



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav řízení a ekonomiky podniku**

**Využívání odpadního tepla z průmyslové výroby v podmínkách  
městské infrastruktury**

**Utilization of waste heat in condition of urban infrastructure**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Bc. Andrej Lacko**

Studijní program: Řízení a ekonomika podniku

Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku

Vedoucí práce: prof. Ing. František Freiberg, CSc.

**Praha, 2021**

# **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 3.1.2021

.....  
**Andrej Lacko**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lacko** Jméno: **Andrej** Osobní číslo: **419931**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení a ekonomika podniku**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Využívání odpadního tepla z průmyslové výroby v podmínkách městské infrastruktury**

Název diplomové práce anglicky:

**Utilization of waste heat from industrial production**

Pokyny pro vypracování:

Popsat optimální zdroje odpadního tepla, které lze využít v podmínkách městské infrastruktury

- Provést odhad technologicky a ekonomicky nejvhodnějších zdrojů odpadního tepla a jeho využití v rámci budov,
- Provést odhad nebo výpočet doby návratnosti investic do těchto technologických řešení v závislosti na dostupnosti potřebných dat
- Přinést přehled jednoduchých doporučení pro energetické manažery ve směru možností hledání a využívání zdrojů odpadního tepla

Seznam doporučené literatury:

- 1) Využití netradičních zdrojů energie ve vytápění - sluneční, geotermální, bioplyn, odpadní teplo. Praha: Dům techniky, 1988.
- 2) VAVŘIČKA, Roman a Tomáš MATUŠKA. Zpětné získávání tepla v oblasti přípravy teplé vody = Heat recovery in the field of hot water preparation. Vytápění větrání instalace. 2016, 25(3), 126-131. ISSN 1210-1389.
- 3) ŠMÍD, Václav. Odpadní teplo a jeho využití. Praha: Ústav pro technické a ekonomické informace, 1958. Technické informace. R. 1958. Řada 11.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. František Freiberg, CSc., ústav řízení a ekonomiky podniku FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **26.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **02.04.2021**

prof. Ing. František Freiberg, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. František Freiberg, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

16.12.2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce pojednává o využití odpadního tepla z průmyslové výroby v rámci městské infrastruktury. Práce nejdříve vysvětluje potenciál tohoto doposud relativně opomíjeného zdroje energie, dále popisuje a přibližuje jednotlivé technologie využívající odpadní teplo. Poslední část je zaměřena na projekt související s využitím odpadního tepla jako zdroje energie pro městskou infrastrukturu a uvádí ekonomické zhodnocení tohoto projektu.

## **Klíčová slova**

Odpadní teplo, zdroje odpadního tepla, přímé využití odpadního tepla, nepřímé využití odpadního tepla, tepelné přijímače, potenciál odpadního tepla, městská infrastruktura.



## **Abstract**

This diploma thesis deals with the utilization of waste heat from industrial production within the framework of urban infrastructure. The work first explains the potential of this relatively neglected energy source, then describes and describes the individual sources of waste heat. The last part focuses on the project related to the use of waste heat as a source of energy for urban infrastructure and provides an economic evaluation of this project.

## **Key words**

Waste heat, waste heat sources, direct use of waste heat, indirect use of waste heat, heat receivers, waste heat potential, urban infrastructure.

## **Poděkování**

Děkuji panu Doc. Ing. Ondřejovi Vojáčkovi, Ph.D., za důležité odborné rady a připomínky k této práci, za morální podporu a cenné rady ohledně mého životního směřování. Dále bych touto formou rád poděkoval zaměstnancům univerzity z Ústí nad Labem a agentury IREAS za poskytnutí informací pro poslední část této práce a celkovou spolupráci.

Kvůli současné situaci koronavirových opatření bylo obzvlášť obtížné získat kladnou zpětnou vazbu ohledně návštěvy jednotlivých budov. Když jsem se pokusil kontaktovat společnosti, kde mě již znali, jestli bych si mohl změřit, jaké teplo jejich zařízení vyzařuje, tak mi bylo řečeno, že jsou kvůli koronavirovým opatřením prakticky zaplombované a není možné tam nikoho „zvenčí“ vpustit. Proto jsem byl opravdu vděčný za poskytnuté informace od společnosti ENASPOL a.s. a všech ostatních společností jako jsou například GT ENERGY s.r.o., AKIRE s.r.o. a HENNLICH s.r.o. za jejich ochotu a poskytnuté informace a podklady, které mi byly poskytnuty.

# Obsah

Úvod	7
<b>1. Teoretická část</b>	<b>8</b>
1.1. Výroba elektrické energie v ČR	10
1.1.1. Podíl výroby elektřiny v ČR	10
1.2. Odpadní teplo	12
1.2.1. Zdroje odpadního tepla	13
1.2.2. Faktory ovlivňující využívání odpadního tepla	14
1.2.3. Maximální účinnost při výrobě elektrické energie pomocí Carnotova cyklu	16
1.2.4. Výběr teploty a materiálu zařízení	18
1.2.5. Složení odpadního proudu	19
1.3. Technologie využití odpadního tepla	20
1.4. Tepelná čerpadla	21
1.4.1. Rozdělení tepelných čerpadel podle zdroje tepla	21
1.4.2. Topný faktor	27
1.4.3. Základní komponenty tepelného čerpadla	29
1.4.4. Princip tepelného čerpadla	30
1.5. Organický Rankinův cyklus (ORC)	32
1.5.1. Horkovodní ORC – Princip	32
1.5.2. Spalinové ORC – Princip	34
1.6. Průmyslové chlazení	37
1.6.1. Absorpční chlazení	37
1.7. Výměník tepla	43
1.7.1. Trigenerace	44
1.8. Stirlingův cyklus	45
1.8.1. Modifikace Stirlingova motoru	45
1.8.2. Princip chodu Stirlingova motoru	47
<b>2. Praktická část</b>	<b>48</b>
2.1. Informační portály	50
2.1.1. Portál odpadního tepla	50
2.1.2. Portál Waste heat	53
2.2. Společnost ENASPOL, a.s.	56
2.2.1. Hodnoty odpadního tepla v ENASPOL, a.s.	56
2.2.2. Stávající stav budovy	60
2.2.3. Okrajové podmínky návrhu	60
2.3. Studie využití odpadního tepla	65
2.3.1. Stirlingův motor	65
2.3.2. Tepelné čerpadlo	71
2.3.3. Tepelný výměník	76
2.4. Návrhovatelnost projektu	79
2.4.1. Stirlingův motor	79
2.4.2. Tepelné čerpadlo + ORC	79
2.4.3. Tepelný výměník	79
2.5. Diskuze	82
<b>Závěr</b>	<b>83</b>

<b>Zdroje</b>	<b>84</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>88</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>90</b>
<b>Nomenklatura symbolů</b>	<b>91</b>

## Úvod

Téma využití odpadního tepla jsem si vybral z důvodu velkého ekonomického a ekologického potenciálu této problematiky. Správné využívání odpadního tepla by snížilo náklady například na vytápění budov, ve kterých se odpadní teplo vytváří díky průmyslové výrobě, čímž by se dále přispělo k šetření životního prostředí a zvýšení energetické účinnosti budov.

Osobně si nemyslím, že se v České republice firmy v průmyslové sféře chovaly nezodpovědně, pokud jde o plýtvání a využívání zdrojů v porovnání například s Německem, což je dáno také normami typu ISO 14 000. Nicméně existuje spousta odvětví, kam ještě úplně nepronikla idea využití odpadního tepla a chtěl bych v této práci vysvětlit, proč tomu tak je, najít možná řešení a objasnit jejich výhodnost, ať už v krátkém či delším časovém horizontu.

Smysluplnost budou mít tyto technologie ale především tehdy, kdy se na jejich využívání budou podílet všichni producenti odpadního tepla po celém dnes již globalizovaném světě, ve kterém se projevilo, že je, co se mezinárodní spolupráce a komunikace týče v době koronavirových opatření, stále na čem pracovat.



Obrázek 1.1: Tepelná elektrárna Počerady



# 1. Teoretická část

Dnešní doba se vyznačuje snižováním emisí, stále větším důrazem a snahou o ochranu životního prostředí a hledáním nových potenciálních zdrojů energie. Doba nevyčerpatelného zdroje nerostných surovin je ta tam, a proto je nutné hledat alternativní zdroje energií a jejich optimální metody využití. Tento trend má přispět k udržitelnému rozvoji a zefektivnění hospodaření s energetickými zdroji tak, aby byly všeobecně dostupné a nedocházelo k jejich zbytečnému plýtvání.

Snaha o zvýšení účinnosti využívání primárních energetických zdrojů, která by měla omezit závislost Evropy na jejich importu a přispět ke snížení ekologické zátěže, se také projevuje v řadě evropských dokumentů a směrnic. Evropská unie se v rámci energetického balíčku 20-20-20 zavázala k redukci emisí oxidu uhličitého o 20 % oproti úrovni v roce 1990, poklesu spotřeby energetických zdrojů o 20 % v porovnání s předpoklady z roku 2007 a k navýšení podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu na 20 %. [1]

Většina energie se v České republice získává z fosilních paliv, hlavně pak uhelných elektrárnách, ale to se ke splnění nových evropských norem musí brzo změnit. Tlak ze strany Evropské unie na snížení používání fosilních paliv jako uhlí a ropy neustále roste a z dlouhodobého hlediska je nejistá i budoucnost jaderné energetiky.

Právě proto je nutné nalézt řešení, jak využít zdroje energie, které už dávno máme, ale které se teprve nyní projevují jako perspektivní a dosud poměrně nevyužívané. Tento fakt se ale s vývojem stále efektivnějších technologií, může hodně rychle změnit.

Jedním z mnoha řešení, jak využít zatím unikající zdroje energie, je právě využití odpadního tepla, které vzniká ať už průmyslovou výrobou nebo jakoukoli jinou činností člověka při jeho práci. [7]

## 1.1. Výroba elektrické energie v ČR

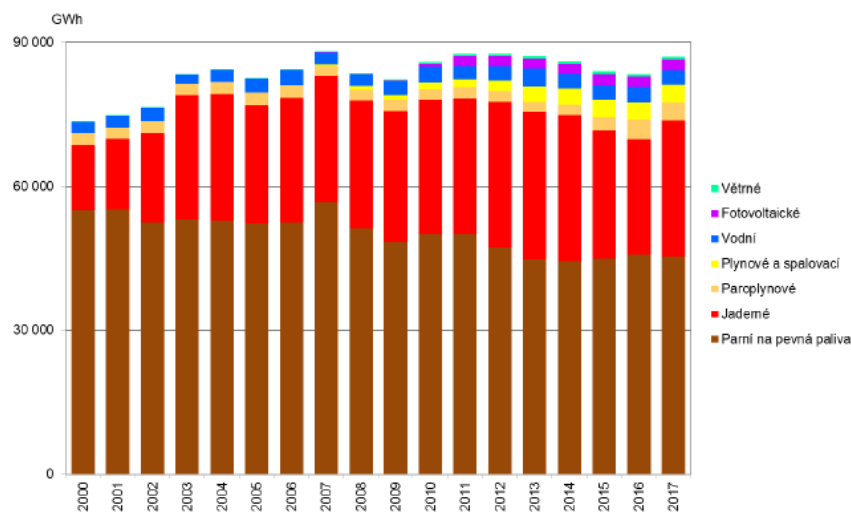
Energetika v České republice sestává z výroby, spotřeby, importu a exportu elektřiny. V roce 2019 bylo vyrobeno celkem 86 964 GWh elektrické energie. Největší část energie, a to 47,6 %, byla vyrobena v parních elektrárnách. V jaderných elektrárnách bylo vyrobeno 34,8 % energie, 6,3 % připadlo na paroplynové a 4,2 % na plynové. Ve fotovoltaických elektrárnách bylo vyrobeno 2,6 % energie, na vodní elektrárny připadlo 2,3 % a na větrné 0,8 % vyrobené elektřiny. [2]

Česká republika vyrábí více elektrické energie, než sama spotřebuje. Proto je v Evropské unii spíše exportérem elektrické energie. Celkové množství vyvezené elektřiny je 18,8 % naší produkce. [3]

Ačkoliv ČR vyprodukuje více energie, než sama spotřebuje, hlavními producenty energií jsou stále uhelné elektrárny, což je se zvyšujícím se tlakem na dekarbonizaci EU stále závažnější problém, který bude nutné řešit nalezením a využitím nových zdrojů energií, které byly doposud opomíjené.

### 1.1.1. Podíl výroby elektřiny v ČR

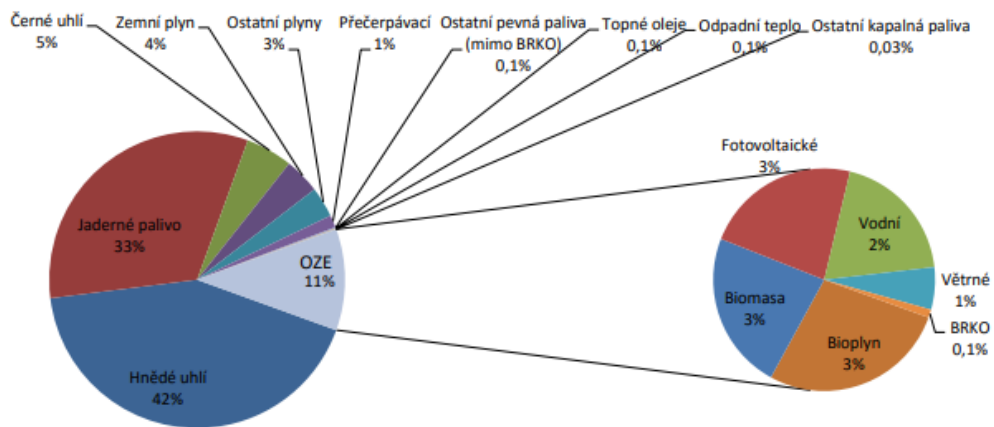
Výroba elektřiny podle druhu elektráren v ČR [GWh], 2000–2017



Obrázek 1.1: Výroba elektřiny podle druhu elektráren v ČR [3]

Jak je viditelné z grafu, do roku 2007 byla výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů relativně opomíjená technologie. To vše se změnilo až na přelomu roku 2010, kdy je z grafu evidentní stále se zvyšující podíl těchto nových způsobů výroby. Větrné elektrárny žádný výrazný růst nevykazují, ale fotovoltaické elektrárny do roku 2016 neustále zvyšovaly produkci. Také lze zaznamenat stále se snižující využívání elektřiny z uhelných elektráren a zvyšující podíl výroby elektrické energie z jádra. Nedávno byl dokonce zastaven provoz první uhelné elektrárny na našem

území Pruněřov, která patřila také k největším znečišťovatelům ovzduší nejen na Chomutovsku, ale i v celé České republice. [6]



Obrázek 1.2: Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2017 [5]

Z tohoto grafu, který ukazuje výrobu elektrické energie v roce 2017, je zřejmé, že ačkoliv se zvýšil podíl obnovitelných zdrojů, využití odpadního tepla je stále silně opomíjené.

## 1.2. Odpadní teplo

Odpadní teplo je ve zkratce přesně to, jak se jmenuje. Je to odpad vytvářený chlazením, klimatizací anebo výrobou vytvářející tento energetický zdroj. Mnoho podniků tímto způsobem vytváří spoustu přebytečného tepla, které ale nikdo nikdy nevyužije, a to je škoda. To, že ho nikdo nikdy nemůže využít, ale není tak úplně pravda. Je spousta jiných využití odpadního tepla, než jen otevřít okno a vyvětrat nebo se jen potit ve výrobní hale. [8]

Odpadní teplo jako takové představuje obrovský nevyužitý energetický potenciál. S jeho produkcí se potýká především ta část průmyslu, která by potřebovala přesný opak, a to je chladit. Cílovými uživateli odpadního tepla jsou tedy samotní producenti, hutní a kovozpracovatelské společnosti, potravinářský průmysl a jiné průmysly, které svojí činností nutně vytvářejí teplo. Teplo jako takové vzniká například v automobilovém průmyslu, ale také v IT společnostech, které mají potřebu chladit svoje neustále vytížené servery. Dá se říct, že se jedná o takový druh tepla, které se nijak nepodílí na vytváření hodnot podniků a společností a firmy, které ho produkují, ho musí nějakým způsobem využít. [8]

I zbavování se tohoto druhu energie může mít ale efektivní formu, která může vytápět administrativní budovy, přilehlé domácnosti, vyrábět elektrickou energii, ohřívat a přehřívát užitkovou vodu anebo dokonce proměnit teplo na chlad. Nezáleží na tom, v jakém teponosném médiu je teplo obsaženo. Využít je ho nutné tak jako tak.

Tato tematika má především potenciál v úspornosti. Většinou se teplo vyvětrá bez jakékoli návratnosti a další důvod, proč se odpadním teplem zabývat, je snižování emisí skleníkových plynů.

Pokud by se jednalo o nejobsáhlejší aplikaci využití odpadního tepla, tak bychom museli podotknout obzvlášť oblast kompresorů, u kterých je možné získat zpět tepelný výkon přibližně 60 – 70 % el. příkonu kompresoru. Odpadní teplo se pak následně využívá pro přípravu teplé vody nebo přehřevu otopných systémů. [38]

Hlavními z mnoha důvodů, proč se odpadní teplo nevyužívá, je malá obeznámenost s tímto zdrojem energie. První nařízení se u nás objevila v podobě směrnice o energetické účinnosti v roce 2012, což je defacto jediné legislativní opatření v České republice, kde se o vůbec hovoří o využití odpadního tepla. [9]

Další důvod, proč se plýtvá teplem z výroby, jsou finance. Náklady na úpravu a údržbu provozoven jsou samozřejmě vyšší, než když se s využitím odpadního tepla počítá od začátku. Zde ale nastává problém neznalosti majitelů a manažerů o nových technologiích, které jsou již nyní k dispozici, ale o kterých neví. Projevuje se to zejména při výstavbě nových průmyslových budov. Proto je nutné obeznámit jednotlivé manažery s touto problematikou ještě před výstavbou jimi vedených výrobních komplexů a hal. Pokud se tato komplikace nevyřeší, bude to stále začarovaný kruh.



Vývoj technologií ale v posledních letech zaznamenal takové pokroky, že už dnes se mohlo jisté varianty řešení jevit jako výhodná a návratná investice. [7]

### 1.2.1. Zdroje odpadního tepla

Odpadní teplo a jeho zdroje je prakticky všude kolem nás. Největšími producenty odpadního tepla jsou u nás průmyslové firmy, mezi které patří ropné rafinérie, ocelárny, sklárny, prádelny a papírny. Nejsou to ale v žádném případě jen tato odvětví, ve kterém je kvůli pracovním procesům za potřebí vysoké teploty. Jak už bylo řečeno dříve, velkým a hlavně stálým producentem odpadního tepla jsou i datová centra, která vyžadují neustálé chlazení.

Odpadní teplo je v okolním prostředí přenášeno nejrůznějšími způsoby. Podle toho, jakým způsobem je tento druhotný zdroj tepla vázaný, můžeme zdroje rozlišovat na:

- Chemicky vázané odpadní teplo z technologických procesů, které je výsledkem exotermní chemické reakce. Hlavní reakcí u tepelných zdrojů je hoření, což se dá ale také označit jako zesílená oxidace. Například kontakt kyslíku s vodíkem, sírou nebo uhlíkem jsou přesně ty kombinace prvků, které hoření podporují. Odpadní teplo je vedlejší produkt hoření těchto fosilních paliv.
- Jako druhý zdroj se bere v potaz citelné teplo odpadních látek neboli výhřevnost. Hlavní je zde především teplo ze spalin, par, plynů, kapalin a jiných nosičů při výměně tepla. Část skryté tepelné energie neboli latentního tepla je obsaženo v tepelných spalinách, u kterých, je-li dosaženo teploty rosného bodu, dochází pak ke změně skupenství neboli kondenzace přítomné vodní páry a k následnému uvolnění tepla. [10]

Navzdory tomu, že u nás zpracované odpadní teplo pokrývá jen 0,1 % celkové produkce elektrické energie, stále uniká bez jakéhokoliv využití každým rokem teplo s výkonem 17,5 TWh obsaženém jen v průmyslem vytvářené šedé vodě. Dalším případem je energie z odpadního tepla uskladněna ve teplém vzduchu z nuceného větrání budov a ve spalinách topných zařízení. [11]

Odpadní teplo není bráno jako obnovitelný zdroj energie, ale alternativní. Rozdíl je v tom, že odpadní teplo je přímým důsledkem průmyslové činnosti, která může běžet na obnovitelné zdroje. Pokud se bude využívat odpadní teplo, zvýší se tím efektivita využití obnovitelného zdroje, díky kterému je tato činnost schopna provozu, a to například dalším výhřevem nebo výrobou elektřiny. [12] Kvůli neustálému rozvoji průmyslu a zvyšováním nároků na energie navzdory stagnaci růstu populace se nevyhnutelně s tím zvyšuje i produkce odpadního tepla. Tímto zvyšováním produkce se uvolňuje více tepla do atmosféry, což zvyšuje tepelné znečištění naší planety.

### 1.2.2. Faktory ovlivňující využívání odpadního tepla

Pokud se máme rozhodnout, zda stojí vůbec za to uvažovat o využití odpadního tepla, je nutné nejdřív znát několik podmínek a rozhodujících faktorů, které mají určit, jestli daný zdroj energie vhodný k dalšímu využití a zpracování. Jde o to, že ne každý zdroj odpadní energie lze zužitkovat, ať už to je kvůli vysoké finanční zátěži podniku nebo nemožnosti zpracování.

Zásadní faktory, které je nutné posoudit, zda je zdroj energie vhodný nebo ne, jsou [14]:

- Množství odpadního tepla
- Tepelný potenciál a stálost odpadního tepla
- Chemické složení a původ odpadního tepla
- Minimální teplota zdroje
- Přítomnost potenciálních spotřebitelů tepla poblíž odběrových míst
- Technologické provedení, dostupnost a jiné parametry.

Tyto otázky musí být předem zodpovězeny před samotným začátkem instalace rekuperačních zařízení. Odpovědi na tyto otázky umožňují lépe pochopit a zanalyzovat kvalitu odpadního tepla a rizika a omezení technického řešení například kvůli korozi, zkratu, vlhkosti atd. [14]

#### 1.2.2.1. Teplota a kvalita zdroje odpadního tepla

Teplota odpadního tepla je naprosto zásadní faktor, když se rozhoduje o možnosti využití jeho energie. Nízkopotenciální teplo, které vzniká chlazením hydraulického oleje, je rozdílné od tepla z přehřátých par na sání kompresoru, které je také možné využít na ohřev teplé vody, jejíž teplota se klidně pohybuje na hodnotách kolem 40 až 90 °C.

Pak existuje další případ, který je naprosto opačný. Při výrobě sádrokartonu se vypařovaná voda v podobě páry o teplotě i 200 °C odsává ze sušičky [13]. Výhodou nízkopotenciálního tepla je to, že se vyskytuje ve vysoké míře v několika na sobě nezávislých průmyslových odvětvích. Problém je ovšem většinou to, že požadovaná teplota aspoň 55 °C je jen zřídka dosažena a tím se výrazně snižují možnosti využití této energie.

Za teplotné médium s nízkým potenciálem je možné považovat to, jehož teplota se pohybuje od teploty okolního prostředí a do 260 °C. Další stupeň je pak teplotné médium středněpotenciální, jehož teplota se pohybuje od 260 °C do 650 °C. Takové teploty je možné najít například v cementářství v cementářských pecích, kde se může teplota uvnitř pece pohybovat až v řádu 2000 °C a odpadní páry, které z pece uniká má teplotu i zmíněných 650 °C.

Poslední kategorie je teplo vysokopotenciální, kam se řadí to odpadní teplo s teplotou média pohybující se od 650 °C do 1650 °C. Tyto teploty se opět vyskytují u pecí, ale jedná se zde o obloukové pece, čily hutní

a železářský průmysl. Takové teploty jsou už schopné rozpohybovat dodatečně nainstalovanou turbínu a jejím otačením vyrábět elektřinu [14].

Zásadním požadavkem na odpadní teplo je tedy, aby měl zdroj tepla vyšší teplotu, než je teplota chladiče. Dále je důležitá i velikost teplotního rozdílu mezi zdrojem tepla a chladičem, který ho odebírá. Toto pak ovlivňuje finální využitelnost odpadního tepla [14].

Teplotní rozdíl ovlivňuje:

- Rychlost přenosu tepla,
- Maximální teoretickou účinnost přeměny odpadního tepla na jiný druh energie (z tepelné např. na elektrickou nebo kinetickou),
- Výběr následných materiálů, ze kterých je chladič vyroben. [14]

Tabulka 1.1: Kategorie odpadního tepla [14]

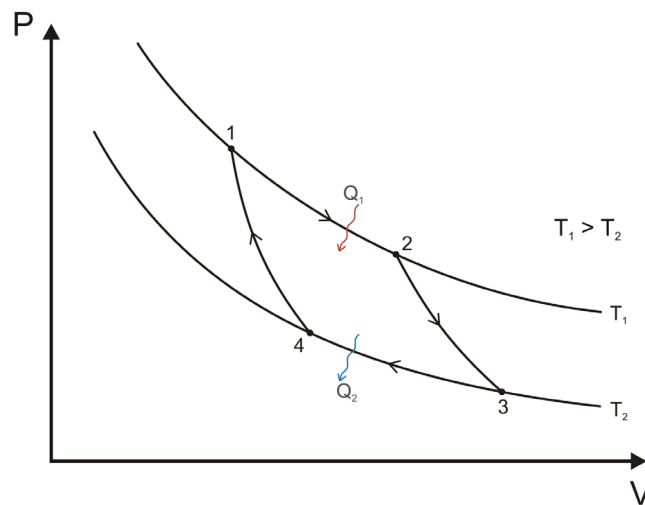
Potenciál / Teplotní rozsah	Příklad zdroje	Teplota [°C]	Typické metody zpracování / technologie
<b>Vysokopotenciální &gt; 650 °C</b>	Elektrické obloukové pece	1370 – 1650	Předehřev spalovacího vzduchu
	Kyslíková výroba oceli	1200	Výroba páry pro proces vytápění nebo pro mechanické / elektrické práce
	Křemíkové pece na hliník	1100 – 1200	
	Šachtové pece na měď	760 - 820	Předehřev vsazek do pecí
	Kalicí pece	930 – 1090	
	Keřímková pec na měď	900 – 1090	Transfer do středněpotenciálních teplot a následné využití
	Zpracování vodíku	650 – 980	
	Spalovací pece	650 – 1430	
	Sklářské pece	1300 – 1540	
	Zpracování koksu	650 – 1000	
	Kuplová pec pro výrobu litiny	820 – 980	
<b>Středněpotenciální 230 – 650 °C</b>	Výdech parního kotle	230 – 480	Předehřev spalovacího vzduchu
	Výfukové plyny turbíny	370 – 540	Výroba elektrické energie
	Výdech pístového motoru	320 – 590	ORC pro výrobu elektrické energie
	Pec pro tepelnou úpravu	430 – 650	Předehřev dalších pecí
	Sušící a vytvrzovací pece	230 – 590	
	Cementářská pec	450 – 620	Využití nízkoteplotních procesů
<b>Nízkopotenciální &lt; 230 °C</b>	Výfukové plyny zplynovacích kotlů	70 – 230	Vytápění prostorů, ohřev vody
	Etylenové kotle		
	Proces parního kondenzátoru	50 – 90	Modernizace pomocí tepelného čerpadla, které zvyšuje teplotu pro konečné použití
	Chladící voda z žíhací pece	70 – 230	
	Chladící voda z vzduchového kompresoru	30 – 50	ORC pro výrobu elektrické energie
	Chladící voda ze spalovacího motoru	70 – 120	
	Klimatizace chladících kondenzátorů	30 – 40	
	Sušící, pečící a vytvrzovací pece	90 – 230	
	Tepelné zpracování pevných / kapalných látek	30 – 230	

### 1.2.3. Maximální účinnost při výrobě elektrické energie pomocí Carnotova cyklu

Využití odpadní tepla má při různých teplotách různé teoretické mezní hodnoty účinnosti pro výrobu energie. Maximální účinnost při dané teplotě

je založena na efektivitě Carnotova cyklu, což je vratný oběžný děj, který se skládá ze čtyř procesů [15]:

- 1) Adiabatické stlačování (4-1) – při adiabatickém ději nedochází k tepelné výměně mimo soustavu.
- 2) Izotermické rozpínání (1-2) – nutné dodat stroji teplo  $Q_2$  (teplo odebrané ohřívací)
- 3) Adiabatické rozpínání (2-3)
- 4) Izotermické stlačování při teplotě chladiče  $T_1$  (3-4) – stroji odebrané teplo  $Q_1$  (teplo odevzdané chladiči)



Obrázek 1.3: Účinnost Carnotova cyklu [16]

Účinnost tohoto děje se dá vyjádřit vzorcem [15]:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$

kde

- $\eta$  je maximální možná účinnost [-]  
 $T_1$  je teplota chladiče [K],  
 $T_2$  je teplota odpadního média [K].

S rostoucí teplotou účinnost stoupá a se snižující se teplotou dramaticky klesá, jak je možno vidět z následujícího grafu.





Obrázek 1.4: Závislost účinnosti na teplotě

Teplota odpadního média přímo ovlivňuje účinnost jeho využití, ale je důležité, aby se zhodnotily i faktory jako je množství odpadního tepla i tepelný potenciál a jeho kvalita.

#### 1.2.3.1. Množství odpadního tepla

Jedním z dalších zásadních faktorů při zjišťování potenciálu využití odpadního tepla je zjistit jeho množství neboli výhřevnost. Výhřevnost nám určuje, jaké množství energie se v proudu teplonosného média skrývá. Plynulost proudu teplonosného média je pak zase měřítkem využitelnosti této energie.

Množství odpadního tepla je funkcí teploty a hmotnostního průtoku a má vzorec [14]:

$$\dot{E} = \dot{m}h(t) \quad (2)$$

kde

$\dot{E}$  jsou ztráty odpadního tepla [ $\frac{W}{s}$ ]

$\dot{m}$  je hmotnostní tok proudu teplonosného média [ $\frac{kg}{s}$ ]

$h(t)$  je měrná entalpie v závislosti na teplotě [J]

#### 1.2.4. Výběr teploty a materiálu zařízení

Teplota zdroje odpadního tepla také významně ovlivňuje materiál, ze kterého je chladicí zařízení vyrobeno. Pokud jsou teploty obzvláště vysoké, tak například plastové komponenty nesmí přijít do kontaktu

se zdrojem. Vysoké teploty mohou dále zvyšovat riziko koroze, oxidace, lomů ve struktuře materiálu, která nastává při opětovném ohřívání a ochlazování zařízení a to je zatím řeč jen o teple, jako takovém. S teplem se do ovzduší mohou uvolňovat i žíravé látky, které mohou také zásadním způsobem ovlivňovat zařízení. Uhlíková ocel začíná oxidovat při teplotách nad 425 °C, nerezová ocel má hranici 650 °C [14]. Zařízení, které pracují ve vyšších teplotách jsou vyrobena z materiálů s legujícími prvky jako jsou chrom, nikl nebo kobalt. Se zvyšujícím obsahem těchto prvků roste odolnost materiálů před žářem, ale také roste jejich cena. Plasty a polymery jsou při vysokých teplotách obzvláště nevhodné, i když existují výjimky. Alternativou proto může být keramika, která má vynikající odolnost proti žáru, ale jejíž nevýhodou je křehkost [17].

#### **1.2.5. Složení odpadního proudu**

Energie, která je obsažená v odpadních vodách a v organické hmotě, která v ní plave, se nejčastěji vyjadřuje formou chemické spotřeby kyslíku, kde se určuje kolik CHSK v mg/l a dá se označit jako energie chemická. I když chemické složení nemá přímý vliv na kvalitu nebo množství dostupného tepla, složení odpadního proudu ovlivňuje především technologie a následná technologie jeho zpracování nebo využití. Proud odpadního tepla je závislý hlavně na faktorech jako je tepelná vodivost a tepelná kapacita, která následně ovlivňuje například účinnost tepelných výměníků. Chemické složení má významný vliv při návrhu tepelných článků [14].

### 1.3. Technologie využití odpadního tepla

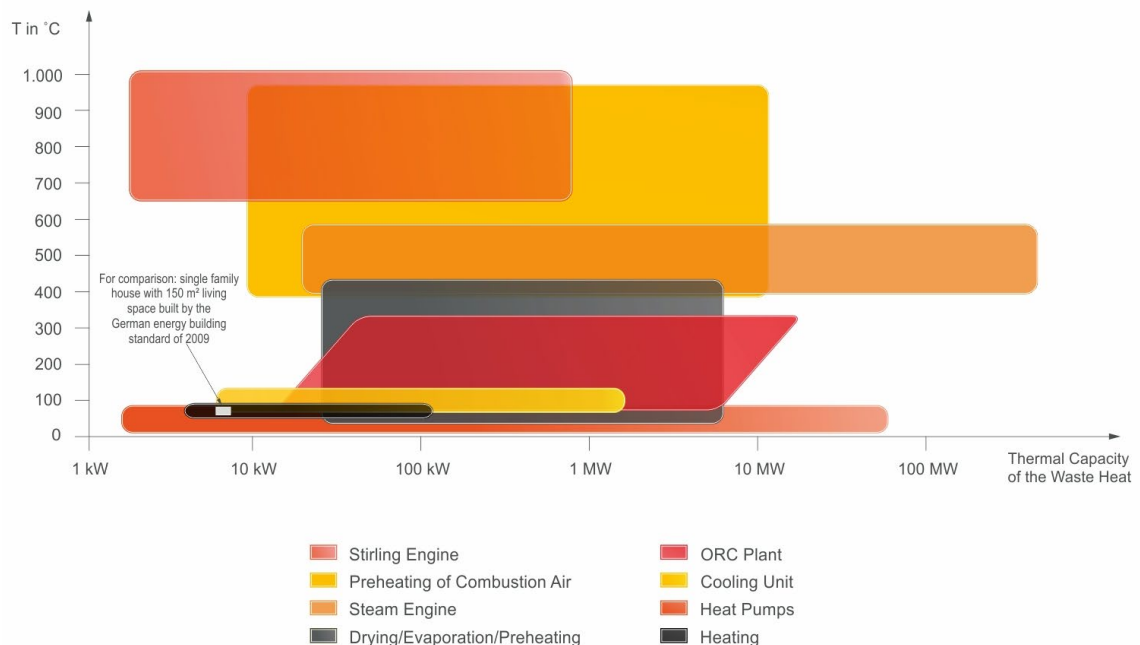
Nejběžnější způsob využití odpadního tepla je nejen u nás, ale i v zahraničí založen především na vytápění průmyslových budov nebo předeřevu užitkové vody. Je to sice aspoň nějaký způsob, jak využít tuto formu energie, ale potenciál je upřímně daleko výš. Problémem tohoto způsobu využití je nízká efektivita a také potíže v podobě omezeného využití trvalého odebrání vzniklého odpadního tepla.

Například v zimě je toto teplo možné využívat jako pomocný zdroj na vytápění budovy prakticky vždy, ale problém nastává hlavně v létě, kdy se teplotní rekordy posunují na vyšší hodnoty a v tu chvíli je vytápění v průmyslové budově zbytečné stejně jako ona investice.

Odpadní teplo je využito ve:

- Vytápění a dodávce teplé vody pro domácnosti (tepelná čerpadla)
- Rekuperaci a následném využití tepla v podnikových procesech.
- Výrobě elektrické energie
- Výměnicích tepla [7].

Nové technologie jsou ale již schopné běžně snížit pracovní náklady v továrnách a budovách, ve kterých jsou nainstalovány, čímž dále zvyšují efektivitu využití energií. Dnes je dostupná celá škála technologií, které se liší možným použitelným tepelným médiem, které pro svoji činnost potřebují, teplotou onoho média, schopností a požadavky využití. [39]



Obrázek 1.5: Kategorizace technologií využívajících odpadní teplo [39]

## 1.4. Tepelná čerpadla

Jak už bylo řečeno, nejvyšší podíl ve využívání energie z odpadního tepla má ohřev vody anebo vytápění, ať už průmyslových budov nebo domácností. I když zde nemluvíme o žádných vysokých teplotách, většinou jsou v řádu 30 °C, je voda obsahující energii z tepla považována za relativně zajímavý stálý zdroj energie, a to obzvláště při spojení s tepelnými čerpadly.

Velký rozmach tepelných čerpadel přišel na počátku 80. let v severských zemích jako Švédsko a Norsko. Severské země se obecně snaží lépe pracovat s využitím energií na vytápění prostor. Na Islandu se například používají termální prameny. Se stále zvyšujícími se ekologickými nároky se tyto technologie už ale vůbec netýkají jen zemí u polárního kruhu. Za poslední dvě desetiletí se to stalo zajímavým a stále žádanějším tématem i u nás.

Tepelná čerpadla mají schopnost zpracovávat i teplo o nízkém potenciálu a svojí činností zvýšit na požadované hodnoty, a to i v zimním období, kdy jsou podmínky a nároky extrémnější. Výhodou je, že ačkoliv mají tuto schopnost, zvládnou to za zlomek ceny díky jejich topnému faktoru. Velkým potenciálním otazníkem v oblasti energetiky jsou dnes elektricky poháněná tepelná čerpadla, která by mohla vyrovnávat výkyvy dodávek a odběrů elektrických sítí, a to jak v zimních, tak v letních podmínkách. [18]

### 1.4.1. Rozdělení tepelných čerpadel podle zdroje tepla

Tepelná čerpadla se dělí podle toho, které zdroje tepla využívají, nebo přesněji řečeno, ve kterém mediu je teplo obsaženo. Typy čerpadel mohou být různé. Například existují čerpadla typu vzduch / voda, kde se odebírá teplo z okolního vzduchu a následně se jím ohřívá nebo předehřívá užitková voda nebo voda na vytápění budovy. Dále může čerpadlo předávat teplo z jednoho media do druhého stejného, jako jsou čerpadla voda - voda, které jsou nejběžnější. Tepelné čerpadla v drtivé většině využívají nízkopotenciální teplo.

Tepelná čerpadla se tedy dělí na následující kategorie podle zdrojů energií jako:

- Vnitřní vzduch (odváděný vnitřním větracím systémem budovy)
- Povrchová voda (rybníky, nádrže)
- Podzemní voda (studny, vrty)
- Půdní vrstvy (zemní kolektory)
- Suché zemské teplo hornin (suché zemní vrty, doly, šachty)

Jednotlivé zdroje energie vysoce ovlivňují konstrukci a vlastnosti tepelného čerpadla. Každé se od sebe nějak liší a má své návrhové výhody, nevýhody a omezení [19].

#### 1.4.1.1. Tepelné čerpadlo země-voda s plošným kolektorem

Zdroj tepla je zde vyhřátá země, ve které je nainstalováno potrubí (primární okruh), jehož účelem je předat tuto energii do otopné vody (sekundárního okruhu). Ke schopnému provozu je nutná stavba buď hlubinných vrtů nebo plošných kolektorů.

Výhodou tohoto čerpadla je to, že i v zimních podmínkách se dá využít geotermální energie, které je v zemi obsažené. Nutnost je ovšem v instalaci kolektoru do větší hloubky okolo 1,2 až 1,5 metrů. K zajištění dobré funkčnosti kolektoru je také nutné zajistit velkou plochu, ve které bude primární okruh nainstalován [23]. Tato vybraná plocha musí být dále brána jako zastavěná a pro žádnou další zástavbu je nevyužitelná. Důležitým faktorem může být i druh půdy, ve které je okruh nainstalován, protože různé typy zemin mohou výrazně snížit výkon tepla získaného z půdy. Komplikace mohou především nastat v kamenitých nebo písčitých půdách.

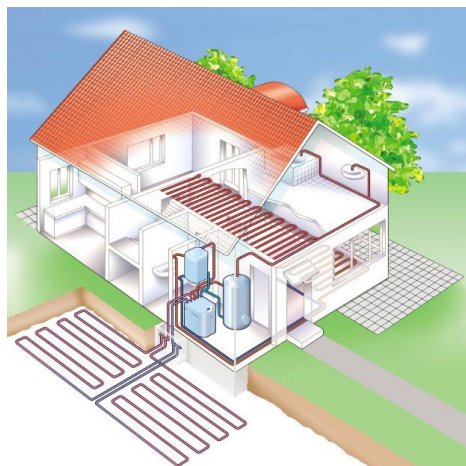
Okruhy plošných kolektorů se instalují v hloubce od 1,2 do 1,5 metru ve vzdálenosti 60 – 80 cm od sebe a jsou v rovině nebo mírně z kopce, aby bylo snadnější je odvodňovat. Pro 1 kWh vyrobeného výkonu je potřeba cca 30 m<sup>2</sup> pozemku [20].

#### **Výhody:**

- Dlouhá životnost
- Stabilní výkony a úspory, které dosahují i 70 % provozních nákladů z klasického vytápění.
- Až o 30 % nižší spotřeba elektrické energie oproti čerpadlům vzduch - voda.

#### **Nevýhody:**

- Rozsáhlé zemní práce, které vyžadují dostatečně velký pozemek, který se nesmí jinak využít. (až 400 m<sup>2</sup>).
- Snížení využitelnosti pozemku (zástavba) [20].



Obrázek 1.6: Tepelné čerpadlo země-voda [23]



#### 1.4.1.2. Tepelné čerpadlo země-voda s hlubinným kolektorem

Stejně jako u plošného kolektoru se u těchto hlubinných získává teplo z vyhřátě země. Teplo se ale ze země získává pomocí geotermálních hlubinných vrtů. Tyto vrty je možné realizovat jen na základě úředních povolení, o což se ale ve většině případů postará realizační firma, která kolektor instaluje. Jak už bylo řečeno, jedná se o hlubinný vrt, který čerpá teplo ze spodní podpovrchové vrstvy půdy, a které je možno využívat celoročně a pro jakýkoliv druh objektu.

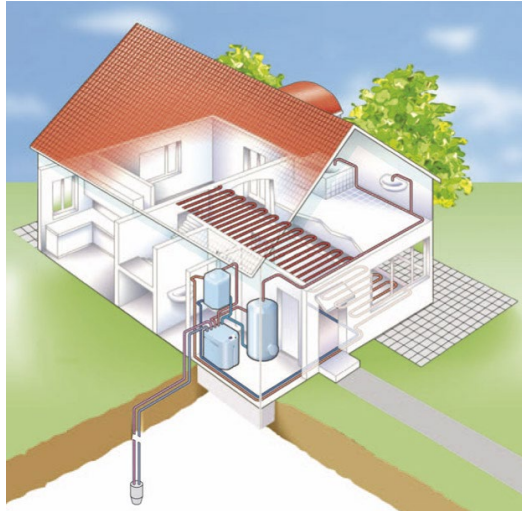
Nutnost získání povolení k vrtu je zapříčiněná především kvůli ochraně životního prostředí (spodní vody apod.), ale jinak se dá říct, že tento způsob získávání tepla je ekologicky nezávadný, a hlavně nevyžaduje rozsáhlé pozemky k jeho realizaci. Jistý požadavek na typ půdy tu ale stále je, a to tvrdost podlaží [20]. Kdyby docházelo k posunům půdy, trubky by se utrhly a celý systém by přestal fungovat. Jisté varianty, jak nedostatečnou tvrdost podlaží kompenzovat, tu jsou, ale od toho se také odráží cena, kde za kvalitní tvrdé podlaží zaplatí majitel 1200 Kč/m a v případě nestabilního se může cena vyšplhat až na dvojnásobek z důvodu zpevnování pomocí konstrukčních prvků. Hloubka vrtu se může místo od místa lišit, ale zpravidla se bere ideální hloubka kolem 15 m k získání výkonu 1 kWh. Pro rodinný domek se dále musí vyvrtat vrt o průměru 16 cm do hloubky někdy až 150 m [20].

#### **Výhody:**

- Dlouhá životnost
- Nehlučnost a bezúdržbové řešení
- Stálost výkonu jak v nízkých, tak vysokých teplotách na povrchu.
- Možnost pasivního / aktivního chlazení.

#### **Nevýhody:**

- Stavební povolení pro hlubinný vrt
- Vyšší náklady za výkopové práce [20].



Obrázek 1.7: Tepelné čerpadlo země-voda [23]

#### 1.4.1.3. Tepelné čerpadlo vzduch-voda

Jednou z největších předností tohoto řešení je snadná venkovní instalace na prakticky jakýkoliv typ stavby a možnost připojení na již instalovaný topný systém s radiátory. Jak je z názvu patrné, teplo je odčerpáváno přímo z venkovního vzduchu, které je následně předáno vodě v topném systému. Vzduch jako takový je velice dostupné medium a díky jeho venkovní teplotě, která se i v zimě pohybuje nad bodem mrazu patří mezi nejrozšířenější media s nízkopotenciálním topným faktorem. Výkon tepelného čerpadla ovšem roste se vzrůstající teplotou. Kvůli tomu je tento typ čerpadla vhodný pro použití v bivalentním provozu. Tím se zajistí provoz i při nízkých teplotách, díky čemuž se účinnost zařízení podstatně zvyšuje.

I když je instalace tohoto typu čerpadla dražší záležitost, kde je průměrná cena okolo 200 000 Kč, je následný provoz čerpadla schopen ušetřit náklady na vytápění až o 50 % oproti klasickým.

Návratnost investice se u tohoto druhu čerpadel může pohybovat kolem 5 let. [22]

#### **Výhody:**

- Nižší počáteční náklady v porovnání s tepelnými čerpadly typu země / voda
- Možnost chlazení v letním období
- Snadná instalace

#### **Nevýhody:**

- Vyšší spotřeba elektřiny a nižší životnost kompresoru než země - voda.
- Hlučná instalace
- Snížený výkon při nízkých teplotách vzduchu [20].



Obrázek 1.8: Tepelné čerpadlo vzduch-voda [23]

#### 1.4.1.4. Tepelné čerpadlo vzduch-vzduch

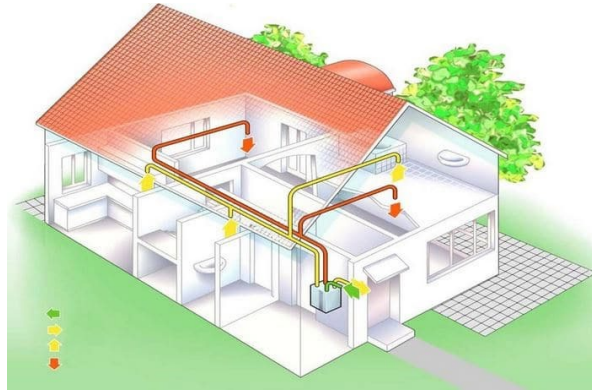
Tepelná čerpadla vzduch - vzduch velice často využívaná jako chladicí zařízení v letních obdobích – klimatizace. Tato tepelná čerpadla ohřívají vnitřní vzduch přímo. Většinou je to z důvodu absence topného systému budovy nebo části budovy. Díky tomu se pak dosahuje vyššího topného faktoru než u ostatních Tepelných čerpadel. Dá se říct, že jsou velice podobná čerpadlům typu vzduch / voda, ale místo vody ohřívají vnitřní vzduch budovy. Je důležité zajistit, aby se ohřátý vzduch roznesl po celé budově, a proto je nejvýhodnější tato zařízení instalovat do co nejméně členitých prostor (openspace). [24]

#### **Výhody:**

- Nejnižší pořizovací cena
- Ekonomický provoz a snadná instalace
- Možnost chlazení v letním období
- Možnost odvlhčování, čištění a ionizace vzduchu

#### **Nevýhody:**

- Absence ohřevu TUV
- Nevhodnost pro objekty s velkým členěním prostor [20].



Obrázek 1.9: Tepelné čerpadlo vzduch-vzduch [23]

#### 1.4.1.5. Tepelné čerpadlo voda-voda

Asi nejméně využívané tepelné čerpadlo je typ voda / voda. Pro instalaci je nutné vyvrtat minimálně dvě studny o hloubce 5 – 25 m o průměru 20 – 25 cm, které od sebe budou vzdáleny 20 metrů. Zdrojem tepla je povrchová voda z vodních toků, podzemní vody, nádrží anebo odpadních vod, které v sobě obsahují odpadní teplo s přítokem minimálně 0,5 l/s, čímž se výrazně snižuje možnost instalace [24].

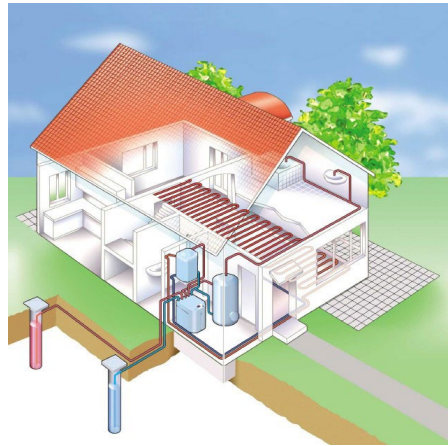
Nejvhodnějším přírodním zdrojem energie jsou studny, ve kterých má voda stabilní teplotu okolo 10 °C. Mezi další vhodné zdroje patří odpadní vody z průmyslové výroby o konstantní teplotě. Čím vyšší je teplota zdroje, tím se zvyšuje topný faktor stejně jako čím nižší je výstupní teplota.

#### **Výhody:**

- Nejvyšší topný faktor ze všech typů tepelných čerpadel
- Zpětné využití odpadního tepla v technologických procesech

#### **Nevýhody:**

- Vyšší náklady na údržbu a servis
- Nutný dostatek vody. [20]



Obrázek 1.10: Tepelné čerpadlo voda-voda [23]

## 1.4.2. Topný faktor

Topný faktor je jedním z ukazatelů účinnosti tepelného čerpadla. Každý druh nebo typ tepelného čerpadla disponuje jiným topným faktorem a je jen na zákazníkovi, aby se rozhodl, který typ je pro něj přijatelný, kdy topný faktor udává poměr přeneseného tepla a spotřebované energie. Existují dva druhy různých topných faktorů, se kterými se v praxi může zákazník setkat. Tyto dva typy se označují jako COP a SCOP a jsou vyjádřeny číslem. Nejběžnější hodnoty topných faktorů se pohybují v intervalu od 2 do 5 [25].

### 1.4.2.1. Topný faktor (COP)

Výkonnostní koeficient se používá jako ukazatel hodnot pro jeden standartní bod, který se řídí pro laboratorní zkoušení tepelných čerpadel a chladících zařízení ČSN EN 14 511 a odpovídá nejčastějšímu provoznímu stavu. Určuje účinnost tepelného čerpadla nebo jinak řečeno, kolik W tepelné energie je vyrobeno po 1 W dodané energie.

Vzorec pro výpočet COP je [25]:

$$COP = \frac{\Phi}{P_c + P_{aux}} \quad (3)$$

kde

$COP$  je topný faktor [-]

$P_c$  je elektrický příkon kompresoru [W]

$P_{aux}$  je elektrický příkon k překonání tlakové ztráty kondenzátoru, odtávání a vlastní regulaci tepelného čerpadla [W].

Když se počítá COP, tak je nutné do celkového příkonu  $P_c + P_{aux}$  přičíst kromě příkonu kompresoru i poměrovou část výhřevu a odtávání,

elektrickou energii regulačních a zabezpečovacích prvků (expanzní ventil, vyhřívání kompresoru proti kondenzaci chladiva) a taky elektrický příkon nutný pro překonání tlakových ztrát výměníků (výparník, kondenzátor) tepelného čerpadla při požadovaném průtoku teplotně nosných látek [25].

Když se například počítá výkonnostní faktor tepelného čerpadla o výkonu 15 kW teplotě 5 °C / 50 °C, tak se jeho teoretický výkonnostní faktor vypočítá pomocí spotřeby kompresoru, která je řekněme 3 kW. Pak se teoretické COP rovná 5. Pokud ale budeme vycházet z celkové spotřeby, kde se sečte spotřeba ventilátoru 150 W, oběhové čerpadlo sekundárního okruhu 30 W, expanzní ventily 20 W, poměrová část výhřevu a odtávání 300 W, tak je reálné COP rovno 4,29.

Topného faktoru, který je uveden v dostatečném provozním rozsahu, který nastane při reálném používání tepelného čerpadla, dosáhneme pomocí měření v laboratorních podmínkách.

Evropská asociace pro tepelná čerpadla (EHPA) uděluje tepelným čerpadlům minimální hodnoty topného faktoru COP. Jedná se o udělení značky kvality Q-label, která se uděluje po dosažení požadovaného minimálního topného faktoru za standardních podmínek. Dané kritérium posléze převzal program Zelená úsporám [25].

Minimální topné faktory COP:

Tabulka 1.2: Topné faktory tepelných čerpadel

<b>Tepelné čerpadlo</b>	<b>Jmenovité podmínky</b>	<b>Požadavek</b>
vzduch-voda	A2/W35	COP > 3.1
země-voda	B0/W35	COP > 4.3
voda-voda	W10/W35	COP > 5.1

#### 1.4.2.2. Sezónní topný faktor (SCOP)

Pokud chce uživatel získat ještě větší povědomí o vhodnosti jednotlivých variant čerpadel, měl by se zajímat ještě o přesnější metodu hodnocení topného faktoru, a to tu sezónní, která je definována normou ČSN EN 14 825, která není stanovena podle laboratorních měření pro jednu škálu provozních podmínek. Stanovení hodnot SCOP (a ověření exaktním měřením) se musí řešit pro každý typ tepelného čerpadla a výkonovou řadu samostatně v nezávislé zkušebně, což je finančně, technologicky a časově náročné. SCOP se získá výpočtem podle uvedené normy s využitím korekcí a okrajových podmínek, které vycházejí z dokumentů pro certifikování tepelných čerpadel, doplněné o hodnoty získané dle ČSN EN 14 511. Stejně tepelné čerpadlo totiž může vykazovat rozdílné hodnoty SCOP a to kvůli jednomu zásadnímu faktoru, kterým je klimatická oblast. Klimatické oblasti jsou definované jako tři, ve kterých je Evropa rozdělena následovně:

- Chladné podnebí – Helsinky s návrhovou venkovní teplotou -22 °C a délkou otopné sezóny 6446 h.
- Průměrné podnebí – Štrasburk s návrhovou venkovní teplotou -10 °C a délkou otopné sezóny 4910 h.

— Teplejší podnebí – Atény s návrhovou venkovní teplotou +2 °C a délkou otopné sezóny 3590 h [25].

Sezónní topný faktor SCOP je tedy založen na komplexnějších výpočtech než COP, který nebere v úvahu změny teplot v průběhu roku.

SCOP lze vypočítat podle vzorce:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (4)$$

kde

$SCOP$  je sezónní topný faktor [-]

$Q_H$  je referenční roční požadavek na vytápění [Wh]

$Q_{HE}$  je roční spotřeba elektrické energie [Wh]

### 1.4.3. Základní komponenty tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo se skládá ze čtyř základních částí:

#### Výparník

Do výparníku se přivádí cirkulující pracovní chladicí kapalina, která odebírá energii ze zdroje tepla. Absorbované teplo a nízký tlak způsobuje vypařování chladicí kapaliny, jejíž páry se stanou novým nositelem této energie a jsou dále přiváděny do kompresoru. Chladicí kapalina se následně ochladí a musí být pomocí cirkulace znovu zvýšena její teplota pomocí nízkopotenciálního tepla. Výměníky, které jsou určeny pro kapaliny jsou z většinou letované deskové a pro vzduch jsou trubkové [26].

#### Kompresor

Kompresor nasává plyny z výparníku, stlačuje je a vytlačuje do kondenzátoru. Práce, kterou je kompresor poháněn se změní na teplo, které se přičítá k přivedenému teplu ve výparníku. Kompresor je z těchto čtyř částí jedině zařízení v oběhu, kterému je nutné dodávat hnací energii (většinou elektrickou). [26]

#### Kondenzátor

V kondenzátoru se odvádí teplo z výparníku a kompresoru pomocí cirkulující chladicí kapaliny. Odvedené teplo způsobuje kondenzaci par cirkulující chladicí látky. Energie přivedená do kondenzátoru parami chladiva se do sekundárního okruhu, které převede teplo do topného systému. [26]

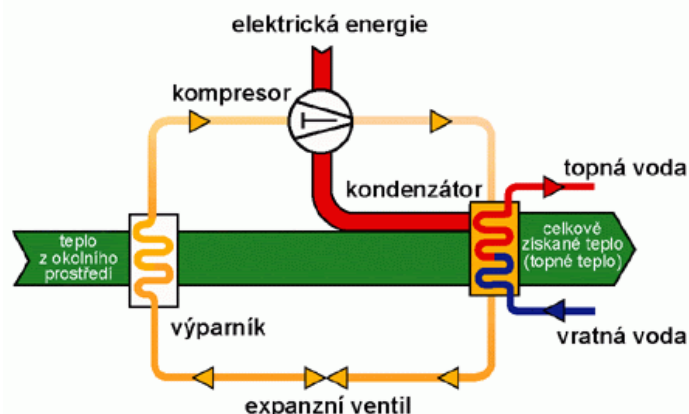
## Expanzní ventil

Kapalné chladivo, které kondenzovalo při vyšším tlaku se převádí (škrtí) do výparníku, aby se zde opět vypařilo při nižším tlaku. Hlavní úlohou expanzního ventilu je udržovat rozdílný tlak mezi vysokotlakou a nízkotlakou stranou chladicího oběhu [26].

### 1.4.4. Princip tepelného čerpadla

Úloha tepelného čerpadla se řekne snadno. Jeho pomocí transformovat nízkopotenciální teplo na vyšší. Neomezené množství tepla, které je všude kolem nás, ať už obsažené ve vodě, vzduchu nebo i zemi mnohdy ale není dostatečně potenciální, jak bychom si přáli.

Principem celého procesu je odebrat teplo z okolního prostředí pomocí vhodného tepelného nosiče, který díky své nižší teplotě dokáže efektivně absorbovat energii z okolního prostředí. Nemrznoucí směs je přivedena do výparníku tepelného čerpadla, kde je udržována nízká teplota a tlak. Zde dojde k předání tepla chladivu, které je cirkuluje v uzavřeném okruhu uvnitř zařízení. Toto kapalné chladivo se díky přijatému teplu začne odpařovat a páry tohoto chladiva se nasají kompresorem, který je prudce stlačí. Díky kompresi se zvýší tlak a tím i teplota, čímž se nízkopotenciální medium stane mediem s vyšším potenciálem a následně putuje tento nosič do kondenzátoru. V kondenzátoru pak chladič odevzdá veškerou svoji energii, která je rovna součtu energie odebrané z okolního prostředí a dodané hnací energii snížené o ztráty v kompresoru do otopného systému, který vytápí objekt. Plynné chladivo změní své skupenství opět na kapalné a putuje zpět do výparníku [26].



Obrázek 1.11: Schema tepelného čerpadla [27]

#### 1.4.4.1. Bivalentní provoz tepelného čerpadla

Potřebný výkon na vytápění se v průběhu roku značně mění. Teplotní extrémy jdou oběma směry, a proto není možné dimenzovat tepelná čerpadla na maximální výkon. Kdybychom chtěli vyrobit tepelné čerpadlo,



keré by fungovalo na maximální výkon ve všech podmínkách, tak by byla pořizovací cena mnohonásobně vyšší, než je tomu doposud a investice by se možná ani nikdy nevrátila.

Kvůli tomu jsou tepelná čerpadla doplněna o tzv. špičkový zdroj tepla, kterým může být třeba elektrokotel. Jeho nevýhodou jsou další požadavky na elektrickou energii, ale je to nezbytnost v dobách velkých mrazů, kdy není výkon tepelného čerpadla dostatečný. Instalovaný výkon těchto tepelných čerpadel je nižší, než maximální potřebný (mezi 50 - 80 %). Riziko nastává při výpadku proudou [28].

#### 1.4.4.2. *Monovalentní provoz tepelného čerpadla*

Monovalentní tepelná čerpadla se používají k pokrytí tepelných ztrát, která se u moderních budov pohybuje okolo 12 kW. Výkon tepelného čerpadla je nastaven právě tak, aby dokázal zvládnout pokrýt tyto tepelné ztráty. Je proto nutné, aby tepelné čerpadlo spolupracovalo s dalším zdrojem, což je výhodné z hlediska investice, která pak není tak vysoká. Omezující faktory jsou pouze pro tepelná čerpadla typu vzduch-voda a vzduch/vzduch, které může ovlivňovat venkovní teplota, a to především jejich účinnost, kdy tepelné čerpadlo funguje jen do -13 °C. [28]

## 1.5. Organický Rankinův cyklus (ORC)

V posledních letech se kvůli stále se zvyšující poptávce po levnější elektrické energii objevila řada inovací v technologiích, které se dnes zdají jako vhodné alternativy. Mezi ně patří právě ty technologie, které pracují na principu organického Rankinova procesu. Dá se říct, že jde o klasický kondenzační cyklus, jaký se používá ve všech elektrárnách, které k výrobě elektrického proudu používají parní turbínu. Rozdíl v ORC je v tom, že místo vodní páry se používá organická látka, která jako nosné medium roztáčí turbínu a tím se generátorem vyrobí elektřina [29].

Důvod, proč se místo vody používá jiné nosné medium, je jednoduchý. ORC pracuje s takovými teplotními rozdíly a na takových teplotních úrovních, se kterými si standartní parní cyklus již neví rady [29].

Existují dva základní typy ORC zařízení. První je horkovodní ORC zařízení, které jako vstupní energetické médium používá využívá horkou vodu a horkovzdušné ORC, které jako nosné médium využívá spaliny [29].

Častou otázkou, která je předmětem debat ohledně ORC zařízení, je, které zařízení je nejlepší, co se týče účinnosti, neboli které dokáže vyrobit nejvíce elektrického proudu. Kvůli tomu, že ORC systémy využívají jako vstupní média s nízkým tepelným potenciálem, nemůžeme čekat jejich účinnosti nijak závratné. Spíše než o účinnost jde ale o jeho začlenění do energetické koncepce podniku [29].

ORC zařízení se využívají především v průmyslových odvětvích, kde se vytváří přebytek odpadního tepla. Další předností těchto zařízení je jejich ekologičnost.

Hlavním přínosem těchto zařízení je [29]:

- Společnou produkcí tepelné a elektrické energie se zvyšuje účinnost využití primárního zdroje paliva,
- Omezení znečištění životního prostředí,
- Nižší zatěžování přenosové soustavy / snížení ztrát vzniklé přenosem,
- Potenciální pokrytí nákladů na energii.

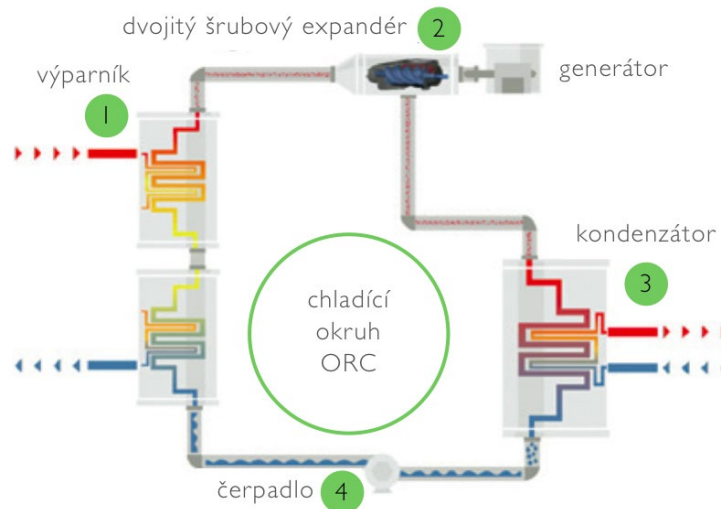
### 1.5.1. Horkovodní ORC – Princip

Bylo řečeno, že ORC zařízení pracují na principu otáčející se turbíny, ale v případě horkovodních zařízení to není úplně přesné. Pro samotnou přeměnu tepelné energie na elektrickou se zde většinou používá zařízení nazývané expandér.

Princip takového systému je [29]:

- Horká voda vstupuje do výparníku a zahřívá provozní kapalinu ORC (většinou olej) na bod varu a tím ho přeměňuje na páru. Horká pára pak vytváří tlak.
- Pára je stlačena skrz šroubový expandér a ten roztáčí elektrický generátor na základě změny tlaků.

- Pára je zchlazena zdrojem studené vody a v kondenzátoru kondenzuje zpět do kapalné formy.
- Provozní medium se vrací zpátky do výparníku a proces se opakuje.



Obrázek 1.12: Schema zařízení ORC

Expandér si můžeme představit jako kompresor, ale zde se jedná o dvojitý šroubový expandér:



Obrázek 1.13: Expander

Jako provozní medium je používán například pentafluoropropan a zdrojem tepla je použita teplá voda o teplotě od 65 °C do 125 °C, čili se jedná o teploty, které se v běžné energetice využívají pouze na vytápění. [29]

Podle typu zapojení můžeme čekat výstupní elektrický výkon v rozmezí 10 – 300 kWel. Tak velký rozptyl možných výstupních hodnot je způsoben především teplotou vstupní vody a jejím průtokem. Se zvyšujícím se průtokem stejně jako se zvyšující se teplotou vody výstupní výkon stoupá a hmotnostní průtok horké vody vstupující do ORC může být již od 4 l/s. [29]

Celý systém pracuje v nízkých otáčkách, tedy kolem 5000 ot/min. Generátor je asynchronní indukční s kotvou nakrátko. Není schopný

fungovat v ostrovním režimu, jinými slovy, musí být napojen na klasickou rozvodnou síť. [29]

Dnes už je na trhu několik kvalitních výrobců malých horkovodních ORC zařízení, která jsou jak malá, tak větší. Výhodou malých systémů je, že i když kolikrát nedokážou vyrobit obrovské množství elektrické energie, tak nahrazují malé chladicí systémy, připojených například na motorech kogeneračních jednotek, čímž kompletně odpadá nutnost instalace klimatizací a jiných revitalizátorů vzduchu. Jiné společnosti, jako například Electratherm, cílí na průmyslové budovy a zařízení s produkcí odpadního tepla, s jehož pomocí můžou ORC zařízení vyrobit řádově až desítky stovek kW. [29]

Všechny ORC systémy by se dali shrnout dvěma slovy, a to aktivní chlazení. Když se vyskytne proces, jehož vedlejším produktem je teplo, které je nutné redukovat, ať už z důvodu ergonomie pracovního místa anebo dosahuje takových teplot, které by byla škoda nevyužít, jsou tyto systémy předurčeny k náhradě za standartní chladicí jednotky. [29]

Co se účinnosti přeměny tepla na elektrickou energii týče, pohybují se horkovodní ORC zařízení někde okolo 8–12 %, ale jak už bylo řečeno, jejich hlavním účelem není výroba elektrické energie, ale její úspora. [29]

Výhodou horkovodního ORC zařízení spočívá v jejich jednoduchosti, která se i tak ale nesmí podceňovat, protože špatný návrh zapojení do systému může znamenat místo nízké účinnosti zařízení až prakticky neúčinnost a jen zbytečné náklady. Proto je důležité důkladné vyprojektování a bezchybná instalace. [29]

### **1.5.2. Spalinové ORC – Princip**

Spalinové ORC využívá jako vstupní médium přímo samotné spaliny z kogenerační jednotky, průmyslových procesů, kotlů atd. od teplot 350 °C do cca 550 °C. Spaliny ve výparníku ohřívají provozní médium ORC systému, kterým může být například toluen. Ten se zahřeje na teplotu okolo 330 °C a dochází k velké expanzi na lopatkách turbíny. Za turbínou je médium přiváděno do vakua, kde je stabilizováno a pak je následně zkondenzováno a převedeno znovu do kapalné formy a navráceno na začátek celého cyklu. [29]

Turbína ORC zařízení je většinou napojena vertikálně. Je nasazena na hřídel, na které je uložen i samotný generátor. Otáčky turbíny a generátoru jsou cca 25 000 ot/min, což umožňuje generování potřebných 50 Hz a 400 V. I tento systém je nutné napojit na klasickou rozvodnou síť. [29]

Spaliny z ORC zařízení dále vystupují přes komín o teplotě cca 180 °C. Toto je taky teplota, na kterou se dopočítává účinnost celého systému, která se pohybuje okolo 18-22 %. U spalinových ORC zařízení je důležité se také bavit o další hodnotě, kterou je teplota chladicí vody. Teplota chladicí vody z ORC (která slouží k chlazení toluenu) může totiž dosáhnout i teploty 90 °C. Tento parametr teploty chladicí vody je natolik zásadní,

že se nabízí prostor pro využití takového ORC, jako seriózního zařízení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. [29]

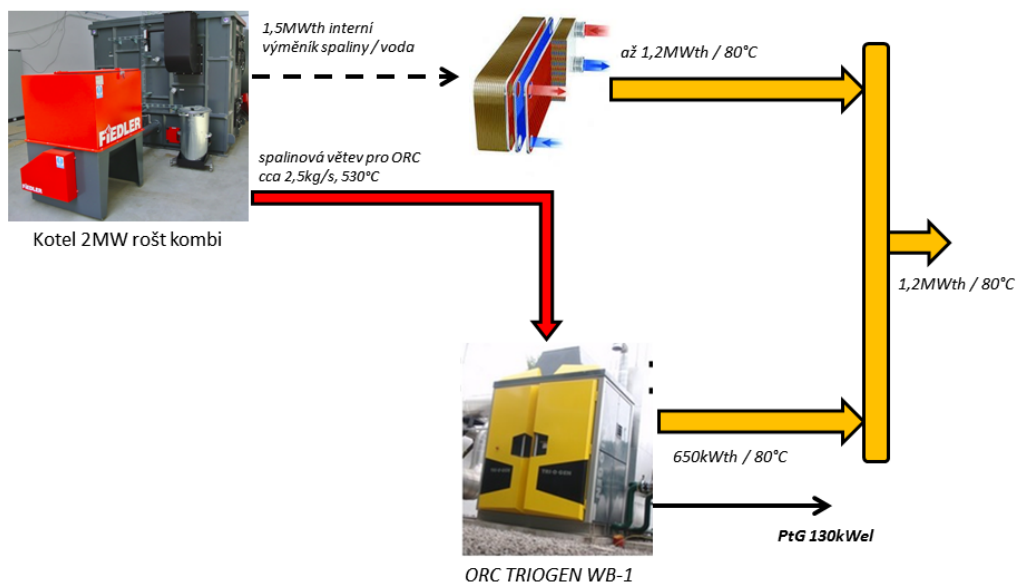
Výstupní výkon spalínového ORC je dán průtokem a teplotou spalin a rovněž typem samotného ORC zařízení. Nejčastěji se vyskytují zařízení s parametry výstupního elektrického výkonu do 160 kWel a teplotou chladicí vody do 80 °C. ORC systémy, které svým výkonem přesahují obvyklou hranici 300kW, využívají ohřevu vnitřního media přes olejové hospodářství. Tedy ORC samotné není napojeno přímo na spaliny, ale je zde vřazen olejový cyklus, který pomáhá udržet stabilitu celého provozu. [29]

Tabulka 1.3: Parametry spalínových ORC systémů

Výroba elektrické energie z ORC	Energie v horké vodě	Teplota vody za ORC
50 KweI	200 kWth	do 90 °C
70 KweI	300 kWth	do 90 °C
120 KweI	520 kWth	do 90 °C
130 KweI	650 kWth	do 85 °C
250 KweI	1400 kWth	do 90 °C
350 KweI	1600 kWth	do 90 °C
500 KweI	2300 kWth	do 90 °C

Spalínové ORC zařízení můžeme vidět instalované na motorech kogeneračních jednotek, v průmyslu na využití spalin, ale čím dál častěji pronikají do oblasti dřevozpracujících závodů nebo decentrálního vytápění obce či města. Důvod je právě v možnosti využití teplé vody z chladicího okruhu ORC. [29]

Jako příklad instalace biomasové kogenerace s využitím ORC ukazuje následující obrázek:



Obrázek 1.14: Příklad biomasové elektrárny - kombinovaná výroba elektřiny a tepla ze dřeva [29]

Základem je kotel na biomasu (štěpka, piliny apod.). Spaliny o teplotě až 530 °C vstupují přímo do evaporátoru ORC jednotky. Systém vyrábí elektrickou energii a teplo. Jak elektřina, tak teplo se ideálně využije přímo v místě instalace – např. v dřevozpracujícím závodě. Výhodou takového řešení je začlenění odpadového produktu z pil – tedy dřevní hmoty do energetického procesu s následným přímým využitím. [29]

## 1.6. Průmyslové chlazení

Drtivá většina technických zařízení a průmyslových strojů se vyznačuje uvolňováním značného množství tepla, které je z velké části nežádoucí a může dokonce negativně ovlivňovat ergonomii pracovišť, zaměstnance ale také i chod samotného zařízení, které toto teplo emituje. Proto je nutné toto teplo v co největší možné míře odvádět a přetvářet na chlad nebo jiný typ energie.

Mezi nejpoužívanější metody chlazení patří [30]:

- Chlazení přirozenými prostředky – vzduch, voda, sníh, led,
- Chlazení chemickými roztoky – snížení teploty je docíleno pomocí rozpouštění, které je způsobeno přebytečným teplem,
- Chlazení vypařováním chladiva – systém strojního chlazení (kompresní a sorpční).

Opět je hlavním přínosem snížení provozních nákladů na chlazení. Je to dáno i energetickou směrnicí Evropského parlamentu 2010/31/EU, která klade stále větší důraz na snižování spotřeby těchto energií. Tím, že se průmyslovým chlazením šetří náklady se dále zlepšuje i kvalita vzduchu, což vytváří vhodné pracovní prostředí a podmínky pro zaměstnance.

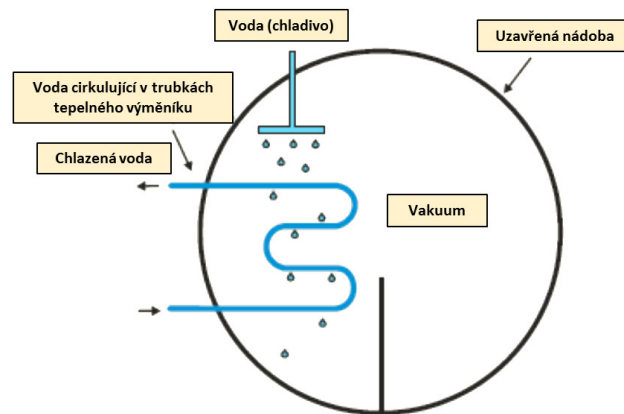
### 1.6.1. Absorpční chlazení

Absorpční chlazení je založeno na fyzikálních vlastnostech dvou látek (absorbent a chladivo), neboli schopnosti jejich vzájemné absorpce. Absorpční chlazení využívají relativně malá čerpadla pro dosažení tlakových rozdílů, na rozdíl od kompresorových, které stlačují páry, což je výkonově i energeticky náročnější.

Princip absorpčního chlazení lze rozdělit do pěti fází [30]:

#### 1. Fáze

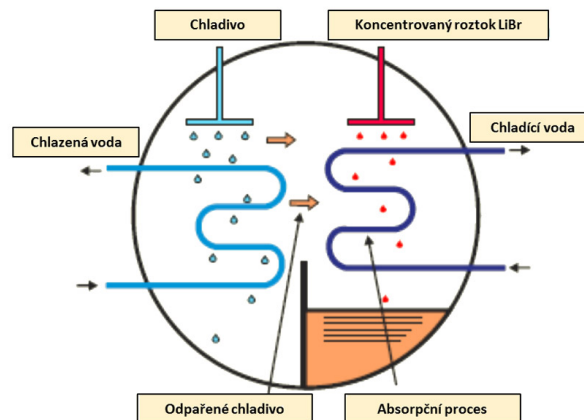
V těchto systémech chladivo, tj. voda, absorbuje teplo v nižší teplotě a nižším tlaku během odpařování a uvolňuje teplo ve vyšší teplotě a vyšším tlaku během kondenzace. Při atmosférickém tlaku voda vaří při 100 °C. Při udržování ve vysokém vakuu se voda vaří a ochlazuje sama.



Obrázek 1.15: Fáze 1 [30]

## 2. Fáze

Po zahřátí páry chladiva stoupají a odcházejí z výparníku. Následně jsou absorbovány v absorbéru do kapalné absorpční látky, např. koncentrovaný roztok LiBr za současného uvolnění absorpčního tepla. Bromid lithný má schopnost absorbovat vodu (chladiivo) kvůli své chemické afinitě, která je přímo úměrná koncentraci a nepřímo úměrná její teplotě. Odpaření chladiva se koná při nízkém tlaku. Zředěný roztok, který obsahuje vstřebávané chladicí páry, se zahřívá na vyšší tlak viz obr. [30]

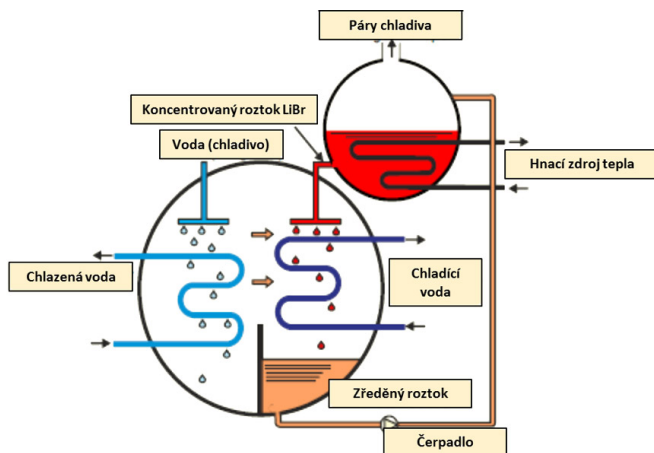


Obrázek 1.16: Fáze 2 [30]

## 3. Fáze

Do části oběhu s vyšším pracovním tlakem je čerpadlem dopravena vzniklá kapalná směs. Zředěný LiBr roztok ztrácí svou schopnost absorbovat vodní páru. Z toho důvodu je třeba znovu roztok zahřát za použití zdroje tepla viz obr. [30]

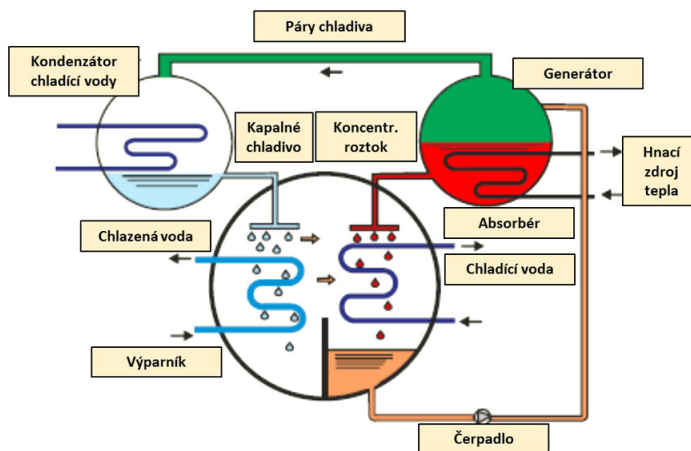




Obrázek 1.17: Fáze 3 [30]

#### 4. Fáze

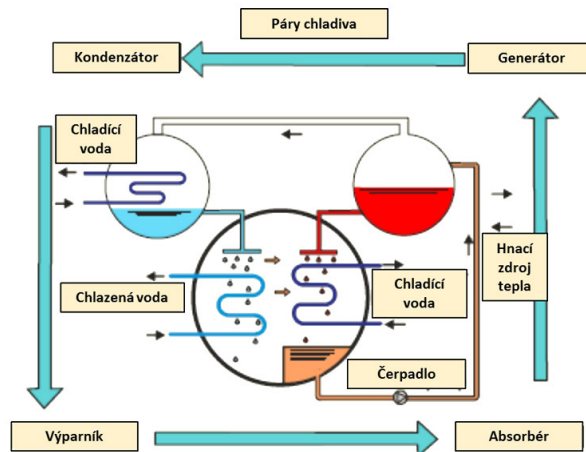
Páry chladiva z absorpční kapaliny jsou díky zahřátí směsi vypuzeny. V kondenzátoru páry kondenzují při kontaktu s ochlazovaným povrchem a stávají se kapalným chladičem. Do výparníku opět vystupuje kapalně chladiivo přes škrťací ventil, kde vlivem snížení tlaku dochází k varu chladiva při nízké teplotě a odnímání tepla ochlazovanému mediu viz obr. [30]



Obrázek 1.18: Fáze 4 [30]

#### 5. Fáze

Chladiivo prochází sérií procesů chladicího cyklu. Jedná se zejména o odpařování, absorpci, čerpadlo, kondenzaci, škrčení a expanzi. Během tohoto cyklu chladiivo absorbuje teplo z nízkoteplotního zdroje tepla, uvolní jej v kondenzátoru při vyšší teplotě viz obr. [30]



Obrázek 1.19: Fáze 5 [30]

Proces absorpčního chladicího zařízení se dá rozdělit na jednostupňový a dvoustupňový cyklus. Chladicí zařízení, které využívá dvoustupňového cyklu, zvýší svoji účinnost pomocí tepla obsaženého v odpařených parách chladiva v prvním stupni, které je pak následně využito k dodatečnému vaření směsi v druhém generátoru. Dvoustupňový absorpční cyklus vyžaduje až o 45 % méně užitného tepla, díky čemu dosahuje chladicí faktor od 1,2 až 1,4. Potřebuje ale oproti jednostupňovému zařízení dodání energie o vyšší teplotě (v tomto případě musí mít medium teplotu vyšší než 170 °C). Oproti tomu se účinnost jednostupňového cyklu pohybuje v rozmezí od 60 až 80 % (chladicí faktor je zde 0,6 až 0,8). Teplota nosného media se pohybuje okolo 65 až 140 °C. Chladicí jednotky mohou být poháněné horkou vodou, parou, plyny, oleji nebo přímo výfukovými plyny z výrobního procesu. [31]

Kvalita absorpčního se vyjadřuje taky pomocí výkonového čísla COP, o kterém už bylo napsáno v kapitole 3.1.8. Výkonové číslo u absorpčního oběhu je vyjádřeno poměrem vyrobeného chladu ve výparníku a tepla dodaného vysokoteplotním zdrojem. V tomto absorpčním cyklu jsou hlavní dvě pracovní látky [31]:

- Chladivo – vypařuje se a kondenzuje,
- Absorbent – absorbující látky.

Existuje celá řada látek, které mohou společně pracovat v absorpčních cyklech. Základní podmínkou vhodné dvojice látek je dobrá rozpustnost chladiva v látce absorpční. Z látek, které podmínku, jsou dále použitelné jen ty, které mohou pracovat v oblasti použitelných teplotních a tlakových úrovní. Dále je nutné při hledání vhodných dvojic zjistit dostupnost, cenu a vliv látek na životní prostředí. Látky, které se nejčastěji používají v komerčních absorpčních zařízeních jsou [31]:

Tabulka 1.4: Chladící a absorpční látky [31]

<b>Chladivo</b>	<b>Absorbent</b>
NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O	Roztok H <sub>2</sub> O - LiBr
H <sub>2</sub> O	NaOH
H <sub>2</sub> O	Roztok H <sub>2</sub> O - LiCl

Rozdílnost v prvních dvou pracovních látkách, které jsou zároveň nejpoužívanější, je především v možnosti dosahovaných teplot chladiv a tím i teploty chlazené vody. V případě roztoku H<sub>2</sub>O – LiBr e teplota ochlazené vody pohybuje okolo 4 °C. Narozdíl od absorbentu, který využívá vodu, lze dosáhnout chladící kapaliny o teplotě až –60 °C. [31]

U instalací absorpčních zařízení se dále uvažuje o jejich výhodnosti oproti například kompresorovým chladícím zařízením. Uvažují se výhody a nevýhody jednotlivých zařízení obojího typu, protože se může stát, že ne vždy jsou absorpční zařízení lepší varianta než ty kompresorové. Jednotlivé výhody a nevýhody obou konkurenčních technologií výroby chladu jsou srovnány v následujícím přehledu [31]:

Tabulka 1.5: Výhody a nevýhody absorpčních a parních oběhů [31]

<b>Porovnaný parametr</b>	<b>Absorpční oběhy</b>	<b>Parní oběhy</b>
Rozměry	velké	Malé
Spotřeba el. Energie	nízká (5 % výkonu)	vysoká (30-50 % výkonu)
Investiční náročnost	vysoká	nízká
Nároky na obsluhu	žádné	žádné
Nároky na servis	velmi malé	malé
Životnost	vysoká	nízká
Požadavek na dodávku řídicího tepla	vysoký	Žádný
Množství pracovních náplní	Velké	Malé
Hmotnost	Velká	Malá
Hlučnost	nízká	střední

Tabulka 1.6: Zdroje energie chladících absorpčních jednotek [31]

Látka	Výkon [kW]	
	Jednostupňové	Dvoustupňové
teplá voda	od 35 do 6000	od 200 do 12000
pára	od 350 do 6000	
plyn	od 160 do 4000	
spaliny/odpadní teplo	od 100 do 12000	
Látka	Tlak na přívod páry [bar/g]	
	Jednostupňové	Dvoustupňové
pára	od 0,5 do 3,5	od 4,0 do 10
Látka	Teplota vody (°C)	
	Jednostupňové	Dvoustupňové
teplá voda	od 75 do 140	nad 140

### Výhody:

- Absorpční chladící jednotky o výkonu od 35 kW do 18000 kW chladu.
- Nízká vlastní spotřeba, až o 95 % než u kompresorového chlazení.
- Nižší produkce CO<sub>2</sub>.
- Vysoká účinnost.
- Přibližně dvojnásobná životnost oproti kompresorovému chlazení.

### Nevýhody:

- Absorpční jednotka je přibližně 1,5x větší a 3x těžší než kompresorová chladící jednotka.
- Vyšší investiční náklady [31].

## 1.7. Výměník tepla

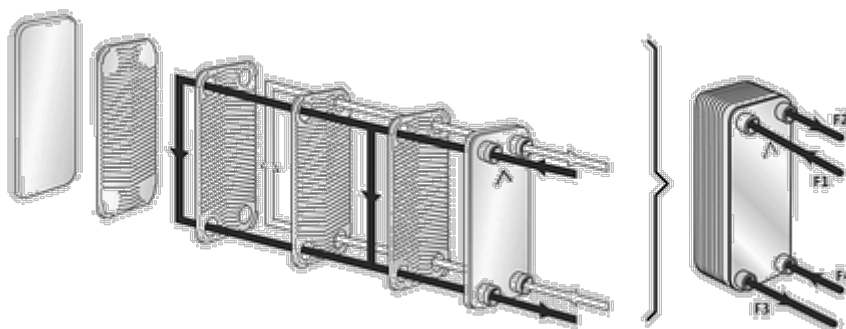
Pokud odpadní teplo sestává ze spalin, které mají nízkou teplotu, které nejsou vhodně pro ORC, tak pro průmyslové chlazení, bude součástí technického řešení pro maximální využití odpadního tepla z technologického procesu nutné zapojit do horkovzdušné cesty také další výměník tepla, ve kterém se jeden proud media ohřívá a druhý chladí díky sdílení tepla. Energie horkého vzduchu bude předána pomocí výměníku do vody, kde už je možné využít zvýšenou teplotu pomocí ORC a průmyslového chlazení. Správný výběr výměníku tepla pro dosažení co nejvyšší teploty vody, na základě čehož dosáhneme i vyšší účinnosti navrhovaných řešení, je stěžejní [32].

Pro správné navržení tepelného výměníku je nutné správně určit:

- Tepelný výkon.
- Teplosměnnou plochu.
- Výstupní teplotu horkého vzduchu.
- Tlakové ztráty.

Účinnost výměníku se mění podle typu. Největší účinnost má deskový výměník, který dosahuje až 90 %. V praxi to znamená, že studená strana se ohřeje na vyšší teplotu, než kdyby se obě media smíchala v nádobě. To je možné dosáhnout zapojením protiproudým zapojením [32].

Právě velká teplosměnná plocha je klíčem k dosažení vysoké účinnosti. Uvnitř výměníku jsou na sebe skládány desky v mnoha vrstvách, kde se následně střídá okruh teplého a studeného media. Pro zvětšení teplosměnné plochy se desky žebroují a v těchto žebrech jsou umístěny kanálky, kterými media proudí. Desky jsou dále uspořádány tak, aby byly oba toky odděleny a nemohly se smíchat [32].



Obrázek 1.20: Deskový výměník [20]

Zapojení deskového výměníku musí splňovat určitá pravidla [32]:

- Výměník nesmí být vystaven přílišným teplotním či tlakovým cyklům a výkyvům.
- Nesmí zamrznout.
- Používají se ohebné/pružné přípoje, pokud hrozí přenášení vibrací.

- Vstupy musejí být vybaveny regulačními ventily (pomalu otevírat vstupy při spuštění, zatímco výstup je plně otevřen).
- Je nutné namontovat vypouštěcí ventil na spodní stranu dolního přípoje a odvodušňovací ventil na horní straně přípoje (v nejvyšším bodě). Při spuštění je nutné otevřít odvodušňovací ventily.
- Pokud nastane, že tlak v systému je větší než konstrukční tlak výměníku, pak je nutné vstupy vybavit pojistným ventilem.

### 1.7.1. Trigenerace

Jako trigenerace se označuje společná výroba elektřiny, tepla a chladu. Současná dodávka všech tří energetických toků není nicméně nezbytnou podmínkou a z provozního hlediska není ani ve většině případů vyžadována. Pod pojem trigenerace tedy spadají zařízení umožňující variantně dodávku elektřiny a tepla nebo elektřiny a chladu. Technologicky jde o spojení kogenerační technologie s absorpční chladicí jednotkou [31].

Toto propojení je pro obě zařízení vysoce nezávislé a fyzické propojení je realizováno pouze v místech tepelných výměníků napojením proudů médií z kogeneračních a absorpčních jednotek. Z hlediska provozu kogeneračních technologií je toto řešení výhodné, protože absorpční oběh využívá tepelnou energii produkovanou kogeneračním zdrojem v letních měsících, a tím je možno dosáhnout vyššího ročního využití kogenerační jednotky [31].

Jestli sledujeme ekonomický přínos uplatnění třígeneračních jednotek, pak je nutné zhodnotit potřebu dodávky chladu v našich podmínkách. Detailní hodnocení je nutné provést pro každý objekt dle platné normy, ale na tomto místě můžeme uvést několik obecných charakteristik [31]:

- Maximální požadovaný chladicí výkon je blízký 80 % výpočtového tepelného výkonu na vytápění.
- Roční potřeba chladu odpovídá cca 25 % roční potřeby tepla.
- Meziroční srovnání jednotlivých chladicích sezón vykazuje výrazně větší variabilitu, než vykazuje srovnání sezón topných.

Z ekonomického hlediska představuje nasazení trigenerační technologie ve srovnání s pořízením technologie kogenerační značné navýšení investičních nákladů v okamžiku pořízení. V průběhu provozu potom dochází k větším úsporám za dodávku energií. Srovnání doby návratnosti kogenerační a trigenerační technologie uplatněné v konkrétních podmínkách ukazuje, že doplnění kogenerační technologie o absorpční chladicí jednotku nijak zásadně neovlivňuje dobu návratnosti, ale poskytuje investorovi možnost větších zisků (úměrně zvýšení investice) dosažených za dobu životnosti zařízení [31].

## 1.8. Stirlingův cyklus

Stirlingův motor, který si v roce 1816 nechal patentovat skotský pastor Robert Stirling patří mezi motory tepelné. Může být motorem spalovacím s vnějším spalováním nebo využívat tepelný rozdíl získaný jiným způsobem (geotermální energie, odpadní teplo, sluneční energie). Konstrukčně se může provedení teplovzdušného motoru lišit. Motor může být jak pístový, jedno i mnoha válcový, tak i turbokompresorový. [33]

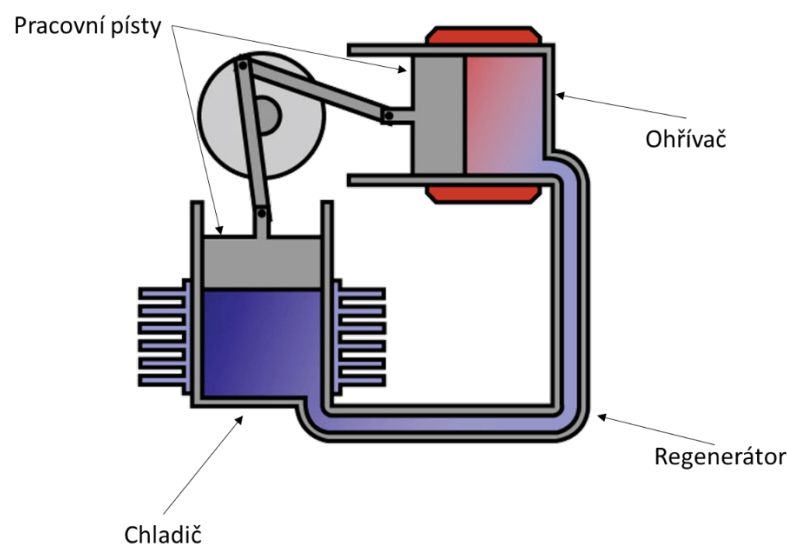
V 19. a 20. století vznikaly různé modifikace tohoto motoru, které sloužily například k pumpování vody. Vznikly i menší verze, které mohly pohánět například šicí stroje nebo ventilátory. Paliva byla různého typu (kapalná, pevná i plynná. V době svého vzniku byl motor limitován především metalurgickými znalostmi a možnostmi své doby. Kvůli tomu byl vytlačen elektromotory a spalovacími motory. V 50. letech 20. století ovšem rozvoj výroby nových materiálů umožnil další rozvoj Stirlingova motoru [34].

### 1.8.1. Modifikace Stirlingova motoru

Existují tři základní modifikace Stirlingova motoru [34]:

#### 1.8.1.1. Alfa modifikace

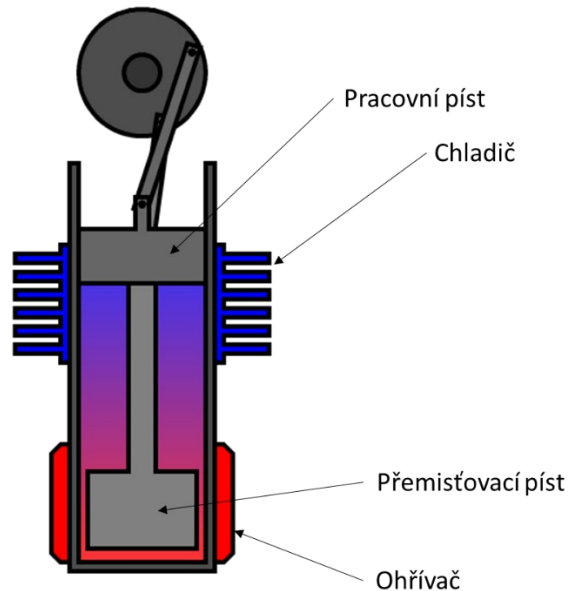
První verze Stirlingova motoru obsahuje dva písty ve dvou různých válcích. Jeden válec je teplý a druhý je studený. Mezi těmito dvěma válci se nachází chladič, regenerátor a ohřivač. Teplý válec je umístěn uvnitř vysokoteplotního prostoru, studený v nízkoteplotním prostoru. Toto provedení umožňuje snížení měrné hmotnosti na jednotku výkonu a je velmi rozšířené. [34]



Obrázek 1.21: Modifikace alfa [35]

### 1.8.1.2. Beta modifikace

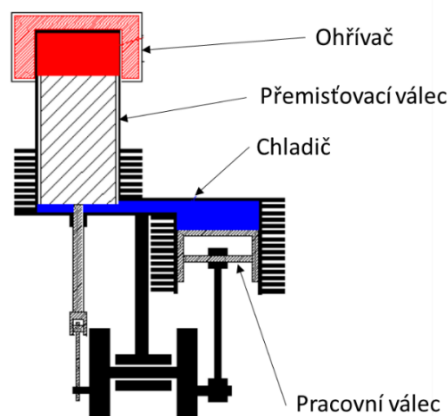
Modifikace beta Stirlingova motoru se od verze alfa liší tím, že v jednom válci se pohybují dva písty, které se nazývají přemístovací a pracovní. Přemístovací píst přemísťuje plyn z teplého prostoru válce do chladného, a naopak a pracovní píst koná práci. [34]



Obrázek 1.22: Modifikace beta [36]

### 1.8.1.3. Gamma modifikace

Tato modifikace obsahuje dva písty, z nichž jeden se nazývá přemístovací a druhý je pracovní, přičemž oba písty mají své vlastní válce, ve kterém se pohybují. Tato modifikace se používá u modelů Stirlingova motoru o malých výkonech. [34]



Obrázek 1.23: Modifikace gamma [37]



## 1.8.2. Princip chodu Stirlingova motoru

Stirlingův motor pracuje na principu rozdílu teplot. Pro představu je dobré si uvědomit, že s rozdílnou teplotou se mění i tlak v mediu, které se pro chod motoru používá. Ve většině případů je tímto mediem vzduch. Představme si válec, jehož jedna strana je ohřívána a druhá ochlazována. Ve válci je uzavřeno určité množství vzduchu, který má ze začátku stejný tlak jako vzduch okolní. Píst, který se nachází uvnitř tohoto válce se nazývá přeháněč, což je lehký dutý válec. Po ohřátí jedné strany válce má vzduch kvůli změně tlaku tendenci obtéct celý přeháněč na stranu druhou, čímž se přeháněč přesune z jedné strany válce na druhou. Ohřátý vzduch, který obtekl přeháněč se na druhé straně válce zchladí, čímž se vytvoří podtlak a díky tomu se přeháněč zase „vcucne“ do předchozí pozice a celý proces se opakuje. [33]

### 1.8.2.1. Výhody a nevýhody Stirlingova motoru

#### **Výhody [34]:**

- Ke spalování nedochází přímo v motoru, ale mimo něj, což umožňuje používat prakticky jakékoliv palivo,
- Lze použít odpadní teplo, geotermální nebo solární energii, která se pak převede na mechanickou a ta dále například na elektrickou,
- Většina Stirlingových motorů má ložiska a těsnění na chlazené straně, díky čemuž nepotřebují tolik maziva,
- Motor není nutno často revizovat, protože pracovní látka není přímo v kontaktu se spalinami. Intervaly kontrol jsou v řádu každých 5000 - 10000 pracovních hodin,
- Nízká hlučnost, plynulý chod, nízké vibrace,
- při správné konstrukci má motor díky vnějšímu spalování nižší emise než spalovací motory,
- protože operují s nižšími tlaky, jsou bezpečnější než parní motory,
- motor je celkově menším komplexem než jiné pístové motory, nejsou potřeba ventily a palivový systém je jednoduchý.

#### **Nevýhody [34]:**

- Není to ani zdaleka tak rozšířený typ motoru jako jsou spalovací, a proto jsou nákladnější na pořízení,
- Kvůli neustálým změnám tlaku a teplot uvnitř válce je nutné používat speciální materiály odolné vůči korozi a vysokým teplotám,
- Pomalejší regulace výkonu než u klasických spalovacích motorů,
- Nelze ho spustit a okamžitě mít plný výkon. Musí se nejdříve zahřát.
- Motor pracuje na principu rozdílu teplot, a proto se chladící teplota očekává co možná nejnížší a tím roste velikost chladiče, čímž může růst hmotnost a není proto výhodné tento motor použít na pohyblivé zařízení a stroje jako například automobily nebo dokonce letadla.

## **2. Praktická část**

V České republice má průmysl výraznou roli. Mezi hlavní odvětví průmyslu u nás patří strojírenský, chemický, hutnický a potravinářský. Průmysl v České republice zaměstnává 38% pracovní schopné populace [41]. V tak velkém množství výrobního potenciálu je obsažen také potenciální zdroj doposud nevyužité tepelné energie, buď kvůli neobeznámenosti veřejnosti anebo strachu z výše investice a její následné návratnosti.

Mojí motivací při práci na toto téma je fakt, že životní prostředí je jedno z nejdůležitějších témat našeho století a nalézání nových alternativ, jak ho chránit a zároveň na tom ušetřit mi přijde jako skvělá kombinace.

Cílem této práce je zhodnocení potenciálu jednoho konkrétního provozu disponujícího v současné době nevyužitým zdrojem odpadního tepla pomocí tzv. studie proveditelnosti. Porovnáno je pomocí zjednodušených výpočtů více technologií, z nichž je vybrána nejpravděpodobnější – ve smyslu ekonomického zhodnocení i realizovatelnosti.

## 2.1. Informační portály

Česká republika je stále vcelku průmyslovou zemí. Z toho důvodu ji problematika znečištění – nebo v případě tématu této práce – odpadního tepla. Není proto divu, že jsou provozy sledovány a je jim nabízena pomoc v podobě informací nebo grantů.

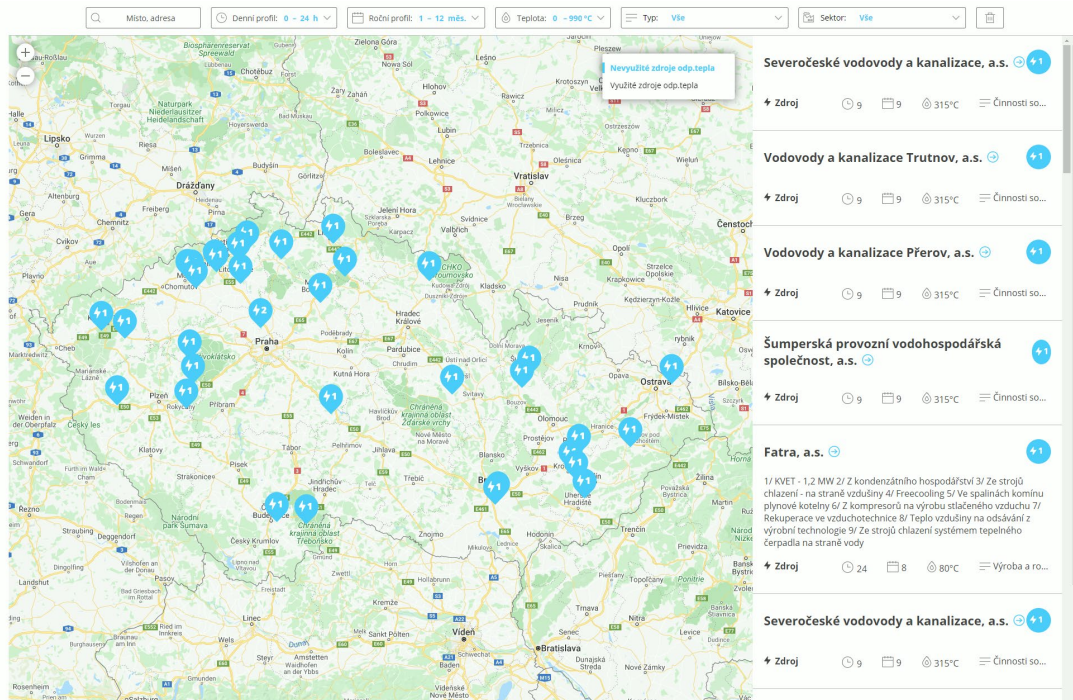
Jedním z portálů, které vznikly ve spolupráci s univerzitami, je Odpadní teplo: <http://www.odpadni-teplo.cz/>, který vznikl jako součást projektu CE-HEAT ve spolupráci s Institutem pro ekonomickou a ekologickou politiku při Univerzitě J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, který měl za úkol obeznámit právě společnosti, které se zabývají průmyslovou výrobou, jejichž činnost vytváří tento druh plýtvání, a seznámit je s možným řešením této problematiky.

Dalším užitečným portálem je webový portál Waste-Heat: <https://www.waste-heat.eu/>, který funguje jako pomocný nástroj pro projektanty při volbě možných technologií, které využívají odpadní teplo z průmyslových zařízení.

### 2.1.1. Portál odpadního tepla

Tento portál vznikl na základě spolupráce s technologickými podniky, díky nimž bylo možné vytvořit mapu, která sdružuje podniky s potenciálem využití odpadního tepla. Výhodné to může být jednak pro samotné společnosti při rozhodování o inovacích, ale také pro výrobce technologií pro využití odpadního tepla, stejně tak pro obce nebo kraje kvůli místní politice.

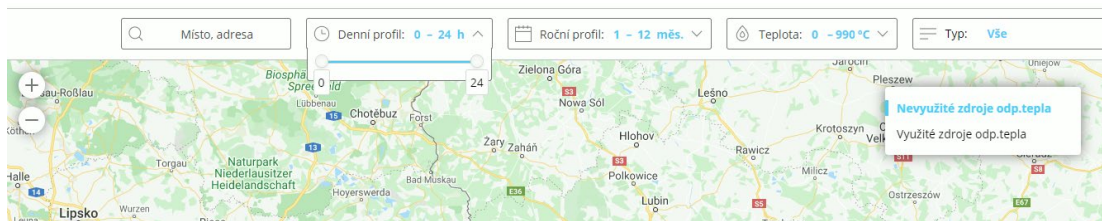
Současný globalizační trend vede ke sdružování a kooperaci, proč by tedy například několik továren nemohlo spolupracovat na zásobování přílehlého sídelního celku teplem pro domácnosti?



Obrázek 2.1: Mapa dotazovaných společností [42]

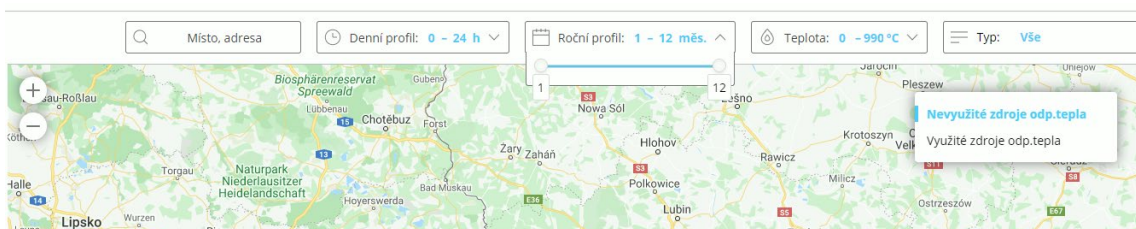
Tato mapa zobrazuje podniky, které souhlasily s naměřením hodnot odpadního tepla, které produkují a které bylo naměřeno odborníky zabývajícími se tímto tématem z Institutu pro ekonomickou a ekologickou politiku při Univerzitě J. E. Purkyně v Ústí nad Labem.

Na mapě je možné vyfiltrovat pomocí zadaných parametrů podniky produkující odpadní teplo podle počtu směn, během kterých probíhá výroba, tedy na jednosměnnou, dvousměnnou nebo nepřetržitou výrobu.



Obrázek 2.2: Volba společností podle doby provozu [42]

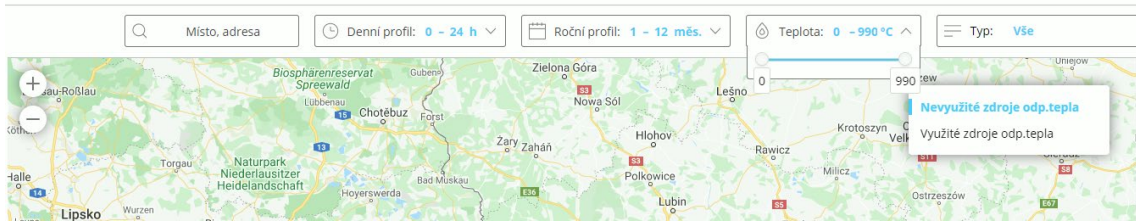
Dále je možné navolit si parametr jako množství měsíců v roce, kdy výroba probíhá.



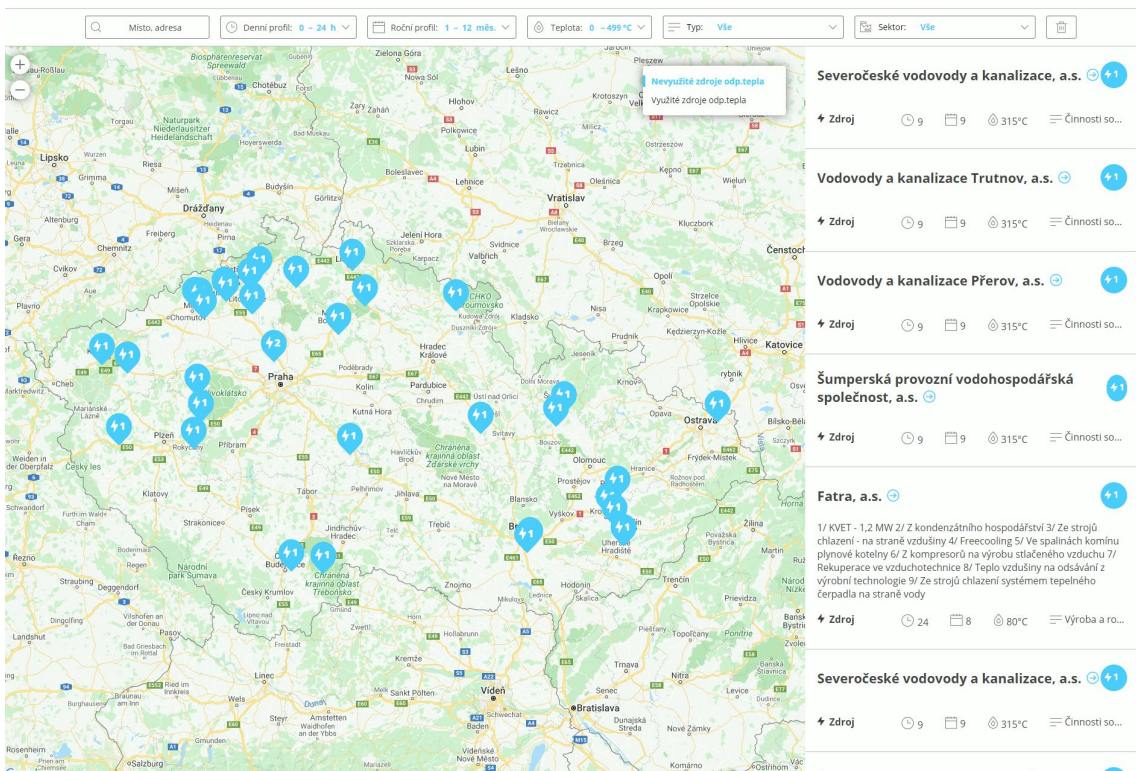
Obrázek 2.3: Volba společností podle počtu měsíců provozu [42]



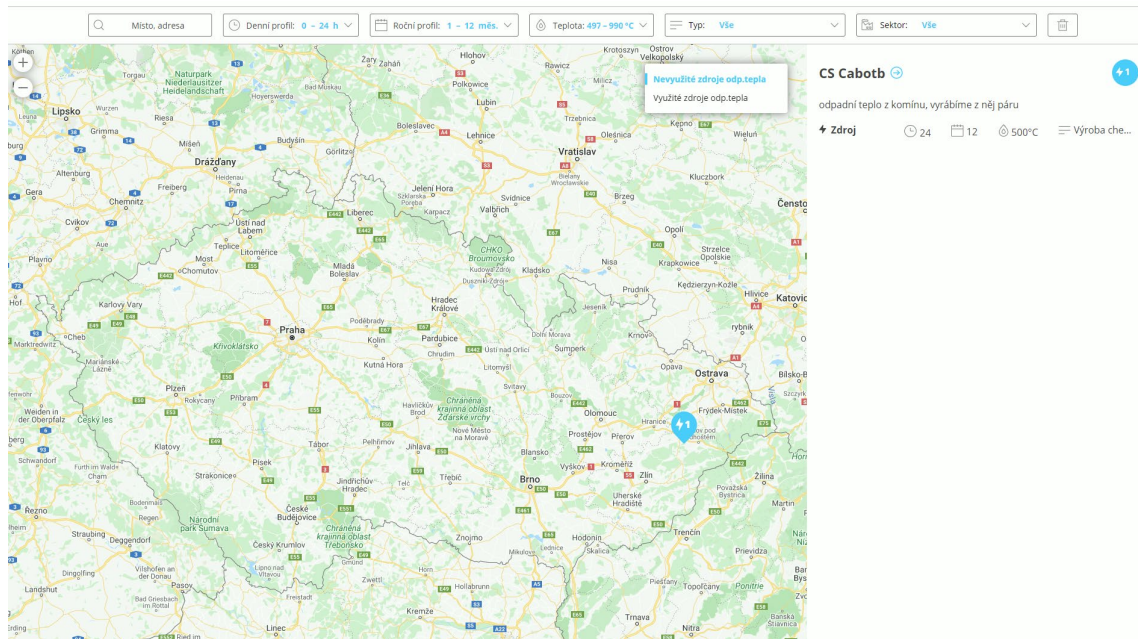
Rozmezí teplot odpadního tepla, kdy mapa zobrazí jiné společnosti v závislosti na produkovaném teple.



Obrázek 2.4: Volba společnosti podle teploty zdroje odpadního tepla [42]



Obrázek 2.5: Mapa podniků produkujících odpadní tepla s teplotou média 0-499 °C [42]



Obrázek 2.6: Mapa podniků produkujících odpadní teplo s teplotou média 499-999 °C [42]

Mezi další možné volitelné parametry patří typ tepla podle typu zařízení, jež teplo generuje, jako jsou:

- Systémy ventilace/vzduchotechnika
- Chladicí systémy a klimatizace
- Odpadní teplo z chodu kompresorů
- Teplo ze spalin a dalších odpadních plynů
- Odpadní voda z technologických procesů
- Voda z chladících procesů
- Ostatní technika

Poslední kategorií, kterou je možné si specifikovat, je sektor, ve kterém dané budovy působí a to:

- Obytné budovy
- Administrativní budovy (úřady)
- Rostlinná a živočišná výroba, myslivost a související
- Těžební průmysl
- Výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla a klimatizace vzduchu
- Zpracovatelský průmysl
- Služby

### 2.1.2. Portál Waste heat

Druhým portálem, který jsem použil při řešení této diplomové práce je [www.Waste-Heat.eu](http://www.Waste-Heat.eu).

Tato stránka vznikla v rámci mezinárodního projektu podporovaného Evropskou unií za účelem snížení emisí CO<sub>2</sub>, který se jmenuje CE-HEAT. Je zaměřen hlavně na společnosti, firmy a developery, energetické konzultanty a tvůrce legislativ zabývající se úsporami v oblasti energetiky [3].

Nedostatek informací ohledně energetického potenciálu odpadního tepla byl důvodem pro vytvoření této internetové stránky, aby objasnil a usnadnil projektantům hledání informací zabývajících se tímto tématem.

Jeden z hlavních nástrojů určených právě pro projektanty nových technologických řešení v oblasti zpracování odpadního tepla, je funkce portálu Waste Heat s názvem Decision Support System (DSS), která po zadání určitých hodnot funguje jako kalkulačka, podle které může projektant vybrat nejlepší možnou technologii zpracující odpadní teplo.

Jde samozřejmě pouze o simulaci s předem zadanými technologiemi a zařízeními, ale stále se jedná o velice kvalitní nástroj, který ulehčí rozhodovací proces [43].

#### 2.1.2.1. *Decision Support Systém*

Pro správnou funkci tohoto nástroje je nutné znát aspoň přibližně hodnoty a údaje související s daným typem odpadního tepla. Výhoda tohoto nástroje je ta, že nutné informace představují naprosté minimum, takže jej může využít i člověk, který není naprostým odborníkem na tuto problematiku [3].

Mezi zásadní informace nutné znát pro správné použití tohoto nástroje patří [43]:

#### **Základní informace**

- Teplonosné médium
- Přerušovaný/nepřetržitý zdroj
- Teplota zdroje (°C)
- Výkon zdroje

#### **Pokročilé informace**

- Cena tepelných energií v dané oblasti
- Cena elektřiny v dané oblasti
- Hodnota dotace
- Stimul pro úsporu za tunový ropný ekvivalent
- Délka dálkového vytápění

Všechny tyto hodnoty je možné zadat do nástroje DSS, který vypadá takto:



The screenshot shows a web-based interface for the DSS tool. It is divided into two main sections: 'WASTE HEAT SOURCE INFORMATION' and 'ADVANCED INPUT'.  
 In the 'WASTE HEAT SOURCE INFORMATION' section, there are dropdown menus for 'type of emission' (set to 'Water') and 'emission profile' (set to 'Continuous'). Below these is a note: 'Note: **continuous** can be used for steel&iron factories, paper, glass, concrete production, CHP, biogas plants and Energy Producers; **discontinuous** for food and textile industry.' There are also input fields for 'temperature' (500 °C) and 'thermal power' (2000 kW).  
 The 'ADVANCED INPUT' section contains input fields for 'thermal energy cost' (0,05 €/kWh), 'electricity cost' (0,05 €/kWh), 'grant' (20 %), 'incentive for saved TOE' (100 €/TOE), and 'district heating length' (2500 m). A red 'Calculate' button is located at the bottom of this section.

Obrázek 2.7: Vzhled nástroje DSS [43]

Po zadání hodnot do tohoto nástroje systém vygeneruje škálu možných technologií, které jsou schopny toto teplo zpracovat: jako například:

- Organický Rankinův cyklus
- Absorpční regenerační jednotka pro chlazení
- Výměník tepla pro vytápění (např. Předehřev v produktivním procesu)
- Dálkové vytápění
- Tepelné čerpadlo ke zvýšení teploty zdroje při vyšší teplotě
- Kombinované řešení s instalací jak ORC, tak dálkového vytápění

Technology	Power Installed [kW]	Power Recovered [kW]	Mass Flow Rate [kg/s]	Temp. [°C]	District Length [km]	Payback [years]	DSCR	IRR [%]	NPV [€]	CO2 [t/year]	PES [TOE]
abs	2000	2000	5	500	-	4.0	3.80	25.2	4501967	1142	506
he	1920	1920	5	500	-	4.5	3.37	22.4	3951103	1600	676
orc	300	1560	4	500	-	6.6	2.27	14.9	1219167	1001	444
match	ORC: 300 DISTRICT: 100	1660	7	500	2.5	13.1	1.15	6.5	323147	1098	485

Obrázek 2.8: Výsledek vyhodnocení ze zadaných hodnot [43]

Nástroj po vyhodnocení všech zadaných parametrů následně interpretuje možné alternativy, které se od sebe liší mírou návratnosti, množstvím rekuperované energie, vnitřního výnosového procenta, současné přidané hodnoty, snížené produkce CO<sub>2</sub> a hlavních energetických úspor.

## 2.2. Společnost ENASPOL, a.s.

Jako společnost, na kterou chci tento projekt zaměřit, jsem si vybral firmu ENASPOL, a.s., která je předním evropským výrobcem povrchově aktivních látek (tenzidů) a pomocných přípravků pro různá průmyslová odvětví. Společnost má sídlo v blízkosti obce Velvěty v severních Čechách.

Jedná se tedy hlavně o výrobu chemických látek a výrobků jako jsou prací, mycí a čistící prostředky, produkty osobní hygieny, ale také výrobky používané ve stavebním průmyslu. Portfolio výrobků je tedy opravdu široké.

### 2.2.1. Hodnoty odpadního tepla v ENASPOL, a.s.

Jak bylo popsáno v předešlé kapitole, zdroje a informace o odpadním teple ve společnosti ENASPOL, a.s. jsem našel na portálu odpadního tepla [42], což je potenciální zdroj informací, ale při hledání bližších informací o budově jsem zjistil, že již proběhlo vypracování projektu na odstranění onoho zdroje tepla a teplota současného zdroje tepla je 35 °C. Informace by tedy bylo vhodné aktualizovat.

V ENASPOL, a.s. se nachází jeden zdroj odpadního tepla a jeho parametry jsou:

- Nepřerušovaný
- Teplota zdroje je 35 °C
- Teplo pochází z chlazení výrobních zařízení
- Teplonosné médium: Voda
- Tok nosiče odpadního tepla: cca 106 m<sup>3</sup>/hod.

Hodnota, která ve vyplněné tabulce portálu odpadního tepla nebyla zaznamenána, byl výkon, který toto teplo poskytuje. Proto je nutné ho zjistit pomocí výpočtu tepla:

$$Q = mc \Delta T \quad (5)$$

kde

- Q je celkový výkon [J]
- m je hmotnostní tok média [kg]
- c je měrná tepelná kapacita média [ $\frac{J}{kg.K}$ ], v našem případě má voda  $c = 4\,180 \frac{J}{kg.K}$
- $\Delta T$  je rozdíl počáteční ( $T_1$ ) a koncové ( $T_2$ ) teploty [K], v tomto případě  $T_1 = 35\,^{\circ}C$  a  $T_2 = 26\,^{\circ}C$ .

Hmotnost musela být vypočítána pomocí průtoku vody, kdy za hodinu proteče  $106 \text{ m}^3$ .  $106 \text{ m}^3$  je  $106\,000$  litrů a jeden litr vody váží přibližně  $1 \text{ kg}$ . Průtok je tedy  $106\,000 \text{ kg/hod}$ .

$$m = \frac{106\,000}{3600} = 29.4 \text{ kg} \quad (6)$$

Za sekundu tedy proteče  $29,4$  litrů vody, která váží  $29,4 \text{ kg}$ .

$$Q = 29,4 \times 4180 \times 9 = 1\,106\,028 \text{ J} \quad (7)$$

Pomocí zjištěného množství energie tepla nyní spočítám výkon:

$$P = \frac{W}{t} \quad (8)$$

kde

$P$  je celkový výkon [W]  
 $W$  je práce [J]  
 $t$  je čas [s]

$$P = \frac{1\,106\,028 \text{ J}}{1} = 1\,106 \text{ kW} \quad (9)$$

Výkon, který dané odpadní teplo poskytuje je tedy  $1\,106 \text{ kW}$ .

Po zadání těchto hodnot do kalkulačky Waste-Heat, kde znám [42]:

Nosné médium: Voda  
Typ produkce: Nepřerušovaný  
Teplota:  $35 \text{ }^\circ\text{C}$   
Výkon:  $1\,106 \text{ kW}$

### **Pokročilé hodnoty:**

Cena Eura je  $26,20 \text{ Kč}$  tedy [45]:

Průměrná cena tepla z tepláren je  $2,15 \text{ Kč/kWh}$  [44] =>  $0,08 \text{ Euro/kWh}$

Průměrná cena elektřiny z centrální sítě je  $5,80 \text{ Kč/kWh}$  [44] =>  $0,22 \text{ Euro/kWh}$ .

Všechny ostatní hodnoty jsem volil kvůli nedostatku informací jako  $0$ , protože celý tento kalkulátor je především orientační.

## Zadání hodnot:

WASTE HEAT SOURCE INFORMATION		ADVANCED INPUT	
type of emission	Water	thermal energy cost	0,08 €/kWh
emission profile	Continuous	electricity cost	0,22 €/kWh
<small>Note: <b>continuous</b> can be used for steel&amp;iron factories, paper, glass, concrete production, CHP, biogas plants and Energy Producers; <b>discontinuous</b> for food and textile industry.</small>		grant	0 %
temperature	35 °C	incentive for saved TOE	0 €/TOE
thermal power	1100 kW	district heating length	10 m
<input type="button" value="Calculate"/>			

Obrázek 2.9: Vložené získané hodnoty [43]

## Další systémem nastavené hodnoty:

Comparison between viable solutions to recover a **continuous** waste heat from **water** taking in to consideration the following economic parameters:

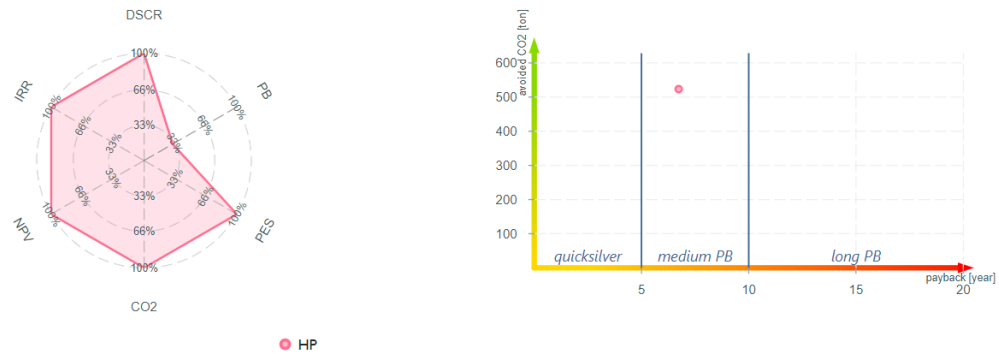
- thermal energy cost: 0.08 €/kWh
- electricity cost: 0.22 €/kWh
- grant: 0 %
- incentive for saved TOE (Tonne Oil Equivalent): 0 €/TOE
- technical life time: 15 years
- oper and maint cost: 20 %
- interest rate (for NPV calculation) : 4 %
- NPV period: 30 years
- inflation rate: 1.2 %

Obrázek 2.10: Soubor hodnot přenastavených systémem kalkulátoru Waste-Heat.eu [43]

Kalkulačka Waste-Heat.eu sama po zadání základních informací jako cena energií atd. také sama dosadí hodnoty jako je životnost technologie, provozní náklady a náklady na údržbu (v našem případě 20 %), úrokovou sazbu pro ČSH (4 %), dobu rozsahu pro výpočet ČSH (30 let) a procento inflace (1,2 %).

## Výsledek po zadání hodnot:

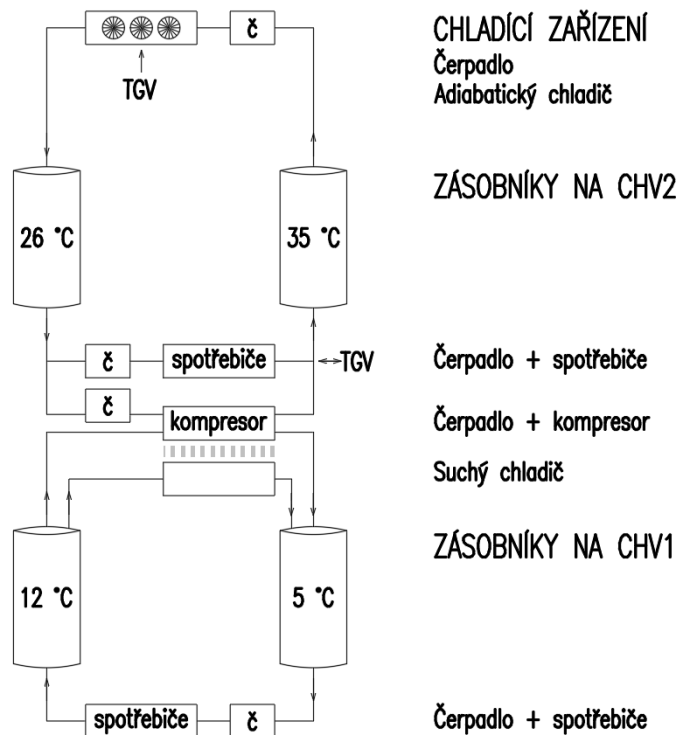
Technology	Power Installed [kW]	Power Recovered [kW]	Mass Flow Rate [kg/s]	Temp. [°C]	District Length [km]	Payback [years]	DSCR	IRR [%]	NPV [€]	CO2 [t/year]	PES [TOE]
hp	600	600	6	35	-	6.7	1.26	21.5	1400468	524	216



Obrázek 2.11: Výsledné hodnoty z kalkulačky Waste-Heat.eu [43]

Technologii, kterou nám kalkulátor Waste-Heat vypočítal jako jedinou možnou pro tento typ tepla, je tepelné čerpadlo (HP – Heat Pump). Dále je možné vidět, že nainstalovaný výkon této jednotky má potenciál být 600 kW, množství energie, která může být rekuperována je také až 600 kW, tok hmoty, která by fungovala jako nosič je 6 kg/s, teplota, kterou zařízení využije je 35 °C. Doba návratnosti investice (s nulovou dotací) bude 6,7 roku, poměr krytí dluhu je 1,26 vnitřní výnosové procento je 21,5 %, čistá současná hodnota investice bude po 30 letech bude 36 362 261 Kč, snížení produkce CO<sub>2</sub> je 524 tun ročně a ekvivalent ušetřené energie z ropy je 216 tun.

### 2.2.2. Stávající stav budovy



Obrázek 2.12: Schema zapojení stávajících chladících zařízení

#### 2.2.2.1. Shrnutí hlavních problémů:

- Stávající řešení je zaměřeno hlavně na průmyslové chlazení výrobních zařízení, které vytvářejí teplo, z výrobních procesů.
- Já toto teplo obsažené v chladící vodě hodlám využít pro vytápění a ohřev užitkové vody.
- Nejvyšší teplotu v celém navrženém okruhu má voda v zásobníku CHV2 před adiabatickým chladičem, která má teplotu 35 °C a tok 106 l/s. Tu chceme využít pomocí instalace tepelného výměníku.

### 2.2.3. Okrajové podmínky návrhu

#### 2.2.3.1. Zdroj tepla

Za zdroj tepla je považována nádrž s vodou o teplotě 35 °C (CHV2, ohřátá z technologií). Tato nádrž má možnost vydatnosti minimálně 106 l/s.

Tabulka 2.1: Okrajové podmínky výpočtu – chladící voda

	<b>CHV2</b>
<b>Teplonosné medium</b>	voda
<b>Teplota vody vstupní (<math>T_{w1}</math>)</b>	35 °C
<b>Teplota vody výstupní (<math>T_{w2}</math>)</b>	26 °C
<b>Maximální průtok</b>	106 l/s

<b>Měrná tepelná kapacita vody</b>	4180 J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
<b>Hmotnostní tok</b>	106 kg/s
<b>Teplotní spád</b>	9 K

### 2.2.3.2. Vnější podmínky

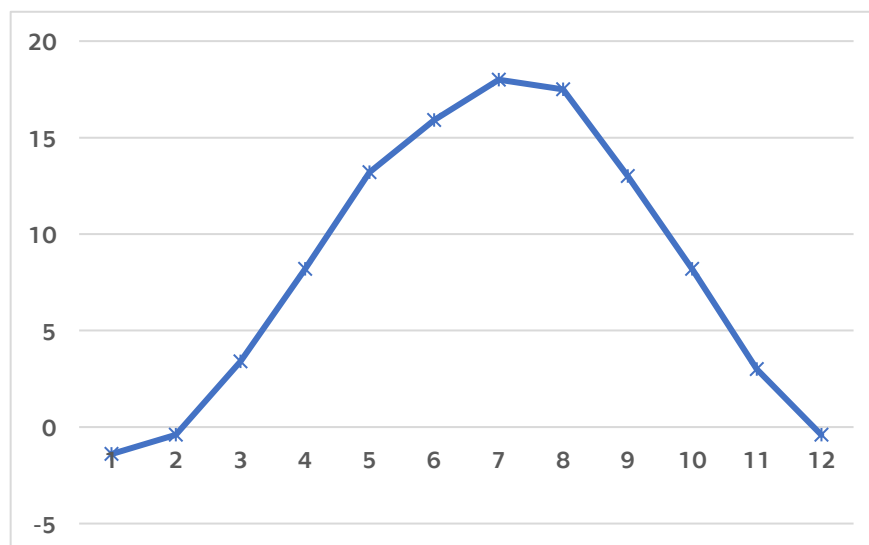
Pro následující výpočty byly použity tyto hodnoty vnějšího prostředí:

Tabulka 2.2: Okrajové podmínky výpočtu - exteriér

	Zima	Léto
<b>Tlak vzduchu</b>	98 kPa	
<b>Nadmožská výška</b>	260 m.n.m	
<b>Teplota vzduchu</b>	-12 °C	32 °C
<b>Entalpie</b>	56 kJ/kg s.v.	
<b>Relativní vlhkost</b>	90 %	

Tabulka 2.3: Průměrné měsíční venkovní teploty

Měsíc	Průměrná teplota [°C]
Leden	-1,4
Únor	-0,4
Březen	3,4
Duben	8,2
Květen	13,2
Červen	15,9
Červenec	18,0
Srpen	17,5
Září	13,0
Říjen	8,2
Listopad	3,0
Prosinec	-0,4



Obrázek 2.13: Průměrné dlouhodobé teploty Ústeckého kraje

### 2.2.3.3. Energetické nároky provozní budovy

Uvažujeme, že v budově pracuje 85 lidí. Podle normované spotřeby vody v kancelářských administrativních budovách na jednu osobu ročně jeden pracovník spotřebuje při používání toalety a umyvadla užitkovou vodu o objemu 8 m<sup>3</sup> ročně. Pokud se bere v potaz i kolik teplé vody zaměstnanec používá, pak tato hodnota stoupne na 14 m<sup>3</sup> ročně. Teplé vody tedy pracovník ročně spotřebuje 6 m<sup>3</sup>. Celková spotřeba teplé vody v budově je tedy 510 m<sup>3</sup>.

Denní spotřeba teplé vody v budově je pak:

$$Spotř = \frac{510}{365} = 1,397 \frac{m^3}{den} \quad (10)$$

Pokud máme spočítat, kolik energie je nutné spotřebovat pro ohřátí užitkové o tomto objemu, pak použijeme klasickou rovnici pro výpočet tepla, která je:

$$Q = mc_{\Delta T} [J] \quad (11)$$

kde

Q	je teplo [J]
m	je váha [kg]
c	je měrná tepelná kapacita [ $\frac{J}{kgK}$ ]
$\Delta T$	je teplotní spád [K]

Jako rozdíl teplot uvažuji průměrnou teplotu užitkové vody 10 °C a teplotu, na kterou užitkovou vodu ohřejeme, což je 60 °C, takže výsledný rozdíl je 50 °C.

#### Potřebné teplo pro přípravu TUV

$$Q = 1400 * 4180 * 50 = 292,6 MJ \quad (12)$$

#### Potřebný výkon ohříváče pro ohřev TUV

$$P = \frac{292600000}{24 * 3600} = 3,386 kW \quad (13)$$

Potřebný výkon na ohřev vody je tedy 3,386 kW.



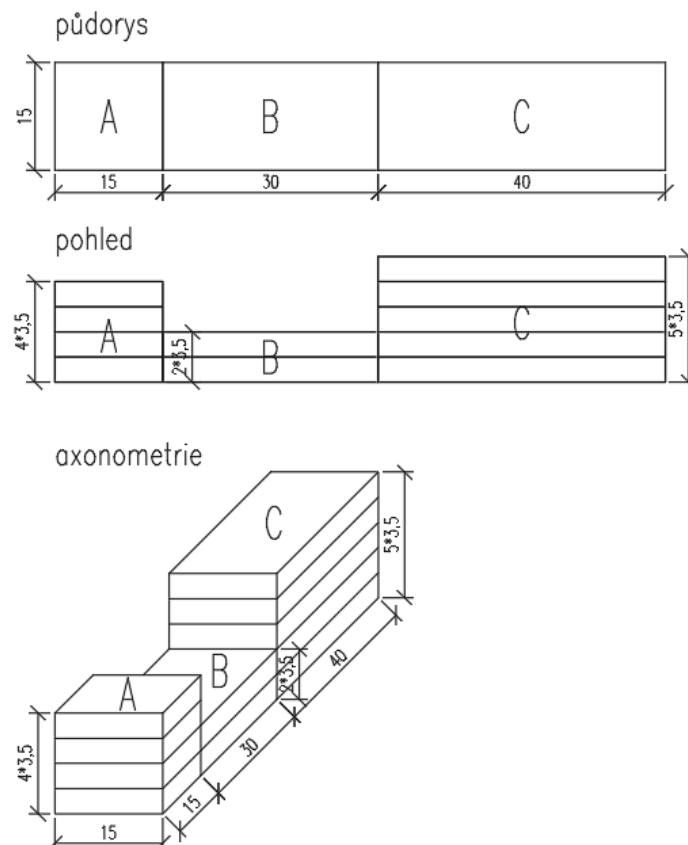
Ohřev vody je ovšem jen část funkce řešení, protože pomocí tepelného čerpadla se dá vytápět i celá budova. Pro výpočet nutného výkonu, který by byl schopen vytápět vnitřní pracovní prostory budovy bylo nutné zjistit rozměry budovy, především její plochy stěn, střechy a podlahy, ve které bude vytápění použito.

Každá část budovy má jiný součinitel prostupu tepla  $UT$  ( $W/m^2 \cdot K$ ). Střecha má součinitel prostupu tepla 0,36, stěny mají součinitel prostupu tepla 0,45 a podlaha 0,6.

Střecha uvažované budovy má plochu  $1275 \text{ m}^2$ , stejně jako podlaha budovy. Stěny tvoří dohromady plochu  $2975 \text{ m}^2$ .

Vytápění bude mít největší smysl hlavně v zimních měsících, kdy je v Ústeckém kraji průměrná teplota vzduchu  $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Proto je pro výpočet nutného výkonu zjistit teplotní rozdíl vzduchu v budově, ideálně  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , který je tedy  $33 \text{ K}$ .

### Únik tepla obálkou budovy



Obrázek 2.14: Schema provozní budovy

## 1. Stěny

$$\Delta T * U_t * S = 33 * 0,45 * 2975 = 44178,75 \text{ W} \quad (14)$$

## 2. Střecha

$$\Delta T * U_t * S = 33 * 0,36 * 1275 = 25245 \text{ W} \quad (15)$$

## 3. Podlaha na terénu

$$\Delta T * U_t * S = 33 * 0,60 * 1275 = 15147 \text{ W} \quad (16)$$

Celkový návrhový únik tepla z budovy je tedy  $84\,570,75 \text{ W} + 3\,387 \text{ W} = 87\,957,75 \text{ W}$ .

Potřebný výkon tepelného čerpadla se bude v průběhu roku měnit. Důvodem jsou rozdílné venkovní teploty, kdy např. v lednu bude výkon čerpadla na maximum, ale v červenci bude potřebný výkon daleko menší. Roční potřebný výkon v rámci jednotlivých měsíců se spočítala následně:

V lednu poběží čerpadlo na maximální výkon 100 %, kdy kvůli venkovní teplotě  $-1,4 \text{ °C}$  musí vytopit vzduch v místnostech na  $21 \text{ °C}$ , což je zároveň teplota, od které se odvíjí všechny ostatní výpočty pro výkon.

Pomocí trojčlenky se spočítaly výkony pro všechny ostatní výkony potřebné pro ostatní měsíce v roce.

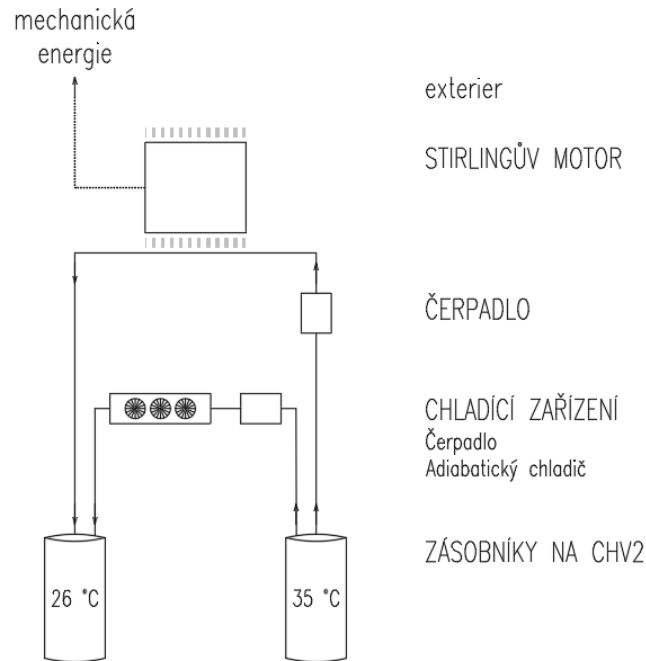
Tabulka 2.4: Potřebné výkony pro ohřev TUV + vody na vytápění

Měsíce	Venkovní teplota (°C)	Dovytápění (°C)	Potřebný výkon čerpadla (%)	Potřebný výkon čerpadla (kWh)
Leden	-1,4	22,4	100	54972,5
Únor	-0,4	21,4	95,54	52612,9
Březen	3,4	17,6	78,57	43646,2
Duben	8,2	12,8	57,14	32319,8
Květen	13,2	7,8	34,82	20521,6
Červen	15,9	5,1	22,77	14150,5
Červenec	18	3	13,39	9195,2
Srpen	17,5	3,5	15,63	10375,1
Září	13	8	35,71	20993,5
Říjen	8,2	12,8	57,14	32319,8
Listopad	3	18	80,36	44590,1
Prosinec	-0,4	21,4	95,54	52612,8

## 2.3. Studie využití odpadního tepla

Zařízení jsou navržena s přihlédnutím k velmi nízké teplotě odpadní vody. Vyzkoušel jsem spočítat účinnosti několika zařízení, o kterých jsem si myslel, že by byla využitelná pro daný zdroj odpadního tepla, ze kterých mi vyšly následující výstupy.

### 2.3.1. Stirlingův motor



Obrázek 2.15: Schema zapojení Stirlingova motoru

Podle Schmidovy analýzy Stirlingova cyklu je možné sestrojít Stirlingův motor s účinností 30 až 40 % výkonu.

#### 2.3.1.1. Termická účinnost podle Carnota

$$\eta_{car} = \frac{T_0 - T_{ch}}{T_0} \quad (17)$$

kde

$\eta_{car}$  je termická účinnost podle Carnota [-]  
 $T_0$  je teplota chladiče (exteriérového vzduchu) [K]  
 $T_{ch}$  je teplota chladiče [K]

Potom  $\Delta T$  je rozdíl teploty ohříváče a teploty chladiče.  $\Delta T_{léto} \sim 40$  K,  $\Delta T_{zima} \sim 10$  K.  $T_{ch} \sim 310$  K, potom účinnost Carnotova cyklu bude:

$$\eta_{car} = \frac{10}{310} \sim \frac{40}{310} = 3,2 \% \sim 13 \% \quad (18)$$

Podle přepočtu bude účinnost Stirlingova motoru v závislosti na okolní teplotě  $\eta_{st} = 1,3-5,2 \%$ .

Pro porovnání účinnosti jiných druhů motorů můžu uvést například klasický spalovací motor, jehož moderní jednotky dosahují účinnosti 30 - 40 %, což je způsobeno třením a odpory pohyblivých částí uvnitř motoru. Dále je nutné poznamenat, že dvě až tři čtvrtiny energie paliva se přemění primárně na teplo a po odečtení odporu vzduchu a ztráty přes převodovku se celkový výkon, který spalovací motor dokáže z paliva přenést na vozovku je okolo 20 %.

Navíc je spalovací motor poháněn palivem, které vytváří spaliny a odpadní teplo, oproti tomu náš návrh Stirlingova motoru bude poháněn právě teplem, které by jinak využito nebylo a žádným jiným palivem nebo pohonnou hmotou, za kterou by se muselo platit.

Pro porovnání účinnosti jiných tepelných motorů můžou být:

Tabulka 2.5: Příklady účinnosti jiných druhů motorů [46]

Tepelný motor	$\eta_{max}$	$\eta$
Parní stroj lokomotivy	0,35	0,09 – 0,15
Parní turbína	0,60	0,25 – 0,35
Plynová turbína	0,55	0,22 – 0,37
Čtyřdobý zážehový motor	0,65	0,20 – 0,33
Vznětový motor	0,73	0,30 – 0,42
Raketový motor	0,75	0,50

### 2.3.1.2. Konstrukce

Konstrukce zařízení vychází z modifikace Stirlingova motoru Beta s oběma písty v jednom válci, kde je jedna strana válce ohřívána druhá naopak chlazena.

Médium, které bude pohánět písty zařízení, je vzduch ohřátý litinovou deskou, která bude předávat teplo z proudu ohřáté vody z chladicího oběhu CHV2. Litina byla zvolena z důvodu jejích dobrých vlastností vedení tepla.

Činnost motoru bude tedy způsobena přenosem tepla z chladicí vody, do litinové desky, která předá teplo vzduchu uvnitř válce motoru. V litinové desce bude umístěn topný had z trubky o průměru 80 mm, což je stejná šířka trubky chladicího oběhu CHV2 k zajištění minimální tlakové ztráty.

### 2.3.1.3. Výpočet předběžných parametrů Stirlingova stroje pomocí konstrukčních charakteristik

Pomocí matematických vztahů a konstrukčních charakteristik byl proveden výpočet pro námi zadaná, respektive předpokládaná vstupní data.

Teplotní spád je 9 °C (35/26), tloušťka litinové desky je 0,2 m, tepelná vodivost litiny je 60 W/mK, další materiály, které jsou na desku přiloženy fungují jako tepelná izolace s tloušťkou 0,1 m a tepelnou vodivostí 0,045 W/mK. Dále jsem použil jako vstupní teplotu média  $T_{w1}$  35 °C a výstupní teplotu  $T_{w2}$  26 °C. Teplota uvnitř válce je 24 °C, průměr trubky uvnitř desky je 80 mm, rozteč trubek 0,2 m, součinitel přestupu tepla dolů 8 W/m<sup>2</sup>K, součinitel 30 W/m<sup>2</sup>K a tepelný výkon, který se do válce přenesl jsem přednastavil na 1 kW.

## Výpočet

Výpočet vychází z teorie jednorozměrového vedení tepla válcovými zdroji.

Tabulka 2.6: Vrstvy pro vytápění teplé strany Stirlingova motoru

Vrstva	a1	a1	b
Tloušťka $d_i$ [m]	0,1	0,1	0,02
Tepelná vodivost $\lambda_i$ [W/mK]	60		0,045

Tabulka 2.7: Vstupní hodnoty pro návrh

Teplota uvnitř motoru na ohřívané straně	$t_i$ [°C]	24
Průměr trubek	$D_{tr}$ [m]	0,08
Rozteč trubek	$l$ [m]	0,2
Součinitel přestupu tepla dolů	$\alpha'_p$ [W/m <sup>2</sup> K]	8
Součinitel přestupu tepla nahoru	$\alpha_p$ [W/m <sup>2</sup> K]	30
Navrhovaný výkon přenosu	$Q$ [W]	1000

## Součinitel prostupu tepla souvrství

$$\Lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i}} \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (19)$$

kde

$\Lambda_i$  je součinitel prostupu tepla daného souvrství  $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$

$$\Lambda_a = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1}{60} + \frac{0,1}{60}} = 27,9 \frac{W}{m^2K} \quad (20)$$

$$\Lambda_b = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,1}{60} + \frac{0,1}{0,45} + \frac{0,1}{0,45}} = 1,76 \frac{W}{m^2K} \quad (21)$$

#### Charakteristické číslo souvrství

$$m = \sqrt{\frac{2(\Lambda_a + \Lambda_b)}{\pi^2 \lambda_{a1} D_{tr}}} \left[ \frac{1}{m} \right] \quad (22)$$

kde

$m$  je charakteristické číslo souvrství  $\left[ \frac{1}{m} \right]$

$$m = \sqrt{\frac{2(27,9 + 1,75)}{\pi^2 \cdot 60 \cdot 0,08}} = 1,11 \frac{1}{m} \quad (23)$$

#### Teplota povrchu

$$t_p = t_i + \frac{\Lambda_a}{\alpha_p} \left( \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_i \right) [^{\circ}C] \quad (24)$$

kde

$t_p$  je teplota povrchu uvnitř motoru na oteplené straně  $[^{\circ}C]$

$$t_p = 24 + \frac{27,9}{19} \left( \frac{35 + 26}{2} - 24 \right) = 30 \text{ } ^{\circ}C \quad (25)$$

#### Měrný tepelný tok

$$q = \alpha_p (t_p - t_i) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (26)$$

kde

$q$  je měrný tepelný tok směrem (nahoru) do zařízení  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$$q = 30(30,02 - 24) = 180,6 \frac{W}{m^2} \quad (27)$$

## Potřebná plocha

$$S_p = \frac{Q}{q} [m^2] \quad (28)$$

kde

$S_p$  je měrný tepelný tok směrem (nahoru) do zařízení [ $\frac{W}{m^2}$ ]

$$S_p = \frac{1000}{180,6} = 5,46 m^2 \quad (29)$$

Výsledná plocha litinové desky schopná přenést teplo o výkonu 1000 W vyšla na více než 5,5 m<sup>2</sup>.

Tato hodnota obsahu desky byla použita společně s ostatními hodnotami jako teploty horké a studené strany válce, kompresního poměru, plynovou konstantou vzduchu, tlaku vzduchu v prvním cyklu a množstvím dodaného tepla.

Hodnoty jsem získal pomocí kalkulačky společnosti Mide, která se sama zabývá vývojem těchto zařízení. Její kalkulačka funguje podobně jako ta Waste-Heat.eu. Jednoduše se zadají přibližné hodnoty, jako jsou horká a studená strana zařízení, kompresní poměr, plynová konstanta média uvnitř válce, tlak média ve válci při stavu 1, objem média ve válci při stavu 1 a výkon dodaný stirlingovu motoru.

### Calculator Inputs

Hot end temperature (K):	<input type="text" value="308"/>
Cold end temperature (K):	<input type="text" value="272"/>
Compression Ratio:	<input type="text" value="2"/>
Specific gas constant of working fluid (J/kg·K):	<input type="text" value="287"/>
Pressure at state 1 (kPa):	<input type="text" value="100"/>
Volume at state 1 (cc):	<input type="text" value="5500000"/>
Amount of heat applied to engine (W):	<input type="text" value="1000"/>

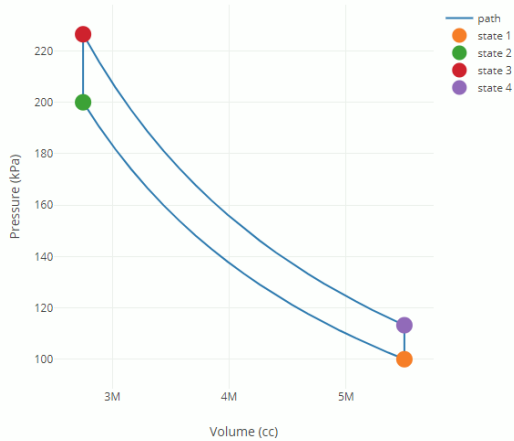
CALCULATE

**Obrázek 2.16:**  
Hodnoty zadané  
do kalkulačky  
Midé

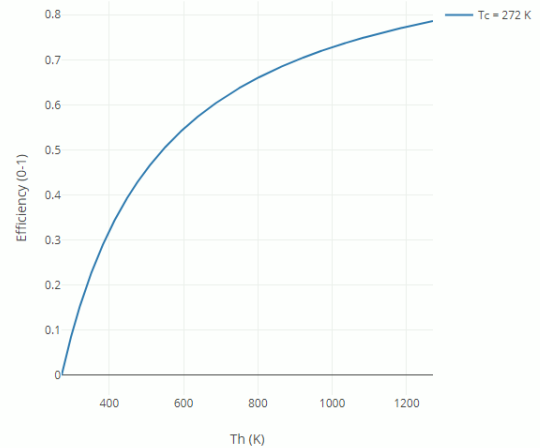
### Calculation Status: Inputs OK

Predicted Frequency (RPM)	0.1390
Predicted Power Out (W)	116.9
Predicted Efficiency (0-1)	0.1169
Predicted Average Pressure (kPa)	153.9
Swept Volume (cc)	2.750e+6
Mass of Working Fluid (mg)	7.046e+6
Work Out Per Cycle (J)	5.046e+4
Predicted Specific Work Out Per Cycle (J/mg-working fluid)	0.007162
Volume at State 1 (cc)	5.500e+6
Absolute Pressure at State 1 (kPa)	100.0
Temperature at State 1 (K)	272.0
Volume at State 2 (cc)	2.750e+6
Absolute Pressure at State 2 (kPa)	200.0
Temperature at State 2 (K)	272.0
Volume at State 3 (cc)	2.750e+6
Absolute Pressure at State 3 (kPa)	226.5
Temperature at State 3 (K)	308.0
Volume at State 4 (cc)	5.500e+6
Absolute Pressure at State 4 (kPa)	113.2
Temperature at State 4 (K)	308.0

**Obrázek 2.17:**  
Hodnoty získané  
z kalkulačky Midé



**Obrázek 2.18:** P-V Diagram ideálního Stirlingova cyklu pro zadané hodnoty



**Obrázek 2.19:** Účinnost dle Carnota a Stirlinga vs. teplota horké strany

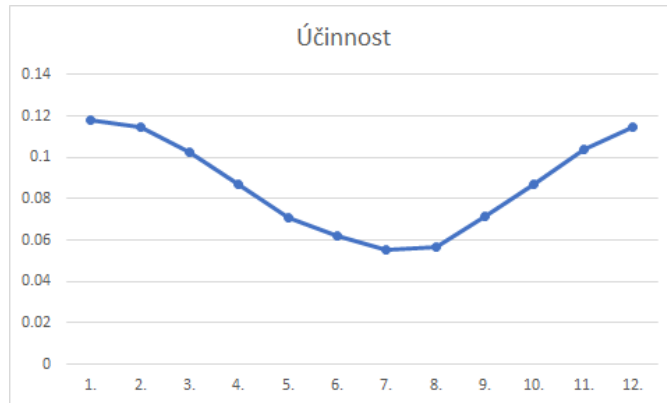
#### 2.3.1.4. Průměrná účinnost v průběhu roku

Tabulka 2.8: Průměrné účinnost Stirlingova motoru v průběhu roku

Měsíc	Průměrná účinnost [%]
Leden	11,8
Únor	11,5
Březen	10,3
Duben	8,7
Květen	7,1
Červen	6,2
Červenec	5,5
Srpen	5,7
Září	7,1
Říjen	8,7
Listopad	10,4
Prosinec	11,5

Průměrná účinnost v průběhu roku je potom 8,7 %.





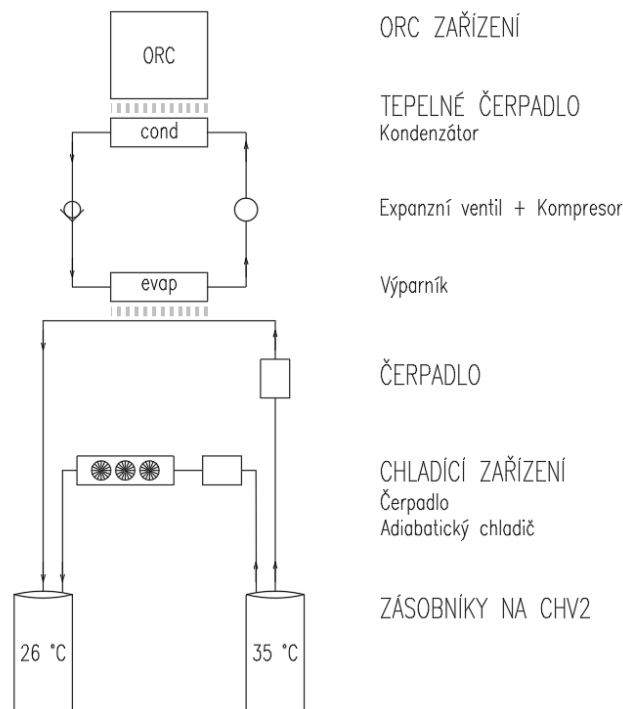
Obrázek 2.20: Účinnost Stirlingova motoru v průběhu roku

Výkon zařízení se mění v závislosti na okolních teplotách. Je zřejmé, že účinnost zařízení bude nejnižší v období letních měsíců, kdy je teplotní rozdíl nejnižší. Oproti tomu účinnost bude nejvyšší v zimním období.

### 2.3.2. Tepelné čerpadlo

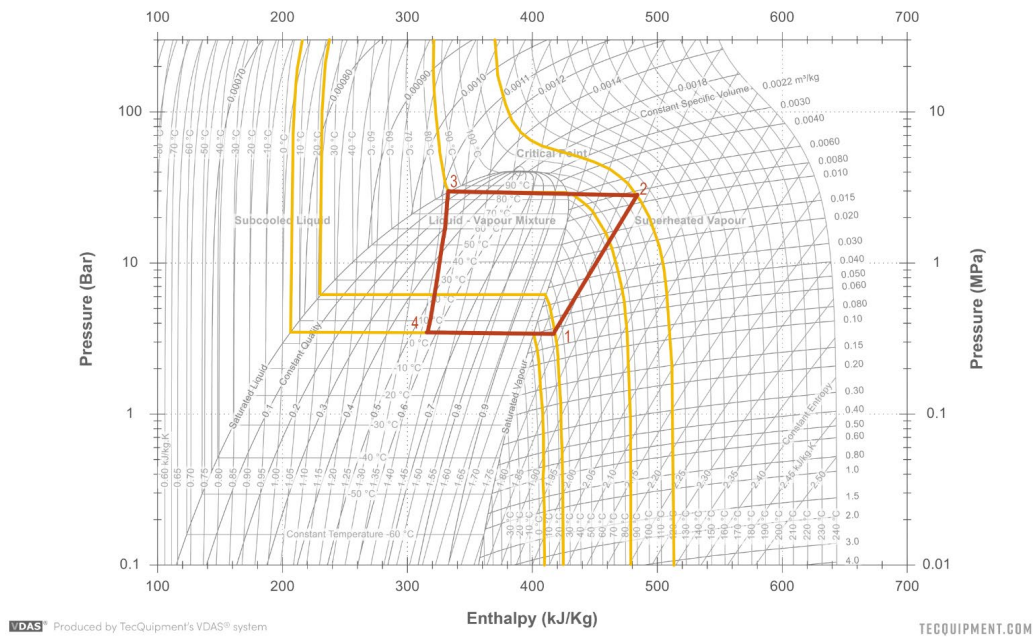
Tepelné čerpadlo je nutné pro zvýšení tepelného potenciálu teplotního média (vody) pro zajištění funkce zařízení ORC. Je to takový předchlánek pro samotné ORC zařízení, které navýší teplotu teplotního média na potřebnou hodnotu, se kterou pak dokáže organický rankinův cyklus pracovat.

Zvoleno bylo chladivo R-134a.



Obrázek 2.21: Schéma zapojení tepelného čerpadla

### 2.3.2.1. Pracovní body



Obrázek 2.22: p-h diagram pro R-134a [tecquipment.com]

Tabulka 2.9: Hodnoty v pracovních bodech [Peacesoftware.de]

Bod	T [°C]	P [bar]	h [ $\frac{kJ}{kg}$ ]
1	23	3,47	418
2	120	29,26	482,3
3	85	29,26	332
4	5	3,47	332

### 2.3.2.2. Topný faktor

$$q_{ch} = h_1 - h_4 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (30)$$

kde

$q_{ch}$  je chladivost [ $\frac{kJ}{kg}$ ]

$$q_0 = h_3 - h_2 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (31)$$

kde

$q_0$  je výhřevnost [ $\frac{kJ}{kg}$ ]

$$q_{ch} = 418 - 332 = 86 \frac{kJ}{kg} \quad (32)$$

$$q_0 = 332 - 482,3 = -150,3 \frac{kJ}{kg} \quad (33)$$

$$w_0 = q_{ch} + q_0 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (34)$$

kde

$w_0$  je měrná práce  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$$w_0 = 86 + (-150,3) = -64,3 \frac{kJ}{kg} \quad (35)$$

$$COP_t = \frac{q_0}{w_0} [-] \quad (36)$$

kde

$COP_t$  je tepelný faktor tepelného čerpadla [-]

$$COP_t = \frac{-150,3}{-64,3} = 2,34 \quad (37)$$

### 2.3.2.3. Navrhovaný výkon

Byl zvolen hmotnostní průtok chladicí vody (10 l/s) a ostatní hodnoty byly dopočítány.

$$Q_{hx} = m_{ch} abs(h_{ch,in} - h_{ch,out}) [kW] \quad (38)$$

kde

$Q_{hx}$  je navrhovaný výkon [kW]  
 $m_{ch}$  je měrný hmotnostní tok chladiva [kg/s]  
 $h_{ch,in}$  je měrná entalpie na vstupu do chladiče [kJ/kg]  
 $h_{ch,out}$  je měrná entalpie na výstupu z chladiče [kJ/kg]

$$Q_{hx} = 5,85 * abs(482,3 - 418) = 376,200 kW \quad (39)$$

$$Q_{hx} = m_{liq} abs(t_{liq,out} - t_{liq,in}) [kW] \quad (40)$$

kde

$t_{liq,in}$  je teplota chladící vody na vstupu [°C]  
 $t_{liq,out}$  je teplota chladící vody na výstupu [°C]

$$Q_{hx} = 10 * abs(26 - 35) = 376,200 kW \quad (41)$$

$$Q_{hx} = UA \frac{\delta_V - \delta_M}{\ln\left(\frac{\delta_V}{\delta_M}\right)} [kW] \quad (42)$$

kde

$U$  je součinitel prostupu tepla [ $\frac{kJ}{kg.K}$ ]  
 $A$  je teplosměnná plocha [m<sup>2</sup>]  
 $\delta_V$  je vyšší teplotní spád [K]  
 $\delta_M$  je menší teplotní spád [K]

$$Q_{hx} = 6000 * 4,83 \frac{18 - 9}{\ln\left(\frac{18}{9}\right)} = 376,200 kW \quad (43)$$

$$Q_{hx} = UA \frac{\delta_V - \delta_M}{\ln\left(\frac{\delta_V}{\delta_M}\right)} [kW] \quad (44)$$

kde

$U$  je součinitel prostupu tepla [ $\frac{kJ}{kg.K}$ ]  
 $A$  je teplosměnná plocha [m<sup>2</sup>]

**Celkový navrhovaný výkon tepelného čerpadla je tedy:**

$$Q_{T\check{c}} = \frac{Q_{hx}}{1 - \frac{1}{\eta}} [kW] \quad (45)$$

$$Q_{T\check{c}} = \frac{376,2}{1 - \frac{1}{2,34}} = 656,95 \text{ kW} \quad (46)$$

#### 2.3.2.4. ORC

Účinnost ORC zařízení byla určena dle Carnotova cyklu. Vstupní teplota strana  $t_{oORC}$  je 80 °C (výstup z tepelného čerpadla popsaného výše) a teplota chladiče  $t_{chORC}$  je stanovena na 40 °C.

$$COP_{tORC} = \frac{t_{oORC} - t_{chORC}}{t_{oORC} [K]} [-] \quad (47)$$

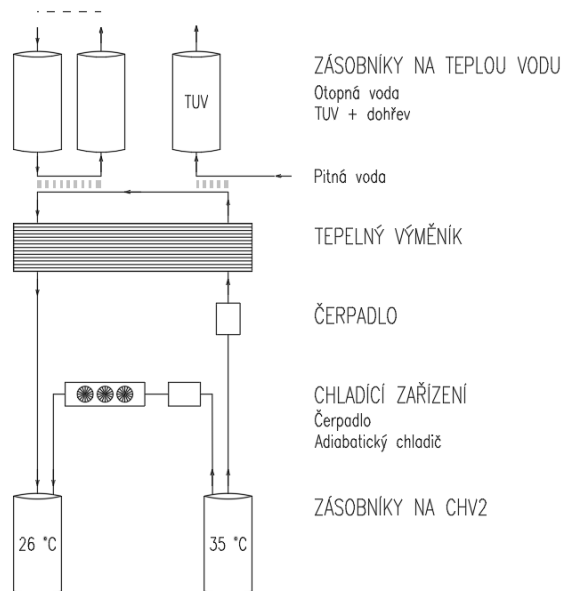
$$COP_{tORC} = \frac{80 - 40}{80 + 273} = 0,11 \quad (48)$$

#### 2.3.2.5. Celkový navrhovaný výkon

$$Q_{ORC} = \frac{Q_{T\check{c}}}{1 - \frac{1}{COP_{ORC}}} [kW] \quad (49)$$

$$Q_{ORC} = \frac{656,95}{1 - \frac{1}{0,11}} = -81,20 \text{ kW} \quad (50)$$

### 2.3.3. Tepelný výměník

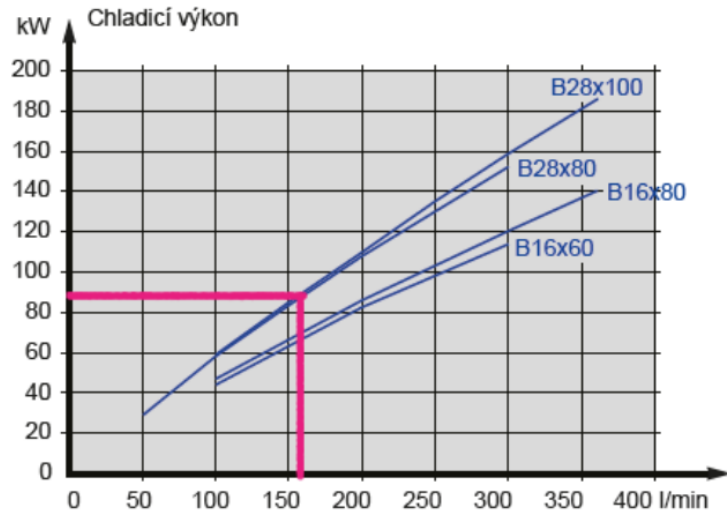


Obrázek 2.23: Schema zapojení tepelného výměníku

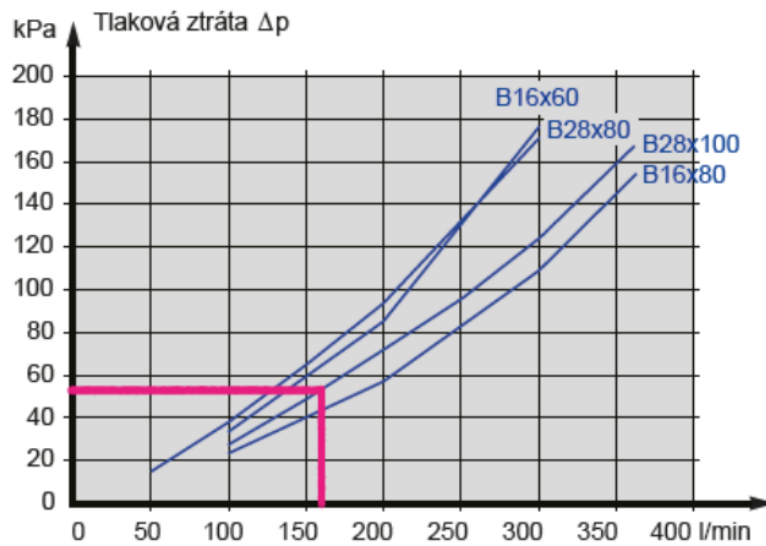
Tepelný výměník je navrhován, aby pokryl potřebu tepla budovy rovnou necelým 88 kW (pro zimní venkovní návrhovou teplotu).

Zařízení jsem zvolil od společnosti Hennlich Energy, která se zabývá výrobou a instalací tepených výměníků. Použiji jejich tepelný deskový výměník (B28x100), který je schopný pracovat s průtokem 2,66 l/s, tlaková ztráta 55kPa. Čerpadlo bude navrženo na tyto hodnoty.

### Typy HCBP-B16, HCBP-B28

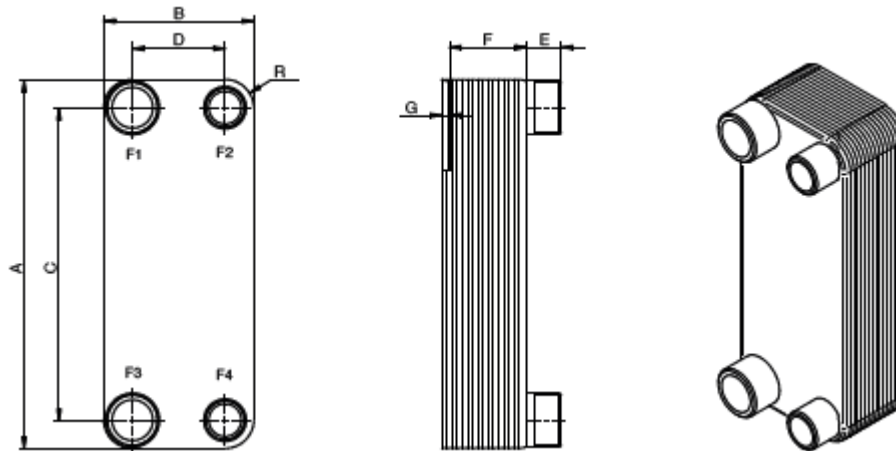


Obrázek 2.24: Navrhovaný průtok pro výměník Hennlich B28x100



Obrázek 2.25: Navrhovaná tlaková ztráta pro výměník Hennlich B28x100

### 2.3.3.1. Konstrukce výměníku



Obrázek 2.26: Konstrukce tepelného výměníku [Hennlich group, a.s.]

Typ	A mm (+/-2)	B [mm] (+/-2)	C [mm] (+/-1)	D [mm] (+/-1)	E mm (+/-1)	F +/- 3%	Max. počet desek	hmotnost	standardní koncovky ISO G vnější závit
HCBP-B5T	193	76	154	40	20,1	4 + ( 2,24 x PD )	60	0,6 + ( 0,044 x PD )	3/4"
HCBP-B8T	317	76	278	40	20,2	4 + ( 2,24 x PD )	60	0,8 + ( 0,075 x PD )	3/4"
HCBP-B10T	289	119	243	72	20,1	4 + ( 2,24 x PD )	140	1,4 + ( 0,096 x PD )	1" / 1 1/4"
HCBP-B12	287	117	234	63	27,1	4,4 + ( 2,34 x PD )	140	1,7 + ( 0,116 x PD )	1 1/4"
HCBP-B15T	468	76	432	40	20,1	4 + ( 2,24 x PD )	60	1,4 + ( 0,104 x PD )	1 1/4"
HCBP-B16	376	119	320	63	27,1	4 + ( 2,24 x PD )	140	1,7 + ( 0,120 x PD )	1 1/4"
HCBP-B25T	526	119	479	72	20,1	4 + ( 2,24 x PD )	140	2,2 + ( 0,178 x PD )	1" / 1 1/4"
HCBP-B28	526	119	470	63	27,1	4 + ( 2,24 x PD )	140	2,3 + ( 0,164 x PD )	1" / 1 1/4"
HCBP-B35	393	243	324	174	27,1	8 + ( 2,34 x PD )	250	7,0 + ( 0,340 x PD )	1 1/2"
HCBP-B120T	525	243	456	174	27,1	10 + ( 2,29 x PD )	250	10,3 + ( 0,404 x PD )	1 1/2"
HCBP-B56	525	243	430	148	54,2	14 + ( 2,44 x PD )	280	16,3 + ( 0,419 x PD )	2 1/2"

Obrázek 2.27: Parametry navrženého tepelného výměníku [Hennlich group, a.s.]

Vybráno bylo stožebrové těleso.



## 2.4. Návratnost projektu

### 2.4.1. Stirlingův motor

Výstupy z vypočítaných hodnot jsou neuspokojivé, protože ačkoliv účinnost zařízení je okolo 12 %, a to jen při teplotě venkovního vzduchu - 1,4 °C, dokázalo by z dodaného 1 kW vytvořit 116,9 W, což by nebylo tak zlé, ale problém zde tvoří objem válce a tím i velikost a váha pístu motoru pohánějící hřídel motoru při 0,1390 ot/min. Tak velká konstrukce by za vidinou výkonu pouze 116,9 W nebyla nikdy výhodná a defacto ani proveditelná.

### 2.4.2. Tepelné čerpadlo + ORC

Je možno dosáhnout vcelku dobré účinnosti, ale ORC zařízení má natolik vysoké pořizovací náklady (v řádech několika desítek milionů) a nároky na vysoké teploty a hmotnostní toky, že se pro toto použití nevyplatí.

Tepelné čerpadlo by bylo možno použít i pro případ č. 3 (tedy pro přípravu TUV a k vytápění provozní budovy), ale vzhledem k nízkým potřebným výkonům je pouhý tepelný výměník jednodušší, levnější a vzhledem k tomu, že nepotřebuje chladivo (vystačí s vodními okruhy), i ekologičtější variantou.

### 2.4.3. Tepelný výměník

Jako nejlepší variantu pro dané situaci byl zvolen tepelný výměník kvůli jeho zcela dostatečným výkonům pro vytápění. Při výpočtu doby návratnosti projektu tepelného výměníku jsem použil výpočet pomocí čisté současné hodnoty, kdy jsem jako hodnotu Cash Flow použil roční úsporu energetických nákladů, které při průměrné ceně 2,15 Kč/ kWh činí 834 866 Kč, ke kterým jsem přičítal i odpisy investice, které jsou rozloženy na deset let [46] [47]. Celková investice byla odhadnuta na 2 800 000 Kč (předpokládají se náklady na pořízení, na instalaci, na přestavbu vodovodního oběhu a na dostavbu zásobníku na vodu). Odpisy tedy činí 280 000 Kč/rok.

Výpočet ČSH (NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^{T\check{z}} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IN$$

Obrázek 2.28 - Vzorec pro výpočet ČSH [49]

Kde:

**CFt** je roční úspora nákladů na energie plus odpisy [Kč]

**r** je diskontní sazba [%]

**Tž** je doba životnosti investice [rok]

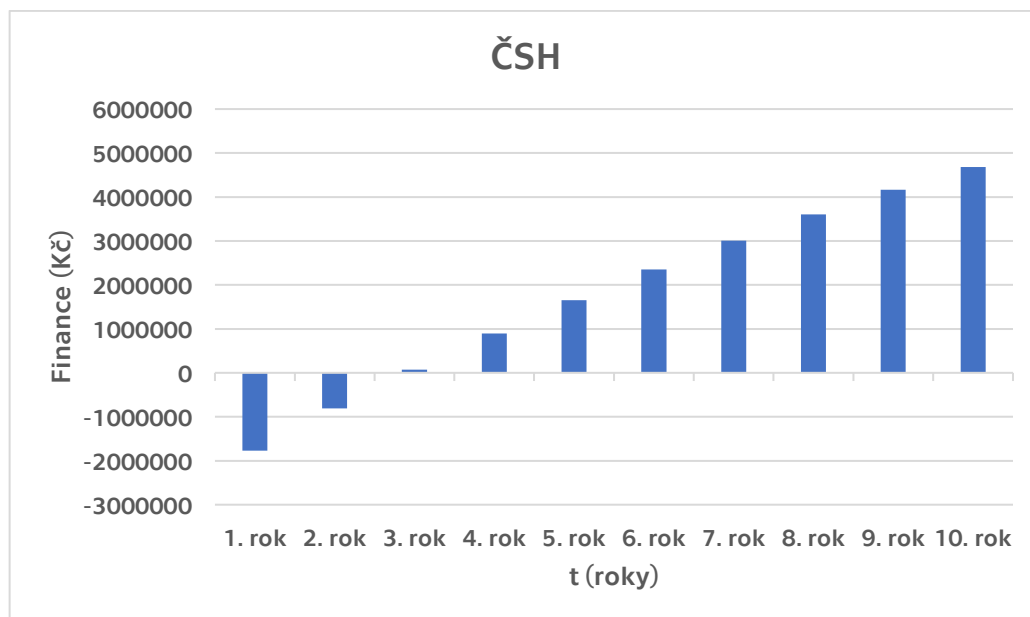
**IN** jsou celkové náklady investice [Kč]

Celkové náklady investice, ve kterých je zahrnut nákup tepelného výměníku, jeho instalace, přestavba vodovodního oběhu a instalace vodních zásobníků činí 2 800 000 Kč. Formu zisku, který většinou tvoří základ CF zde vytvářejí úspory za ušetřené náklady na teplo, ke kterým se dále připočítávají odpisy z investice, která se rovnoměrně odepisuje deset let, kdy je CF něco okolo 1 115 000 Kč. Diskontní sazbu jsem zvolil 8 %, protože jsem uvažoval hodnotu inflace, která je 3 % a dále možný růst ceny plynu.

*Tabulka 2.10: Čistá současná hodnota v následujících 10 letech po investici*

Rok	Čistá současná hodnota
1	-1767717
2	-811899
3	73118
4	892578
5	1651337
6	2353892
7	3004405
8	3606733
9	4164443
10	4680842

Po deseti letech bude čistá současná hodnota investice dosahovat hodnoty 4 680 850 Kč.



Obrázek 2.29: Čistá současná hodnota

Dobu návratnosti projektu se pohybuje těsně před koncem třetího roku doby života investice. Investice se stane ziskovou přibližně okolo 2 let a 11 měsíců.

## **2.5. Diskuze**

Celkové roční ušetřené náklady na vytápění a ohřev vody jsou pak 834 866 Kč, což je ve srovnání s investičními náklady okolo 2,8 milionu Kč, která zahrnuje jak cenu tepelného čerpadla, přestavby vodovodního vedení pro jeho zapojení do vodovodu užitkové vody, instalace vodojemu na jím ohřátou vodu, přívětivá hodnota, která při diskontní sazbě 8 % zajišťuje návratnost investice v období kolem 3 let.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo představit technologicky a ekonomicky nejvhodnější zdroje odpadního tepla a jeho následné využití pomocí dnes dostupných technologií a následně vykalkulovat jejich ekonomickou návratnost v závislosti na dostupnosti potřebných dat.

V první části diplomové práce je uvedena teorie využívání odpadního tepla a jeho dalších faktorů jako jsou například množství tepla, teplotního nosiče a hmotnostního toku, která by mohla být pomocným nástrojem pro kohokoliv, koho by tato problematika mohla v budoucnu zajímat.

V druhé části jsem se zaměřil na aplikaci těchto poznatků o možnostech využití odpadního tepla a současných technologií na konkrétním příkladu.

Výhodou České republiky je fakt, že je to země, která je plná technologických budov napříč širokou škálou průmyslových odvětví.

Z důvodů koronavirových opatření, které znemožňovaly návštěvy těchto budov byl jako objekt, ve kterém byl projekt navržen, zvolena budova společnosti ENASPOL a.s., která již podobný projekt provedla a já se rozhodl jej ještě modifikovat. Z důvodu nízkého potenciálu odpadního tepla bylo navrženo řešení, které spočívá v zapojení tepelného výměníku, který ohřívá užitkovou vodu a vytápí místnosti pomocí tepla obsaženém ve vodě chladicího oběhu CHV2.

Výhodou tohoto řešení je jeho nenáročnost instalace na již modifikovaný okruh, který zajišťuje stálý zdroj vody o teplotě 35 °C a vysoká finanční návratnost díky dnes už relativně nízkým pořizovacím nákladům a následně díky dodanému teplu z chladicího oběhu a výrazně sníženým energetickým a ekonomickým nárokům na vytápění a ohřev užitkové vody.

Pomocí tepelného výměníku bude voda, která bude napojena na samostatný oběh, ohřáta na 32 °C a přivedena do zásobníku o objemu 500 litrů, kterou budou moci zaměstnanci využívat po dohřátí jako TUV a dále bude pomocí takto ohřáté vody možné vytápět kanceláře a jiné místnosti, ve kterých probíhají pracovní procesy.

Technologie využívající odpadní teplo jsou jistě zajímavý nápad, který je nutné dále zkoumat a obeznamovat s ním širokou veřejnost, nicméně zatím se pro středně velké podniky vyplatí investovat do zařízení jako jsou tepelná čerpadla nebo výměníky tepla, které jsou díky svým relativně nízkým nákladům a širokému spektru využití (obzvláště tepelná čerpadla) schopná ušetřit náklady na vytápění a dále i na přehřev výrobních procesů. Pokud jde o Stirlingův motor, tak je co se nízkopotenciálního tepla defacto nevyužitelný kvůli svým velkým rozměrům a nízkému výkonu při nízkých teplotách. S nízkopotenciálním teplem si dokáže jen velmi těžko poradit i ORC zařízení, které by pro svůj chod potřebovalo ještě dodatečné tepelné čerpadlo, které by dokázalo zvýšit teplotu uvažovaného teplotního média, ale při současné teplotě chladicí vody 35 °C (navrhovaným čerpadlem navýšená na 80 °C) je tato technologie nevyužitelná.

## Zdroje

- [1] Klimaticko-energetický balíček do roku 2020 - Ministerstvo životního prostředí. Ministerstvo životního prostředí [online]. Copyright © 2008 [cit. 04.08.2020]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/klimaticko\\_energeticky\\_balicek\\_2020](https://www.mzp.cz/cz/klimaticko_energeticky_balicek_2020)
- [2] Výroba a spotřeba elektrické energie v roce 2019 | ČSÚ v Brně. Český statistický úřad | ČSÚ [online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xb/vyroba-a-spotreba-elektricke-energie-v-jihomoravskem-kraji-v-roce-2019>
- [3] Energetický regulační úřad: Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2017 [online]. [cit. 20-06-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/17553-vyroba-a-spotreba-elekriny-v-cr-v-roce-2017>
- [4] Výroba elektřiny v ČR podle druhu elektráren. - Aktuálně.cz. Zprávy - Aktuálně.cz [online]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/vyroba-elekriny-v-cr-podle-druhu-elekraren/r~ee003a20ecd011e8b2380cc47ab5f122/r~ecf1f174f30511e8b2380cc47ab5f122/>
- [5] Informační portál. Informační portál [online]. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/elektrarny-na-biomasu>
- [6] 301 Moved Permanently. oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/na-chomutovsku-konci-provoz-elekrarny-prunerov-i/>
- [7] Využití odpadního tepla pro výrobu elektřiny, tepla a chladu. oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/vyuziti-odpadniho-tepla-pro-vyrobu-elekriny-tepla-a-chladu>
- [8] Odpadní teplo: když firmy netopí pánu bohu do oken | byznys-energie.cz | Byznys & Energie. Byznys & Energie | Byznys & Energie [online]. Copyright © 2020 E.ON [cit. 08.08.2020]. Dostupné z: <https://www.byznys-energie.cz/clanek/odpadni-teplo-kdyz-firmy-netopi-panu-bohu-do-oken>
- [9] EUR-Lex — Access to European Union law — choose your language [online]. Copyright © [cit. 09.08.2020]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>
- [10] Fučík, Z. Stručná teorie kondenzace u kondenzačních plynových kotlů. [online]. 2004 [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzbinfo.cz/vytapime-plynem/1912-strucna-teorie-kondenzace-u-kondenzacnich-plynovych-kotlu>
- [11] Vondra M., Bobák P. a Máša V. Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů. 2015, 43. [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: [http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/12/vtei\\_2015\\_6\\_vyuziti\\_odpadniho.pdf](http://www.vtei.cz/wp-content/uploads/2015/12/vtei_2015_6_vyuziti_odpadniho.pdf)
- [12] Odpadní teplo. PO AGRO XXL a.s. [online]. Copyright © 2008 Enchantress Design [cit. 18.08.2020]. Dostupné z: <https://www.poagroxxl.com/odpadni-teplo/>
- [13] 7122: Využití odpadního tepla. COPTel – výukový portál SŠ-COPT Kroměříž [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena. [cit. 18.08.2020]. Dostupné z: <https://coptel.cz/mod/page/view.php?id=8789>

- [14] Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry. [online]. 2008, 112 [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: [https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste\\_heat\\_recovery.pdf](https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf)
- [15] Carnotův (ideální) kruhový děj. 302 Found [online]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/mol\\_ekul/4\\_2](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/mol_ekul/4_2)
- [16] Carnotův cyklus – Enpedie. [online]. Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Carnot%C5%AFv\\_cyklus](http://enpedie.cz/wiki/Carnot%C5%AFv_cyklus)
- [17] Ptáček L. a kol: *Nauka o materiálu II*, Akademické nakladatelství CERM, Brno 1999
- [18] Hintz, M. *Využití odpadního či zbytkového tepla tepelnými čerpadly*. [online]. HOTJET CZ, 2015, (Firemní článek) [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13251-vyuziti-odpadniho-ci-zbytkoveho-tepla-tepelnymi-cerpadly>
- [19] KVB ENERGY - tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov | Tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov, vytápění, solární ohřev. *KVB ENERGY - tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov | Tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov, vytápění, solární ohřev* [online]. Copyright © 2020 [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: <https://kvb-uspora-energie.cz/>
- [20] Tepelná čerpadla země/voda – plocha – Tepelná čerpadla IVT. *Tepelná čerpadla IVT – švédská kvalita pro vaše pohodlí* [online]. Copyright © 2003 [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/tepelna-cerpadla-zeme-voda-plocha>
- [21] K čemu slouží a kolik stojí vrty pro tepelná čerpadla? | E.ON. *Pomáháme šetřit peníze i přírodu | E.ON* [online]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/vrty-pro-tepelna-cerpadla>
- [22] *Pomáháme šetřit peníze i přírodu | E.ON* [online]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/tepelne-cerpadlo-vzduch-voda#anchor-menu>
- [23] KVB ENERGY - tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov | Tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov, vytápění, solární ohřev. *KVB ENERGY - tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov | Tepelná čerpadla Opava, Ostrava, Bruntál, Krnov, vytápění, solární ohřev* [online]. Copyright © 2020 [cit. 31.08.2020]. Dostupné z: <https://kvb-uspora-energie.cz/>
- [24] Tepelná čerpadla voda-voda - Tepelná čerpadla M-klima. *Tepelná čerpadla a klimatizace do bytů, domů a kanceláří - M-Klima* [online]. Dostupné z: <https://www.m-klima.cz/tepelna-cerpadla/tepelna-cerpadla-voda-voda/>
- [25] *Parametry pro hodnocení efektivity tepelných čerpadel: COP a SCOP.* [online]. 2015 [cit. 31.08.2020]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13196-parametry-pro-hodnoceni-efektivitu-tepelnych-cerpadel-cop-a-scop>
- [26] Vytápění: Tepelná čerpadla, Tzbinfo [online]. [cit. 31.08.2020]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla>
- [27] Katedra technických zařízení budov K11125. *Projekční podklady a pomůcky - Tepelná čerpadla* [online]. [cit. 31.08.2020]. Dostupné z:

<http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=9&TZB=f1203927ec0f127ede5744279a331cac>

- [28] Honzík, J. Tepelná čerpadla: Dimenzování tepelného čerpadla vzduch-voda, bivalentní/záložní zdroj. [online]. [cit. 31.08.2020]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla>
- [29] Systémy ORC a jejich uplatnění v praxi | Energie kolem nás. *Energie kolem nás* [online]. Copyright © 2020 [cit. 02.09.2020]. Dostupné z: <http://ekn.cz/systemy-orc-a-jejich-uplatneni-v-praxi/>
- [30] Přeměna odpadního tepla na elektřinu nebo chlad/absorpční chlazení [online]. Copyright © [cit. 02.09.2020]. Dostupné z: <https://www.lbgmoravia.cz/technologie/premena-odpadniho-tepla-na-elektřinu-nebo-chlad/absorpčni-chlazení-p50/>
- [31] Pospíšil, J. Větrání/Klimatizace: Chladící oběhy, trigenerace, dálkové chlazení [online]. [cit. 02.09.2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/7910-chladici-obehy-trigenerace-dalkove-chlazení>
- [32] Princip výměníku tepla - Výměníky tepla SWEP. *Deskové výměníky tepla SWEP [Pájené, rozebíratelné]* [online]. [cit. 02.09.2020] Dostupné z: <https://www.vymeniky-tepla.cz/princip/>
- [33] Teplovzdušné motory. *Stirlingův motor* [online]. [cit. 24.09.2020] Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/uvod/stirling.htm>
- [34] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 24.09.2020]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28586](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28586)
- [35] Use TRIZ to Develop Stirling Engine The Triz Journal . The Triz Journal – TRIZ Methodology, Tools, Articles and Case Studies The Triz Journal | TRIZ Methodology, Tools, Articles and Case Studies [online]. Copyright © 2019, The TRIZ Journal, all rights reserved. [cit. 24.09.2020]. Dostupné z: <https://triz-journal.com/using-triz-to-develop-a-new-stirlingbrayton-engine/>
- [36] Segunda-feira, 10 De Maio De - Beta Type Stirling Engine - Free Transparent PNG Clipart Images Download. *ClipartMax - PNG Clipart Free Download, Largest Transparent Clip Art Images Collection* [online]. Copyright © clipartmax.com All Rights Reserved. [cit. 24.09.2020]. Dostupné z: [https://www.clipartmax.com/middle/m2i8m2G6H7A0N4d3\\_segunda-feira-10-de-maio-de-beta-type-stirling-engine/](https://www.clipartmax.com/middle/m2i8m2G6H7A0N4d3_segunda-feira-10-de-maio-de-beta-type-stirling-engine/)
- [37] Tipos de Motor Stirling | Blog SEAS. *SEAS, Estudios Superiores Abiertos Online* [online]. Copyright © SEAS Estudios Superiores Abiertos [cit. 24.09.2020]. Dostupné z: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/tipos-de-motor-stirling/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/tipos-de-motor-stirling/)
- [38] *Svaz průmyslu a dopravy České Republiky* [online]. Copyright © [cit. 02.12.2020]. Dostupné z: [https://www.spcr.cz/images/Energeticke\\_ustory\\_studie.pdf](https://www.spcr.cz/images/Energeticke_ustory_studie.pdf)
- [39] Waste heat technologies | Waste Heat. *Waste Heat* [online]. Copyright © [cit. 02.12.2020]. Dostupné z: <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat/waste-heat-technologies>



- [40] Přes polovinu energie protopíme | ČSÚ. *Český statistický úřad | ČSÚ* [online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/pres-polovinu-energie-protopime>
- [41] Europe :: Czechia — The World Factbook - Central Intelligence Agency. [online]. Dostupné z: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ez.html>
- [42] *Odpadní Tepl* [online] [cit. 16.12.2020]. Dostupné z: <http://www.odpadni-teplo.cz/catalog/enaspol-a-s>
- [43] Decision support system | Waste Heat. *Waste Heat* [online]. Copyright © 2019 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z: <https://www.waste-heat.eu/waste-heat-toolbox/investment-decision-support/decision-support-system>
- [44] Cena kWh elektřiny, plynu a tepla 2020 - Kupní Síla. *KupniSila.cz - Kupní Síla* [online]. Copyright © 2014 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z: <https://www.kupnisila.cz/cena-kwh-elekriny-plynu-tepla/>
- [45] Aktuální kurz eura ke koruně, EUR/CZK. ČNB, banky, směnárny. | Peníze.cz. *Peníze.cz - Půjčky, Kurzy měn, Akcie, Hypotéky, Bydlení, Daně* [online]. Copyright © 2000 [cit. 16.12.2020]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/kurzy-men/6596-euro>
- [45] Tepelné motory [online]. [cit. 03.01.2021] Dostupné z: [https://www.gymck.cz/storage/1332145807\\_sb\\_8b\\_fy\\_tepelne\\_motory\\_01.pdf](https://www.gymck.cz/storage/1332145807_sb_8b_fy_tepelne_motory_01.pdf)
- [46] Třídění hmotného majetku do odpisových skupin - Portál POHODA. *Zákony - Portál POHODA* [online]. Copyright © 2012 STORMWARE s.r.o. [cit. 03.01.2021]. Dostupné z: <https://zakony.pohoda.cz/danove-a-financni-pravo/zakon-o-danich-z-prijmu/trideni-hmotneho-majetku-do-odpisovych-skupin/?fbclid=IwAR1AJU7H4fR64z-Ee2VN5yHN9sXKYgVMZUwqjSClEMj-muNJrpaHFEkFk8>
- [47] Daňové odpisy [online]. Copyright © 2018 eStránky.cz [cit. 03.01.2021]. Dostupné z: <http://www.odpisy.estranky.cz/clanky/danove-odpisy/?fbclid=IwAR24C6zl5Rgi6qtUePAa9WVIGYr2bHfcHkiO5GW8AE7jjwDjnmzNrK3k7k0>
- [48] Sedlář, J. Tepelná čerpadla: Model tepelného čerpadla s odvodem tepla na třech úrovních. [online]. [cit. 3.01.2021]. Dostupné z: [https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla/12678-model-tepelneho-čerpadla-s-odvodem-tepla-na-trech-urovnich?fbclid=IwAR2O9Bwo5DA9QgmH0sH2WJyrXqpn6AbewuBK2\\_lzln\\_kUkéfmUOrjp-zVVI](https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-čerpadla/12678-model-tepelneho-čerpadla-s-odvodem-tepla-na-trech-urovnich?fbclid=IwAR2O9Bwo5DA9QgmH0sH2WJyrXqpn6AbewuBK2_lzln_kUkéfmUOrjp-zVVI)
- [49] Jak vyhodnotit přínosy a návratnost zateplení domu - čistá současná hodnota - ESTAV.cz. *ESTAV.cz - Architektura. Stavba. Bydlení.* [online]. Copyright © Copyright [cit. 03.01.2021]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/4796-jak-vyhodnotit-přínosy-a-navratnost-zatepleni-domu-cista-soucasna-hodnota>

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Tepelná elektrárna Počerady .....	7
Obrázek 1.1: Výroba elektřiny podle druhu elektráren v ČR [3] .....	10
Obrázek 1.2: Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2017 [5] .....	11
Obrázek 1.3: Účinnost Carnotova cyklu [16] .....	17
Obrázek 1.4: Závislost účinnosti na teplotě .....	18
Obrázek 1.5: Kategorizace technologií využívajících odpaní teplo [39].....	20
Obrázek 1.6: Tepelné čerpadlo země-voda [23].....	22
Obrázek 1.7: Tepelné čerpadlo země-voda [23].....	24
Obrázek 1.8: Tepelné čerpadlo vzduch-voda [23].....	25
Obrázek 1.9: Tepelné čerpadlo vzduch-vzduch [23].....	26
Obrázek 1.10: Tepelné čerpadlo voda-voda [23].....	27
Obrázek 1.11: Schema tepelného čerpadla [27].....	30
Obrázek 1.12: Schema zařízení ORC.....	33
Obrázek 1.13: Expander .....	33
Obrázek 1.14: Příklad biomasové elektrárny - kombinovaná výroba elektřiny a tepla ze dřeva [29] ..	35
Obrázek 1.15: Fáze 1 [30] .....	38
Obrázek 1.16: Fáze 2 [30] .....	38
Obrázek 1.17: Fáze 3 [30] .....	39
Obrázek 1.18: Fáze 4 [30] .....	39
Obrázek 1.19: Fáze 5 [30] .....	40
Obrázek 1.20: Deskový výměník [20] .....	43
Obrázek 1.21: Modifikace alfa [35] .....	45
Obrázek 1.22: Modifikace beta [36] .....	46
Obrázek 1.23: Modifikace gamma [37].....	46
Obrázek 2.1: Mapa dotazovaných společností [42] .....	51
Obrázek 2.2: Volba společností podle doby provozu [42].....	51
Obrázek 2.3: Volba společností podle počtu měsíců provozu [42] .....	51
Obrázek 2.4: Volba společnosti podle teploty zdroje odpadního tepla [42].....	52
Obrázek 2.5: Mapa podniků produkujících odpadní teplo s teplotou media 0-499 °C [42] .....	52

Obrázek 2.6: Mapa podniků produkujících odpadní teplo s teplotou media 499-999 °C [42].....	53
Obrázek 2.7: Vzhled nástroje DSS [43].....	55
Obrázek 2.8: Výsledek vyhodnocení ze zadaných hodnot [43].....	55
Obrázek 2.9: Vložené získané hodnoty [43].....	58
Obrázek 2.10: Soubor hodnot přenastavených systémem kalkulátoru Waste-Heat.eu [43] .....	58
Obrázek 2.11: Výsledné hodnoty z kalkulačky Waste-Heat.eu [43] .....	59
Obrázek 2.12: Schema zapojení stávajících chladících zařízení.....	60
Obrázek 2.13: Průměrné dlouhodobé teploty Ústeckého kraje .....	61
Obrázek 2.14: Schema provozní budovy.....	63
Obrázek 2.15: Schema zapojení Stirlingova motoru .....	65
Obrázek 2.16: Hodnoty zadané do kalkulačky Midé .....	69
Obrázek 2.17: Hodnoty získané z kalkulačky Midé .....	69
Obrázek 2.18: P-V Diagram ideálního Stirlingova cyklu pro zadané hodnoty .....	70
Obrázek 2.19: Účinnost dle Carnota a Stirlinga vs. teplota horké strany.....	70
Obrázek 2.20: Účinnost Stirlingova motoru v průběhu roku .....	71
Obrázek 2.21: Schéma zapojení tepelného čerpadla.....	71
Obrázek 2.22: p-h diagram pro R-134a [tecquipment.com].....	72
Obrázek 2.23: Schema zapojení tepelného výměníku.....	76
Obrázek 2.24: Navrhovaný průtok pro výměník Hennlich B28x100.....	77
Obrázek 2.25: Navrhovaná tlaková ztráta pro výměník Hennlich B28x100 .....	77
Obrázek 2.26: Konstrukce tepelného výměníku [Hennlich group, a.s.].....	78
Obrázek 2.27: Parametry navrženého tepelného výměníku [Hennlich group, a.s.].....	78
Obrázek 2.28 - Vzorec pro výpočet ČSH [49] .....	79
Obrázek 2.29: Čistá současná hodnota .....	81

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Kategorie odpadního tepla [14] .....	16
Tabulka 1.2: Topné faktory tepelných čerpadel .....	28
Tabulka 1.3: Parametry spalinových ORC systémů .....	35
Tabulka 1.4: Chladicí a absorpční látky [31] .....	41
Tabulka 1.5: Výhody a nevýhody absorpčních a parních oběhů [31] .....	41
Tabulka 1.6: Zdroje energie chladících absorpčních jednotek [31] .....	42
Tabulka 2.1: Okrajové podmínky výpočtu – chladicí voda .....	60
Tabulka 2.2: Okrajové podmínky výpočtu - exteriér .....	61
Tabulka 2.3: Průměrné měsíční venkovní teploty .....	61
Tabulka 2.4: Potřebné výkony pro ohřev TUV + vody na vytápění .....	64
Tabulka 2.5: Příklady účinnosti jiných druhů motorů [46] .....	66
Tabulka 2.6: Vrstvy pro vytápění teplé strany Stirlingova motoru .....	67
Tabulka 2.7: Vstupní hodnoty pro návrh .....	67
Tabulka 2.8: Průměrné účinnost Stirlingova motoru v průběhu roku .....	70
Tabulka 2.9: Hodnoty v pracovních bodech [Peacesoftware.de] .....	72
Tabulka 2.10: Čistá současná hodnota v následujících 10 letech po investici .....	80

## Nomenklatura symbolů

$\eta$	Účinnost [%]
$T_1$	Teplota chladiče [K]
$T_2$	Teplota odpadního média [K]
$\dot{E}$	Ztráty odpadního tepla [ $\frac{W}{s}$ ]
$\dot{m}$	Hmotnostní tok proudu teponosného média [ $\frac{kg}{s}$ ]
$h(t)$	Měrná entalpie v závislosti na teplotě [J]
<b>COP</b>	Topný faktor [-]
$P_c$	Elektrický příkon [W]
$P_{aux}$	Elektrický příkon k překonání tlakové ztráty kondenzátoru, odtávání a vlastní regulaci tepelného čerpadla [W]
<b>SCOP</b>	Sezónní topný faktor [-]
$Q_H$	Referenční roční požadavek na vytápění [Wh]
$Q_{HE}$	Roční spotřeba elektrické energie [Wh]
$Q$	Teplo obsažené v médiu [J]
$m$	váha [kg]
$c$	Měrná tepelná kapacita [J/kg*K]
$\Delta T$	Rozdíl teplot [K]
$P$	výkon [W]
$U_T$	Součinitel přestupu tepla [W/m <sup>2</sup> *K]
$W$	Práce [J]
$t$	Čas [s]
$q_{ch}$	Chladivost [s]
$q_o$	Výhřevnost [ $\frac{kJ}{kg}$ ]
$w_o$	Měrná práce [ $\frac{kJ}{kg}$ ]
<b>COP<sub>t</sub></b>	Topný faktor [-]
$Q_{hx}$	Navrhovaný výkon [kW]
$Q_{TČ}$	Celkový výkon tepelného čerpadla [kW]
<b>COP<sub>tORC</sub></b>	Topný faktor ORC [-]
$Q_{ORC}$	Celkový výkon ORC [kW]
$\dot{m}_{ch}$	měrný hmotnostní tok chladiva [kg/s]
$h_{ch,in}$	měrná entalpie na vstupu do chladiče [kJ/kg]
$h_{ch,out}$	měrná entalpie na výstupu z chladiče [kJ/kg]
$U$	Součinitel prostupu tepla [ $\frac{kJ}{kg.K}$ ]
$A$	teplosměnná plocha [m <sup>2</sup> ]
$\delta_V$	vyšší teplotní spád [K]
$\delta_M$	menší teplotní spád [K]
<b>NPV</b>	Čistá současná hodnota [Kč]
<b>CF<sub>t</sub></b>	roční úspora nákladů na energie plus odpisy [Kč]
$r$	Diskontní sazba [%]
<b>TŽ</b>	Doba životnosti investice [rok]
<b>IN</b>	Celkové náklady investice [Kč]