ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

TEPELNÉ ČERPADLO SE SEZÓNNÍ AKUMULACÍ TEPLA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BC. JAN ŠTĚTKA

č. 26 – TZP – 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štětka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **408901**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tepelné čerpadlo se sezónní akumulací tepla

Název diplomové práce anglicky:

Heat Pump with Seasonal Heat Storage

Pokyny pro vypracování:

Pro zadaný rodinný dům proveďte analýzu využití sezónní akumulace tepla na bázi vodního akumulátoru. Energetický systém bude využívat tepelné čerpadlo a fotovoltaický systém. Analýzu proveďte v simulačním prostředí TRNSYS. Vyhodnoťte energetické parametry systému pro dodávku tepla pro vytápění a přípravu teplé vody.

Seznam doporučené literatury:

Matuška, T.: Solární zařízení v příkladech, GRADA, 2012.
Petrák, J., Petrák, M.: Tepelná čerpadla, ČVUT v Praze, 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Matuška Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **30.06.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

20. 4. 2017
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Souhrn

Cílem této diplomové práce je provedení analýzy využití sezónní akumulace tepla na bázi vodního akumulátoru v kombinaci s tepelným čerpadlem a fotovoltaickým systémem. V teoretické části jsou popsány hlavní komponenty řešeného energetického systému. Pro zadaný dům byl v simulačním prostředí TRNSYS vytvořen model celého energetického systému. Bylo provedeno vyhodnocení energetických parametrů systému v závislosti na velikosti zásobníku, tloušťce izolace zásobníku a prahové hodnotě výkonu fotovoltaického systému.

Summary

The aim of this diploma thesis is to analyze the usage of seasonal accumulation of heat based on a water accumulator in combination with a heat pump and a photovoltaic system. The theoretical part describes the important parameters of the solved energy system. For the given house, a model of the entire energy system was created in TRNSYS simulation environment. An evaluation of the system's energy parameters was carried out, depending on the tank size, the insulation thickness of the isolation and the photovoltaic system power threshold.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Tepelné čerpadlo se sezónní akumulací tepla“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Tomáše Matušky, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Klatovech 30. 06. 2017 Bc. Jan Štětka

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Tomáši Matuškovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování této diplomové práce, Ing. Bořivoji Šourkovi, Ph.D. za cenné rady při práci v TRNSYS a rodičům za umožnění studia.

Obsah

Značky a jednotky 7
1. Úvod 9
1.1. Budova s téměř nulovou spotřebou energie 9
1.2. Cíl práce 12
2. Prvky energetického systému 13
2.1. Tepelné čerpadlo s řízenými otáčkami 14
2.1.1. Kompresor tepelného čerpadla 14
2.1.2. Výhody tepelných čerpadel s řízenými otáčkami 15
2.1.3. Další využití tepelných čerpadel s řízenými otáčkami 16
2.2. Fotovoltaický systém 17
2.2.1. Elektrické vlastnosti fotovoltaických panelů 17
2.2.2. Elektrické měniče 19
2.2.3. Napojení fotovoltaického systému 21
2.3. Sezónní zásobník tepla 21
2.3.1. Akumulace s využitím citelného tepla 22
2.3.2. Akumulace s využitím skupenského tepla 22
2.3.3. Akumulace s využitím sorpčního tepla 24
2.3.4. Akumulace s využitím chemických reakcí 25
2.3.5. Praktické provedení zásobníků pro sezónní akumulaci tepla 25
2.4. Příklady provedení budov se sezónní akumulací tepla 28
3. Řešený objekt a energetický systém 30
3.1. Popis budovy 30
3.2. Schéma systému 32
3.2.1. Nabíjení pohotovostního kombinovaného zásobníku pro přípravu teplé vody 33
3.2.2. Nabíjení kombinovaného pohotovostního zásobníku pro potřeby otopné soustavy 34
3.2.3. Přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku 35
3.2.4. Nabíjení sezónního zásobníku 35
3.3. Simulační model budovy 36
3.3.1. Konstrukce 36
3.3.2. Tepelné zisky 38

3.3.3. Nastavení okrajových podmínek režimu vytápění 40
3.3.4. Nastavení parametrů větracího zařízení objektu 40
3.3.5. Výpočet potřeby tepla na vytápění a výpočet aktuálního tepelného výkonu 42
3.4. Tepelné čerpadlo 45
3.4.1. Tepelné čerpadlo s řiditelnými otáčkami pro řešený energetický systém 45
3.4.2. Tepelné čerpadlo pro referenční systém 47
3.5. Fotovoltaické moduly 48
3.6. Pohotovostní kombinovaný zásobník tepla 49
3.7. Sezónní zásobník tepla 50
3.8. Regulace 51
3.9. Systém 53
4. Analýza výsledků 54
4.1. Hodnocené parametry energetického systému 54
4.2. Energetická bilance referenčního systému 56
4.3. Energetická bilance systému se sezónní akumulací 58
4.4. Vliv velikosti prahové hodnoty výkonu FV systému na energetickou bilanci systému 62
4.5. Vliv tloušťky izolace sezónního zásobníku na energetickou bilanci systému 63
4.6. Vliv velikosti sezónního zásobníku na energetickou bilanci systému 66
5. Závěr 69
Seznam literatury 73
Seznam příloh 77
Přílohy na přiloženém CD 77

Značky a jednotky

AKU	- objem sezónního akumulačního zásobníku	[m^3]
c	- měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
H	- tloušťka	[cm]
P	- výkon	[kW]
Q	- roční potřeba energie	[kWh]
R	- tepelný odpor	[m^2K/W]
SPF	- sezónní topný faktor	[-]
U	- součinitel prostupu tepla	[W/m^2K]
W	- energie	[kWh]
f_{FV}	- solární pokrytí	[-]
f_{nPE}	- faktor neobnovitelné primární energie	[-]
f_R	- redukční činitel	[-]
r_{FV}	- činitel využití	[-]
t	- teplota	[°C]
$\Delta e_{p,R}$	- snížení potřeby primární neobnovitelné energie ref. budovy	[-]
λ	- součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]
ρ	- hustota	[kg/m^3]
$d\tau$	- časový krok	[min]

Indexy

avg	- průměrná hodnota
c	- celková hodnota
em	- střední hodnota
EO	- elektrický dohřev
FV	- fotovoltaický systém
HV	- teplá voda
HS	- otopná soustava
in	- dodaná
iz	- izolace
kz	- pohotovostní kombinovaný zásobník
loss	- ztrátová
m	- měrná
nZEB	- budova s téměř nulovou spotřebou energie
nPE	- neobnovitelná primární energie
on	- prahová hodnota
out	- odebraná
ref	- referenční budovy
ref(FV+přehřívání)	- ref. budovy s FV systémem a přehříváním poh. komb. zásobníku
síť	- dodaná vnější elektrickou sítí
se	- na vnější straně konstrukce
si	- na vnitřní straně konstrukce
sz	- sezónní zásobník
TČ	- celoroční provoz systému s tepelným čerpadlem
xmin	- časový krok x minut
zbyt	- zbytková

1. Úvod

Evropská unie v současné době ve všech technických oblastech prosazuje myšlenku udržitelného rozvoje a snížení lidského vlivu na životní prostředí na planetě Zemi. Jedním z prostředků, jak tohoto dosáhnout, je snižování uhlíkové stopy lidstva. Tento uhlík je ve velké míře tvořen spalováním některých neobnovitelných primárních zdrojů energie nebo látek, k jejichž výrobě bylo těchto neobnovitelných primárních zdrojů použito. Jejich zásoby na naší planetě jsou omezené, k čemuž je nutno přidat fakt, že ne všechny tyto zásoby jsou lidstvu dostupné při zachování energetické a finanční rentability. Proto je cílem postupně snižovat spotřebu neobnovitelné primární energie a nacházet k ní vhodné alternativy ve formě užití obnovitelné primární energie.

Významnou položkou z pohledu podílu na celkové spotřebované energie je energie spotřebovaná na provoz budovy [L2]. Dlouhodobě je vidět snaha o snižování spotřeby této energie – projevem této snahy byly dříve hlavně zpřísňující se požadavky na tepelné vlastnosti konstrukcí budov (v České republice řeší tuto problematiku norma ČSN EN 73 0540-2) a povinné štítkování budov. Dále začaly být používány různé pojmy jako „pasivní dům“, případně pojem „budova blízká nulové“, která je definována v informativní příloze výše zmíněné normy ČSN EN 73 0540-2. Dodržování těchto standardů však bylo čistě na zájmu a možnostech investorů. Nově se objevuje, jako legislativně definovaný, pojem „budova s téměř nulovou spotřebou energie“. Tento pojem se primárně vyskytuje ve Směrnici Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU, dle které všechny nové budovy v Evropské unii od 31. prosince 2020 musí být právě budovami s téměř nulovou spotřebou energie.

Konečným cílem je stavět budovy ekologicky efektivní, s minimálními požadavky na spotřebu primární neobnovitelné energie a s vhodným využitím obnovitelné primární energie. Přitom je nutné dbát na celkovou koncepci zařízení (např. vhodné dimenzování jednotlivých prvků) a zamezit neefektivnímu užívání obnovitelného zdroje energie (např. optimální regulací soustavy).

1.1. Budova s téměř nulovou spotřebou energie

Z pohledu evropské směrnice je budova s téměř nulovou spotřebou energie definována jako budova s velmi nízkou energetickou náročností, jejíž spotřeba je

ve značném rozsahu kryta z obnovitelných zdrojů, včetně energie z obnovitelných zdrojů vyráběné v místě či v jeho okolí. Konkrétní definice je ponechána na národní legislativě z důvodu možnosti zohlednění diverzity klimatických podmínek a efektivnosti využití nákladů na soubory technických opatření [L2].

V České republice je tato směrnice implementována do zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, kde je uvedena česká definice termínu budovy s téměř nulovou spotřebou energie, která odpovídá evropské definici. Prováděcí vyhláškou tohoto zákona je vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov, v platném znění (dále jen „vyhláška č. 78/2013 Sb.“) ve které jsou definovány parametry pro zařazení objektu mezi budovy s téměř nulovou spotřebou energie. Základem pro získání tohoto statutu je srovnání hodnot ukazatelů energetické náročnosti hodnocené budovy s údaji pro referenční budovu, kdy sledované ukazatele jsou neobnovitelná primární energie za rok, celková dodaná energie za rok a průměrný součinitel prostupu tepla [L3].

[L4] Požadovaný průměrný součinitel prostupu tepla je pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie určen vztahem

$$U_{em,nZEB} = f_R \cdot U_{em} = 0{,}7 \cdot U_{em} \qquad (1)$$

kde je $U_{em,nZEB}$ průměrný součinitel prostupu tepla pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie [W/m^{2}K];

U_{em} průměrný součinitel prostupu tepla obálkou ref. budovy [W/m^{2}K];

f_R redukční činitel [-].

Požadavek na obnovitelné zdroje je ve vyhlášce obsažen ve snížení hodnoty neobnovitelné primární energie stanovené pro referenční budovu dle vztahu

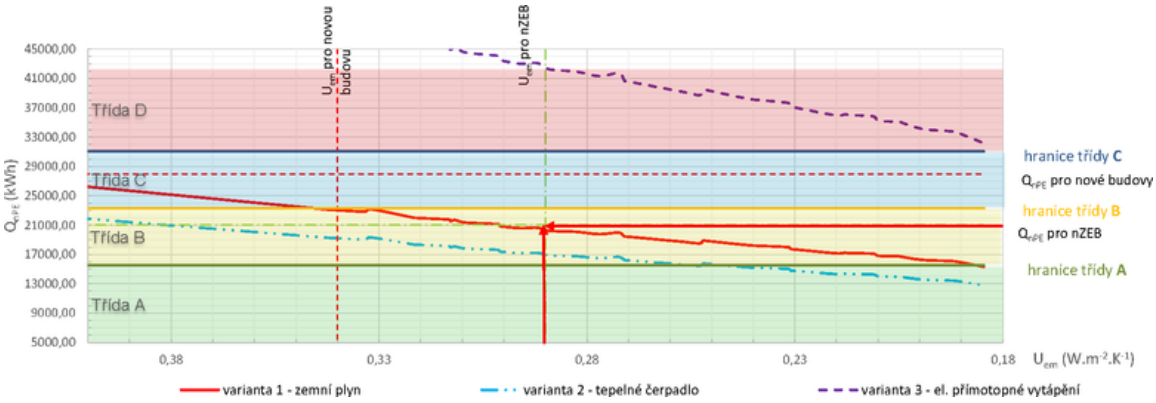
$$Q_{nPE,nZEB} = \left(1 - \Delta e_{p,R}\right) \cdot Q_{nPE} = 0{,}75 \cdot Q_{nPE} \qquad (2)$$

kde je $Q_{nPE,nZEB}$ roční potřeba neobnovitelné primární energie pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie [kWh];

Q_{nPE} roční potřeba neobnovitelné primární energie pro referenční budovu [kWh];

$\Delta e_{p,R}$ snížení potřeby primární neobnovitelné energie ref. budovy [-].

Praktické vyznění požadavků zakotvených ve vyhlášce č. 78/2013 Sb. je vidět v grafu na obr. 1. Tento graf je provedený pro běžný dvoupodlažní rodinný dům se zastavěnou plochou 78,4 m^2. [L5]



Obr. 1 Závislost neobnovitelné primární energie na U_{em} a zdroji tepla [L5]

Z grafu je zřejmé, že dle současných nastavených podmínek lze v České republice dosáhnout požadované výše neobnovitelné primární energie (a tedy získat statut budovy s téměř nulovou spotřebou energie a dosáhnout kolaudace nově postavené budovy v roce 2020) pouze s dostatečnou izolací bez jakéhokoli obnovitelného zdroje v objektu. Při takto nastavených parametrech se spotřeba primární energie pohybuje mezi 100 až 160 kWh/m^2 za rok dle tvaru budovy [L6].

V řadě zemí Evropské unie je dle národních definic cílem dosažení spotřeby primární energie ve výši 45 nebo 50 kWh/m^2 za rok, nejpřísněji je tento parametr nastaven v Dánsku: 20 kWh/m^2 za rok, naopak v Lotyšsku je nastaven na 95 kWh/m^2 za rok [L2]. Evropská komise vydala v roce 2016 soubor doporučených hodnot pro různá klimatická pásma na území členských států. Pro Českou republiku jakožto kontinentální stát Evropská komise určila předpokládanou energetickou náročnost pro rodinný dům vyjádřenou na 20 až 40 kWh/m^2 čisté neobnovitelné primární energie za rok se spotřebou primární energií mezi 50 a 70 kWh/m^2 za rok při místní produkci energie z obnovitelných zdrojů přibližně 30 kWh/m^2 za rok. Pro ostatní klimatická pásma jsou patrné určité rozdíly v číselných hodnotách spotřebované a produkované energie od hodnot výše uvedených, nicméně je zde ze strany Evropské komise jednoznačně viditelný předpoklad produkce energie v každé budově [L2]. Je tedy otázkou, zda Evropská komise ponechá typicky českou cestu k budově s téměř nulovou spotřebou energie bez odezvy.

Při tvorbě koncepce technických systémů v budově pro zajištění tepelné pohody a přípravu teplé vody dle předpokladů Evropské komise je nutno reflektovat fakt, že výše uvedené hodnoty doporučení Evropské komise v sobě, kromě vytápění, vaření, přípravy teplé vody, vlhčení a chlazení, obsahují také energii dodanou pro zajištění

vnitřního osvětlení. Při uvažování běžné potřeby elektrické energie jen na osvětlení přibližně 5 kWh/m^2.rok (a faktoru využití primární energie pro elektřinu ve výši 3) vychází jen na osvětlení potřeba 15 kWh/m^2.rok neobnovitelné primární energie ukusující z celkového požadavku potřeby 20 až 40 kWh/m^2.rok čisté primární energie. Pro zajištění vytápění, přípravu teplé vody, větrání a chlazení bude tedy nutno vystačit si s primární neobnovitelnou energií ve výši 5 až 25 kWh/m^2 ročně, což je relativně ambiciózní požadavek.

1.2. Cíl práce

Cílem práce je provedení analýzy a simulace řešení budovy se skutečně téměř nulovou spotřebou neobnovitelné primární energie a významným podílem energie z místních obnovitelných zdrojů. Jedná se o objekt s velmi nízkou energetickou náročností s instalovaným fotovoltaickým systémem a se sezónní akumulací tepla na bázi vodního zásobníku, který bude v příhodných klimatických podmínkách nabíjen tepelným čerpadlem na bázi voda/voda, přičemž primární okruh tepelného čerpadla bude odebírat energii z okolního prostředí chladičem venkovního vzduchu. V zimních měsících bude naopak primární okruh tepelného čerpadla odebírat naakumulovanou energii z vodního akumulátoru.

Provoz tepelného čerpadla bude spjat s provozem fotovoltaického systému v návaznosti na aktuální produkci elektrické energie. Proto bude uvažováno s tepelným čerpadlem s proměnnými otáčkami, které má možnost přizpůsobit svůj elektrický příkon aktuálnímu výkonu fotovoltaického systému. V případě dostatečného elektrického výkonu (nad určitou stanovenou hodnotu) z fotovoltaického systému bude tepelné čerpadlo odebírat teplo z venkovního vzduchu a přehřívat denní kombinovaný zásobník tepla pro překlenutí požadavků na teplo v období snížené produkce elektrické energie z fotovoltaického systému (např. v noci). V případě možnosti pokrytí potřeby elektrické energie systému (za předpokladu přizpůsobování příkonu tepelného čerpadla) fotovoltaickým systémem a absenci jiných požadavků na dodávku tepla dojde přes tepelné čerpadlo k přečerpání tepla z okolního vzduchu do sezónního zásobníku. K nabíjení sezónního zásobníku tedy bude docházet bez použití draze zaplacené elektrické energie z vnější elektrické sítě.

V případě aktuálního požadavku na dodávku tepla do denního zásobníku (aktuální odběr tepla pro vytápění objektu nebo pro přípravu teplé vody) bude chod

tepelného čerpadla pro zajištění komfortu uživatele nezávislý na produkci elektrické energie ve fotovoltaickém systému a elektrická energie bude odebírána z vnější elektrické sítě. Tepelné čerpadlo bude v zimním období odebírat teplo naakumulované ve vodním sezónním zásobníku, tedy z látky o vyšší teplotě, než je teplota okolního prostředí, a pracovat tak s vyšším tepelným faktorem a nižší spotřebou elektrické energie z vnější elektrické sítě.

Celá soustava technického zařízení řešeného objektu bude simulována v prostředí TRNSYS, na základě jehož výstupů bude vypracováno energetické hodnocení celoročních parametrů soustavy pro dodávku tepla na vytápění objektu a přípravu teplé vody v závislosti na velikosti objemu sezónního zásobníku a srovnání těchto parametrů s referenčním systémem, využívající jako zdroj tepla tepelné čerpadlo země/voda bez sezónní akumulace. Dále bude zhodnocen vliv velikosti prahové hodnoty fotovoltaického systému pro přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku a vliv tloušťky izolace sezónního zásobníku na energetickou bilanci celého systému.

2. Prvky energetického systému

Základním technickým prvkem v moderních objektech je zdroj tepla s vysokou účinností. V případě řešeného objektu se jedná o tepelné čerpadlo typu voda/voda s řízenými otáčkami, jehož výhodou je možnost korigovat tepelný výkon a současně elektrický příkon. Této vlastnosti je v daném případě využito v jeho kombinaci s fotovoltaickým systémem, jehož elektrický výkon je ze své podstaty proměnný.

V případě systému zahrnujícího sezónní akumulaci tepla je z pohledu efektivity celého systému důležitým prvkem energetické soustavy sezónní akumulátor tepla. Pro navazující simulaci bude uvažován fyzikálně nejjednodušší vodní zásobník, avšak v současné době se vědecká obec usilovně věnuje také vývoji složitějších druhů zásobníků, které by mohly přinést zefektivnění procesu sezónní akumulace a její výraznější rozšíření do praktického světa. Výzkum a vývoj využití sezónní akumulace tepla, vyrobeného z obnovitelných zdrojů pro potřeby pokrytí energetické náročnosti objektů, probíhá již téměř jedno století. Vyznačuje se různými přístupy k problematice

a k jejímu řešení, jak z pohledu akumulace tepla, tak z pohledu získávání energie z obnovitelných zdrojů.

2.1. Tepelné čerpadlo s řízenými otáčkami

Tepelná čerpadla jsou dnes v rodinných domech považována za běžné zdroje tepla pro potřeby vytápění a přípravu teplé vody. Na rozdíl například od kotlů na kapalná a plynná paliva však tepelná čerpadla dlouhou dobu nebyla schopna řízeně měnit vlastní výkonovou charakteristiku v závislosti na potřebě dodávané energie.

2.1.1. Kompresor tepelného čerpadla

Příčinnou tohoto stavu bylo rozšířené používání standardního kompresoru typu scroll. Ten je tvořen dvěma spirálami vloženými do sebe – jedna spirála je statická, druhá koná excentrický krouživý pohyb. Tím dochází k nasátí pracovní látky a jejímu stlačení do středu a v důsledku toho je zvýšen tlak pracovní látky na požadovanou hodnotu. Pro správnou těsnost systému je nutné spirály trvale mazat. Při nízkých úhlových otáčkách rotace spirály dochází ke snížení účinnosti mazání a tím ke snížení spolehlivosti a výkonnosti kompresoru. [L7] Z tohoto důvodu byla možnost regulace výkonu změnou otáček u standardního kompresoru typu scroll dlouhou dobu problematická. Regulace výkonu mohla být řešena například obtokem, pro běžná zařízení tepelné techniky byly tyto kompresory užívány bez možnosti regulace výkonu.

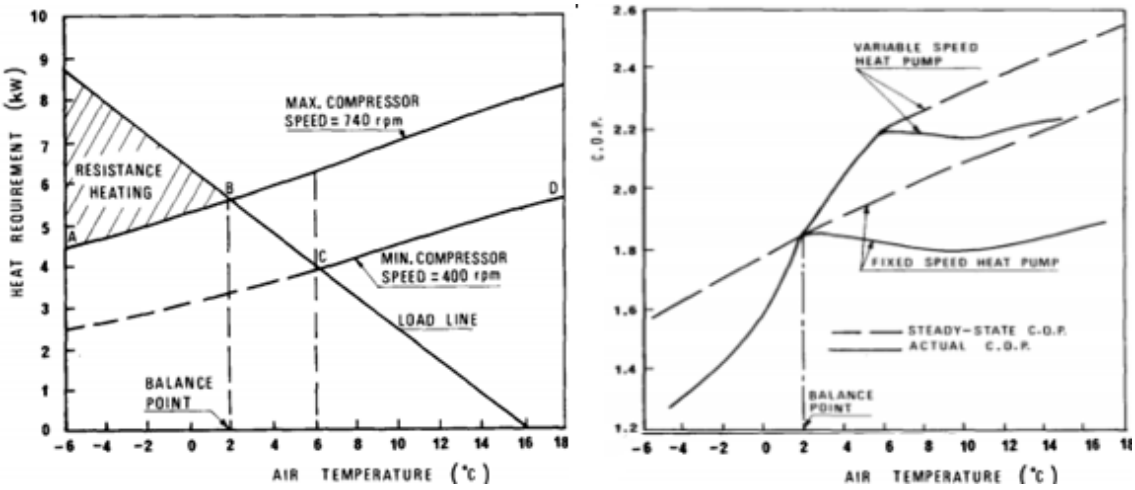
Vývojem klasického scroll kompresoru dále vznikl kompresor typu Digital scroll. Princip řízení jeho výkonu spočívá v přerušení stlačovací fáze oddálením rotorů kompresoru od sebe. Tímto způsobem je možno regulovat jmenovitý výkon kompresoru v rozmezí od 10 do 100 %. [L7]

Dvojitý rotační kompresor představuje jiný princip kompresoru, umožňující regulaci jeho výkonu změnou otáček. Tento druh kompresoru byl vyvinutý již v osmdesátých letech minulého století. Technicky se tento kompresor skládá ze dvojice pevných komor, v každé komoře se otáčí excentrická vačka, která spolu s pohyblivou komorovou přepážkou stlačuje pracovní látku. Pro vyvážení soustavy a snížení namáhání hřídele a ložisek jsou obě vačky, které jsou uloženy na společné hřídeli, umístěny v protilehlých polohách. Díky své konstrukci jsou jednotlivé části kompresoru méně namáhány a dochází ke snížení potřeby mazání a zvýšení odolnosti v nízkých otáčkách kompresoru ve srovnání s kompresory typu scroll. To umožňuje výkon dvojitého rotačního kompresoru regulovat změnou otáček. [L7]

Pro zařízení velkých výkonů je možno využít šroubových kompresorů s regulací výkonu frekvenčním měničem. K pohonu kompresorů s plynulou změnou otáček mohou sloužit standardní třífázové elektromotory nebo vysokootáčkové motory s frekvenčním měničem. V případě užití vysokonapěťového stejnosměrného motoru je plynulá změna otáček vyvolávána bez frekvenčního měniče přepínáním fází. [L8]

2.1.2. Výhody tepelných čerpadel s řízenými otáčkami

Výhoda tepelných čerpadel s řízenými otáčkami, tzv. invertorových tepelných čerpadel, spočívá v regulaci jeho okamžitého výkonu. To tepelnému čerpadlu umožňuje měnit provozní parametry motoru, přizpůsobovat je provozním požadavkům a tím dosáhnout maximální účinnosti a minimálních provozních ztrát. Přínosem řízení otáček kompresoru je také snížení počtu jeho startů, které mají výrazný vliv na životnost kompresoru a také na hodnotu topného faktoru. V přechodové periodě po startu tepelného čerpadla nastává do dosažení ustáleného stavu situace, kdy tepelné čerpadlo spotřebovává elektrickou energii při malých tepelných výstupech a hodnota okamžitého topného faktoru je následkem toho nízká. Příklad chování typů tepelných čerpadel s regulací výkonu a bez regulace výkonu v konkrétním případě dle [L9] je uveden na obr. 2.



Obr. 2 [L9] Závislost velikosti tepelných ztrát objektu a výkonové křivky tepelného čerpadla s konstantními a s proměnnými otáčkami na venkovní teplotě (levý graf)
Závislost topného faktoru tepelného čerpadla s konstantními a s proměnnými otáčkami na venkovní teplotě (pravý graf)

Na levém grafu na obr. 2 se nachází závislost velikosti tepelných ztrát objektu na venkovní teplotě. Dále jsou v něm zaneseny výkonové křivky vzorového tepelného čerpadla pro maximální a minimální otáčky kompresoru. Výkonová křivka při maximálních otáčkách zároveň představuje výkonovou křiku konvenčního tepelného

čerpadla bez možnosti regulace výkonu. Nad bodem bivalence dochází k přebytku tepelného výkonu tepelného čerpadla a tepelné čerpadlo je regulováno systémem zapnuto/vypnuto. Pro tepelné čerpadlo s řiditelnými otáčkami při nižším aktuálním výkonu dochází k posunutí teploty bodu rovnováhy mezi odběrem tepla a regulovatelným tepelným výkonem a nad touto hodnotou ke snížení počtu startů tepelného čerpadla [L9]. Tím je snížen výskyt výše zmíněných přechodových period s nižším aktuálním topným faktorem. Teoretický průběh topných faktorů i s naznačením tohoto poklesu je na pravém grafu na obr. 2. V případě instalace tepelných čerpadel bez regulovatelného výkonu jsou v systému pro omezení počtu startů kompresoru za účelem potlačení výše uvedeného vlivu a za účelem zvýšení životnosti kompresoru instalovány akumulační nádrže. Účelem její instalace je vyrovnávat rozdíl mezi okamžitým výkonem tepelného čerpadla a okamžitým odběrem tepla.

Velikost úspory užitím tepelného čerpadla s proměnnými otáčkami je závislá na více parametrech, např. způsobu odběru tepla z prostředí (TČ vzduch/voda, země/voda) nebo na klimatickém podnebí v místě instalace. Dle [L10] byla provedena simulace chování energetické soustavy s tepelnými čerpadly vzduch/voda a země/voda v případě instalace systému v různých klimatických podmínkách v Itálii: kontinentální klimatická zóna představovaná Milánem, klimatické podmínky v Římě jako představitele středu Itálie a středomořské klima reprezentované Palermem. Z výsledků simulace vyplývá, že zatímco pro systémy země/voda je potenciál energetické úspory instalací tepelného čerpadla s řiditelnými otáčkami téměř konstantní napříč výše uvedenými městy, v případě systému vzduch/voda panující klimatické podmínky potenciál úspor výrazně ovlivňují. Pro systém vzduch/voda v kontinentálního klimatu, kde existuje předpoklad výskytu chladného časového období a tedy se jedná o oblast s menším podílem částečného zatížení systému, jsou dle daného výzkumu úspory násobně menší než v případě jeho instalace v přímořském podnebí, které představuje klimatické podmínky, kde je tepelné čerpadlo během roku provozováno delší časový úsek na nižší tepelné zatížení.

2.1.3. Další využití tepelných čerpadel s řízenými otáčkami

Dosud byl kladen důraz zejména na přizpůsobení chodu tepelného čerpadla změně parametrů odběru tepla na sekundární straně tepelného čerpadla za účelem zvýšení účinnosti energetického systému v případě užití tepelného čerpadla

s proměnnými otáčkami ve srovnání s užitím tepelného čerpadla bez regulace otáček. V současné době, s postupným nárůstem instalací fotovoltaických systémů, které fungují ve spojení s budovami, začíná být řešena otázka přizpůsobování příkonu kompresoru tepelného čerpadla dostupnému výkonu fotovoltaického systému. Příkon tepelného čerpadla je měněn za účelem zvýšení solárního pokrytí energetických potřeb budovy a za účelem zvýšení využití produkce fotovoltaického systému. Optimalizaci pro takový systém nabízí na trhu např. Junkers nebo AC Heating. Tepelného čerpadla s proměnnými otáčkami kompresoru je v praktické části této diplomové práce využito právě s ohledem na přizpůsobování svého příkonu elektrickému výkonu fotovoltaického systému.

2.2. Fotovoltaický systém

Fotovoltaický systém je založen na principu fotoelektrického jevu, který byl vědecky zpozorován již v roce 1839. První fotovoltaický článek s dostatečnou účinností pro praktickou výrobu elektřiny (monokrystalický článek s účinností 6 %) byl vyroben v roce 1954 a po roce 1957 byly fotovoltaické panely využívány na kosmických družicích. S pozemským využitím fotovoltaických panelů se ve větší míře začalo uvažovat po ropné krizi v sedmdesátých letech minulého století. Díky postupnému snižování nákladů na výrobu panelů a růstu účinnosti těchto panelů (a díky nastavené politice napříč státy např. ve formě různých dotací) došlo ve světě během posledních 20 let k výraznému rozšíření instalací fotovoltaických systémů a k nárůstu instalovaného výkonu fotovoltaických panelů [L11].

2.2.1. Elektrické vlastnosti fotovoltaických panelů

[L12] Důležité parametry každého elektrického zdroje jsou napětí, proud a vnitřní odpor. Velikost napětí naprázdno ovlivňuje především použitý polovodič ve fotovoltaickém panelu. Proud nakrátko je funkcí dopadajícího záření na fotovoltaický článek, který při konstantním dopadajícím záření vykazuje chování jako zdroj konstantního proudu. Elektrické chování fotovoltaického článku se nejčastěji popisuje volt-ampérovou charakteristikou.

Elektrický výkon článku je určen součinem napětí a proudu. Je tedy zřejmé, že výkon fotovoltaického systému je dán volt-ampérovou charakteristikou fotovoltaického článku. Ta je zobrazena na obr. 3. V grafu jsou vyznačeny základní elektrické parametry článku – proud nakrátko, napětí naprázdno a proud a napětí při maximálním výkonu

článku. Tyto hodnoty definují tzv. Fill Factor neboli činitel plnění. Ten vyjadřuje poměr nejvyššího dosažitelného a teoretického výkonu článku a je dán vztahem

$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [-] \qquad (3)$$

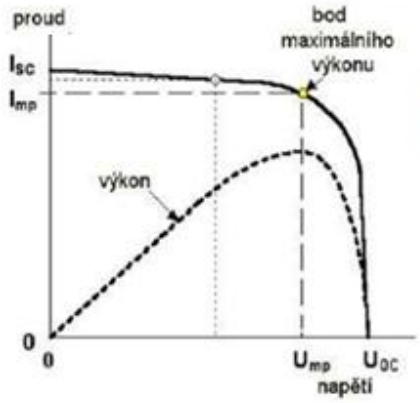
kde je U_{MP} napětí při maximálním výkonu článku [V];

I_{MP} proud při maximálním výkonu článku [A];

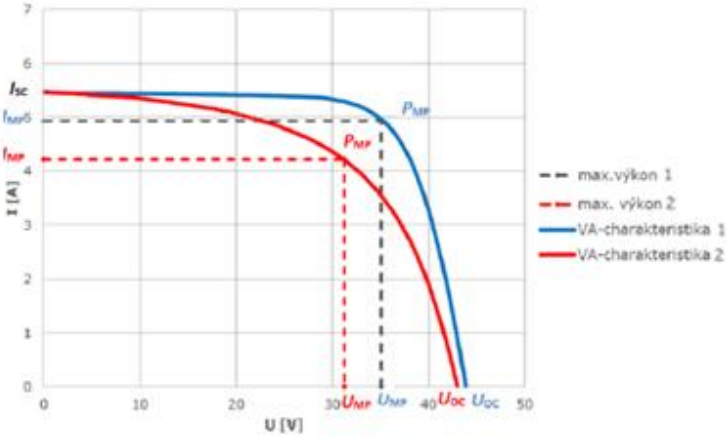
U_{OC} napětí naprázdno [V];

I_{SC} proud nakrátko [A].

Hodnota činitele plnění se odvíjí od morfologie materiálu a odporu aktivní plochy. Snížením činitele plnění klesá účinnost fotovoltaického systému a to vede k nižší produkci elektrické energie (obr. 4).

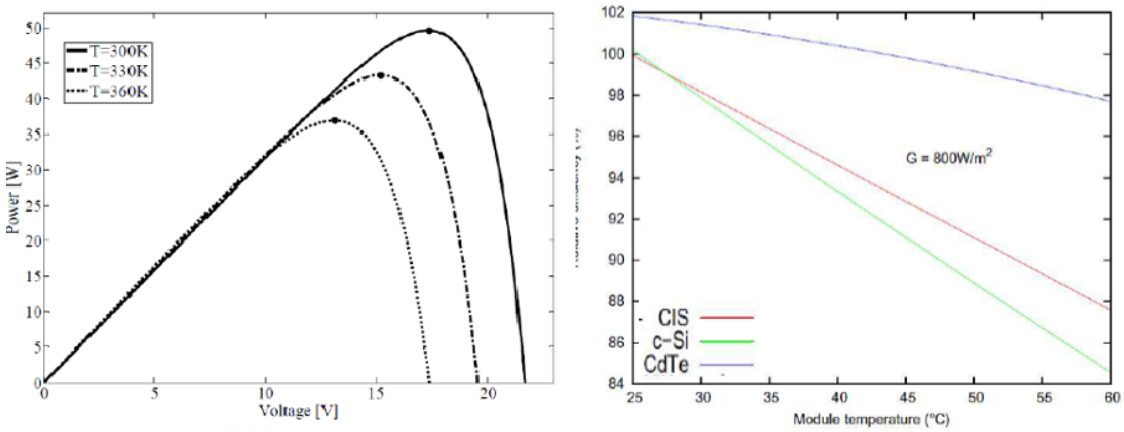


Obr. 3 Volt-ampérová a výkonová charakteristika FV článku [L12]



Obr. 4 Změna výkonu FV článku při různých hodnotách činitele plnění [L13, upraveno]

Volt-ampérová charakteristika fotovoltaického článku je obecně závislá na konkrétních provozních parametrech systému, na okamžitém stavu panujících přírodních podmínek, zejména v podobě velikosti ozáření, a na teplotě fotovoltaického panelu. Jeho elektrická účinnost lineárně klesá s jeho rostoucí teplotou (viz obr. 5). Tuto závislost charakterizuje tzv. teplotní součinitel fotovoltaického článku. Ten je proměnný v závislosti na technologii článku, pro krystalické články se jeho obvyklá hodnota pohybuje mezi 0,35 až 0,5 %/K [L12].



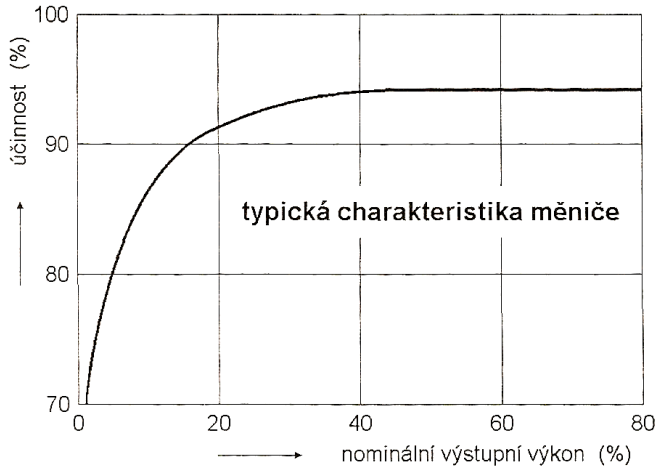
Obr. 5 Změna výkonu FV článku se změnou teploty (graf vlevo) [L12]
Závislost účinnosti FV článku na teplotě panelu pro různé druhy FV panelů (graf vpravo) [L12]

Na účinnosti fotovoltaického panelu má také výrazný vliv jeho stáří, neboť v čase dochází ke změnám proudových charakteristik článků. Dle [L14] výrobci tenkovrstvých panelů poskytují záruku na nejvýše 10% pokles výkonu po 10 letech provozu a celkově 20% pokles po 25 letech provozu.

2.2.2. Elektrické měniče

Výstupem z fotovoltaických panelů je stejnosměrný proud. Pro většinu aplikací je nutno jej za účelem jeho dalšího využití dále zpracovat a přeměnit na proud střídavý o požadované frekvenci a dále upravit výstupní napětí tak, aby odpovídalo jeho následnému využití. Této úpravy je dosahováno v elektrickém měniči.

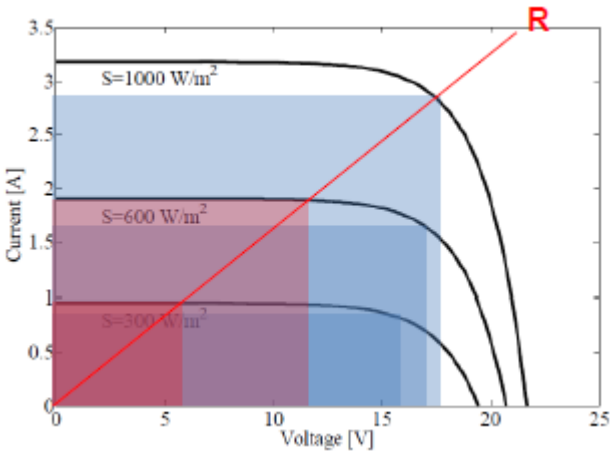
Většina v současnosti instalovaných fotovoltaických systémů [L15] je napojena do vnější elektrické sítě. Z tohoto důvodu musí být měnič schopen upravit průběh napětí tak, aby odpovídal sinusovému průběhu napětí ve vnější síti a napětí do vnější sítě bylo dodáváno přesně ve fázi – měnič musí být tzv. přifázován na síť. Tyto měniče mohou být transformátorové (spolehlivé, těžší, výrobně nákladnější) nebo moderní beztransformátorové s využitím výkonových polovodičů, které mají nižší výrobní náklady. Měniče systémů napojených na rozvodnou síť musí také zajistit odpojení fotovoltaického systému od odstavené rozvodné sítě, aby na ní mohla být zajištěna bezpečnost při údržbových pracích. [L16]



Obr. 6 Typická závislost účinnosti měniče na odebíraném výkonu [L16]

Účinnost měniče není konstantní po jeho celém výkonovém spektru. Typická závislost účinnosti měniče na odebíraném výkonu je zobrazena na obr. 6. Účinnosti měniče 90 % bývá dosahováno přibližně při 15 % odebíraného nominálního elektrického výkonu a od 40 % nominálního elektrického výkonu dosahuje účinnost měniče maximálních hodnot okolo 95 % [L16]. Pro nízké hodnoty přenášeného výkonu je naopak účinnost měniče nízká, při dimenzování střídače je proto nutno postupovat s ohledem na tuto závislost. Výkon střídače nesmí být menší než 90 % špičkového výkonu fotovoltaického pole. [L15]

Měniče jsou často vybaveny obvodem, který zajišťuje fotovoltaickému systému optimální provozní podmínky pro zajištění maximální možné produkce elektrické energie – tzv. sledovač výkonového maxima (MPPT). Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1., poloha maxima výkonu je závislá na konkrétních provozních parametrech systému a mění se během provozu.



Obr. 7 Pozice výkonového maxima dle parametrů FV systému [L17]

Na obr. 7 je znázorněna změna polohy výkonového maxima v závislosti na dopadajícím slunečním záření. Pokud by zátěž ve formě elektrického odporu byla konstantní, odebíraný elektrický výkon by při ozáření menším než 1000 W/m^2 odpovídal ploše červeně vyznačené oblasti. Proto je výhodné do systému instalovat MPPT, který je schopen sledováním změny výkonu určit polohu tohoto maxima a pomocí řízené změny zátěže ve formě elektrického odporu se maximu přiblížit. V tomto případě při užití MPPT by odebíraný výkon odpovídal ploše modře vyznačených oblastí v grafu dle aktuálního výkonu ozáření.

2.2.3. Napojení fotovoltaického systému

[L15] Fotovoltaické systémy můžeme dle aplikace vyrobené energie dělit na tzv. grid-on systémy, dodávající elektřinu alespoň částečně do sítě, a grid-off systémy, které na rozvodnou síť nejsou napojeny. V minulých desetiletích převažovaly grid-off systémy, neboť bylo fotovoltaických systémů většinově užíváno v místech, kde nebyla běžná elektrická síť dostupná a fotovoltaický systém představoval její náhradu. Během posledních let naopak výrazně vzrostl podíl systémů kombinujících připojení na běžnou rozvodnou síť s fotovoltaickým systémem pro zlepšení energetické bilance objektů. V současné době je podíl grid-off systémů na celkovém instalovaném výkonu fotovoltaických systémů v řádu jednotek procent.

Napojení grid-on systémů na veřejnou síť je možno provést napřímo přes vlastní elektroměr měřící pouze elektrickou energii dodanou do vnější elektrické sítě, kdy odebíraná elektrická energie pro potřeby objektu je měřena zvlášť. Tento způsob je ovšem ekonomicky nevýhodný za situace, kdy cena dodané energie je vyšší než výkupová cena. Optimálním řešením za současné ekonomické situace je napojení fotovoltaického systému do sítě přes domovní rozvaděč. Energie vyrobená ve fotovoltaickém systému slouží takto primárně k hrazení potřeb objektu a do vnější rozvodné sítě dodává elektřinu pouze v případě přebytku výkonu.

2.3. Sezónní zásobník tepla

Zásobníky tepla slouží pro překlenutí nesoučasnosti požadavků na potřebu energie s výkonovým potenciálem jejího vzniku ze solárních zdrojů. Jakožto jeden ze základních prvků solární soustavy má zásobník významný podíl na chodu celé solární soustavy a ovlivňuje úroveň pokrytí potřeby tepla.

Důležitými parametry pro hodnocení zásobníků tepla jsou hustota akumulace (množství tepla akumulované v 1 m^3 objemu zásobníku) a účinnost akumulace (poměr mezi dodanou energií do zásobníku a využitelnou energií ze zásobníku odebranou). Tepelnou energii je možno akumulovat různými způsoby s využitím různých fyzikálních dějů a různých akumulačních látek. Základními principy akumulace jsou akumulace s využitím citelného tepla a akumulace s využitím latentního tepla. Pro praktické reálné využití principů akumulace s využitím sorpčního tepla a akumulace s využitím chemických reakcí je nutno ještě jejich dalšího vývoje.

2.3.1. Akumulace s využitím citelného tepla

Tento druh akumulace využívá tepelné kapacity pracovní látky [L18]. Jako pracovní látky se využívají látky s vysokou tepelnou kapacitou [J/m^3K] – voda, kamenivo nebo štěrk (možno v kombinaci s vodou), beton.

Tab. 1 - Vlastnosti pracovních látek užívaných pro akumulaci v citelném teple [L18]

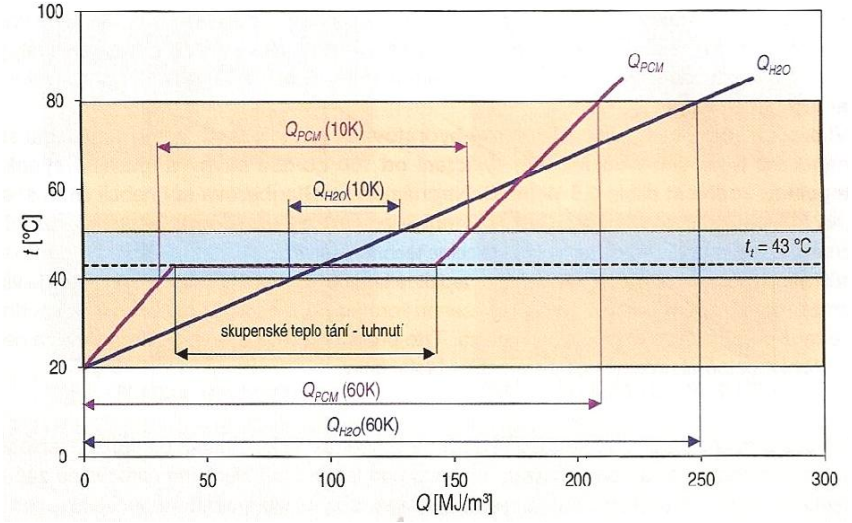
Pracovní látka	Měrná tepelná kapacita [J/kgK]	Hustota [kg/m^3]	Objemová tepelná kapacita [MJ/m^3K]
voda	4187	998	4,2
štěrk	750	1650	1,2
beton	1020	2300	2,3
zemina	900 až 2900	1600 až 2800	2,0 až 3,0

Výhodou akumulačních zásobníků pracujících na principu citelného tepla je jeho fyzikální a konstrukční jednoduchost. Naopak důsledkem nízké hustoty akumulace [100 až 300 MJ/m^3] se tyto zásobníky vyznačují velkým potřebným objemem. Za problematické je z pohledu užití také možno považovat změnu teploty pracovní látky při akumulování energie, a to jak s ohledem na využitelnost různých teplotních hladin, tak také vzhledem ke vznikajícím tepelným ztrátám v zásobníku.

2.3.2. Akumulace s využitím skupenského tepla

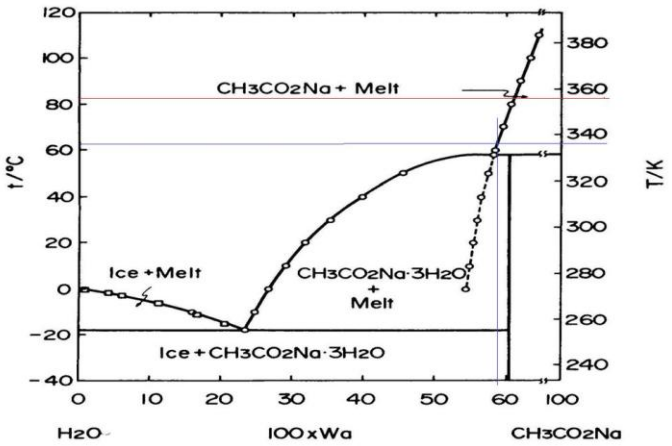
Tento druh akumulace využívá kromě tepelné kapacity pracovní látky i skupenské (latentní) teplo [L18]. Vzhledem k velikosti objemové změny (a tedy velkým tlakovým změnám) při přechodu mezi kapalným a plynným skupenstvím se užívá přechodu mezi kapalným a pevným stavem pracovní látky. Při nízkém teplotním rozdílu mezi počáteční a konečnou fází akumulace okolo teploty skupenské

změny může mít tento druh zásobníku tepla výrazně větší akumulační kapacitu než zásobník pracující pouze s citelným teplem.



Obr. 8 Srovnání akumulované energie v závislosti na rozdílu teplot při akumulaci s využitím citelného a skupenského tepla [L18]

Se zvětšujícím se rozsahem teplot akumulace tepla se výhoda akumulace s využitím skupenského tepla snižuje. V případě užití akumulační látky s nízkou tepelnou kapacitou může být při velkém teplotním rozdílu akumulované teplo dokonce menší než při užití standardního zásobníku s využitím citelného tepla (viz obr. 8).



Obr. 9 Fázový diagram CH_3COONa [L19]

[L18] Jako pracovní látky se používají látky s vysokou hodnotou skupenského tepla a s vhodnou teplotou změny skupenství. Pro solární soustavy se používají pracovní látky založené na organických látkách - parafiny a vosky (l_t = 90 až 200 MJ/m^3, t_t = 30 až 70 °C) a na anorganických látkách – hydratované soli, např. hydratovaná sůl kyseliny octové $CH_3COONa.3H_20$ (t_t = 84 °C, nepatrným zvýšením podílu vody lze

teplotu skupenské změny snížit k hodnotě 60 °C, viz obr. 9 [L19]). Nevýhodou v případě použití hydratovaných solí je nutnost přidání aditiv pro zajištění stálých tepelně-akumulačních vlastností nebo proti problémům s korozivitou, které však snižují latentní teplo. Výhodou při použití hydratovaných solí je možnost podchlazení kapaliny.

[L18][L19] Podchlazení je proces snížení teploty kapaliny pod bod tuhnutí, aniž by došlo ke skupenské změně a k uvolnění naakumulovaného skupenského tepla. Toho lze dosáhnout ochlazením plně kapalné fáze směsi bez výskytu tuhých krystalů, na kterých by kapalina začala měnit své skupenství. Takto bychom byli schopni akumulační látku ochladit na teplotu blízkou teplotě okolí a omezit tak tepelné ztráty v průběhu skladování. V případě potřeby vybíjení zásobníku je nutno vyvolat krystalizaci v podchlazené kapalině, např. vložením krystalu použitého hydrátu. Při krystalizaci se uvolní akumulované teplo, které je částečně využito na ohřátí na teplotu fázové změny. S ohledem na snahu využít nejvíce předností dané technologie (tedy skladování akumulační hmoty při nízké teplotě) je energeticky výhodné provádět krystalizaci akumulační hmoty postupně a užít pro sezónní akumulaci menší akumulační buňky. K tomuto přispívá i skutečnost, že proces podchlazení a krystalizace u akumulačních celků nad 250 kg může být již nestabilní. Praktickou nevýhodou tohoto uspořádání je složitost celého systému (např. nutnost instalace výměníků do každé akumulační buňky) a jeho regulace, jehož důsledkem jsou výrazně vyšší pořizovací náklady. Ty v součinnosti s obavami ze spolehlivosti (zbytkové krystaly bránící podchlazení, nechtěná krystalizace podchlazeného zásobníku) a trvanlivosti celého akumulačního procesu brání výraznějšímu praktickému rozšíření tohoto principu akumulace.

2.3.3. Akumulace s využitím sorpčního tepla

[L18] Tento druh akumulace tepla je založen na principu pohlcování a uvolňování vody (vodních par) a tepelné energie na povrchu tuhé látky (adsorpce), případně v kapalné látce (absorpce). Při desorpci teplá pracovní látka (vzduch v případě otevřeného systému, voda v případě uzavřeného systému) přivádí do sorbentu tepelnou energii za současného vypuzování vodní páry ze sorbentu. Po vysušení sorbentu je možno mluvit o nabitém stavu, který (bez tepelných ztrát) trvá až do procesu adsorpce/absorpce. Při té sorbent pohlcuje vlhkost z pracovní látky za uvolňování sorpčního tepla.

Jako tuhé sorbenty se využívají mikroporézní materiály, jako jsou silikagely a zeolity, avšak jejich užití je omezeno potřebou vysoké teploty pro jejich desorpci. Jako kapalný absorbent se používá chlorid lithný s vodou jako pracovní látkou. Výhodou této technologie je dosažení vysoké hustoty akumulace (500 až 1000 MJ/m^3), avšak vzhledem k současným investičním nákladům není dosud její užití ve srovnání s běžnými způsoby akumulace tepla ekonomicky rentabilní.

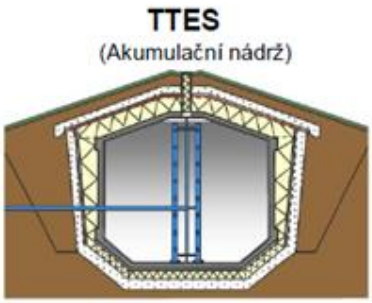
2.3.4. Akumulace s využitím chemických reakcí

[L18] Při tomto akumulačním procesu je využíváno vratných chemických reakcí. Při akumulaci energie se jedná o endotermickou reakci, kdy po dodání tepla dojde k rozložení sloučeniny XY na dvě samostatné látky X a Y, které se odseparují a skladují samostatně po dobu akumulace tepla bez významných tepelných ztrát. V případě potřeby uvolnění uložené energie proběhne sloučením těchto látek exotermická reakce za vzniku původní sloučeniny a uvolnění reakčního tepla. V současné době se pro tento druh akumulace využívá rozkladů hydroxidů a oxidů kovů nebo peroxidů, které však probíhají za vysokých teplot (> 90 °C). Pro praktické využití této metody akumulace pro sezónní akumulaci tepla je nutné vyzkoumat látky s endotermní reakcí o teplotě výrazně nižší než je tato. Navíc je tento princip akumulace dosud provázen problémy se životností použitých látek a problémy se stabilitou a vratností chemických reakcí.

2.3.5. Praktické provedení zásobníků pro sezónní akumulaci tepla

Vodní zásobník

Vodní zásobník je stavebně nejjednodušší sezónní zásobník tepla a jeho použití není omezeno geologickými podmínkami v místě výstavby. Výhodou tohoto druhu zásobníků je vysoká hustota akumulace – obvyklá tepelná kapacita vodních zásobníků tepla je 60 až 80 kWh/m^3 vody v zásobníku, při vysokém stupni izolace mohou být tepelné ztráty tohoto druhu zásobníku relativně nízké. V geologicky stabilní lokalitě bez podzemních vod může být umístěn do země v provedení se železobetonovou konstrukcí na vnitřní straně obloženou nerezovými plechy pro zajištění těsnosti zásobníku, vnější tepelná izolace bývá z důvodu vyšší stability ve formě pěnového skla o tloušťce 20 až 70 cm [L20]. V případě vnitřní nadzemní instalace je z důvodu snížení tepelných ztrát nádrž často instalována v objektu centrálně a její tepelné ztráty jsou tímto také využity pro částečné krytí tepelných ztrát objektu. [L21]



Obr. 10 Schematické zobrazení podzemního vodního zásobníku tepla [L20]

Obr. 11 Nadzemní vodní zásobník tepla – rodinný dům ve městě Regensburg (D) [L21]

Pro účinnou tepelnou akumulaci se v případě vodních zásobníků užívá tzv. teplotní stratifikace, tedy vrstvení objemu zásobníku podle teploty řízeným ukládáním tepla do vrstev o blízké teplotě [L18]. V důsledku tohoto vrstvení je v horní části zásobníku výrazně vyšší teplota než v jeho spodní části, což umožňuje dodávat do systému teplo o požadované teplotě i tehdy, kdy zásobník není plně nabit, a tím zvýšit podíl dodané energie zásobníkem na celkovém akumulovaném teplu.

Pro zásobníky tepla s řízeným vrstvením existuje více technologií k dosažení stratifikace zásobníku během jeho nabíjení. Kromě technologicky a investičně náročné možnosti řízení nabíjení pomocí ventilů na každé teplotní úrovni jsou jednoduchým způsobem stratifikace zásobníku trubkové stratifikační vestavby. Úroveň vstupu vody do zásobníku je dána rozdílem hustot přiváděné vody a hustotou vody v dané vrstvě zásobníku – přiváděná voda je přiváděna pod vrstvu, která má nejbližší nižší hustotu, tedy pod nejbližší teplejší vrstvu. Pro zabránění zpětného přisávání vody z chladnější části zásobníku do rozvodné trubky jsou na odbočkách instalovány lehké zpětné klapky. Voda do dané teplotní vrstvy musí být přiváděna nízkou rychlostí (< 0,1 m/s), aby působením kinetické energie vstupující vody nedošlo k narušení teplotních vrstev.

Akumulace tepla do zemského masivu

Akumulace tepla do zemského masivu může být provedena pomocí hloubkových vrtů nebo plošných kolektorů. Jako akumulační látka zde slouží půda, proto akumulační schopnost zemního zásobníku je zásadně ovlivněna jejím typem. Vhodným typem zeminy pro tento způsob akumulace tepla jsou jílovité půdy, které mají větší objemovou tepelnou kapacitu než půdy písčité nebo písčito-hlinité [L20]. Akumulační schopnost těchto zásobníků je 3 až 5 krát nižší než

u vodních zásobníků (15 až 30 kWh/m^3), jejich výhodou jsou však nižší vstupní investice.

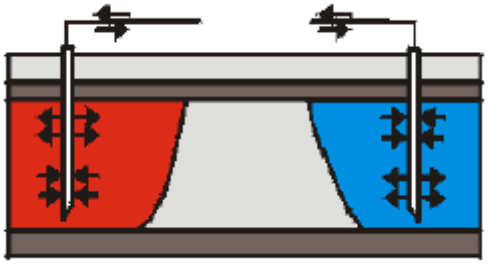
V případě plošných kolektorů se trubky představující výměník tepla instalují přibližně do hloubky 0,5 až 2,5 m [L22]. V dnešní době se k těmto účelům používá plastových trubek. Teplota v takto provedeném zásobníku dosahuje ve srovnání s vodními zásobníky nižších hodnot, příkladová simulace dle [L20] uvádí v konkrétním případě maximální teplotu přibližně 35 °C.

Akumulace tepla pomocí vrtů má oproti plošným kolektorům výhodu v lepším přestupu tepla. Půda pod povrchem má vlivem nasycené vlhkosti tepla dobrou tepelnou vodivost. U plochých kolektorů dochází v blízkosti povrchu vlivem ohřevu půdy k částečnému úniku této vlhkosti, což má nepříznivý vliv na přestup tepla mezi výměníkem a půdou [L22]. Naopak silně nepříznivě na tento typ zásobníku může působit případná přítomnost proudění spodní vody v okolí zásobníku, která může akumulované teplo odvést z okolí výměníku. Sonda ve vrtech bývá ve formě jednoduché nebo dvojité U hadice, případně v provedení koncentrické trubky. Hloubka vrtů většinou dosahuje hodnot 30 až 50 m [L20] (je tedy menší než v případě vrtů užívaných čistě jako zdroj tepla pro primární okruh tepelného čerpadla), vzdálenost mezi nimi přibližně 3 metry. Hydraulické propojení smyček je dáno kombinací paralelního a sériového propojení, při nabíjení je zemní masiv nabíjen od středu pole sond, aby maxima teplotního pole bylo dosaženo v těchto místech a nižší teplota na okraji pole snižovala tepelné ztráty zásobníku.

Podpovrchový výkopový zásobník

[L18] Podpovrchový výkopový zásobník, jehož akumulační objem tvoří voda nebo kombinace voda+štěrk, se vyznačuje relativně nízkými investičními náklady (ve srovnání s vodními betonovými zásobníky jsou měrné náklady o 30 % nižší). V případě štěrkovodního zásobníku zajišťuje štěrk (podíl štěrku max. 60 až 70 %) nosnost zásobníku, avšak znatelně snižuje jeho tepelnou kapacitu přibližně na poloviční hodnotu (30 až 40 kWh/m^3). Nabíjení a vybíjení může být prováděno přímo otopnou vodou nebo pomocí výměníku ve formě trubkového registru umístěného v zásobníku. Stejně jako v případě klasického vodního zásobníku je nutná dostatečná tepelná izolace zásobníku.

Akumulace ve zvodněném podloží



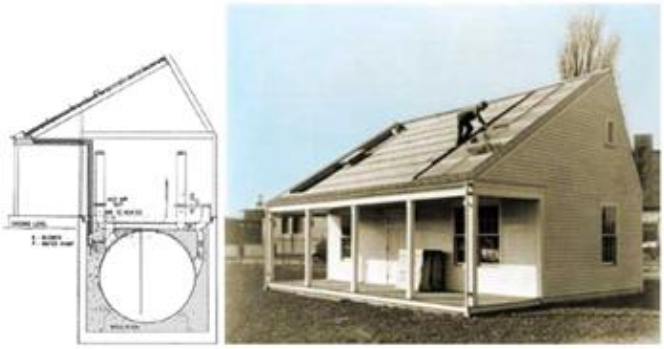
Obr. 12 Akumulace ve zvodněném podloží [L21]

Akumulace ve zvodněném podloží, v tzv. aquiferu, je akumulace tepla v propustné vrstvě písčitého nebo štěrkového podloží nasyceného vodou, která je obklopena nepropustnými vrstvami [L18]. V místě výstavby zásobníku nesmí docházet k významnému proudění spodních vod. Při nabíjení dochází na jednom konci k čerpání studené vody, která je ohřívána zdrojem tepla a vracena na druhý konec podloží, kde se vytváří tepelné pole (obr. 12). Toto tepelné pole se postupným nabíjením rozšiřuje ke studenému konci. Při vybíjení se tok vody i tepelný tok obrací. Pro zjištění možnosti realizace tohoto druhu zásobníku je nutno zajistit hydrogeologické posudky v místě předpokládané stavby. V těch je provedeno ověření vhodnosti vybudování tohoto zásobníku v místě výstavby jednak na základě složení zemní vrstvy, jednak na základě požadavku neovlivnit podzemní vody. Díky těmto skutečnostem není tento druh akumulace tepla výrazně rozšířen.

2.4. Příklady provedení budov se sezónní akumulací tepla

Snaha o výstavbu energeticky nenáročných objektů není záležitostí pouze posledních let, pracovníci výzkumů se touto myšlenkou zabírali již velkou část minulého století. Většina instalací sezónních zásobníků je postavena na myšlence užití zásobníku tepla v kombinaci s tepelnými solárními kolektory. Hledání ideální kombinace užití energie z obnovitelných zdrojů a principů akumulace získané energie však dala vzniknout mnohým rozdílným technickým systémům a výzkum ideálního systému pro energeticky příznivé objekty stále není u svého konce.

Jedním z prvních objektů, který pro vytápění získával většinu energií ze Slunce, byl *Solar I*, který byl postaven již v roce 1938 [L23] na Massachusetts Institut of Technology, USA. Tento přízemní demonstrativní dům byl vybaven podzemním vodním zásobníkem tepla, jenž se nacházel pod podlahovou plochou objektu, a sluneční energii získával ze solárních tepelných kolektorů.



Obr. 13 Objekt *Solar I* včetně řezu ukazujícího umístění zásobníku tepla [L24]

Obr. 14 Objekt *Solar One House*, Delaware [L26]

V roce 1973 byl pod vedením University of Delaware, USA postaven *Solar One House* [L25]. Tento dům kombinoval solární tepelné kolektory se třemi hybridními panely (celková plocha fotovoltaických panelů činila 8,64 m^2), které produkují elektrickou energii pro pohon tepelného čerpadla a která může být akumulována do akumulátoru o kapacitě 800 Ah. Objekt byl vybaven pohotovostním zásobníkem tepla pracujícím na principu vázaného tepla s tepelnou kapacitou 250 kWh, který obsahoval 3200 kg soli $Na_2SO_3.5H_2O$. Tento zásobník mohl být nabíjen teplem ze solárních panelů nebo energií produkovanou tepelným čerpadlem.

V roce 1992 postavil Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems ve Freiburgu, Německo, *Self-Sufficient Solar House* [L27]. Ten přeměňuje sluneční energii na elektrickou ve fotovoltaických panelech, které mají špičkový výkon 4,2 kW. Celková průměrná spotřeba elektrické energie tohoto objektu je 8,7 kWh/m^2. Vyrobenou elektrickou energii je možno krátkodobě akumulovat v bateriích o kapacitě 20 kWh. Pro řešení dlouhodobé akumulace tento dům, na rozdíl od výše zmíněných systémů, využívá principu akumulace elektrické energie. Při přebytku elektrické energie je prováděna elektrolýza vody, vzniklé vodík a kyslík jako produkty elektrolýzy jsou uchovávané v oddělených zásobnících (15 m^3 pro H_2, 7,5 m^3 pro O_2) a slouží jako zdroj pro palivové články, které následně vyrábí elektrickou energii.

Jako příklad kombinace solárních tepelných kolektorů s vodním zásobníkem tepla lze uvést *Nullenergiehaus Nader*, Laβnitzhöhe, Rakousko [L28], který byl postaven na rozdíl od výše zmíněných jako běžný rodinný dům s výpočtovou tepelnou ztrátou 4,5 kW a obytnou plochou 150 m^2. Plocha solárních kolektorů činí 85 m^2, získaná tepelná energie je ukládána ve stratifikačním zásobníku o objemu 75 m^3.

Ze zásobníku je odebíráno teplo pro přípravu teplé vody a ohřev otopné vody do systému podlahového vytápění.

Jak naznačuje výše uvedený krátký přehled, na světě se vyskytují různé kombinace technických systémů, zahrnující energii z obnovitelných zdrojů a akumulace tepla. V současné době sice existují systémy umožňující existenci energeticky fungujících systémů, které dávají budově možnost chovat se z pohledu vztahu k vnější energetické síti jako energeticky téměř nulová. Je však neustálou snahou tyto systémy zlepšovat a najít optimální řešení z hlediska vyváženosti ekologie/ekonomie pro vznik a implementaci energie z obnovitelných zdrojů do systému technického zařízení budov. V rámci výzkumu a vývoje tak vznikají další možná řešení těchto technických systémů.

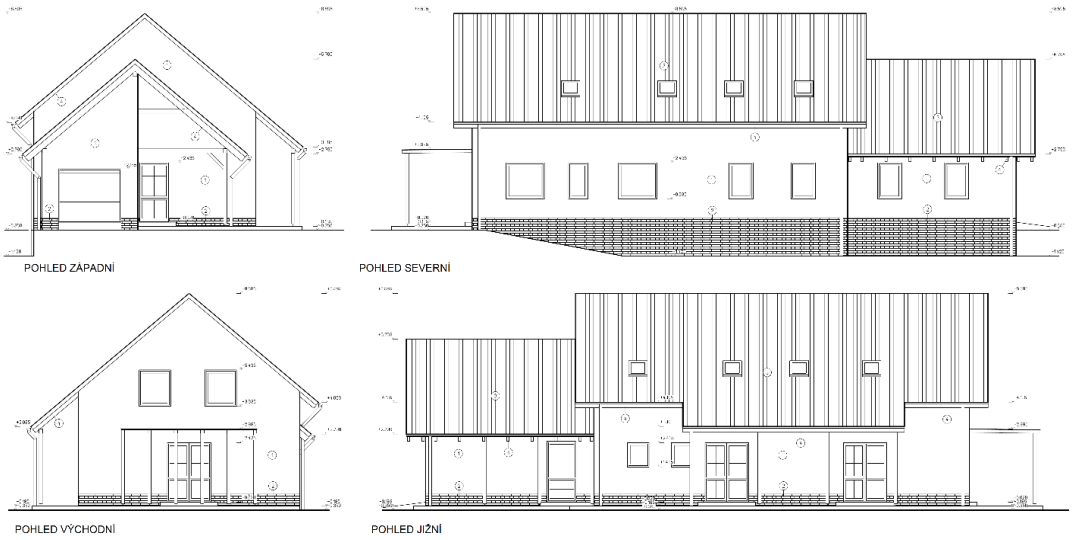
3. Řešený objekt a energetický systém

3.1. Popis budovy

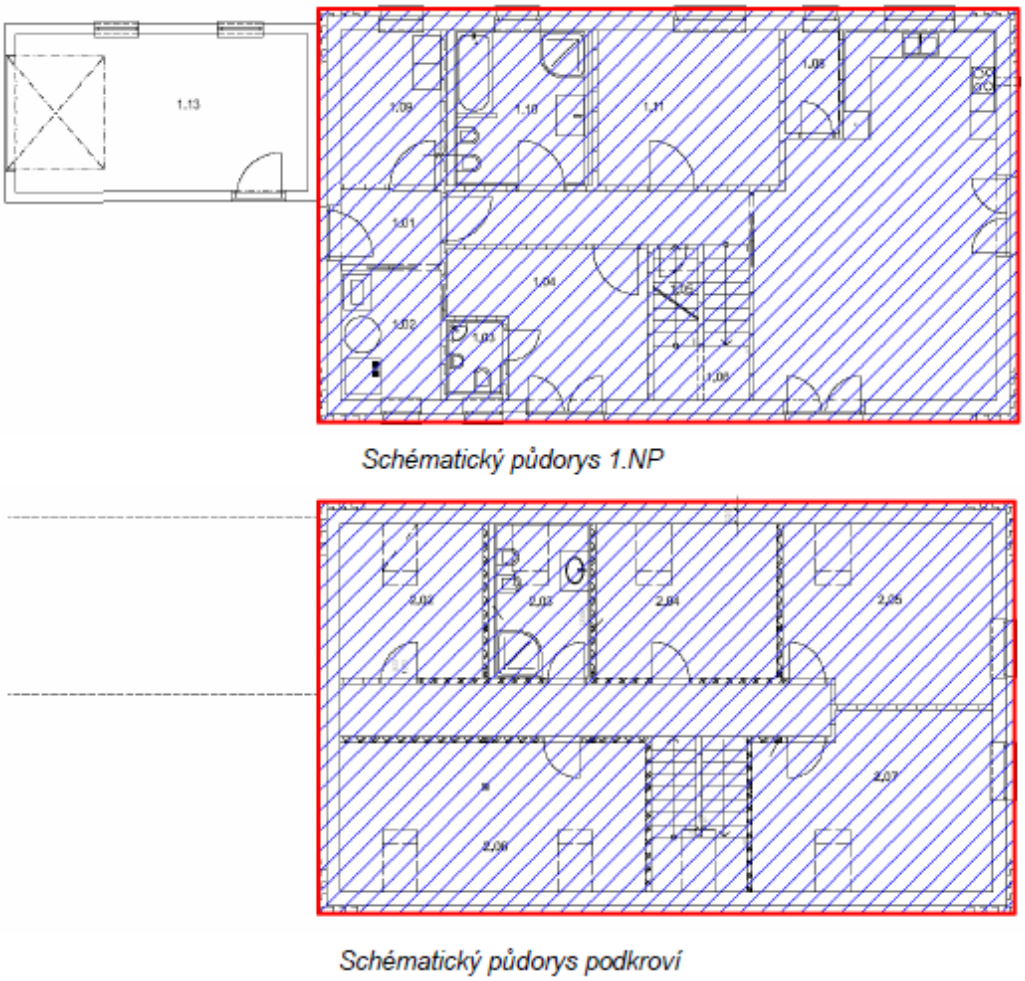
Obr. 15 Umístění řešeného objektu [L29, upr.][L30]

Pro simulaci energetického systému byl použit reálný objekt, nacházející se v současné době ve stadiu výstavby. Stavba je umístěna v katastrálním území obce Hamry u Hlinska, parc.č. 60/9 v Pardubickém kraji. Řešená budova je jednopodlažní rodinný dům s vytápěným podkrovím a sedlovou střechou, bez sklepních prostor, s obestavěným prostorem 935 m^3 a celkovou obytnou plochou 190 m^2. K objektu přiléhá nevytápěná garáž pro jeden osobní automobil. Tato garáž se v energetických

výpočtech (stejně jako v energetickém posudku) neuvažuje a s přilehlou stěnou řešeného objektu je počítáno jako s přiléhající k venkovnímu prostředí.



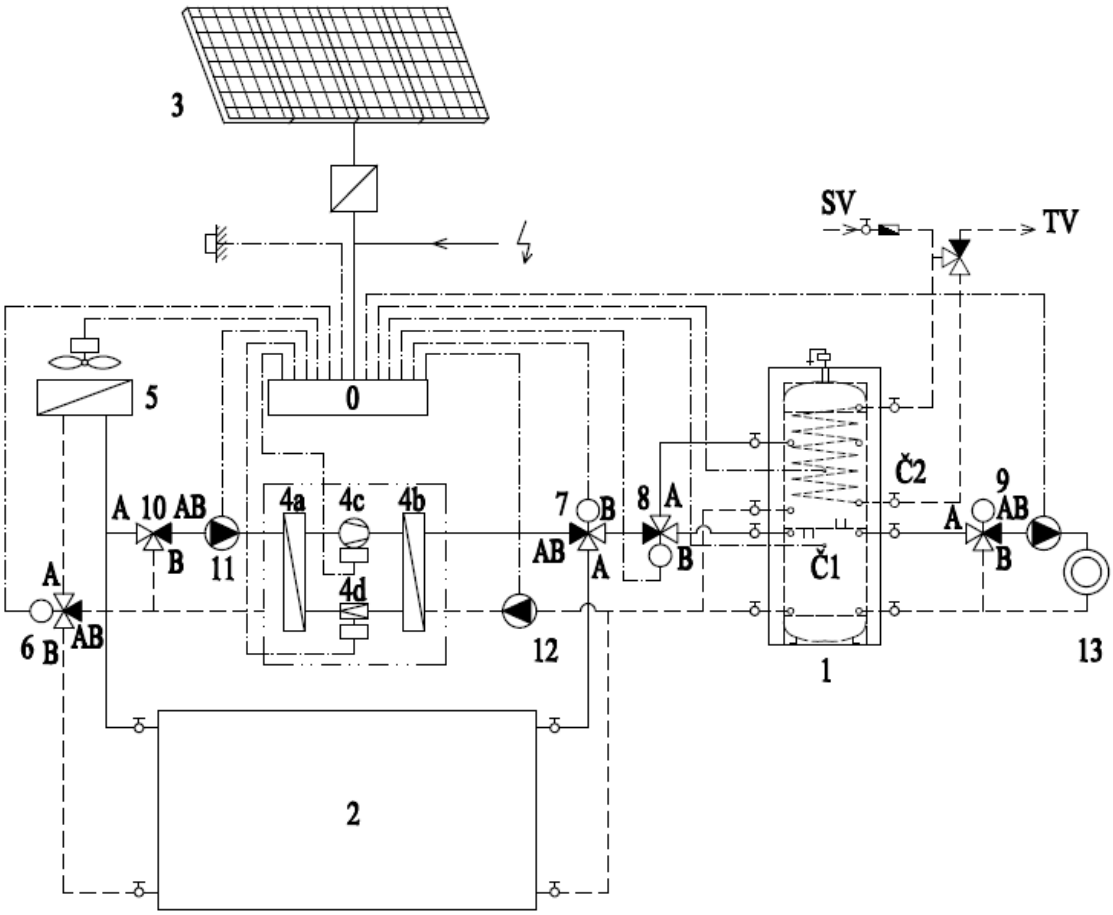
Obr. 16 Pohledy na řešený objekt



Obr. 17 Půdorys 1. NP a půdorys podkroví [L31]

V přízemí budovy se nachází obývací pokoj s kuchyňským koutem, ložnice, pracovna investora, koupelna, WC, šatna a technická místnost pro zařízení energetického systému budovy. V podkroví se nachází větší obytný prostor, koupelna a čtveřice pokojů.

3.2. Schéma systému



Obr. 18 Schéma energetického systému objektu

Základním prvkem řešeného systému je tepelné čerpadlo sestávající z výparníku (4a), kompresoru s regulací otáček (4c), kondenzátoru (4b) a elektronicky řízeného expanzního ventilu. Expanzní ventil a kompresor jsou řízeny regulátorem (0) dle potřeby odběru tepla a aktuálního výkonu fotovoltaického systému se sledovačem výkonového maxima (3). Teplo pro primární stranu tepelného čerpadla může být odebíráno z chladiče venkovního vzduchu (5), případně z vodního sezónního zásobníku (2). Oběhová čerpadla na primárním (11) a sekundárním (12) okruhu tepelného čerpadla jsou elektronicky řízena v závislosti na frekvenci kompresoru tepelného čerpadla. Jako pohotovostní zásobník slouží kombinovaná akumulační nádrž

o objemu akumulované vody 377 litrů. Tento zásobník bude sloužit jako zdroj tepla pro otopnou soustavu (13) a zároveň bude v jeho integrovaném nerezovém výměníku zajištěna příprava teplé vody. Pokročilý regulátor dále ovládá zdvih rozdělovacích ventilů (6), (7), (8) v návaznosti na potřebě odběru tepla a vnějších podmínkách, a dle venkovní teploty vzduchu ekvitermně řídí teplotu vstupní vody do otopné soustavy směšovacím ventilem (9).

3.2.1. Nabíjení pohotovostního kombinovaného zásobníku pro přípravu teplé vody

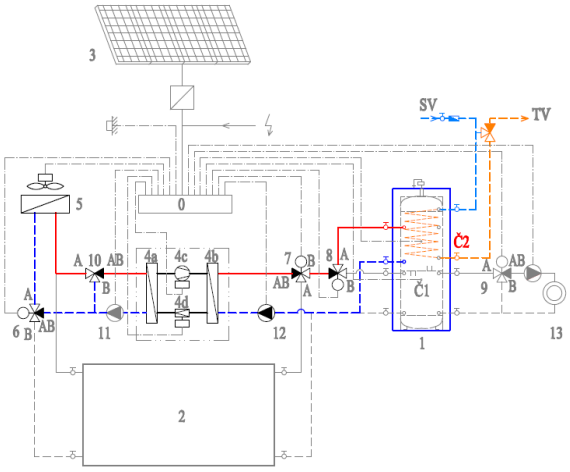
Z hlediska hierarchie řízení energetického systému objektu je prioritní požadavek na přípravu teplé vody, která probíhá ve výměníku v horní části pohotovostního zásobníku. Set-point pro přípravu teplé vody je 49 °C se spínací diferencí ± 1 K, aktuální teplota je měřena v zásobníku čidlem Č2. V případě požadavku na přípravu teplé vody dojde k nabíjení této části zásobníku bez ohledu na dostupný výkon fotovoltaického systému; příkon kompresoru (4c) nebude za této situace proměnný. Rozdělovací ventil (7) bude v poloze B, ventil (8) bude za této situace nastaven do polohy A pro nabíjení horní části pohotovostního kombinovaného zásobníku.

Varianta letní provoz

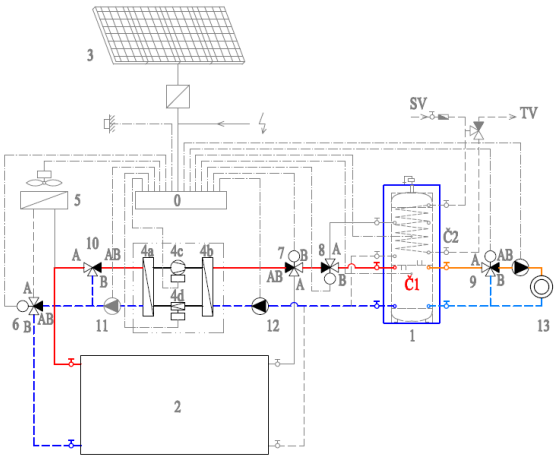
Během měsíců s vyšší teplotou venkovního vzduchu (nad 10 °C) a v ostatních měsících v okamžicích, kdy teplota venkovního vzduchu překročí teplotu 10 °C, bude jako zdroj tepla pro primární okruh tepelného čerpadla sloužit venkovní vzduch – rozdělovací ventil (6) bude nastaven do polohy A (viz obr. 19).

Varianta zimní provoz

V časovém období s teplotami pod 10 °C bude prováděn odběr tepla primárním okruhem tepelného čerpadla z vodního sezónního zásobníku – rozdělovací ventil (6) bude nastaven do polohy B. Z důvodu provozního omezení tepelného čerpadla bude před výparníkem směšovací ventil (10) omezovat teplotu na vstupu do výparníku na hodnotě 25 °C.



Obr. 19 Schéma energetického systému pro přípravu teplé vody – letní provoz



Obr. 20 Schéma energetického systému pro nabíjení pohotovostního zásobníku pro potřeby otopné soustavy – zimní provoz

3.2.2. Nabíjení kombinovaného pohotovostního zásobníku pro potřeby otopné soustavy

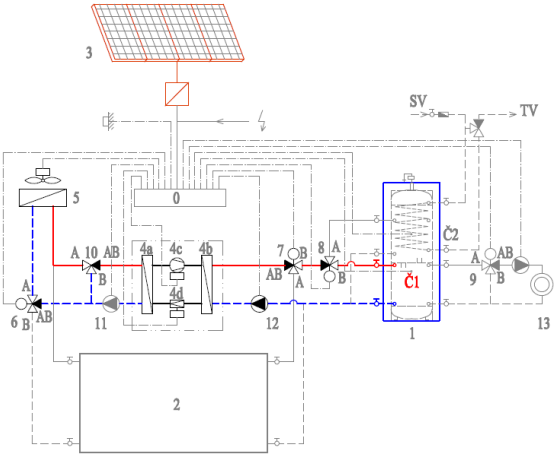
Tento stav má z hlediska hierarchie nižší prioritu, než je nabíjení horní části zásobníku pro přípravu teplé vody. Pokud je tedy splněn požadavek čidla Č2 a zároveň je podkročena teplota měřená čidlem Č1, dojde k nabíjení spodní části zásobníku, ze které je odebírána voda pro potřeby otopné soustavy. Stejně jako v případě nabíjení zásobníku pro potřeby přípravy teplé vody, dojde k nabíjení této části zásobníku bez ohledu na dostupný výkon fotovoltaického systému, příkon kompresoru (4c) opět nebude za této situace proměnný. Rozdělovací ventily (7) a (8) budou nastaveny do polohy B pro nabíjení spodní části pohotovostního kombinovaného zásobníku.

Teplota udržovaná regulací ve spodní části zásobníku je v průběhu roku proměnná. Nastavená teplota bude vždy o 2 °C vyšší, než je teplota otopné vody na vstupu do otopné soustavy, která bude určená ekvitermně dle teploty venkovního vzduchu (návrhová teplota otopné vody do otopné soustavy je 40/35 °C).

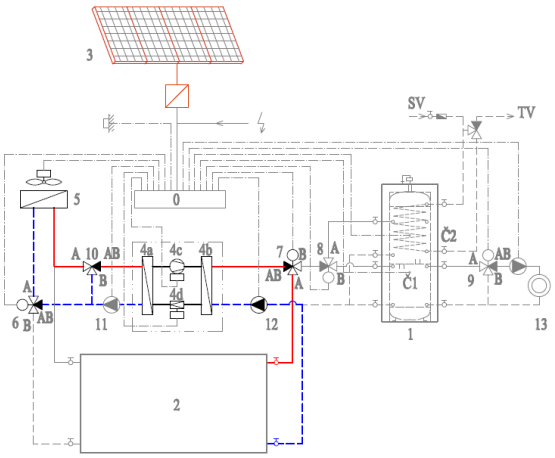
Varianty nastavení rozdělovacího ventilu (6) primárního okruhu (pro letní a zimní provoz) jsou v případě nabíjení pohotovostního kombinovaného zásobníku pro potřeby otopné soustavy totožné jako v případě jeho nabíjení pro potřeby přípravy teplé vody včetně logiky jejich řízení. Na obr. 20 je zobrazeno schéma v případě zimního provozu.

3.2.3. Přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku

K tomuto jevu dochází v okamžiku, kdy je splněn požadavek na primární spínací teplotu obou čidel Č1 a Č2 v okamžiku, kdy produkce elektrické energie fotovoltaickým systémem pokrývá celkový příkon energetického systému nebo je hodnota produkce elektřiny nad definovanou prahovou hodnotou. V daném okamžiku dojde ke zvýšení spínací teploty na čidle Č1 na hodnotu 50 °C, rozdělovací ventil (7) bude nastaven do polohy B, ventil (8) do polohy B. Varianty nastavení rozdělovacího ventilu (6) primárního okruhu (pro letní a zimní provoz) jsou pro nabíjení pohotovostního kombinovaného zásobníku pro potřeby otopné soustavy totožné jako v případě jeho nabíjení pro potřeby přípravy teplé vody včetně logiky jejich řízení.



Obr. 21 Schéma energetického systému při přehřívání krátkodobého zásobníku – letní provoz



Obr. 22 Schéma energetického systému při nabíjení sezónního zásobníku

3.2.4. Nabíjení sezónního zásobníku

Z hlediska hierarchie řízení celého energetického systému se jedná o děj s nejnižší prioritou. K nabíjení sezónního zásobníku dochází pouze za situace, kdy je celý pohotovostní kombinovaný zásobník nabitý na teplotu 50 °C a není akutní (prioritní) požadavek na dodávku teplé vody. Zároveň k tomuto režimu dochází pouze tehdy, kdy aktuální elektrický výkon fotovoltaického systému zároveň pokrývá požadavky na dodávku elektřiny pro činnost kompresoru (4) a dalších pomocných prvků [oběhových čerpadel primárního (11) a sekundárního okruhu (12) tepelného čerpadla, servopohonů ventilů (6+7+8), ventilátoru chladiče venkovního vzduchu (5), regulace] a teplota venkovního vzduchu je vyšší než 10 °C pro dosažení hodnoty

topného faktoru tepelného čerpadla, který by byl z hlediska provozu celého energetického systému dostatečně efektivní. Regulátor dle aktuálních provozních podmínek a matematického popisu tepelného čerpadla předvídá aktuální elektrický příkon systému a dle něj upravuje frekvenci otáček kompresoru tepelného čerpadla tak, aby aktuální energie produkovaná fotovoltaickým systémem měla nejvyšší možný stupeň využití. Rozdělovací ventily (6) a (7) budou nastaveny do polohy A.

3.3. Simulační model budovy

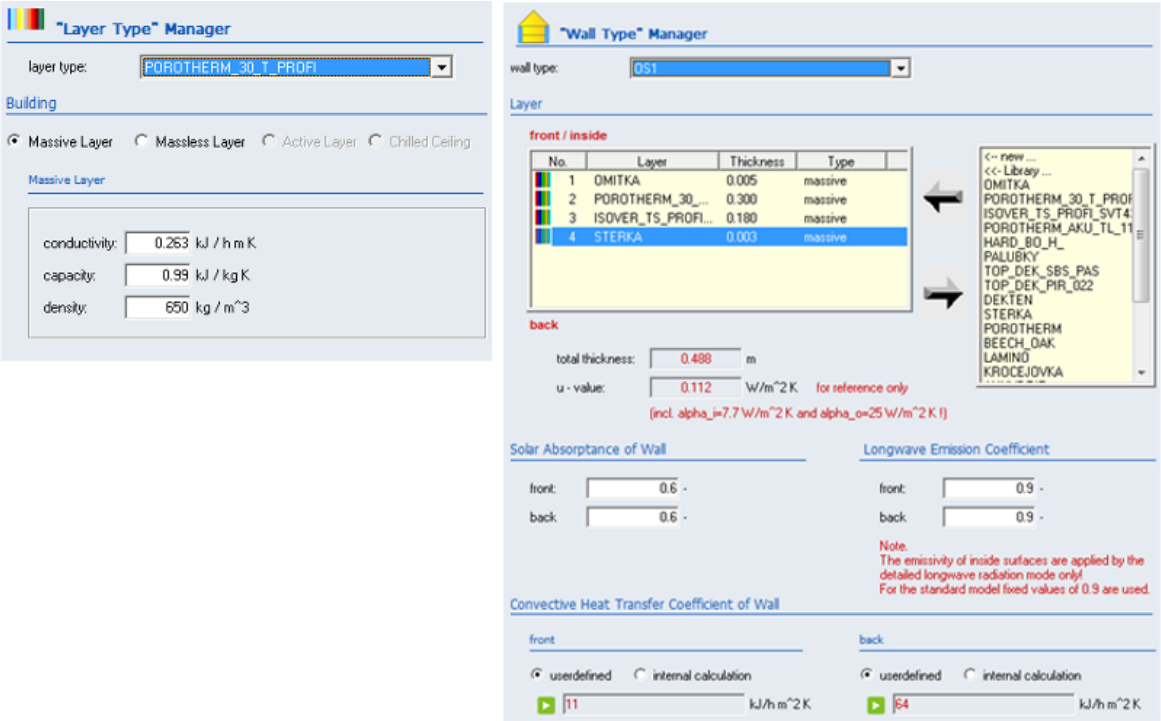
Do simulačního prostředí TRNSYS [L32] je model budovy zanesen pomocí objektu *Type56* [L32], který načítá parametry budovy z externího souboru vytvořeného v rozhraní TRNBuild. Tohoto modelu bude využito v simulaci výpočtu potřeby tepla na vytápění objektu. Model objektu je pro potřeby této simulace proveden zjednodušeně jako dvouzónový, kde každá zóna odpovídá jednomu obytnému podlaží – tedy zóna představující 1.NP a zóna představující podkroví. Pro zjednodušení modelu je vnitřní teplota vzduchu uvažována jako střední o hodnotě 20 °C, vliv místností o jiných vnitřních teplotách (koupelny 24 °C, technická místnost a šatna 15 °C) je zanedbán. Důsledek tohoto zjednodušení je v daném případě malý, neboť podíl těchto místností na prostoru objektu není výrazný a jejich vliv se vzájemným působením na energetickou bilanci budovy částečně vyrovnává.

3.3.1. Konstrukce

Objekt je dle vypracovaného energetického posudku konstruován jako rodinný dům s velmi nízkou energetickou náročností. Pro dosažení tohoto standardu je pro konstrukci budovy použito materiálů s dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Skladby jednotlivých konstrukcí byly převzaty z energetického posudku [L31] a vypracované projektové dokumentace. Obvodové konstrukce se skládají z tepelně-izolačních broušených cihel Porotherm 30 T Profi Dryfix, které jsou dále izolované minerální izolací Isover TF PROFI o tloušťce 180 mm. Střešní konstrukce je izolována deskami z polyisokyanurátové pěny TOPDEK 022 PIR (tloušťka 240 mm) a podlaha je izolována deskami z pěnového polystyrenu Isover EPS 100 taktéž o tloušťce 240 mm.

Pro potřeby vytvoření obvodové konstrukce v programu TRNBuild je nutné definovat jednotlivé materiály (označení v programu Typ vrstvy) a jejich vlastnosti, které ovlivňují tepelné chování materiálu včetně schopnosti akumulace tepla v konstrukci budovy – tepelná vodivost, tepelná kapacita a hustota materiálu. Z takto

vytvořených materiálů je následně definována konkrétní konstrukce. Příklad definování materiálu a konstrukce je uveden na následujícím obrázku.



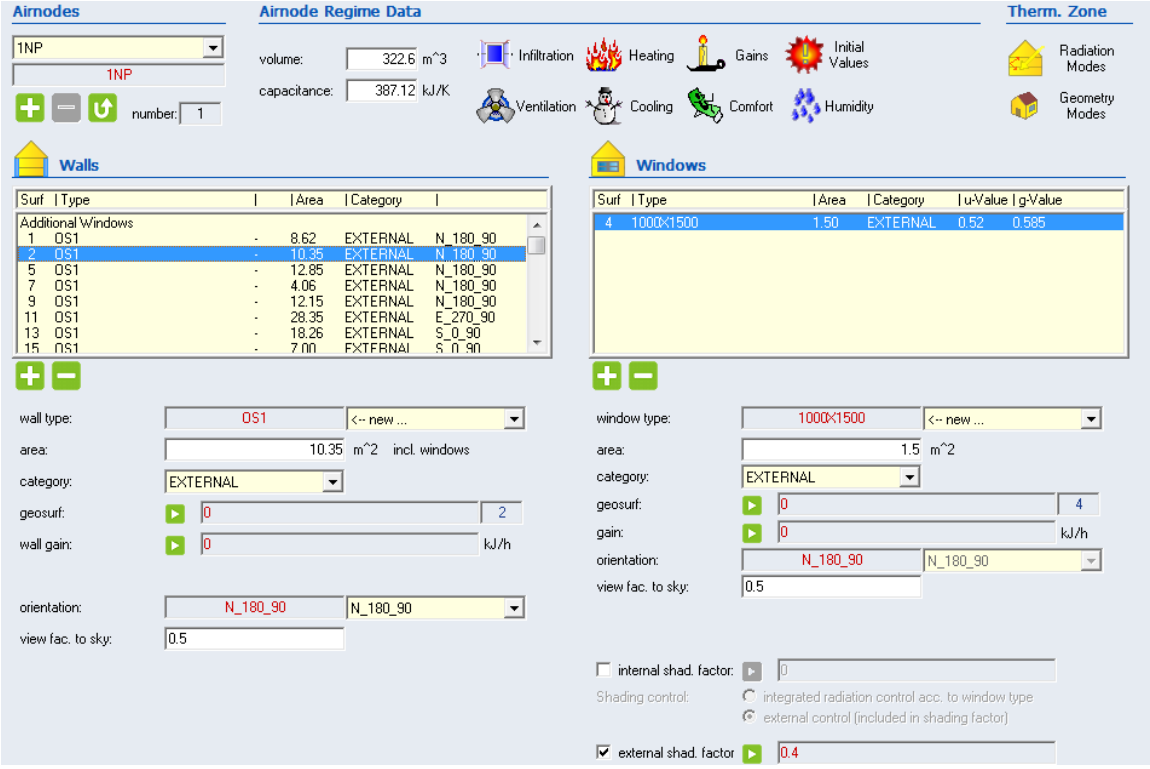
Obr. 23 „Layer Type Manager“ - okno pro vytváření jednotlivých vrstev konstrukce včetně jejich vlastností (zde pro tepelně-izolační broušenou cihlu Porotherm 30 T Profi Dryfix) „Wall Type“ Manager – okno pro definování skladby jednotlivých konstrukcí (zde pro obvodovou stěnu)

Detailní skladby obvodových konstrukcí včetně hodnot fyzikálních vlastností zadávaných v TRNBuild a výpočtu součinitele prostupu tepla se nacházejí v příloze 1. Součinitele prostupu tepla jednotlivých konstrukcí určené dle ČSN EN 73 0540-2 jsou uvedeny v tab. 2. Tyto součinitele prostupu tepla mají z pohledu navazující práce pouze orientační vypovídající schopnosti. Simulační program si celkové tepelné vlastnosti definované konstrukce určuje sám na základě vlastních vnitřních výpočtů a vlastních okrajových podmínek přestupu tepla a tuto hodnotu nevypisuje.

Tab. 2 – Součinitel prostupu tepla použitých konstrukcí

Druh konstrukce	U_{EP} **[W/m²K]**	U **[W/m²K]**
Vnější obvodová stěna	0,114	0,112
Podlaha 1.NP	0,15	0,147
Podlaha 2.NP	0,37	0,388
Střecha šikmá	0,092	0,089

Každá jednotlivá stěna byla definována v modelu zóny. Parametry pro každou konstrukci jsou plocha (včetně oken a dveří), množství a plocha dveřních a okenních otvorů, faktor pohledu k obloze (pro svislé konstrukce hodnota 0,5; pro šikmou střechu hodnota 0,75) a kategorie konstrukce dle její pozice v budově. Ta může být následující: *Internal* pro vnitřní konstrukci podílející se na tepelné bilanci budovy pouze akumulací (zde vnitřní příčky objektu), *Adjacent* pro konstrukci přiléhající k jiné zóně budovy (stropní konstrukce mezi patry), *Boundary* pro konstrukci přiléhající k jinak definovanému prostoru (podlaha v přízemí – vnější teplota za konstrukcí jako parametr vstupující do výpočtu z prostředí *Simulation Studio*) a *External* pro konstrukci přiléhající k venkovnímu prostředí v definované geometrické pozici (parametry venkovního prostředí jsou definovány jako vstupy *Type56* v simulačním prostředí TRNSYS). Tyto definované geometrické pozice představuji pro kategorii *External* vertikální plochy o severní, jižní, západní a východní orientaci a plochy se sklonem 42 ° obrácené na jih a na sever.

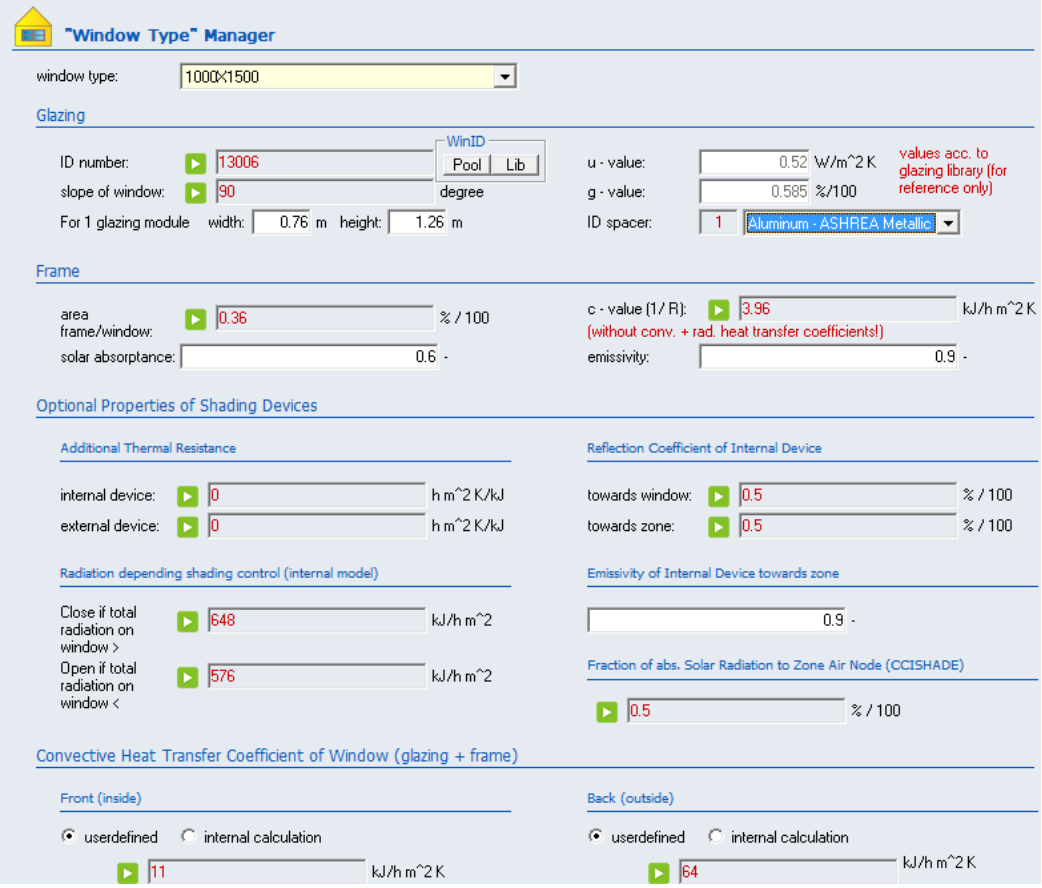


Obr. 24 „Airnode“ – okno pro vytváření jednotlivých konstrukcí, oken a dveří včetně jejich geometrie

3.3.2. Tepelné zisky

Pro určení vnějších tepelných zisků byla data pro parametry zasklení a odstínění prosklených ploch převzata z Energetického posudku [L31]. Vzhledem ke komplexnosti

a složitosti modelů zasklení v TRNSYS nebyl tvořen vlastní model skla a z databáze skel v TRNBuild bylo vybráno zasklení s nejbližšími parametry – propustnost slunečního záření zasklením g = 0,58, součinitel prostupu tepla zasklení U_G = 0,52 W/m^{2}K, součinitel prostupu tepla rámu U_F = 1,1 W/m^{2}K. Podíl rámu k zasklení jednotlivých okenních a dveřních prvků byl převzat z Energetického posudku.



Obr. 25 „Window Type“ Manager – okno pro nastavení parametrů zasklení a okenního rámu

Stínění průsvitných konstrukcí je na reálném objektu řešeno přesahem sedlové střechy, případně přístřeškem. V nastavení modelu objektu tomuto odpovídají korekční činitel stínění pro svislá zasklení F_s = 0,6 a pro střešní okna F_s = 0,9 (zadávaný *external shading factor* je doplněk F_s do jedné). Faktor pohledu k obloze pro okna a dveře ve vertikální poloze činí 0,5 a pro střešní okna nabývá tento parametr hodnoty 0,9. Nastavování těchto parametrů viz obr. 25.

V objektu bylo počítáno s periodicky se opakujícími vnitřními tepelnými zisky od osob vyskytujících se v domě a s tepelnými zisky reprezentující elektrické vybavení domu. Pro potřeby výpočtu se předpokládá, že rodinný dům bude obýván čtyřmi

osobami vykonávajícími lehkou činnost, vyskytující se v objektu pravidelně od 17:00 do 8:00.

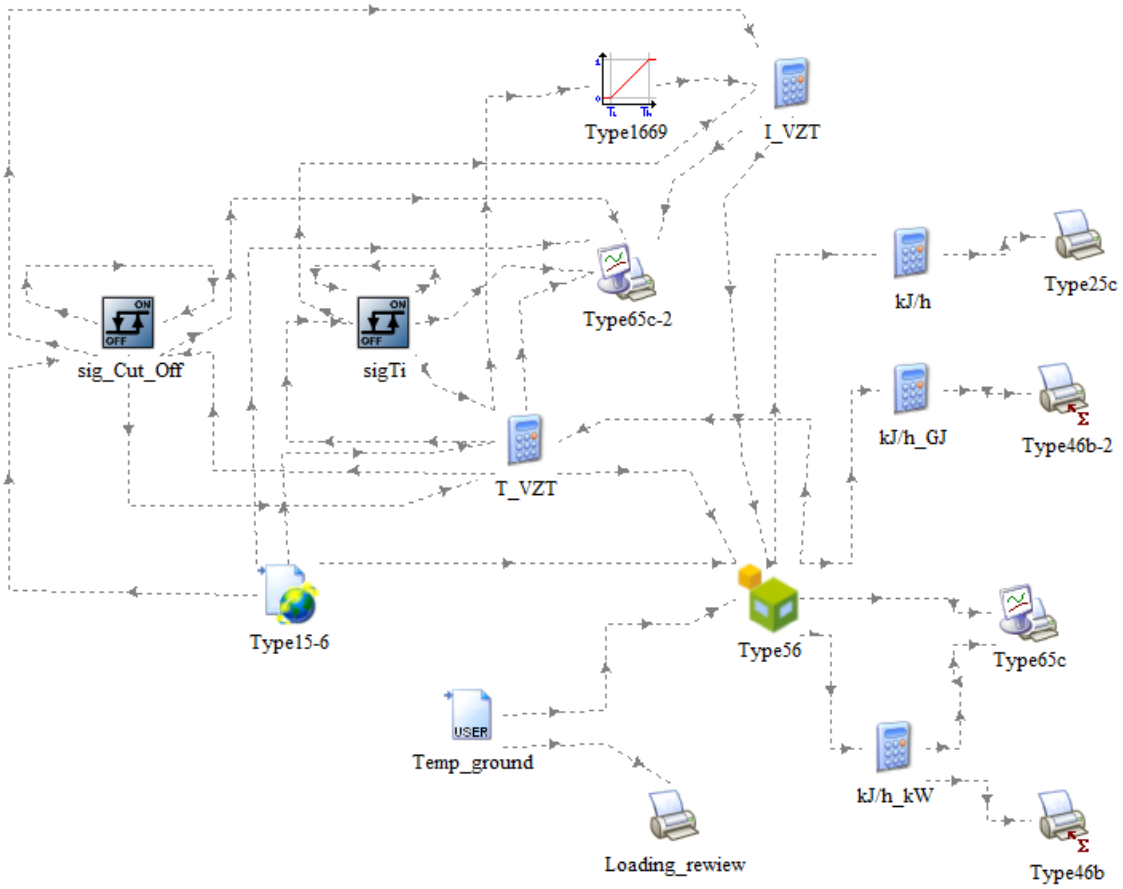
Tepelné zisky od elektrického vybavení a osvětlení domu, ve skutečnosti různě proměnné co do velikosti a doby výskytu, jsou pro potřeby výpočtu nahrazeny trvalým a stálým zdrojem tepla o hodnotě 100 W. Vnitřní tepelné zisky, které nelze z dlouhodobého hlediska považovat za stálé a periodicky se opakující (např. vaření), nejsou do výpočtu zahrnuty.

3.3.3. Nastavení okrajových podmínek režimu vytápění

Okrajové podmínky režimu vytápění v TRNBuild jsou nastavovány v *„Heat Type“ Manager*. Požadovaná vnitřní výsledná teplota, tedy set-point režimu vytápění, byla nastavena na hodnotu 20 °C. Z důvodu zamezení vlivu případného nedostatku výkonu imaginárního zdroje možným nedotápěním objektu na výslednou potřebu tepla je výkon zdroje nastaven jako nelimitovaný (nekonečně velký). Vzhledem k použitému druhu otopného systému – užití podlahového vytápění – je nastaven podíl sálavé složky na hodnotu 45 %. V objektu není k dispozici strojní vlhčení vzduchu.

3.3.4. Nastavení parametrů větracího zařízení objektu

Budova je vybavena řízeným větráním s větrací jednotkou s maximálním větracím průtokem 275 m^3/h a výměníkem pro zpětné získávání tepla z odváděného vzduchu s průměrnou účinností 75 %. Tato jednotka bude zajišťovat přívod čerstvého venkovního vzduchu na základě hygienických požadavků a zároveň bude v letních měsících sloužit pro odvádění tepelné zátěže tzv. free-coolingem – přívodem chladnějšího venkovního vzduchu by-passem výměníku zpětného získávání tepla. Vzhledem k tomuto požadavku a navazující komplexnosti nastavení parametrů intenzity výměny vzduchu a teploty vzduchu vstupující do energetické bilance objektu je jejich nastavení v panelu *„Ventilation Type“ Manager* provedeno pouze ve formě externích vstupů z prostředí *Simulation Studio*. Zde řídící signál vzniká v modelu regulátoru tvořeném dvojicí ON/OFF spínačů (*Type2d* [L32]), proporcionálního kontroleru (*Type1669* [L32]) a dvojicí kalkulaček pro zpracování signálů.



Obr. 26 Schéma simulace pro výpočet potřeby tepla na vytápění včetně *Typů* pro řízení větracího zařízení

Řízení teploty vstupujícího vzduchu nastavováním by-passové klapky výměníku zpětného získávání tepla a cirkulační klapky ve větrací jednotce je prováděno na základě vazeb vnitřní teploty v objektu a teploty venkovního vzduchu. Spínač *sigTi* nastavený na teplotu 22 °C s hysterezí ± 0,5 K při překročení spínací hodnoty posílá signál do regulátoru (kalkulačka *T_VZT*), kde dochází k regulaci odstavením výměníku zpětného získávání tepla a k nastavování cirkulační klapky tak, aby zůstal zachován teplotní rozdíl maximálně deset stupňů mezi vzduchem vstupujícím do vnitřních místností a vzduchem uvnitř objektu. Zároveň v případě, že teplota venkovního vzduchu překročí teplotu vnitřního vzduchu (spínač *sig_Cut_Off*, hystereze ± 0,5 K) vysílá signál pro opětovné využití výměníku ZZT pro snížení teplotní zátěže přiváděné z venkovního prostředí. Výše zmíněná logika je v kalkulátoru *T_VZT* matematicky popsána, výstupem z něj je teplota vzduchu přiváděného do objektu.

Během většiny průběhu roku plní větrací zařízení roli dodávky hygienického množství vzduchu pro obývající osoby. Je počítáno s dodávkou hygienického minima vzduchu na úrovni 25 m^3/h na osobu v případě jejich přítomnosti dle denního režimu

(viz 3.3.2) a dodávkou 25 m^3/h pro trvalé provětrání objektu (nad rámec hygienického minima přívodu vzduchu pro osoby). V případě užití větracího zařízení pro free-cooling dochází k lineárnímu růstu průtoku přiváděného venkovního vzduchu až do maximálního možného výkonu větrací jednotky na základě signálu proporčního regulátoru *Type1669* [L32]. Maximální výkon větrací jednotky je požadován při dosažení 26 °C.

Jako vstupní parametr pro *Type56* slouží hodnota výměny vzduchu, který je počítán v kalkulátoru *I_VZT*. V případě dodávky vzduchu za přítomnosti osob je tato hodnota rovna 0,22 1/h, v případě dodávky pouze minima vzduchu pro trvalé provětrání objektu vychází intenzita výměny vzduchu 0,045 1/h. Pro maximální průtok vzduchu větrací jednotkou (275 m^3/h) činí intenzita větrání 0,48 1/h.

3.3.5. Výpočet potřeby tepla na vytápění a výpočet aktuálního tepelného výkonu

Model řešeného objektu pro výpočet potřeby tepla na vytápění vytvořený v rozhraní TRNBuild je do simulačního prostředí zanesen pomocí *Type56*. Jako databáze klimatických dat byl pro simulaci použit typický meteorologický rok pro oblast Praha. Tato databáze typu Meteonorm je do TRNSYS nahrávána přes *Type15-6* [L32]. V *Type15-6* jsou z těchto dat načítána hodinová meteorologická data (např. teplota vzduchu a oblohy, relativní vlhkost vzduchu,…) a dále jsou z obsažených datových údajů počítány velikosti slunečního ozáření na plochu dle jejich azimutu a sklonu. V daném případě se jedná o plochy zmíněné v kap. 3.3.1 představující orientaci stěn a střechy. Tyto údaje jsou následně vstupem pro *Type56*. Vstupem pro *Type56* je dále průběh teplot pod podlahou přízemního podlaží, který je načítán pomocí *Type9a* [L32] ze zdrojového textového souboru. Tento průběh teplot byl vytvořen ze simulace teploty sezónního zásobníku iteračním způsobem. Hodnoty takto získaných teplot byly sníženy o 5 °C. Tato početní úprava je na straně bezpečnosti výpočtu. Výstupem simulace jsou hodnoty aktuální potřeby tepelného výkonu pro otopnou soustavu objektu (v kJ/h a kW) a roční potřeba tepla na vytápění objektu (v GJ a kWh), které jsou ukládány do výstupního souboru.

Vliv velikosti časového kroku na výsledné potřebě tepla

Pro zajímavost byl porovnán vlivu velikosti časového kroku na výpočet potřeby tepla na vytápění. Simulace provedena ve třech časových krocích – 2 minuty, 20 minut a 1 hodina. Výsledky simulací se nacházejí v tab. 3.

Tab. 3 - Vliv velikosti časového kroku na výsledné potřebě tepla

$d\tau$	2 minuty			20 minut			60 minut		
	1.NP [kWh]	2.NP [kWh]	Celkem [kWh]	1.NP [kWh]	2.NP [kWh]	Celkem [kWh]	1.NP [kWh]	2.NP [kWh]	Celkem [kWh]
Leden	298	583	881	298	583	881	298	583	881
Únor	383	466	849	383	466	849	383	466	849
Březen	325	317	642	325	317	642	326	317	643
Duben	83	76	159	83	76	159	83	76	159
Květen	19	15	34	19	15	34	19	15	34
Červen	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Červenec	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Srpen	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Září	0	2	2	0	2	2	0	2	2
Říjen	0	89	89	0	89	89	0	89	89
Listopad	10	392	402	10	392	402	10	392	402
Prosinec	207	562	769	207	562	769	207	562	768
Celkem	3826			3825			3826		
Podíl Q_{Xmin}/Q_{2min}	1			0,99986			1,0002		

Z výsledků simulace je zřejmé, že v případě výpočtu potřeby tepla má změna časového kroku ve zkoumaném rozmezí 2 minuty až 1 hodina vliv na měsíční potřebu tepla v řádu desetin kilowatthodiny a i v případě největšího časového intervalu je rozdíl hodnot roční potřeby tepla menší než 1 ‰ celkové hodnoty a vliv hodnoty časového kroku v daném časovém intervalu na tuto simulaci je tedy možno považovat za zanedbatelný.

Pro potřeby simulací energetických systémů v budově bylo použito dat s časovým krokem 2 minuty, aby mohlo dojít k řádnému vyhodnocení současnosti produkce elektrické energie a odběru elektrické energie tepelným čerpadlem a jeho příslušenství, neboť při delším časovém kroku roste riziko nepostřehnutí součinnosti špiček produkce a odběru.

Porovnání výsledků simulace v TRNSYS s hodnotami z Energetického posudku

Pro možnost porovnání výsledků simulace v TRNSYS s hodnotami z Energetického posudku bylo přistoupeno ke stejnému zjednodušení teploty v podloží jako v Energetickém posudku [L31], tedy tato teplota byla zvolena za konstantní o hodnotě 25 °C. Za časový krok simulace byly zvoleny 2 minuty, výsledné porovnání je zapsáno v tab. 4.

Tab. 4 - Porovnání výsledků simulace v TRNSYS s hodnotami z Energetického posudku

Měsíc	TRNSYS [kWh]	Energetický posudek [kWh]	TRNSYS/EP [-]
Leden	1009	1054	**0,957**
Únor	763	770	**0,991**
Březen	457	446	**1,025**
Duben	61	71	**0,869**
Květen	9	-	-
Červen	-	-	-
Červenec	-	-	-
Srpen	-	-	-
Září	-	-	-
Říjen	150	172	**0,872**
Listopad	667	648	**1,029**
Září	978	946	**1,034**
Celkem*	**4094**	**4107**	**0,997**

* Výsledky simulace jsou mírně odlišné od výsledku uváděného v minulé kapitole – příčinou je uvažovaný proměnný průběh teploty pod podlahou přízemního podlaží v případě předchozí simulace

Jak je patrné z výše uvedené tabulky, výsledky simulace v TRNSYS pro vytvořený model řešené budovy při uvažování konstantní teploty pod podlahou řádově odpovídají v měsíčním souhrnu výsledkům z Energetického posudku. Celková potřeba tepla získaná simulací činí 4094 kWh. Maximální vnitřní teplota dle simulace činí 26 °C (maximální teplota dle energetického posudku činí 24,9 °C). Porovnáním výše uvedených hodnot jsme provedli velmi zjednodušenou kontrolu vytvořeného modelu budovy.

3.4. Tepelné čerpadlo

3.4.1. Tepelné čerpadlo s řiditelnými otáčkami pro řešený energetický systém

Jako zdroj tepla pro budovu slouží tepelné čerpadlo voda/voda s řiditelnými otáčkami. Toto čerpadlo je simulováno prostřednictvím *Type264* ([L33], viz *Příloha 5*). Tento semi-fyzikální matematický model je založen na modelování chladivového okruhu s kompresorem s proměnnými otáčkami a v případě potřeby je schopný simulovat provoz tepelného čerpadla s odvodem tepla z chladiče přehřátých par a z dochlazovače. Parametry nastavení modelu viz příloha 2.

V TRNSYS byla provedena simulace zkoušky tepelného výkonu čerpadla voda/voda dle ČSN EN 14511 [L34] při frekvenci kompresoru 50 Hz. Nejprve byla provedena simulace tepelného čerpadla za standardních podmínek. Pro tepelné čerpadlo tohoto typu je zkouška provedena se vstupní teplotou vody do výparníku 10 °C a výstupní teplotou vody z výparníku 7 °C. Požadovaná změna teplotních parametrů kapaliny na straně kondenzátoru je 30/35 °C. Výstupem této simulace je průtok vody kondenzátorovou stranou tepelného čerpadla při výše uvedených teplotních parametrech.

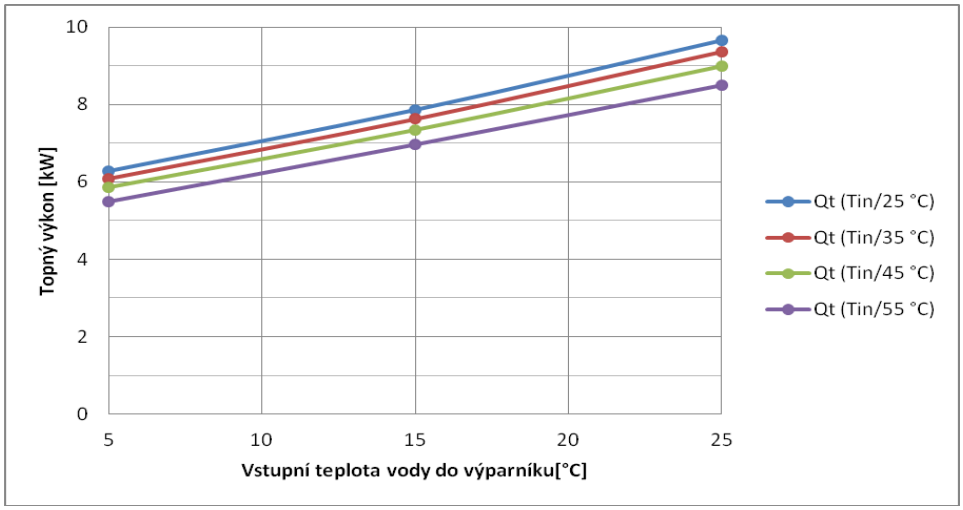
Tab. 5 Měření tepelného čerpadla za standardních podmínek

	Venkovní výměník		**Vnitřní výměník**	
	Vstupní teplota [°C]	**Výstupní teplota [°C]**	**Vstupní teplota [°C]**	**Výstupní teplota [°C]**
Standardní podmínky (voda)	10	7	30	35
Hodnota průtoku [kg/h]	1630		1180	

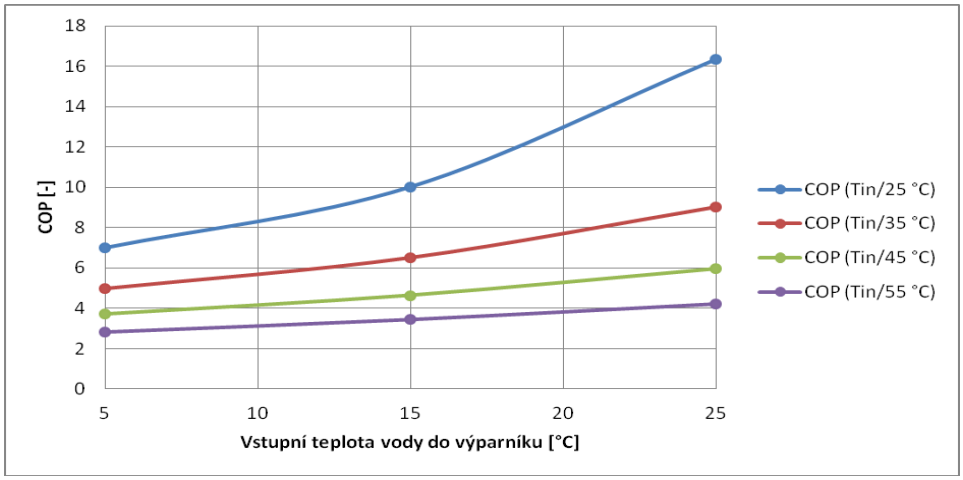
Získané hodnoty průtoků jsou použity jako nastavené průtoky pro simulaci výkonu tepelného čerpadla za uživatelských podmínek. Vzhledem k charakteru energetického systému byla provedena simulace výkonové charakteristiky a charakteristiky topného faktoru pro vstupní teplotu vody na výparníkovém výměníku v rozmezí 5 až 25 °C do požadované výstupní teploty vody na kondenzátoru maximálně 55 °C. Hodnoty tepelného příkonu, výkonu a topného faktoru jsou uvedeny v tab. 6 a v grafické formě na obr. 27 a obr. 28.

Tab. 6 Výkonové parametry modelu použitého tepelného čerpadla

Vstupní teplota vody na výparníku	Výstupní teplota vody na kondenzátoru	Výkon [kW]	Příkon [kW]	Topný faktor [-]
25 °C	25 °C	9,66	0,59	16,3
	35 °C	9,36	1,04	9,0
	45 °C	8,99	1,51	6,0
	55 °C	8,51	2,01	4,2
15 °C	25 °C	7,86	0,78	10,0
	35 °C	7,63	1,17	6,5
	45 °C	7,34	1,58	4,7
	55 °C	6,97	2,02	3,4
5 °C	25 °C	6,28	0,90	7,0
	35 °C	6,09	1,22	5,0
	45 °C	5,85	1,57	3,7
	55 °C	5,49	1,95	2,8

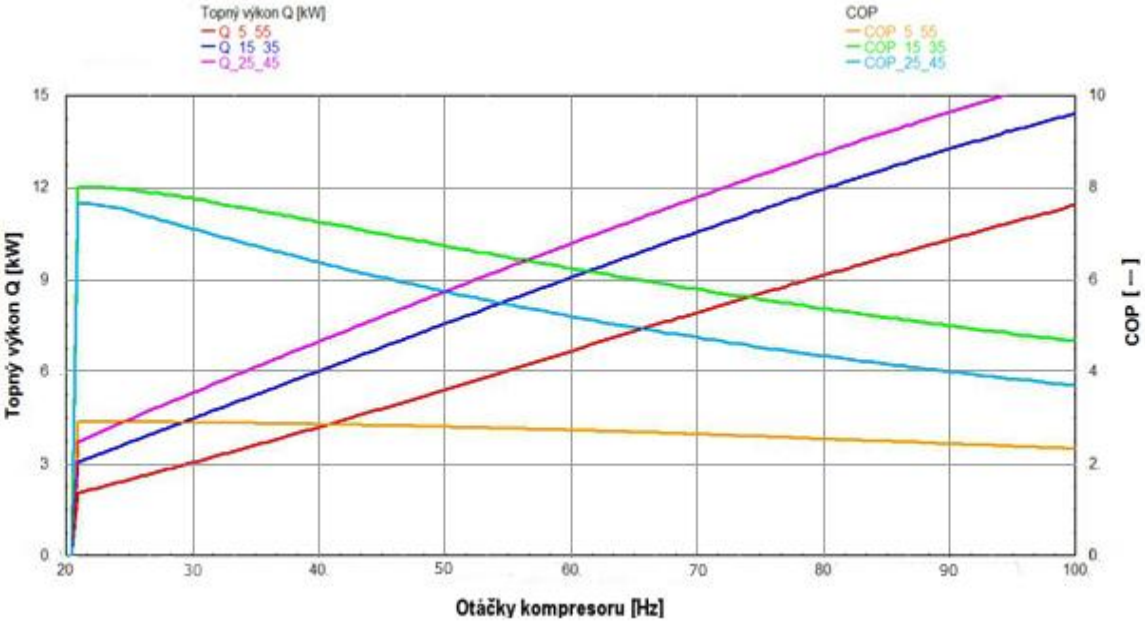


Obr. 27 Výkonová charakteristika modelu tepelného čerpadla



Obr. 28 Charakteristika topného faktoru modelu tepelného čerpadla

V normě ČSN EN 14511 není doslovně popsáno měření tepelného výkonu invertorového tepelného čerpadla při jeho částečném zatížení. Je však možné logiku této metodiky pro jejich měření (a simulaci) použít. Vzhledem k tomu, že regulace systému bude udržovat otáčky kompresoru mezi 30 a 80 Hz, byly provedeny simulace pro sestrojení závislosti tepelného výkonu a topného faktoru tepelného čerpadla na frekvenci kompresoru. Výsledky jsou graficky zpracovány na obr. 29.



Obr. 29 Charakteristiky topného výkonu a topného faktoru tepelného čerpadla v závislosti na otáčkách kompresoru

V případě letního provozu bude teplo pro primární okruh tepelného čerpadla odebíráno ze vzduchu přes chladič venkovního vzduchu (výměník vzduch/voda) *Type508a* ([L32], viz *Příloha 5*), přes který je vzduch proháněn ventilátorem *Type642* ([L32], viz *Příloha 5*). Systém řízení chodu tepelného čerpadla a oběhových čerpadel je popsán ve stati Regulace.

3.4.2. Tepelné čerpadlo pro referenční systém

Pro referenční systém bude jako zdroj tepla sloužit tepelné čerpadlo země/voda s konstantními otáčkami, kdy teplo je odebíráno zemskému masivu pomocí hlubinného vrtu. Toto čerpadlo je taktéž simulováno prostřednictvím *Type264* [L33]. Primární okruh tepelného čerpadla je proveden zjednodušeně jako vstup teplonosné kapaliny (etylenglykol) o konstantní teplotě 0 °C. Ve skutečnosti teplota kapaliny na vstupu do výparníku tepelného čerpadla v průběhu roku kolísá, na začátku otopného období se pohybuje lehce nad uvedenou hodnotou, v průběhu otopného období díky vychlazování

vrtu se tato teplota snižuje a na konci otopného období se pohybuje mírně pod nulovou hodnotou, v letním období poté dochází k regeneraci vrtu. Pro potřeby simulace referenčního systému tedy teplota 0 °C odpovídá střední teplotě teplonosné kapaliny během otopného období.

Pro nastavení parametrů průtoků primárního a sekundárního okruhu tepelného čerpadla byla provedena simulace měření tepelného čerpadla za standardních podmínek. Pro tepelné čerpadlo tohoto typu je zkouška provedena se vstupní teplotou vody do výparníku 0 °C a takovým průtokem teplonosné látky výparníkem, aby výstupní teplota vody z výparníku činila -3 °C. Požadovaná změna teplotních parametrů kapaliny na straně kondenzátoru je 30/35 °C.

Tab. 7 Měření tepelného čerpadla za standardních podmínek

	Venkovní výměník		**Vnitřní výměník**	
	Vstupní teplota [°C]	**Výstupní teplota [°C]**	**Vstupní teplota [°C]**	**Výstupní teplota [°C]**
Standardní podmínky (voda)	0	-3	30	35
Hodnota průtoku [kg/h]	1280		925	

3.5. Fotovoltaické moduly

Jako zdroj elektrické energie umožňující hradit dílčí část elektrické potřeby objektu slouží fotovoltaické panely, které jsou instalovány na jižní straně střechy objektu. Špičkový instalovaný výkon panelů je 6 kW_p, systém se skládá z 24 panelů o celkové ploše 39,48 m^2. Jako model instalovaného fotovoltaického systému v TRNSYS, jehož výstupy nejlépe odpovídají skutečným parametrům instalovaného systému, byl použit *Type50b* [L32] (viz *Příloha 5*). Tento model ve své podstatě představuje model hybridního kolektoru. Nastavením parametru průtoku teplonosné kapaliny na záložce *Input* na hodnotu blízkou nule (0,01 kg/h) a nastavením nulového počtu zasklení začne *Type50b* udávat výstupy jako samotný fotovoltaický panel. Účinnost fotovoltaického článku dosahuje 18 %, hodnota činitele plnění činí 0,8, teplotní součinitel byl zvolen -0,45 %/K, což jsou parametry odpovídající hodnotám dosahovaným u polykrystalových panelů. Nastavení ostatních parametrů je patrno z přílohy 3.

Jako vstup pro tento *type* slouží teplota venkovního vzduchu, rychlost větru (pro výpočet ztrát fotovoltaického panelu) a celková hodnota dopadajícího záření dopadající na plochu o orientaci totožné s orientací panelu. Výstupním údajem je aktuální elektrický výkon fotovoltaických panelů. Tento údaj je zaveden do kalkulátoru *efficiency* (viz *Příloha 5*), který tento výstup ponižuje o předpokládané ztráty na stejnosměrném vedení, o ztráty na měniči a regulátoru a o ztráty na střídavém vedení. Tyto ztráty jsou ve skutečnosti v čase proměnné dle aktuálního elektrického výkonu fotovoltaického systému. Pro potřeby této simulace byly elektrické ztráty fotovoltaického systému odhadnuty a jako jejich konstantní hodnota bylo zvoleno 10 %. Takto zvolené číslo je na straně bezpečnosti výpočtu. Výstupem z kalkulátoru je tedy aktuální hodnota použitelného elektrického výkonu fotovoltaického systému.

3.6. Pohotovostní kombinovaný zásobník tepla

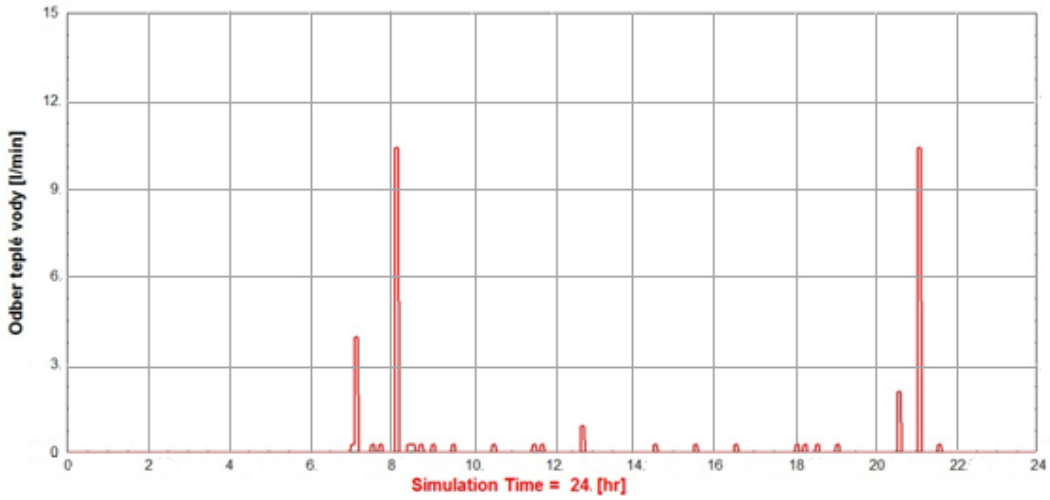
Sekundární okruh tepelného čerpadla je napojen na pohotovostní zásobník tepla, kterým je kombinovaný akumulační zásobník s vnitřním trubkovým výměníkem pro přípravu teplé vody [L35]. V simulaci energetického systému představuje tento zásobník *Type340* [L36] (viz *Příloha 5*). Tento model umožňuje simulaci zásobníku až s deseti dvojicemi vstup/výstup (*doubleport*), čtyřmi vnitřními výměníky, vnitřním zdrojem tepla ve formě elektropatrony a pěti teplotními senzory.

Vnitřní objem otopné vody v zásobníku činí 377 litrů. Objem výměníku pro ohřev teplé vody je 21 litrů při jeho povrchové ploše 6 m^2. Měrné tepelné ztráty zásobníku byly převzaty z výsledků laboratorního měření skutečného zásobníku provedeného na ČVUT/UCEEB pro potřeby jiné odborné práce. Nastavení parametrů *Type340* je patrno z přílohy 4. Relativní výška zadávaných parametrů (tj. připojovacích hrdel, výměníků, čidel apod.) je vztažena k čisté výšce zásobníkové nádrže bez izolace 1,77 m.

Jak je patrné ze schematického zapojení na obr. 18, zásobník může být, dle energetického požadavku systému, nabíjen tepelným čerpadlem do své spodní části (připojení *doubleport-1*, čidlo teploty *2*) nebo do horní části (připojení *doubleport-3*, čidlo teploty *1*). Vybíjení zásobníku pro potřeby otopné soustavy probíhá přes *doubleport-2*, výměník pro ohřev teplé vody představuje *heat exchanger-1*. Výstup čidla 1 je veden do termostatu *Reg_Hot (*[L32], *Type108)*, který řídí udržování teplotní hladiny horní části zásobníku na 49 °C. Výstup čidla 2 je zaveden do termostatů

Reg_Hot_norm a *Reg_Hot_preh* (oba taktéž *Type108 – viz Příloha 5*), které reagují na teplotu spodní části zásobníku (podrobněji viz kapitola regulace).

Křivka odběru teplé vody je načítána do *Simulation Studio* pomocí *Load_m_HotW (*[L32], *Type9a – viz Příloha 5)*. Tento soubor obsahuje hodnoty okamžitého průtoku odběru teplé vody v kg/h pro jednotkový celkový odběr. Zvolená křivka odpovídá zátěžovému profilu odběru s výraznou ranní a večerní odběrovou špičkou (viz obr. 30). Načtená hodnota je v kalkulátoru *Daily_Load* (*viz Příloha 5*) násobena celkovým denním odebíraným množstvím teplé vody. Vzhledem k předpokládanému obydlení objektu 4 osobami za běžné potřeby 40 litrů teplé vody na osobu a den a při uvažování běžných tepelných ztrát v rozvodech 25 % vychází denní spotřeba teplé vody 200 litrů. Pro simulaci bylo uvažováno s teplotou studené vody o celoroční konstantní teplotě 10 °C. Hodnota průtoku a vstupní teplota studené vody jsou zavedeny na vstup výměníku modelu zásobníku. Teplota ohřáté teplé vody je po výstupu ze zásobníku omezena na teplotu 45 °C pomocí termostatického ventilu *Diverter_HotW* ([L32], *Type11b – viz Příloha 5*) osazeného na studené straně vodního rozvodu a T-kusu *Tee piece* ([L32], *Type11h – viz Příloha 5*) osazeného na teplé straně. Celková potřeba tepla pro přípravu teplé vody činí 2980 kWh/rok.



Obr. 30 Denní odběrová křivka teplé vody

3.7. Sezónní zásobník tepla

Jako sezónní zásobník tepla byl použit *Type4c* ([L32], viz *Příloha 5*), který představuje model stratifikačního vodního zásobníku umístěného v zemi pod podlahou přízemního podlaží objektu, aby část jeho tepelných ztrát byla využita k částečnému pokrytí tepelných ztrát objektu. Součinitel prostupu tepla obvodových ploch zásobníku

je pro simulace vlivu velikosti zásobníku a prahové hodnoty výkonu fotovoltaického systému zvolen 0,1 W/m^{2}K, což představuje přibližně tloušťku izolace 40 cm. Pro simulaci vlivu tloušťky izolace se pohybuje od 0,06 W/m^{2}K do 0,19 W/m^{2}K, což představuje tloušťky izolace od 20 do 70 cm. Objem zásobníku bude v rámci simulací měněn v rozmezí od 40 m^3 do 140 m^3 a bude sledován jeho vliv na energetickou bilanci celého systému, v případě zkoumání vlivu prahové hodnoty výkonu fotovoltaického systému bude simulace provedena s objemem zásobníku 100 m^3.

Potrubní rozvod primárního okruhu tepelného čerpadla pro vybíjení sezónního zásobníku charakterizují parametry teploty a průtoku. Chladná voda primárního okruhu je zavedena na stratifikační vstup tzv. chladné části zásobníku, výstup teplé vody ze zásobníku představuje *Temperature/Flowrate to Load* z vrchní části zásobníku. Připojení modelu zásobníku na sekundární okruh tepelného čerpadla (nabíjení zásobníku) probíhá přes stratifikační vstup tzv. teplé části zásobníku a výstupy *Temperature/Flowrate to Heat source* ze spodní části sezónního zásobníku.

Model zásobníku *Type4c* umožňuje definovat teplotu okolí pro výpočet tepelných ztrát zásobníku jako proměnný vstupní parametr, avšak neumožňuje tuto teplotu definovat zvlášť pro každou stěnu zásobníku. Je tedy nutno tuto teplotu definovat jako střední pro celý zásobník – v daném případě jako teplotu zohledňující jak vliv teploty v objektu (pro svrchní stranu zásobníku), tak vliv teploty zeminy ovlivňované teplotním polem vodního zásobníku. Na základě kvalifikovaného odhadu představuje tuto teplotu sinusová křivka mezi teplotami 10 a 16 °C. Pro odborné stanovení této teplotní křivky by bylo nejvhodnější provést měřící experiment průběhu teplot zeminy v okolí zásobníku.

3.8. Regulace

Regulace celého energetického systému je provedena pomocí *Type1250* [L32] tvořící ekvitermní křivku otopné vody, termostatů *Type108* [L32] a dvou-bodových regulátorů *Type2d* [L32], jejichž signály jsou dále zpracovány v kalkulátorech, z nichž jsou vedeny signálové výstupy pro jednotlivé komponenty představující funkční aktivní části energetického systému.

Požadovaná vstupní teplota otopné vody do systému vytápění je na základě teploty venkovního vzduchu určována v komponentě *Ekviterm* (*Type1250* – viz *Příloha 5*). Tato komponenta na rozdíl od skutečné ekvitermní regulace určuje výstup

zjednodušeně a nebere v potaz teplotní exponent otopných ploch. Požadovaná teplota vody je dána lineární interpolací mezi body t_{w1} = 40 °C (při t_e = - 20 °C) a t_{w1} = 20 °C (při t_e = 20 °C).

V případě potřeby ohřevu vrchní části zásobníku *Type340* spíná termostat *Reg_Hot* na základě výstupních hodnot čidla v zásobníku Č2 (viz *Příloha 5,* set-point 49 °C, spínací diference ± 1 K). Kalkulátor nazvaný *Regulátor* (viz *Příloha 5*) tento signál dál přímo předává do tepelného čerpadla, spolu s požadavkem na konstantní otáčky kompresoru tepelného čerpadla a oběhových čerpadel. V případě potřeby ohřevu spodní části zásobníku *Type340* spíná termostat *Reg_Heat_norm* na základě výstupních hodnot čidla v zásobníku Č1 (viz *Příloha 5,* set-point dle požadované teploty otopné vody z *Type1250* zvýšené o 2 °C, spínací diference ± 1 K). *Regulátor,* v případě neaktivního požadavku z *Reg_Hot,* tento signál dále předává do tepelného čerpadla, pracovní podmínky kompresoru a oběhových čerpadel jsou totožné s výše uvedeným případem.

Aktuální výkon fotovoltaického systému je sledován v regulátorech s*igPV* a *sigPVfull* (*Type2d,* viz *Příloha 5*), které jej porovnávají s nastavenou prahovou hodnotou výkonu fotovoltaického systému, resp. s aktuálním příkonem energetického systému. Předmětem simulace je zjištění optimální prahové hodnoty pro chod energetického systému. Spínací diference pro tyto regulátory je nastavena na hodnotu ± 0,01 kW. V daném případě dochází k přebíjení pohotovostního kombinovaného zásobníku, v *Regulátoru* je na základě aktuálního výkonu fotovoltaického systému počítána optimální frekvence kompresoru a oběhových čerpadel primárního a sekundárního okruhu tepelného čerpadla. Přebíjení zásobníku je ukončeno na základě signálu z termostatu *Reg_Heat_preh* (viz *Příloha 5,* čidlo Č1, set-point 50 °C, spínací diference ± 1 K). V případě nabití celého pohotovostního kombinovaného zásobníku při stále aktivním signálu dostatečného výkonu fotovoltaického systému a venkovní teplotě vyšší než 10 °C (sledováno regulátorem *sigTe, Type2d,* viz *Příloha 5*, spínací diference ± 0,5 K) dojde ke změně nastavení ventilu *Ventil_7* (*Type11f,* viz *Příloha 5)* na sekundární straně tepelného čerpadla (viz kapitola 3.9.) a k nabíjení sezónního zásobníku.

V případě, že je venkovní teplota nižší než 10 °C (regulátor *sigTe*) a teplota vody v sezónním zásobníku je vyšší než teplota venkovního vzduchu (sledováno regulátorem *sig_Tzs_Te, Type2d,* viz *Příloha 5*, spínací diference ± 0,5 K), provede *Regulátor* akční

zásah na rozdělovacím ventilu *Ventil_6* (*Type11f,* viz *Příloha 5)* na primární straně tepelného čerpadla (viz kapitola 3.9.) a tepelné čerpadlo začne odebírat energii naakumulovanou v sezónním zásobníku tepla. V opačném případě odebírá primární okruh tepelného čerpadla energii z okolního prostředí chladičem venkovního vzduchu.

3.9. Systém

Type9a – komponenta pro načítání dat ze zdrojového textového souboru. Zde slouží pro načítání požadované aktuální tepelné potřeby *Load_power* (viz *Příloha 5*) a pro načítání aktuální potřeby teplé vody *Load_m_HotW* (viz *Příloha 5*). [L32]

Type682 – model *OS_Hamry* (viz *Příloha 5*), který je vsazen do modelu otopné soustavy a představuje tepelnou zátěž systému. Data získává z výše zmíněné *Type9a*. [L32]

Type31 – model části potrubí, slouží po potřeby stabilizace chodu simulace v případech změny polohy ventilů a následné náhlé změny teploty. [L32]

Type11b + *Type11h* – termostatický rozdělovací ventil na chladném potrubí a T-kus na potrubí o větší energetické hladině, které simulují termostatický směšovací ventil na tomto potrubí. Požadovaná teplota po smísení na výstupu z T-kusu a teplota vstupující do T-kusu jsou vstupem modelu rozdělovacího ventilu. Tato dvojice se v systému vyskytuje celkem třikrát: na výstupu z pohotovostního zásobníku řídí teplotu náběhové vody do otopné soustavy dle výstupu z ekvitermního regulátoru (ventil 9 dle obr. 18), na primárním okruhu tepelného čerpadla zajišťuje maximální teplotu na vstupu primárního okruhu do tepelného čerpadla na hodnotě 25 °C (ventil 10) a na výstupu teplé vody z výměníku pohotovostního kombinovaného zásobníku zabezpečuje nepřekročení teploty 45 °C. [L32]

Type11f + *Type11h* – dvojice řízeného rozdělovacího ventilu a T-kus v potrubí. Signál od regulace je veden do rozdělovacího ventilu, při hodnotě signálu 1 je veškerý průtok směrován do *Outlet 2*. V řešené soustavě představují tyto celkem tři dvojice čistě přepínací ventily: ventil 6 dle obr. 18 na primárním okruhu tepelného čerpadla pro nastavení zdroje odběru tepla, ventil 7 pro nabíjení sezónního zásobníku a ventil 8 pro nabíjení horní nebo spodní části pohotovostního kombinovaného zásobníku. [L32]

Type3d – model představující oběhové čerpadlo okruhu otopné soustavy. Toto čerpadlo pracuje s konstantním průtokem 416,5 kg/h zaručujícím teplotní spád 5 K při maximálním odběru tepla. [L32]

Type110 – model představující oběhové čerpadlo s řiditelnými otáčkami na primárním a sekundárním okruhu tepelného čerpadla. Nastavená hodnota maximálního průtoku je pro čerpadlo primárního okruhu 2500 kg/h, pro čerpadlo sekundárního okruhu 2000 kg/h. Kontrolní signál pro řízení otáček čerpadla je vstupem modelu z regulace. [L32]

Type65c – komponenta pro výstup aktuálních hodnot do textového souboru a jejich grafického vyjádření na obrazovce. [L32]

Type46b – komponenta pro součtový textový výstup do souboru. Kumuluje aktuální hodnoty a tvoří jejich měsíční součty. [L32]

4. Analýza výsledků

4.1. Hodnocené parametry energetického systému

Hodnocení jednotlivých energetických systémů je závislé zejména na množství elektrické energie dodané vnější sítí $W_{el,síť}$. V případě budovy bez instalace fotovoltaického systému je tato hodnota rovna elektrické energii W_{el} spotřebované budovou na vytápění včetně elektrické energie spotřebované na provoz technického systému.

V případě uvažování instalace fotovoltaického systému tento systém vyprodukuje ročně elektrickou energii W_{FV}. Z tohoto množství energie je pro krytí spotřeby elektrické energie energetického systému využita elektrická energie $W_{el,FV}$. V tomto případě je tato hodnota pro získání $W_{el,síť}$ odečtena od W_{el}. Přebytek produkce elektrické energie od fotovoltaického systému $W_{FV,zbyt}$ je dále využit elektrickými spotřebiči v objektu, případně je prodán do vnější sítě. Stupeň využití solárních zisků energetickým systémem je dán vztahem

$$r_{FV} = \frac{W_{el,FV}}{W_{FV}} \qquad [-] \qquad (4)$$

kde je $W_{el,FV}$ elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem krytá ze zisků FV systému [kWh];

W_{FV} elektrická energie vyrobená fotovoltaickým systémem [kWh].

Hodnota solárního pokrytí udává, jaké množství spotřebované elektrické energie je schopna pokrýt produkce instalovaného fotovoltaického systému. Je tedy dán vztahem

$$f_{FV} = \frac{W_{el,FV}}{W_{el}} \qquad [-] \qquad (5)$$

kde je $W_{el,FV}$ elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem krytá ze zisků FV systému [kWh];

W_{el} celková elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem [kWh].

Pro systémy s instalovaným tepelným čerpadlem je důležitým parametrem udávajícím efektivitu celého systému sezónní topný faktor. Ten je vypočítán dle vztahu

$$SPF = \frac{W_{HW,HS}}{W_{el,síť}} \qquad [-] \qquad (6)$$

kde je $W_{HW,HS}$ potřeba tepla objektu pro vytápění a přípravu teplé vody [kWh];

$W_{el,síť}$ celková elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem dodaná vnější sítí [kWh].

[L4] Pro zhodnocení splnění požadavků pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie dle doporučení Evropské komise bude vypočtena roční potřeba neobnovitelné primární energie. Její výpočet vychází z celkové dodané energie, která v případě využití tepelného čerpadla obsahuje i energii okolního prostředí. Ta je určena jako rozdíl potřeby energie, kterou tepelné čerpadlo dodává, a vypočtené spotřeby energie tepelného čerpadla. Neobnovitelná primární energie pro hodnocenou budovu se vypočítá jako součet součinů dodané energie po jednotlivých energonositelích a příslušných faktorů neobnovitelné primární energie. Pro energii z okolního prostředí je tento faktor roven nule. Po zjednodušení obecného vzorce na základě předcházející informace můžeme vzorec pro výpočet roční potřeby neobnovitelné primární energie pro řešený energetický systém napsat jako

$$Q_{nPE} = W_{el,síť} \cdot f_{nPE} = W_{el,síť} \cdot 3 \qquad [\text{kWh}] \qquad (7)$$

kde je $W_{el,síť}$ celková elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem dodaná vnější sítí [kWh];

f_{nPE} faktor neobnovitelné primární energie [-].

4.2. Energetická bilance referenčního systému

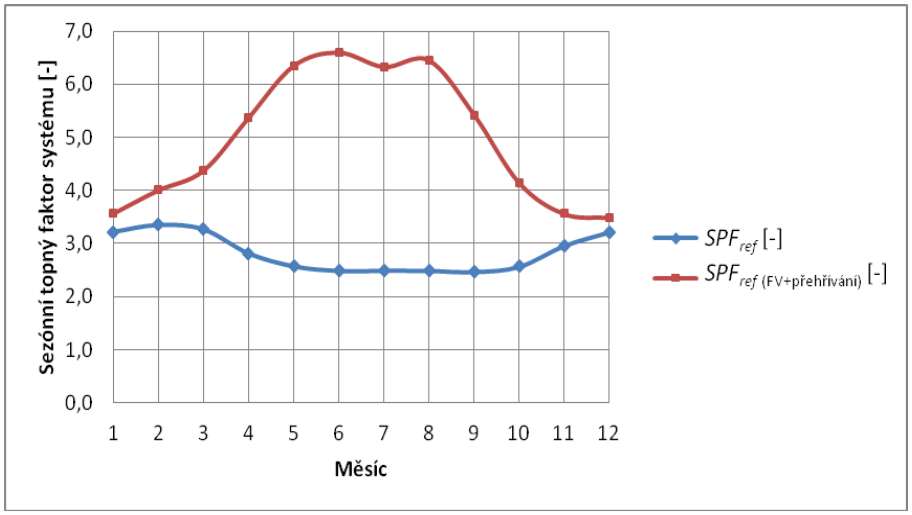
Pro možnost porovnání sezónních topných faktorů a potřeby elektrické energie v případě užití sezónní akumulace byla provedena simulace referenčního (porovnávacího) systému. Ten by měl stejnou potřebu tepla jako řešený systém, tedy roční potřebu tepla přibližně 3830 kWh na vytápění a 2980 kWh pro přípravu teplé vody v podmínkách České republiky, avšak fungoval by bez sezónního zásobníku tepla. Jako zdroj tepla pro tento referenční systém bylo zvoleno tepelné čerpadlo země/voda popsané v kapitole 3.4.2. Systém bude stejně jako v případě sezónního zásobníku doplněn kombinovaným zásobníkem o objemu 277 litrů s integrovaným výměníkem pro přípravu teplé vody.

Budova s vytápěním referenčním systémem vlastně nepředstavuje řešenou budovu bez sezónního akumulátoru. Ze sezónního zásobníku je totiž část jeho ztrát využita pro krytí tepelných ztrát budovy, neboť toto teplo je do objektu přenášeno přes podlahu přízemního podlaží. Skutečná budova bez sezónního zásobníku tedy bude mít potřebu tepla na vytápění o toto přijaté teplo vyšší.

V případě běžného systému bez instalace fotovoltaického systému je roční spotřeba elektrické energie celého systému včetně oběhových čerpadel 2269 kWh. Sezónní topný faktor *SPF* celého systému v daném případě vychází okolo hodnoty 3,0. Nízká hodnota sezónního topného faktoru je dána vysokým podílem potřeby tepla na přípravu teplé vody, kdy při vysoké výstupní teplotě vody z tepelného čerpadla dosahujeme nízkých topných faktorů tepelného čerpadla. Prakticky tedy nejnižších topných faktorů se dosahuje v letních měsících (přibližně 2,5). Takto nízké hodnoty efektivity systémů s tepelnými čerpadly jsou pro pasivní domy nebo domy blízké pasivnímu standardu běžné. [L37]

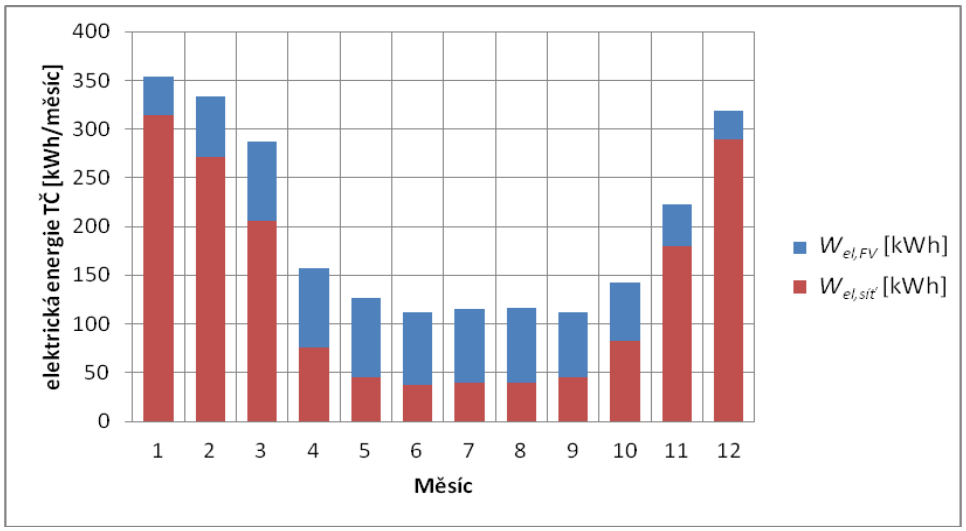
V případě instalace fotovoltaického systému a užití systému přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku (adaptivní regulace) dochází k výraznému nárůstu hodnoty sezónního topného faktoru. Z vnější elektrické sítě je do objektu dodáno 1625 kWh elektrické energie. Tomu odpovídá roční sezónní topný faktor okolo hodnoty 4,2. V daném případě také, díky schopnosti využití energie produkované fotovoltaickým systémem, dosahujeme výrazně většího topného faktoru v letních měsících, kde jeho hodnota v měsíčním maximu překračuje velikost 6,5.

Měsíční energetické bilance referenčního systému v tabulkovém a grafickém vyjádření včetně průběhu sezónního topného faktoru během roku jsou uvedeny v příloze 8 na CD.

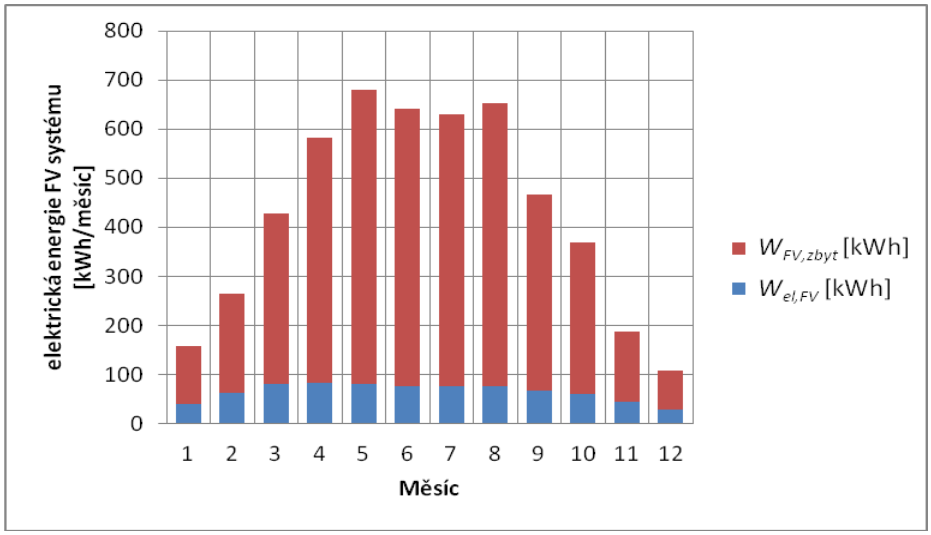


Obr. 31 Průběh sezónního topného faktoru během roku pro referenční systém bez instalace fotovoltaického systému (SPF_{ref}) a v případě jeho užití v kombinaci s přehříváním pohotovostního zásobníku ($SPF_{ref(FV+přehřívání)}$)

V daném případě celkové solární pokrytí f_{FV} činí 32 %. Využití elektřiny vyprodukované fotovoltaickým systémem pro potřeby energetického systému činí pouhých 15 %. Grafické vyjádření solárního pokrytí celkové potřeby elektrické energie během roku se nachází na obr. 32. Z grafu využití produkce fotovoltaického systému energetickým systémem (obr. 33) je zřetelný přebytek výkonu fotovoltaického systému, zatímco není dosahováno plného solárního pokrytí. To je způsobeno nesouběhem produkce energie fotovoltaickým systémem a energie spotřebovávané energetickým systémem. Přebytek produkce elektrické energie od fotovoltaického systému je dále využit elektrickými spotřebiči v objektu, případně je prodán do vnější sítě. Tato skutečnost se vyskytuje také ve všech navazujících simulacích.



Obr. 32 Solární pokrytí celkové potřeby energie pro referenční systém v kombinaci s fotovoltaickým systémem a přehříváním zásobníku
$W_{el,FV}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem krytá ze zisků FV systému
$W_{el,síť}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem dodaná vnější sítí



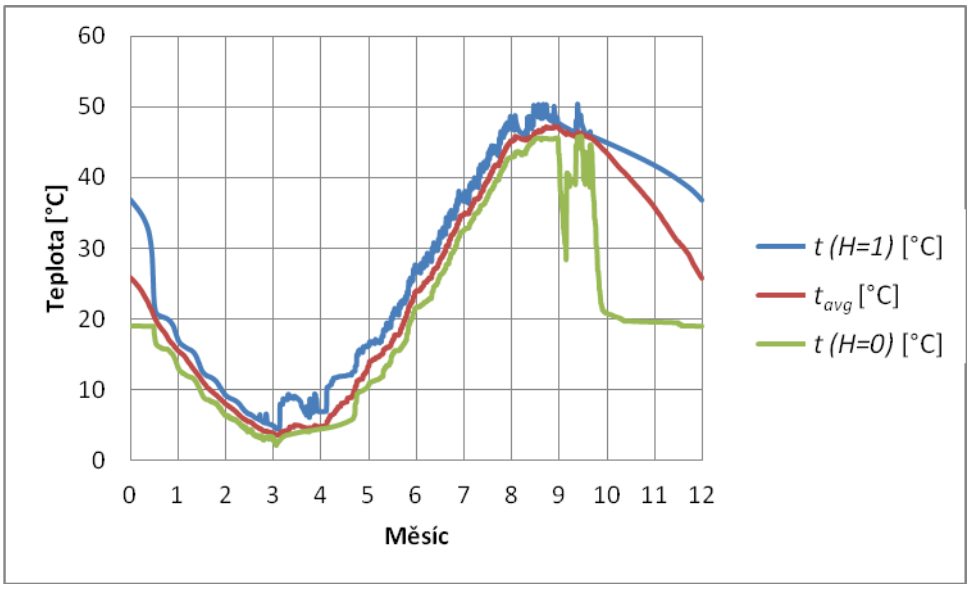
Obr. 33 Využití produkce fotovoltaického systému energetickým systémem pro referenční systém v kombinaci s fotovoltaickým systémem a přehříváním zásobníku
$W_{FV,zbyt}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energ. systémem krytá ze zisků FV systému
$W_{el,síť}$ [kWh] – elektrická energie vyrobená FV systémem nespotřebovaná energetickým systémem

4.3. Energetická bilance systému se sezónní akumulací

Pro analýzu chování soustavy se sezónním zásobníkem byly vždy simulovány dva následující roky a výsledky pro vyhodnocení byly použity z druhého simulovaného roku. Pro detailní rozbor energetické bilance objektu se sezónní akumulací byla zvolena varianta s objemem vodního sezónního zásobníku 100 m^3. Takový objem sezónního zásobníku je dostatečný pro akumulaci tepla výše popsaným energetickým systémem v průběhu celého roku bez rizika zamrzání primárního okruhu tepelného čerpadla

(podchlazení sezónního zásobníku pod 0 °C) a chod systému tedy plně odpovídá popisu uvedenému v kapitole 3.2.

K nabíjení sezónního zásobníku dochází přibližně v časovém období květen až září. Na konci akumulačního procesu koncem září dosahuje teplota vody v sezónním zásobníku v závislosti na stratifikaci 45 až 50 °C. Ke konci otopného období na přelomu března a dubna se nejnižší teplota v zásobníku pohybuje okolo teploty 4 °C. Průběh teploty v zásobníku je zaznamenán na obr. 34.



Obr. 34 Průběh teplot v sezónním zásobníku 100 m^3
***t (H=1)* teplota vrchní vrstvy; t_{avg} – průměrná teplota zásobníku; *t (H=0)* teplota spodní vrstvy**

Pro potřebu dodání užitečné energie v množství přibližně 6720 kWh (3830 kWh pro vytápění objektu a 2890 kWh pro přípravu teplé vody) tepelné čerpadlo vyrobí celkem 15853 kWh tepelné energie. Z tohoto množství je do sezónního zásobníku uloženo 6789 kWh. Přibližně třetina (2194 kWh) z tohoto množství je díky tepelným ztrátám sezónního zásobníku ztracena. Ztráty v pohotovostním kombinovaném zásobníku činí přibližně 667 kWh, avšak vzhledem k umístění pohotovostního kombinovaného zásobníku uvnitř objektu tato položka ztrát zároveň částečně pokrývá tepelnou ztrátu objektu.

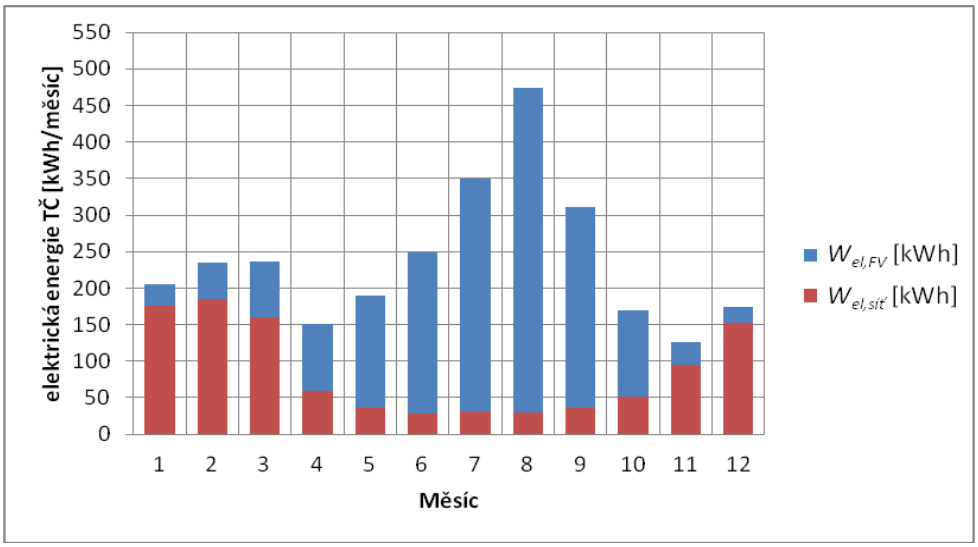
Tab. 8 Bilance tepla vyprodukovaného tepelným čerpadlem (sezónní zásobník 100 m^3)

Produkce tepla TČ	Sezónní zásobník			Pohotovostní kombinovaný zásobník		
Q_c [kWh]	$Q_{sz,in}$ [kWh]	$Q_{sz,out}$ [kWh]	$Q_{sz,loss}$ [kWh]	$Q_{kz,in}$ [kWh]	$Q_{kz,out}$ [kWh]	$Q_{kz,loss}$ [kWh]
15853	6789	-4607	-2194	7467	-6800	-667

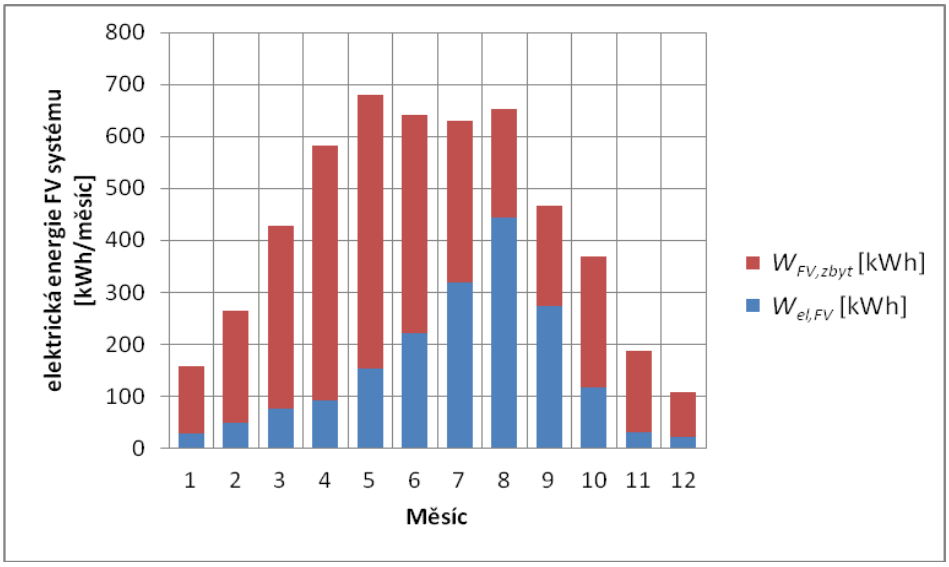
kde je	Q_c	tepelná energie vyprodukovaná tep. čerpadlem	[kWh];
	$Q_{sz,in}$	energie dodaná do sezónního zásobníku	[kWh];
	$Q_{sz,out}$	energie sezónního zásobníku zpětně využitá	[kWh];
	$Q_{sz,loss}$	tepelná ztráta sezónního zásobníku	[kWh];
	$Q_{kz,in}$	energie dodaná do pohot. kombinovaného zásobníku	[kWh];
	$Q_{kz,out}$	energie využitá na přípravu TV a vytápění	[kWh];
	$Q_{kz,loss}$	tepelná ztráta pohot. kombinovaného zásobníku	[kWh].

Celková roční spotřeba elektrické energie (nehledě na původ energie) činí 2868 kWh. Z tohoto množství připadá 2417 kWh na pohon kompresoru a 451 kWh na pohon periferních zařízení (ventilátor, oběhová čerpadla). Fotovoltaický systém po odečtení ztrát (na měniči, regulátoru,…) vyprodukuje 5167 kWh elektrické energie za rok, z čehož 1828 kWh je možno použít na pokrytí požadavků energetického systému. Za těchto podmínek vnější elektrická síť dodává do systému pouze 1040 kWh.

V případě užití sezónního zásobníku o objemu 100 m^3 a fotovoltaického systému o špičkovém výkonu 6 kW$_p$ činí celkové solární pokrytí f_{FV} 64 % potřeby elektrické energie systému. Pro potřeby energetického systému bude využito 35 % elektřiny vyprodukované fotovoltaickým systémem. Grafické vyjádření solárního pokrytí celkové potřeby energie během roku se nachází na obr. 35, graf využití produkce fotovoltaického systému energetickým systémem na obr. 36.



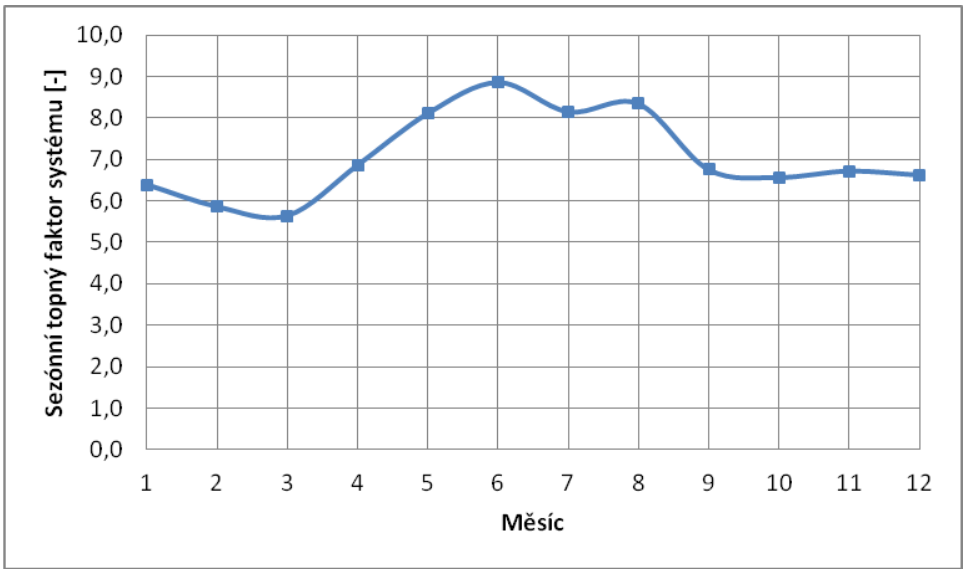
Obr. 35 Solární pokrytí celkové potřeby energie (sezónní zásobník 100 m^3)
$W_{el,FV}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem krytá ze zisků FV systému
$W_{el,síť}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energetickým systémem dodaná vnější sítí



Obr. 36 Využití produkce fotovoltaického systému energet. systémem (sezónní zásobník 100 m^3)
$W_{FV,zbyt}$ [kWh] – elektrická energie spotřebovaná energ. systémem krytá ze zisků FV systému
$W_{el,sít'}$ [kWh] – elektrická energie vyrobená FV systémem nespotřebovaná energetickým systémem

Zároveň dochází k výraznému nárůstu topného faktoru ve srovnání s výsledky simulace referenčního systému – v rámci hodnocení celoročního provozu je řešený systém schopen dosahovat sezónního topného faktoru *SPF* = 6,5. Nejnižšího topného faktoru je dosahováno při téměř vybitém sezónním zásobníku v měsíci březnu, kdy však stále dosahujeme hodnoty topného faktoru přes 5,5. V letních měsících při vysoké produkci elektrické energie fotovoltaickým systémem se topný faktor pohybuje okolo hodnoty 9 (viz obr. 37).

Potřeba měrné primární neobnovitelné energie dosahuje hodnoty 16,5 kWh/m^2.rok, což je výrazně méně než požadovaná výše 25 kWh/m^2.rok.

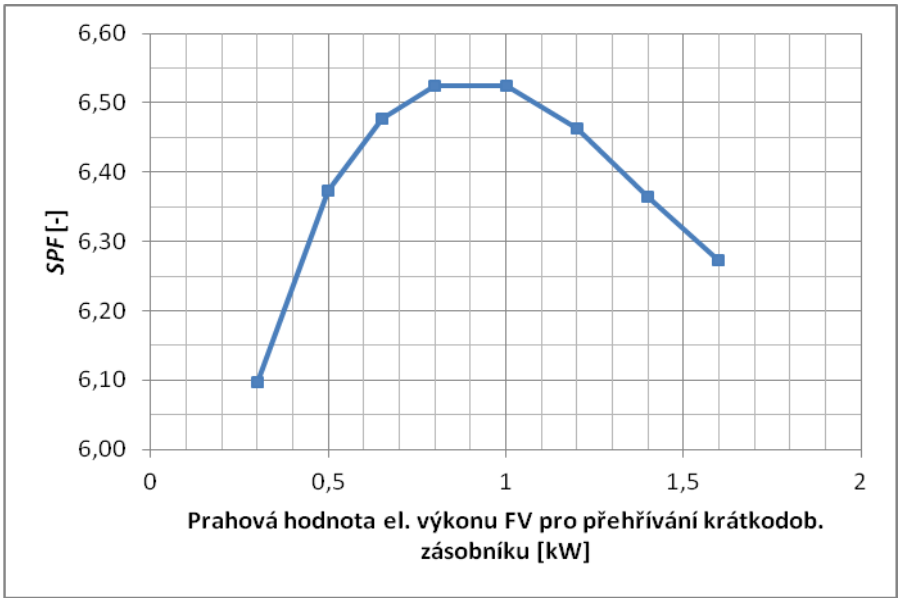


Obr. 37 Průběh sezónního topného faktoru během roku (sezónní zásobník 100 m^3)

4.4. Vliv velikosti prahové hodnoty výkonu FV systému na energetickou bilanci systému

Prahová hodnota elektrického výkonu fotovoltaického systému pro zahájení přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku nekoresponduje s maximálním provozním elektrickým příkonem systému s tepelným čerpadlem. Optimální hodnota prahové hodnoty elektrického výkonu fotovoltaického systému se nachází na nižší úrovni cca 50 % maximálního elektrického příkonu systému a její přesná hodnota je specifická pro konkrétní kombinace výkonových parametrů jednotlivých částí energetického systému. Následující analýza byla provedena pro velikost sezónního zásobníku 100 m^3 a špičkový výkon fotovoltaického systému 6 kW_p.

Nejvyšší hodnotu sezónního topného faktoru tento systém dosahuje, je-li prahová hodnota aktuálního výkonu fotovoltaického systému pro spuštění přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku v rozmezí 0,8 až 1 kW. Při nastavení prahové hodnoty na nižší nebo vyšší hodnotu se efektivita energetického systému snižuje. Z obr. 38 je však patrné, že tato křivka grafu má plochý vrchol a pokles účinnosti se změnou prahové hodnoty v okolí optimální hodnoty není příliš výrazný. V rozmezí prahové hodnoty od 0,6 kW do 1,25 kW se rozdíl dosahovaného sezónního topného faktoru pohybuje do 0,1. Dosahované hodnoty solárního pokrytí a využití produkce se v okolí optima mění také pouze minimálně.



Obr. 38 Závislost sezónního topného faktoru energetického systému na prahové hodnotě elektrického výkonu fotovoltaického systému pro přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku

Souhrnný přehled energetické bilance systému v závislosti na prahové hodnotě elektrického výkonu fotovoltaického systému se nachází v tab. 9. Měsíční energetické bilance systémů v tabulkovém a grafickém vyjádření včetně průběhu sezónního topného faktoru během roku pro jednotlivé hodnoty prahového výkonu fotovoltaického systému jsou uvedeny v příloze 6 na CD.

Tab. 9 Energetické bilance systému pro různé prahové hodnoty elektrického výkonu fotovoltaického systému

P_{on} [kW]	f_{FV} [-]	r_{FV} [-]	SPF [-]	$W_{el,\,síť}$ [kWh]
0,3	0,62	0,35	6,10	1113
0,5	0,63	0,36	6,37	1065
0,65	0,64	0,35	6,48	1048
0,8	0,64	0,35	6,54	1040
1	0,64	0,36	6,54	1041
1,2	0,64	0,36	6,46	1050
1,4	0,62	0,34	6,36	1067
1,6	0,60	0,32	6,27	1082

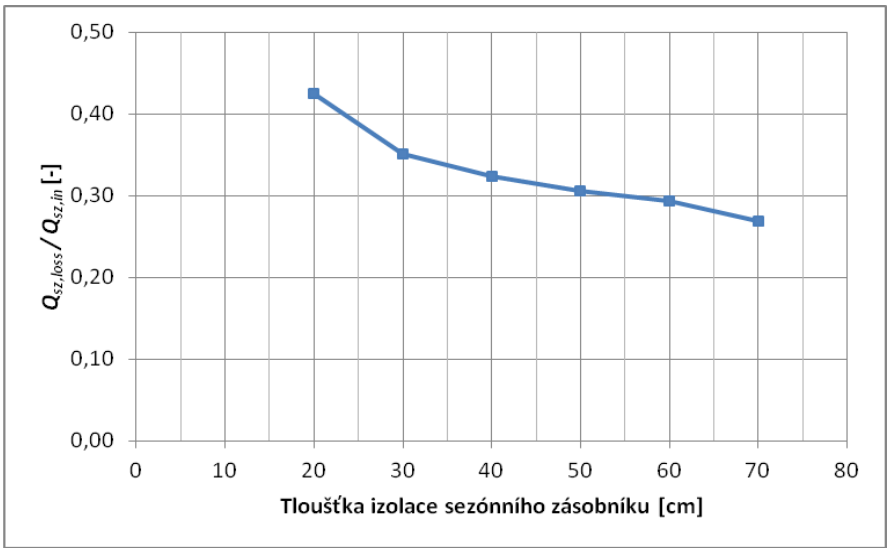
kde je:	P_{on}	prahová hodnota výkonu FV systému	[cm]
	f_{FV}	solární pokrytí energetických potřeb budovy	[-];
	r_{FV}	využití produkce fotovoltaického systému	[-];
	SPF	sezónní topný faktor	[-];
	$W_{el,\,síť}$	spotřeba el. energie dodaná vnější sítí	[kWh].

4.5. Vliv tloušťky izolace sezónního zásobníku na energetickou bilanci systému

V první řadě je nutno zdůraznit, že v rámci této práce je hodnocen pouze vliv na energetickou bilanci systému. Optimální zhodnocení vlivu tloušťky izolace by znamenalo zahrnutí ekonomického faktoru v podobě nárůstu investičních nákladů. Byly provedeny simulace řešeného systému při zvoleném objemu sezónního zásobníku 100 m^3 a nastavení prahové hodnoty fotovoltaického systému pro přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku na hodnotu 0,8 kW. Tloušťka izolace sezónního zásobníku (součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0{,}04$ W/mK) byla měněna v rozmezí od 20 cm do 70 cm.

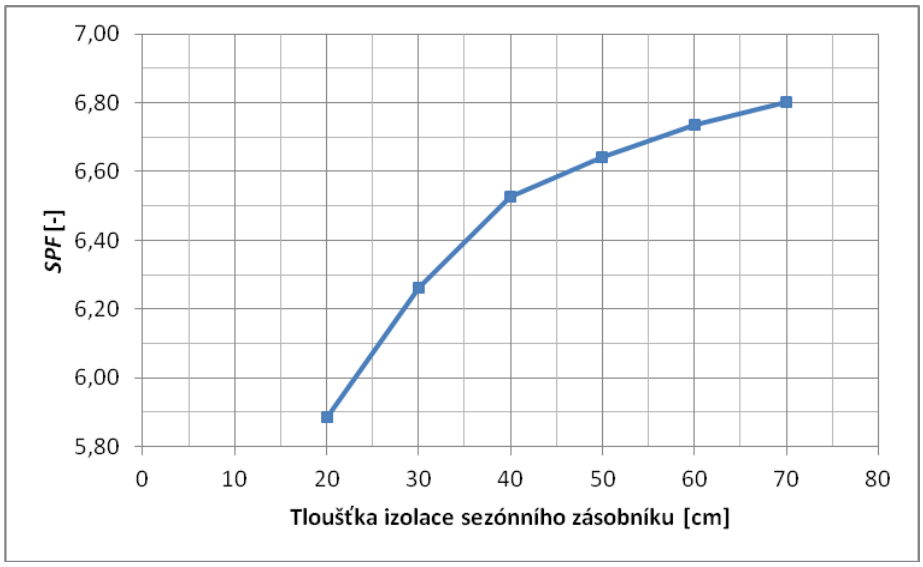
Průběh vlivu tloušťky izolace na energetickou bilanci systému není překvapivý a plně odpovídá předpokladům. Největšího efektu změnou tloušťky izolace je

dosahováno při jejích malých výchozích tloušťkách. S celkovým nárůstem tloušťky izolace dochází již pouze k menším změnám součinitele prostupu tepla a vliv změny tloušťky izolace na celkovou energetickou bilanci systému klesá. Tloušťka izolace výrazně ovlivňuje podíl tepelných ztrát sezónního zásobníku na celkové dodané energii do něj, jak je vidět na obr. 39. V případě izolace o tloušťce 20 cm mají tepelné ztráty podíl na celkové dodané energii 42 %. Tento podíl postupně klesá, ale pro izolaci o tloušťce 70 cm činí tepelná ztráta stále ještě 27 %. Za situace, kdy je snaha zlepšovat účinnosti strojních zařízení o každé procento, to znamená stále ohromné množství ztrátové energie. Z tohoto důvodu je snaha o využití akumulace na jiném způsobu než na akumulaci citelného tepla (viz kapitola 2.3.).



Obr. 39 Vliv tloušťky tepelné izolace sezónního zásobníku na podílu tepelných ztrát sezónního zásobníku vůči celkové dodané energii do tohoto zásobníku

Na obr. 40 je vidět vliv změny tloušťky izolace na sezónní topný faktor energetického systému. Ve srovnání s nastavením prahové hodnoty (viz 4.4.) má změna tloušťky izolace na *SPF* výrazný vliv. Pro tloušťky izolace menší než 40 cm topný faktor rychle klesá a užití takovéto mocnosti izolace je z energetického hlediska relativně neefektivní. Při dalším nárůstu vrstvy tepelné izolace roste hodnota sezónního topného faktoru přibližně o 0,1 bodu na dalších 10 cm izolační vrstvy a tento růst dále klesá.



Obr. 40 Vliv tloušťky tepelné izolace sezónního zásobníku na sezónní topný faktor systému

Souhrnný přehled energetické bilance systému v závislosti na tloušťce izolace sezónního zásobníku se nachází v tab. 10. Je zřejmé, že s růstem tloušťky izolace zároveň roste velikost solárního pokrytí f_{FV} a využití produkce r_{FV} v řádu setin bodu na přidaných 10 cm tepelné izolace. Ani při výrazném zvětšení tloušťky izolace však tento systém nedosahuje potenciálu plného solárního pokrytí.

Tab. 10 Energetické bilance systému pro různé tloušťky izolace sezónního zásobníku

H_{iz} [cm]	f_{FV} [-]	r_{FV} [-]	SPF [-]	$W_{el,síť}$ [kWh]	$Q_{sz,loss}$ [kWh]	$Q_{sz,loss}$ / $Q_{sz,in}$ [-]
20	0,61	0,35	5,89	1153	2901	0,42
30	0,63	0,35	6,27	1084	2396	0,35
40	0,64	0,35	6,54	1040	2194	0,32
50	0,65	0,37	6,64	1022	2089	0,31
60	0,66	0,38	6,73	1008	2037	0,29
70	0,67	0,39	6,80	998	1868	0,27

kde je:

H_{iz}	tloušťka tepelné izolace stěny sezon. zásobníku	[cm]
f_{FV}	solární pokrytí energetických potřeb budovy	[-];
r_{FV}	využití produkce fotovoltaického systému	[-];
SPF	sezónní topný faktor	[-];
$W_{el,\ síť}$	spotřeba el. energie dodaná vnější sítí	[kWh];
$Q_{sz,loss}$	tepelná ztráta sezónního zásobníku	[kWh];
$Q_{sz,in}$	energie dodaná do sezónního zásobníku	[kWh];
$Q_{sz,loss}$ / $Q_{sz,in}$	podíl tepelných ztrát sezónního zásobníku na celkové dodané energii do něj	[kWh].

Měsíční energetické bilance systémů v tabulkovém a grafickém vyjádření včetně průběhu sezónního topného faktoru během roku pro jednotlivé tloušťky izolace sezónního zásobníku jsou uvedeny v příloze 7 na CD.

4.6. Vliv velikosti sezónního zásobníku na energetickou bilanci systému

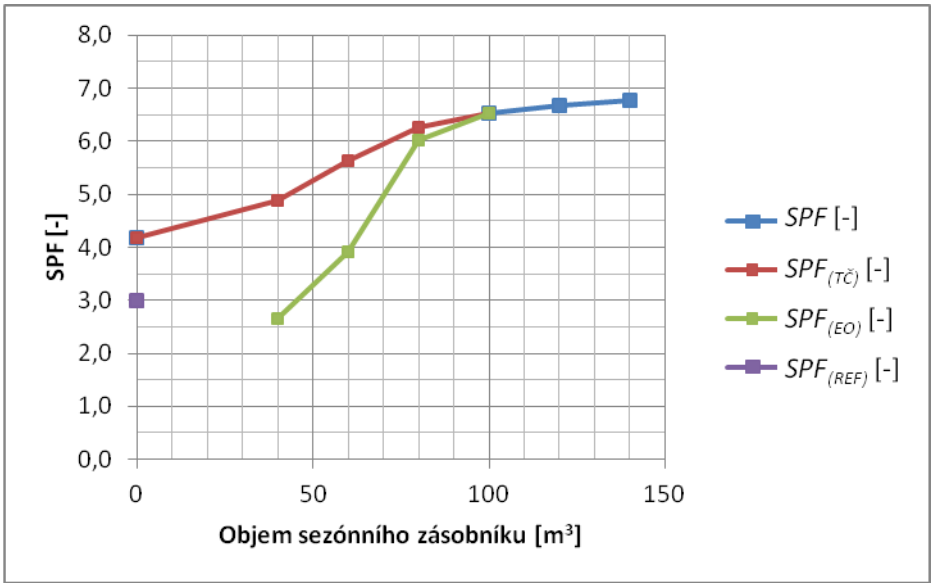
Parametry vodního sezónního zásobníku mají výrazný vliv na velikost sezónního topného faktoru a množství elektřiny, které je nutno dodat do systému z vnější elektrické sítě. Velikost zásobníku má však vliv nejen na energetickou bilanci celého systému, ale zároveň také na funkčnost výše popsané soustavy. Vzhledem k použití vody jako teplonosné látky energetického systému je nutné zabránit zamrzání vody při teplotách klesajících pod 0 °C. Díky tomuto omezení nelze v teplotách pod bodem mrazu využívat systém v režimu tepelného čerpadla vzduch/voda a jako zdroj tepla je k dispozici pouze teplo naakumulované v sezónním zásobníku. Výše popsaný systém tedy funguje pouze tehdy, je-li zásobník schopen pojmout dostatek tepelné energie, aby na konci otopné sezóny teplota v něm zůstávala nad nulou.

Pro simulaci chodu systému s menším zásobníkem je nutno přijmout některá možná opatření, jak s danou situací naložit. Jednou z možností, jak se vyrovnat s rizikem zamrznutí systému, je úplné odpojení sezónního zásobníku a tepelného čerpadla a čistý elektrický dohřev v podobě elektrických patron v pohotovostním kombinovaném zásobníku. Tato možnost požaduje nejmenší dodatečné úpravy uvedeného systému, avšak předpokládá výskyt časového období, kdy jsou energetické potřeby objektu kryty čistě elektrickým dohřevem, tedy neekonomicky a neekologicky a tím dochází k výraznému snižování topného faktoru.

Technicky zajímavější řešení představuje použití tepelného čerpadla, které je vybaveno dvěma výparníky. Díky tomu může tepelné čerpadlo pracovat nezávisle jako typ voda/voda (s výše uvedeným omezením ohledně zamrzání) nebo jako typ vzduch/voda s nemrznoucí náplní v primárním okruhu, díky které může být toto tepelné čerpadlo využíváno i při venkovních teplotách pod bodem mrazu. Tento druh tepelných čerpadel ovšem zatím není příliš rozšířen a v současné době jsou hlavně ve stadiu vývoje. Pro nastínění energetických parametrů takové soustavy, tedy soustavy s celoročním provozem tepelného čerpadla, bude provedena simulace s tepelným čerpadlem dle 3.4.1., které bude (nerealisticky) provozováno i v teplotách pod bodem

mrazu. Energetické parametry skutečného systému by řádově měly odpovídat těmto hodnotám.

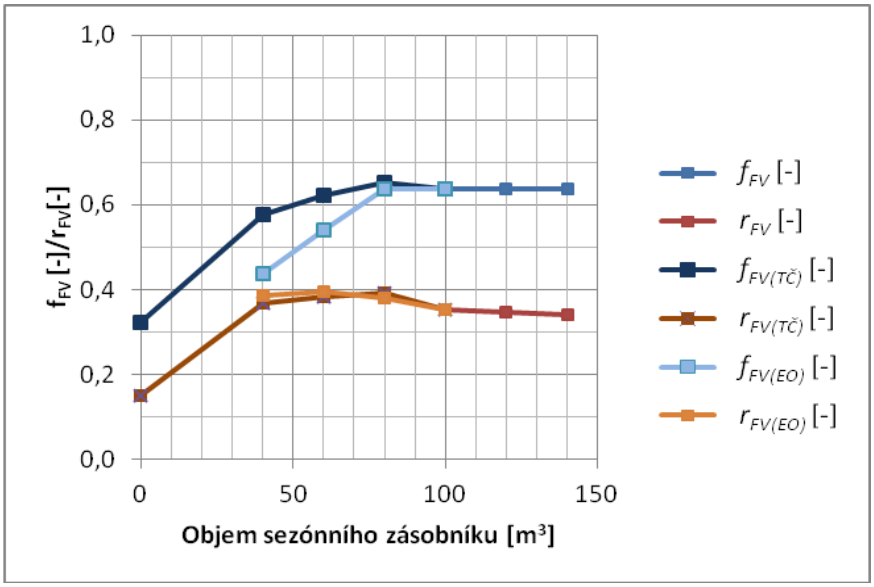
Teoretické řešení v podobě použití nemrznoucí etylenglykolové směsi do sezónního zásobníku a otopné soustavy silně naráží na ekonomické limity a z těchto důvodů není s touto variantou dále uvažováno. Například v případě ředění etylenglykolové směsi s vodou v poměru 1:2 při uvažování objemu zásobníku 60 m^3 by bylo nutno doplnit do systému přibližně 20 m^3 etylenglykolu. Při běžné ceně 65 Kč/litr by vycházely náklady na samotný etylenglykol na částku vyšší než milion korun.



Obr. 41 Závislost sezónního topného faktoru na velikosti sezónního zásobníku
***SPF* – plně funkční akumulační systém dle kapitoly 3.2.;**
***SPF* $_{(TČ)}$ – varianta tepelného čerpadla s dvojicí výparníků pro celoroční provoz;**
***SPF* $_{(EO)}$ – varianta provozu s následným odstavením TČ a čistě elektrickým dohřevem**
***SPF* $_{(REF)}$ – referenční systém bez fotovoltaického systému**

Na obr. 41 je graficky vyjádřena závislost sezónního topného faktoru na velikosti sezónního zásobníku. Hodnota $SPF_{(TČ)}$ v grafu pro hypoteticky nulový objem zásobníku představuje referenční systém při užití fotovoltaického systému a přehřívání pohotovostního kombinovaného zásobníku. V případě možnosti trvalého použití tepelného čerpadla roste trvale výrazně hodnota sezónního topného faktoru až do objemu zásobníku přibližně 80 m^3 vodního objemu, kde dosahuje hodnoty přibližně 6,3. Nad hodnotou tohoto objemu dochází již pouze k mírnému nárůstu sezónního topného faktoru (cca 6,8 pro objem zásobníku 140 m^3). Je tedy patrné, že další zvětšování objemu zásobníku nepřináší výrazný energetický efekt a takovéto zásobníky je možno považovat za předimenzované. Pro objem sezónního zásobníku menší než 100 m^3 již hrozí reálné nebezpečí zamrznutí vody v primárním okruhu

tepelného čerpadla. Pro nedostatečné velikosti sezónního zásobníku ve variantě plného odstavení tepelného čerpadla a následného elektrického dohřevu dochází s jejich zmenšováním k výraznému poklesu topného faktoru, neboť po vyčerpání energetického potenciálu zásobníku je energetický systém provozován s topným faktorem 1. Ještě při objemu zásobníku 80 m^3 má množství energie dodávané elektrickým dohřevem malý podíl na celkové dodávce energie a sezónní topný faktor dosahuje hodnoty 6 (pouze o několik desetin méně než při hypotetickém celoročním provozu tepelného čerpadla), ale při objemu zásobníku 40 m^3 klesá jeho hodnota až pod hodnotu odpovídající referenčnímu systému bez jakéhokoli užití fotovoltaického systému.



Obr. 42 Závislost solárního pokrytí f_{FV} a využití produkce fotovoltaického systému energetickým systémem r_{FV} v závislosti na objemu sezónního zásobníku
f_{FV} / r_{FV} – plně funkční akumulační systém dle kapitoly 3.2.;
$f_{FV(TČ)}$ / $r_{FV(TČ)}$ – varianta tepelného čerpadla s dvojicí výparníků pro celoroční provoz;
$f_{FV(EO)}$ / $r_{FV(EO)}$ – varianta provozu s následným odstavením TČ a čistě elektrickým dohřevem

Změna velikosti solárního pokrytí f_{FV} a využití produkce r_{FV} (obr. 42) odpovídá předpokládanému chování systému. Obě hodnoty výrazně rostou s růstem velikosti zásobníku do 80 m^3, nad touto hodnotou se růst zpomaluje. Na základě výsledků simulace lze tvrdit, že maximální hodnota solárního pokrytí při užití tohoto energetického systému se pohybuje okolo 67 % a většího solárního pokrytí se dalším zvětšováním objemu sezónního zásobníku nedosahuje. Zvětšováním objemu sezónního zásobníku tedy v rámci tohoto energetického systému nedosáhneme plného solárního pokrytí energetických potřeb budovy. Pro malé velikosti zásobníku ve variantě plného odstavení tepelného čerpadla a elektrického dohřevu solární pokrytí výrazně klesá.

Podíl využití produkce fotovoltaického systému energetickým systémem r_{FV} se pohybuje v maximu na hodnotách okolo 40 %.

Souhrnný přehled energetické bilance systému v závislosti na velikosti akumulační nádrže pro případ hypotetického celoročního provozu tepelného čerpadla se nachází v tab. 11. Měsíční energetické bilance systémů v tabulkovém a grafickém vyjádření včetně průběhu sezónního topného faktoru během roku pro jednotlivé velikosti sezónního zásobníku jsou uvedeny v příloze 8 na CD.

Tab. 11 Energetické bilance systému pro různé velikosti sezónního zásobníku

AKU [m^3]	f_{FV} [-]	r_{FV} [-]	*SPF* [-]	W_{el} [kWh]	$W_{el,\,FV}$ [kWh]	$W_{el,\,sít'}$ [kWh]	$Q_{nPE,m}$ [kWh/m^{2}rok]
0	0,32	0,08	4,2	2398	772	1625	25,7
40	0,58	0,37	4,9	3296	1904	1392	22,0
60	0,62	0,38	5,6	3188	1982	1205	19,0
80	0,65	0,39	6,3	3114	2028	1086	17,2
100	0,64	0,35	6,5	2868	1828	1040	16,4
120	0,64	0,35	6,7	2810	1792	1018	16,1
140	0,64	0,34	6,8	2765	1764	1001	15,8

kde je:

f_{FV}	solární pokrytí energetických potřeb budovy	[-];
r_{FV}	využití produkce fotovoltaického systému	[-];
SPF	sezónní topný faktor	[-];
W_{el}	celková spotřeba elektrické energie	[kWh];
$W_{el,\,FV}$	spotřeba el. energie krytá FV systémem	[kWh];
$W_{el,\,sit'}$	spotřeba el. energie dodaná vnější sítí	[kWh];
$Q_{nPE,m}$	měrná potřeba neobnovitelné primární energie	[kWh/m^2.rok].

Z tab. 11 je zřejmé, že v případě užití tohoto systému se sezónní akumulací je plnění současných požadavků na měrnou potřebu neobnovitelné energie ve výši 25 kWh/m^2.rok (viz kapitola 1.1.) realizovatelné.

5. Závěr

Pro zadaný rodinný dům s velmi nízkou energetickou náročností s instalovaným fotovoltaickým systémem a invertorovým tepelným čerpadlem byla v simulačním

prostředí TRNSYS provedena analýza energetického systému s vodním sezónním zásobníkem v podloží objektu. Jako zdroj tepla v řešeném objektu slouží tepelné čerpadlo, které v letních měsících odebírá energii z okolního prostředí chladičem venkovního vzduchu, v zimě energii naakumulovanou v sezónním zásobníku.

Energetická bilance systému vybaveného sezónní akumulací tepla dosahuje výrazně lepších výsledků ve srovnání s referenčním systémem, jak vyplývá z obsahu kapitoly 4.2. a 4.3. Pro řešený objekt se na základě provedených simulací jeví jako energeticky optimální užití sezónního zásobníku o velikosti 100 m^3. V tomto případě je pro vytápění objektu a přípravu teplé vody nutno dodat přibližně 1040 kWh elektrické energie z vnější sítě (solární pokrytí potřeb elektřiny z fotovoltaického systému činí 64 %) a celý systém dosahuje sezónního topného faktoru na úrovni 6,5. Potřeba měrné primární neobnovitelné energie nabývá pro tento konkrétní systém hodnoty 16,5 kWh/m^2.rok. Na základě výše uvedeného lze konstatovat, že v případě užití principielně takovéhoto systému se sezónní akumulací dochází k naplnění limitů předpokládaných Evropskou komisí na měrnou potřebu neobnovitelné energie ve výši 25 kWh/m^2.rok, požadavky pro budovu s téměř nulovou spotřebou energie jsou tedy s rezervou splněné. Při užití zásobníku o menším užitném objemu roste riziko zamrznutí systému při vyčerpání energetického potenciálu sezónního zásobníku. Naopak při dalším zvětšování objemu zásobníku roste sezónní topný faktor již pouze minimálně, a to přibližně o desetinu bodu na každých 20 m^3 vodního objemu zásobníku. Také hodnota solárního pokrytí se při růstu objemu zásobníku dále nemění – instalací tohoto energetického systému tedy nedosáhneme plného solárního pokrytí energetických potřeb budovy.

Dále byl zkoumán vliv tloušťky tepelné izolace na tepelné ztráty sezónního zásobníku a sezónní topný faktor systému. Simulace (viz kapitola 4.5.) potvrdila, že v případě užití sezónní akumulace na principu citelného tepla odebírají tepelné ztráty sezónního zásobníku výraznou část tepla akumulovaného do zásobníku během jeho nabíjení. Tak tomu je i v případě užití tepelného čerpadla jako zdroje tepla pro zásobník. Tepelné čerpadlo nemá potenciál nabít zásobník do výrazně vysokých teplot, jaké mohou být dosahovány při přímém nabíjení zásobníku pomocí tepelných kolektorů. V případě nabíjení zásobníku tepelnými kolektory by docházelo k ještě většímu úniku tepla díky většímu gradientu teplot mezi zásobníkem a jeho okolím. Ani výrazný další nárůst tloušťky izolace od určité hodnoty, v daném případě 40 cm,

podíl tepelných ztrát na dodané energii do zásobníku podstatně nesnižuje. S ohledem na celkovou energetickou bilanci systému při zvoleném objemu zásobníku 100 m^3 se hodnota sezónního topného faktoru při tloušťce izolace nad 40 cm mění o méně než 0,1 bodu na každých přibývajících 10 cm tloušťky izolace.

Simulacemi zaznamenanými v této diplomové práci byl tedy potvrzen předpoklad, že v případě užití vody, tedy látky s vysokou tepelnou kapacitou, jako akumulační látky pro primární okruh tepelného čerpadla, lze v případě celkové optimalizace jednotlivých dílčích komponent vytvořit energetický systém, který umožní dlouhodobý chod tepelného čerpadla v jeho optimálních pracovních podmínkách a dosáhnout tímto způsobem vysokých hodnot sezónních topných faktorů.

Zároveň však zde vyvstává otázka problematiky velikosti sezónního zásobníku nejen s ohledem na energetickou bilanci systému s tepelným čerpadlem voda/voda, ale také s ohledem na celkovou funkčnost tohoto energetického systému. Při poddimenzování sezónního zásobníku dochází na konci otopného období k vyčerpání tepelné energie uchované v sezónním zásobníku, v důsledku čehož v něm teplota klesá k bodu mrazu. Je nutno tedy zabránit zamrznutí zásobníku jeho odstavením. Pokud k tomuto jevu dojde za venkovních teplot pod bodem mrazu, není v tento okamžik možné použít tepelné čerpadlo ani pro čerpání energie z venkovního prostředí, neboť teplonosnou látkou primárního okruhu tepelného čerpadla mezi ním a chladičem venkovního vzduchu je také voda. Pro takovéto systémy by bylo vhodné instalovat tepelná čerpadla se dvěma výparníky, kdy okruh vzduch/voda by bylo možné provozovat i při venkovních teplotách pod 0 °C. Tento druh tepelných čerpadel není však dosud v praxi rozšířen. Ústav techniky prostředí fakulty strojní ČVUT se na vývoji tepelného čerpadla tohoto typu podílí. Pro simulace chování energetického systému používajícího tepelné čerpadlo s dvěma výparníky by bylo vhodné vytvořit jeho model v TRNSYS.

Cílem této práce nebylo hodnotit ekonomickou návratnost vybudování objektu s energetickou soustavou s vodním sezónním zásobníkem tepla. Přesto bych si dovolil nad tímto tématem malé zamyšlení. V současné době, částečně i díky malému rozšíření sezónních zásobníků, je jejich vybudování velmi nákladná investice. Relativní přínos úspory energie a nárůst sezónního topného faktoru je v případě užití tohoto systému sice možno pokládat za značný, avšak díky celkově malé energetické náročnosti dnešních rodinných domů není dosahovaná roční finanční úspora provozních nákladů při použití

sezónních zásobníků natolik výrazná, aby zajistila brzkou návratnost takovéto investice. Z mého pohledu by však bylo předčasné myšlenku sezónní akumulace, ať již se zásobníkem na vodní nebo jiné bázi, zavrhovat. Je však možné, že rozšíření principu sezónní akumulace nenastane z ekonomicko-tržních důvodů, ale zejména z důvodů politicko-ekologických. Pokud bude pokračovat současný trend neustálého zpřísňování legislativních požadavků na energetickou náročnost budov ve formě dalšího snižování potřeby měrné primární neobnovitelné energie, je možné reálně předpokládat, že sezónní akumulace tepla bude nutnou podmínkou pro splnění budoucích legislativních požadavků na výstavbu objektů. Proto je nezbytné se touto problematikou i nadále odborně zabývat.

Seznam literatury

[L1] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/31/EU: ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepracování). In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2010, Svazek 53.

[L2] DOPORUČENÍ: o pokynech na podporu budov s téměř nulovou spotřebou energie a osvědčených postupů k zajištění, aby do roku 2020 byly všechny nové budovy budovami s téměř nulovou spotřebou energie. In: *2016/1318*.

[L3] Vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov se změnami: 230/2015 Sb. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2013, Částka 36. s. 738.

[L4] ANTONÍN, Jan a Magdalena PURKRTOVÁ. *Budovy s téměř nulovou spotřebou energie - Definice* [online]. 2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15180-budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie-definice

[L5] KABELE, Karel a Miroslav URBAN. *Případové studie budov s téměř nulovou spotřebou energie v ČR - rodinný dům: Pohled na budovy s téměř nulovou spotřebou energie v kontextu současných legislativních požadavků v ČR (část 3)* [online]. 2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15176-pripadove-studie-budov-s-temer-nulovou-spotrebou-energie-v-cr-rodinny-dum

[L6] ČEJKA, Michal a Jan ANTONÍN. Budovy s téměř nulovou spotřebou – porovnání energetických standardů. *TZBinfo.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: http://stavba.tzb-info.cz/budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-energie/15181-budovy-s-temer-nulovou-spotrebou-porovnani-energetickych-standardu

[L7] DAVID, Petr. *Kompresory pro tepelná čerpadla* [online]. 2015 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13498-kompresory-pro-tepelna-cerpadla

[L8] KOLARČÍK, Kamil, Jaroslav KAMINSKÝ a Mojmír VRTEK. *Kompresory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2017-06-18]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/002_Kompresory---Kolarcik-a-kol---P3.pdf

[L9] TASSOU, S.A., C.J. MARQUAND a D.R. WILSON. Comparison of the performance of capacity controlled and conventional on/off controlled heat pumps. *Applied Energy: Volume 14, Issue 4* [online]. 1983, , 241-256 [cit. 2017-06-23]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030626198390051X

[L10] ADHIKARI, R.S., N ASTE, M MANFREN a D MARINI. Energy Savings through Variable Speed Compressor Heat Pump Systems. *Energy Procedia: Volume 14* [online]. 2012, 1337-1342 [cit. 2017-06-23]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211045188

[L11] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.

[L12] MATUŠKA, Tomáš. *Fotovoltaika: Základy*. (přednáška). Praha: FS ČVUT, 12.04.2016.

[L13] HYLSKÝ, Josef, Dávid STRÁCHALA a Jiří VANĚK. Potenciálově indukovaná degradace fotovoltaických modulů. *Elektrorevue*. 2015, **17**(6), 6. ISSN 1213-1539.

[L14] STANĚK, Kamil. *Fotovoltaika pro budovy*. Praha: Grada pro Katedru konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, 2012. ISBN 978-80-247-4278-6.

[L15] MATUŠKA, Tomáš. *Fotovoltaika - systémy*. (přednáška). Praha: FS ČVUT, 03.05.2016.

[L16] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010. ISBN 978-80-904311-5-7.

[L17] MATUŠKA, Tomáš. *Fotovoltaika: Speciální aplikace FV systémů*. (přednáška). Praha: FS ČVUT, 10.05.2016.

[L18] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 9788024735252.

[L19] NOHEJL, Ervín. *Sezónní akumulátor tepla s minimálními ztrátami: Akumulace tepla s využitím podchlazené taveniny trihydrátu octanu sodného* [online]. 2014 [cit.

2017-03-06]. Dostupné z: http://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11626-sezonni-akumulator-tepla-s-minimalnimi-ztratami

[L20] MATUŠKA, Tomáš. *Solární soustavy a tepelná čerpadla pro CZT* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/ZZT-P9-solar-p1.pdf

[L21] MATUŠKA, Tomáš. *Solární soustavy s vysokým pokrytím* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/02/AZE-P4-sezonni_akumulace_zasobniky.pdf

[L22] SCHULZ, Heinz. *Teplo ze slunce a země: energeticky úsporné topné systémy s podzemními zásobníky tepla, slunečními absorbéry a tepelnými čerpadly : s příspěvkem Doroty Chwiedukové*. Ostrava: HEL, 1999. ISBN 80-86167-09-7.

[L23] SIEGENTHALER, John. *Heating with renewable energy: practical, hydronic-based combisystems for residential and light commercial buildings*. Cengage Learning, 2016. ISBN 978-128-5075-600.

[L24] *Seasonal Thermal Storage* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://bruteforcecollaborative.wordpress.com/2010/03/16/seasonal-thermal-storage/

[L25] BÖER, Karl W. Solar One: The Delaware solar house and results obtained during the first years of operation. In: *International Conference on Photovoltaic Power Generation*. Hamburg, 1974, s. 8.

[L26] UNIVERSITY OF DELAWARE. *Solar One House* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://www1.udel.edu/iec/SolarOneHouse.html

[L27] VOSS, Karsten. *The Self-Sufficiente Solar House Freiburg: Results Of Three Years of Operation* [online]. Freiburg, 1996 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z http://www.academia.edu/16914376/The_self-sufficient_solar_house_in_Freiburg_Results_of_3_years_of_operation. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems.

[L28] HEGEDYS, Herbert a Christian FINK. *Nullenergiehaus Nader – Laßnitzhöhe* [online]. , 5 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: http://download.nachhaltigwirtschaften.at/pdf/lassnitzhoehe_nader.pdf

[L29] Hamry. *Mapy Google* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z

https://www.google.cz/maps/place/539+01+Hamry/@50.2648279,16.0127606,7z/data=!4m2!3m1!1s0x470da355e0114165:0xd5427c524c641aae

[L30] Informace o pozemku. *Nahlížení do katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://nahlizenidokn.cuzk.cz/ZobrazObjekt.aspx?encrypted=3K4zDTD6ggPdVagnDpgqXtk_4WvRFc4uYeCXNYUs1s_YoXNPw4KL0_-ma38SO09RTb9xV3kXHRmaYtKVYpHFIDb1HRcvtPq4IKb_P9Dbs0OQE85MbveGccKE3DmNfuu2

[L31] SCHWARZER, Jan. *Energetický posudek: Oblast podpory B - Výstavba domů s velmi nízkou energetickou náročností*. 2014. SAS Projekt.

[L32] Transient System Simulation Tool - TRNSYS 17.1, The University of Wisconsin, Madison, http:// http://sel.me.wisc.edu/trnsys.

[L33] SEDLÁŘ, Jan. *TRNSYS 260 Variable speed ground heat pump with desuperheater and subcooler*. UCEEB, 2016. [online]. [cit. 2017-06-10]. Dostupné z: http://www.uceeb.eu/vysledky-rp2

[L34] SEDLÁŘ, Jan. *Zkoušení tepelných čerpadel pro vytápění* [online]. , 3 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13365-zkouseni-tepelnych-cerpadel-pro-vytapeni

[L35] REGULUS. Technický list: Kombinovaná akumulační nádrž HSK 390 P [online]. [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: http://www.regulus.cz/download/tech-listy/cz/tl_cz_technicky-list_hsk390p.pdf

[L36] DRUECK, H.. *Multiport Store Model for TRNSYS – Type 340*, Transsolar GmbH, Stuttgart, Germany. 2006.

[L37] MATUŠKA, Tomáš. Přínosy tepelných čerpadel v pasivních domech. In: *Pasivní domy*. Brno: Centrum pasivního domu, 2012, s. 280-287. ISBN 978-80-904739-2-8.

Seznam příloh

Příloha 1: Technické vlastnosti použitých stavebních materiálů a výpočet součinitele prostupu tepla obvodových konstrukcí objektu
Příloha 2: Nastavení parametrů modelu tepelného čerpadla – *Type264*
Příloha 3: Nastavení parametrů modelu fotovoltaického systému – *Type50b*
Příloha 4: Nastavení parametrů modelu pohotovostního kombinovaného zásobníku – *Type340*
Příloha 5: TRNSYS: Schéma simulačního programu (1x A2)

Přílohy na přiloženém CD

Příloha 6: Vliv velikosti prahové hodnoty na energetickou bilanci (xls)
Příloha 7: Vliv tloušťky tepelné izolace na energetickou bilanci (xls)
Příloha 8: Vliv velikosti sezónního zásobníku na energetickou bilanci (xls)
Příloha 9: Diplomová práce – elektronická podoba (pdf)

Příloha 1: Technické vlastnosti použitých stavebních materiálů a výpočet součinitele prostupu tepla obvodových konstrukcí objektu

Vnější obvodová stěna Porotherm

Stěna vnější

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Omítka	0,005	0,99	2000	0,79	0,005
Porotherm 30 T Profi	0,3	0,077	650	0,99	3,896
Isover TF Profi SVT431	0,18	0,039	120	0,84	4,673
Stěrka	0,003	0,85	1750	1,25	0,004
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,13
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,04

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,114
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{pas,20}$ [W/m^{2}K]	0,18
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	0,3
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,25

Vnitřní stěna Porotherm

Stěna vnitřní mezi prostory s rozdílem teplot do 5°C včetně

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Omítka	0,005	0,99	2000	0,79	0,005
Příčkové zdivo Porotherm 11,5 AKU P10	0,115	0,32	1050	0,96	0,359
Omítka	0,005	0,99	2000	0,79	0,005
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,13
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,13

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	1,59
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí (Δt < 5°C) $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	2,7
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí (Δt < 5°C) $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	1,8

Podlaha 1.NP - keramická dlažba

Podlaha přiléhající k zemině

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Keramická dlažba	0,01	1,01	2000	0,84	0,010
Anhydritový potěr	0,059	1,25	2200	0,9	0,047
Tepelná izolace EPS 100S SVT1592	0,24	0,038	32	1	6,298
Hydroizolace Glastek 40	0,002				
Základová deska	0,2	1,43	1200	1	0,140
Vzduchová mezera	0,1	0,588	1010	1,2	0,170
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,17
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,04

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,15
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{pas,20}$ [W/m^{2}K]	0,22
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	0,3
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,45

Podlaha 1.NP - lamino

Podlaha přiléhající k zemině

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Lamino	0,007	0,11	940	1	0,064
Kročejová izolace	0,002	0,028	650	1	0,071
Anhydritový potěr	0,059	1,25	2200	0,9	0,047
Tepelná izolace EPS 100S SVT1592	0,24	0,038	32	1	6,298
Hydroizolace Glastek 40	0,002				
Základová deska	0,2	1,43	1200	1	0,140
Vzduchová mezera	0,1	0,588	1010	1,2	0,170
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,17
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,04

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,14
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{pas,20}$ [W/m^{2}K]	0,22
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	0,3
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,45

Podlaha 2.NP - keramická dlažba

Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Keramická dlažba	0,01	1,01	2000	0,84	0,010
Anhydritový potěr	0,059	1,25	2200	0,9	0,047
Systémová deska Varionova	0,03	0,032	100	1	0,938
Tepelná izolace EPS 100 S	0,05	0,04	32	1	1,250
Stropní panel Goldbeck	0,25	1,43	1200	1	0,175
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,17
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,17

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,37
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	1,05
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,7

Podlaha 2.NP - lamino

Strop mezi prostory s rozdílem teplot do 10 °C včetně

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Lamino	0,007	0,11	940	1	0,064
Kročejová izolace	0,002	0,028	650	1	0,071
Anhydritový potěr	0,059	1,25	2200	0,9	0,047
Systémová deska Varionova	0,03	0,032	100	1	0,938
Tepelná izolace EPS 100 S	0,05	0,04	32	1	1,250
Stropní panel Goldbeck	0,25	1,43	1200	1	0,175
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,17
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,17

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,37
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	1,05
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,7

Střecha šikmá

Střecha šikmá

Konstrukce	d [m]	λ_u [W/mK]	ρ [kg/m^3]	c [kJ/kgK]	R_j [m^{2}K/W]
Palubky	0,02	0,18	1000	1,38	0,111
TopDek SBS pás	0,003	0,22	1050	1	0,014
TopDek 022 PIR SVT580	0,24	0,023	32	1	10,591
Dekten MultiPro	0,0008	0,85	275	1	0,001
Laťování - kontralatě					
Keramická krytina					
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce Rsi [m^{2}K/W]					0,1
Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce Rse [m^{2}K/W]					0,043

Součinitel prostupu tepla konstrukcí U [W/m^{2}K]	0,092
Požadovaný součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{N,20}$ [W/m^{2}K]	0,24
Doporučený součinitel prostupu tepla konstrukcí $U_{rec,20}$ [W/m^{2}K]	0,16

Příloha 2: Nastavení parametrů modelu tepelného čerpadla – *Type264*

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Ref	4	-	More...	✓
2	Accuracy	10	-	More...	✓
3	MaxIter	1000	-	More...	✓
4	UA_cond	1800	W/K	More...	✓
5	UA_evap	1300	W/K	More...	✓
6	UA_sub	200	W/K	More...	✓
7	UA_des	100	W/K	More...	✓
8	cp_cond	4.18	kJ/kg.K	More...	✓
9	cp_evap	4.18	kJ/kg.K	More...	✓
10	cp_sub	4.18	kJ/kg.K	More...	✓
11	cp_des	4.18	kJ/kg.K	More...	✓
12	CompC1	18.27	m^3	More...	✓
13	CompC2	0.02808	-	More...	✓
14	CompC3	0.0008586	-	More...	✓
15	CompC4	-0.000008531	-	More...	✓
16	CompC5	0.02076	-	More...	✓
17	CompD1	0.880806789182079	-	More...	✓
18	CompD2	0.00020628345239054	-	More...	✓
19	CompD3	-0.0000207253287847222	-	More...	✓
20	CompD4	-0.0414020987146138	-	More...	✓
21	CompD5	0.0000269053009403096	-	More...	✓
22	CompD6	0.000083512973706887	-	More...	✓
23	CompD7	0.000204831077332995	-	More...	✓
24	CompD8	-0.0000332529629774604	-	More...	✓
25	Eta_HL	0	-	More...	✓
26	dt_evap	5	K	More...	✓
27	dt_con	0	K	More...	✓
28	dt_suc	0	K	More...	✓
29	TMax	130	C	More...	✓
30	SigmaMax	15	-	More...	✓
31	SigmaMin	1.5	-	More...	✓
32	TcMax	70	C	More...	✓
33	TeMax	30	C	More...	✓
34	TcMin	30	C	More...	✓
35	TeMin	-30	C	More...	✓

Příloha 3: Nastavení parametrů modelu fotovoltaického systému – *Type50b*

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Mode	2	-	More...	✓
2	Collector Area	**39.48**	m^2	More...	✓
3	Collector Fin Efficiency Factor	0.96	-	More...	✓
4	Fluid Thermal Capacitance	**1.01**	kJ/kg.K	More...	✓
5	Collector plate absorptance	**0.95**	-	More...	✓
6	Number of glass covers	**0**	-	More...	✓
7	Collector plate emittance	**0.85**	-	More...	✓
8	Loss coefficient for bottom and edge losses	**20**	**W/m^2.K**	More...	✓
9	Collector slope	45	degrees	More...	✓
10	Transmittance absorbtance product	**0.95**	-	More...	✓
11	Temperature coefficient of PV cell efficiency	**0.0045**	any	More...	✓
12	Temperature for cell reference efficiency	25	C	More...	✓
13	Packing factor	0.8	-	More...	✓

Příloha 4: Nastavení parametrů modelu pohotovostního kombinovaného zásobníku – *Type340*

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
1	storage height	1.77	m	More...	☑
2	storage volume	0.377	m^3	More...	☑
3	spec. heat capacity of the fluid in the storage	4.19	kJ/kg.K	More...	☑
4	density of the fliud in the storage	998	kg/m^3	More...	☑
5	effective thermal conductivity in the storage	2.16	kJ/hr.m.K	More...	☑
6	number of heat exchangers (fixed)	4	-	More...	☑
7	initial temerpature of the whole system	35	C	More...	☑
8	bottom heat loss capacity rate	1.75	kJ/hr.K	More...	☑
9	top heat loss capacity rate	0.76	kJ/hr.K	More...	☑
10	rel. length of 1. zone	1	-	More...	☑
11	For 1. Zone heat loss capacity rate from storage to ambient	8.21	kJ/hr.K	More...	☑
12	rel. length of 2. zone	0	-	More...	☑
13	For 2. Zone heat capacity rate from storage to ambient	0	kJ/hr.K	More...	☑
14	rel. length of 3. zone	0	-	More...	☑
15	For 3. zone heat capacity rate from storage to ambient	0	kJ/hr.K	More...	☑
16	For 4. zone heat capacity rate from storage to ambient	0	kJ/hr.K	More...	☑
17	rel. height of inlet postition from doubleport -1	0.44	-	More...	☑
18	rel. heigth of outlet position from doubleport-1	0.12	-	More...	☑
19	additional parameter for doubleport (not used)-1	0	-	More...	☑
20	stratified charging with doubleport(=1)-1	0	-	More...	☑
21	rel. height of inlet postition from doubleport -2	0.12	-	More...	☑
22	rel. heigth of outlet position from doubleport-2	0.44	-	More...	☑
23	additional parameter for doubleport (not used)-2	0	-	More...	☑
24	stratified charging with doubleport(=1)-2	0	-	More...	☑
25	rel. height of inlet postition from doubleport -3	0.8	-	More...	☑
26	rel. heigth of outlet position from doubleport-3	0.5	-	More...	☑
27	additional parameter for doubleport (not used)-3	0	-	More...	☑
28	stratified charging with doubleport(=1)-3	0	-	More...	☑
Doubleport 4-10 not used					

57		rel. position of temperature sensor-1	**0.67**	-	More...	✓
58		rel. position of temperature sensor-2	**0.42**	-	More...	✓
59		rel. position of temperature sensor-3	0.5	-	More...	✓
60		rel. position of temperature sensor-4	**0.3**	-	More...	✓
61		rel. position of temperature sensor-5	**0.1**	-	More...	✓
62		auxiliary heater mode	**1**	-	More...	✓
63		heater install mode	0	-	More...	✓
64		abs. length of auxiliary heater	**1**	m	More...	✓
65		rel. position where aux. heater is installed	**0.69**	-	More...	✓
66		rel. position fo temperature controller for aux. heater	**0**	-	More...	✓
67		set temperature of the controller for aux. heater	0	C	More...	✓
68		dead band temperature difference of the controller	**0**	deltaC	More...	✓
69		rel. inlet position of the heat exchanger-1	**0.46**	-	More...	✓
70		rel. outlet position of the heat exchanger-1	**0.95**	-	More...	✓
71		volume of heat exchanger-1	**0.021**	m^3	More...	✓
72		spec.heat capacity of the fluid in the heat exchanger-1	**4.19**	kJ/kg.K	More...	✓
73		densitiy of the fluid in the heatexchanger-1	**998**	kg/m^3	More...	✓
74		heat transfere capacity rate from the heat exchange to the store-1	**1.15**	kJ/hr.K	More...	✓
75		1. parameter for the calculation of (UA)*-1	**0.387**	-	More...	✓
76		2. parameter for the calculation of (UA)*-1	0	-	More...	✓
77		3. parameter for the calculation of (UA)*-1	**0.861**	-	More...	✓
78		heat loss capacity rate from the heat exchanger to ambient-1	0	kJ/hr.K	More...	✓
79		stratified charging with first heat exchanger if sch1=1 or sch1=2-1	0	-	More...	✓
80		factor for secondary mass flow rate (only if sch1=2)-1	0	-	More...	✓
81		factor for time dependency of (UA)h1,s-1	0	-	More...	✓
82		rel. inlet position of the heat exchanger-2	-1	-	More...	✓
Exchangers 2-4 not used						
121		accuracy for calculating the temperatures	0.001	deltaC	More...	✓
122		accuracy for temperature dependency of (UA)* (%)	1	-	More...	✓
123		precision fo the mixing process in the store	**1000**	-	More...	✓
124		flag, if the temperature-dependence timestep control is used (1=yes)	0	-	More...	✓
125		number of nodes for the storage	**1**	**% (base 100)**	More...	✓
126		emulation of former versions	**-7**	-	More...	✓