



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

SPOLUPRÁCE PLYNOVÉHO KOTLE A TEPELNÉHO ČERPADLA V TOPNÉM SYSTÉMU

COOPERATION OF GAS BOILER AND HEAT PUMP IN THE HEATING SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Šimon Kunert

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Šimon Kunert
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Spolupráce plynového kotle a tepelného čerpadla v topném systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kotel na zemní plyn a tepelné čerpadlo představují dvě často využívané technologie zásobování teplem energií rodinných domů. Principiálně jsou tyto technologie zcela odlišné, což nabízí prostor pro využití jejich silných stránek pro vzájemnou spolupráci. V rámci práce budou uvedené technologie řešeršním způsobem blíže představeny a na vybraném objektu bude hodnocen přínos jejich spolupráce v klimatických podmínkách ČR. Konkrétně bude posuzována energetická efektivita zásobování teplem (hledání minima energie potřebné pro vytápění), dále bude hodnocen ekonomický přínos spolupráce TČ a kondenzačního kotle. Pro uvedená hodnocení bude sestaven podrobný bilanční model uvažovaného systému a návazný ekonomický model pro komplexní hodnocení.

Cíle diplomové práce:

1. Stručně představit technologie kotlů na zemní plyn a tepelných čerpadel.
2. Vytvořit bilanční model pro hodnocení spolupráce tepelného čerpadla a kotle na ZP z pohledu spotřeby energie, produkce CO₂ a nákladů provozu.
3. Zpracovat parametrickou studii zaměřenou na ocenění vlivu dílčích vstupních parametrů na efektivnost spolupráce TČ a kotle na ZP.
4. Pro zadaný objekt realizovat návrh optimálního řešení pro spolupráci kotle na ZP a TČ včetně detailního technicko–ekonomického zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. Tepelná čerpadla. Praha: EkoWATT, 2009, 71 s. : il., mapy. ISBN 978-80-87333-02-0.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje spolupráci plynového kotle a tepelného čerpadla v topném systému. Obsahuje stručný popis obou zařízení a hybridní varianty. Cílem práce je vytvoření bilančního modelu, který pomáhá primárně sledovat uvolněné emise CO₂ a provozní náklady. Následná parametrická studie hledá optimální nastavení spolupráce pro oba sledované parametry. Výsledky jsou porovnávány s vytápěním plynovým kotlem, nebo tepelným čerpadlem vzduch/voda. Poslední část se věnuje nalezení optimálního nastavení pro konkrétní objekt.

Klíčová slova

Tepelné čerpadlo, plynový kotel, hybridní vytápění, bilanční model

Abstract

This master's thesis deals with the cooperation of gas boiler and heat pump in heating system. It contains a brief description of both device and hybrid variant. The aim of this thesis is to create a balance model that helps primary monitor the released CO₂ emission and operating costs. The subsequent parametric study seeks the optimal setting of cooperation for both monitored parameters. The results are compared with gas boiler heating or heat pump air to water. The last part is developed to find the optimal setting for a particular object.

Key words

Heat pump, gas boiler, hybrid heating system, balance model

Bibliografická citace

KUNERT, Šimon. Spolupráce plynového kotle a tepelného čerpadla v topném systému [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140387>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Spolupráce plynového kotle a tepelného čerpadla v topném systému** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu práce.

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D., za odbornou pomoc a cenné rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Také děkuji své rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia podporovali.

Obsah

Úvod	10
1. Základní možnosti vytápění	11
1.1. Elektrické vytápění	11
1.2. Vytápění plynem	11
1.3. Vytápění pevnými palivy	11
2. Plynový kotel	11
2.1. Podle způsobu umístění a upevnění kotle	12
2.1.1. Stacionární kotle	12
2.1.2. Závěsné kotle	12
2.2. Podle odvodu spalin	12
2.2.1. Atmosférické kotle	12
2.2.2. Turbo kotle s nuceným odvodem spalin	12
2.3. Konvekční a kondenzační kotle	12
2.3.1. Konvekční kotel	12
2.3.2. Kondenzační kotel	12
3. Tepelné čerpadlo	14
3.1. Topný faktor	14
3.2. Tepelné čerpadlo sorpční	14
3.2.1. Absorpční tepelné čerpadlo	14
3.2.2. Adsorpční tepelné čerpadlo	15
3.3. Tepelná čerpadla s kompresorem	15
3.3.1. Popis oběhu	15
3.3.2. Tepelné čerpadlo vzduch/voda	16
3.3.3. Tepelné čerpadlo země/voda	17
3.3.4. Tepelné čerpadlo voda/voda	18
3.3.5. Plynové tepelné čerpadlo	18
4. Hybridní vytápění	19
5. Bilanční model	21
5.1. Klimatické údaje	21
5.1.1. Křivka trvání venkovních teplot	21
5.1.2. Teplotní interval pro letní období	22
5.2. Potřeba tepla	22
5.2.1. Potřeba tepla na vytápění	22
5.2.2. Potřeba tepla na přípravu teplé vody	24
5.3. Plynový kotel	25
5.3.1. Účinnost plynového kondenzačního kotle	25
5.3.2. Vytápění pomocí plynového kotle	26
5.3.3. Ohřev TUV pomocí plynového kotle	27
5.3.4. Celkové shrnutí pro plynový kotel	27

5.4.	Tepelné čerpadlo.....	28
5.4.1.	Výkon a COP tepelného čerpadla	28
5.4.2.	Ohřev TUV pomocí tepelného čerpadla.....	29
5.4.3.	Vytápění pomocí tepelného čerpadla	30
5.4.4.	Celkové shrnutí pro tepelné čerpadlo	31
5.5.	Hybridní vytápění – Tepelné čerpadlo a plynový kotel	32
5.5.1.	Ohřev TUV pomocí hybridního modelu	32
5.5.2.	Vytápění pomocí hybridního modelu.....	33
5.5.3.	Celkové shrnutí pro hybridní model.....	33
6.	Parametrická studie	34
6.1.	Základní vstupní údaje pro bilanční model	34
6.2.	Výsledné hodnoty při změně parametru COP_{mez}	35
6.2.1.	Porovnání tvorby emisí tepelného čerpadla a plynového kotle.....	37
6.2.2.	Porovnání nákladů na provoz tepelného čerpadla a plynového kotle	38
6.3.	Výsledné hodnoty při změně parametru t_{mez}	39
6.4.	Výsledné hodnoty při změně teploty přírodní otopné vody.....	42
6.5.	Vyhodnocení pro další varianty bilančního modelu.....	44
6.6.	Možné ekonomické varianty při změně ceny elektřiny a plynu	44
6.7.	Výsledné hodnoty při změně COP	46
6.8.	Výsledné hodnoty při změně tepelné ztráty objektu	47
6.9.	Náklady za provoz při změně ceny paliva a novém COP_{mez}	49
7.	Realizace pro konkrétní objekt.....	50
7.1.	Potřeba tepla pro vytápění	51
7.2.	Potřeba tepla pro přípravu teplé vody.....	51
7.3.	Výpočet bilančního modelu.....	52
7.4.	Výsledky z bilančního modelu	53
7.5.	Vyhodnocení výsledků	54
7.6.	Shrnutí	58
	Závěr.....	59
	Seznam použitých zdrojů	61
	Seznam použitých značek a zkratk	64
	Seznam obrázků	67
	Seznam tabulek	68

Úvod

V dnešní době je čím dál tím větší tlak na to, aby vytápění bylo nejenom ekonomické, což platilo vždy, ale také ekologické. Ideální vytápění by tedy mělo splňovat dvě protichůdná hlediska. To nejlevnější vytápění totiž často patří mezi to nejméně ekologické, většinou se bavíme o vytápění pomocí tuhých paliv. Pokud se mluví o ekologickém řešení, často se zmiňují tepelná čerpadla, ta jsou však většinou drahá, když se má plně využít jejich potenciál, pak vychází nejlépe z těch nejběžnějších typů země/voda, ten je však ještě dražší a nedá se vždy využít. V posledních pár letech se začalo mluvit o další variantě, jak si co nejlépe zajistit vytápění, a to pomocí hybridního způsobu, kdy místo jednoho zdroje tepla jsou zdroje dva, které se navzájem doplňují co nejlepším způsobem. Právě jedním z možných řešení této kombinace je varianta plynového kotle a tepelného čerpadla. Představa je taková, že v létě a během teplejší části topné sezóny se bude o vytápění starat čerpadlo typu vzduch/voda, které se dobře instaluje a stojí méně než varianta země/voda. Pokud přijdou studené dny, kdy teplota padá hluboko pod nulu a čerpadlo ztrácí svůj výkon a svoji ekonomiku provozu, tak se o topení postará plynový kotel, kterému zima tolik nevádí a stojí při těchto podmínkách na provozu méně než právě tepelné čerpadlo. Celkový efekt by měl být takový, že oproti samotnému plynovému kotli výrazně poklesne spotřeba zemního plynu, zároveň však nedochází k razantnímu zvýšení spotřeby elektrické energie během zimy z důvodů větší potřeby tepla a horšího topného faktoru čerpadla. Na trhu se navíc začaly objevovat první výrobci, co nabízejí právě tuto variantu pro domácnosti.

Tato práce si dává za úkol prověřit, zda jsou tyto předpoklady správné, zda skutečně mohou přinést úsporu peněz, případně i emisí CO₂ a pokud ano, tak jak velké tyto úspory jsou, zda se výrazně větší počáteční investice může někdy v budoucnu vyplatit.

1. Základní možnosti vytápění

V současné době lze vybírat z velkého množství způsobů, jak zajistit vytápění budov a zařízení. Samozřejmě platí, že ne všechny způsoby mohou být vždy dostupné, často se bere v potaz hledisko ekonomické, technické a v nejbližší době bude pravděpodobně nutné zahrnout i hledisko ekologické, případně další faktory. V této části jsou stručně popsány základní možnosti vytápění, které se dnes využívají a jejich rozdělení [1].

1.1. Elektrické vytápění

Výhodou elektrického vytápění je jeho velká dostupnost, dá se použít prakticky vždy a nebývá tak prostorově náročné, jako jiné alternativy. Za velký klad můžeme považovat i čistý provoz, absenci vzniku popela, nutnost řešit palivové hospodářství, případně zajišťovat přívod spalovacího vzduchu. Tento typ zařízení navíc nevyžaduje prakticky žádný pravidelný servis. Elektrické vytápění můžeme dále dělit na následující skupiny [1]:

- Přímotopné (sálavé panely, elektrické konvektory, stropní a podlahové vytápění)
- Teplovodní (elektrický kotel, tepelné čerpadlo)
- Teplovzdušné (větrací jednotka s topným registrem, klimatizační jednotka s funkcí vytápění)

1.2. Vytápění plynem

Dalším velmi běžným způsobem vytápění je využití plynu. Většinou jako palivo slouží zemní plyn, který je rozváděn pomocí plynových přípojek, lze však i využít možnost zásobníků na zkapalněný plyn [1] (zemní plyn, propan, butan) [2]. Je zde také nutnost zavést přívod spalovacího vzduchu a odvodu spalin. Oproti zařízením na elektřinu vyžadují plynové kotle každoroční kontrolu [1]. Pozitivní vlastností je velmi vysoká účinnost až 98 % (bráno ke spalnému teplu), absence prachu a sazí ve spalinách. Při spalování zemního plynu nedochází ani ke vzniku žádných dioxinů a furanů, které se mohou objevovat například při vytápění biomasou [2].

1.3. Vytápění pevnými palivy

Poslední variantou, která se používá, je vytápění pomocí tuhých paliv, kam řadíme dřevo, dřevní pelety a uhlí. Poslední z jmenovaných je však z ekologických důvodů na ústupu a postupně nahrazován právě palivy rostlinného původu. Velkým kladem těchto paliv je jejich nízká cena, obzvláště u dřeva, kdy se jedná o jeden z nejlevnějších způsobů vytápění vůbec. Mezi zápory musí být zařazen nejnáročnější provoz z hlediska údržby, kdy teplosměnné plochy jsou zanášeny nánosy a vyžadují pravidelné čištění. Dále to je odvod spalin komínem, který si vyžaduje třikrát za rok zkontrolovat. Mezi poslední nevýhody patří palivové hospodářství, které je však už u dnešních moderních kotlů na pelety dobře vyřešeno pomocí automatických podavačů a náročností se blíží kotlům na plyn [1].

Vzhledem k tématu diplomové práce není nutné rozebírat všechny typy vytápění do detailu, a proto se následující část zaměří pouze na plynový kotel a tepelné čerpadlo, kterým bude věnován následující prostor.

2. Plynový kotel

Vytápění pomocí plynových kotlů je v České republice hojně rozšířené. Podle dat od Ministerstva průmyslu a obchodu v České republice z roku 2018 tuto variantu volilo 23 % domácností. Samotné plynové kotle se dají dělit podle různých kritérií v závislosti na výkonu, konstrukci a dalších vlastnostech. Zde je uvedeno několik možných kategorií rozdělení [3]:

2.1. Podle způsobu umístění a upevnění kotle

2.1.1. Stacionární kotle

Stacionární kotle slouží jako náhrada za staré nevyhovující zařízení na tuhá paliva. Výkonově se řadí mezi větší a objemnější zařízení, které můžeme nalézt například v kotelnách. Jejich součástí často bývá i integrovaný zásobník na vodu [3]. Většinou jsou umístěny na zemi, nebo soklu [4].

2.1.2. Závěsné kotle

Tento typ kotle je menší a lehčí, své využití nachází především v domácnostech. Připevňuje se obvykle na stěnu v obydlí [3].

2.2. Podle odvodu spalin

2.2.1. Atmosférické kotle

Přívod vzduchu se zajišťuje přímo z místnosti a odvod spalin komínem přirozenou cestou. Tento typ kotlů je nejběžnější [3].

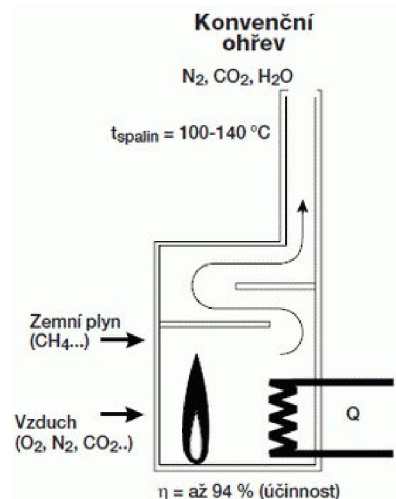
2.2.2. Turbo kotle s nuceným odvodem spalin

V tomto provedení je přívod vzduchu a odvod spalin nucený z exteriéru bez závislosti na vnitřním prostředí. Proudění zajišťuje integrovaný ventilátor přímo v kotli [3].

2.3. Konvekční a kondenzační kotle

2.3.1. Konvekční kotel

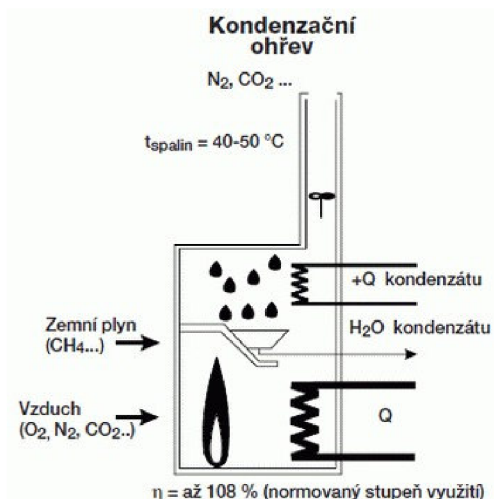
Jedná se o klasický plynový kotel, v kterém dochází k běžnému spalování za účelem výroby tepla předávaného teplonosné látce. V domácnostech se používají pro vytápění a ohřev teplé vody [3]. V současné době jsou vytlačovány kondenzačními kotli [5].



Obr. 2.1: Princip fungování konvekčního kotle [3].

2.3.2. Kondenzační kotel

Hlavní výhodou oproti konvekčním kotlům je využití tepla vzniklého nejenom spalováním, ale i kondenzací vodní páry, která by se jinak odváděla společně se spalinami. Podmínkou pro využití této energie je nutnost dostat se v kotli pod teplotu rosného bodu. Toho je docíleno speciální konstrukcí výměníku. Teoreticky mohou kondenzační kotle získat o 11 % více energie než kotle klasické [3]. Vzhledem k tomu, že dříve byla účinnost kotle počítána z výhřevnosti paliva, kde se nepočítalo s kondenzací, tak často vychází nad 100 %. Pokud bychom využili pro výpočet spalné teplo, účinnost by klesla pod 100 %. Tento typ kotle bývá dražší než konvekční [3], nicméně dnes nahrazují kotle klasické [5].



Obr. 2.2: Princip fungování kondenzačního kotle [3].

Zde jsou uvedeny dodávky a typy plynových kotlů dovezených do České republiky mezi roky 2017 až 2019 na základě šetření pro MPO [5].

Tab. 2.1: Dodávky plynových kotlů [5].

	2017	2018	2019
Konvenční pro vytápění závěsný	1 087	790	347
Konvenční pro vytápění stacionární	0	1	0
Konvenční kombinovaný závěsný	4 242	2 104	894
Konvenční kombinovaný stacionární	1 449	1 015	1 045
Kondenzační pro vytápění závěsný	41 457	43 886	48 103
Kondenzační pro vytápění stacionární	790	832	990
Kondenzační kombinovaný závěsný	27 323	31 600	32 443
Kondenzační kombinovaný stacionární	218	191	203
Ostatní	12	9	12
Celkem	76 578	80 428	84 037

Z výše uvedené tabulky je vidět, že v současné době s velkým rozdílem převažují kotle kondenzační nad kotli konvenčními, jejichž prodeje neustále klesají. Konkrétně v roce 2019 bylo dodáno 81 739 kondenzačních kotlů (97 %) a 2 286 konvenčních kotlů (3 %) [5].

3. Tepelné čerpadlo

Tento typ zařízení funguje na principu odebírání tepla z primární strany teplotonosné látky o nižší teplotě, nejčastěji to bývá vzduch, země, voda, a předávání ho sekundární straně druhé teplotonosné látky, obvykle vodě, s vyšší teplotou. Pro získání této energie musíme část dodat sami nejběžněji v podobě pohonu kompresoru, nebo tepelné energie pro procesy využívající sorpční materiály. Při tomto ději dochází k ochlazení látky na primární a ohřívání látky na sekundární straně. Některá dnešní tepelná čerpadla umožňují i chlazení, v tom případě jde energie opačným směrem. Jedná se o stejný děj, který využívají ledničky [6].

3.1. Topný faktor

Dříve než budou popsány jednotlivé typy je dobré si něco říct o výpočtu efektivnosti, konkrétně o topném faktoru. U většiny pracovních strojů se pro určení efektivnosti používá účinnost, což je poměr energie získané a přivedené. Protože každý stroj má ztráty, její hodnota je vždy menší jak 1 (respektive 100 %). V případě tepelných čerpadel se ale používá topný faktor ϵ_T využívající též zkratku COP (*Coefficient of Performance*). Ten udává poměr množství tepla získaného a vstupní energie (obvykle pro pohon kompresoru). Energie získaná z okolí se do výpočtu nezapočítává, proto topný faktor vychází vyšší jak 1. Pokud by se počítala účinnost tepelného čerpadla a zahrnuly se všechny energie do výpočtu, včetně tepla z okolí, tak účinnost by samozřejmě vyšla pod 100 % [7].

$$COP = \frac{Q}{E} [-] \quad (3.1)$$

Topný faktor tepelného čerpadla často nebývá konstantní hodnotou, ale mění se v závislosti na okolních podmínkách, především změnou teplotních hladin. Teplota média, z kterého odebíráme teplo (voda, vzduch), se může během roku měnit, stejně tak teplota na výstupu. Proto se nedá porovnávat topný faktor u dvou rozdílných čerpadel, pokud nevíme, za jakých podmínek bylo měření provedeno a nedá se obecně říct, že tepelné čerpadlo s vyšším topným faktorem je lepší než čerpadlo s nižším faktorem. V dnešní době existují normy, které se pro výpočet mohou použít, aby srovnání bylo možné a mělo vypovídající hodnotu. Často pak sami výrobci přidávají grafy se závislostí na potřebném výkonu a okolní teplotě [7].

Lze se také setkat s pojmem skutečný topný faktor, někdy taky sezónní topný faktor, jenž započítává nejen energii pro pohon kompresoru, ale i spotřebu oběhového čerpadla, ventilátoru a dalších částí spotřebovávající elektřinu [7].

3.2. Tepelné čerpadlo sorpční

Tento typ čerpadel je mechanicky jednodušší oproti čerpadlům s kompresorem, celkově jsou tyto skupiny konstrukčně odlišné. Využívá se zde principu sorpce, mezimolekulárních vazeb absorbentu, nebo adsorbentu k pracovní látce. Síla, která nám pohání tento děj, je v podobě tepelné energie. Výsledný proces je cyklický, kdy při nízké teplotě pracovní látka navazuje na absorbent, nebo adsorbent a opět se uvolní při teplotě vyšší. Tuto skupinu lze dělit na tepelná čerpadla absorpční a adsorbční. Princip fungování je však v obou případech podobný [6].

3.2.1. Absorpční tepelné čerpadlo

Čerpadlo používá jako chladivo (pracovní látku) nejčastěji bromid lithný, nebo čpavek, což jsou sloučeniny rozpustné ve vodě. Pracovní látka, která odebírá teplo prvním tepelnému výměníku na jedné straně, kdy na druhé straně ochlazuje vodu, případně vzduch, je pohlcena vodou v absorbéru. Tato směs proudí do místa ohřívачe, kde dojde k příjmu tepelné energie, kdy při vyšším tlaku dochází k uvolnění pracovní látky a ta předá teplo v druhém tepelném výměníku nejčastěji topné vodě, nebo vzduchu, přitom často dochází k její kondenzaci. Látka

následně proudí zpět do absorbéru. Jedná se o plynulý, cyklický děj [6]. Tento typ čerpadel vyrábí například společnost Broad, která se zaměřuje na výkonnější zařízení o výkonech ve stovkách kilowat, kdy COP faktor při vytápění dosahuje až hodnot 1,8, při kombinované účinnosti při topení a chlazení má COP faktor hodnotu 2,3 a vyšší [8].



Obr. 3.1: Absorpční tepelné čerpadlo od firmy Broad [8].

3.2.2. Adsorpční tepelné čerpadlo

I když oba typy těchto tepelných čerpadel fungují podobně, přesto zde nalezneme pár důležitých změn. V prvním případě u absorpčních oběhů dochází k odnímání tepla při rozpouštění chladiva v absorbéru, tak v druhém případě u adsorpčního oběhu teplo přechází při přilnutí pracovní látky na povrch adsorbentu. Tou bývá nejčastěji zeolit. Jde o přírodní látku s porézní strukturou, což se projevuje na velkém povrchu. Prostorové uspořádání atomů vytváří dutiny a kanálky, kde se zachytává pracovní látka, nejběžněji voda. Po přidání tepla se voda opět uvolní [6].

Sorpční čerpadla dosahují nižšího podílu mezi celkově vyprodukovanou tepelnou energií a vloženou energií než kompresorová čerpadla. Tento podíl ale není úplně srovnatelný, protože lze využívat odpadní teplo a sluneční energii. Tento typ zařízení nachází využití nejen v podobě vytápění, nebo chlazení domácností, ale i v některých domácích ledničkách na plyn [6].

3.3. Tepelná čerpadla s kompresorem

Zařízení využívá principu cyklické změny skupenství chladiva (pracovní látky), kondenzaci páry na kapalinu v kondenzátoru a následné odpaření ve výparníku. Oběh můžeme rozdělit na vysokotlakou a nízkotlakou část, celkově se čerpadlo skládá se ze čtyř základních částí, kompresoru, kondenzátoru, expanzního ventilu a výparníku [6].

3.3.1. Popis oběhu

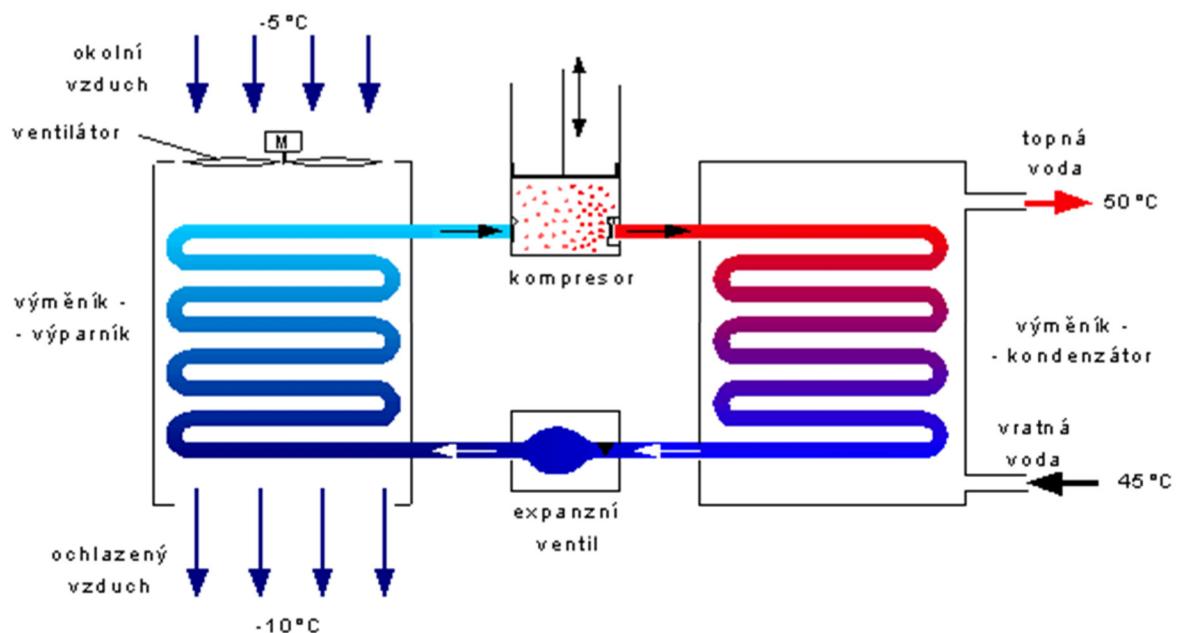
Popis oběhu se dá začít z více míst. V tomto případě je začátek popisu u kompresoru. Tam začíná vysokotlaká část [6]. Zde dochází k stlačování par chladiva na tlak odpovídající kondenzační teplotě. Přitom je zvýšen nejenom tlak, ale i teplota chladiva. Zároveň kompresor je část, které dodáváme elektrickou energii [9]. Ta se používá při výpočtu COP faktoru [10]. Kompresory, které se používají, jsou typu scroll, twin rotary, nebo pístové. V případě malých

a středních výkonů je pohon a kompresor spojen do jedné části, aby byl hermeticky uzavřen a nemohlo tak dojít k úniku chladiva z okruhu [9].

Chladivo následně proudí do výměníku, kondenzátoru, kde teplé páry kondenzují a ochlazují se, přitom se předává teplo topné vodě, případně vzduchu. Výměníky bývají letované deskové, nebo trubkové [9].

Následuje část s expanzním ventilem, která odděluje vysokotlakou a nízkotlakou část, která zde začíná. Jeho úkolem je regulace průtoku do výparníku, zároveň zaručuje, že chladivo jde do kompresoru už vypařené [9].

Poslední z hlavních částí je výparník, kde přechází teplo z nízko potenčního zdroje na chladivo. Vzhledem k nízkému tlaku dochází k odpařování i při nízkých teplotách, tak lze využít energie ve zdroji, jehož teplota je nízká, za běžných podmínek nepoužitelná k ohřevu. Jaký typ výparníku je použit souvisí na typu výběru čerpadla [9].



Obr. 3.2: Schéma oběhu tepelného čerpadla [10].

3.3.2. Tepelné čerpadlo vzduch/voda

V posledních letech se jedná dominantní typ tepelných čerpadel, které se u nás dodávají. Podle statistického zjišťování z roku 2019 provedené MPO tvoří podílem na trhu přes 90 % [11]. Mezi jejich hlavní klady patří absence vrtů, nebo pozemních kolektorů, díky čemuž mají nižší pořizovací náklady a jednodušší instalaci. Teplo pro vytápění se bere od venkovního vzduchu, který je ventilátorem vháněn přes výměník. Průtok vzduchu je v řádově v tisících m³/h. Obvykle se tento tepelný výměník nachází ve venkovním prostředí, ale v případě potřeby ho lze umístit i do budovy, když je ale nutné zajistit přívod a odvod vzduchu do místnosti. Mezi největší nevýhody tepelného čerpadla patří nestálá energie ve vzduchu, ta je totiž přímo úměrná teplotě a závisí i na vlhkosti. Vlhčí vzduch obsahuje více energie než suchý. V praxi to znamená, že v zimním období výkon čerpadla, tím pádem i tepelný faktor, klesá. Z těchto

důvodů je často nutné doplnit tepelné čerpadlo o další zdroj vytápění, nejčastěji se jedná o elektrokotel [7].



Obr. 3.3: Tepelné čerpadlo vzduch/voda od firmy PZP HEATING [16].

3.3.3. Tepelné čerpadlo země/voda

Druhým nejběžnějším typem tepelného čerpadla je typ země/voda [11]. Ten se dá ještě rozdělit na tepelná čerpadla využívající teplo podloží (zemní vrt), nebo půdní vrstvy (zemní kolektor). V prvním případě dochází k využití tepla ze zemského jádra, kde neustále probíhá nukleární rozklad prvků. Vzniklé teplo potom proniká na zemský povrch. Čím hlouběji se dostaneme, tím vyšší teplota se tam obvykle nachází. Obecně se dá říct, že teplota se zvedá o 1 °C každých 30 metrů, kdy v hloubce 100 metrů je teplota okolí 10 °C. Průměrný tepelný tok dosahuje hodnoty 60 mW/m², ale jsou známy i vrty s 90 mW/m². Tato vlastnost je závislá na typu podloží. Samotný vrt dosahuje hloubky od 50 do 150 metrů a průměru od 130 do 220 mm. Pokud nám to situace dovoluje, tak je lepší volit jeden hlubší vrt než dva kratší. Do něj se pak zasouvá polyethylenová hadice kolektoru, v které proudí nemrznoucí směs. Vrt se poté utěsní cementovou, nebo jílocementovou směsí, aby nedošlo k narušení hydrogeologických poměrů. Například neutěsněným vrtem by mohlo dojít k průniku znečištěné povrchové vody do podzemní, případně propojení oblastí o různých hloubkách. Velkou výhodou je stálý topný faktor o hodnotě cca 4,5. Ten je navíc během celého roku konstantní. Jediné riziko hrozí, že zemní vrt je nedostatečný a v případě jeho přetěžování může dojít k jeho zamrznutí [7].

Druhou variantou je využití půdního kolektoru, kdy polyethylenová trubka s nemrznoucí směsí není vedena do vrtu, ale je rozložena do hadovitého výkopu o hloubce 1.5 až 2 metry, aby nedošlo k promrznutí. Trubky by měly být pokládány v ideálním případě 1 metr od sebe, nejméně 0,6 metru. Alternativou k trubce jsou kolektory typu slinky. Jedná se o smyčky potrubí, které vzniknou roztažením kola hadice. V tomto případě je nutný širší výkop šířky 0,9 metru a délce 15 až 20 metrů. Samotné kolo má délku přibližně 200 metrů. Výhodou oproti vrtům je nižší cena, nevýhodou už částečné kolísání topného faktoru během roku. Navíc se na pozemku, kde je umístěn kolektor nedá stavět, neměly by se tam vysazovat stromy, aby jejich kořeny nepoškodily systém, neměl by se tam dávat bazén, či skleník [7].

V obou případech lze tepelné čerpadlo použít nejenom na vytápění, ale i chlazení domu, čímž dochází k rekuperaci tepla zpět do půdy. Správný vrt nebo kolektor by měl být naddimenzovaný tak, aby fungoval i bez této rekuperace a regeneroval přirozeně během léta [7].



Obr.3.4: Kolektor typu slinky [32].

3.3.4. Tepelné čerpadlo voda/voda

Posledním ze základních typů tepelných čerpadel, které využíváme, jsou varianty využívající zdroj energie v podobě podzemní vody. V tomto případě je nutné vybudovat dvě studny, zdrojovou studnu po čerpání potřebné vody a vsakovací studnu, kam ochlazenou vodu vracíme. Mezi největší klady tohoto řešení patří nejvyšší průměrný roční faktor při nejnižších nákladech. To způsobuje využití podzemní vody, jejíž teplota se stále pohybuje mezi 8 až 10 °C. Tepelné čerpadlo musí být ochráněno v případě výpadku vody, aby nedošlo k jeho poškození, zejména hrozí zamrznutí výměníku. Velkým záporem je fakt, že toto tepelné čerpadlo se dá použít pouze ve vhodných lokalitách, kde se nachází dostatečně silný zdroj vody, zároveň podlaží ji musí stíhat vsakovat. Dále je nutné zjistit, zda voda není příliš mineralizovaná, aby se čerpadlo rychle nezanášelo. Pokud oblast všechny technické předpoklady splňuje, je nutné získat povolení od vodoprávního úřadu. Navíc v některých chráněných oblastech z důvodů legislativy není možné tento typ čerpadla vůbec provozovat [7].

Do této kategorie by šlo zařadit tepelné čerpadlo využívající vodu povrchovou. Zde však vyvstává několik problémů. Teplota takové vody bývá v zimě nízká, navíc může být znečištěná, zdroj musí být dostatečně silný, aby nezamrzal. Jako ideální místo se jeví například náhony pro malé vodní elektrárny. Všechny tyto uvedené problémy způsobují, že tento typ čerpadel je obzvláště v našich podmínkách velice vzácný [7].

3.3.5. Plynové tepelné čerpadlo

Jedná se o typ zařízení, který se objevil v posledních letech, má základní konstrukci podobnou jako klasické tepelné čerpadlo, ale místo elektromotoru pro pohyb kompresoru využívá spalovací motor na plyn [12]. Tento typ čerpadla můžeme nalézt pod zkratkami GEHP [13], nebo jenom GHP, což v obou případech vychází z anglického názvu *gas-engine heat pump* [12]. Výhodou je, že oproti klasickému čerpadlu se nevyužívá jenom teplo z okolí, ze vzduchu, ale také odpadní teplo ze spalovacího motoru, přitom zůstávají zachovány kladné vlastnosti běžného tepelného čerpadla, to znamená žádné výraznější konstrukční úpravy, tichý a nenáročný provoz, možnost použití jak pro vytápění, tak chlazení. Navíc odpadá problém se silnější elektrickou přípojkou, protože zařízení má téměř nulovou spotřebu elektřiny. Využití mohou nalézt spíše u větších objektů a průmyslu, jako jsou haly, školy, nemocnice, bytové

domy a další [12]. Při experimentech s tímto typem čerpadla bylo dosahováno COP faktoru od 3 do 5 v závislosti na otáčkách spalovacího motoru, potažmo kompresoru, a teploty okolního vzduchu [13]. Výrobce těchto čerpadel je například společnost Yanmar [14], nebo ESM-YZAMER [15]. Mezi české výrobce se pak řadí společnost TEDOM, která se zaměřuje hlavně na kogenerační jednotky a tepelné čerpadlo nabízí pro zvýšení tepelné a celkové účinnosti zařízení. Jako zdroj energie slouží odpadní teplo z chladicího okruhu, které by se jinak muselo mařit ve venkovním chladiči [17].



Obr. 3.5: Plynové tepelné čerpadlo od firmy Yanmar [14].

Zde je nutné říct, že ne všechna tepelná čerpadla, co existují, byla uvedena v této práci. V praxi se můžeme setkat s variantami vzduch/vzduch, nemrznoucí kapalina/voda, voda/vzduch a s dalšími variantami, které nachází uplatnění například ve výrobních procesech [7]. Pro základní přehled je však výše uvedené rozdělení více než dostatečné.

4. Hybridní vytápění

Kromě možnosti vytápění jenom pomocí jedné varianty se v posledních letech objevují zprávy o možnosti využití dvou, nebo dokonce tří zdrojů tepla, která by se využívala v optimálních podmínkách pro jejich provoz, což by mělo mít hlavně pozitivní vliv na ekonomiku provozu a také na emise [18]. Nejběžnější variantou nabízenou na trhu je kombinace tepelného čerpadla vzduch/voda a plynového kotle. Mezi hlavní benefity této varianty se řadí absence předělávání rozvodů topení po domě z důvodů nižší výstupní teploty u zdroje tepla. [19]. Hlavně tepelné čerpadlo vzduch/voda by při nízkých venkovních teplotách mělo velké problémy udržet vyšší teplotu vody v systému, jakou dodávají například kotle na tuhá paliva, muselo by docházet k dohřevu pomocí elektrokotlů. Tato varianta však není moc efektivní, pokud zahrneme i výrobu elektřiny v elektrárně, není ani moc ekonomická. Druhou možností by bylo předělání rozvodu vytápění například na podlahové topení, kdy není potřeba tak velký teplotní spád z důvodu mnohem větší velikosti výhřevné plochy, což ale opět není zrovna levné a jednoduché řešení. Právě hybridní vytápění by mělo přinášet ekonomičtější a ekologičtější provoz bez nutnosti velkých zásahů [18].

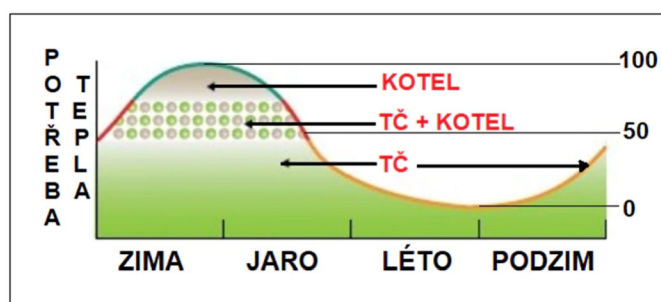
V dnešní době nalezneme přinejmenším tři společnosti – Viessmann [18], Atlantic [19] a Bosch [20], které nabízejí různé podoby hybridního systému vytápění. Za zmínku pak stojí společnost Viessmann, která tvrdí, že její systém dokáže ohřívat vodu až na 70 °C [21]. Samozřejmě pak vyvstává otázka, jaká je účinnost takového systému, protože při takto vysokých teplotách už nedochází ke kondenzaci v plynovém kotli, protože teplota rosného

bodů u klasických zařízení je 57 °C [22]. Spíše se tato informace musí brát jako zajímavost, protože standardně výrobce uvažují o teplotě 55 °C na výstupu jako u konkurence [23].



Obr. 4.1: Sestava tepelné čerpadlo a kondenzačního kotle od firmy Viessmann [21].

Zákazníci si mohou volit mezi několika variantami podle toho, která jim bude nejvíce vyhovovat. Jak už bylo zmíněno v prvním odstavci, tak nejběžnějším typem je využití tepelného čerpadla vzduch/voda a plynového kotle, které je i programováno v bilančním modelu. Představa využití je taková, že tepelné čerpadlo bude zajišťovat potřebu vytápění během většiny roku, kdy má velký topný faktor a vypouští mnohem menší emise oproti kotlům na fosilní paliva, zároveň je levné na provoz. Při poklesu teplot, kdy roste potřeba tepla na vytápění a klesá COP faktor, by docházelo k zapojení plynového kotle, který by dokázal dostat teplotu výstupní vody na požadovanou hodnotu. Při velmi nízkých teplotách, kdy tepelné čerpadlo výrazně ztrácí na výkonu, by došlo k jeho odstavení z důvodů neefektivního provozu a celé vytápění by přešlo na plynový kotel [18]. V celkovém hodnocení se předpokládá, že tepelné čerpadlo se bude podílet na vytápění z 60 až 80 % v závislosti na výrobci [19,20].



Obr. 4.2: Možnosti hybridního vytápění v různých ročních obdobích [18].

Určitou komplikací může být, že podobná kombinace vyžaduje přípojku zemního plynu, která není vždy k dispozici, avšak existují minimálně tři alternativy, jak se s tímto problémem vypořádat. Tou nejjednodušší variantou je připojit kotel na externí zdroj paliva v podobě tlakových nádob, jež jsou naplněny propanem, nebo propan-butanem. Firma Atlantic pak propaguje svoji kombinaci tepelného čerpadla a kotle na lehký topný olej. Zásobník by měl být dostatečně objemný na to, aby dokázal pojmout dostatek paliva na celou topnou sezónu a doplňoval by se pouze jednou, nebo dvakrát za rok [19]. Další z možností je automatický kotel na pelety [19], nebo klasický kotel na dřevo [18].

Tepelné čerpadlo se ovšem nemusí kombinovat pouze s kotlem, ale i se solárními kolektory, kdy se vůbec nepoužívá zařízení na fosilní paliva. Při této volbě se většinou instaluje i akumulační nádrž pro ukládání tepla ze slunce pro využití v pozdější době. Avšak možných kombinací je celá řada, včetně absence tepelného čerpadla a využití kotle a kolektorů, případně zapojení solárních panelů [18].

Rozhodně nejkomplicovanější je trivalentní systém, kdy jsou používány rovnou tři zdroje tepla. V tomto případě se nabízejí různé kombinace složené z plynového kotle, kotle na tuhá paliva, tepelného čerpadla, solárního kolektoru a fotovoltaických panelů. Varianta se čtyřmi zdroji tepla se nepoužívá z důvodů ekonomických, kdy její pořízení by bylo vysoce nákladné a případné ušetřené náklady na provoz by byly oproti variantám bivalentním a trivalentním zanedbatelné [18].

5. Bilanční model

Výsledný bilanční model se využívá pro porovnání tří možností vytápění, konkrétně pro tepelné čerpadlo vzduch/voda, plynový kotel a kombinaci tepelného čerpadla a plynového kotle, takzvaný hybridní model vytápění. Pro všechny dané možnosti jsou zadávány stejné vnější vstupní parametry, jako je teplota napájecí vody, potřeba tepla pro vytápění, venkovní teplota a podobně, kdy mezi hlavní sledované parametry na výstupu patří emise CO₂ a náklady na provoz.

Pro výpočet byla použita tak zvaná intervalová metoda, kdy se vychází z křivky trvání teplot pro konkrétní časové období. Otopné období je rozděleno podle rozdílů teplot, v tomto případě po 1 Kelvinu. Pro každý teplotní interval je stanovena střední teplota a doba trvání. Poté následuje série výpočtů pro každý interval zvlášť, kdy se například zjišťuje potřeba tepla, výkon tepelného čerpadla, teplo dodané tepelným čerpadlem, jeho doba provozu a další údaje. Na závěr dojde sečtení jednotlivých výsledků ze všech intervalů a získáme tím výsledné údaje za celý rok provozu [24].

5.1. Klimatické údaje

Pro výpočet je nutné znát klimatické podmínky, za kterých bude tepelné čerpadlo a plynový kotel provozovány. V ideálním případě přímo pro konkrétní místo umístění. Vzhledem k tomu, že tyto údaje nejsou pro většinu míst k dispozici, jsou pro výpočet použity klimatické údaje z normy TNI 73 0351, kde nalezneme četnost hodin pro jednotlivé venkovní teploty.

5.1.1. Křivka trvání venkovních teplot

Ze vstupních údajů o klimatických podmínkách lze sestavit bezrozměrnou křivku trvání venkovních teplot.

Poměrná doba

$$V = \frac{T}{T_z} [-] \quad (6.1)$$

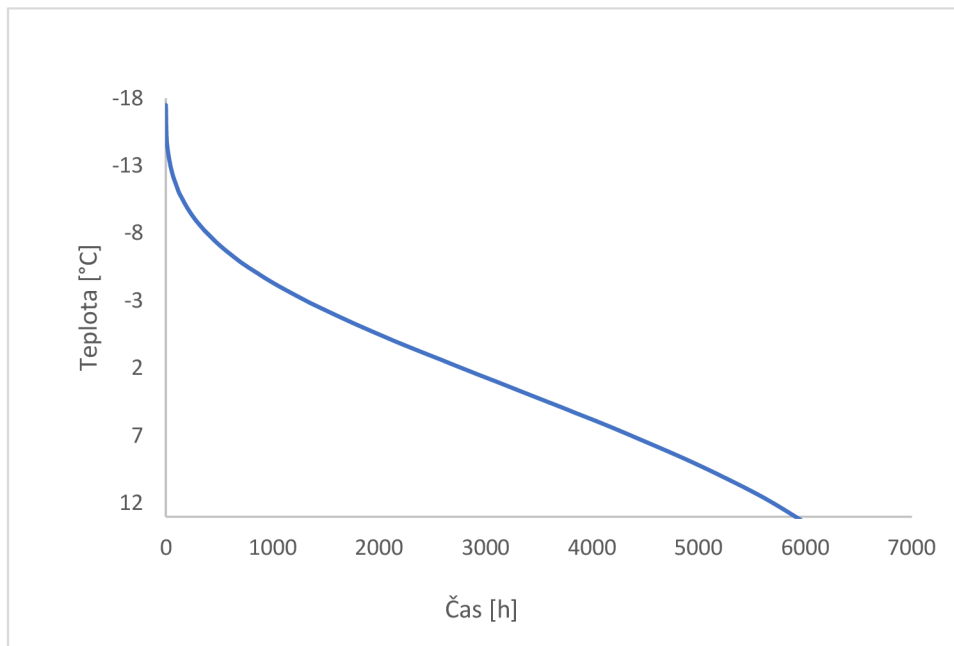
T Doba výskytu teplot nižších než t_c [h]

T_z Doba trvání otopného období [h]

Bezrozměrná křivka trvání teplot

$$v = (1 - V)^{0,985 \cdot V^{-0,626}} [-] \quad (6.2)$$

Z vypočtených hodnot mohu následně vykreslit výslednou křivku trvání venkovních teplot.



Obr. 5.1: Graf křivky venkovních teplot.

5.1.2. Teplotní interval pro letní období

Pro přípravu teplé vody v letním období se intervalová metoda zjednoduší pouze do jednoho teplotního intervalu, kdy počítáme s průměrnou letní venkovní teplotou [24].

Průměrná venkovní letní teplota

$$t_{e,L} = \frac{t_{e,rok} \cdot 8760 - t_{e,z} \cdot T_z}{8760 - T_z} \text{ [°C]} \quad (6.3)$$

$t_{e,rok}$ Průměrná roční teplota [°C]

$t_{e,z}$ Průměrná venkovní teplota otopného období [°C]

Počet hodin letního intervalu

$$T_{j,L} = 8760 - T_z \text{ [h]} \quad (6.4)$$

5.2. Potřeba tepla

Pro další části výpočtu bilančního modelu je nutné zjistit potřebné hodnoty tepla pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody (TUV). Potřebné vstupní údaje se dají nalézt na internetu, nebo na stránkách Ministerstva průmyslu a obchodu v ČR, z kterých bylo čerpáno i pro tuto práci [25].

5.2.1. Potřeba tepla na vytápění

Výpočet celoroční potřeby tepla můžeme provést pomocí programů veřejně dostupných na internetu [26], nebo pomocí vzorců, z kterých dané programy vychází [27].

Vytápěcí denostupně

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) [K \cdot \text{dny}] \quad (6.5)$$

- d Délka topného období [dny]
 t_{is} Průměrná vnitřní výpočtová teplota [°C]
 t_{es} Průměrná teplota otopného období [°C]

Opravný součinitel

$$\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_D [-] \quad (6.6)$$

- e_i Nesoučasnost tepelné ztráty větráním a tepelné ztráty prostupem [-]
 (běžně se pohybuje v intervalu 0,6 až 0,9, pro bilanční model se volí hodnota 0,8)
 e_t Snížení teploty v místnosti během dne/noci [-]
 (nabývá hodnot 0,8 až 1 pro permanentně vytápěné objekty, pro bilanční model je volena hodnota 1)
 e_D Zkrácení doby vytápění u objektů s přestávkou provozu [-]
 (nabývá hodnot 0,8 až 1 pro permanentně vytápěné objekty, pro bilanční model je volena hodnota 1)

Roční potřeba tepla pro vytápění

$$Q_{VYT,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_{eN})} [kWh] \quad (6.7)$$

- η_o Účinnost soustavy (možnost regulace soustavy) [-]
 (nabývá hodnot 0,9 pro kotle na pevná paliva až 1 pro plynovou kotelnu, pro model se volí hodnota 0,95)
 η_r Účinnost rozvodu vytápění [-]
 (nabývá hodnot 0,95 až 0,98, pro model se volí hodnota 0,95)
 Q_c Tepelná ztráta objektu [kWh]
 t_{eN} Venkovní výpočtová teplota [°C]

Počet hodinostupňů výpočtového teplotního intervalu

Po zjištění celoroční potřeby tepla je nutné rozdělení pro jednotlivé teplotní intervaly. K tomu se dají využít hodinostupně DH. Jsou dvě možnosti, jak je můžeme získat. První varianta počítá s využitím vzorce [24].

$$DH_j = T_j \cdot (t_{is} - t_e) [K \cdot h] \quad (6.8)$$

- T_j Délka topného období v teplotním intervalu [h]
 t_e Průměrná teplota otopného období v daném intervalu [°C]

Výhodou této varianty je, že teplota v místnosti nemusí být po celou dobu konstantní, ale může se měnit, a hodinostupně se počítají pro každou teplotu zvlášť.

Druhou možností je využití dat z již zmiňované normy TNI 73 0351, kde nalezneme hodnoty hodinostupně pro konstantní vnitřní výpočtovou teplotu $t_{is} = 20$ °C. Tato varianta však nebyla využita.

Potřeba tepla na vytápění pro jednotlivé intervaly

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT,r} \cdot \frac{DH_j}{DH_r} \quad [kWh] \quad (6.9)$$

DH_r Počet hodinostupňů během roku za otopné období [K·dny]

Ekvitermní teplota přívodní vody

$$t_{w1} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i \right) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{e,N}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad [^{\circ}C] \quad (6.10)$$

t_i Vnitřní výpočtová teplota v místnosti [$^{\circ}C$]

$t_{w1,N}$ Návrhová teplota přívodní vody [$^{\circ}C$]

$t_{w2,N}$ Návrhová teplota vratné vody [$^{\circ}C$]

n Teplotní exponent [-]

(pro velkoplošné vytápění $n = 1,1$; pro otopná tělesa $n = 1,3$)

Rozdíl teplot přívodní a vratné vody pro ekvitermní regulaci [34]

$$\Delta t_w = (t_{w1,N} - t_{w2,N}) \cdot \frac{t_e - t_i}{t_{e,N} - t_i} \quad [^{\circ}C] \quad (6.11)$$

Ekvitermní teplota vratné vody

Odečtením rozdílů teplot od výstupní teploty vody při ekvitermní regulaci získáme teplotu vratné vody při vstupu zpět do ohřivače, ta je důležitá pro určení účinnosti kotle.

$$t_{w2} = t_{w1} - \Delta t_w \quad [^{\circ}C] \quad (6.12)$$

Požadovaná teplota otopné vody

Zde je nutné zmínit, že pro potřeby bilančního modelu jsou vypočtené parametry dostačující, avšak v reálném využití je teplota na výstupu z ohřivacího zařízení (tepelné čerpadlo, plynový kotel) vyšší než ekvitermní teplota přívodní vody. Dochází tak k zohlednění teplotního spádu na výměníku a omezení cyklování čerpadla. Rovnice má potom tvar:

$$t_{k2} = t_{w1} + \Delta t_k \quad [^{\circ}C] \quad (6.13)$$

Δt_k Přehřátí ekvitermní teploty přívodní vody [$^{\circ}C$]

(bývá voleno okolo 5 Kelvinů v případě bilančního modelu je pro zjednodušení $\Delta t_k = 0$ K)

5.2.2. Potřeba tepla na přípravu teplé vody

Obdobným způsobem se postupuje i při výpočtu potřeby tepla na přípravu teplé vody, kdy je nejdříve nutné zjistit celoroční potřebu, buď pomocí programu [26], nebo pomocí vzorců [27].

Denní potřeba tepla pro ohřev teplé vody

$$Q_{TUV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \cdot 10^{-3} [kWh] \quad (6.14)$$

- z Koefficient energetických ztrát systému (počítá se s hodnotou 0,5) [-]
 ρ Měrná hmotnost vody [kg/m³]
 (ρ = 1000 kg/m³)
 c Měrná tepelná kapacita vody [J/kg]
 (c = 4186 J/kg)
 V_{2p} Celková potřeba teplé vody za 1 den [m³/den]
 t₂ Teplota ohřáté vody [°C]
 t₁ Teplota studené vody [°C]

Roční potřeba tepla pro ohřev teplé vody

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot (N - d) [kWh] \quad (6.15)$$

N Počet pracovních dní soustavy v roce [dny]

Po výpočtu celoroční potřeby tepla pro TUV dojde k určení potřeby v jednotlivých teplotních intervalech.

Potřeba tepla na ohřev teplé vody pro jednotlivé intervaly

$$Q_{TUV,j} = Q_{TUV,r} \cdot \frac{T_j}{8760} [kWh] \quad (6.16)$$

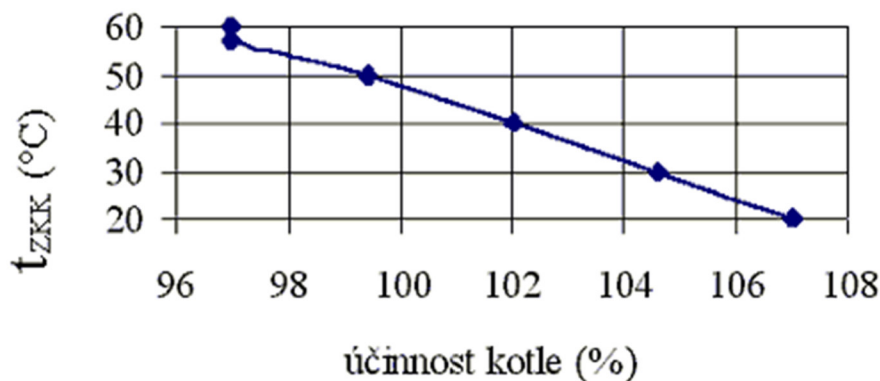
8760 Počet hodin v roce

5.3. Plynový kotel

Když už jsou k dispozici údaje o potřebě tepla pro vytápění a ohřev TUV, lze začít psát rovnice pro samotný bilanční model. První z variant je plynový kotel.

5.3.1. Účinnost plynového kondenzačního kotle

Účinnost plynového kondenzačního kotle se odvíjí od teploty vratné vody, protože ta silně ovlivňuje kondenzaci spalin na výstupu. Rozdíly v účinnosti mohou dosahovat až 14 %, což už je dost podstatný rozdíl, proto není možné považovat tento údaj za konstantní a je nutné zohlednit jeho změnu. Vstupní údaje pro výpočet byly nalezeny na internetu [22].



Obr. 5.2: Účinnost kondenzačního kotle v závislosti na teplotě vratné vody [22].

Z dostupného obrázku byla vypsána data do tabulky, která jsou využita pro vytvoření lineární funkce pomocí programu Excel. Hodnota pro 60 °C nebyla do tabulky zahrnuta ze dvou důvodů – za prvé při takto vysoké teplotě už nedochází ke kondenzaci a účinnost začíná klesat mnohem pomaleji a docházelo by k neupřesnění funkce, za druhé se takto vysoké teploty vratné vody v modelu nedosahuje. V praxi by to znamenalo teplotu výstupní vody okolo 70 °C a vyšší, což jsou hodnoty pro běžné tepelné čerpadlo vzduch/voda prakticky nedosažitelné.

Tab. 5.1: Účinnost kondenzačního kotle na teplotě vratné vody [22].

t_{w2} [°C]	η [%]
20	107,0
25	106,0
30	104,5
35	103,0
40	102,0
45	101,0
50	99,5
55	97,0

Účinnost plynového kotle v závislosti na teplotě vody

Z rovnice (6.12) známe požadovanou teplotu vody na vstupu zpět do kotle, pomocí které se dá dopočítat účinnost při vytápění.

$$\eta_j = -0,2714 \cdot t_{w2} + 112,68 \quad [\%] \quad (6.17)$$

5.3.2. Vytápění pomocí plynového kotle

Spotřebované množství zemního plynu

$$V_j = \frac{Q_{VYT,j}}{Q_i \cdot \frac{\eta_j}{100}} \quad [m_n^3] \quad (6.18)$$

Q_i Výhřevnost paliva [kWh/m_{pal}^3]
(výhřevnost zemního plynu při normálních podmínkách je $9,964 kWh/m_{pal}^3$)

Množství CO_2 uvolněné spálením $1 m_n^3$ zemního plynu

Pro výpočet CO_2 , které se uvolní při spálení zemního plynu, jsou použity informace ze stránek MPO, kde se nalézá hodnota $0,2t/MWh$ ($0,2kg/kWh$) na výhřevnosti paliva [28]. Pro bilanční model došlo k přepočítání, aby bylo známo, kolik CO_2 se uvolní při spálení $1 m^3$ paliva.

$$\begin{aligned} m_{CO_2} &= Q_i \cdot m_{CO_2, Qi} \quad [kg/m_{pal}^3] \\ m_{CO_2} &= 9,964 \cdot 0,2 = 1,99 \\ m_{CO_2} &= 1,99 \quad kg/m_{pal}^3 \\ m_{CO_2} &= 0,00199 \quad t/m_{pal}^3 \end{aligned} \quad (6.19)$$

$m_{CO_2, Qi}$ Produkce CO_2 [kg/kWh]
($0,2 kg/kWh$)

Množství CO_2 uvolněné v daném intervalu

Vynásobením spotřebovaného plynu a konstanty získané z rovnice 6.19 lze určit uvolněné emise CO_2 pro daný interval.

$$M_{CO_2, j} = V_j \cdot m_{CO_2} \quad [t] \quad (6.20)$$

Cena za 1 m_n³ paliva

Obdobním způsobem se postupuje i při určení ceny plynu, který se standartně uvádí Kč/MWh. Pro výpočet je však vhodnější převést cenu na Kč/m³_{pal}. Cena je uváděna v bilančním modelu jako proměnná pro případ, že by se v budoucnu výrazně měnila. Dělení 1000 se objevuje ve vzorci z důvodů převedení jednotky Kč/MWh na Kč/kWh.

$$N_{zp} = \frac{N_{zp, Qi}}{1000} \cdot Q_i \left[\frac{\text{Kč}}{\text{m}^3_{\text{pal}}} \right] \quad (6.21)$$

$N_{zp, Qi}$ Cena paliva [Kč/MWh]

Cena za spotřebované palivo v intervalu

$$N_j = N_{zp} \cdot V_j [\text{Kč}] \quad (6.22)$$

5.3.3. Ohřev TUV pomocí plynového kotle

Stejným způsobem se pokračuje i při určování emisí a ceny tepla pro ohřev teplé vody. Jediné dva rozdíly se dají nalézt hned na začátku výpočtu.

Účinnost plynového kotle v závislosti na teplotě vody

Jedná se o upravenou rovnici 6.17, kde se místo teploty vratné vody počítá s teplotou studené vody.

$$\eta_j = -0,2714 \cdot t_1 + 112,68 \quad [\%] \quad (5.23)$$

Spotřebované množství zemního

Druhou změnou je nahrazení $Q_{VYT, j}$ v rovnici 5.18 pomocí $Q_{TUV, j}$.

$$V_j = \frac{Q_{TUV, j}}{Q_i \cdot \frac{\eta_j}{100}} \quad [\text{m}^3_n] \quad (5.24)$$

Všechny následující výpočty jsou identické jak pro vytápění, tak pro ohřev teplé vody. Konkrétně rovnice 6.19 až 6.22.

5.3.4. Celkové shrnutí pro plynový kotel

Nakonec může dojít k celkovému výpočtu emisí CO₂, nákladů za vytápění a ohřev TUV a množství spotřebovaného zemního plynu za celou roční sezónu. Výsledky lze získat sečtením jednotlivých mezivýpočtů ze všech intervalů.

Celkové množství CO₂ uvolněné za rok

$$M_{CO_2, rok} = \sum_j M_{CO_2, j} \quad [t] \quad (6.25)$$

Celkové provozní náklady plynového kotle za rok

$$N_k = \sum_j N_j + U_k \quad [\text{Kč}] \quad (6.36)$$

U_k Fixní náklady za provoz kotle (servis)
($U_k = 2000$ Kč)

Celkové množství spotřebovaného zemního plynu

$$V = \sum_j V_j [m_n^3] \quad (6.27)$$

5.4. Tepelné čerpadlo

Pro bilanční model je zvoleno tepelné čerpadlo typu vzduch-voda, které patří mezi nejlevnější na pořízení a řadí se k nejběžnějším typům, se kterými se dá setkat. Tepelný výkon závisí na venkovní teplotě a teplotě výstupní vody. S poklesem venkovní teploty vzduchu, nebo vzrůstem teploty vody na výstupu klesá. V praxi se nepočítá s tím, že by tepelné čerpadlo mělo pokrývat potřebu za všech teplot, ale volí se o menším výkonu, což se děje především z ekonomických důvodů na pořízení. Při nízkých teplotách, kdy už je výkon nedostatečný, dochází k dotápnění pomocí elektřiny.

5.4.1. Výkon a COP tepelného čerpadla

Pro výpočet je nezbytné znát závislost tepelného výkonu a COP faktor na rozdílech teplot venkovního vzduchu a výstupní vody. Pro základní výpočet jsou použity údaje od firmy Regulus, které se dají nalézt na internetu [28], kde jsou uváděny parametry pro čtyři různé venkovní teploty a tři teploty výstupní vody. Data z technického listu byla přepsána do Excelu a byly z nich vytvořeny lineární závislosti. Postupovalo se obdobně, jako při výpočtu účinnosti plynového kotle.

Tab.5.2: Výkon tepelného čerpadla Regulus EcoAir 408 [29].

t_e [C°]	t_{k2} [C°]	Δt [C°]	COP [-]	$\Phi_{k,TUV,j}$ [kW]
-15	35	50	2,42	3,63
-15	45	60	1,99	3,5
-15	55	70	1,63	3,27
-7	35	42	3,02	4,73
-7	45	52	2,51	4,62
-7	55	62	2,08	4,39
2	35	33	3,76	6,02
2	45	43	2,93	5,51
2	55	53	2,65	5,88
7	35	28	4,83	7,83
7	45	38	3,78	7,44
7	55	48	3,11	7,08

Rozdíl teplot venkovního vzduchu a výstupní vody

$$\Delta t = t_{k2} - t_e [^{\circ}\text{C}] \quad (6.28)$$

Výkon tepelného čerpadla

$$\Phi_{k,35,j} = -0,1808 \cdot \Delta t + 12,467 [kW] \quad (6.29)$$

$$\Phi_{k,45,j} = -0,1641 \cdot \Delta t + 13,187 [kW] \quad (6.30)$$

$$\Phi_{k,55,j} = -0,1705 \cdot \Delta t + 15,088 [kW] \quad (6.31)$$

Pozn. číslo v dolním indexu vyjadřuje teplotu výstupní vody v °C.

COP faktor

$$COP = -0,0697 \cdot \Delta t + 6,2542 [-] \quad (6.32)$$

5.4.2. Ohřev TUV pomocí tepelného čerpadla

V případě tepelného čerpadla je nutné si uvědomit, že jeho výkon je podstatně menší než u plynového kotle, a proto je nutné počítat i čas provozu v daném intervalu. Může totiž dojít k situaci, kdy čerpadlo zvládá ohřívat TUV, ale už mu nemusí zbývat dostatek času pro ohřev vody pro vytápění. V tomto případě je zvolena varianta, kdy se primárně ohřívá teplá užitková voda.

Dostupné teplo z tepelného čerpadla pro přednostní přípravu TUV

Když je známa doba trvání daného intervalu, tak pomocí rovnice výkonu lze dopočítat maximální možné dodané teplo v daném intervalu. Například, pokud chceme teplotu vody 55 °C, tak použijeme rovnici 6.31. To znamená, že $\Phi_{k,TUV,j} = \Phi_{k,55,j}$. Pokud požadují jinou teplotu vody, využijí rovnici pro danou teplotu, buď 6.29, nebo 6.30.

$$Q_{k,TUV,j} = \Phi_{k,TUV,j} \cdot T_j \text{ [kWh]} \quad (6.33)$$

Skutečně dodané teplo na ohřev TUV od tepelného čerpadla

Reálně dodané množství tepla je buď teplo nutné pro ohřev TUV v daném intervalu, nebo v případě nízkých teplot, kdy výkon tepelného čerpadla je nedostatečný, tak maximální dostupné teplo.

$$Q_{T\check{c},TUV,j} = \min(Q_{k,TUV,j}, Q_{TUV,j}) \text{ [kWh]} \quad (6.44)$$

Skutečná doba provozu tepelného čerpadla v režimu TUV

Pro výpočet dodaného tepla pro vytápění v pozdější části je nutné znát čas, které čerpadlo potřebuje pro ohřev TUV.

$$T_{T\check{c},TUV,j} = \frac{Q_{T\check{c},TUV,j}}{Q_{k,TUV,j}} \text{ [h]} \quad (6.35)$$

Potřeba hnací energie pro pohon tepelného čerpadla v režimu TUV

Pomocí COP faktoru z rovnice 5.32 lze zjistit potřebnou elektrickou energii pro přípravu teplé vody.

$$E_{T\check{c},TUV,j} = \frac{Q_{T\check{c},TUV,j}}{COP_{TUV,j}} \text{ [kWh]} \quad (6.36)$$

Potřeba pomocné elektrické energie v režimu TUV

Tato veličina vyjadřuje potřebu energie pro pomocná zařízení čerpadla, jako jsou ventily, oběhová čerpadla a další.

$$E_{pom,TUV,j} = P_{pom,TUV} \cdot T_{T\check{c},TUV,j} \text{ [kWh]} \quad (6.37)$$

$P_{pom,TUV}$ elektrický příkon pomocných zařízení (TUV)
(pro bilanční model je považována konstantní hodnota 0,3 kW [30])

Teplo z doplňkového (záložního) ohříváče v režimu TUV

V případě, že tepelné čerpadlo nedisponuje dostatečným výkonem pro potřeby TUV, dochází k ohřevu pomocí záložního zdroje, který spotřebovává elektrickou energii. Pro zjednodušení se dá předpokládat, že se elektrina mění na teplo se 100 % účinností.

$$Q_{d,TUV,j} = Q_{TUV,j} - Q_{T\check{c},TUV,j} \text{ [kWh]} \quad (6.38)$$

5.4.3. Vytápění pomocí tepelného čerpadla

Při výpočtu bilančního modelu je opět nutné znát tepelný výkon, COP faktor v závislosti na teplotách vzduchu a výstupní vody a nově také dostupný čas v daném teplotním intervalu, pokud se čerpadlo používá jak pro ohřev TUV, tak pro vytápění.

Zbývající doba provozu v režimu vytápění

Aby se dalo spočítat dostupné teplo, jež se dá využít, tak se musí spočítat doba dostupná v daném intervalu. Výpočet se provede pouze odečtením času provozu v režimu přípravy TUV od dostupného času v intervalu.

$$T_{k,VYT,j} = T_j - T_{T\check{c},TUV,j} [h] \quad (6.39)$$

Dostupné teplo z tepelného čerpadla pro vytápění

Po vypočtení času se pokračuje výpočtem dostupného tepla, tentokrát za pomoci rovnice (5.30) pro 45 °C, což je návrhová teplota otopné vody.

$$Q_{k,VYT,j} = \Phi_{k,VYT,j} \cdot T_{k,VYT,j} [kWh] \quad (6.40)$$

Skutečně dodané teplo na vytápění od tepelného čerpadla

Jedná se o minimální hodnotu z dostupného tepla a potřebou tepla pro jednotlivé intervaly.

$$Q_{T\check{c},VYT,j} = \min(Q_{k,VYT,j}, Q_{VYT,j}) [kWh] \quad (6.41)$$

Skutečná doba provozu tepelného čerpadla v režimu vytápění

$$T_{T\check{c},VYT,j} = \frac{Q_{T\check{c},VYT,j}}{\Phi_{k,VYT,j}} [h] \quad (6.42)$$

Potřeba hnací energie pro pohon tepelného čerpadla v režimu vytápění

Postupuje se identicky jako při výpočtu TUV.

$$E_{T\check{c},VYT,j} = \frac{Q_{T\check{c},VYT,j}}{COP_{VYT,j}} [kWh] \quad (6.43)$$

Potřeba pomocné elektrické energie v režimu vytápění

Jedná se o podobnou rovnici, jako v případě 5.37. Jediný rozdíl spočívá ve větším příkonu pro pomocná zařízení.

$$E_{pom,VYT,j} = P_{pom,VYT} \cdot T_{T\check{c},VYT,j} [K \cdot dny] \quad (6.44)$$

$P_{pom,VYT}$ elektrický příkon pomocných zařízení (vytápění)
(pro bilanční model je považována konstantní hodnota 0,5 kW [29])

Teplo z doplňkového (záložního) ohříváče v režimu vytápění

V případě, že je výkon tepelného čerpadla nedostačující pro pokrytí spotřeby tepla pro vytápění, dochází k zapojení záložního zdroje na elektrickou energii. Elektrický ohříváč bude považován za ideální zařízení s účinností 100 %. Dnešní ohříváče se skutečně této hodnotě velice přibližují.

$$Q_{d,VYT,j} = Q_{p,VYT,j} - Q_{T\check{c},VYT,j} [kWh] \quad (6.45)$$

5.4.4. Celkové shrnutí pro tepelné čerpadlo

Po vypočtení všech údajů z teplotních intervalů můžeme udělat jejich součet a celkovou bilanci. Když je známé celkové množství spotřebované elektřiny, tak se dají spočítat celkové uvolněné emise CO₂ a náklady za roční provoz.

Roční dodávka tepla tepelným čerpadlem

Jedná se o součet celkového dodaného tepla tepelným čerpadlem pro vytápění a ohřev teplé vody za celý rok.

$$Q_{T\check{c},rok} = \sum_j Q_{T\check{c},TUV,j} + \sum_j Q_{T\check{c},VYT,j} \quad [kWh] \quad (6.46)$$

Roční potřeba hnací energie tepelného čerpadla

$$E_{T\check{c},rok} = \sum_j E_{T\check{c},TUV,j} + \sum_j E_{T\check{c},VYT,j} \quad [kWh] \quad (6.47)$$

Roční potřeba pomocné elektrické energie pro provoz tepelného čerpadla

$$E_{pom,rok} = \sum_j E_{pom,TUV,j} + \sum_j E_{pom,VYT,j} \quad [kWh] \quad (6.48)$$

Roční dodávka tepla doplňkovým zdrojem (ohřívačem)

$$Q_{d,rok} = \sum_j Q_{d,TUV,j} + \sum_j Q_{d,VYT,j} \quad [kWh] \quad (6.49)$$

Roční potřeba elektrické energie

Sečtením všech dodávek elektřiny získáme celkovou spotřebu elektřiny za rok potřebnou pro výpočet celkové bilance.

$$E_{T\check{c}} = E_{T\check{c},rok} + E_{pom,rok} + Q_{d,rok} \quad [kWh] \quad (6.50)$$

Celkové uvolněné emise CO₂ za rok

$$M_{CO_2,rok} = CO_{2,EF} \cdot E_{T\check{c}} \quad [t] \quad (6.51)$$

CO_{2,EF} Emisní faktor při výrobě elektřiny [t/MWh]
(pro bilanční model je brána konstantní hodnota CO_{2,EF} = 0,394 t/MWh, která se dá nalézt na stránkách MPO [31])

Celkové roční náklady tepelného čerpadla na provoz

Z celkové spotřebované energie už lze dopočítat i celkové náklady na provoz tepelného čerpadla za rok. Cena elektřiny je brána podle tarifu D56d, který se používá při vytápění elektřinou, včetně tepelných čerpadel. Nutné je i započítat roční náklady na údržbu.

$$N_{T\check{c}} = \left(E_{T\check{c}} \cdot \frac{D56d}{1000} \right) + U_{T\check{c}} \quad [K\check{c}] \quad (6.52)$$

U_{T_č} Fixní náklady za provoz tepelného čerpadla [Kč]

(U_{T_č} = 3000 Kč)

D56d Cena elektřiny pro tepelná čerpadla [Kč/MWh]

Sezónní topný faktor

Tento parametr nelze u plynového kotle sledovat, pouze u tepelného čerpadla. Je to poměr dodaného tepla k celkové spotřebované elektřině za celou topnou sezónu, to znamená, že se nepočítá pouze s elektřinou na provoz, ale také pro pomocná zařízení a ohřev vody pomocí elektrických ohřivačů.

$$SPF = \frac{Q_{T\check{c},rok}}{E_{T\check{c},rok} + E_{pom,rok} + Q_{d,rok}} [-] \quad (5.53)$$

5.5. Hybridní vytápění – Tepelné čerpadlo a plynový kotel

Jednou z nejběžnějších forem hybridního vytápění, jak už bylo zmíněno, je varianta s tepelným čerpadlem vzduch/voda a plynového kotle. Více informací o hybridních variantách se dá nalézt v kapitole 5. Právě na tuto variantu se zaměřuje tato práce. Předpoklad fungování je takový, že primárně se bude používat k ohřevu tepelné čerpadlo, které v případě nedostatečného výkonu si bude dopomáhat plynovým kotlem. Není zde uvažována akumulární nádrž.

První část bilančního modelu při normálních podmínkách je identická s variantou tepelného čerpadla, proto nebudou rovnice 6.26 až 6.47 znova uváděny, ale bude na ně pouze odkázáno. Největší změnou je absence elektrického ohřivače pro dohřev vody při nízkých teplotách, kdy je nahrazen právě plynovým kotlem. V tomto případě jsou výpočty opět podobné. Jedná se konkrétně o využití rovnic 6.17 až 6.25. Podrobnější vysvětlení a případné změny jsou vysvětleny níže. Pokud nedošlo ke změně rovnice, je na ni opět pouze odkázáno, pokud došlo k nějaké změně proměnné, tak je napsána znova.

5.5.1. Ohřev TUV pomocí hybridního modelu

Začátek výpočtu je identický s tepelným čerpadlem, konkrétně se jedná o Rovnice 6.33 až 6.38, proto následuje popis od tohoto bodu dále.

Ohřátí vody v tepelném čerpadle

Abychom znali účinnost plynového kotle, s jakou se podílí na ohřevu vody, je nutné znát teploty teplé vody na výstupu z tepelného čerpadla, které získáme jednoduše ze znalosti rozdílů teplot pro ohřátí vody skutečně dodaným teplem a potřebou tepla pro jednotlivé intervaly.

$$\Delta t_m = \Delta t_w \cdot \frac{Q_{T\check{c},TUV,j}}{Q_{TUV,j}} [^{\circ}\text{C}] \quad (5.64)$$

Teploty teplé vody na vstupu do kotle

Tato hodnota je důležitá pro určení účinnosti. Jedná se o teplotu vody, která vstupuje do plynového kotle.

$$t_m = \Delta t_m + t_{k2} [^{\circ}\text{C}] \quad (5.55)$$

Účinnost plynového kotle v závislosti na teplotě vstupní vody

Výpočet se provede obdobně, jako u rovnice 6.17, ale pro správné hodnoty použijeme teplotu vody na výstupu z tepelného čerpadla.

$$\eta_j = -0,2714 \cdot t_m + 112,68 [\%] \quad (6.56)$$

Množství zemního plynu potřebné pro vytápění

Pokud je známa účinnost kotle v daném teplotním intervalu, tak se dá přejít k výpočtu požadovaného množství zemního plynu. K výpočtu slouží upravená rovnice 6.18, kdy $Q_{TUV,j}$ (potřeba tepla pro TUV) je nahrazeno potřebou tepla z doplňkového zdroje.

$$V_j = \frac{Q_{d,TUV,j}}{Q_i \cdot \frac{\eta_j}{100}} [m_n^3] \quad (6.57)$$

Následující rovnice 6.19 až 6.22 nachází uplatnění ve stejné podobě, jako u výpočtu plynového kotle. Tímto jsou známy všechny údaje z části pro ohřev teplé vody.

5.5.2. Vytápění pomocí hybridního modelu

Stejně jako u případu ohřevu vody byla použita úvodní rovnice pro začátek výpočtu z kapitoly pro tepelné čerpadlo. Jde o rovnice 6.39 až 6.45. Proto i zde pokračuje výpočet až od tohoto bodu, který se z velké části shoduje s postupem při ohřevu TUV.

Ohřátí vody v tepelném čerpadlu

$$\Delta t_m = \Delta t_w \cdot \frac{Q_{T\check{c},VYT,j}}{Q_{VYT,j}} [^\circ\text{C}] \quad (5.58)$$

Následuje opět opakování výpočtu z předchozího postupu, přesněji jde o využití rovnic 6.55 a 6.56.

Množství zemního plynu potřebné pro vytápění

$$V_j = \frac{Q_{d,VYT,j}}{Q_i \cdot \frac{\eta_j}{100}} [m_n^3] \quad (6.59)$$

Zbývající výpočet je identický jako v případě ohřevu TUV a použijí se rovnice 6.19 a 6.22 z části plynového kotle.

5.5.3. Celkové shrnutí pro hybridní model

Po vypočtení všech údajů pro teplotní intervaly opět následuje sečtení výsledných hodnot pro budoucí porovnání. I zde dochází k využití vzorců z předchozích výpočtů. Konkrétně jde o rovnice 6.27, 6.46, 6.47, 6.48

Roční spotřeba elektrické energie

$$E_{T\check{c}} = E_{T\check{c},rok} + E_{pom,rok} [kWh] \quad (6.60)$$

Celkové množství CO₂ uvolněné spálením zemního plynu za rok

Sečtením uvolněných emisí z výroby elektřiny a spálením zemního plynu získáme finální výsledky pro zhodnocení bilančního modelu.

$$M_{CO_2,rok} = \sum_j M_{CO_2,j} + CO_{2,EF} \cdot E_{T\check{c}} [t] \quad (6.61)$$

Celkové provozní náklady za rok

Po sečtení celkových nákladů na palivo, elektřinu a údržbu jak plynového kotle, tak tepelného čerpadla, jsou k dispozici finální výsledky pro celkové hodnocení.

$$N = \sum_j N_j + U_k + \left(E_{T\check{c}} \cdot \frac{D56d}{1000} \right) + U_{T\check{c}} [K\check{c}] \quad (6.62)$$

Sezónní topný faktor

$$SPF = \frac{Q_{T\check{c},rok}}{E_{T\check{c},rok} + E_{pom,rok}} [-] \quad (5.63)$$

6. Parametrická studie

Po naprogramování všech tří bilančních modelů může dojít k další fázi, kdy jsou jednotlivé parametry měněny a dají se sledovat změny týkající se produkce emisí a nákladů na provoz. Aby byly k dispozici konkrétní výsledky použitelné pro porovnání, tak je potřeba zavést konkrétní číselné vstupní údaje pro výpočet. Jako vstupní údaje pro vzorový výpočet slouží klimatické údaje pro Brno ze stránek MPO [25].

6.1. Základní vstupní údaje pro bilanční model

Pro porovnání jednotlivých výsledků je potřeba si zvolit vzorové vstupní údaje, které budou konstantní, jako jsou například klimatické vstupní údaje potřebné pro výpočet tepla, a ty, jež se mohou případně měnit dle potřeby výpočtu. Vzorový objekt, na kterém se zkoumají jednotlivé výsledky, bude počítán pro podmínky v Brně. Aby se nemusely neustále přepisovat ostatní hodnoty parametrů, tak budou uvedeny taktéž u vstupních údajů s tím, že pokud nebude uvedeno jinak, budou právě tyto hodnoty použity při výpočtu. Hlavními sledovanými údaji pak jsou uvolněné emise CO₂, náklady na provoz, spotřebované množství zemního plynu a elektřiny. Celkové výsledky jsou prezentovány pomocí grafů, které se nacházejí v jednotlivých podkapitolách i s případnými změnami v zadání. Tady je také nutné zmínit určité zjednodušení z důvodů nedostatků dat, kdy spotřeba elektrické energie u plynového kotle bude považována za 0 kWh. Důvody lze uvést dva. Za prvé neznáme dobu provozu plynového kotle, za druhé jeho spotřeba, která se odhaduje na cca 200 až 400 kWh elektřiny za rok [33], je v porovnání s tepelným čerpadlem výrazně menší.

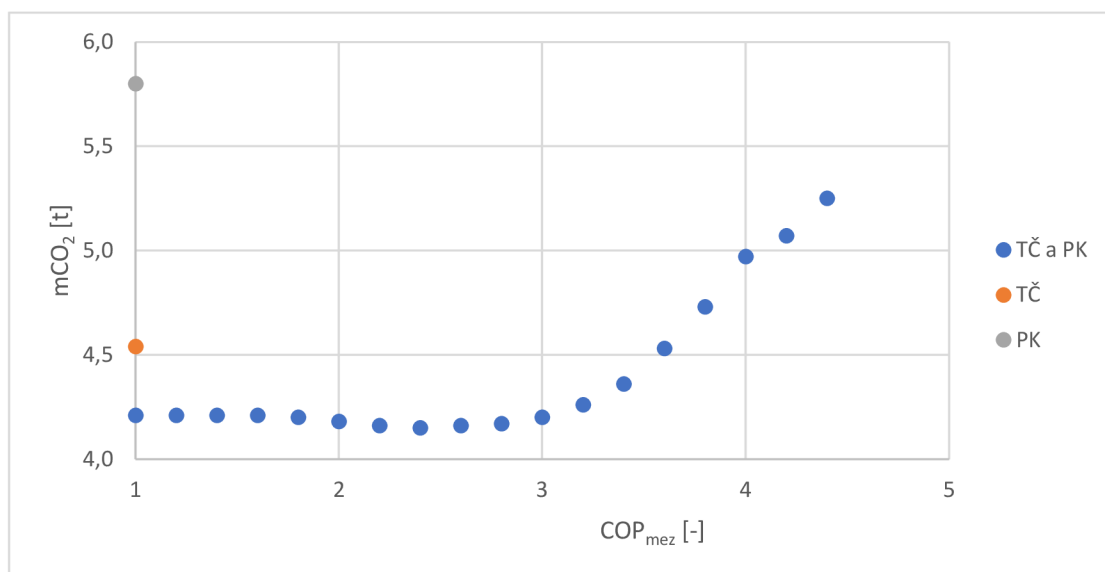
Tab. 6.1: Zadané parametry.

Venkovní výpočtová teplota t_{eN}	-12 °C
Střední denní venkovní teplota t_{em}	13 °C
Délka topného období d	232 dnů
Průměrná teplota během otopného období t_{es}	4,4 °C
Tepelná ztráta objektu Q_c	10 kW
Průměrná vnitřní výpočtová teplota t_{is}	20 °C
Návrhová teplota přívodní otopné vody $t_{w1,N}$	45 °C
Návrhová teplota vratné otopní vody $t_{w2,N}$	35 °C
Teplota studené vody t_1	10 °C
Teplota ohřáté vody t_2	55 °C
Celková potřeba teplé vody za 1 den V_{2p}	0,25 m ³ /den
Cena elektřiny D56d	6300 Kč/MWh
Cena zemního plynu N_p	2080 Kč/MWh

6.2. Výsledné hodnoty při změně parametru COP_{mez}

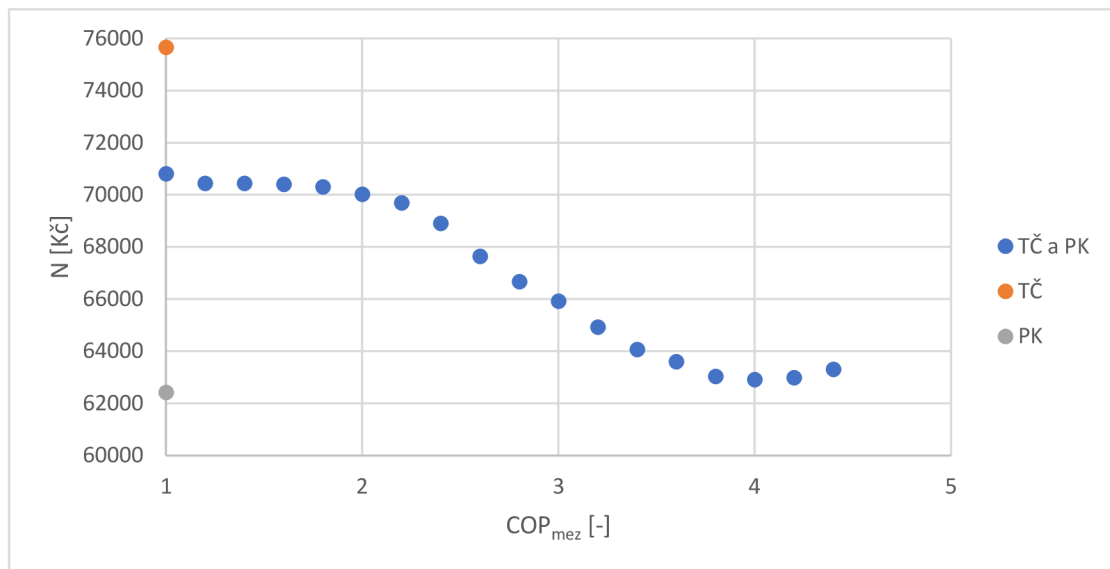
První parametr, jenž se bude měnit, je hodnota COP_{mez} . V případně hybridního vytápění to znamená vypnutí tepelného čerpadla, pokud jeho COP klesne právě pod tuto stanovenou hodnotu, kdy o případné vytápění se pak stará jen plynový kotel. Aby bylo docíleno smysluplných výsledků, bude se pohybovat COP_{mez} v hodnotách od 4,4 do 1,0 s poklesem vždy o 0,2.

Pro samotný výpočet se využije funkce KDYZ v programě Excel, kdy v obecném tvaru je definována KDYZ(podmínka; [ano];[ne]), v tomto případě má obecný tvar například pro vytápění KDYZ($COP_{VYT,j} \geq COP_{mez}; \varphi_{k,VYT,j}; 0$). V praxi to znamená, pokud je COP větší, nebo rovno COP_{mez} , tak výkon tepelného čerpadla v daném intervalu je $\varphi_{k,VYT,j}$. Pokud je ale COP menší jak COP_{mez} , pak je $\varphi_{k,VYT,j}$ rovno 0, tepelné čerpadlo netopí, všechna energie na vytápění se musí brát z doplňkového zdroje, což v případě hybridního modelu představuje plynový kotel. Obdobně se postupuje při ohřevu TUV.



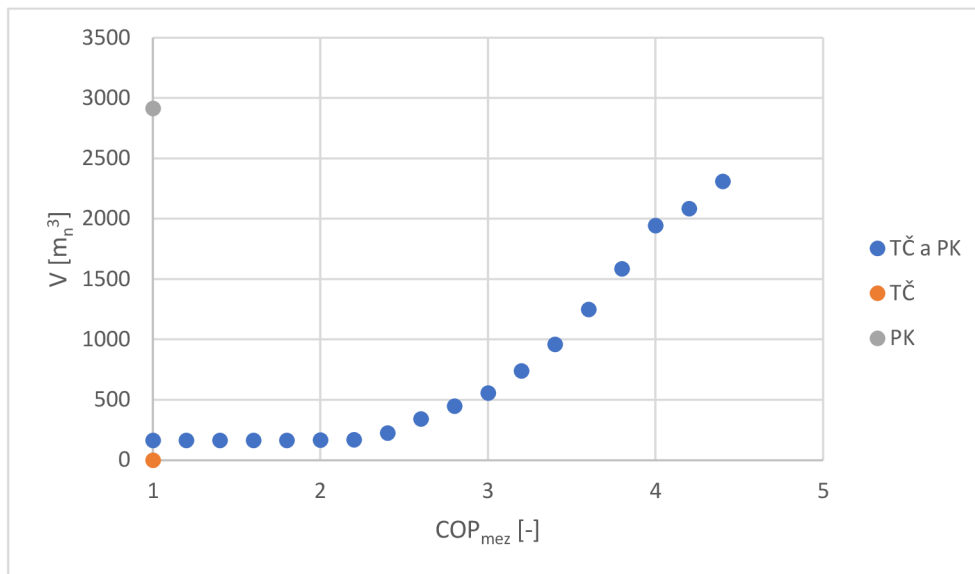
Obr. 6.1: Graf uvolněných emisí CO_2 při COP_{mez} .

Z údajů, které vychází z bilančních modelů, vyplývá, že hybridní forma vytápění se dá považovat z hlediska emisí CO_2 za nejvýhodnější, byť varianta s tepelným čerpadlem se k ní v určitých fázích dost přibližuje, nebo ji dokonce překonává. Nejoptimálnější COP_{mez} se nachází okolo hodnoty 2,4, což odpovídá z hlediska teploty využití tepelného čerpadla při ohřevu TUV do 1 °C a pro vytápění do -10°C. Tehdy se uvolňuje 4,15 tuny CO_2 . Samotné tepelné čerpadlo uvolní 4,54 tuny CO_2 (zvýšení o 9 % oproti hybridní formě) a u plynového kotle jsou emise v podobě 5,80 tuny CO_2 (zvýšení o 40 %). Podrobnější vysvětlení, proč vychází emise takto nízko, se nachází v další podkapitole.

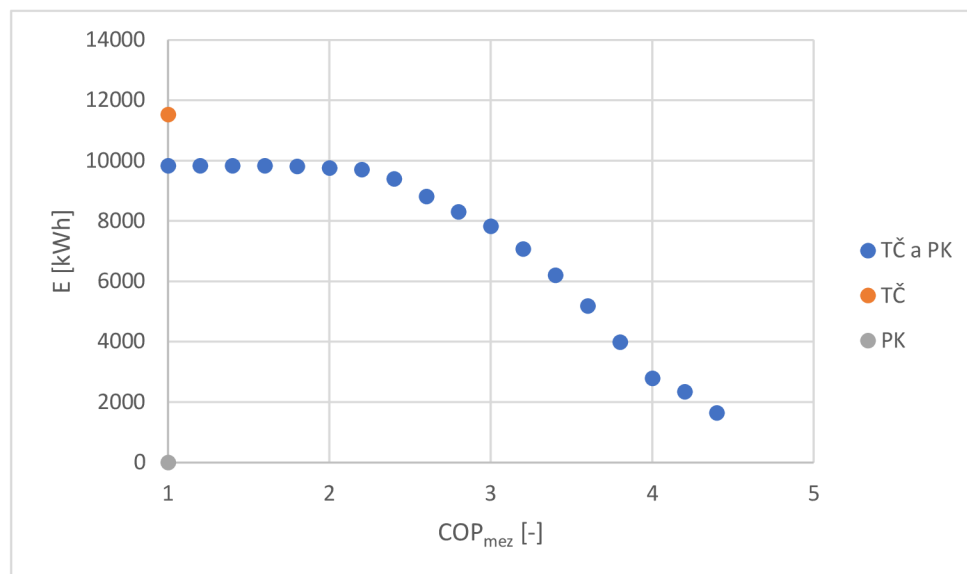


Obr. 6.2: Graf nákladů za roční provoz při COP_{mez} .

Z grafu lze vypočítat ne zrovna optimální výsledky pro provoz tepelných čerpadel, co se týká ekonomiky provozu. Hlavní důvody jsou dva. Za prvé pro smysluplné využití obou zdrojů, aby například plynový kotel nefungoval jen pár hodin v roce, je zvolené tepelné čerpadlo menšího výkonu, než by bylo pro daný objekt úplně vhodné, což se projevuje tím, že od teploty $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ si vypomáhá záložním zdrojem tepla. Jeho sezónní topný faktor se pohybuje okolo hodnoty 2,6. Druhý důvod je ten, že v době psaní této práce v prvním čtvrtletí roku 2022, kdy byly brány hodnoty z ceníku společnosti ČEZ, vychází jedna MWh elektřiny více než třikrát draž, oproti jedné MWh za zemní plyn. To je hlavní důvod, proč z ekonomického hlediska vychází nejvýhodněji topení zemním plynem, byť hybridní varianta se jí dost v určitý moment dost přibližuje. Neoptimálnější hodnota COP_{mez} pro hybridní formu vytápění se nachází okolo hodnoty 4, kdy nás provoz stojí jen o 1 % draž než kotel, zároveň je ale levnější o 20 % oproti tepelnému čerpadlu. Je také zajímavé, že při takto vysoké hodnotě COP_{mez} se využívá pro ohřev TUV pouze plynový kotel a při vytápění se tepelné čerpadlo vypíná už při $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podrobnější důvod, proč je minimum v bodě 4 je v následujících podkapitolách.



Obr. 6.3: Graf spotřeby zemního plynu při COP_{mez} .



Obr. 6.4: Graf spotřeby elektrické energie při COP_{mez} .

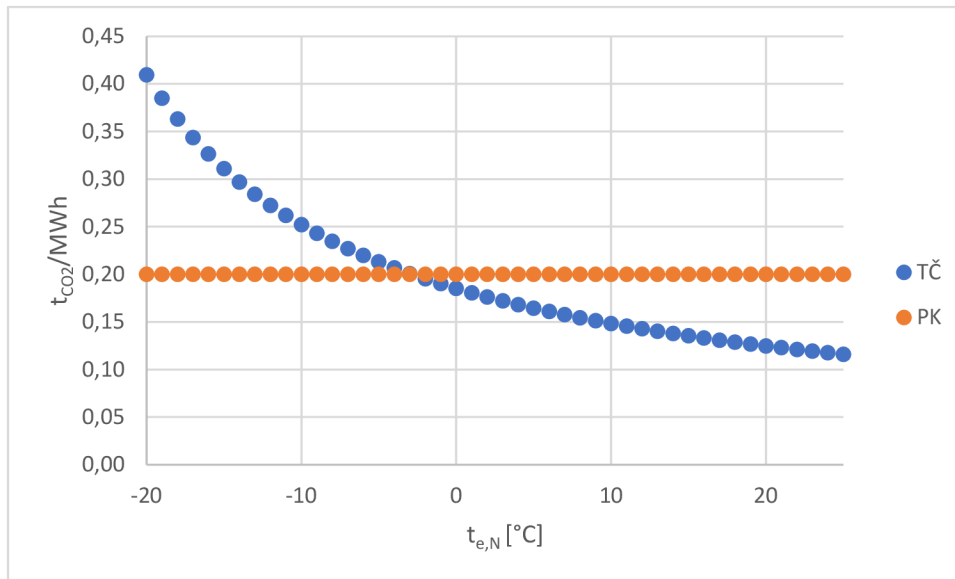
Pro celkové doplnění jsou zde ještě uvedeny spotřeby zemního plynu a elektrické energie. Ty se použijí při porovnání s dalšími variantami.

6.2.1. Porovnání tvorby emisí tepelného čerpadla a plynového kotle

Jak už bylo zmíněno, tak z hlediska emisí si nejlépe vede právě hybridní model. V této části se nachází vysvětlení, proč tomu tak je. Pro výpočet pro porovnání jsou použita data ze stránek MPO jako v předchozích případech. Tam si lze dohledat, že při uvolnění jedné MWh zemního plynu se uvolní 0,2 tuny CO_2 bráno k výhřevnosti paliva. Pro zjednodušení lze předpokládat, že plynový kotel má 100 % účinnost. Pro tepelné čerpadlo je výpočet komplikovanější. Pro elektřinu platí emise cca 0,4 tuny CO_2 na MWh, jenže právě její spotřeba je závislá na faktoru COP. Nesmí se zapomenout ani na elektřinu pomocnou. Pro výpočet lze potom použít následující rovnici.

$$M_{CO_2,m} = \left(E_{pom} + \frac{Q_{T\check{c}}}{COP} \right) \cdot CO_{2,EF} [t/MWh] \quad (6.1)$$

Teplu dodané čerpadlem $Q_{T\check{c}}$ bude 1 MWh. Podělením COP faktorem lze určit energii na pohon čerpadla. Energie pomocná je závislá na době provozu tepelného čerpadla, kterou ovlivňují klimatické podmínky, a výkonu čerpadla, jenž je závislý na teplotě výstupní vody. I když je v porovnání s energií na pohon výrazně menší, nelze ji jednoduše zanedbat. Proto dojde ke zjednodušení, kdy se bude rovnat 5 % tepla dodaného čerpadlem, takže její hodnota je 0,05 MWh. Teplota vody se bere konstantních 55 °C. Pro výpočet COP se použije rovnice 6.32.



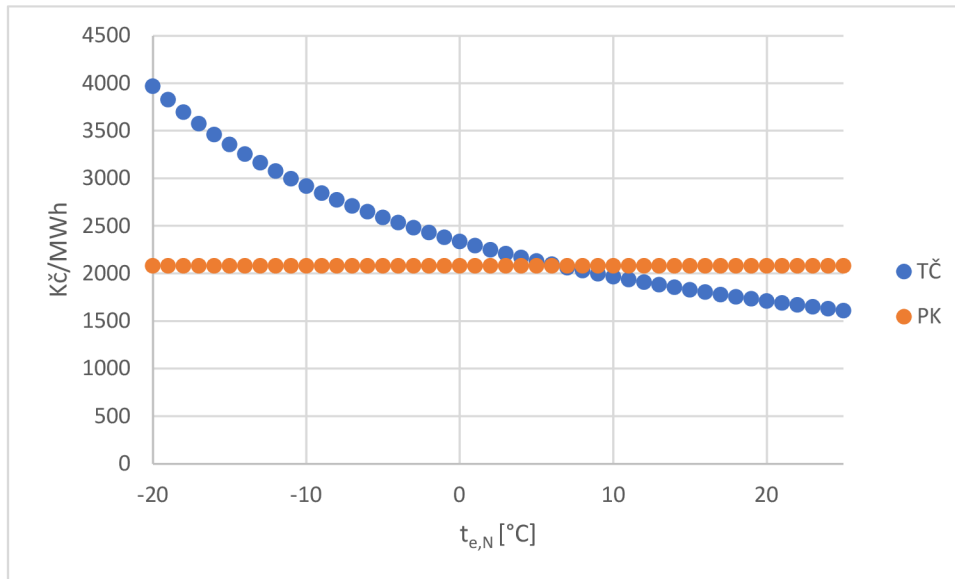
Obr. 6.5: Graf uvolněných emisí za MWh v závislosti na zařízení.

Z grafu vyplývá, že tepelné čerpadlo vychází z hlediska emisí lépe jen do určité teploty, od které se v současné době vyplatí provozovat plynový kotel. Hybridní vytápění může využívat jednotlivé zdroje právě tak, aby jejich produkce byla co nejnižší, proto je schopné dosahovat lepších výsledků než jednotlivé zdroje samostatně. Je nutné však říct, že emise z výroby elektřiny v posledních letech neustále klesaly a pokud tento trend vydrží, tak bude i výhodnost hybridního vytápění z tohoto hlediska časem menší.

6.2.2. Porovnání nákladů na provoz tepelného čerpadla a plynového kotle

Z velice podobných důvodů, jaké byly vysvětleny v předchozí podkapitole, se dá vysvětlit i optimální hodnota 4 pro ekonomiku provozu hybridního modelu. S rostoucím COP_{mez} se zmenšuje oblast, v které se nevyplatí tepelné čerpadlo a doba provozu v něm, proto dochází k poklesu nákladů. V bodě 4 dojde k protnutí, kdy jsou obě zařízení stejně drahá, následný růst nákladů při vyšším COP_{mez} je způsoben tím, že se vypíná tepelné čerpadlo při podmínkách, kdy je na provoz levnější než plynový kotel a tím není docíleno optimálních hodnot. Samotné minimum je dané poměrem dodaného tepla a spotřebované elektřiny. Pokud je cena plynu přibližně 1/3 ceny elektřiny, tak tepelné čerpadlo vychází levněji od bodu, kdy dodá zhruba třikrát více tepla, než spotřebuje elektřiny, což odpovídá přibližně bodu COP_{mez} 4. Opět se totiž nesmí zapomenout na pomocnou elektřinu, která není v COP zahrnuta. Právě ta nám posouvá minimum grafu více doprava jako v případě emisí. Pro lepší vysvětlení je zde vzorec pro výpočet nákladů na 1 MWh dodaného tepla. Za $Q_{T\check{c}}$ dosazujeme hodnotu jedna. COP byla vypočtena rovnicí 6.32.

$$N_m = D56d \cdot \left(E_{pom} + \frac{Q_{T\check{c}}}{COP} \right) [K\check{c}/MWh] \quad (6.2)$$

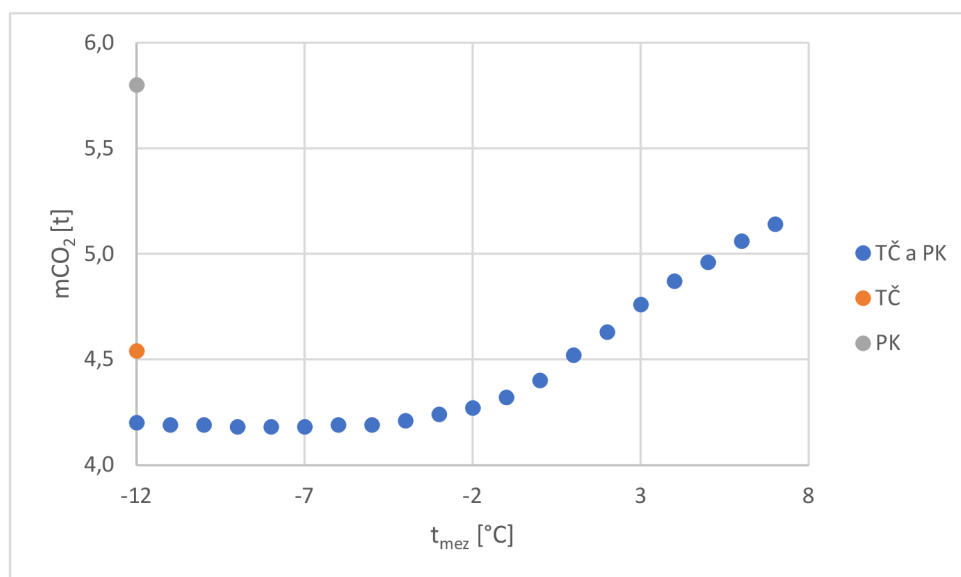


Obr. 6.6: Graf ceny za MWh tepla v závislosti na teplotě.

Pro graf je brána teplota vody na výstupu 45 °C. Opět došlo k menšímu zjednodušení, kdy účinnost plynového kotle se považuje po celou dobu 100 %, pomocná energie je 0,05 MWh jako u předchozího příkladu. Ceny elektřiny a plynu jsou brány podle ceníku společnosti ČEZ z dubna roku 2022. K průtnutí křivek dochází v tomto případě při 5 °C, což přibližně odpovídá COP rovno 4. Menší rozdíl oproti grafu u obrázku číslo 6.2 (minimum se nachází při 4 °C) je způsoben právě pomocnou energií, která se u bilančního modelu počítala pro každý interval zvlášť. Pro vysvětlení však tento malý rozdíl není důležitý.

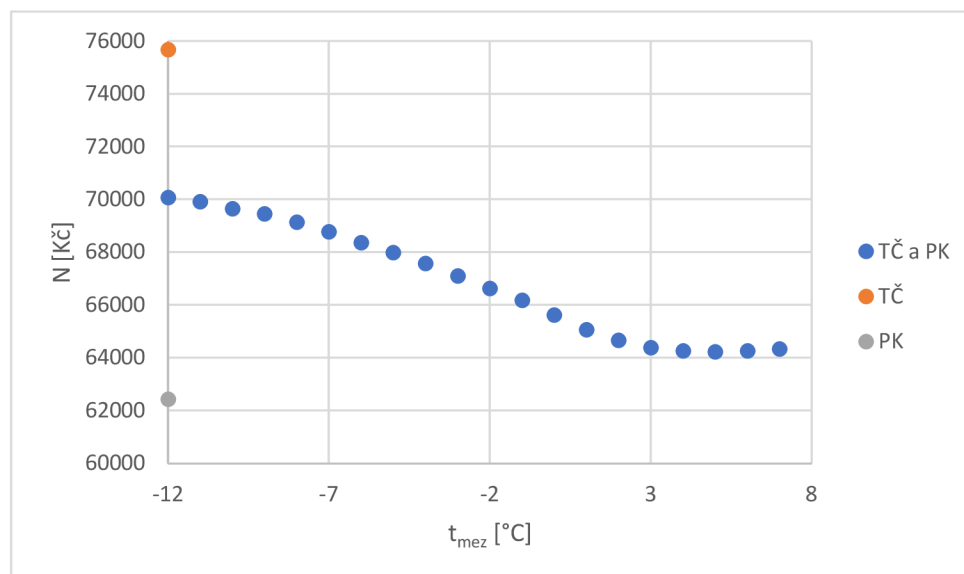
6.3. Výsledné hodnoty při změně parametru t_{mez}

Fungováním hybridního vytápění se nemusí ovlivňovat jen hodnota COP, ale taky venkovní teplota. Největší rozdíl v tomto případě je, že tepelné čerpadlo vypíná jak pro ohřev TUV, tak pro vytápění ve stejnou dobu. Ostatní parametry zůstávají stejné, proto i hodnoty pro plynový kotel a tepelné čerpadlo se nemění. Teplota, kdy bude docházet k vypínání tepelného čerpadla, se bude měnit od 7 °C do -12 °C se změnou vždy o 1 °C. Jednotlivé popisy se pak zaměří hlavně na hybridní formu vytápění, protože ta je nejzajímavější z hlediska budoucího využití. Opět se využívá funkce KDYZ z programu Excel, v tomto případě v obecné podobě $KDYZ(t_c \geq t_{mez}; \varphi_k, VYT, j; 0)$.



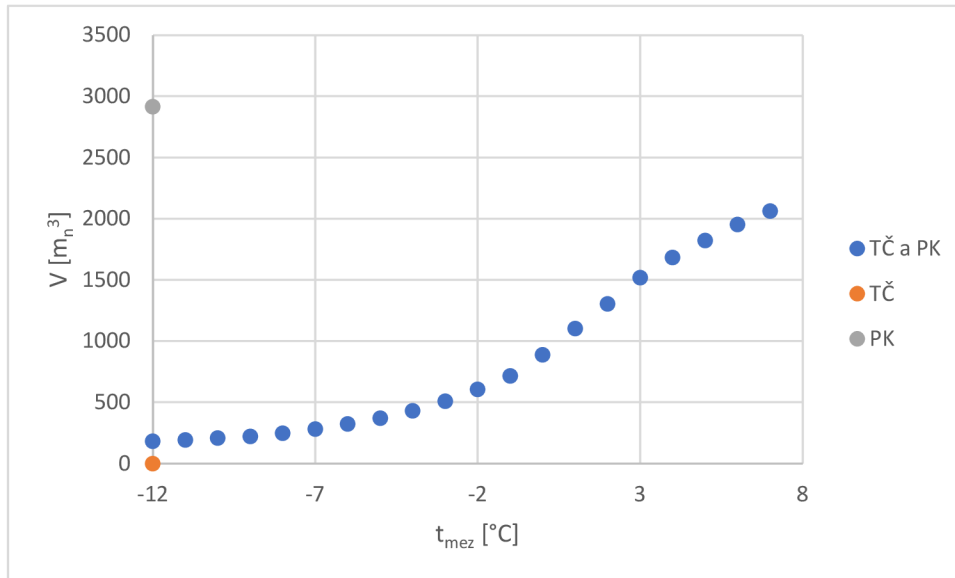
Obr. 6.7: Graf uvolněných emisí CO₂ při t_{mez}.

Ze získaných výsledků plyne, že nejlepších hodnot je dosaženo při -7 až -9 °C, kdy je uvolněno 4,18 tuny CO₂, což je ovšem mírné navýšení oproti variantě COP_{mez} při vytápění, navíc toto minimum se nachází zhruba o 2 °C výš.



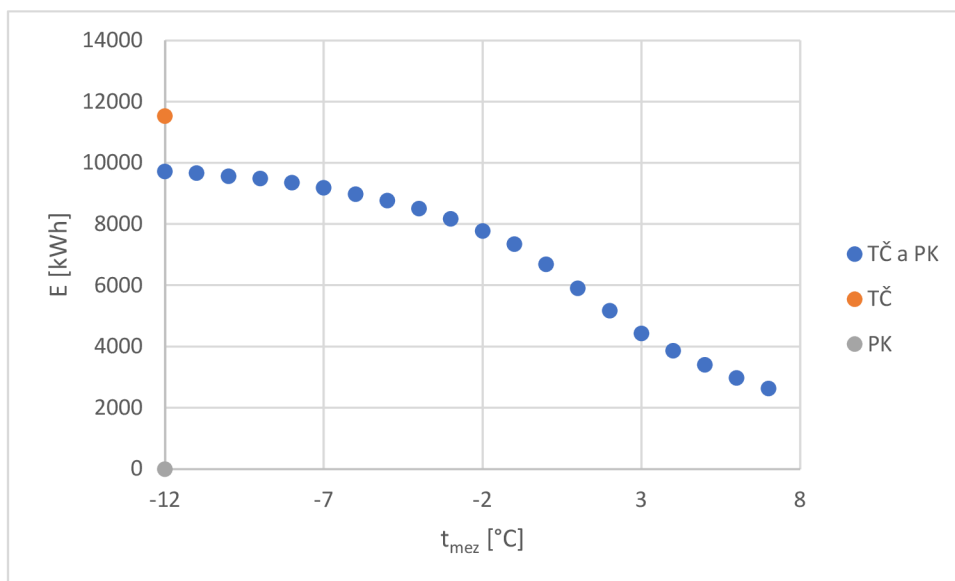
Obr. 6.8: Graf nákladů za roční provoz při t_{mez}.

Z grafu lze vidět, že minima se dosahuje při teplotě 5 °C, ale opět se jedná o menší zvětšení oproti předchozí variantě a při vyšší teplotě.



Obr. 6.9: Graf spotřeby zemního plynu při t_{mez} .

Při spotřebě zemního plynu vychází očekávaný průběh, kdy s častějším využitím kotle nám roste jeho spotřeba, ale neroste takovým způsobem, jak u předchozího výpočtu. Například při vytápění $COP_{mez} = 4$, což odpovídá teplotě zhruba 4 °C , je spotřeba cca 1950 m^3 plynu, avšak při t_{mez} se spotřebuje 1680 m^3 , při $COP_{mez} = 3$ (cca -6 °C) kotel spálí 560 m^3 , při t_{mez} to je 325 m^3 .



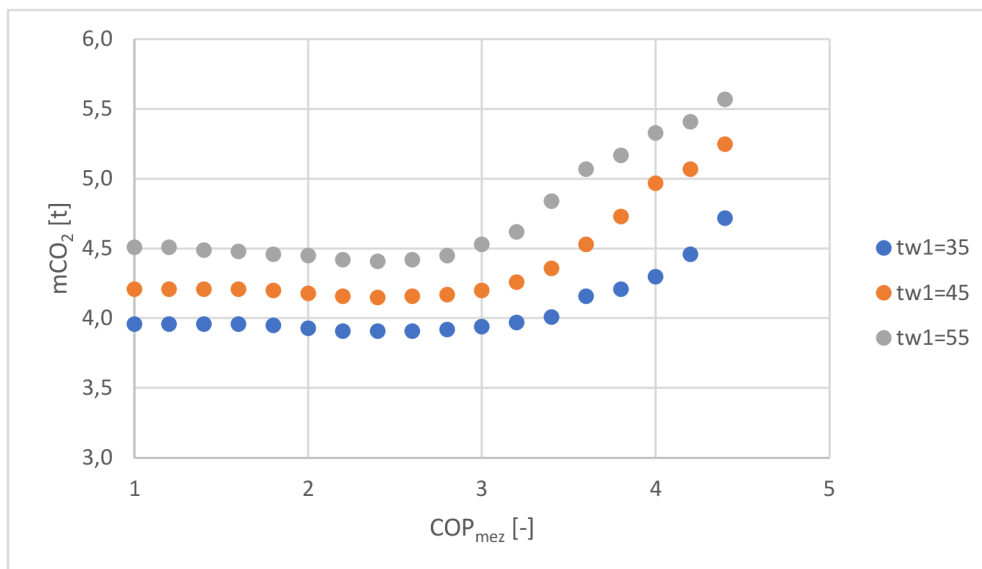
Obr. 6.10: Graf spotřeby elektrické energie při t_{mez} .

Z dat vychází opět očekávané výsledky, že čím více se vytápí tepelným čerpadlem, tak roste spotřeba elektřiny. Dochází zde ovšem k růstu spotřeby, oproti COP_{mez} , což se dá odhadnout i z předchozího grafu. Konkrétně při $COP_{mez} = 3$, což odpovídá přibližně $t_{mez} = -6\text{ °C}$, narostla spotřeba o více jak 1000 kWh , při $COP_{mez} = 4$, $t_{mez} = 4\text{ °C}$, pak došlo ke zvýšení o více jak 900 kWh .

Z výsledných grafů vychází z hlediska ekonomického a emisního lepší varianta s COP_{mez} , kdy dokážeme lépe využít schopností tepelného čerpadla a plynového kotle, proto následující modely budou využívat právě tuto variantu.

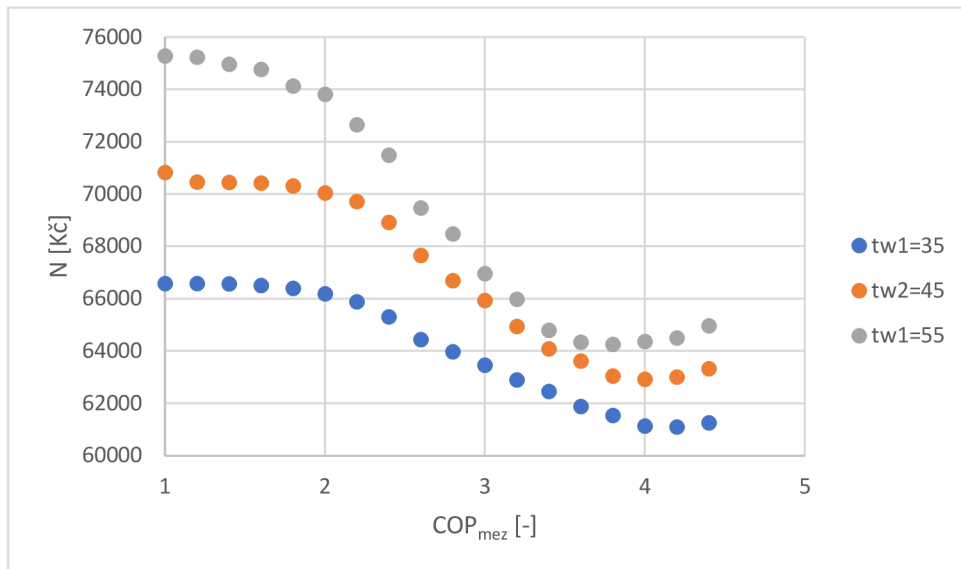
6.4. Výsledné hodnoty při změně teploty přívodní otopné vody

Mezi hlavní přednosti hybridní formy vytápění má patřit schopnost ohřívat vodu pro vytápění i na vyšší hodnoty, aby se nemusel předělávat topný systém v objektu. Jak už bylo zmíněno, tak dnešní tepelná čerpadla sice zvládají ohřívat vodu na 55 °C a případně ještě vyšší, to ovšem neznamená, že je jejich provoz zrovna optimální. Hlavně při nízkých teplotách si musíme dopomáhat elektrickým vytápěním. Naproti tomu připadá v úvahu i varianta s teplotou vody 35 °C, kdy roste výkon čerpadla. Proto další část studie se věnuje právě výsledkům při zvýšení teploty v systému na 55/45 °C a snížení na 35/25 °C. Pro výkon tepelného čerpadla při vytápění jsou použity jiné rovnice, 6.31 a 6.29. Ostatní parametry zůstávají zachovány. Mění se parametr COP_{mez} a to od hodnoty 4,4 po 1,0 vždy se změnou o 0,2. Pro lepší porovnání je místo grafů pro jednotlivé teploty udělán vždy jeden společný, ale pouze pro hybridní model vytápění.



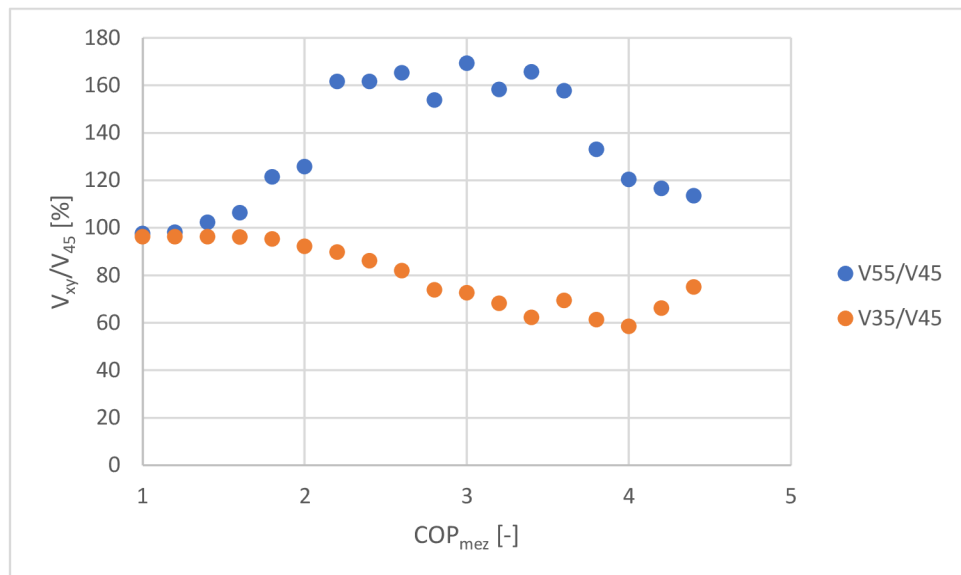
Obr. 6.11: Graf uvolněných emisí CO_2 .

Z výsledných hodnot lze vypočítat, že nejmenší emise CO_2 se dosahuje, když COP_{mez} je rovna přibližně 2,4. Pro všechny varianty je tato hodnota přibližně stejná. Toto minimum ovlivňuje hlavně COP faktor, který se počítá pro všechny rovnice stejně. Menší vliv na rozdíl mezi jednotlivými teplotami má energie pomocná, ovšem právě ona způsobuje posunutí minima směrem doprava na ose COP_{mez} .



Obr. 6.12: Graf nákladů na provoz při tw_1 .

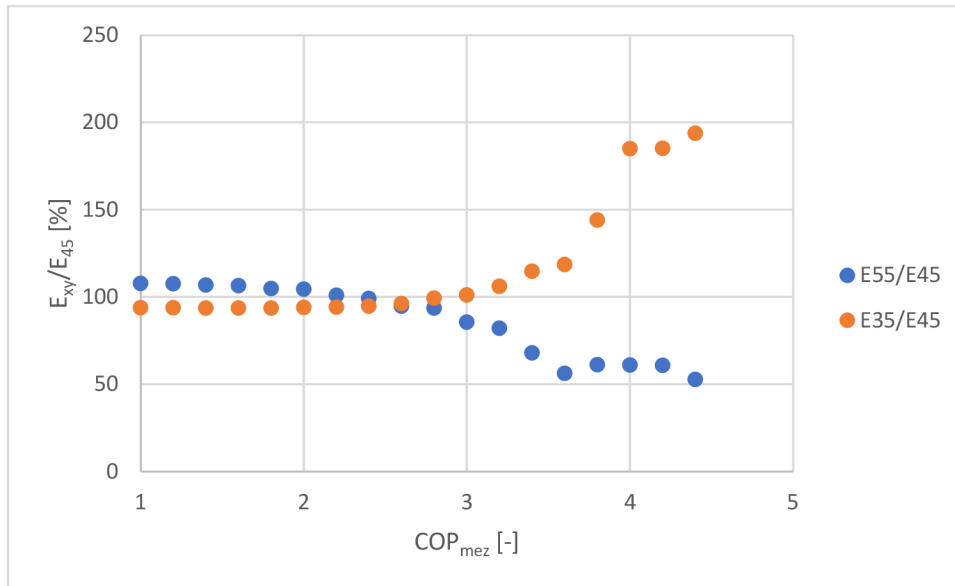
Pro nejnižší náklady je nejvhodnější nastavení pro COP_{mez} přibližně na hodnotu 4. Jedná se o bod, kdy spotřeba elektřiny klesne na tolik, že se vyplatí více provozovat tepelné čerpadlo než plynový kotel. Pro připomenutí v současné době je poměr ceny plynu a elektřiny 0,33. To znamená, že pokud bychom zanedbali pomocnou energii, tak ideální bod COP_{mez} by byl právě 0,33. Ovšem i v tomto případě právě tato energie posouvá ideální bod o trochu výše. Dalším zajímavým poznatkem je, že při teplotě vody 35 °C a COP_{mez} větším jak 3,8 dojde k poklesům nákladů pod plynový kotel. Největší úspory je dosahováno v bodě 4,2, kdy ale roční úspora činí cca 500 Kč.



Obr. 6.13: Graf porovnání spotřeby plynu při teplotách vody 45 a 55 °C.

Při porovnání spotřeby zemního plynu vyšlo celkem očekávané navýšení při vyšší teplotě vody a pokles při nižší teplotě. Mnohem zajímavější je však skutečnost, že změny nejsou konstantní, ale poměrně výrazně se mění v závislosti na COP_{mez} . Z hlediska emisí CO_2 a nákladů na provoz se zdá jako ideální hodnota 3,5. Tehdy ovšem dochází k největšímu

rozdílům, kdy dochází k nárůstu o 60 % a případně poklesu o 40 %. Tento rozdíl je ještě výraznější, pokud si uvědomíme, že u plynového kotle došlo k rozdílu bez ohledu na teplotu o cca 1,5 %. Důvod tak razantního nárůstu a poklesu je jiná doba provozu tepelného čerpadla. Při hodnotě COP_{mez} 3,5 se při vytápění vody na 35 °C vypíná při -8 °C, při ohřívání vody na 45 °C při -1 °C a ohřevu na 55 °C už při 2 °C. Vytápění pak probíhá pomocí kotle, který tak má provozní dobu mnohem větší, proto tak razantní nárůst spotřeby.



Obr. 6.14: Poměr spotřeby elektrické energie při vytápění na 45 a 55 °C.

Z porovnání vychází opět zajímavé zjištění, že do COP_{mez} 2,5 je spotřeba elektrické energie poměrně srovnatelná, byť malé rozdíly tam být musí. Jedná se o období, kdy dochází k co největšímu využití tepelného čerpadla a topí skoro celou zimní sezónu. Lze si to zjednodušeně představit jako vytápění pouze tepelným čerpadlem. Čím vyšší teplotu vody požadují, tím více elektřiny spotřebuje. Případné vypínání probíhá až při nízkých teplotách, kterých do roka tolik není, proto se to výrazně nepromítne ani do grafu. K rozdílům dochází až od bodu, kdy tepelné čerpadlo začíná nahrazovat plynový kotel a spotřeba elektřiny tím pádem výrazně poklesne. Čím je nižší teplota otopné vody, tím později se čerpadlo vypne, a proto má v druhé části grafu nejvyšší spotřebu varianta ohřevu vody na 35 °C.

6.5. Vyhodnocení pro další varianty bilančního modelu

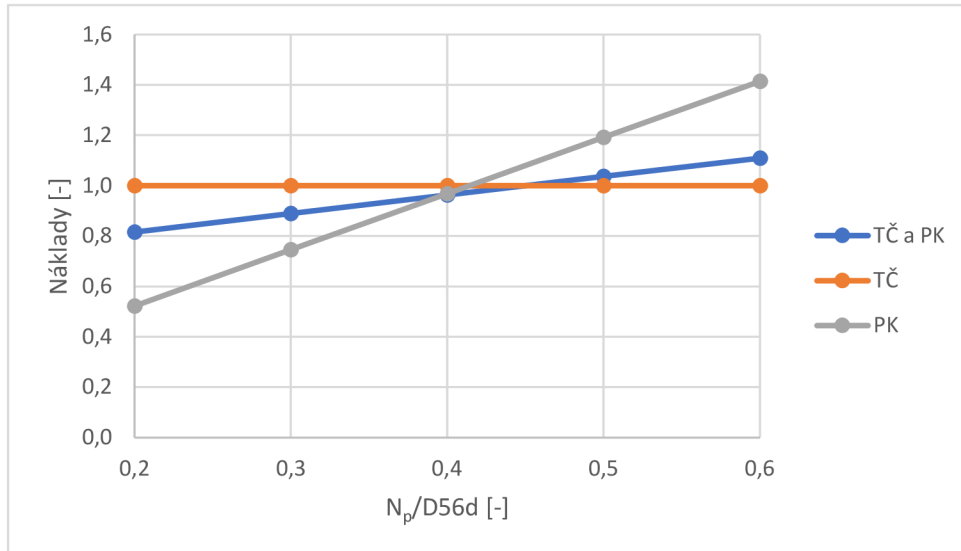
Ze získaných údajů lze vyvodit závěr, že teplota vody v otopném systému nemá vliv na změnu optimálního nastavení COP_{mez} , která vychází u obou případů přibližně stejně. Pro co nejnižší emise se ideální číselná hodnota pohybuje od 2,2 do 2,6 a pro ekonomický provoz pak mezi 3,8 až 4,2. Co se však mění, je teplota, kdy dochází k vypnutí tepelného čerpadla, která s vyšší teplotou otopné vody klesá, což způsobuje i zmenšení doby jeho provozu, který má za následek výraznou změnu spotřeby zemního plynu a elektrické energie.

Pokud se má dosahovat dobrých výsledků jak z hlediska emisí, tak ekonomiky, pak by se měl bilanční model pohybovat v rozsahu COP_{mez} mezi 3 až 4. Jako kompromisní varianta pro další výpočty je zvolena hodnota 3,4.

6.6. Možné ekonomické varianty při změně ceny elektřiny a plynu

Z předchozích výpočtů bylo možné určit optimální hodnoty pro co nejlepší ekonomiku provozu při současné situaci. Vzhledem k tomu, že ceny elektřiny a plynu se poslední dobou poměrně rychle mění, je dobré zjistit, jak by se měnily náklady na provoz bilančního modelu

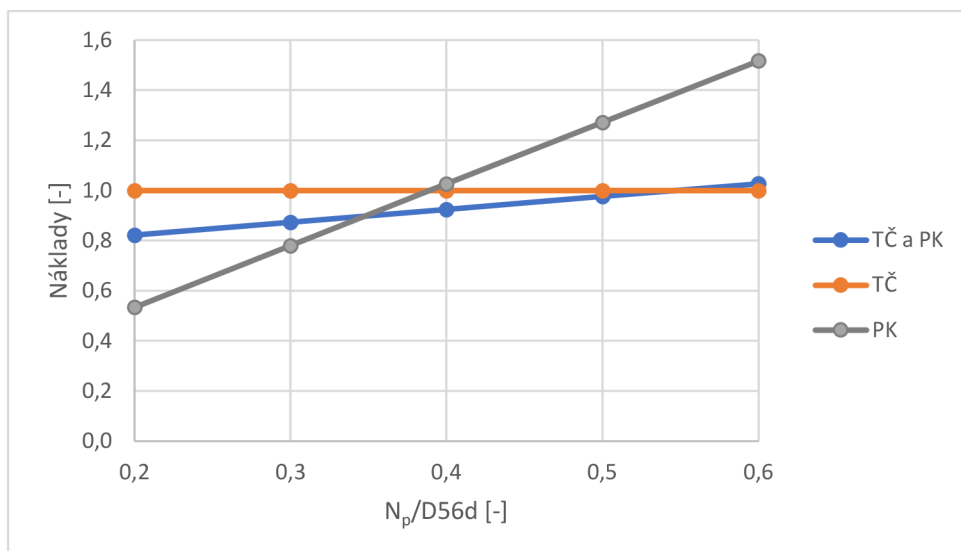
v porovnání s tepelným čerpadlem a plynovým kotle. V grafu nebudou uváděny konkrétní číselné hodnoty, ale poměr ceny plynu a elektřiny. Ostatní vstupní parametry zůstávají stejné jako u první varianty, to znamená, že se počítá s teplotním spádem 45/35 °C a pro parametr COP_{mez} je volena hodnota 3,4. Poměr cen se volí v rozmezí od 2/10 po 6/10.



Obr. 6.15: Graf porovnání nákladů na provoz $tw1=45\text{ °C}$.

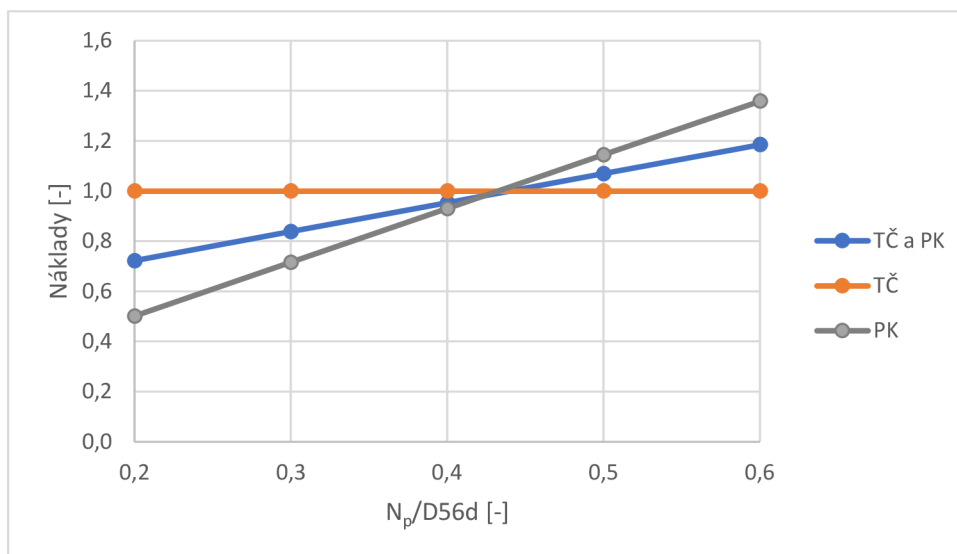
Z dat vyplývá, že do poměru cen přibližně 0,4 vychází nejlevněji na provoz plynový kotel, od 0,4 do 0,45 pak hybridní model a od 0,45 výše má nejlepší ekonomiku provozu tepelné čerpadlo. Hybridní varianta má ještě jednu výhodu, její náklady provozu jsou ze všech tří variant nejméně závislé na změně cen za komodit.

Velice pozitivní vliv na ekonomiku provozu pak má zmenšení teploty napájecí vody. Proto je zde i druhý graf, kdy je teplotní spád 35/25.



Obr. 6.16: Graf porovnání nákladů na provoz $tw1=35\text{ °C}$.

Při změně teploty vody na 35 °C se rozšiřuje oblast, kdy vychází hybridní varianta vytápění nejlépe. Z grafu lze vyčíst, že se jedná o oblast od 0,35 do 0,55, což je podstatný rozdíl oproti předchozí variantě.

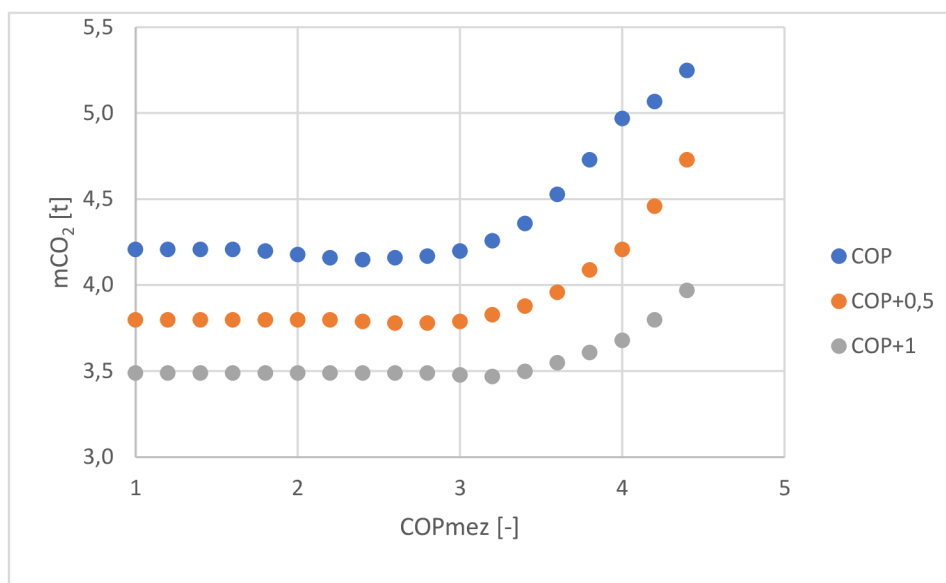


Obr. 6.17: Graf porovnání nákladů na provoz $tw1=55$ °C.

Pro úplné doplnění je zde ještě graf pro 55 °C, kdy lze vidět, že hybridní model je nejlevnější pouze ve velice krátkém úseku při hodnotě cca 0,433. Po ekonomické stránce provozu by se toto zařízení moc neuplatnilo. Zlepšení by přineslo dražší tepelné čerpadlo s lepším COP faktorem, které by však bylo mnohem dražší na provoz a počáteční investice by se pravděpodobně nikdy nevrátila.

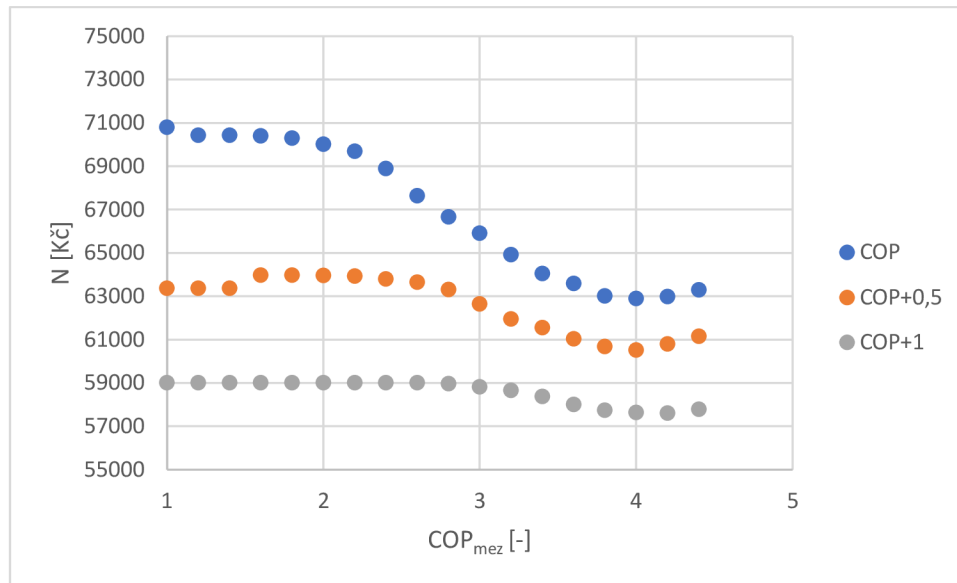
6.7. Výsledné hodnoty při změně COP

Další z faktorů, který by mohl ovlivňovat produkci CO₂ a nákladů je, COP faktor. Každé tepelné čerpadlo ho má trochu jiný, proto další změnou bude úprava rovnice 6.32, kdy se bude měnit poslední člen. Ten se zvětší o hodnotu 0,5 a 1. Zmenšení nelze provést, protože by COP vycházelo menší jak 1 už od -6 °C při ohřevu TUV, -14 °C při vytápění. COP_{mez} se opět mění od 4,4 do 1,0. Pro lepší porovnání budou jednotlivé výsledky dány vždy do jednoho grafu.



Obr. 6.18: Graf uvolněných emisí CO₂ při změně COP.

Z výsledků z bilančního modelu je vidět pokles CO_2 v celém spektru COP_{mez} , kdy zmenšení probíhalo rovnoměrně v celém rozsahu. Případné rozdíly jsou způsobeny tím, že při zvýšení COP čerpadla došlo k jeho vypnutí při nižší teplotě. V případě COP+0,5 došlo k vypnutí o 4 °C později, v případě COP+1 o 8 °C nižší oproti původní hodnotě. Pokles emisí je v prvním případě o 10 až 12 %, v druhém případě o 16 až 24 %.

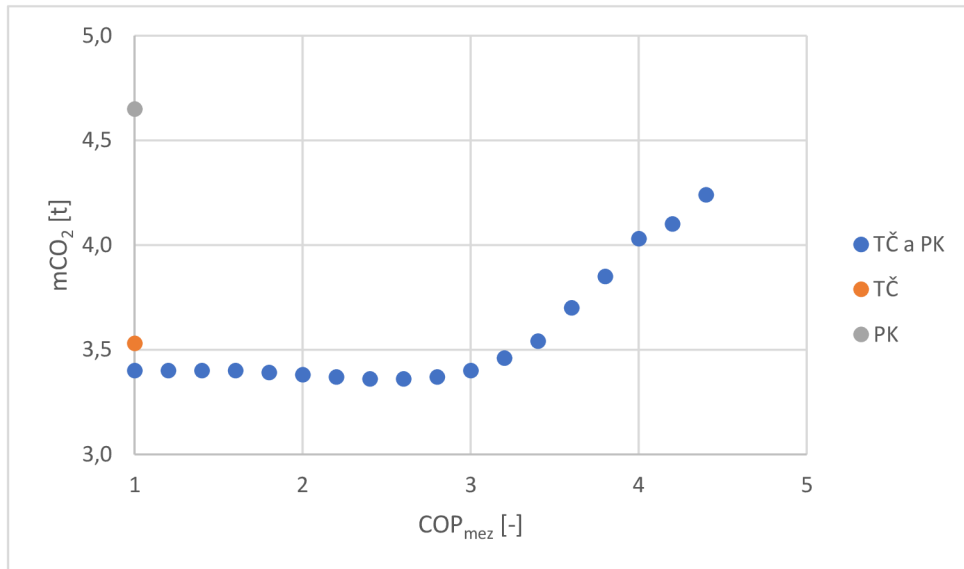


Obr. 6.19: Graf nákladů na provoz při změně COP.

U nákladů na provoz si lze dobře povšimnout věci, že při zvýšení COP čerpadla dojde k situaci, kdy při zmenšování COP_{mez} nedochází k žádným změnám. Tehdy totiž nastává situace, že tepelné čerpadlo se nikdy při svém provozu na takto nízkou hodnotu COP nedostane, a proto nedochází k žádným změnám. Čerpadlo jede po celou dobu topného období a nevypíná se. Co se úspor týká, tak při COP_{mez} větší jak 3 dochází k zmenšení provozních nákladů o 4 % při COP+0,5, respektive 9 % při COP+1. Při menší hodnotě jak 3 úspory rostou až na finální hodnoty 10 % a 17 %.

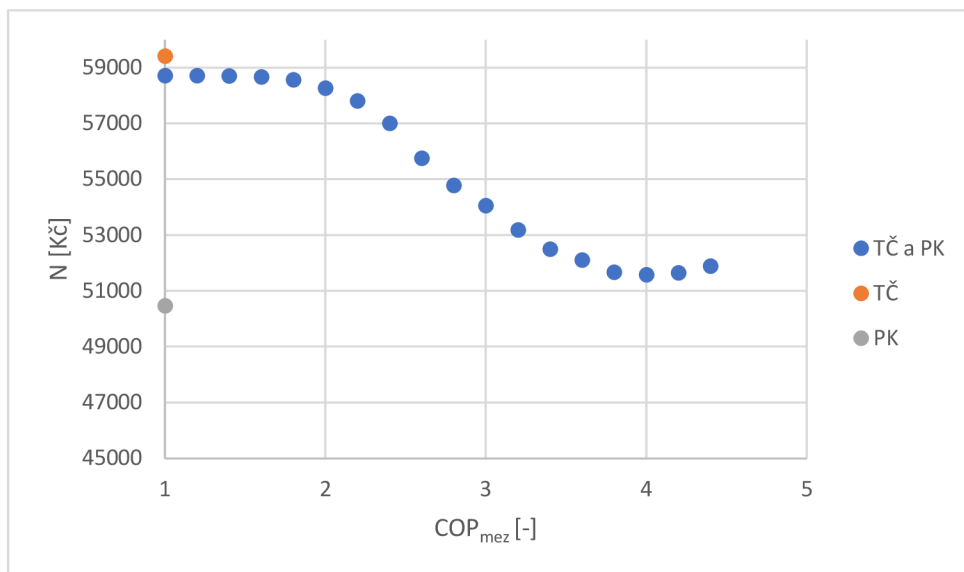
6.8. Výsledné hodnoty při změně tepelné ztráty objektu

Dalším parametrem, jenž výrazně ovlivňuje náklady, je tepelná ztráta objektu. Při současných parametrech, které jsou zadané, vychází sezónní topný faktor čerpadla 2,51. Ten by se měl optimálně pohybovat mezi 2,5 až 3. Pro vyšší hodnoty by bylo nutné volit silnější a dražší tepelné čerpadlo, při menších hodnotách zase nedochází k optimálnímu využití. Je zde nutné zdůraznit, že v této práci se bavíme o sezónním topném faktoru tepelného čerpadla vzduch/voda, který zahrnuje jak vytápění, tak ohřev TUV. Pokud bychom brali hodnoty pouze pro vytápění, nebo jen pro ohřev TUV, tak by se výsledky dost lišily. Dále si je nutné uvědomit, že jiné dražší typy tepelných čerpadel, například země/voda, sice mají vyšší investiční náklady, ale díky menší teplotní změně země dosahují i podstatně lepších výsledků, tehdy dosahuje sezónní topný faktor hodnot 4,5 až 5. Všechny tyto věci jsou zde řečeny, protože na internetu se dají dohledat hodnoty k sezónnímu topnému faktoru od 2 až 5, vždy je ale nutné si zjistit, pro jaké účely bylo čerpadlo testováno, o jaký se jednalo typ a případné další informace. Pro parametrický model je tepelná ztráta objektu snížena na 7,5 kW. Ostatní parametry zůstávají zachovány. Při těchto podmínkách je SPF pro čerpadlo 2,8.



Obr. 6.20: Graf uvolněných emisí CO₂ při $Q_c=7,5$ kW.

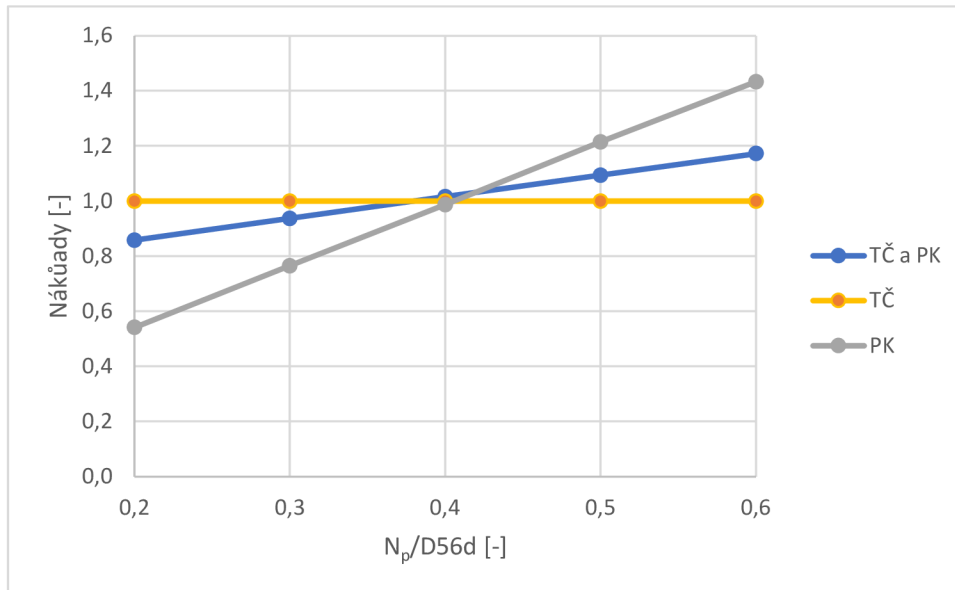
V porovnání s grafem při ztrátě 10 kW došlo k celkovému poklesu, ale minimum se stále nachází na hodnotě COP_{mez} 2,4. Došlo tak k ověření předchozích výsledků.



Obr. 6.21: Graf nákladů za roční provoz při $Q_c=7,5$ kW.

I v tomto případě se potvrdily údaje získané z předchozích grafů, kdy minimálních provozních údajů se dosáhne při hodnotě COP_{mez} 4.

Údaje o spotřebě zemního plynu a elektřiny nejsou uvedeny, místo toho je zde zpracován graf pro poměr ceny, zda nedošlo k nějaké změně, protože případní uživatelé zohledňují hlavně finance a za jakých podmínek se zařízení vyplatí provozovat.

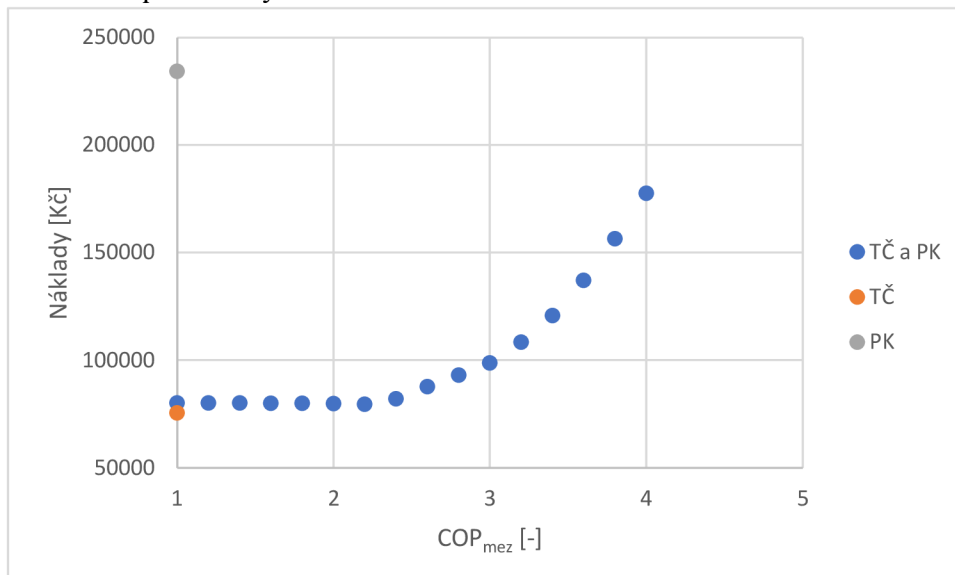


Obr. 6.22: Graf porovnání nákladů při změně ceny při $Q_c=7,5$ kW.

V tomto případě došlo ke změně, kdy hybridní model vytápění nikdy nevychází lépe než další dvě varianty. K protnutí jednotlivých křivek došlo při podobných hodnotách $N_p/D56d$ jako u předchozí varianty. Teplota vody je pro připomenutí 45 °C.

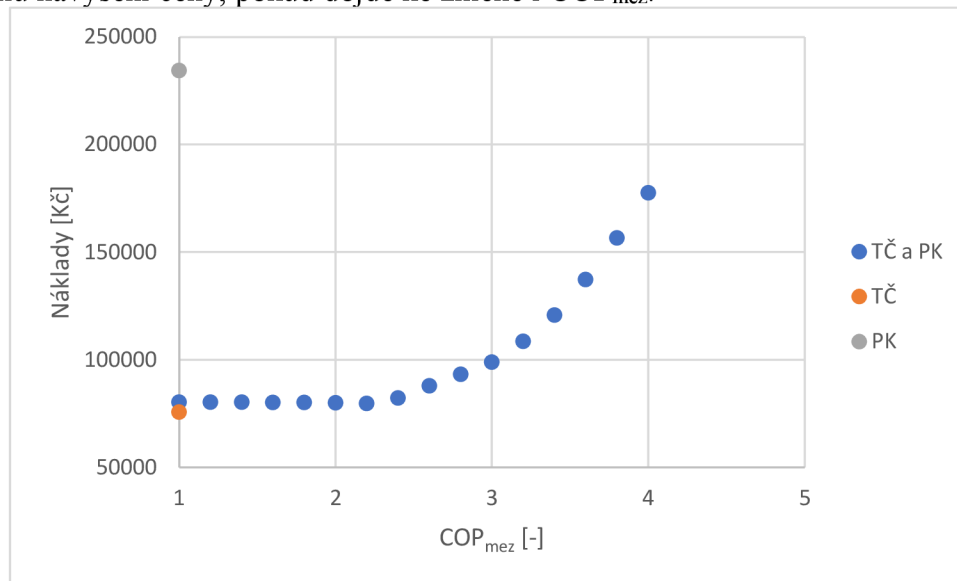
6.9. Náklady za provoz při změně ceny paliva a novém COP_{mez}

Grafy porovnání nákladů z minulých kapitol využívaly COP_{mez} 3,4, což bylo bráno jako optimum z hlediska nákladů a emisí při současných podmínkách. Vystává zde totiž problém, že při změně ceny paliva se posouvá i optimální hodnota nastavení COP_{mez} pro co nejekonomičtější provoz. Proto se tato kapitola zaměří na hledání nového optima z hlediska nákladů, pokud se cena z jedné z komodit, v tomto případě plynu, výrazně zvýší a to čtyřnásobně. Teplota vody bude stále 45 °C.



Obr. 6.23: Graf porovnání nákladů na provoz při $Q_c = 10$ kW a změně ceny paliva.

Nový optimální bod z hlediska nákladů je COP_{mez} 2,2. Pro připomenutí při současných cenách se pohybuje okolo hodnoty 4. Došlo tedy k výraznému posunu. Hybridní forma vytápění stále nevychází jako nejvýhodnější, ale v porovnání s plynovým kotlem nedošlo k tak razantnímu navýšení ceny, pokud dojde ke změně i COP_{mez} .



Obr. 6.24: Graf porovnání nákladů při $Q_c = 7,5$ kW a změně ceny paliva.

Pro potvrzení výsledků je zde graf také pro objekt s tepelnou ztrátou 7,5 kW. Minimálních nákladů se dosahuje při COP_{mez} 2. Celkově hybridní model vytápění umožňuje vytápět vždy s náklady blízkými buď tepelnému čerpadlu, nebo plynovému kotli. Přitom má stále výhodu nižších emisí.

7. Realizace pro konkrétní objekt

Poslední část práce se zaměří na konkrétní objekt. Bude se jednat o rodinný dům s dvěma poschodími a obytnou plochou menší než 100 m², ve kterém trvale žijí dvě osoby. Objekt se nachází v podhorské oblasti, proto jsou vzaty údaje z klimatických záznamů pro nejbližší dostupné město vzdálené 6 km, konkrétně Rychnov nad Kněžnou. Aby se nemusel předělávat stávající topný systém, tak se uvažuje s teplotou vody primárně 55 °C, v případě příliš pesimistických výsledků i hodnota 45 °C. Další údaj, který se bude moci měnit, je COP_{mez} .

Tab. 7.1: Zadané parametry pro konkrétní objekt.

Venkovní výpočtová teplota t_{eN}	-15 °C
Střední denní venkovní teplota t_{em}	13 °C
Délka topného období d	254 dnů
Průměrná teplota během otopného období t_{es}	3,5 °C
Tepelná ztráta objektu Q_c	5 kW
Průměrná vnitřní výpočtová teplota t_{is}	18 °C
Návrhová teplota přívodní otopné vody $t_{w1,N}$	55 °C
Návrhová teplota vratné otopné vody $t_{w2,N}$	45 °C
Teplota studené vody t_1	10 °C
Teplota ohřáté vody t_2	55 °C
Celková potřeba teplé vody za 1 den V_{2p}	0,12 m ³ /den
Cena elektřiny D56d	6300 Kč/MWh
Cena zemního plynu N_p	2080 Kč/MWh

7.1. Potřeba tepla pro vytápění

Vzhledem k tomu, že se využívají rovnice, jež byly vypsány v kapitole 6.2 Potřeba tepla, tak nejsou zde znova vysvětlovány a je do nich rovnou dosazováno.

Vytápěcí denostupně

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) [K \cdot dny] \quad (6.5)$$

$$3683 = 254 \cdot (18 - 3,5) [K \cdot dny] \quad (6.5)$$

Opravný součinitel

$$\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_D [-] \quad (6.6)$$

$$0,8 = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 [-] \quad (6.6)$$

Roční potřeba tepla pro vytápění

$$Q_{VYT,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_{eN})} [kWh] \quad (6.7)$$

$$11872 = \frac{0,8}{0,95 \cdot 0,95} \cdot \frac{24 \cdot 5 \cdot 3683}{(318 - 15)} [kWh] \quad (6.7)$$

Počet hodinostupňů výpočtového teplotního intervalu

Od vzorce 6.7 je nutné začít počítat mezivýsledky pro jednotlivé intervaly zvlášť. Z těchto důvodů se využívá programu Excel, protože počítání pomocí kalkulačky by bylo prakticky nemožné. Pro ukázkou je zde uveden počátek výpočtu pro interval $t_e = 5,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hodnota T_j se pro připomenutí bere z normy TNI 73 0351.

$$DH_j = T_j \cdot (t_{is} - t_e) [K \cdot h] \quad (6.8)$$

$$3900 = 312 \cdot (18 - 5,5) [K \cdot h] \quad (6.8)$$

Potřeba tepla na vytápění pro jednotlivé intervaly

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT,r} \cdot \frac{DH_j}{DH_r} [kWh] \quad (6.9)$$

$$552,50 = 11872 \cdot \frac{3900}{83800} [kWh] \quad (6.9)$$

V této fázi je znám základní údaj, který vstupuje do následujících výpočtů pro konkrétní modely. Pro jednotlivé teplotní intervaly se dopočítává teplota vody pomocí rovnic 6.10 až 6.13. Ty však nebudou teď uvedeny, místo toho je v jedné z dalších kapitol print screen obrazovky z Excelu včetně těchto výsledků.

7.2. Potřeba tepla pro přípravu teplé vody

Po vypočtení potřeby tepla na vytápění se postupuje obdobně při výpočtu tepla pro ohřev TUV. Opět zde nejsou rovnice podrobně vysvětlovány, protože k tomu došlo v kapitole 6.2, proto následuje samotné dosazení.

Denní potřeba tepla pro ohřev teplé vody

$$Q_{TUV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \cdot 10^{-3} [kWh] \quad (6.14)$$

$$7,84 = (1 + 0,5) \cdot \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 0,1 \cdot (55 - 10)}{3600} \cdot 10^{-3} [kWh] \quad (6.14)$$

Roční potřeba tepla pro ohřev teplé vody

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot (N - d) [kWh] \quad (6.15)$$

$$2690 = 7,84 \cdot 254 + 0,8 \cdot 7,84 \cdot (365 - 254) [kWh] \quad (6.15)$$

Potřeba tepla na ohřev teplé vody pro jednotlivé intervaly

$$Q_{TUV,j} = Q_{TUV,r} \cdot \frac{T_j}{8760} \text{ [kWh]} \quad (6.16)$$

$$95,8 = 2690 \cdot \frac{312}{8760} \text{ [kWh]} \quad (6.16)$$

7.3. Výpočet bilančního modelu

Samotný výpočet bilančního modelu vyžaduje vypočtení více než 100 rovnic pro jeden teplotní interval, kterých je 32, a další rovnice pro celkovou sumarizaci a zhodnocení. Celkově se řeší více než 3000 rovnic pro konkrétní parametry, které se počítají pro výpočet všech tří bilančních modelů – tepelné čerpadlo, plynový kotel a hybridní model vytápění. Proto zde nejsou jednotlivé rovnice s dosazením uvedeny, nicméně se jedná o ty stejné, které byly zmíněny v přechozích kapitolách, konkrétně rovnice 6.17 až 6.63. Místo toho jsou zde dva print screeny obrazovky právě z výpočtu bilančního modelu. Jedná se o hodnoty při teplotě vody na výstupu 55 °C a COP_{mez} 3.

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
2	DH _j [K·h]	Q _{TUV,j} [kWh]	t _{k2} [°C]	Δtw [°C]	Δt	COP _{TUV,j}	Φ _{k,TUV,j} [kW]	Φ _{k,TUV,j} [kW]	Q _{k,TUV,j} [kWh]	Q _{č,TUV,j} [kWh]	T _{č,TUV,j} [h]
3	0	0,00	55	45	72,5	1,20	2,73	0,00	0,00	0,00	0
4	173	1,54	55	45	71,5	1,27	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00
5	168	1,54	55	45	70,5	1,34	3,07	0,00	0,00	0,00	0,00
6	455	4,30	55	45	69,5	1,41	3,24	0,00	0,00	0,00	0,00
7	441	4,30	55	45	68,5	1,48	3,41	0,00	0,00	0,00	0,00
8	397	3,99	55	45	67,5	1,55	3,58	0,00	0,00	0,00	0,00
9	708	7,37	55	45	66,5	1,62	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1226	13,21	55	45	65,5	1,69	3,92	0,00	0,00	0,00	0,00
11	880	9,83	55	45	64,5	1,76	4,09	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1537	17,81	55	45	63,5	1,83	4,26	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1836	22,11	55	45	62,5	1,90	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00
14	2107	26,41	55	45	61,5	1,97	4,60	0,00	0,00	0,00	0,00
15	2092	27,34	55	45	60,5	2,04	4,77	0,00	0,00	0,00	0,00
16	2430	33,17	55	45	59,5	2,11	4,94	0,00	0,00	0,00	0,00
17	2967	42,39	55	45	58,5	2,18	5,11	0,00	0,00	0,00	0,00
18	3342	50,06	55	45	57,5	2,25	5,28	0,00	0,00	0,00	0,00
19	3627	57,13	55	45	56,5	2,32	5,45	0,00	0,00	0,00	0,00
20	5643	93,68	55	45	55,5	2,39	5,63	0,00	0,00	0,00	0,00
21	6930	121,63	55	45	54,5	2,46	5,80	0,00	0,00	0,00	0,00
22	6501	121,01	55	45	53,5	2,53	5,97	0,00	0,00	0,00	0,00
23	6712	132,99	55	45	52,5	2,59	6,14	0,00	0,00	0,00	0,00
24	5104	108,11	55	45	51,5	2,66	6,31	0,00	0,00	0,00	0,00
25	4266	97,06	55	45	50,5	2,73	6,48	0,00	0,00	0,00	0,00
26	3900	95,83	55	45	49,5	2,80	6,65	0,00	0,00	0,00	0,00
27	3220	86,00	55	45	48,5	2,87	6,82	0,00	0,00	0,00	0,00
28	3402	99,51	55	45	47,5	2,94	6,99	0,00	0,00	0,00	0,00
29	3173	102,58	55	45	46,5	3,01	7,16	7,16	2391,36	102,58	14,33
30	3290	118,86	55	45	45,5	3,08	7,33	7,33	2836,81	118,86	16,22
31	2558	104,73	55	45	44,5	3,15	7,50	7,50	2557,76	104,73	13,96
32	2652	125,31	55	45	43,5	3,22	7,67	7,67	3129,87	125,31	16,34
33	2068	115,48	55	45	42,5	3,29	7,84	7,84	2948,50	115,48	14,73
34		845,25	55	45	38,4	3,58	8,54	8,54	23515,26	845,25	98,92

Obr. 7.1: Print screen z Excelu výpočet pro ohřev TUV.

Na prvním obrázku lze vidět údaje při výpočtu pro ohřev teplé užitkové vody. Mezi nejzajímavější údaje patří počet denostupňů, aktuální COP a výkon tepelného čerpadla v daném intervalu. Jedná se pouze o část tabulky, protože celá by se v rozumném měřítku na stránku nevešla.

	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
2	$Q_{p,vytaj}$ [kWh]	t_i [°C]	Δt_w [°C]	t_{w1} [°C]	t_{w2} [°C]	t_{k2} [°C]	t_{w2} [°C]	Δt [°C]	COP_{vytaji}	$\Phi_{k,teorj}$ [kW]	$\Phi_{k,vytaj}$ [kW]
3	0,00	18	10,76	57,23	46,47	57,23	46,47	74,73	1,05	2,35	0,00
4	24,44	18	10,45	56,34	45,89	56,34	45,89	72,84	1,18	2,67	0,00
5	23,73	18	10,15	55,45	45,30	55,45	45,30	70,95	1,31	2,99	0,00
6	64,46	18	9,85	54,55	44,70	54,55	44,70	69,05	1,44	3,31	0,00
7	62,48	18	9,55	53,65	44,10	53,65	44,10	67,15	1,57	3,64	0,00
8	56,17	18	9,24	52,74	43,50	52,74	43,50	65,24	1,71	3,96	0,00
9	100,30	18	8,94	51,83	42,89	51,83	42,89	63,33	1,84	4,29	0,00
10	173,61	18	8,64	50,91	42,27	50,91	42,27	61,41	1,97	4,62	0,00
11	124,67	18	8,33	49,98	41,65	49,98	41,65	59,48	2,11	4,95	0,00
12	217,74	18	8,03	49,05	41,02	49,05	41,02	57,55	2,24	5,28	0,00
13	260,10	18	7,73	48,11	40,38	48,11	40,38	55,61	2,38	5,61	0,00
14	298,49	18	7,42	47,16	39,74	47,16	39,74	53,66	2,51	5,94	0,00
15	296,30	18	7,12	46,21	39,08	46,21	39,08	51,71	2,65	6,27	0,00
16	344,25	18	6,82	45,24	38,43	45,24	38,43	49,74	2,79	6,61	0,00
17	420,33	18	6,52	44,27	37,76	44,27	37,76	47,77	2,92	6,94	0,00
18	473,38	18	6,21	43,29	37,08	43,29	37,08	45,79	3,06	7,28	7,28
19	513,83	18	5,91	42,30	36,40	42,30	36,40	43,80	3,20	7,62	7,62
20	799,35	18	5,61	41,31	35,70	41,31	35,70	41,81	3,34	7,96	7,96
21	981,75	18	5,30	40,30	34,99	40,30	34,99	39,80	3,48	8,30	8,30
22	920,98	18	5,00	39,28	34,28	39,28	34,28	37,78	3,62	8,65	8,65
23	950,80	18	4,70	38,24	33,55	38,24	33,55	35,74	3,76	8,99	8,99
24	723,07	18	4,39	37,20	32,80	37,20	32,80	33,70	3,91	9,34	9,34
25	604,35	18	4,09	36,14	32,04	36,14	32,04	31,64	4,05	9,69	9,69
26	552,50	18	3,79	35,06	31,27	35,06	31,27	29,56	4,19	10,05	10,05
27	456,17	18	3,48	33,97	30,48	33,97	30,48	27,47	4,34	10,41	10,41
28	481,95	18	3,18	32,85	29,67	32,85	29,67	25,35	4,49	10,77	10,77
29	449,51	18	2,88	31,72	28,84	31,72	28,84	23,22	4,64	11,13	11,13
30	466,01	18	2,58	30,56	27,98	30,56	27,98	21,06	4,79	11,50	11,50
31	362,31	18	2,27	29,37	27,10	29,37	27,10	18,87	4,94	11,87	11,87
32	375,70	18	1,97	28,16	26,19	28,16	26,19	16,66	5,09	12,25	12,25
33	292,97	18	1,67	26,90	25,23	26,90	25,23	14,40	5,25	12,63	12,63
34											

Obr. 7.2: Print screen z Excelu pro výpočet vytápění.

Na druhém obrázku si lze přečíst mezivýpočty při výpočtu vytápění. Vybraná část v sobě obsahuje mimo jiné výsledky z rovnic 6.10 až 6.13, COP faktor a výkon tepelného čerpadla v daném intervalu.

7.4. Výsledky z bilančního modelu

Pro lepší ovládání programu je vytvořena úvodní stránka, kam se zadávají vstupní údaje potřebné pro výpočet, v dolní části pak jsou výsledky pro zadané parametry. Celkem se sleduje 7 výsledků – energie pro ohřev TUV za rok, energie pro vytápění za rok, uvolněné emise CO₂, náklady, spotřeba plynu, spotřeba elektřiny a sezónní topný faktor. Poslední údaj, který se sledoval, byl poměr ceny elektřiny a plynu. Ten se využíval pro určení nejvýhodnějšího zdroje z hlediska ekonomiky, když se měnily ceny komodit. Pro lepší představu je zde print screen úvodní stránky.

Název	Symbol	Hodnota	Jednotka
Venkovní výpočtová teplota	t_{eN}	-15	°C
Střední denní venkovní teplota	$t_{e,m}$	13	°C
Délka topného období	d	254	dny
Průměrná teplota během otopného období	$t_{e,s}$	3,5	°C
Vytápění			
Tepelná ztráta objektu	Q_c	5	kW
Průměrná vnitřní výpočtová teplota	t_{is}	18	°C
Návrhová teplota přívodní otopná vody	$t_{w1,N}$	55	°C
Návrhová teplota vratná otopní vody	$t_{w2,N}$	45	°C
Ohřev TUV			
Teplota studené vody	t_1	10	°C
Teplota ohřáté vody	t_2	55	°C
Celková potřeba teplé vody za 1 den	V_{20}	0,1	m ³ /den
Ceny za palivo a elektřinu			
Cena elektřiny	D_{56d}	6300	Kč/MWh
Cena zemního plynu (k výhřevnosti)	N_p	2080	Kč/MWh
Poměr ceny plynu a elektřiny		0,33	
Mezní hodnota COP	COP_{mez}	3	
Výsledky			
Celková potřeba energie pro vytápění za rok	$Q_{vyt,r}$	11871,67	kWh
Celková potřeba energie pro ohřev TUV za rok	$Q_{tuv,r}$	2690,55	kWh
Shrnutí tepelné čerpadlo+kotel			
Uvolněné emise CO ₂	mCO_2	2,05	t
Náklady	N	33839,8	Kč
Spotřebované množství zemního plynu	V	359,9	m ³
Spotřebované množství elektřiny	E	3393,6	kWh
Sezónní topný faktor	SPF	3,19	
Shrnutí tepelné čerpadlo			
Uvolněné emise CO ₂	mCO_2	2,08	t
Náklady	N	36270,3	Kč
Spotřebované množství zemního plynu	V	0,0	m ³
Spotřebované množství elektřiny	E	5281,0	kWh
Sezónní topný faktor	SPF	2,74	
Shrnutí kotel			
Uvolněné emise CO ₂	mCO_2	2,78	t
Náklady	N	30959,6	Kč
Spotřebované množství zemního plynu	V	1397,3	m ³
Spotřebované množství elektřiny	E	0,00	kWh

Obr. 7.3: Print screen Excel úvodního listu.

7.5. Vyhodnocení výsledků

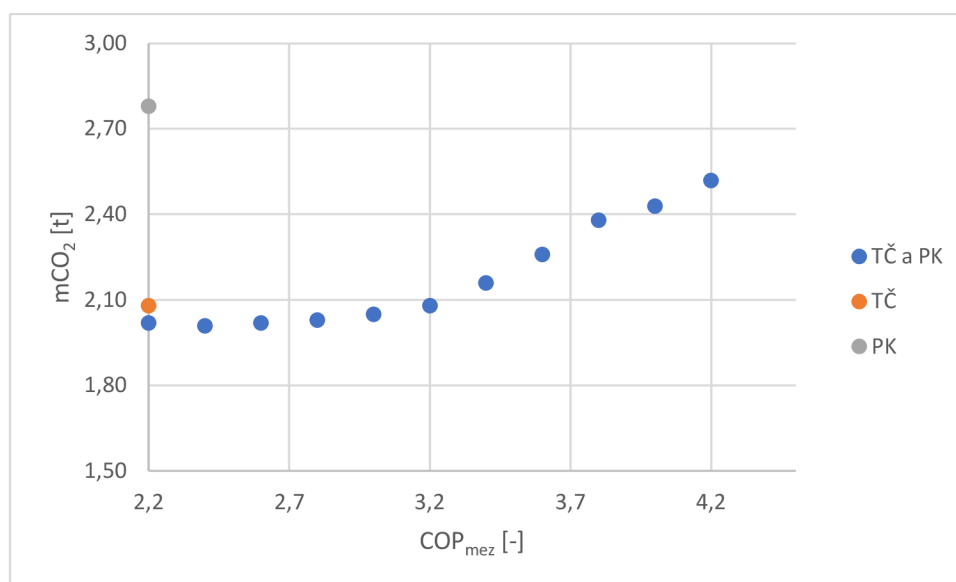
Z parametrické studie jsou už známé optimální parametry pro nastavení COP_{mez} , proto se zkoumaly pouze výsledky pro hodnoty COP_{mez} od 2,2 do 4,2, opět se změnou 0,2. Hlavními sledovanými kritérii jsou emise a náklady. Pro ukázkou jsou zde tabulky s konkrétními výsledky.

Tab. 7.2: Výsledky pro 55 °C, hybridní model.

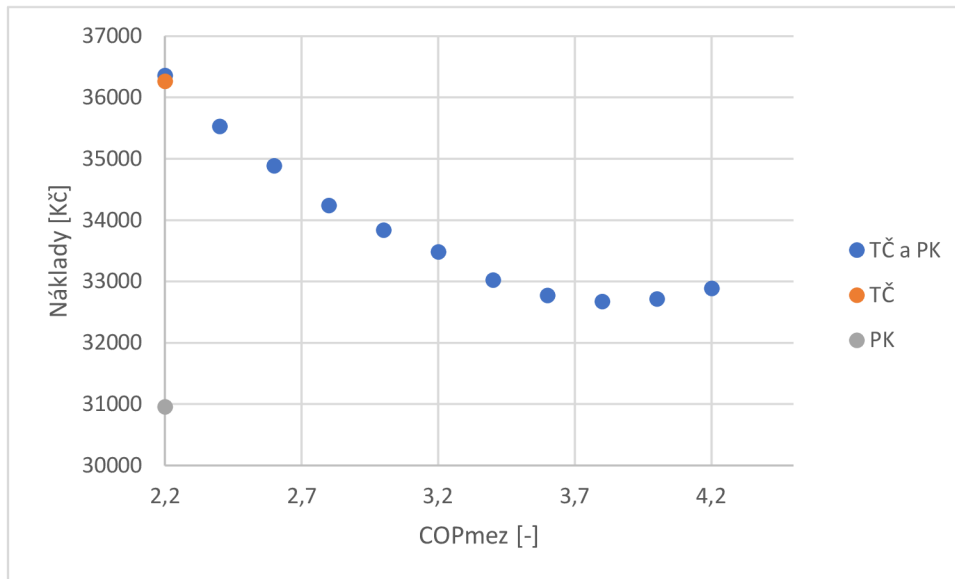
Tepelné čerpadlo a kotel					
COP _{mez} [-]	mCO ₂ [t]	N [KČ]	V [m ³]	E [kWh]	SPF [-]
2,2	2,02	36361,7	82,2	4707,5	2,91
2,4	2,01	35530,6	147,8	4360,1	2,99
2,6	2,02	34888,3	211,4	4048,6	3,05
2,8	2,03	34245,1	293,1	3677,9	3,13
3	2,05	33839,8	359,9	3393,6	3,19
3,2	2,08	33486,8	436,0	3087,4	3,24
3,4	2,16	33023,9	586,0	2520,3	3,36
3,6	2,26	32777,5	758,7	1913,3	3,47
3,8	2,38	32677,3	940,2	1300,2	3,66
4	2,43	32716,4	1010,2	1076,4	3,75
4,2	2,52	32888,5	1121,7	736,7	3,92

Tab. 7.3: Výsledky pro 55 °C, tepelné čerpadlo a plynový kotel.

Tepelné čerpadlo				Plynový kotel				
mCO ₂ [t]	N [KČ]	E [kWh]	SPF [-]	mCO ₂ [t]	N [KČ]	V [m ³]	E [kWh]	SPF [-]
2,08	36270,3	5281,0	2,74	2,78	30959,6	1397,3	0,0	0

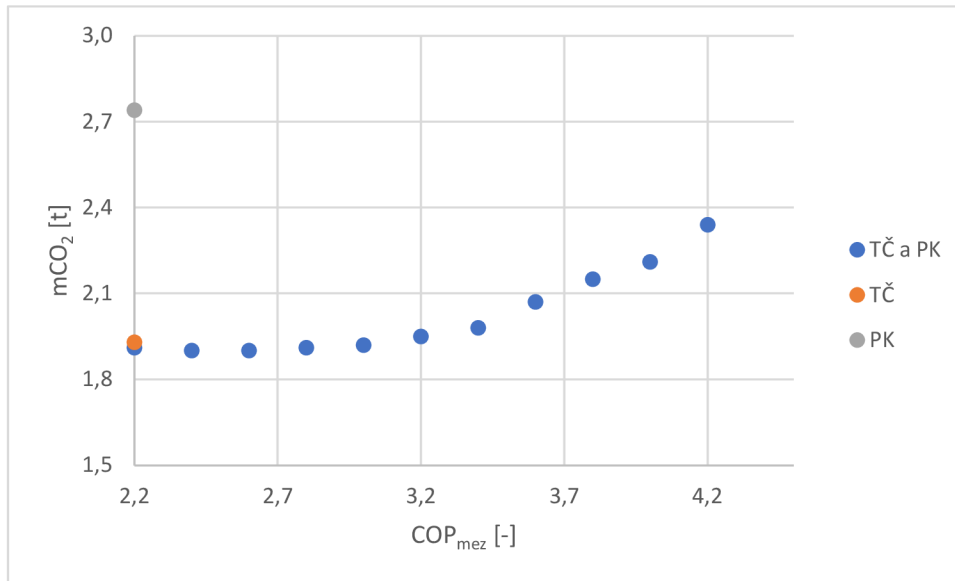


Obr. 7.4: Graf uvolněných emisí při $t_{w1} = 55$ °C pro daný objekt.

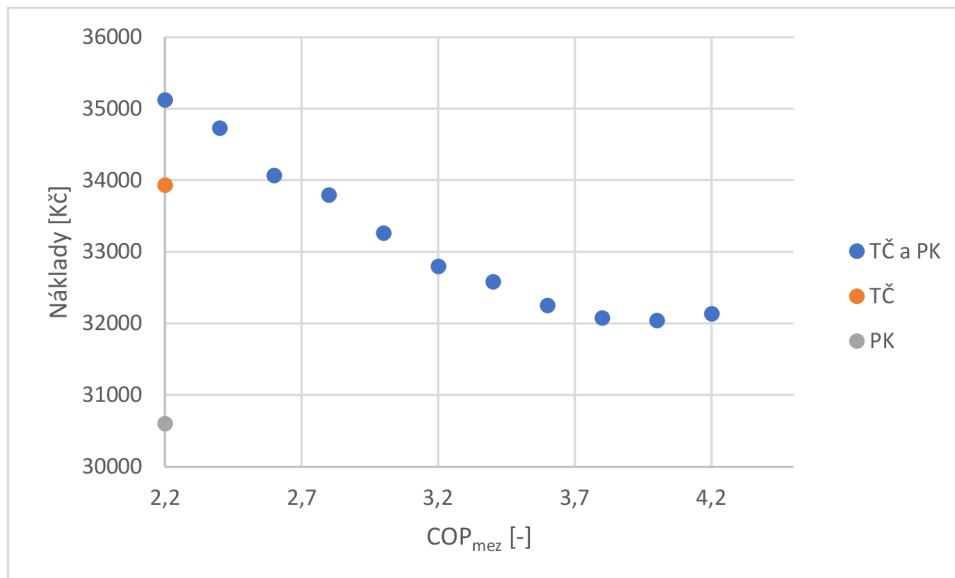


Obr. 7.5: Náklady za roční provoz pro daný objekt.

I když se poměrně výrazně změnily parametry oproti předešlým výpočtům, tak výsledky se blíží těm z parametrické studie. Z hlediska emisí má hybridní forma vytápění určitě smysl, problém je, že hlavním kritériem bývá většinou cena a ta není úplně optimální. Stále totiž vychází o trochu draž než plynový kotel. Na rozdíl cen má i vliv to, že u hybridního modelu platíme za údržbu dvou zařízení, opět pro připomenutí u plynového kotle jsou roční náklady 2000 Kč a u tepelného čerpadla 3000 Kč. Pokud by se o obě zařízení starala jedna firma, je možné, že by došlo k poklesu nákladů a cena by spadla na úroveň plynového kotle. Stále by však zůstávaly vysoké pořizovací náklady, proto se provede i výpočet pro teplotu vody 45 °C, zda neklesnou náklady výrazněji.



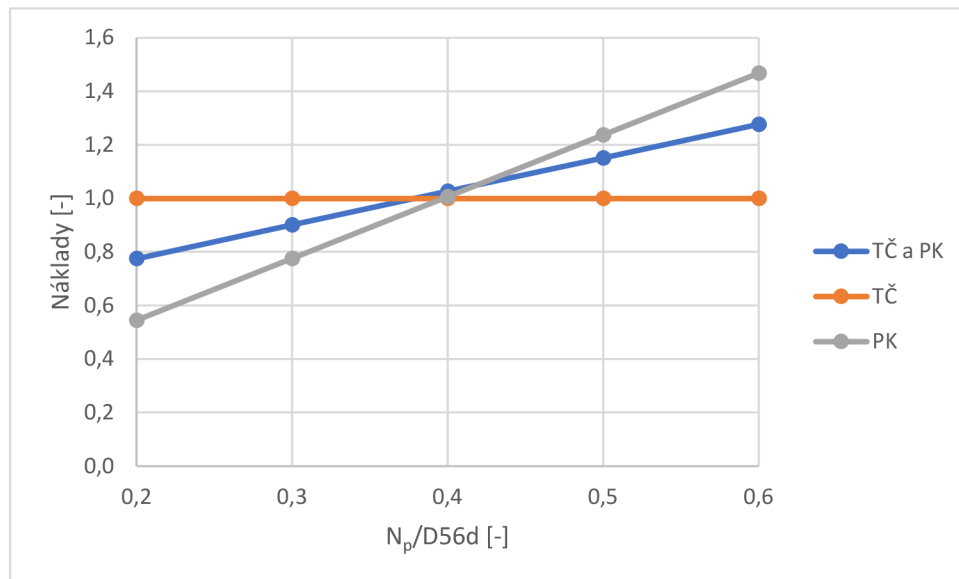
Obr. 7.6: Graf uvolněných emisí při $t_{w1} = 45\text{ °C}$ pro daný objekt.



Obr. 7.8: Náklady za roční provoz pro daný objekt.

Bohužel ani snížení teploty nepřineslo kýžený efekt a náklady za provoz sice poklesly, ale u všech variant. U hybridní varianty jsou stále zhruba o 1500 Kč větší než u plynového kotle. Navíc minimum se posunulo více doprava, takže dál od ideálního bodu pro co nejnižší emise, takže výsledek je ještě horší než při 55 °C , bráno z hlediska hybridního modelu vytápění. Proto zde není uvedena ani tabulka výsledků.

Proto se další výpočet zaměří na hledání optimálního poměru ceny elektřiny a plynu, kdy bude vycházet tato varianta nejlépe.



Obr. 7.9: Graf porovnání nákladů při změně ceny pro daný objekt COP_{mez} 3,4.

Ani při změně poměrů nákladů za elektřinu a zemní plyn při teplotě vody 55 °C se hybridní forma vytápění nikdy nestane při zadaných parametrech nejlevnější formou vytápění. S teplotou vody 35 °C se nebude pro daný objekt počítat, protože se jedná už o starší rodinný dům, kdy pokles vody v systému z dnešních 55 °C na 35 °C by se s největší pravděpodobností neobešel bez výrazných změn do topného systému. Navíc mezi hlavní výhody hybridní formy vytápění má patřit absence takových to výrazných stavebních zásahů.

7.6. Shrnutí

Celkové shrnutí při návrhu pro daný konkrétní objekt není zrovna pozitivní. V dnešní době se v domě vytápí kondenzačním plynovým kotlem, který stále vychází při současných cenách jako nejlevnější řešení, proto tepelné čerpadlo vzduch/voda, případně hybridní forma vytápění nepřipadají moc do úvahy. Tam, kde se dá sledovat pozitivní vývoj, jsou emise CO_2 , které se daří tímto způsobem snížit oproti plynovému kotli v optimálním bodě až o výrazných 28 %, což není zanedbatelný výsledek. Při COP_{mez} okolo 3,4, což se dá považovat za optimální bod z hlediska emisí a nákladů, se dosahuje snížení o 20 % oproti kotli, což je o 6 % více proti tepelnému čerpadlu.

Závěr

Tato diplomová práce se zaměřuje na spolupráci plynového kotle a tepelného čerpadla pro vytápění v domácnosti. Úvodní část je věnována základním typům vytápění, které se dají v České republice použít a jejich základní charakteristiky, výhody a zápory.

Protože se tato práce zaměřuje hlavně na plynové kotle a tepelná čerpadla, tak další část je věnována právě jim, kdy jsou popisovány nejen obecné vlastnosti pro danou možnost, ale podrobně jsou rozebírány jednotlivé typy a varianty z obou skupin, jaké lze v dnešní době použít. Celkově se dá říct, že v dnešní době výrazným způsobem dominují v oblasti vytápění pomocí zemního plynu kondenzační kotle, které dokáží využívat teplo uvolněné kondenzací spalin. Tím dosahují velice dobrých výsledků z hlediska účinnosti, i proto přes své vyšší pořizovací náklady si dokázaly získat většinu trhu v naší republice.

Tepelné čerpadlo se považuje za jedno z neekologičtějších zařízení na trhu. Dokáže dodávat díky své konstrukci více tepla než spotřebuje elektřiny. V dnešní době navíc začínají nacházet uplatnění nejenom při vytápění, ale i v průmyslu, kdy dokážou optimalizovat a zlepšovat účinnost některých procesů. To však není předmětem této práce. Proto se hlavní část zaměřila na jednotlivé typy, které se dnes vyskytují a jejich kladné a stinné stránky. Je zde základní popis fungování, aby se dalo lépe pochopit, jak toto zařízení pracuje a co je to topný faktor, jenž nám slouží k popisu efektivity provozu místo klasické účinnosti. Mezi nejběžnější variantu, co lze potkat, patří varianta vzduch/voda. Nevyžaduje totiž žádné složité úpravy topného systému, ani rozkopání parcely z důvodů pokládky hadic s chladičem, případně vyvrtání vrtů. Velkou daní však za tuto lehkou instalaci je výrazná změna topného výkonu během roku, který klesá společně s venkovní teplotou, proto se tato varianta často instaluje se záložním zdrojem, často topnou spirálou, který zařízení vypomáhá, když má nedostatečný výkon. Tím pádem ale dochází i k růstu nákladů.

Druhou nejběžnější variantou je typ země/voda. Ten sice vyžaduje velké počáteční náklady, avšak oproti typu vzduch/voda má mnohem stabilnější výkon, jenž se dá z větší části považovat za konstantní, byť i zde lze pozorovat menší pokles. Předpoklad je takový, že díky velmi nízkým nákladům na provoz se zařízení časem splatí.

Další část pak popisuje v poslední době nový typ vytápění – to hybridní systém vytápění. Z určitého úhlu pohledu tuto variantu využívají někteří lidé už dnes, kdy mají právě tepelné čerpadlo a pro případ potřeby kotel na tuhá paliva, většinou dřevo. Rozdíl je v tom, že systém se řídí v tomto případě dohromady a snaží se pracovat v co nejoptimálnější variantě, aby byly využity pozitiva obou zdrojů tepla na maximum. Nejběžnější varianta kombinuje plynový kotel a tepelné čerpadlo vzduch/voda, té se věnuje právě tato práce. Další z možností pak je například kombinace solárních kolektorů a tepelného čerpadla.

Teoreticky by měla fungovat varianta s plynovým kotlem a tepelným čerpadlem tak, že při poklesu venkovní teploty, kdy dojde k poklesu topného faktoru a výkonu čerpadla, se zapojí do vytápění v ideálním bodě i plynový kotel, což povede ke zlepšení ekonomiky provozu a ideálně se sníží emise.

Proto byl vytvořen bilanční model v programu Excel, který měl dané předpokládané informace potvrdit nebo vyvrátit. Výsledné hodnoty získané z parametrické studie tyto předpoklady z části potvrdily a z části ne. Velice pozitivní vliv měl hybridní model vytápění z hlediska uvolněných emisí CO₂ do vzduchu. Při všech variantách byl poměrně velký úsek, kdy uvolněné emise byly menší. Většinou se úspora v optimálním bodě pohybovala okolo 5 až 10 % oproti tepelnému čerpadlu a až o 40 % v porovnání s plynovým kotlem. Z tohoto hlediska by se dal tento způsob vytápění považovat za dobrý. Je zde však nutné zdůraznit jednu věc. Uvažuje se o současné situaci, kdy byly brány emise pro výrobu z elektřiny v roce 2020, což je hodnota 0,394 tuny CO₂ na MWh. Tento údaj měl v posledních letech tendenci neustále klesat, tím pádem by se výhodnost tohoto řešení časem zmenšovala. Ovšem k přihlídnutím k situaci z poslední doby může dojít taky k přesnému opaku, kdy emise zase

porostou. Cílem je si uvědomit, že výsledky platí při současných podmínkách a za pár let mohou být jiné.

Menší úspěch měla hybridní forma vytápění z hlediska nákladů. V naprosté většině případů totiž vycházel nejlevněji na provoz plynový kotel, byť tato varianta se mu dokázala v určitých případech dost přiblížit. Tehdy o výhodnosti systému rozhodovaly především roční náklady za údržbu zařízení, které jsou u hybridní varianty vyšší, protože je nutné se starat o dvě zařízení. Pouze v jednom případě došlo k poklesu nákladů pod hodnotu plynového kotle, to při ohřevu vody na 35 °C, Q_c 10 kW a COP_{mez} 4,2 během parametrické studie. Úspora však činila přibližně 500 Kč, což by rozhodně nestačilo na pokrytí zvýšených investičních nákladů na počátku. Druhým problémem bylo, že při takto vysoké hodnotě pro vypínání tepelného čerpadla došlo k nárůstu emisí nad hodnoty tepelného čerpadla. Pokud by se bral jako nějaký kompromis z hlediska emisí a nákladů, pak by vycházela nejlépe hodnota COP_{mez} 3,4 až 3,6. Při těchto parametrech však vycházel nejlevněji plynový kotel. A ani při optimálním parametru nastavení z hlediska ekonomiky, by daná úspora nebyla taková, aby se zařízení z tohoto hlediska vyplatilo.

Část parametrické studie se zaměřila i na možnou změny ceny za elektřinu a plyn. Při konstantním parametru COP_{mez} 3,4 si nejlépe při zadaných údajích vedlo vytápění při teplotě vody na 35 °C, kdy vycházelo nejlevněji od poměru ceny plynu a elektřiny 0,35 až 0,5. Při teplotě 45 °C se tato oblast zmenšila na 0,4 až 0,45. Nejhůře si vedla varianta při vytápění na 55 °C, která nebyla nejlevnější nikdy. Zkoušela se i varianta, kdy se kromě ceny paliva měnil i COP_{mez} . I když tento způsob vytápění nebyl nejlevnější, tak umožňoval provoz při nízkých nákladech, bez ohledu na změnu cen komodit, což se dá hodnotit kladně.

Dále se porovnávaly nejenom náklady a emise, ale i spotřeba elektřiny, zemního plynu při různých podmínkách, kdy se měnila teplota vody, ztráta tepelného objektu a podobně. Pokles byl při COP_{mez} 3,4 přibližně o 66 % v případě elektřiny oproti tepelnému čerpadlu a o 50 % v případě spotřeby zemního plynu oproti kotli. Podrobnější výsledky jsou v samotné práci.

Při výpočtu pro konkrétní objekt, což byl rodinný domek v podhorské oblasti nevyšla hybridní forma vytápění nejlevněji nikdy, ani pro jednu uvažovanou teplotu, došlo pouze k úsporu emisí CO_2 .

Celkově se dá zhodnotit tato forma vytápění jako ekologicky přínosná, výjimečně i z hlediska ekonomického. Umožňuje vytápět vždy levnějším zdrojem energie a tím dosahovat vždy, nízkých nákladů na provoz, ale počáteční náklady jsou výrazně vyšší. Dá se tedy doporučit pro lidi, kteří hledí hlavně na vytápění z environmentálního hlediska než z ekonomického. Je tedy otázkou do budoucna, zda se tento typ vytápění prosadí a případně v jaké formě.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HODBOŮ, Josef. Kritéria pro volbu způsobu vytápění. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 24.7.2020 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/20968-kriteria-pro-volbu-zpusobu-vytapani>
- [2] Vytápíme plynem. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem>
- [3] BUFKA, Aleš, Jana BLECHOVÁ TOUROVÁ, Miroslav MODLÍK a Jana VEVERKOVÁ. Přehled trhu plynových kotlů 2017 - 2019, díl 1.-Kategorie kotlů, druhy plynů a spotřeby. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 11.6.2020 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/20786-prehled-trhu-plynovych-kotlu-2017-2019-dil-1-kategorie-kotlu-druhy-plynu-a-spotreby>
- [4] ZACHARIÁŠ. Zdroje tepla na plyn. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 11.4.2007 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/4048-zdroje-tepla-na-plyn>
- [5] BUFKA, Aleš, Jana BLECHOVÁ TOUROVÁ, Miroslav MODLÍK a Jana VEVERKOVÁ. Přehled trhu plynových kotlů do 50 kW, 2017 - 2019, díl 2. - Ceny plynu, počty kotlů. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 18.6.2020 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/20823-prehled-trhu-plynovych-kotlu-do-50-kw-2017-2019-dil-2-ceny-plynu-pocty-kotlu>
- [6] HODBOŮ, Josef. Tepelná čerpadla - Základní informace. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/23093-tepelna-cerpadla-zakladni-informace>
- [7] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla.* Brno: ERA, 2005. 21. století. ISBN 80-736-6031-8.
- [8] Absorpční tepelná čerpadla. SOKRA, s.r.o. - Klimatizační a chladicí technika [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.sokra.cz/absorpcni-tepelna-cerpadla-1>
- [9] Tepelná čerpadla. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla>
- [10] STRAKA, Tomáš. Tepelná čerpadla - topení budoucnosti. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 26.4.2002 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/966-tepelne-cerpadlo-topeni-budoucnosti>
- [11] BUFKA, Aleš, Miroslav MODLÍK a Jana VEVERKOVÁ. Tepelná čerpadla - výsledky statistického zjišťování MPO. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2019/5/Tepelna-cerpadla_souhrn_1.pdf
- [12] Plynové tepelné čerpadlo: princip, výhody a využití. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 2.2.2018 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/16894-plynove-tepelne-cerpadlo-princip-vyhody-a-vyuziti>
- [13] ZHANG, Haochun. Experimental Study of the Gas Engine Driven Heat Pump with Engine Heat Recovery. Publish Open Access research journalist & papers [online]. 12.8.2015 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/417432/>
- [14] Air to Water GHP Unit. YANMAR [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: https://www.yanmar.com/global/energy/ghp/air_to_water/

- [15] Tepelná čerpadlá. *ESM YZAMER* energetické služby a monitoring s.r.o. [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.yzamer.sk/produkty/tepelne-cerpadla>
- [16] DYNAMIC - tepelné čerpadlo VZDUCH-VODA-PZP HEATING. Tepelná čerpadla PZP - PZP HEATING [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.tepelna-cerpadla-pzp.cz/cs/m-69-dynamic-tepelne-cerpadlo-vzduch-voda>
- [17] TEPELNÉ ČERPADO - Kogenerační jednotky TEDOM. *TEDOM - kogenerační jednotky, kogenerace a trigenerace* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotka-a-tepelne-cerpadlo>
- [18] Hybridní vytápění. *Viessmann: Topné, průmyslové a chladicí systémy* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/hybridni-vytapeni.html>
- [19] FUCÍK, Zdeněk. Zájem o hybridní zdroje tepla roste. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 5.9.2013 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10305-zajem-o-hybridni-zdroje-tepla-roste>
- [20] HODBOŮ, Josef. Experti Bosch Termotechnika: Hybridní vytápění pro stávající budovy. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 24.9.2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/22820-experti-bosch-termotechnika-hybridni-vytapeni-pro-stavajici-budovy>
- [21] Hybridní tepelné čerpadlo Vitocal 250-AH. *Viessmann: Topné, průmyslové a chladicí systémy* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/obytno-budovy/hybridni-zarizeni/plynova-hybridni-zarizeni/vitocal-250-ah.html>
- [22] BAŠTA, Jiří. Zapojení kondenzačních kotlů s termohydraulickým rozdělovačem. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. 3.9.2003 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/1599-zapojeni-kondenzacnich-kotlu-s-termohydraulickym-rozdelovacem>
- [23] Hybridní vytápění - Kombinace různých zdrojů energie. *Viessmann: Topné, průmyslové a chladicí systémy* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/obytno-budovy/hybridni-zarizeni.html>
- [24] *Výpočtové hodnocení tepelných soustav s tepelnými čerpadly* [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://adoc.pub/vypocetve-hodnoceni-tepelnych-soustav-s-tepelny-mi-erpadlye901b72a1404a5062690113fa7e43f5649542.html>
- [25] HORÁKOVÁ, Alena a Karel MRÁZEK. KLIMATOLOGICKÉ ÚDAJE. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 30.11.2009 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Klimatologie_2009.pdf
- [26] REINBERK, Zdeněk. Výpočet potřeby tepla pro vytápění, větrání a přípravu teplé vody. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov.* [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-vypocet-potreby-tepla-pro-vytapeni-vetrani-a-pripravu-teple-vody>
- [27] Projekční podklady a pomůcky. *Domovská stránka katedry TZB* [online]. [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=1>
- [28] DOLEŽAL, Jiří. Výpočet úspor emisí oxidu uhličitého (CO₂). *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument6794.html>
- [29] *Tl-cz-technicky-list_ea408.pdf*. *Regulus - Úsporné řešení pro vaše topení* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.regulus.cz/download/tech-listy/cz/tl_cz_technicky-list_ea408.pdf

- [30] LINHARTOVÁ, Vladimíra. Výpočet potřeby elektrické energie v otopné soustavě s tepelným čerpadlem vzduch-voda. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov*. [online]. 6.7.2015 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/12941-vypocet-potreby-elektricke-energie-v-otopne-soustave-s-tepelnym-cerpadlem-vzduch-voda>
- [31] BUFKA, Aleš. Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010-2021. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 7.4.2021 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/hodnota-emisniho-faktoru-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2020--260559/
- [32] KALETA, Ján a Aleš KISZA. Základní zásady návrhu plošného zemního kolektoru pro tepelné čerpadlo země/voda. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov*. [online]. 29.7.2013 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/10178-zakladni-zasady-navrhu-plosneho-zemniho-kolektoru-pro-tepelne-cerpadlo-zeme-voda>
- [33] Porovnání nákladů na spotřebu tepla v domácnosti. *Envigroup s.r.o.* [online]. 21.12.2012 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.envigroup.cz/aktualita-452.html>
- [34] REINBERK, Zdeněk. Výpočet a graf ekvitermní křivky. *TZB-info - Stavebnictví. Úspory energií. Technická zařízení budov*. [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/50-vypocet-a-graf-ekvitermni-krivky>

Seznam použitých značek a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
c	Měrná tepelná kapacita vody	[J/kg]
CO _{2,EF}	Emisní faktor při výrobě elektřiny	[t/MWh]
COP	Topný faktor čerpadla	[-]
d	Délka topného období	[dny]
D	Vytápěcí denostupně	[K·dny]
D56d	Cena elektřiny pro tepelná čerpadla	[Kč/MWh]
DH _j	Počet hodinostupňů výpočtového teplotního intervalu	[K·h]
DH _r	Počet hodinostupňů během roku za otopné období	[K·dny]
e _d	Zkrácení doby vytápění	[-]
e _i	Nesoučasnost tepelné ztráty větráním a tepelné ztráty prostupem	[-]
E _{pom,rok}	Roční potřeba pomocné elektrické energie pro provoz tepelného čerpadla	[kWh]
E _{pom,TUV,j}	Potřeba pomocné elektrické energie v režimu TUV	[kWh]
E _{pom,VYT,j}	Potřeba pomocné elektrické energie v režimu vytápění	[kWh]
e _t	Snížení teploty v místnosti během noci/noci	[-]
E _{TČ}	Roční spotřeba elektrické energie	[kWh]
E _{TČ,rok}	Roční potřeba hnací energie tepelného čerpadla	[kWh]
E _{TČ,TUV,J}	Potřeba hnací energie pro pohon tepelného čerpadla v režimu TUV	[kWh]
E _{TČ,VYT,j}	Potřeba hnací energie pro pohon tepelného čerpadla v režimu vytápění	[kWh]
m _{CO2}	Množství CO ₂ uvolněné spálením 1 m _n ³ paliva	t/m ³ _{pal}
M _{CO2,j}	Množství CO ₂ uvolněné v daném intervalu	[t]
M _{CO2,m}	Měrné emise CO ₂	[t/MWh]
m _{CO2,Qi}	Produkce CO ₂	[t/MWh]
M _{CO2,rok}	Celkové množství CO ₂ uvolněné za rok	[t]
n	Teplotní exponent	[-]
N	Počet pracovních dní soustavy v roce	[dny]
N	Celkové provozní náklady za rok	[Kč]
N _j	Cena za spotřebované palivo v intervalu	[Kč]
N _k	Celkové provozní náklady plynového kotle za rok	[Kč]
N _m	Měrné náklady	[Kč/MWh]
N _{TČ}	Celkové roční provozní náklady tepelného čerpadla na provoz	[Kč]
N _{zp}	Cena za 1 m _n ³ paliva	[Kč/m ³ _{pal}]
N _{zp,Qi}	Cena paliva	[Kč/MWh]
P _{pom,TUV}	Elektrický příkon pomocných zařízení (TUV)	[kW]
P _{pom,VYT}	Elektrický příkon pomocných zařízení (vytápění)	[kW]
Q _c	Tepelná ztráta objektu	[kWh]
Q _{d,rok}	Roční dodávka tepla doplňkovým zdrojem	[kWh]
Q _{d,TUV,j}	Teplo z doplňkového ohříváče v režimu TUV	[kWh]
Q _{d,VYT,j}	Teplo z doplňkového ohříváče v režimu vytápění	[kWh]
Q _i	Výhřevnost paliva	[kWh/m ³ _{pal}]

$Q_{k,TUV,j}$	Dostupné teplo z tepelného čerpadla pro přednostní přípravu TUV	[kWh]
$Q_{k,VYT,j}$	Dostupné teplo z tepelného čerpadla pro vytápění	[kWh]
$Q_{TČ,rok}$	Roční dodávka tepla tepelným čerpadlem	[kWh]
$Q_{TČ,TUV,j}$	Skutečně dodané teplo na ohřev TUV od tepelného čerpadla	[kWh]
$Q_{TČ,VYT,j}$	Skutečně dodané teplo od tepelného čerpadla pro vytápění	[kWh]
$Q_{TUV,d}$	Denní potřeba tepla pro ohřev teplé vody	[kWh]
$Q_{TUV,j}$	Potřeba tepla na ohřev teplé vody pro jednotlivé intervaly	[kWh]
$Q_{TUV,r}$	Roční potřeba tepla pro ohřev teplé vody	[kWh]
$Q_{VYT,j}$	Potřeba tepla pro jednotlivé intervaly	[kWh]
$Q_{VYT,r}$	Roční potřeba tepla pro vytápění	[kWh]
SPF	Sezónní topný faktor	[-]
T	Doba výskytu teplot nižších než t_e	[h]
t_1	Teplota studené vody	[°C]
t_2	Teplota ohřáté vody	[°C]
t_e	Průměrná teplota otopného období v daném teplotním intervalu	[°C]
$t_{e,L}$	Průměrná venkovní letní teplota	[°C]
$t_{e,rok}$	Průměrná roční teplota	[°C]
$t_{e,z}$	Průměrná venkovní teplota otopného období	[°C]
t_{eN}	Venkovní výpočtová teplota	[°C]
t_{es}	Průměrná teplota otopného období	[°C]
t_i	Vnitřní výpočtová teplota v místnosti	[°C]
t_{is}	Průměrná vnitřní výpočtová teplota	[°C]
T_j	Délka topného období v teplotním intervalu	[h]
$T_{j,L}$	Počet hodin letního intervalu	[h]
$T_{k,VYT,j}$	Zbývající doba provozu v režimu vytápění	[h]
t_{k2}	Požadovaná teplota otopné vody	[°C]
t_m	Teplota teplé vody na vstupu do kotle	[°C]
$T_{TČ,TUV,j}$	Skutečná doba provozu tepelného čerpadla v režimu TUV	[h]
$T_{TČ,VYT,j}$	Skutečná doba provozu tepelného čerpadla v režimu vytápění	[h]
t_{w1}	Ekvitemní teplota přívodní vody	[°C]
$t_{w1,N}$	Návrhová teplota přívodní vody	[°C]
t_{w2}	Ekvitemní teplota vratné vody	[°C]
$t_{w2,N}$	Návrhová teplota vratné vody	[°C]
T_z	Doba trvání otopného období	[h]
U_k	Fixní náklady za provoz kotle (servis)	[Kč]
$U_{TČ}$	Fixní náklady za provoz tepelného čerpadla	[Kč]
V	Poměrná doba	[-]
v	Bezrozměrná křivka trvání teplot	[-]
V	Celkové množství spotřebovaného zemního plynu	[m ³]
V_{2p}	Celková potřeba teplé vody za 1 den	[m ³ /den]
V_j	Spotřebované množství zemního plynu	[m ³]
z	Koeficient energetických ztrát systému	[-]

Δt	Rozdíl teplot venkovního vzduchu a výstupní vody	[°C]
Δt_k	Přehřátí ekvitermní teploty přívodní vody	[°C]
Δt_m	Ohřátí vody v tepelném čerpadle	[°C]
Δt_w	Rozdíl teplot přívodní a vratné vody pro ekvitermní regulaci	[°C]
ε	Opravný součinitel	[-]
η_j	Účinnost plynového kotle v závislosti na teplotě vody	[%]
η_o	Účinnost soustavy	[-]
η_r	Účinnost rozvodu vytápění	[-]
ρ	Měrná hmotnost vody	[kg/m ³]
$\varphi_{k,VYT,j}$	Výkon tepelného čerpadla pro vytápění	[kW]

Seznam obrázků

- Obr. 2.1: Princip fungování konvekčního kotle [3].
Obr. 2.2: Princip fungování kondenzačního kotle [3].
Obr. 3.1: Absorpční tepelné čerpadlo od firmy Broad [8].
Obr. 3.2: Schéma oběhu tepelného čerpadla [10].
Obr. 3.3: Tepelné čerpadlo vzduch/voda od firmy PZP HEATING [16].
Obr. 3.4: Kolektor typu slinky [32].
Obr. 3.5: Plynové tepelné čerpadlo od firmy Yanmar [14].
Obr. 4.1: Sestava tepelné čerpadlo a kondenzačního kotlem od firmy Viessmann [21].
Obr. 4.2: Možnosti hybridního vytápění v různých ročních obdobích [18].
Obr. 5.1: Graf křivky venkovních teplot.
Obr. 5.2: Účinnost kondenzačního kotle v závislosti na teplotě vratné vody [22].
Obr. 6.1: Graf uvolněných emisí CO₂ při COP_{mez}.
Obr. 6.2: Graf nákladů za roční provoz při COP_{mez}.
Obr. 6.3: Graf spotřeby zemního plynu při COP_{mez}.
Obr. 6.4: Graf spotřeby elektrické energie při COP_{mez}.
Obr. 6.5: Graf uvolněných emisí za MWh v závislosti na zařízení.
Obr. 6.6: Graf ceny za MWh tepla v závislosti na teplotě.
Obr. 6.7: Graf uvolněných emisí CO₂ při t_{mez}.
Obr. 6.8: Graf nákladů za roční provoz při t_{mez}.
Obr. 6.9: Graf spotřeby zemního plynu při t_{mez}.
Obr. 6.10: Graf spotřeby elektrické energie při t_{mez}.
Obr. 6.11: Graf uvolněných emisí CO₂.
Obr. 6.12: Graf nákladů na provoz při t_{w1}.
Obr. 6.13: Graf porovnání spotřeby plynu při teplotách vody 45 a 55 °C.
Obr. 6.14: Poměr spotřeby elektrické energie při vytápění na 45 a 55 °C.
Obr. 6.15: Graf porovnání nákladů na provoz t_{w1}=45 °C.
Obr. 6.16: Graf porovnání nákladů na provoz t_{w1}=35 °C.
Obr. 6.17: Graf porovnání nákladů na provoz t_{w1}=55 °C.
Obr. 6.18: Graf uvolněných emisí CO₂ při změně COP.
Obr. 6.19: Graf nákladů na provoz při změně COP.
Obr. 6.20: Graf uvolněných emisí CO₂ při Q_c=7,5 kW.
Obr. 6.21: Graf nákladů za roční provoz při Q_c=7,5 kW.
Obr. 6.22: Graf porovnání nákladů při změně ceny při Q_c=7,5 kW.
Obr. 6.23: Graf porovnání nákladů na provoz při Q_c = 10 kW a změně ceny paliva.
Obr. 6.24: Graf porovnání nákladů při Q_c = 7,5 kW a změně ceny paliva.
Obr. 7.1: Print screen z Excelu výpočet pro ohřev TUV.
Obr. 7.2: Print screen z Excelu pro výpočet vytápění.
Obr. 7.3: Print screen Excel úvodního listu.
Obr. 7.4: Graf uvolněných emisí při t_{w1} = 55 °C pro daný objekt.
Obr. 7.5: Náklady za roční provoz pro daný objekt.
Obr. 7.6: Graf uvolněných emisí při t_{w1} = 45 °C pro daný objekt.
Obr. 7.8: Náklady za roční provoz pro daný objekt.
Obr. 7.9: Graf porovnání nákladů při změně ceny pro daný objekt COP_{mez} 3,4.

Seznam tabulek

- Tab. 2.1: Dodavky plynových kotlů [5].*
- Tab. 5.1: Účinnost kondenzačního kotle na teplotě vratné vody [22].*
- Tab.5.2: Výkon tepelného čerpadla Regulus EcoAir 408 [29].*
- Tab. 6.1: Zadané parametry.*
- Tab. 7.1: Zadané parametry pro konkrétní objekt.*
- Tab. 7.2: Výsledky pro 55 °C, hybridní model.*
- Tab. 7.3: Výsledky pro 55 °C, tepelné čerpadlo a plynový kotel.*