3$.

Zaznamenané údaje pro simulace jsou uvedené v tabulce 10 a v grafu na obrázku 34. Na konci září byla zaznamenána tepelná energie v zásobníku vyšší o $3,0 MWh$ a teplota vody v zásobníku se zvýšila o $51^{\circ}C$ na $61^{\circ}C$. Při zvýšení počáteční teploty o $10^{\circ}C$ došlo ke snížení hodnoty předaného tepla o 14% a rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem systému činil $44^{\circ}C$.

Při nabíjení zásobníku může teplota v něm dosahovat až 90 °C, avšak s rostoucí teplotou se přenesený výkon soustavou zmenšuje. Toto pozorování naznačuje, že vyšší počáteční teplota znamená menší množství předávaného tepla do zásobníku a také menší rozdíl teplot mezi vstupem a výstupem systému.

Tabulka 10 Vliv počáteční teploty zásobníku

Počáteční teplota zásobníku	[°C]	10	20	30	40	50	60
Teplota na konci září	[°C]	61	64	67	71	75	80
Rozdíl teplot	[°C]	51	44	37	31	25	20
Roční výkon systému SK	[MWh]	3,0	2,5	2,2	1,8	1,5	1,2
Procentuální zastoupení	[%]	100	86	73	61	50	40



Obrázek 34 Vliv počáteční teploty zásobníku

Tato simulace dále ukazuje potenciál solární kolektorové soustavy pro vytápění. Tepelná energie získaná během období od dubna do září může být uložena do podzemního zásobníku a využita v zimních měsících pro vytápění dle potřeby. Pro nízkoenergetické a pasivní domy je měrná roční potřeba tepla na vytápění 15 kWh·m⁻². Za předpokladu, že vytápěný rodinný dům má celkovou podlahovou plochu 120 m², pak celková potřebná tepelná energie by činila 1,8 MWh [60].

V simulaci je počítáno s nulovými ztrátami vedením a zásobníkem. Ztráty vedením se vyskytují při přenosu teplotnosné látky z a do kolektorů a poté ze zásobníku do vytápěných prostor. Ztráty v zásobníku jsou způsobeny tepelnými ztrátami přes stěny a izolaci zásobníku. Tyto ztráty mohou výrazně snížit množství tepelné energie pro vytápění.

7.5.2 Vliv objemu zásobníku

Při simulaci různých objemů zásobníků bylo zjištěno, že s klesajícím objemem zásobníku se snižuje množství tepelné energie, které může být uloženo v zásobníku. Výsledky simulace jsou zobrazeny v tabulce 11 a v grafu na obrázku 35. Za referenční

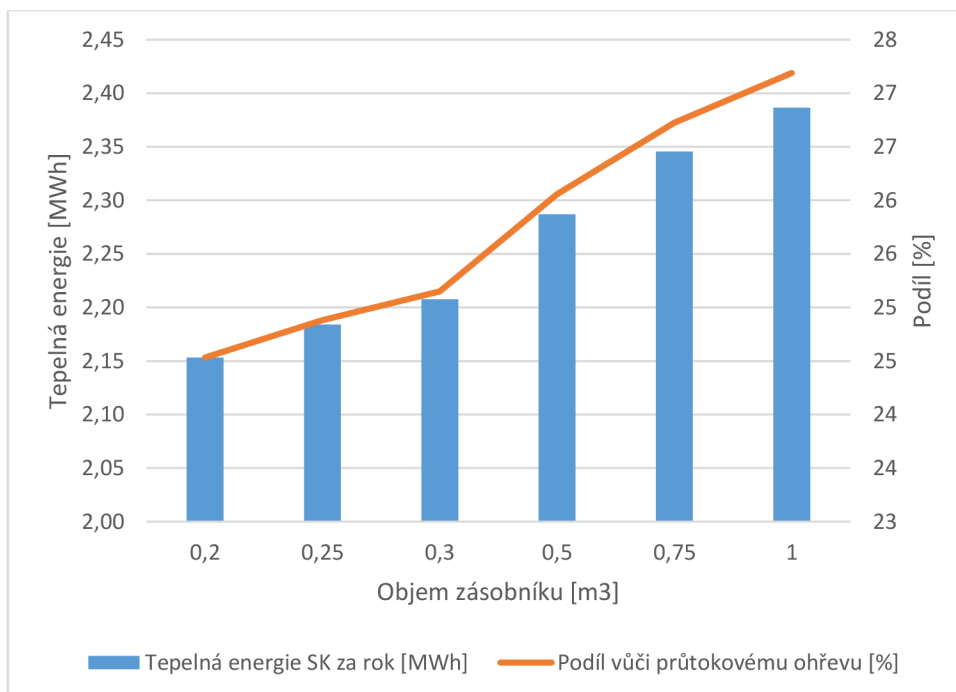
hodnotu byl považován přenos tepla z výměníku vodě o konstantní vstupní teplotě 10 °C (ohřev vody s konstantním průtokem 1000 l·hod⁻¹). Celková roční tepelná energie ze soustavy SK při průtokovém ohřevu odpovídá hodnotě 8,78 MWh.

Vynásobením hodnoty celkového ročního solárního záření z kapitoly 7.1 (1128 kWh·m⁻²) celkovou plochou kolektorů (18,87 m²), se získá potenciál využití solární energie (21,3 MWh). Zisk při průtokovém ohřevu odpovídá 41,2 % celkové solární energie. Zisk zásobníkem o objemu 1 m³ odpovídá 11,2 % celkové solární energie a následně se snižuje.

Při snížení objemu zásobníku na 1 m³ a nastavení průtoku vody odpovídajícího potřebám 4 osob (viz kapitola 7.4 Zatížení) se výsledný výkon zásobníku snižuje o 72,8 % až na 27,2 %. Čím nižší je objem zásobníku, tím nižší je tepelná energie vody čerpané ze zásobníku pro spotřebu. Během teplejších slunečních dnů dochází ke zvýšení teploty vody v zásobníku (nabíjení zásobníku) a tedy zvýšení teploty na vstupu do kolektorů. V případě menších zásobníků může také častěji docházet k překročení teploty 90 °C, kdy soustava přestává dodávat teplo.

Tabulka 11 Vliv objemu zásobníku

Objem zásobníku	[m ³]	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1	Průtokový	Solární energie
Tepelná energie SK za rok	[MWh]	2,15	2,18	2,21	2,29	2,35	2,39	8,78	21,3
Podíl vůči průtokovému ohřevu	[%]	24,5	24,9	25,1	26,1	26,7	27,2	100	-
Podíl vůči celkovému solárnímu záření	[%]	10,1	10,3	10,4	10,7	11,0	11,2	41,2	100



Obrázek 35 Vliv objemu zásobníku

Volba správného objemu zásobníku je důležitým faktorem při návrhu solárního systému pro ohřev vody. Příliš malý objem zásobníku může omezit množství dostupné tepelné energie a zhoršit výkon systému. Naopak, větší objem zásobníku může poskytnout vyšší kapacitu pro ukládání tepelné energie a zvýšit využitelnost solárního systému.

7.6 Zhodnocení

Data ze simulace byla integrována ve 24hodinových intervalech pomocí Type 24 a zaznamenávána do datového souboru ve formátu .out (Type 25). Celkové hodnoty za každý měsíc byly rozděleny počtem dnů v daném měsíci. Bylo provedeno vyhodnocení procentuálního zastoupení využitě a nevyužitě obnovitelné energie, nedostatků elektrické energie (EE) z distribuční sítě. Tyto hodnoty byly zobrazeny v tabulce 12 a v grafech na obrázcích 36, 37, 38 a 40. Procentuální podíl přebytku elektrické energie a spotřebované energie ze sítě je vztážen k dennímu příkonu TČ (100%).

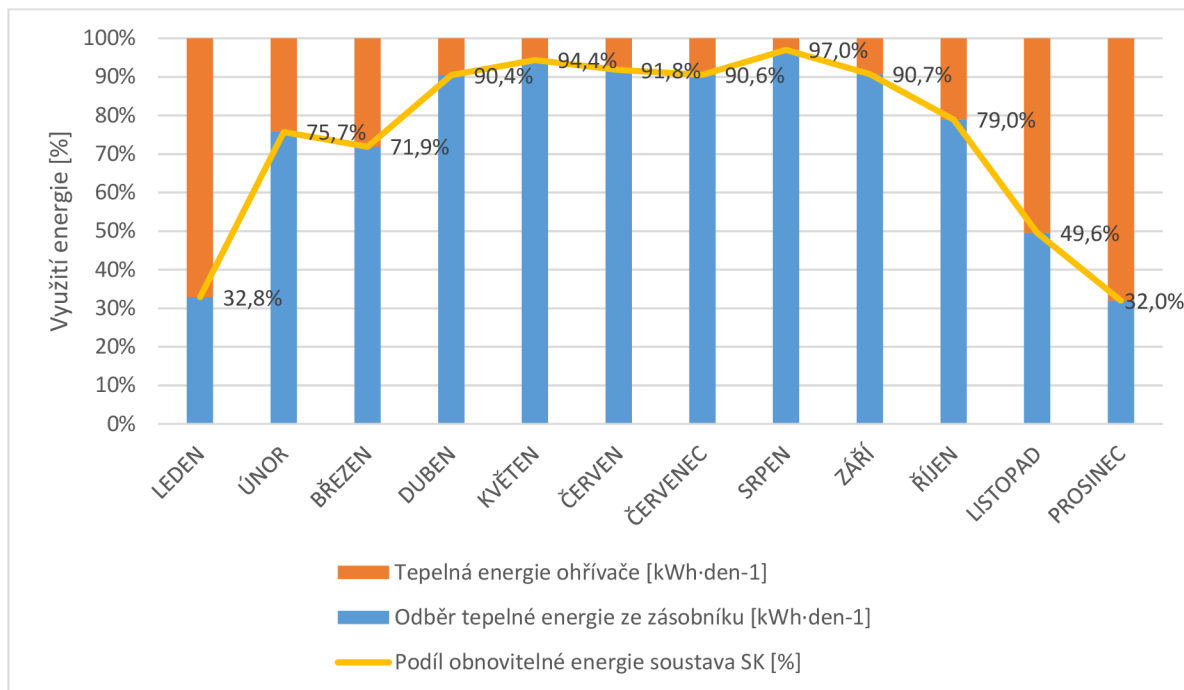
Vyprodukovaná tepelná energie ze solárních kolektorů je předávána přes deskový výměník do zásobníku. Zásobník slouží k odběru ohřáté vody, která následně prochází elektrickým průtokovým ohřivačem a je dohřívána na požadovanou teplotu pro konečné užívání.

V grafu na obrázku 36 je zobrazen podíl obnovitelné energie soustavy SK a elektrické energie z distribuční sítě. Tento graf ukazuje, jaký podíl energie je získáván ze solárních kolektorů a jaký podíl je dodáván z elektrické sítě. Tepelná energie ze zásobníku přesahuje hranici 80 % zastoupení obnovitelné energie od dubna do září včetně. Nejvyšší solární zisk byl dosažen v srpnu s hodnotou 9,1 kWh za den, následovaný červnem – 8,8 kWh a květnem – 8,1 kWh. Graf na obrázku 29 ukazuje, že nejvyšší intenzita slunečního záření byla v květnu. Nicméně, průměrná teplota vzduchu v tomto měsíci je nižší než v letních měsících, což způsobuje vyšší tepelné ztráty SK do okolí. V červenci je intenzita slunečního záření nižší kvůli sklonění solárních kolektorů o 30° vůči horizontální poloze. I přes nejvyšší průměrnou teplotu prostředí (nejnižší ztráty do okolí), soustava SK v červenci nedosahuje nejvyšších hodnot získávané tepelné energie. Nejpriznivější podmínky pro výrobu tepelné energie jsou tedy v červnu a srpnu, kdy je optimální intenzita slunečního záření a průměrné denní teploty.

Vyšší hodnoty odběru tepelné energie ze zásobníku, oproti vyrobené energii z kolektorů na konci sezony naznačují, že zásobník se během teplejších měsíců nabíjel rychleji než se vybíjel. Vyšší podíl obnovitelné energie v únoru byl způsoben stabilizací systému na začátku simulace. Na začátku měsíce teplota zásobníku byla 10 °C a ze zásobníku se odebírala studená voda. Zásobník se začal nabíjet víc koncem měsíce, teplota vrchní části zásobníku se zvýšila a energie uložená v zásobníku v lednu se využila hlavně v únoru.

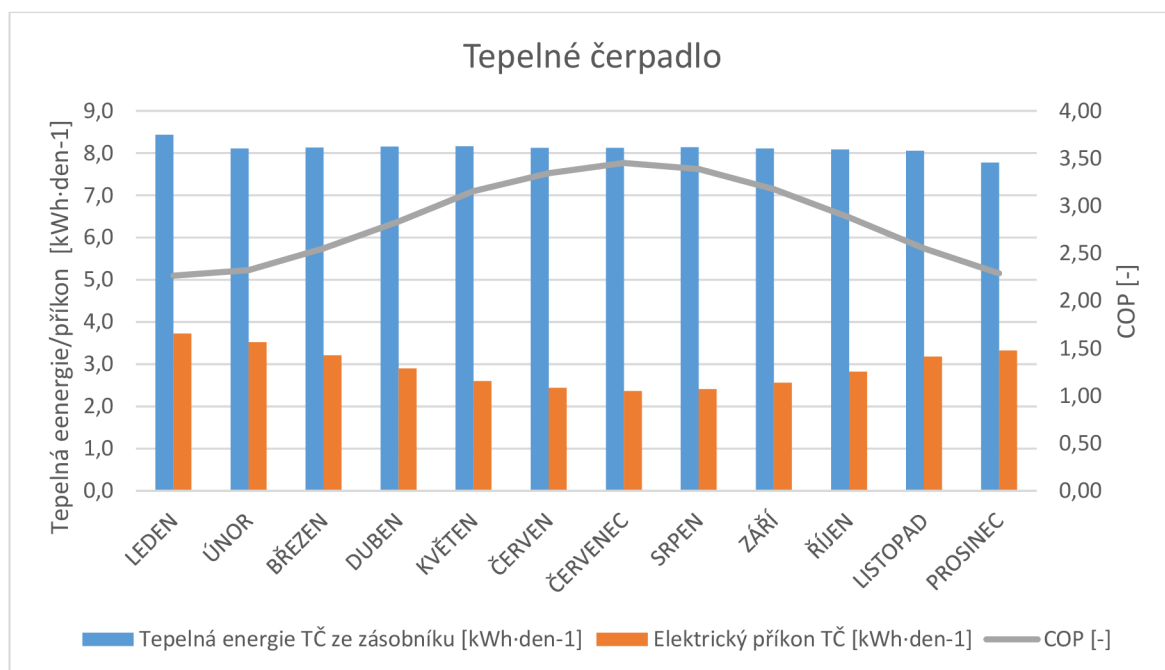
Tabulka 12 Výkon systémů za průměrný den v měsíci a procentuální vyhodnocení

		LEDEN	ÚNOR	BŘEZEN	DUBEN	KVĚTEN	ČERVEN	ČERVENEC	SRPEN	ZÁŘÍ	ŘÍJEN	LISTOPAD	PROSINEC
Tepelná energie z kolektorů	[kWh·den ⁻¹]	3,3	5,0	5,9	8,1	8,1	8,8	7,6	9,1	7,2	6,7	3,5	1,9
Odběr tepelné energie ze zásobníku	[kWh·den ⁻¹]	2,7	6,2	5,8	7,4	7,7	7,5	7,4	7,9	7,4	6,4	4,0	2,6
Tepelná energie ohřívače	[kWh·den ⁻¹]	5,5	2,0	2,3	0,8	0,5	0,7	0,8	0,2	0,8	1,7	4,1	5,5
Celková tepelná energie soustava SK	[kWh·den ⁻¹]	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
Podíl obnovitelné energie soustava SK	[%]	33	76	72	90	94	92	91	97	91	79	50	32
Tepelná energie TČ	[kWh·den ⁻¹]	8,4	8,1	8,1	8,2	8,2	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,0	7,8
Elektrický příkon TČ	[kWh·den ⁻¹]	3,7	3,5	3,2	2,9	2,6	2,4	2,4	2,4	2,6	2,8	3,2	3,3
Tepelná energie podíl PV	[kWh·den ⁻¹]	1,7	2,8	3,6	4,3	4,4	4,6	4,5	4,4	4,2	4,0	2,6	1,3
COP	[-]	2,27	2,32	2,55	2,84	3,16	3,34	3,45	3,39	3,17	2,88	2,55	2,29
Elektrická energie z PV	[kWh·den ⁻¹]	4,4	8,4	12,6	17,9	20,1	19,2	18,0	18,9	13,7	10,3	5,3	2,8
Elektrická energie ze sítě	[kWh·den ⁻¹]	2,95	2,33	1,79	1,39	1,21	1,06	1,05	1,12	1,23	1,43	2,17	2,78
Přebytky elektrické energie z PV	[kWh·den ⁻¹]	3,6	7,2	11,1	16,4	18,7	17,9	16,7	17,6	12,4	8,9	4,3	2,2
Využitá elektrická energie z PV	[%]	21	34	44	52	53	57	56	54	52	49	32	16
Elektrická energie ze sítě	[%]	79	66	56	48	47	43	44	46	48	51	68	84
Přebytky elektrické energie z PV	[%]	97	205	347	564	721	732	706	730	482	316	134	68



Obrázek 36 Využití obnovitelné energie soustava SK

Na obrázku 37 jsou znázorněny hodnoty příkonu a tepelné energie tepelného čerpadla. Křivka COP kopíruje křivku venkovní teploty. V lednu je vidět mírné zvýšení hodnoty COP (o 0,02). Tento jev je způsoben stabilizací a teda zahřátím zásobníku na požadovanou teplotu přes dobu, kdy byla teplota venkovního vzduchu vyšší.

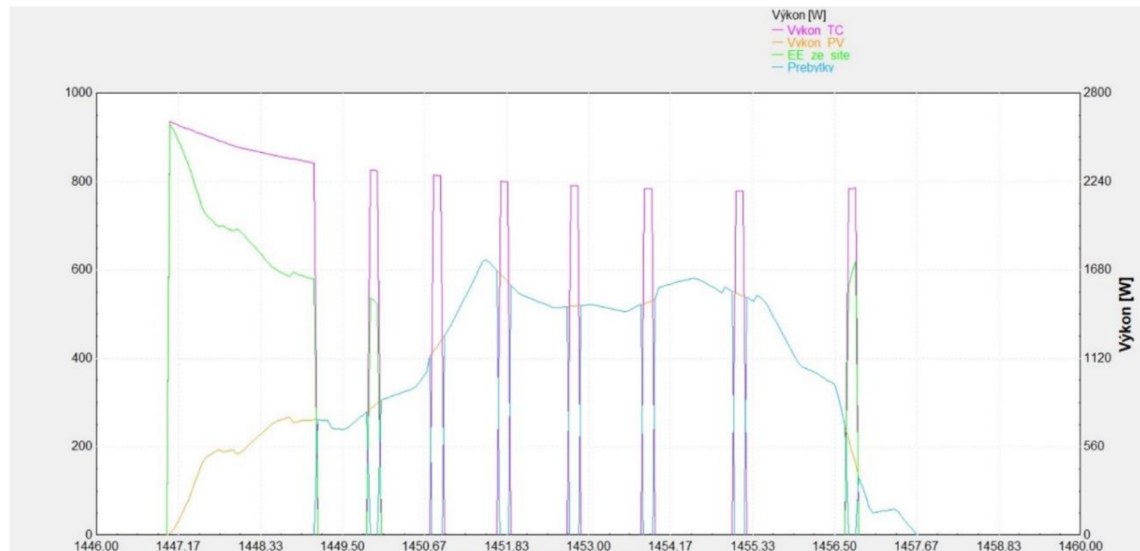


Obrázek 37 Tepelná energie, příkon, COP TČ

Na obrázku 38 se dá pozorovat průběh výroby, spotřeby a přebytků elektrické energie pro den 1. března. Největší výkon PV je zaznamenán v časech 11:23, poté ve 14:21. Jak již bylo zmíněno, TČ pracuje, když fotovoltaický panel vyrábí elektřinu a teplota v zásobníku poklesne pod 48,5 °C. Přes noc se zásobník ochladí, proto je

čerpadlo po dobu 2 h 8 min zapnuté (60,4 %). Následně se čerpadlo během dne zapne 7krát na dobu přibližně 12 minut. Celkově je TČ zapnuté po dobu 3 h 32 min za den. Nejvíce energie se využije ráno, kdy podmínky pro výrobu energie nejsou optimální (sluneční záření padající na PV a teplota okolí je nižší než přes den).

TČ při provozu obvykle pracuje přibližně 15 minut 2 až 3krát za hodinu [61]. Takový cyklus zajistí delší dobu životnosti kompresoru.

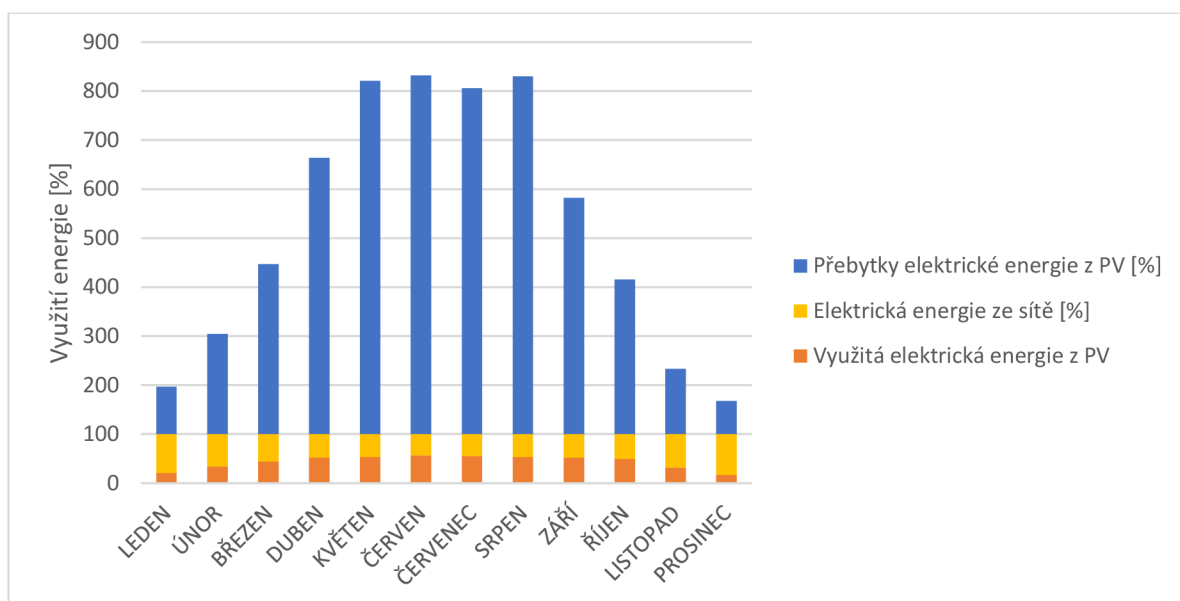


Obrázek 38 Produkce energie v systému PV+TČ

Graf také znázorňuje, z jakých zdrojů čerpadlo odebírá elektrickou energii (ze sítě nebo z PV panelů). Pro 3-7. zapnutí nebylo využito žádné energie ze sítě, jenom z PV panelů. Přebytky elektrické energie z PV panelů vznikají v době, kdy čerpadlo je vypnuté. Ukládáním přebytků elektrické energie do baterie by se zvětšilo využití elektrické energie z PV panelů.

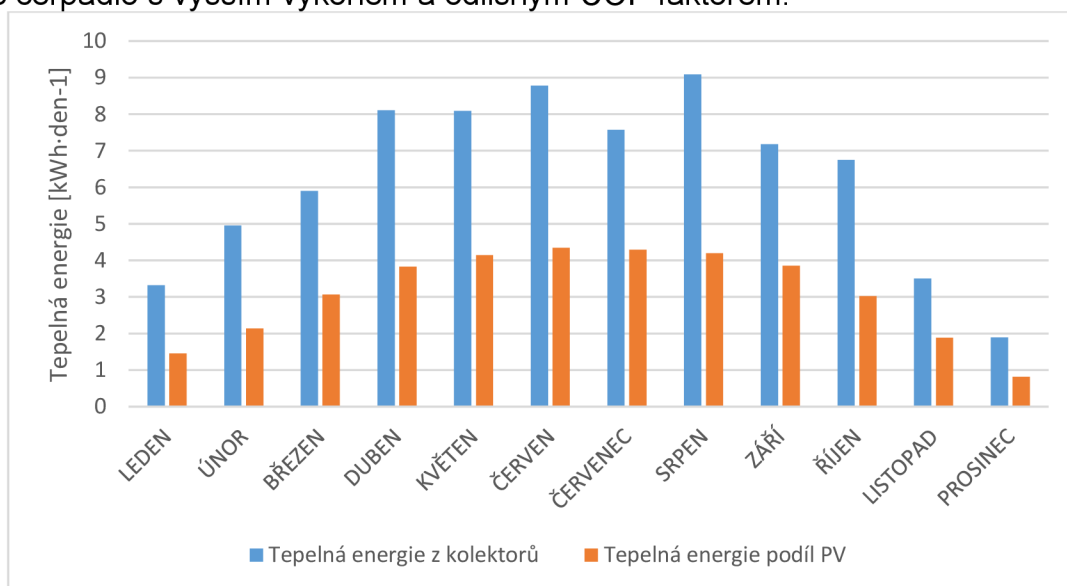
Na obrázku 39 jsou patrné vysoké přebytky, které se budou buď prodávat do sítě nebo využívat pro ostatní účely. Cena za vyrobenou elektřinu z PV se pohybuje přes den od 0,9 do 1,4 Kč [62]. Pro zhodnocení přebytků cena za prodej elektřiny byla uvažována 1,1 Kč. Pokud domácnost nebude schopna využít přebytky z elektrické energie, dá se systém považovat za předimenzovaný.

Elektrická energie z PV pokrývá spotřebu TČ z 16 až 57 %. V zimě je nízký podíl elektrické energie z PV převážně způsoben nízkou intenzitou záření a vyšší potřebou elektrické energie pro TČ z důvodu snížení COP. V létě je to způsobeno zapínáním TČ v nejméně optimální dobu (viz. obr. 28).



Obrázek 39 Produkce/spotřeba elektrické energie soustava PVTČ

Na obrázku 40 je znázorněno porovnání množství tepelné energie produkovaného deseti solárními tepelnými kolektory s produkcí tepelné energie pomocí tepelného čerpadla, přičemž je zohledněn pouze podíl energie z PV panelů. Tepelná energie ze solárních kolektorů je 1,4 až 2,1krát větší, než obnovitelná tepelná energie z TČ. Je to způsobeno nevyužitím přebytků z PV panelů (využito jen 16 až 57 %). Při výpočtu teoretického množství tepelné energie z elektřiny z PV (vynásobením množství vyrobené energie faktorem COP) bylo zjištěno, že 10 PV panelů může tak vyrobit až 64 kWh za den, což by se při uvažované spotřebě stačilo pro zajištění tepla pro téměř 32 osoby. Avšak v tomto případě by se muselo uvažovat tepelné čerpadlo s vyšším výkonem a odlišným COP faktorem.



Obrázek 40 Porovnání tepelného výkonu z obnovitelných zdrojů

7.7 Změna počtu lidí v domácnosti

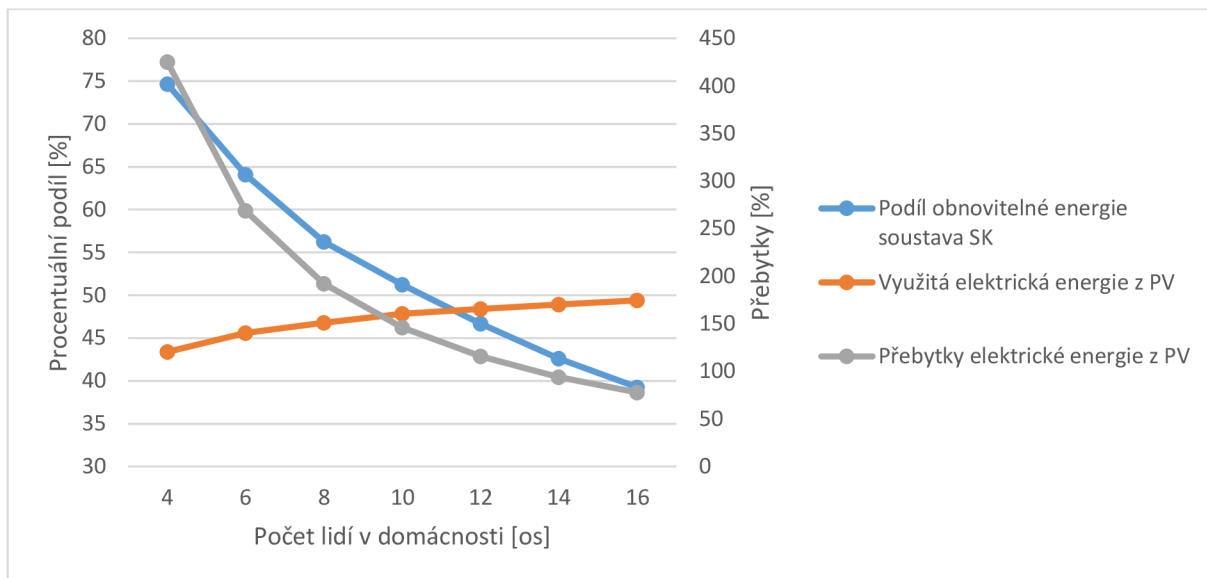
V následující simulaci byla prováděna simulace se zvyšováním počtu lidí v domácnosti a byla sledována závislost parametrů simulace. Roční výsledky jsou zobrazeny v tabulce 13 a v grafu na obrázku 41.

Zvýšením odběru bylo dosaženo snížení teploty vody v zásobníku (vstupní teploty vody do kolektorů). Množství získané tepelné energie ze solárních kolektorů se tím zvýšilo. Podíl obnovitelné energie s nárůstem počtu osob klesá, i přes to, že se čtyřnásobným zvýšením počtu osob, množství energie ze SK zvýšilo 2,0krát, množství elektrické energie spotřebovaných ohřívačem se zvýšilo 3,5krát. Množství tepelné energie získané do soustavy je 4,47 MWh, což odpovídá 50,9 % z celkového možného množství energie (8,87 MWh) z kapitoly 7.5.2.

Tabulka 13 Změna počtu lidí v domácnosti

Počet lidí v domácnosti	[os]	4	6	8	10	12	14	16
Tepelná energie SK	[kWh]	2214	2851	3339	3672	3979	4241	4468
Podíl obnovitelné energie soustava SK	[%]	75	64	56	51	47	43	39
Tepelná energie TČ	[kWh]	2968	4453	5937	7422	8906	10391	11876
Elektrický příkon TČ	[kWh]	1065	1571	2052	2505	2935	3342	3729
Tepelná energie podíl PV	[kWh]	1290	2050	2771	3485	4163	4829	5477
COP	[kWh]	2,79	2,83	2,96	2,96	3,03	3,11	3,19
Elektrická energie ze sítě	[kWh]	623	880	1121	1338	1546	1737	1915
Přebytky elektrické energie z PV	[kWh]	4171	3922	3683	3447	3224	3009	2800
Využitá elektrická energie z PV	[%]	43	46	47	48	48	49	49
Elektrická energie ze sítě	[%]	57	54	53	52	52	51	51
Přebytky elektrické energie z PV	[%]	425	269	192	146	116	94	78

Jelikož zásobník soustavy PVTČ se častěji vybíjí, je potřeba častějšího zapnutí tepelného čerpadla, čímž se zvyšuje COP faktor. Podíl elektrické energie z PV panelů narůstá a pohybuje se v rozsahu 43 až 49 %. Přebytky energie ze sítě klesají výrazně ze 425 % na 78 %.



Obrázek 41 Změna počtu lidí v domácnosti

V případě 16 osob se TČ zapíná ráno na 2:42 hodin a následně během 8 hodin se zapne 18krát na dobu 15 minut, což odpovídá přibližně 2,3 zapnutí za hodinu, což je v rozsahu pro optimální využití kompresoru. Z grafu na obrázku 41 se dá pozorovat zmírňování poklesu podílu obnovitelné energie soustavy SK a přebytku elektrické energie z PV se zvyšujícím se počtem osob.

8 Ztráty

Tepelné ztráty vedením systému se solárními kolektory byly namodelovány pomocí Type 31. Uvažována délka přívodního a odvodního potrubí z kolektorů je 12 metru. Byla uvažována hodnota součinitele prostupu tepla trubkou s izolací do okolí $U_T = 0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

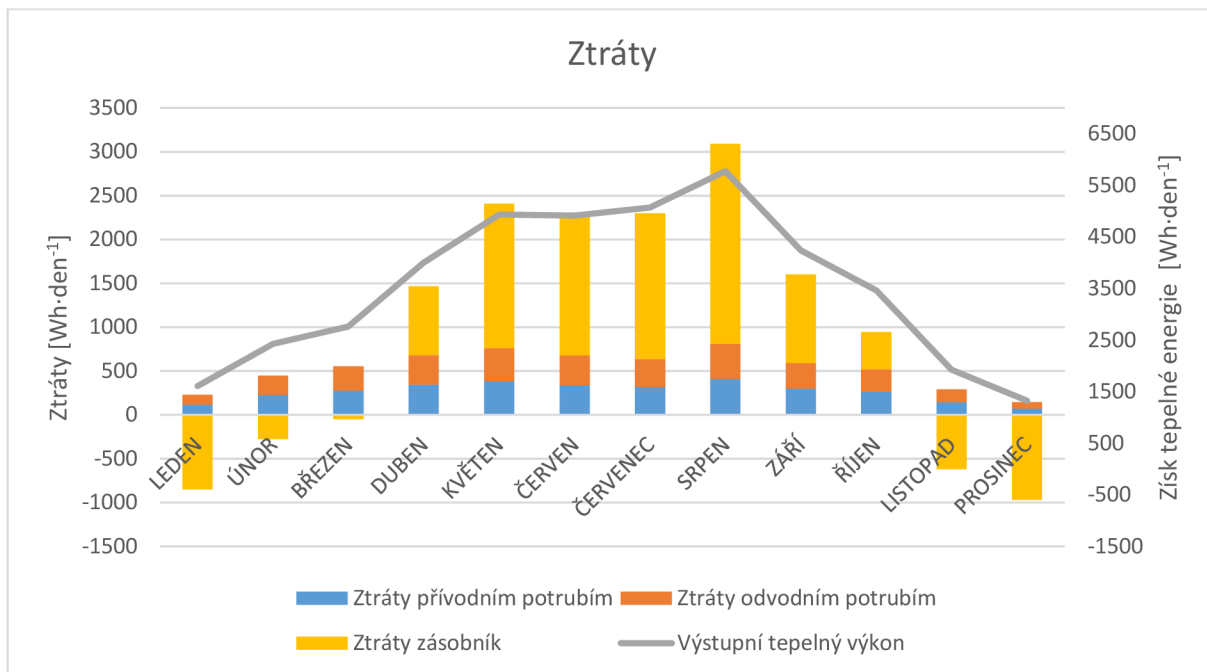
Tepelné ztráty zásobníku byly vypočítané dle ČSN EN 12831-3 [60]. Byl uvažován výměník třídy energetické náročnosti C s plochou $2,2 \text{ m}^2$ o objemu 500 l. Výsledný koeficient prostupu tepla stěnou výměníku $U = 1,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Výsledky simulace jsou znázorněny v tabulce 15 a v grafu na obrázku 42. Ztráty přívodním potrubím do kolektorů a odvodním potrubím z kolektorů v teplejších měsících narůstají kvůli zvýšení teploty v zásobníku (přívodní teploty vody do kolektorů).

Záporné ztráty ze zásobníku v období listopad až březen znázorňují tepelný zisk. Uvažována teplota v okolí zásobníku byla uvažována $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Z toho se dá usoudit, že solární kolektory můžou být využity v období od dubna do října včetně.

Tabulka 14 Ztráty systému kolektorů

	Energie z výměníku	Ztráty přívodním potrubím	Ztráty odvodním potrubím	Ztráty zásobník
	[kWh·den ⁻¹]	[Wh·den ⁻¹]	[Wh·den ⁻¹]	[Wh·den ⁻¹]
LEDEN	1003	116	115	-850
ÚNOR	2027	225	222	-276
BŘEZEN	2745	278	274	-53
DUBEN	5184	344	337	784
KVĚTEN	6332	385	377	1645
ČERVEN	6778	343	334	1606
ČERVENEC	6547	321	312	1665
SRPEN	8041	409	399	2283
ZÁŘÍ	5077	298	291	1013
ŘÍJEN	4012	263	258	423
LISTOPAD	1153	146	144	-621
PROSINEC	311	73	73	-971



Obrázek 42 Ztráty systému kolektorů

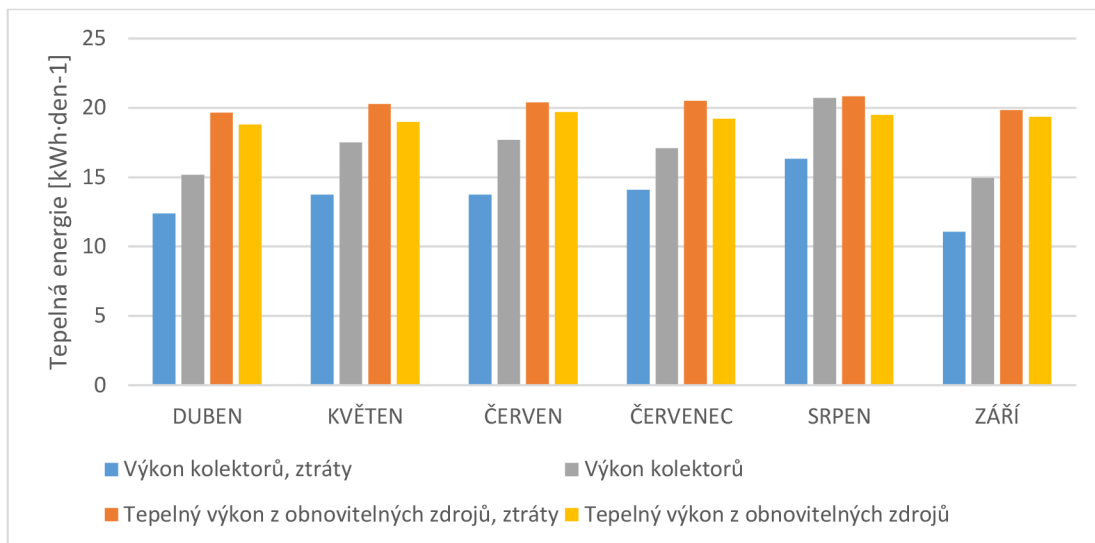
8.1 Porovnání soustavy se ztrátami a bez ztrát pro 16 osob

Výsledky simulace jsou zobrazené v tabulce 15 a v grafu na obrázku 43. Podíl obnovitelné energie soustavy SK klesl o 10 až 15 procent. V červenci je rozdíl vyrobené energie nejmenší.

Tabulka 15 Porovnání výkonu soustavy SK se ztrátami a bez

		DUBEN	KVĚTEN	ČERVEN	ČERVENEC	SRPEN	ZÁŘÍ
Výkon kolektorů	[kWh·den-1]	15,2	17,5	17,7	17,1	20,7	15,0
Odběr ze zásobníku	[kWh·den-1]	15,0	17,8	17,9	17,5	20,5	15,6
Výkon ohřívače	[kWh·den-1]	17,5	14,8	14,7	15,1	12,0	16,9
Celkový výkon	[kWh·den-1]	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Podíl obnovitelné energie	[%]	46	55	55	54	63	48
Výkon kolektorů, ztráty	[kWh·den-1]	12,4	13,7	13,7	14,1	16,3	11,1
Odběr ze zásobníku, ztráty	[kWh·den-1]	9,3	12,9	13,9	14,2	16,1	11,2
Výkon ohřívače, ztráty	[kWh·den-1]	23,2	19,6	18,7	18,4	16,5	21,3
Celkový výkon, ztráty	[kWh·den-1]	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Podíl obnovitelné energie, ztráty	[%]	29	40	43	44	49	34

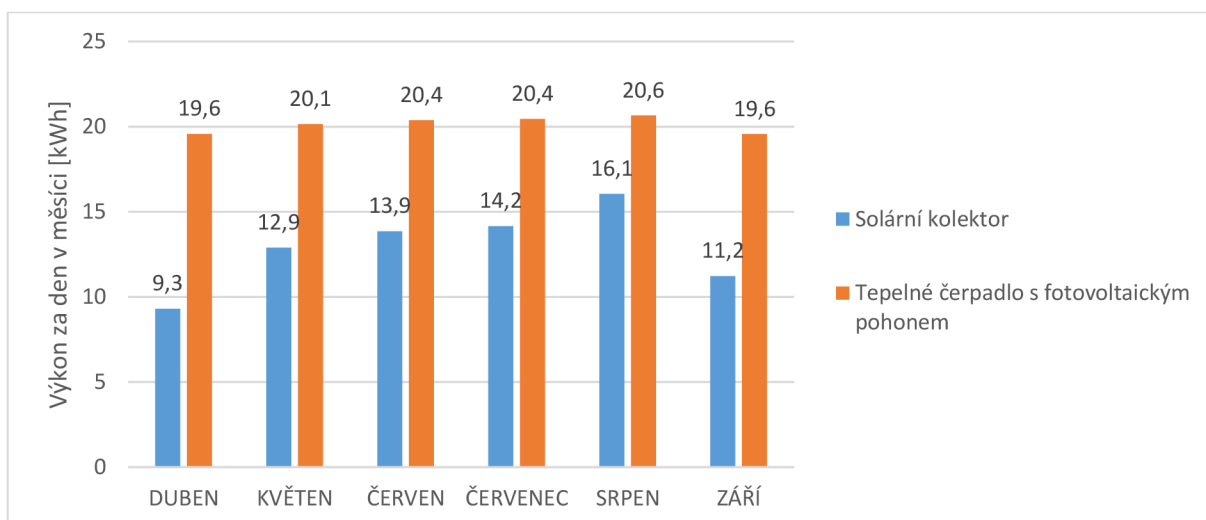
V grafu jsou znázorněny tepelná energie přenesena soustavami PV a PVTČ s tím, že v případě PVTČ byla uvažován pouze tepelná energie, na jejíž výrobě se podílela fotovoltaika. Výroba tepelné energie soustavou TČ v obou případech převažuje výrobu energie soustavou SK.



Obrázek 43 Porovnání vyprodukované tepelné energie se ztrátami a bez

8.2 Simulace ztráty 16 osob

Výsledná simulace zahrnuje ztráty přívodním potrubím do kolektorů, odvodním potrubím z kolektorů a ztráty zásobníkem do okolí. Simulace byla provedena pro domácnost s 16 osobami. Z grafu na obrázku 44 je zřejmé, že množství energie získané soustavou PVTČ je vyšší než množství energie vyrobené soustavou SK. Podíl energie vyrobené solárními kolektory ve srovnání s energií získanou tepelným čerpadlem z fotovoltaiky se pohybuje v rozsahu 48 % až 69 %. Toto znamená, že solární kolektory přispívají značnou částí k celkové energetické potřebě systému. Dále, elektrina z fotovoltaických panelů (PV) je využívána v rozmezí 61 % až 64 %, což je způsobeno častějším zapínáním TČ během dne, kvůli ochlazení zásobníku způsobenou zatížením a ztrátou tepla do okolí.



Obrázek 44 Porovnání soustav SK a PVTČ

Tabulka 16 Simulace ztráty 16 osob

		DUBEN	KVĚTEN	ČERVEN	ČERVENEC	SRPEN	ZÁŘÍ
Tepelná energie z kolektorů	[kWh·den ⁻¹]	12,4	13,7	13,7	14,1	16,3	11,1
Odběr tepelné energie ze zásobníku	[kWh·den ⁻¹]	9,3	12,9	13,9	14,2	16,1	11,2
Tepelná energie ohřivače	[kWh·den ⁻¹]	23,2	19,6	18,7	18,4	16,5	21,3
Celková tepelná energie soustava SK	[kWh·den ⁻¹]	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Podíl obnovitelné energie soustava SK	[%]	29	40	43	44	49	34
Tepelná energie TČ ze zásobníku	[kWh·den ⁻¹]	32,3	33,0	33,5	33,4	32,5	31,1
Elektrický příkon TČ	[kWh·den ⁻¹]	11,3	10,4	10,0	9,7	9,5	9,7
Tepelná energie podíl PV	[kWh·den ⁻¹]	19,6	20,1	20,4	20,4	20,6	19,6
COP	[-]	2,84	3,16	3,34	3,45	3,39	3,17
Elektrická energie z PV	[kWh·den ⁻¹]	17,9	20,1	19,2	18,0	18,9	13,7
Elektrická energie ze sítě	[kWh·den ⁻¹]	4,42	3,99	3,93	3,74	3,42	3,50
Přebytky elektrické energie z PV	[kWh·den ⁻¹]	11,0	13,7	13,2	12,1	12,8	7,5
Využitá elektrická energie z PV	[%]	61	62	61	61	64	64
Elektrická energie ze sítě	[%]	39	38	39	39	36	36
Přebytky elektrické energie z PV	[%]	97	132	131	125	134	78

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo pomocí počítačové simulace porovnat množství tepelné energie produkované solárními tepelnými kolektory s produkcí tepelné energie pomocí tepelného čerpadla poháněného elektrickou energií z fotovoltaických panelů. Porovnání bylo provedeno pro stejnou plochu solárních kolektorů a fotovoltaických panelů s uvažováním různých provozních podmínek:

- Za konstantních provozních podmínek
- S modulem počasí
 - Sezonní zásobník
 - Průtokový zásobník
 - Různé objemy zásobníku
 - Celková simulace bez tepelných ztrát do okolí pro 4 osoby
 - Změna zatížení soustav, změnou počtu osob
 - Celková simulace pro 16 osob, vč. tepelných ztrát

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí: rešeršní (1.-4. kapitola) a simulační (5. – 8. kapitola).

V první kapitole byla rozebrána problematika solární energie a různé způsoby jejího využití. V této části byly detailně popsány solární kolektory a fotovoltaické panely, včetně klíčových parametrů, které byly důležité pro následné vytvoření simulace. Ve druhé kapitole byly popsány různé druhy tepelných čerpadel a také byl vysvětlený topný faktor. V třetí kapitole byly představeny již existující systémy využívající solární kolektory a tepelná čerpadla. Tyto příklady sloužily jako motivace k porovnání dvou systémů a k případnému zpochybnění jejich účinnosti a ekonomické výhodnosti. Ve čtvrté kapitole byly shrnuty poznatky z předchozích kapitol a byl vytvořen předpoklad pro porovnání dvou systémů z hlediska účinnosti, sezonnosti, životnosti. Dále byl uveden předpoklad pro ekonomické zhodnocení obou systémů.

V páté kapitole byl popsán základ pro zadání parametrů do simulačního programu TRNSYS. Nejprve bylo popsáno schéma systému a byly určeny nejdůležitější součásti, které budou použity v simulaci. Poté následovaly parametry pro jednotlivé reálné součásti systému, jako jsou solární kolektor, fotovoltaický panel a tepelné čerpadlo. Tím bylo zajištěno, že simulace bude odpovídat reálnému systému a umožní provést přesnější porovnání dvou systémů.

V šesté kapitole byla provedena parametrická studie, ve které byly měněny vstupní parametry (intenzita slunečního záření, teplota na vstupu do kolektoru, průtok vody v kolektoru a venkovní teplota) s cílem sledovat jejich vliv na závislé parametry (teplota na výstupu z kolektoru, výkon kolektoru, výkon PV panelu, výkon tepelného čerpadla a COP tepelného čerpadla). Získané výsledky poskytly důležité informace pro další hodnocení a optimalizaci systémů z hlediska produkce tepelné energie.

Z této kapitoly vyplývají následující závěry:

- Nižší vstupní teplota vody do kolektoru zvyšuje předaný výkon. Při zvýšení vstupní teploty vody z 20 °C na 45 °C se výkon kolektoru sníží o 14,8 %. Pro snížení ztráty výkonu způsobené vstupní teplotou je užitečné použití stratifikačního zásobníku.

- Snižováním průtoku ze 120 na 60 m³·hod⁻¹ se výkon kolektoru snížil o 3,1 %. Nicméně při nižším průtoku dochází ke zvýšení teploty teplotnosné látky na výstupu z kolektoru až o 21,4 °C.
- S rostoucí intenzitou slunečního záření se zvyšuje výkon solárního kolektoru i výkon fotovoltaického panelu. Solární kolektory jsou účinnějším způsobem využití sluneční energie pro výrobu tepla než fotovoltaické panely pro produkci elektrické energie.
- Při zvýšení teploty okolního vzduchu z 20 na 35 °C se zvyšuje výkon solárního kolektoru o 8,5 % a COP tepelného čerpadla až o 25,3 %. Dochází k významnému zlepšení efektivity systému. Současně se zvyšuje i výkon tepelného čerpadla (až o 5,9 %). Naopak výkon fotovoltaického panelu se snižuje až o 14 %. Při spojení systému fotovoltaického panelu a tepelného čerpadla dochází k vyššímu zastoupení obnovitelné energie při konstantním odběru, čímž se kompenzuje snížení účinnosti fotovoltaického panelu.

V sedmé kapitole byla provedena simulace s použitím reálných meteorologických dat pro Prahu. Časový krok simulace byl nastaven na 3 minuty. Zatížení systému bylo uvažováno pro 4 osoby, kteří spotřebovávají 50 litrů vody o teplotě 45 °C. Zatížení systému bylo rozděleno během dne dle ČSN EN 12831-3. Upřesnil se a rozšířil se popis simulace, zvolené parametry, podmínky porovnání.

Byla provedena studie zásobníku o objemu 50 m³, který měl simulovat sezonní zásobník. Cílem studie bylo zkoumat vliv počáteční teploty zásobníku na výslednou teplotu a celkové tepelné energie v zásobníku. Simulace byla provedena od dubna do konce září. Z provedené simulace vyplývá potenciál pro využití tepelné energie pro vytápění. Tato energie může být uložena do podzemního zásobníku a využita v zimních měsících pro vytápění domu dle potřeby. Množství energie získané ze solárních kolektorů by teoreticky mohlo pokrýt spotřebu tepla pro vytápění pro menší rodinný pasivní dům. V simulaci byly uvažovány nulové ztráty vedením a zásobníkem.

Dále v sedmé kapitole byl popsán vliv objemu zásobníku na výkon solární kolektorové soustavy. Bylo zjištěno, že s klesajícím objemem zásobníku se snižuje množství tepelné energie, které lze uložit v zásobníku. Při průtokovém ohřevu odpovídá zisk tepelné energie 41,2 % z celkové solární energie, která dopadá na povrch kolektorů. Při použití zásobníku o objemu 0,5 m³ se tento podíl snižuje na 10,7 %. Tepelná energie ze zásobníku převyšovala 80% zastoupení obnovitelné energie od dubna do září.

- Nejvyšší solární zisk byl dosažen v srpnu, následovaný červnem a květnem.
- Průměrná teplota vzduchu ovlivňovala tepelné ztráty systému.
- Nejlepší podmínky pro výrobu tepelné energie byly v červnu a srpnu, kdy byla optimální intenzita slunečního záření a průměrné denní teploty.
- Elektrická energie z PV pokrývá spotřebu TČ z 16 až 57 %. V zimě je nízký podíl elektrické energie z PV převážně způsoben nízkou intenzitou záření a vyšší potřebou elektrické energie pro TČ z důvodu snížení COP. V létě je to způsobeno zapínáním TČ v nejméně optimální dobu.

Přebytky z PV panelů dosahují hodnot až 732 % vztažené k příkonu tepelného čerpadla. Pokud domácnost nebude schopna využít přebytky z elektrické energie, dá se systém považovat za předimenzovaný. Případně přebytky elektrické energie můžou být využity pro sekundární ohřev vody v zásobníku, použitím elektrické topné patrony.

Provedla se také simulace se změnou zatížení soustav. Zvýšením odběru bylo dosaženo snížení teploty vody v zásobníku (vstupní teploty vody do kolektorů) a tak množství získané tepelné energie ze solárních kolektorů se tím zvýšilo. Podíl obnovitelné energie ze solárních kolektorů s nárůstem počtu osob klesá, i přes to, že se čtyřnásobným zvýšením počtu osob. Elektrická energie z PV byl využita až do 49 %.

V osmé kapitole proběhla simulace s uvažováním tepelných ztrát v soustavě solárních kolektorů. Byly zohledněny ztráty vedením do a z kolektorů, přičemž délka každé trubky byla předpokládána 12 metrů. Bylo zjištěno, že od listopadu do března dochází k negativním ztrátám do zásobníku (ziskům).

Výsledná simulace pro 16 osob zahrnuje ztráty přívodním potrubím do kolektorů, odvodním potrubím z kolektorů a ztráty zásobníkem do okolí. Podíl energie vyrobené solárními kolektory ve srovnání s energií získanou tepelným čerpadlem z fotovoltaiky se pohybuje v rozsahu 48 % až 69 %. Dále, elektřina z fotovoltaických panelů (PV) je využívána v rozmezí 61 % až 64 %.

Z diplomové práce vyplývá, že soustava PVTČ při stejné ploše SK a PV je účinnější v přeměně obnovitelné energie na tepelnou. Na druhou stranu je také potřeba brát v úvahu počáteční investici soustavy a životnost součástí. Soustava SK je výrazně levnější z investičního hlediska, má vyšší životnost komponentů. Soustava SK může být využita jen v teplejším období kvůli ztrátám tepla od okolí. Komponenty PVTČ jsou výrazně dražší na pořízení a životnost některých součástí je výrazně nižší, než soustavy SK.

Pro budoucí simulace by bylo vhodné provést optimalizaci systému, a to řízení vypínání tepelného čerpadla, menší rozptyl teplot a použití tepelného čerpadla o větším výkonu. Použitím baterie pro ukládání elektrické energie by se účinnost systému PVTČ výrazně zvýšila. Ze simulace plyne, že 10 PV panelů vyrobí 4,6 MW elektrické energie ročně a roční spotřeba TČ pro ohřátí teplé vody pro 16 osob je 3,7 MW. Tento výsledek naznačuje, že s použitím baterie o dostatečném výkonu, soustava PVTČ může být používána samostatně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CIESLAR, Jan. Dvě třetiny spotřeby energie domácností padnou na vytápění. Český statistický úřad [online]. Český statistický úřad, 2022, 20. října 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/dve-tretiny-spotreby-energie-domacnosti-padnou-na-vytapeni>
- [2] Energy consumption in households. Statistics Explained [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households
- [3] WEISS, Werner a Monika SPÖRK-DÜR. SOLAR HEAT WORLD WIDE [cit. 2023-02-05]. DOI: 10.18777/ieashc-shw-2022-0001. Dostupné z: <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2022.pdf>
- [4] BOJEK, Piotr. Solar PV. Iea [online]. 2022, Září [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>
- [5] DELMASTRO, Chiara. Heat Pumps. IEA [online]. Září 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>
- [6] Tepelná čerpadla – prodeje 2010–2021. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. 25.5.2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/tepelna-čerpadla-_prodeje-2010_2021--267746/
- [7] KOPP, Greg; LEAN, Judith L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance: FRONTIER. Geophysical Research Letters [online]. 2011-01-16. Roč. 38, čís. 1. Dostupné online. DOI 10.1029/2010GL045777
- [8] What is Surface Temperature & Why Study It?. The globe program [online]. [cit. 2022-12-1]. Dostupné z: <https://www.globe.gov/web/surface-temperature-field-campaign/overview/science-of-the-surface-temperature-field-campaign>
- [9] Y. Tian, C.Y. Zhao. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy 104 (2013): 538–553. Dostupné z: <https://uhra.herts.ac.uk/bitstream/handle/2299/11214/904970.pdf;jsessionid=3ADB1CCB32CC8472E587220546647250?sequence=2>
- [10] Solární (fotovoltaické) články. Cez [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [11] MATUŠKA, Tomáš. Typy solárních kolektorů. TZB-INFO [online]. [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/154-typy-solarnich-kolektoru>
- [12] Fotelektrický jev. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-05-07].
- [13] Best Research-Cell Efficiency Chart. In: NREL [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html???>
- [14] MATUŠKA, Tomáš. Účinnost solárního kolektoru. In: TZB-INFO [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/161-ucinnost-solarniho-kolektoru>
- [15] ČSN EN 12975: Solární kolektory - Základní požadavky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [16] Optická účinnost slunečních kolektorů. Vacusol [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://vacusol.cz/105-opticka-ucinnost-slunecnich-kolektoru.html>
- [17] MATUŠKA, Tomáš. Optické a tepelné charakteristiky solárních kolektorů. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2010-19-Matuska.pdf>

[18] MATUŠKA, Tomáš. Solární soustavy - rozdělení podle měrného průtoku teplotné kapaliny kolektory. TZB-INFO [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/147-solarni-soustavy-rozdeleni-podle-merneho-prutoku-teplotnosne-kapaliny-kolektory>

[19] AMEUR, Arechkik, Asmae BERRADA, Khalid LOUDIYI a Raymond ADOMATIS. Performance and energetic modeling of hybrid PV systems coupled with battery energy storage. Hybrid Energy System Models [online]. Elsevier, 2021, 2021, 195-238 [cit. 2023-04-30]. ISBN 9780128214039. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-821403-9.00008-1

[20] DIXON, A.E. PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION: THEORY, PRESENT AND FUTURE SOLAR CELLS. Solar Energy Conversion II [online]. Elsevier, 1981, 1981, 243-259 [cit. 2023-05-07]. ISBN 9780080253886. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-025388-6.50037-4

[21] YURTDAS, Semih, Cem TOZLU a Mustafa KARAMAN. Vapor deposition of poly(hexafluorobutyl acrylate) nanocoating for encapsulation of organic solar cells. Progress in Organic Coatings. 2023, 177 [cit. 2023-05-07]. ISSN 03009440. Dostupné z: doi:10.1016/j.porgcoat.2023.107443

[22] HÖSEL, M., D. ANGMO a F.C. KREBS. Organic solar cells (OSCs). Handbook of Organic Materials for Optical and (Opto)electronic Devices. Elsevier, 2013, 2013, 473-507 [cit. 2023-05-07]. ISBN 9780857092656. Dostupné z: doi:10.1533/9780857098764.3.473

[23] BECHNÍK, Bronislav. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>

[24] Fotovoltaický střídač - účinnost není vše. TZB-INFO [online]. 20.4.2009 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>

[25] Global Photovoltaic Power Potential by Country. Global Solar Atlas [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>

[26] What is Global Horizontal Irradiance? [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.3tier.com/en/support/solar-prospecting-tools/what-global-horizontal-irradiance-solar-prospecting/>

[27] BECHNÍK, Bronislav. Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. TZB-INFO [online]. 23.6.2014 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>

[28] ZILVAR, Jiří. Jaký je nejlepší sklon a orientace fotovoltaických panelů pro solární pole?. TZB-INFO [online]. 26.8.2021 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/22703-jaky-je-nejlepsi-sklon-a-orientace-fotovoltaickych-panelu-pro-solarni-pole>

[29] Typy tepelných čerpadel. Viessmann [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/typy-tepelnych-cerpadel.html>

[30] Země/voda - vrt. IVT Tepelná čerpadla [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/tepelna-cerpadla-zeme-voda-vrt>

[31] HODBOŇ, Josef. Tepelná čerpadla – základní informace. TZB-INFO [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/23093-tepelna-cerpadla-zakladni-informace>

[32] Topný faktor COP - účinnost tepelného čerpadla. Abeceda čerpadel [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/topny-faktor-cop-ucinnost-tepelneho-cerpadla>

- [33] Životnost solárních kolektorů. Viessmann [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/zivotnost-solarnich-kolektoru.html>
- [34] Provozní životnost a likvidace solárních panelů. PCC group [online]. 24.01.2022 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.products.pcc.eu/cs/blog/provozni-zivotnost-a-likvidace-solarnich-panelu/>
- [35] Tepelná čerpadla. Viessmann [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/obytno-budovy/tepelna-cerpadla.html>
- [36] FALK, Anton. Summary report on heat pumps in district heating systems. In: Celsius [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://celsiuscity.eu/wp-content/uploads/2021/05/Heat_pumps_in_district_heating_systems_RISE_2021.pdf
- [37] Renewable and non-renewable heat consumption and heat-related CO2 emissions in buildings, 2010-2020. In: Iea [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-and-non-renewable-heat-consumption-and-heat-related-co2-emissions-in-buildings-2010-2020>
- [38] Renewable heat. IEA [online]. 2021 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/renewable-heat?mode=heat@ion=World&publication=2021>
- [39] Silkeborg: Record-breaking solar district heating plant in operation. Solar District Heating [online]. 2017 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.solar-district-heating.eu/silkeborg-record-breaking-solar-district-heating-plant-in-operation/>
- [40] HIRIS, Daniel P., Octavian G. POP a Mugur C. BALAN. Preliminary sizing of solar district heating systems with seasonal water thermal storage. Heliyon [online]. 2022, 8(2) [cit. 2023-05-07]. ISSN 24058440. Dostupné z: [doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08932](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08932)
- [41] Symbiosis between worlds's largest solar heating and CHP plant. State of Green [online]. 04.2020 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://stateofgreen.com/en/news/symbiosis-between-worldss-largest-solar-heating-and-chp-plant/>
- [42] Case study on Solar-heating plant in Silkeborg, Denmark. In: European Union [online]. 28.06.2019 [cit. 2023-05-07]. ISBN 978-92-76-09289-6. Dostupné z: [doi:10.2833/353782](https://doi.org/10.2833/353782)
- [43] HIRIS, Daniel P., Octavian G. POP a Mugur C. BALAN. Preliminary sizing of solar district heating systems with seasonal water thermal storage. Heliyon [online]. 2022, 8(2) [cit. 2023-05-07]. ISSN 24058440. Dostupné z: [doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08932](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08932)
- [44] District Heating with Seasonal Storage in Vojens Denmark. DeepResource [online]. 16.12.2020 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://deepresource.wordpress.com/2020/12/16/district-heating-with-seasonal-storage-in-vojens-denmark/>
- [45] Facebook's hyperscale data center warms Odense. Meta [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://tech.facebook.com/engineering/2020/7/odense-data-center-2/>
- [46] Waste heat from data centers powering the Nordics: A growing number of data center facilities in the Nordics are using waste heat to power people's homes. Straight talk [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://straighttalk.hcltech.com/articles/waste-heat-from-data-centers-powering-the-nordics>

- [47] ZAHÁJILI JSME PROVOZ TEPELNÉHO ČERPADLA. SAKO Brno [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/novinka/cz/1372/zahajili-jsme-provoz-tepelneho-cerpadla/>
- [48] The largest heat-pump plant in the world to produce heat and cooling. KNOWLEDGE HUB [online]. 15.11.2021 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://knowledge-hub.circle-lab.com/article/10079?n=The-largest-heat-pump-plant-in-the-world-to-produce-heat-and-cooling>
- [49] TRNSYS [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <http://www.trnsys.com/>
- [50] SIBBITT, BRUCE, DOUG MCCLENAHAN a REDA DJEBBAR. CASE STUDY DRAKE LANDING SOLAR COMMUNITY [online]. 2015 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.hpbmagazine.org/content/uploads/2020/04/15Su-Drake-Landing-Solar-Community-Alberta-Canada.pdf>
- [51] Solární kolektor Regulus KPS1. In: SVP SOLAR [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/p/solarni-kolektor-regulus-kps1/>
- [52] RÁŽ, J.V. Fyzikální vlastnosti nemrznoucích směsí a navrhování soustav. TZB-INFO [online]. 2010 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/6899-fyzikalni-vlastnosti-nemrznoucich-smesi-a-navrhovani-soustav>
- [53] Fotovoltaický solární panel Jolywood Ntype 415Wp IP68 bifaciální. Svět svítidel [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz/fotovoltaicky-solarni-panel-jolywood-415wp-ip68-bifacialni/>
- [54] VITOCAL 100-A: Technický list pro odborníky. 2019.
- [55] LUTHANDER, Rasmus, Joakim WIDÉN, Daniel NILSSON a Jenny PALM. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. ScienceDirect [online]. 2014 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: doi:10.1016
- [56] NÁVOD NA OBSLUHU A INŠTALÁCIU NEPRIAMOVÝHREVNÝ OHRIEVAČ VODY: OKC 500 NTR/HP. DRAŽICE [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://www.domintex.sk/sub/domintex.sk/images/technicky-list-drazice/Drazice_NTR_HP.pdf
- [57] VRÁNA, Jakub. Nová ČSN EN 12831-3 z pohledu zdravotní techniky. TZB-INFO [online]. 2019 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/19322-nova-csn-en-12831-3-z-pohledu-zdravotni-techniky>
- [58] Často kladené dotazy: Brněnské vodárny a kanalizace [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.bvk.cz/dalsi-informace/casto-kladene-dotazy>
- [59] ČSN EN 12831-3 Energetická náročnost budov - Výpočet tepelného výkonu - Část 3: Tepelný výkon pro soustavy přípravy teplé vody a charakteristika potřeb, Modul M8-2, M8-3. Prosinec 2018.
- [60] CO JE PASIVNÍ DŮM?. CENTRUM PASIVNÍHO DOMU [online]. 2020 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/co-je-pasivni-dum/t2?chapterId=1634>
- [61] JOHNSON, Thomas. Heat Pump Cycle: How Long Should a Heat Pump Run? [online]. 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: Heat Pump Cycle: How Long Should a Heat Pump Run?
- [62] Prodávat vyrobenou elektřinu za tržní cenu? Ano, jde to. BezDodavatele [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.bezdodavatele.cz/vykup/>
- [63] Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny: 5,02 Kč [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>

[64] Nabídka fotovoltaické elektrárny na základě Vašich údajů [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.woltair.cz/fotovoltaika/nabidka?leadUid=429012ac-6371-4d92-8037-c59e3e973ce1>

[65] GoodWe ET Plus - 10 kW [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/p/goodwe-gw10k-et/>

[66] Baterie Dyness Tower T17 - 17,8 kWh [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <http://www.solatech.cz/baterie-dyness-tower-t17-17-8-kwh/>

[67] Sestavy se solárními kolektory FPC [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://solarnikolektory.eu/ploche-solarni-kolektory/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 Solární energie na zemi [8]
Obrázek 2: Rozdělení solárních kolektorů [11]
Obrázek 3 Typické křivky účinnosti různých druhů solárních kolektorů [14]
Obrázek 4 Fotoelektrický jev [12]
Obrázek 5 Vývoj účinnosti fotovoltaických článků
Obrázek 6 Poloha MPP [23]
Obrázek 7 Globální horizontální záření [25]
Obrázek 8 Orientace a úhel kolektoru pro ČR [27]
Obrázek 9 Schéma kompresorového tepelného čerpadla [31]
Obrázek 10 Solární výtopna, Drake Landing, Canada [50]
Obrázek 11 Schéma solární výtopny, Drake Landing, Canada [50]
Obrázek 12 Solární výtopna, Silkeborg, Dánsko [41]
Obrázek 13 Solární výtopna, Vojens, Dánsko [43]
Obrázek 14 Odense, Dánsko
Obrázek 15 Tepelné čerpadlo SAKO, Brno [47]
Obrázek 18: Solární kolektor Regulus KPS1 [51]
Obrázek 19: Fotovoltaický solární panel Jolywood Ntype 415Wp [53]
Obrázek 20 Tepelné čerpadlo Viessman [53]
Obrázek 25: Závislost parametrů na intenzitě slunečního záření
Obrázek 28: Výkon a COP tepelného čerpadla v závislosti na požadované výstupní teplotě ohřevu vody
Obrázek 29 Celkové solární záření na nakloněnou plochu 30 ° a průměrná teplota v období 8:00 – 20:00
Obrázek 30 Schéma zapojení soustavy SK v TRNSYS
Obrázek 31 Schéma zapojení PVTČ v TRNSYS
Obrázek 32 Průběh teplot v zásobníku soustavy PVTČ
Obrázek 33 Graf dle tabulky B.2, ČSN EN 12831-3 [59]
Obrázek 34 Vliv počáteční teploty zásobníku
Obrázek 35 Vliv objemu zásobníku
Obrázek 36 Využití obnovitelné energie soustava SK
Obrázek 37 Tepelná energie, příkon, COP TČ
Obrázek 38 Produkce energie v systému PV+TČ
Obrázek 39 Produkce/spotřeba elektrické energie soustava PVTČ
Obrázek 40 Porovnání tepelného výkonu z obnovitelných zdrojů
Obrázek 41 Změna počtu lidí v domácnosti
Obrázek 42 Ztráty systému kolektorů
Obrázek 43 Porovnání vyprodukované tepelné energie se ztrátami a bez
Obrázek 44 Porovnání soustav SK a PVTČ

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry solárního kolektoru

Tabulka 2: Parametry PV panelu

Tabulka 3: Parametry pro parametrickou studii

Tabulka 4: Závislost parametrů kolektoru na vstupní teplotě teplotnosné látky (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Tabulka 5: Závislost parametrů kolektoru na průtoku (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Tabulka 6: Závislost parametrů kolektoru a PV panelu na intenzitě záření (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Tabulka 7: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě (ref: venkovní teplota – 20 °C, vstupní teplota teplotnosné látky do kolektoru – 20 °C, intenzita záření – 1000 W, průtok – 120 l·hod⁻¹)

Tabulka 8: Závislost parametrů kolektoru, PV panelu a tepelného čerpadla na venkovní teplotě – výpočet

Tabulka 9: Výkon a COP tepelného čerpadla v závislosti na požadované výstupní teplotě ohřevu vody

Tabulka 10 Vliv počáteční teploty zásobníku

Tabulka 11 Vliv objemu zásobníku

Tabulka 12 Výkon systémů za průměrný den v měsíci a procentuální vyhodnocení

Tabulka 13 Změna počtu lidí v domácnosti

Tabulka 14 Ztráty systému kolektorů

Tabulka 15 Porovnání výkonu soustavy SK se ztrátami a bez

Tabulka 16 Simulace ztráty 16 osob

