



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

POTENCIÁL TEPELNÝCH ČERPADEL PRO VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA V INTERIÉRECH MALÝCH A STŘEDNÍCH PODNIKŮ

INTERIORS OF SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES AS A SOURCE OF WASTE HEAT FOR A HEAT PUMP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Valachovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Bc. Filip Valachovič
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Vítězslav Mása, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Potenciál tepelných čerpadel pro využití odpadního tepla v interiérech malých a středních podniků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se zvyšujícím se tlakem na úspory energie roste v průmyslových podnicích potřeba intenzivnějšího využívání odpadního tepla. Začínají se také využívat zdroje odpadního tepla, které dosud zůstávaly mimo oblast zájmu. Jedním z nich je také teplý vzduch v interiérech průmyslových podniků, který je ohříván výrobním nebo zpracovatelským procesem případně zdrojem či rozvody tepla. Teplota v prostoru může být významně zvyšována i venkovními podmínkami během letních měsíců. Práce je zaměřena na mapování potenciálu tohoto druhu odpadního tepla pro další využití v procesu. Důraz bude kladen na posouzení aplikačního potenciálu tepelných čerpadel v uvedené oblasti.

Cíle diplomové práce:

- Přehled dostupných technologií pro využití odpadního tepla se zaměřením na tepelná čerpadla
- Představení hygienických požadavků na kvalitu vnitřního prostředí budov v průmyslovém prostředí
- Tepelná bilance vybraného provozu
- Koncepční návrh integrace tepelných čerpadel do tohoto provozu
- Technicko–ekonomické posouzení záměru

Seznam doporučené literatury:

GRASSI, Walter. Heat Pumps: Fundamentals and Applications. 1. Switzerland: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-62198-2.

GOODFELLOW, Howard D. a Risto KOSONEN. Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 1: Fundamentals. 2nd. United States: Academia Press, 2020. ISBN 9780128167816.

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

V Brně, dne

L. S.

.....
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Problémy spojené so životným prostredím a vysoký nárast cien energií v poslednej dobe nútia spoločnosť hľadať sofistikovanejšie a úspornejšie riešenia z hľadiska spotreby energie. Dôsledkom toho sa tak začínajú viac a viac využívať obnoviteľné zdroje energie a odpadové teplo. Predmetom výskumných prác sa stávajú aj zdroje odpadového tepla, ktoré doteraz zostávali mimo oblasť záujmu, ako je napríklad odpadové teplo obsiahnuté vo vzduchu interiérov priemyselných podnikov. Toto odpadové teplo ma bezpochyby potenciál v mnohých odvetviach priemyselného sektoru. Využitie odpadového tepla zakaždým dopĺňa istá technológia. Z hľadiska prevádzkových nákladov i vplyvu na životné prostredie, sa zdá byť prívetivým riešením tepelné čerpadlo. Hlavným cieľom predkladanej práce je posúdenie aplikačného potenciálu tepelných čerpadiel pre využitie odpadového tepla obsiahnutom vo vzduchu interiérov malých a stredných priemyselných podnikov. Pričom prvá časť práce sa zaoberá prehľadom dostupných technológií pre využitie odpadového tepla, úvodom do tepelných čerpadiel, ďalej je rozoberaná problematika spojená s tepelnou záťažou priemyselných objektov a vzhľadom k možnosti využitia tepelného čerpadla k chladeniu interiéru je pozornosť venovaná tiež hygienickým požiadavkám na kvalitu vnútorného prostredia. V druhej časti práce je predstavený koncepčný návrh integrácie tepelného čerpadla do vybranej prevádzky – priemyselnej práčovne. Metodika riešenia pozostáva z výberu a analýzy prevádzky z hľadiska tepelnej energie, návrhu tepelného čerpadla, ekonomickej analýzy a zhodnotenia dosiahnutých výsledkov. Aktuálne dostupné odpadové teplo vo vzduchu vyšetrovanej práčovne odpovedá 37 kJ a tepelná záťaž odpovedá výkonu 526 kW. Minimálny tepelný výkon tepelného čerpadla pre ohrev 4,3 m³ vody za hodinu odpovedá 170 kW pri príkone kompresora približne 23 kW. Týmto parametrom, súčasným cenám energií, odhadovanej investícii vo výške 1,5 milióna Kč a porovnaní s ohrevom vody spaľovaním zemného plynu bola stanovená návratnosť necelých 6 mesiacov. Vzhľadom k súčasným cenám energií možno konštatovať, že tepelné čerpadlo v danom prípade predstavuje optimálne riešenie. Je prekvapivé, že zatiaľ žiadna práca na toto téma nevznikla a možno konštatovať, že diplomová práca predkladá zcela unikátne riešenie s vysokým potenciálom nie len v pracovníckom procese.

Kľúčové slová

Odpadové teplo, Tepelné čerpadlo, Tepelná záťaž, Práčovňa,

ABSTRACT

Environmental problems and the recent high rise in energy prices are forcing us to look for more sophisticated and more energy-efficient solutions. As a result, more and more renewable energy sources and waste heat are being used. Sources of waste heat, which have so far remained outside the area of interest, such as waste heat contained in the air of industrial interiors, are thus becoming the subject of interest. This waste heat undoubtedly has huge potential in many industries. The use of waste heat is always complemented by a certain technology. In terms of operating costs and the environment, the heat pump seems to be a perspective solution. The main goal of the presented thesis is to evaluate the application potential of heat pumps for the use of waste heat contained in the air of the interiors of small and medium enterprises. The first part deals with an overview of available technologies for the use of waste heat, introduction to heat pump technology, the issue of heat load of industrial buildings and due to the possibility of using a heat pump for cooling the interior, attention is also paid to hygienic requirements for the quality of the interior. The second part of the work presents a conceptual design of the integration of the heat pump into the selected process – laundry facility. The methodology of the solution consists of the selection and analysis of the process in terms of heat energy, heat pump design, economic analysis, and evaluation of the achieved results. The currently available waste heat in the air of the examined laundry corresponds to 37 kJ and the heat load corresponds to the heat output of 526 kW. The minimum heat output of the heat pump for heating 4.3 m³ of water per hour corresponds to 170 kW at a compressor electrical input of approximately 23 kW. This parameters, current energy prices, an estimated investment of CZK 1.5 million and compared to water heating by natural gas combustion give a payback return in less than 6 months. Given the current energy prices, it can be stated that the heat pump is the optimal solution in this case. It is surprising that no work on this topic has been created yet and it can be stated that the diploma thesis presents a completely unique solution with a high potential not only in the laundry process.

Key words

Waste heat, Heat pump, Heat load, Laundry,

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VALACHOVIČ, Filip. *Potenciál tepelných čerpadel pro využití odpadního tepla v interiérech malých a středních podniků* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140738>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na téma Potenciál tepelných čerpadel pro využití odpadního tepla v interiérech malých a středních podniků vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce doc. Ing. Vítězslav Máša Ph.D., za použitia odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

V Brne 19.5.2022

Filip Valachovič

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval svojmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Vítězslavovi Mášovi Ph.D. za obetavú spoluprácu, cenné rady, trpezlivosť, pripomienky a odborné vedenie počas celej doby riešenia problematiky diplomovej práce.

OBSAH

ÚVOD	13
1 Odpadové teplo	15
1.1 Metódy zhodnocovania odpadového tepla.....	18
1.1.1 Prehľad technologických riešení	19
1.1.2 Odpadové teplo ako potenciálny zdroj elektrickej energie	20
1.1.3 Chladenie odpadovým teplom.....	21
1.2 Tepelné čerpadlá pri zhodnocovaní odpadového tepla.....	21
1.2.1 Teplo z odpadového vzduchu	22
1.2.2 Teplo z odpadovej vody	23
2 Technológia tepelné čerpadiel.....	24
2.1 Základné parametre tepelných čerpadiel	25
2.1.1 Vykurovací faktor COP.....	25
2.1.2 Sezónny vykurovací faktor SCOP	25
2.2 Kompresorové tepelné čerpadlá	26
2.2.1 Kompresory.....	27
2.2.2 Expanzný ventil.....	28
2.2.3 Výparník/Kondenzátor.....	28
2.2.4 Prevedenie tepelného čerpadla	29
2.3 Sorpčné tepelné čerpadlá	29
2.3.1 Absorpčné tepelné čerpadlo	30
2.3.2 Adsorpčné tepelné čerpadlo	31
2.4 Chladivá.....	31
2.5 Riadenie tepelných čerpadiel.....	33
2.5.1 Dvojstavová regulácia (štart/stop systém).....	33
2.5.2 Invertné riadenie	33
2.5.3 Ekvitermná regulácia.....	34
3 Tepelná záťaž.....	35
3.1 Tepelná záťaž vnútorného prostredia	35
3.1.1 Tepelná záťaž klimatizovaných priestorov	36
3.1.2 Tepelná záťaž neklimatizovaných priestorov	38
3.2 Tepelná záťaž vonkajšieho prostredia	38
3.3 Diskusia o tepelnej záťaži v priemysle	39
4 Hygienické požiadavky na kvalitu vnútorných priestorov budov	40
4.1 Faktory vplývajúce na kvalitu vnútorného prostredia	40
4.2 Právne záväzné predpisy v oblasti kvality vnútorného prostredia	41
5 Prípadová štúdia – úvod do problematiky	44
6 Prípadová štúdia I – Priemyselná práčovňa	48
6.1 Základné technické a prevádzkové údaje	48
6.2 Tepelná energia	50
7 Prípadová štúdia II – Integrácia tepelné čerpadla.....	55

7.1	Vymedzenie účelu tepelného čerpadla.....	55
7.2	Prevádzkové parametre	56
7.3	Voľba typu tepelného čerpadla.....	56
7.4	Výpočet tepelného čerpadla	57
8	Technicko – ekonomická rozvaha	64
8.1	Obstarávacie náklady	64
8.2	Prevádzkové náklady	64
8.2.1	Ohrev vody tepelným čerpadlom	65
8.2.2	Prevádzkové náklady pri spaľovaní zemného plynu.....	65
8.3	Potenciálna návratnosť.....	67
9	Zhrnutie a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov	70
	ZÁVER	72
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	73
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK.....	78

ÚVOD

Rozmanitosť potrieb súčasného sveta zvyšuje dopyt po pokroku a vývoji v oblasti moderných technológií. So zvýšenými nárokmi na život idú ruka v ruke zvyšujúce sa energetické nároky a s tým súvisiaca polemika týkajúca sa zabezpečenia dostatočného množstva energetických zdrojov. Zároveň však nikdy v histórii nebol kladený taký dôraz na životné prostredie. Práve za účelom dosiahnutia energetickej udržateľnosti sa stále viac a viac hľadajú spôsoby ako dosiahnuť lacnejších, ekologickejších a efektívnejších priemyslových procesov. Tomu nasvedčuje i skutočnosť, že sa Európska únia zaviazala znížiť spotrebu energie v oblasti energetickej účinnosti o 30 % do roku 2030 v porovnaní s rokom 1990 [1]. Jednou z možností ako tento cieľ dosiahnuť je využívanie obnoviteľných zdrojov energie a zhodnocovanie odpadového tepla. V súčasnosti je možné zaznamenávať značný nárast cien energií, predovšetkým však zemného plynu, ktorého cena, v porovnaní s rokom 2021, je až štvornásobná. Vzhľadom na túto skutočnosť je téma tejto diplomovej práce veľmi aktuálna.

Z hľadiska spotreby energie predstavuje priemyselný sektor približne jednu tretinu celosvetovej energie [2]. Zároveň však bývajú opomenuté práve malé a stredné priemyselné podniky napriek tomu, že sa až z 13 % podieľajú na celosvetovom dopyte po energii [3]. Priemyselný sektor všeobecne usiluje o zvýšenie efektivity svojej energetickej účinnosti. Rekuperácia strát odpadového tepla poskytuje jednu z možností a atraktívnu príležitosť pre nízko emisné a menej nákladné zdroje energie. V prípade odpadového tepla sú technológie ako tepelné čerpadlá, kľúčovými zariadeniami na dekarbonizáciu sektora vykurovania. Tepelné čerpadlo využíva väčšinu tepelnej energie (asi 70–75 %) z okolitého prostredia. Nie len, že je toto nízko potenciálové teplo prakticky zdarma, ale tiež sa cielene nevyrába v žiadnej elektrárni a tým nezaťažuje životné prostredie škodlivinami alebo oxidom uhličitým. Napriek tomu, že k prevádzke tepelného čerpadla je nutno dodať menšie množstvo elektrickej energie, je možné tepelné čerpadlo, v prípade vykurovania, považovať za jedno z najekologickejších riešení.

Cieľom diplomovej práce je posúdenie potenciálu tepelných čerpadiel pre využitie odpadového tepla malých a stredných podnikov priemyselného sektora. Unikátnym predmetom záujmu je práve odpadové teplo obsiahnuté vo vzduchu interiéru priemyselného podniku. Prvá časť práce je venovaná priblíženiu problematiky odpadového tepla so zameraním na možné zdroje a potom i technológie využívajúce sa v tejto oblasti. Ďalej je pozornosť venovaná nevyhnutnej teórii tepelných čerpadiel, kedy sú vysvetlené základné princípy a fungovanie tepelných čerpadiel. V ďalšom kroku je predmetom záujmu tepelná záťaž priemyselných podnikov. Vysvetlená je základná metodika, postup a vplyvy na stanovenie tepelnej záťaže. Záver prvej časti práce je venovaný hygienickým požiadavkám na kvalitu vnútorného prostredia. Predstavené sú základné faktory vplyvajúce na vnútorné prostredie a s tým spojené legislatívne dokumenty.

Druhá polovica práce sa venuje koncepčnému návrhu integrácie tepelného čerpadla do vybraného podniku. Ako prípadová štúdia bude predstavená konkrétna priemyselná pracovňa. Koncepčný návrh tak bude odprevádzaný úvodom do teórie pracovníckeho procesu. Samotný návrh koncepčného riešenia pozostáva zo sledu niekoľkých na seba nadväzujúcich krokov

- Popis a predstavenie základných informácií o zvolenom podniku ako je kapacita, hlavné energetické toky a vybavenie. Súčasťou tohto kroku je tiež analýza tepelnej záťaže vybranej prevádzky a určenie aktuálne dostupného množstva odpadového tepla (kapitola 6).

- Druhým krokom bude otázka spojená s voľbou vhodného tepelného čerpadla a celkovo integrácie tepelného čerpadla do procesu. Dôraz bude kladený na výber a vymedzenie účelu tepelného čerpadla, stanovenie prevádzkových a hlavných parametrov tepelného čerpadla (kapitola 7).
- Tretím krokom bude technicko-ekonomická rozvaha procesu s teoreticky integrovaným tepelným čerpadlom. Cieľom tohto kroku bude stanovenie teoretickej doby návratnosti implementácie TČ do zvolenej prevádzky (kapitola 8).
- Záverečným krokom potom bude zhodnotenie dosiahnutých výsledkov a vo všeobecnosti posúdenie potenciálu aplikácie tepelných čerpadiel do vybraného procesu (viď. kapitola 9).

1 Odpadové teplo

Pojem odpadové teplo predstavuje tepelnú energiu, ktorá sa rozptyľuje v atmosfére bez zmysluplného účelu. Odpadové teplo tiež možno definovať ako sekundárny produkt z činnosti primárneho zdroja a v mnohých prípadoch je tento sekundárny produkt možné ďalej spracovávať či využívať, čím sa môže zefektívniť využitie energie.

Na rozdiel od prírodných zdrojov tepla (slnečné žiarenie, veterná energia, geotermálne zdroje apod.) a umelých zdrojov tepla (jadrové, chemické a elektrické zdroje), možno odpadové teplo považovať za neškodný alebo zvyškový zdroj tepla v dôsledku nedokonalého, prípadne termodynamicky obmedzeného procesu. Medzi hlavné sektory spotreby tepelnej energie sa radia energetika, priemyselné a výrobné procesy, obytné a komerčné budovy, vykurovanie a doprava. Hoci odpadové teplo vzniká v každom prípade, najväčšie zdroje odpadového tepla sa vyskytujú v priemyselnom a výrobnom sektore, energetike a doprave [2]. Nasledujúca tabuľka 1 stručne sumarizuje príklady niektorých zdrojov odpadového tepla a jeho konečného využitia.

Tabuľka 1 Príklady zdrojov odpadového tepla a jeho využitia [4]

Zdroje odpadového tepla	Využitie odpadového tepla
<ul style="list-style-type: none">▪ Spaľovanie:<ul style="list-style-type: none">– Pece na tavenie skla– Pece na spaľovanie odpadu– Spaľovňa výparov– Kotle▪ Spracovanie odpadových plynov:<ul style="list-style-type: none">– Oblúkové pece▪ Chladiaca voda z:<ul style="list-style-type: none">– Kotlov– Kompresorov– Spaľovacích motorov▪ Konduktívne, konvektívne a radiačné straty zo zariadení:<ul style="list-style-type: none">– Práčky– Motory▪ Konduktívne, konvektívne a radiačné straty z produktov:<ul style="list-style-type: none">– Horúci koks	<ul style="list-style-type: none">▪ Predhrievanie spaľovacieho vzduchu▪ Predohrev napájacej vody kotla▪ Generovanie pary pre:<ul style="list-style-type: none">– Vytváranie energie– Mechanickú prácu– Ďalšie využitie v procese▪ Vykurovanie priestorov▪ Predohrev vody▪ Prevod do kvapalných/plynných procesných prúdov

Všeobecne sa odhaduje, že 20 až 30 % priemyselnej energie na vstupe do procesu sa mení na odpadové teplo vo forme horúcich výfukových plynov, chladiacej vody a tepla z horúcich a zohriatych povrchov zariadení a produktov [2].

Z toho dôvodu je takmer nutné hľadať cesty k znižovaniu energetickej náročnosti priemyselných procesov. To sa deje viacmennej dvomi spôsobmi. Prvým spôsobom je samotné znižovanie energie spotrebovanej jednotlivými zariadeniami, ktoré možno dosiahnuť určitou optimalizáciou, riadením, využitím tzv. BAT technológií, zmenou procesov alebo techník výroby produktu. Druhou možnosťou k zlepšeniu celkovej energetickej účinnosti je zachytávanie a opätovné využitie odpadového tepla, a to prostredníctvom technológií na zhodnocovanie odpadového tepla (WHR – waste heat recovery systems). Mnohé priemyselné procesy už v súčasnosti zlepšujú zakomponovaním týchto technológií svoju energetickú produktivitu. V niektorých prípadoch, ako sú napríklad priemyselné pece, môže implementácia WHR technológií

zvýšiť energetickú účinnosť o 10 až 50 % [2]. Rekuperácia tepla však v niektorých prípadoch môže byť z ekonomického hľadiska nevýhodná, v ďalších prípadoch zasa nemusí byť technicky možná. Preto je nutné zdroje odpadového tepla určitým spôsobom identifikovať, a to na základe teplotného rozsahu, množstva a formy nosiča tejto tepelnej energie. Rozdelenie zdrojov odpadového tepla na základe teplotného rozsahu udáva tabuľka 2, ktorá, mimo iné, stanovuje typické využitie tepla v danom teplotnom rozsahu.

Tabuľka 2 Teplotná klasifikácia zdrojov odpadového tepla a typické možnosti zhodnocovania tepla v danom teplotnom rozsahu [4]

Teplotný rozsah	Zdroje odpadového tepla	Teplota [°C]	Typické využitie pre daný rozsah teplôt
Vysoký (>650°C)	Šachtové pece na nikel	1370-1650	Predohrev spaľovacieho vzduchu
	Elektrická oblúčková pec	1370-1650	
	Základná kyslíková pec (BOF)	1200	Generovanie pary pre ohrev alebo pre pece
	Šachtové pece na meď	760-820	Predohrev vsádzok do pec
	Kaliace pece	930-1040	
	Proces výroby vodíku	650-980	Prechod na procesy so stredne nízkou teplotou
	Výpary zo spaľovne	650-1430	
	Sklárska pec	1300-1540	
Stredný (230-650°C)	Koksová pec	650-1000	
	Výfuk parného kotla	260-380	Predohrev spaľovacieho vzduchu
	Výfukové plyny turbín	370-540	Výroba pary/energie
	Výfuky piestových motorov	320-590	
	Pece na povrchovú úpravu materiálov	430-650	ORC pre výrobu energie
	Cementárske pece	450-620	Nízko teplotné procesy
Nízky (<230°C)	Rúry na sušenie a pečenie	230-590	Predohrev vsádzok do pece/napájacej vody
	Spaliny plynových bojlerov	70-260	Vyhrievanie priestorov
	Okruh parného kondenzátu	50-90	Ohrev úžitkovej vody
	Chladiaca voda z:		
	- Dverí pecí	30-50	Zvýšenie teploty tepelnými čerpadlami a následné využitie
	- Žihacích pecí	70-230	
	- Vzduchových kompresorov	30-50	Organický Rankinov Cyklus (ORC)
	- Klimatizačných systémov	30-40	
	- kondenzátorov	30-40	
	Pečenie a sušiacie pece	90-230	
Kvapaliny/pevné látky spracované za tepla	30-230		

Ako už tabuľka 2 naznačuje, využitie odpadového tepla zahŕňa výrobu hodnotnejších foriem energie, predohrev spaľovacieho vzduchu, predohrev vsádzok do pecí, predohrev napájacej vody, priame využitie tepla pre stredne a nízko teplotné procesy, absorpčné/adsorpčné chladenie, ohrev úžitkovej vody pre diaľkové vykurovanie, vykurovanie priestorov a mnoho ďalších.

Zdroje odpadového tepla s vysokým teplotným rozsahom sa vyznačujú vysoko kvalitnou tepelnou energiou vhodnou pre širokú škálu využitia s rôznymi požiadavkami na teplotu. Prirodzene sa tieto zdroje nachádzajú napríklad v oceliarskom alebo cementárskom priemysle, v spaľovniach odpadov a podobne [5]. Typickým znakom je tiež vysoká účinnosť výroby energie a vysoká rýchlosť prenosu tepla na jednotku plochy. Na druhú stranu, vysoká teplota môže predstavovať i negatívum v zmysle zvýšenej chemickej aktivity, prípadne korózie alebo vyššieho teplotného namáhania materiálov tepelných výmenníkov. Z tohto hľadiska sa zdroje so stredným teplotným rozsahom vyznačujú vyššou kompatibilitou s materiálmi tepelných výmenníkov, a tým sa stávajú i praktickými pre generovanie energie, i keď s nižšou účinnosťou. Pre stredný teplotný rozsah je zdroj tepla možno nájsť napríklad v automobilovom, sklárskom či energetickom priemysle [5]. Najpočetnejšie zdroje odpadového tepla sú zastúpené práve zdrojmi s nízkym teplotným rozsahom, čo do určitej miery predstavuje pozitívum. Nachádzajú sa takmer v každom odvetví, napríklad petrochemický, potravinársky, textilný priemysel a mnoho ďalších [5]. Prúdy odpadového tepla ukázali, že približne až 60 % nezhodnoteného odpadového tepla sa nachádza v nízkom teplotnom rozsahu [2]. Nevýhodou tejto skupiny je najmä nízka účinnosť v prípade výroby energie a menej konečného využitia tohto nízko potenciálového tepla [4].

Metódy WHR zahŕňajú proces výmeny tepla medzi plynmi a, alebo kvapalinami. Zhodnocovanie odpadového tepla je možné v rámci lokálneho opätovného využitia tepla, ktorého príkladom môže byť použitie výfukových plynov zo spaľovania odpadu na predohrev spaľovacieho vzduchu [2], alebo teplo môže byť prevedené do iného procesu, napríklad odpadové teplo z cementárni sa ďalej bežne využíva pri výrobe sadrokartónu. Tieto metódy môžu značne znížiť spotrebu fosílnych palív a s tým spojené prevádzkové náklady a emisie znečisťujúcich látok. Zaradením WHR systémov do procesu je tiež možná úspora počiatočných nákladov. Napríklad v prípade odpadových plynov zo spaľovania používaných na ohrev vzduchu v budove. Mimo redukcie množstva zakúpených palív môže odpadové teplo potenciálne eliminovať potrebu dodatočného zariadenia na vykurovanie priestorov, čím sa znížia ako počiatočné, tak aj prevádzkové náklady [2].

Nanešťastie realizovateľnosť, respektíve implementácia WHR systémov do stávajúceho procesu nemusí byť, ako je už spomenuté vyššie, vždy možná alebo vhodná. Napríklad, v prípade kedy sa jedná o proces charakteristický značným množstvom odpadového tepla, kedy sa množstvo tepla považuje za významný faktor, je nutné brať v úvahu i kvalitu tohto tepla. Kvalita odpadového tepla je zvyčajne diktovaná jeho teplotou. V praxi to značí, že čím vyššia teplota, tým vyššia kvalita odpadového tepla a jednoduchšia optimalizácia procesu spätného získavania odpadového tepla. Je preto dôležité stanoviť maximálne množstvo vyťažiteľného tepla s najvyšším potenciálom z procesu a zabezpečiť dosiahnutie maximálnej účinnosti zo systému spätného získavania odpadového tepla.

Napriek tomu, že teplota predstavuje kľúčový faktor pri určovaní realizovateľnosti WHR, nie je ani zďaleka jediným dôležitým parametrom. Pri implementácii WHR systému sa jedná o kombináciu mnohých rôznych faktorov. Medzi tieto faktory, ktoré priamo ovplyvňujú realizovateľnosť, mimo iné, patrí:

- množstvo a teplota odpadového tepla;
- prietok tekutiny;
- chemické zloženie odpadového prúdu;
- vlastnosti odpadového prúdu (hmotnostný prietok, tepelná vodivosť, merná tepelná kapacita apod.);
- prípustná tlaková strata;
- účinnosť premeny tepelnej energie zo zdroja tepla;
- fyzické rozmery, hlučnosť, životnosť;
- obstarávacia cena, prípadne návratnosť investície (ROI);

Množstvo, respektíve tepelný obsah je mierou toho, koľko energie je obsiahnuté v prúde odpadového tepla, zatiaľ čo kvalita je mierou užitočnosti odpadového tepla. Množstvo odpadového tepla obsiahnutého v odpadovom toku je funkciou teploty a hmotnostného prietoku prúdu. Množstvo tepelnej energie, respektíve tepelný tok je možné stanoviť na základe bilančnej rovnice tepla:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot h(t) \quad (1.1)$$

kde, \dot{Q} je tepelný tok [W]

\dot{m} je hmotnostný prietok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_p je merná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ΔT je rozdiel teplôt [K]

$h(t)$ špecifická entalpia v závislosti na teplote [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Zmienené faktory charakterizujú odpadové toky respektíve, odpadové teplo vo vyšetrovanom procese. V závislosti od týchto faktorov sa pristupuje k posúdeniu možnosti zhodnotenia tohto odpadového tepla, teda metód jeho využitia. Na základe požadovaného účelu je volená konkrétna technológia zhodnocovania odpadového tepla. Ďalšie časti tejto kapitoly stručne popisujú metódy a vybrané technológie zhodnotenia odpadového tepla. Samostatná podkapitola je tiež venovaná výhradne prípadom využitia odpadového tepla práve za použitia tepelných čerpadiel.

1.1 Metódy zhodnocovania odpadového tepla

V súčasnosti existuje mnoho rôznych technológií rekuperácie tepla, ktoré sa používajú na zachytávanie a opätovné zhodnocovanie odpadového tepla. Zhodnotenie tepla môže byť v zásade v troch základných podobách. A síce, teplo môže byť využité pre výrobu energie, chladenie alebo pre priame využitie v podobe ohrevu či vykurovania. V závislosti od povahy odpadového tepla, cieľového využitia, teplotného rozsahu a vyššie uvedených faktorov sú volené konkrétne technológie či samotné systémy. Tieto jednotky obsahujú bežne systémy spätného získavania odpadového tepla, ako napríklad regeneračné a rekuperačné horáky, ekonomizéry, predhrievače vzduchu (rekuperačné, regeneračné), výparníky, kondenzátory, doskové výmenníky, plášťové výmenníky so segmentovanými prepážkami, parné generátory s rekuperáciou tepla, termodynamické cykly (ORC, Kalinov cyklus), tepelné čerpadlá a podobne. Z uvedených príkladov plyní, že mnohé tieto technológie pozostávajú najmä z výmenníkov tepla rôznych druhov či kategórií, ktoré slúžia pre zachytávanie a spracúvanie priemyselného odpadového tepla pre účely, už spomínaného vykurovania a chladenia. Stručný popis a sumarizácia vybraných WHR technológií je predmetom nasledujúceho textu práce.

1.1.1 Prehľad technologických riešení

Ekonomizéry

- Ekonomizéry predstavujú skupinu výmenníkov tepla, ktoré sa zväčša používajú pre ohrev kvapalín. Systém pozostáva z rebrovaných rúrok, tak aby sa maximalizovala povrchová plocha absorpcie tepla a rýchlosť prestupu tepla [6].
- Typickým príkladom je predohrev napájacej vody kotla, pri ktorom ekonomizér predáva teplo z horúcich spalín do vody vstupujúcej do kotla. Ekonomizéry tak využívajú odpadové teplo a zvyšujú účinnosť celého systému práve predhrievaním pracovnej kvapaliny systému. Podľa [7] môže použitie ekonomizéru znížiť spotrebu paliva o 5 až 10 % a zároveň pokryje svoje investičné náklady za menej ako 2 roky.
- Systém môže vyžadovať odolnejšie materiály, aby sa predchádzalo usadzovaniu kondenzátu, čo vedie k nárastu investičných nákladov.
- Teplotný rozsah: nízky, stredný.

Kotle na odpadové teplo (HRSG)

- Kotle tohto druhu pozostávajú z niekoľkých paralelne umiestnených trubiek z vodou a v smere tepla vystupujú zo systému. Určené sú pre výrobu pary, ktorá sa následne využiteľná pre výrobu energie (napríklad využitím ORC) alebo táto para smeruje späť so systémom. Kotle sú často spojené do väčších celkov spojením s inými zariadeniami, ako sú prídavné horáky, predhrievače, výparníky. Práve spojením kotla, ekonomizéru a výparníka sa získava ucelený systém v podobe parného generátora s rekuperáciou tepla (HRSG), ktorý je využívaný najmä v elektrárnach alebo spaľovniach odpadu.
- Systém vyžaduje na fungovanie niekoľko komponentov a môže vyžadovať dodatočný zdroj tepla, ako napríklad horák na zlepšenie kvality získaného odpadového tepla. Nevýhodou tiež môže byť fakt, že systémy tohto druhu sú zväčša veľmi objemné a vyžadujú si výstavbu na mieste.
- Teplotný rozsah: stredný, vysoký.

Rekuperátory [6]

- Uplatnenie sa nachádza v znížení spotreby energie predohrevom vstupného vzduchu do systému.
- Zvýšenie účinnosti prenosu tepla môže vyžadovať komplikovanejší návrh, respektíve návrh na mieru konkrétneho zariadenia.
- Teplotný rozsah: nízky až vysoký.

Regenerátory [6]

- Tieto zariadenia sú využívané najmä pre odpadové teplo vysokého teplotného rozsahu, ako napríklad z pecí spaľovní odpadu a pre aplikácie charakteristické znečistenými výfukovými plynmi. Rovnako, ako v prípade rekuperátorov, využívajú sa najmä pre predohrev spaľovacieho vzduchu.
- V mnohých aplikáciách s nízkym a stredným rozsahom teplôt sú využívané regenerátory rotačného typu. Výhoda spočíva vo vysokej účinnosti.
- Systémy sú typické svojimi veľkými fyzickými rozmermi, čo priamo súvisí s relatívne vysokými investičnými nákladmi.
- Teplotný rozsah: stredný až vysoký.

Pracovný okruh „run around coil (RAC)“ [6]

- Vyžitie je možno nájsť v prípadoch, kedy sú zdroje tepla príliš ďaleko od seba a kde nie je možné využiť priameho rekuperátora. Rovnako tak sú tieto jednotky vhodné v prípadoch, kedy sa chceme vyhnúť kontaminácii dvoch prúdov.
- Značným obmedzením či nevýhodou je nízka účinnosť a tiež potreba dodatočných zariadení ako sú čerpadlá, ktoré vyžadujú energiu a údržbu pre svoj chod.
- Teplotný rozsah: stredný až vysoký.

Doskové výmenníky tepla (DVT)

- DVT sa radí do skupiny tzv. kompaktných výmenníkov tepla, pričom sa jedná o veľmi široké pole pôsobnosti a aplikácie v rôznych procesoch. Na druhú stranu DVT sú skôr vhodné pre „čisté“ aplikácie, kde nehrozí zanášanie a sú relatívne nízke prevádzkové tlaky.
- Všeobecne sa rozoznávajú 4 základné kategórie DVT [8]:
 - Doskové výmenníky s hladkými doskami
 - Špirálovité doskové výmenníky
 - Doskové výmenníky s profilovanými doskami
 - Špeciálne typy DVT
- Nesmiernou výhodou DVT je najmä ich rozmerová flexibilita, nízke tlakové straty, jednoduché čistenie a údržba (neplatí pre zvarované a spájkované DVT, tam sa jedná o nerozoberateľné výmenníky a čistenie je možné len chemicky).
- Teplotný rozsah: stredný až vysoký.

Tepelná trubica (z *angl. heat pipes systems*)

- Tieto zariadenia sú schopné prenášať teplo z jedného miesta na druhé pomocou kondenzácie a odparovania pracovnej látky (voda, acetón, amoniak a pod.). Tepelnú trubicu možno fiktívne rozdeliť na časť výparníka, časť adiabatckej dopravy a časť kondenzátora. Princíp spočíva vo vyparovaní pracovnej látky vplyvom dodaného tepla. V dôsledku toho sa vytvára tlak pary, ktorý poháňa paru cez adiabatckú sekciu na druhý koniec potrubia [6].
- Systémy tepelných potrubí sa vyznačujú vysokou tepelnou vodivosťou, čoho dôsledkom je minimálny pokles teploty transportovaného tepla na väčšie vzdialenosti.

V skutočnosti je technológií pre zhodnotenie odpadového tepla celá rada. Vo väčšine prípadoch sa však jedná o výmenníky tepla rôznej veľkosti, tvaru, funkcie či prevedenia. Všeobecne je tak týchto technológií skutočne mnoho a ich použitie, respektíve implementácia do vybraného procesu závisí od mnohých faktorov ako je napríklad typ procesu, charakteristika (množstvo, skupenstvo, teplota) odpadových prúdov, účel implementácie a ďalšie. Nasadenie technológií zhodnocovania odpadového tepla do procesu vybranej prevádzky sa tak líši prípad od prípadu.

1.1.2 Odpadové teplo ako potenciálny zdroj elektrickej energie

Spôsobov využitia odpadového tepla pre generovanie elektriny je hneď niekoľko. V literatúre najčastejšie zmieňované technológie sú nasledovné:

- organický Rankinov cyklus (ORC);
- kalinov cyklus (KC);
- termoelektrický generátor (TEG);
- termofotovoltaický generátor (TFG);
- výroba elektriny založená na piezoelektrickom efekte;

Najpočetnejším, respektíve najrozšírenejším spôsobom v prípade vysokých teplôt je výroba elektriny termodynamickými cyklami (ORC, KC). Princíp výroby elektriny pomocou termodynamických cyklov spočíva v premene odpadového tepla (vo forme prúdu) prv na mechanickú prácu a až následne dochádza k výrobe elektriny. Elektrická účinnosť ORC sa bežne pohybuje v rozmedzí 15 až 20 % na svorkách generátoru [9]. Rozdiel ORC a KC spočíva najmä v použití pracovnej látky, kedy v prípade KC sa jedná o zeotropickú zmes (zvyčajne čpavok a voda), ktorá je charakteristická rôznymi bodmi varu. Tento fakt zapríčiňuje zvýšenú účinnosť cyklu [6].

Ostatné spomenuté technológie pracujú s tzv. priamym spôsobom výroby elektriny, kde nedochádza k premene na mechanickú prácu. Všeobecne sa však tieto technológie používajú pre nižšie výkony. Termoelektrické generátory fungujú na princípe Seebeckovho termoelektrického javu, ktorý popisuje vznik napätia v obvode zloženom z dvoch rôznych polovodičov (líšiacich sa svojou vodivosťou) vystavených teplotnému rozdielu. Typická účinnosť TEG sa pohybuje v rozmedzí 2 až 5 %. Kvôli nízkej účinnosti prechádza väčšia časť tepla naprieč modulom bez úžitku. Z toho dôvodu sa TEG často používa v tzv. parazitnej konfigurácii, t.j. ako tepelný výmenník/generátor elektriny.

Termofotovoltaické generátory využívajú k výrobe elektriny radiačné teplo. Výhodou je lepšia účinnosť v porovnaní s inými zariadeniami na priamu elektrickú premenu. Negatívom však je obmedzený rozsah prevádzkových teplôt a fakt, že so zvyšujúcou teplotou účinnosť klesá [6].

1.1.3 Chladienie odpadovým teplom

Spolu s globálnym otepľovaním sa postupne zvyšuje dopyt po možných riešeniach chladienia či už domácností alebo podnikov. Spotrebiteľia často krát volia tú najjednoduchšiu variantu, ktorú predstavuje klimatizačná jednotka. Mimo iné spôsoby spomenuté vyššie, odpadové teplo rovnako tak ponúka možnosť využitia pre prípady chladienia. V súčasnosti sú pre tieto aplikácie známe predovšetkým dve možné technológie, a síce adsorpčné a absorpčné chladienie. Pre výrobu chladu by potenciálne mohlo byť využité i tepelné čerpadlo, keďže systémy absorpčného a adsorpčného chladienia pracujú na podobných princípoch.

Ako už názov napovedá, systémy sú založené na fyzikálnych dejoch absorpcie a adsorpcie. V prípade absorpcie to znamená rozpúšťanie plynnej látky v kvapaline. Systém absorpčnej jednotky pracuje podobne ako tepelné čerpadlo, kde dochádza k odparovaniu chladiva vplyvom dodaného (odpadového) tepla. Chladivo potom skondenzuje a skvapalnené je potom rozstrekované vo výparníku, kde odoberá teplo chladenej vode, takto ochladená voda je ďalej využívaná pre účely chladienia. Adsorpčná varianta pracuje na podobnom princípe, teplo sa rovnako tak spätne využije pre tepelnú kompresiu chladiva, avšak systém je založený na schopnosti molekúl vody lepšie vytvárať väzby s určitou hygroskopickou soľou než s ostatnými molekulami vody. [10]

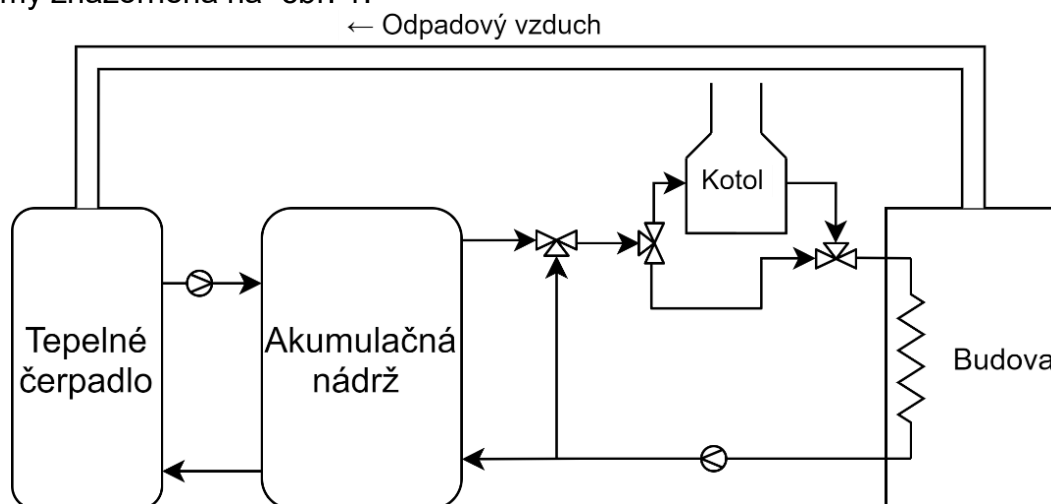
1.2 Tepelné čerpadlá pri zhodnocovaní odpadového tepla

S výnimkou priameho využitia odpadového tepla prostredníctvom technológií uvedených v kapitole 1.1.2 a ďalších, zhodnocovanie odpadového tepla všeobecne zahŕňa najmä tri typy. A síce tak dochádza k premene odpadového tepla na elektrickú energiu, výroba chladu odpadovým teplom alebo konverzia odpadového tepla na výstup užitočného tepla pomocou tepelného čerpadla (TČ). Pre zmysluplné využitie, respektíve pre dosiahnutie požadovanej účinnosti spätného získavania odpadového tepla je častokrát požadovaná vyššia teplota, ktorá v rade procesov absentuje a v priemyselnom sektore dominuje skôr teplota nízka. Často sú pre tieto účely

využívané práve tepelné čerpadlá, ktorých primárnou funkciou je dosiahnutie vyššej kvality – teploty odpadového tepla. Následne je toto teplo o vyššej teplote ďalej využívané pre rôzne účely. Implementáciou tepelných čerpadiel do stávajúcej alebo celkom novej prevádzky dochádza, pri správnom spracovaní, k hospodárnejšej prevádzke a úsporám na energiách. Pozitívom je tiež ekologická stránka veci, kedy sa využitím tohto, inak nevyužitého odpadového prúdu, zamedzuje alebo prinajmenšom redukuje množstvo emisií spôsobeným napríklad spaľovaním fosílnych palív. Možné úspory spojené so začlenením TČ do prevádzky a návratnosť investície do rekuperačného systému silno závisí od rozdielu teplôt zdroja odpadového tepla a konečnej teploty média. Čím je rozdiel týchto teplôt nižší, tým TČ rekuperuje energiu lacnejšie. Ďalším významným faktorom je tiež dĺžka prevádzky rekuperačného systému. V prípadoch, kedy je rekuperácia v prevádzke neustále, príkladom môže byť ohrev vody v trojzmenných či nepretržitých prevádzkach, sa návratnosť pohybuje v radoch mesiacov [11]. Ako už tabuľka 1 a tabuľka 2 naznačuje, odpadové teplo je možné získavať z rôznych zdrojov, medzi ktoré, mimo vyššie uvedených, je možno radiť i odpadový a vetrací vzduch, odpadové priemyselne vody a mnoho ďalších.

1.2.1 Teplo z odpadového vzduchu

Pojem odpadový vzduch predstavuje celkom široký okruh možností. Pod týmto pojmom si možno predstaviť mnoho aplikácií. Príkladom tak môže byť vetrací vzduch z riadeného vetrania, odpadový vzduch z technologických procesov alebo všeobecne vzduch z priestorov charakteristickými veľkou tepelnou záťažou (napríklad serverové miestnosti, pracovne, pekáre a podobne). Čo sa technického riešenia získavania tepla týka, tak prvotnou úlohou je zabezpečenie vhodného, dostatočne efektívneho odberu tepla. Za ideálnych podmienok je odber tepla zaistený umiestnením výparníka priamo do priestoru s odpadným teplom. V prípade, že tento spôsob z rôznych dôvodov nie je možný, naskytá sa varianta, kedy je výparník umiestnený v centrálnych vzduchotechnických jednotkách. Ďalšou možnosťou je prívod odpadového vzduchu prostredníctvom potrubia a ventilátorov priamo k výparníku. Posledná možnosť a principiálna implementácia tepelného čerpadla do takého procesu je v podobe schémy znázornená na obr. 1.



Obr. 1 Implementácia tepelného čerpadla pre využitie odpadového vzduchu (prevzaté a upravené z [12])

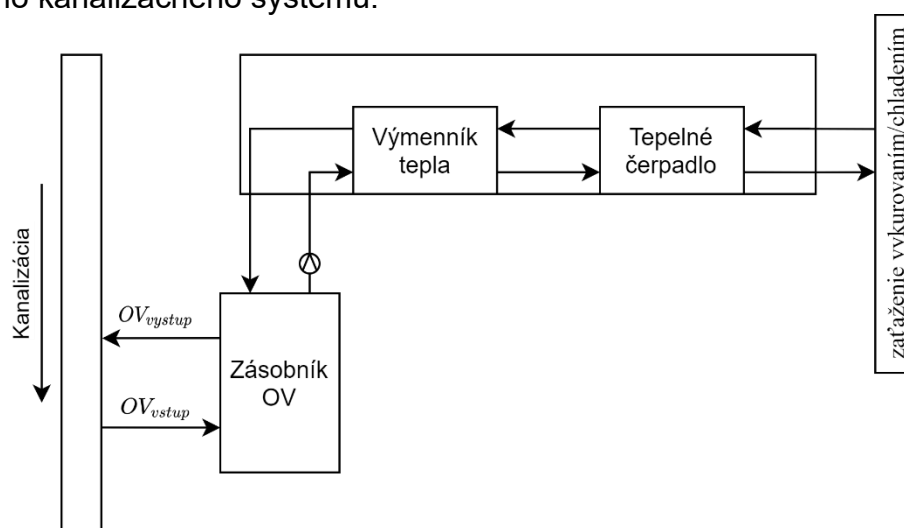
Schéma na obr. 1 zobrazuje možné využitie TČ pre zhodnotenie odpadového vzduchu z budovy. Vzduch je z budovy odťahovaný ventilátormi inštalovanými v zberných vzduchovodoch. Vzduch pred vypúšťaním do atmosféry prechádza výparníkom, kde

odovzdáva svoje teplo. Toto teplo prúdi okruhom tepelného čerpadla, čím dochádza k zvýšeniu jeho teploty a ďalej slúži pre ohrev vykurovacieho média v systéme (ohrieva vodu v akumuláčnej nádrži). Ohrevné médium v akumuláčnej nádrži ďalej bežne slúži pre vykurovacie účely, teda je dopravované do radiátorov pomocou obehového čerpadla. Pre prípad, kedy je teplota vody v akumuláčnej nádrži príliš nízka, dohrieva sa prídavným, dodatočným zdrojom tepla (v tomto prípade kotlom). Na druhú stranu, ak je teplota vody príliš vysoká, zníži sa pomocou trojcestného ventilu. Daný spôsob zapojenia TČ, kotla a vykurovacieho systému v mnohých prípadoch umožňuje implementovať tepelné čerpadlo v existujúcej prevádzke [12].

1.2.2 Teplo z odpadovej vody

Možných zdrojov odpadovej vody je hneď niekoľko, môže sa tak jednať o vodu s priemyselných procesov, z chladiacich technológií, splašková voda z obytných priestorov a podobne. Podmienkou však je, aby táto odpadová voda bola z technologických dôvodov prečerpávaná. V závislosti od povahy, respektíve čistoty vody sa volia vhodné typy výmenníkov. Príkladom je tak doskový výmenník, ktorý má v tejto oblasti značné zastúpenie, avšak len v prípade čistých odpadových vôd. V prípade splaškových alebo značne znečistených odpadných vôd sa využívajú špeciálne výmenníky. Odber tepla je tiež možný prestupom tepla cez stenu kanalizačného potrubia, kedy sa využíva vopred upravených potrubí. V praxi nastávajú i prípady, kedy je dodávka odpadovej vody len nárazová, v tom prípade je vhodné inštalovať doplnkové zásobníky odpadovej vody, ktoré zabezpečia rozloženie rekuperácie odpadného tepla do dlhšieho časového úseku. Pokiaľ sú samotné odpadové vody charakteristické vysokou teplotou (nad 25°C), doporučuje sa voľba viacstupňovej rekuperácie, kedy sa v prvej fáze odoberie teplo len pomocou výmenníku tepla a až v druhej fáze prichádza na rad tepelné čerpadlo.

Príklad implementácie tepelného čerpadla do kanalizačného systému so zameraním na využitie odpadovej vody je znázornený na obr. 2. Časť odpadovej vody preteká do zásobníka odpadovej vody (OV) cez sitá, aby sa zachytili pevné častice. Táto voda zbavená nečistôt sa potom čerpá do externého výmenníka tepla nad zemou, ktorý je ďalej pripojený k výparníku tepelného čerpadla. Veľkou výhodou tohto systému je jeho nezávislosť od kanalizácie, kedy sa vyžaduje len minimálny zásah do stávajúceho kanalizačného systému.



Obr. 2 Implementácia tepelného čerpadla pre využitie tepla z odpadovej vody (prevzaté a upravené z [13])

2 Technológia tepelné čerpadiel

Tepelné čerpadlo ako také nachádza uplatnenie najmä v prípade ohrevu teplej úžitkovej vody alebo pre vytápanie budov či priestorov. Prípadne môže tepelné čerpadlo slúžiť i pre výrobu chladu. Uplatnenie a záujem o tepelné čerpadlá sa za poslednú dekádu stále zvyšuje. Dôvodom je predovšetkým hospodárnejšie nakladanie s energiami a tiež ekologická povaha zariadenia, kedy sa okrem menšieho množstva elektrickej energie využíva predovšetkým nízko potenciálové teplo, ktoré je tiež obnoviteľným a teda predstavuje ekologický zdroj energie.

Prvé, základné princípy tejto technológie formuloval už v roku 1852 lord Kelvin (William Thomson) v svojom druhom zákone termodynamiky tak, že „reverzne fungujúceho tepelného motoru je možné využiť nie len k chladeniu, ale i k ohrevu“. Prvé tepelné čerpadlá však uzreli svetlo sveta približne 75 rokov neskôr. Medzi priekopníkmi sa radí aj slovenský rodák, inžinier Aurel Stodola, ktorý ako prvý v roku 1928 skonštruoval prvé tepelné čerpadlo s uzavretou slučkou na svete [14].

Tepelné čerpadlo pracuje podobne ako čerpadlo klasické – vodné, ktoré prečerpáva vodu o nízkej hladine na miesto o hladine vyššej. Podobne tak pracuje i čerpadlo tepelné, ktoré extrahuje teplo z okolia o nižšej teplote na vyššiu teplotnú hladinu. Pojem tepelné čerpadlo všeobecne popisuje zariadenie, ktoré dokáže využívať teplo nízkej teploty obsiahnuté napríklad vo vode, vzduchu alebo v zemi a bežnými spôsobmi je toto teplo nevyužiteľné. Respektíve, pomocou ľavotočivého Carnotovho kruhového obehu, technicky realizovaného ako tepelné čerpadlo je možné transformovať časť energie, t.j. energie z okolia na teplo o vyššej teplote pre ďalšie využitie [15]. Na rozdiel od všetkých termodynamických transformačných obehov, pri ktorých je teplo dodávané za účelom dosiahnutia mechanickej práce, bežia tieto obehy obrátene. A teda, prívodom mechanickej práce a nízko potenciálového tepla dostávame tepelnú energiu s vyšším obsahom exergie. Niekedy však ani túto vysokohodnotnú energiu nepotrebujeme a potrebné „stlačenie“ je prevedené miesto kompresoru sorpčnými reakciami [15].

Tepelné čerpadlá je možno klasifikovať na základe rôznych charakteristických vlastností, pričom základné rozdelenie spočíva v type ich pracovného cyklu čo priamo súvisí s povahou tekutín, ktoré využívajú. Na základe toho sa rozlišujú kompresorové čerpadlá a, v praxi menej časté, absorpčné tepelné čerpadlá. Ďalšie rozdelenie tepelných čerpadiel podľa [16] je nasledovné:

- Podľa pohonu tepelného čerpadla:
 - kompresorové s piestovým kompresorom;
 - kompresorové s rotačným kompresorom;
 - kompresorové so skrutkovým kompresorom;
 - turbokompresorové;
 - sorpčné (absorpčné a adsorpčné);
- Podľa druhu pohonnej energie:
 - s elektrickým pohonom (elektromotor)
 - s motorom spaľujúcim kvapalné palivá (spaľovacie motory)
- Podľa zdrojov tepla:
 - vzduch – vzduch;
 - voda – voda;
 - vzduch – voda;
 - zem – voda;

2.1 Základné parametre tepelných čerpadiel

Pred popisom konkrétnych typov TČ je nutné zadefinovať určité základné parametre, na základe ktorých je možné čerpadlá porovnávať, rozlišovať či vyberať. Medzi hlavné parametre patrí tzv. vykurovací faktor.

2.1.1 Vykurovací faktor COP

Vykurovací faktor alebo COP (Coefficient of Performance) je spomedzi základných parametrov TČ azda najdôležitejším. Mimo iné, preto, že je ukazovateľom účinnosti samotného tepelného čerpadla. Jedná sa o bezrozmerné číslo definované ako pomer vyrobeného tepla (energie) a dodanej mechanickej práce.

$$COP = \frac{Q_{T\check{c}}}{P_{T\check{c}}} \quad [-] \quad (2.1)$$

kde, $Q_{T\check{c}}$ je vykurovací výkon tepelného čerpadla [W]

$P_{T\check{c}}$ je elektrický príkon kompresoru [W]

Zo vzťahu daný rovnicou 2.1 plynie, že čím je hodnota COP vyššia, tým je účinnosť TČ efektívnejšia a prevádzka tak lacnejšia. Hodnota vykurovacieho faktoru 4 teda vypovedá, že pri dodaní 1 kW elektrickej energie tepelné čerpadlo vyprodukuje 4 kW tepelnej energie. Bežne sa hodnota COP pohybuje v rozmedzí 2,5 – 4,5 [16]. Na druhú stranu sa jedná o aktuálnu hodnotu, teda hodnota COP sa v čase neustále mení na základe prevádzkových podmienok. Z toho dôvodu sa pre celkové hodnotenie skôr využíva priemerný sezónny vykurovací faktor SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance).

2.1.2 Sezónny vykurovací faktor SCOP

Vykurovací faktor SCOP predstavuje priemernú hodnotu COP za celú vykurovaciu sezónu (využíva viacerých vykurovacích faktorov COP). Jeho hodnota sa stanovuje na základe experimentálnych dát z testovania tepelných čerpadiel a dát klimatických. Principiálne sa jedná o postup kedy sa v skúšobni stanoví COP pri danej teplote, následne sa z klimatických dát zistí koľko hodín ročne je táto teplota dosahovaná a nakoniec sa dopočíta spotrebovaná a vyrobená energia. Hodnoty SCOP sú síce reálne hodnoty, no ich dosiahnutie je len za určitých okolností. Vypočítaný SCOP sa používa pre klasifikáciu tepelných čerpadiel do tried energetickej účinnosti pri ich štítkovaní. Priemerný skutočne nameraný sezónny vykurovací faktor sa potom značí ako SPF (Seasonal Performace Factor) [17], [18].

Vykurovací faktor všeobecne pozitívne ovplyvňujú najmä 4 faktory, a síce [16]:

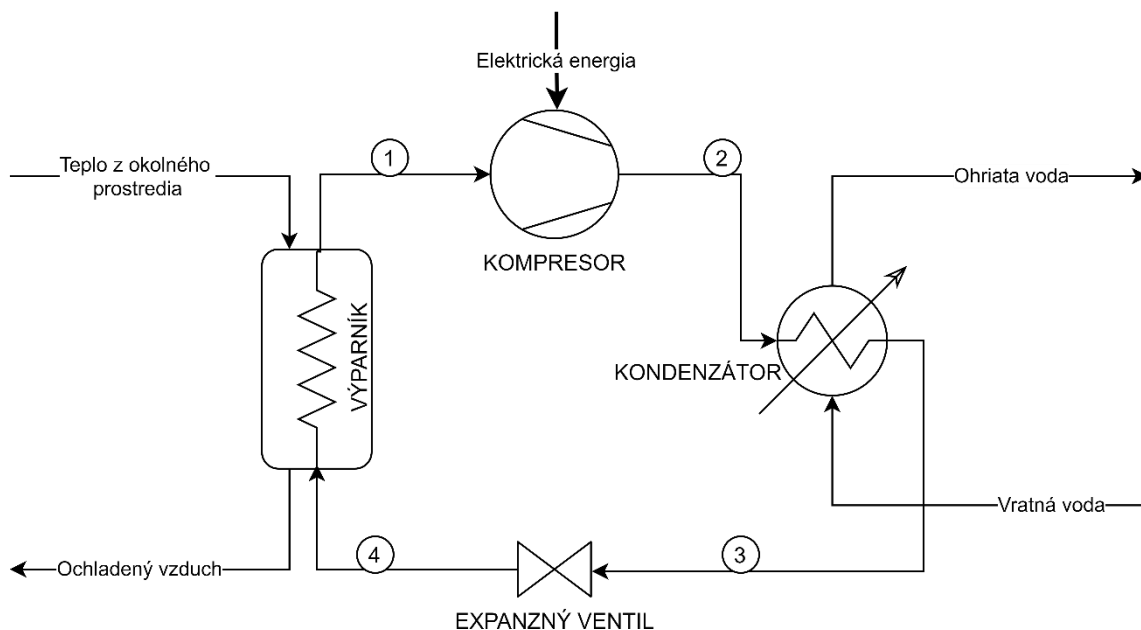
- čo možno najvyššia teplota nízko teplotného zdroja tepla;
- čo možno najnižšia teplota teplotonosnej látky (väčšinou voda);
- vhodné fyzikálne a chemické podmienky chladiva – počas prevádzky sú tieto parametre nemenné, závisí tak len na voľbe chladiva pred uvedením TČ do prevádzky;
- Dobré konštrukčné prevedenie TČ (rovnako ako pri chladive, závisí na výrobcovi);

2.2 Kompresorové tepelné čerpadlá

Činnosť kompresorového tepelného čerpadla spočíva v princípe cyklickej zmeny skupenstva pracovnej látky – chladiva, ktorá prebieha v uzavretom pracovnom okruhu. Kompresorové tepelné čerpadlo pracuje podľa princípu obráteného Carnotovho cyklu (ľavotočivý obeh). Jedná sa tak o premenu, respektíve odparenie chladiva na paru a kondenzáciu tejto pary späť na kvapalinu. Kompresorové tepelné čerpadlá pozostávajú zo štyroch hlavných častí:

- kompresor;
- expanzný ventil;
- kondenzátor;
- výparník;

Ohrev média tepelným čerpadlom spočíva všeobecne v štyroch krokoch, a síce tak možno hovoriť o vyparovaní, kompresii, kondenzácii a expanzii. V prvom kroku je teplo z okolitého prostredia (napríklad vzduchu) predávané pracovnej látke (chladivu) vo výparníku, čím dochádza k odpareniu chladiva. Takto vzniknutá para pokračuje ďalej ku kompresoru, ktorý pary nasaje a stlačí na vyšší tlak čím vzrastie ich teplota. Prehriata para potom putuje do kondenzátora, kde predá svoje teplo teplotonosnej látke (napríklad vode či vzduchu). Ochladená a skvapalnená pracovná látka následne prechádza expanzným ventilom, kde dochádza k zníženiu tlaku, čím značne klesne teplota chladiva, ktoré potom putuje opäť do výparníku a celý proces opakuje. Schéma kompresorového TČ je znázornené nižšie na obr. 3, kde možno vidieť princíp TČ s vodou ako ohrevným médium.



Obr. 3 Schéma kompresorového tepelného čerpadla

Obr. 3, mimo princípu tepelného čerpadla ako takého, znázorňuje i vnútorný obeh chladiva (označené prúdy číslami 1 až 4). Pričom každá vetva obsahuje chladivo o rôznom stave:

- 1 – sýta para, chladivo o nízkom tlaku a zvýšenej teplote chladiva;
- 2 – prehriata para, chladivo o vysokom tlaku a maximálnej teplote;
- 3 – sýta kvapalina, chladivo o vysokom tlaku a strednej teplote;
- 4 – mokrá para, chladivo o nízkom tlaku a minimálnej teplote;

2.2.1 Kompresory

Kompresor možno považovať za základný prvok TČ, ktorý zabezpečuje kolobeh chladiva. V kompresore dochádza ku zvýšeniu tlaku odpareného chladiva z tlaku odpovedajúceho výparnej teplote chladiva na tlak odpovedajúci teplote kondenzačnej. Úlohou kompresoru tak je vyvinúť a udržať požadovaný tlak medzi výparníkom a kondenzátorom. Kompresor je zväčša poháňaný elektromotorom, elektrická energia sa po odčítaní strát kompresoru ukladá v podobe tepla do chladiva. Aby sa predišlo úniku tohto tepla do okolia sú kompresory spoločne s elektromotorom uložené v hermeticky uzavretej nádobe. To však neplatí v prípade väčších zariadení, kedy sa motor od kompresoru oddeľuje prevodom. Tepelné straty motoru sa potom nepodieľajú na vnútornom obehu chladiva.

Pre tepelné čerpadlá sa v drvivej väčšine využívajú kompresory objemové, najmä skrutkové a špirálové (Scroll) kompresory (viď. obr. 4), prípadne i piestové [19]. Piestové kompresory predstavujú lacnejšiu variantu no na druhú stranu sú hlučnejšie, charakteristické nižším vykurovacím faktorom. Životnosť piestových kompresorov sa pohybuje okolo 15 rokov [20]. V súčasnosti sú skôr využívané objemové kompresory rotačné – špirálové (Scroll) a skrutkové. Dôvodom je, mimo iné, ich vyššia účinnosť, respektíve COP, menšie fyzické rozmery, nižšia hlučnosť, plynulejší chod, nízke vibrácie a lepšie ovládanie [19]. Vynikajú najvyšším COP spomedzi ostatných spomínaných kompresorov. Na druhú stranu, cenou vysokej účinnosti je i vyššia obstarávacia cena. Špirálové kompresory sa v podstate skladajú z dvoch špirál, z ktorých jedna je pevná a druhá excentricky krúži. V špirálach dochádza k nasatiu a následnému stlačeniu média smerom ku stredu, čím sa zvýši tlak a tým i teplota na požadovanú hodnotu. Aby nedochádzalo k úniku média, je nutno špirály neustále premazávať. Pri nízkych otáčkach sa účinnosť mazania znižuje, čo môže spôsobiť nadmerné opotrebenie kompresoru. Z toho dôvodu je dôležitá správna voľba či návrh TČ so zvýšeným ohľadom na predimenzovanie s hľadiska výkonu. Životnosť týchto kompresorov je minimálne 20 rokov. Prevádzka je menej hlučná práve kvôli kompresii, ktorá je hladká a tichá pretože je zapojených len veľmi málo pohyblivých častí. Vďaka tomu je tento kompresor veľmi spoľahlivý [19], [20]. Skrutkové kompresory sú všeobecne vhodnejšie pre vyššie výkony (nad 50 kW), ktoré sa pýšia lepšou účinnosťou.



Obr. 4 Špirálový (scroll) kompresor [21]

2.2.2 Expanzný ventil

Rovnako ako kondenzátor, tak aj expanzný ventil, je kľúčovou súčasťou vnútornej jednotky a jeho funkciou je prudké zníženie tlaku chladiva pred výparníkom. Odoberá chladivo z kondenzátoru späť do výparníku. Expanzné ventily v TČ sú riadené buď termostaticky alebo elektronicky, čo vedie i k ich deleniu na:

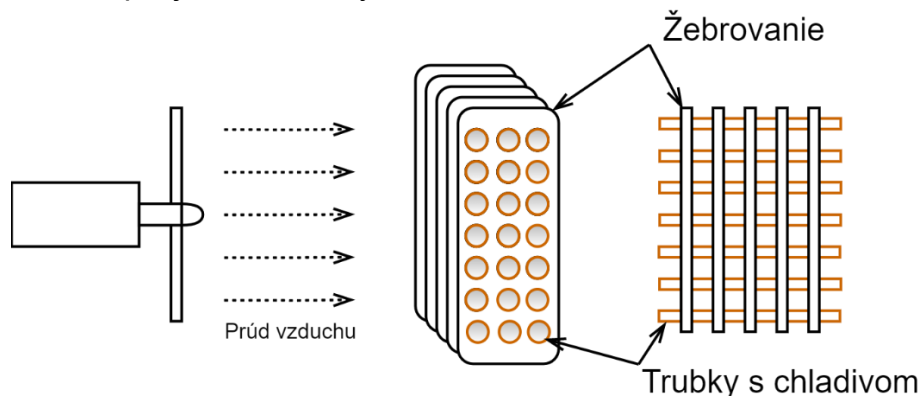
- Expanzný ventil s konštantným tlakom – nesprávne nazývaný aj automatický expanzný ventil, udržiava konštantný tlak vo výparníku bez ohľadu na to, aké je aktuálne zaťaženie vo výparníku. Neumožňuje riadenie prietoku chladiva [19].
- Tepelný (termostatický) expanzný ventil – riadi množstvo prietoku chladiva, čím zároveň riadi aj prehrievanie na výstupe z výparníka. Tepelné expanzné ventily sa často všeobecne označujú ako „meracie zariadenia“. Používajú sa s premenlivým tepelným zaťažením [19].

Expanzné ventily vo všeobecnosti pracujú v závislosti od prehriatia chladiva na výstupe z výparníka a jeho tlaku. Tento tlak sa musí udržiavať pod pevnou hranicou nazývanou MOP (maximum operating pressure – maximálny prevádzkový tlak), aby sa predišlo akejkoľvek abnormálnej činnosti kompresora. Za normálnych podmienok (tlak pod MOP) expanzný ventil pracuje na základe prehriatia chladiva za výparníkom, ale po dosiahnutí MOP sa otvor ventilu zúži, čím sa zabráni ďalšiemu zvýšeniu tlaku [19].

2.2.3 Výparník/Kondenzátor

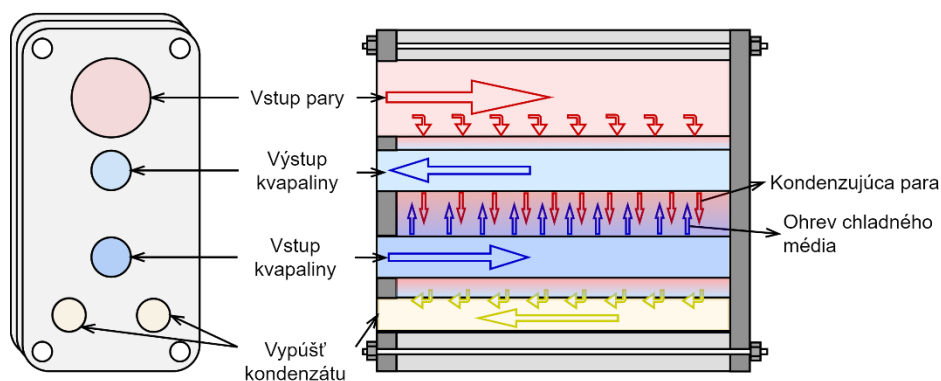
Vo výparníku dochádza k prestupu nízko potenciálového tepla z okolia do kvapalného chladiva. Chladivo z expanzného ventilu sa vo výparníku odparuje a vystupujúca para môže byť nasýtená (v tom prípade sa jedná o mokrý výparník) alebo prehriata (suchý výparník). V kondenzátore zase dochádza k prestupu tepla z chladiva do vykurovacej sústavy. Celý dej prebieha pri relatívne vysokých teplotách i tlakoch.

Vo všeobecnosti sa jedná o výmenníky tepla, ktoré sú schopné vymieňať teplo s viacerými typmi vnútorných i vonkajších zdrojov. Na základe čoho sa i samotné TČ delia (viď. rozdelenie TČ vyššie na strane 24) napríklad na TČ vzduch – vzduch, vzduch – voda a podobne. V každom prípade prvé slovo odkazuje na vonkajší zdroj a druhé na zdroj vnútorný. Vnútorným zdrojom môže byť aj voda, zatiaľ čo vonkajším zdrojom môže byť voda ba dokonca aj zem. V prípade, že je vonkajší zdroj vzduch, potom vzduchom chladený výmenník (výparník) pozostáva zo zväzku rebrovaných trubiek, v ktorých prúdi chladivo. Chladiaci vzduch potom zabezpečuje jeden alebo viac axiálnych ventilátorov. Príklad výparníku využívajúci vzduch ako zdroj nízko potenciálového tepla je znázornený na obr. 5:



Obr. 5 Výparník (prevzaté a upravené z [19])

V prípade vody potom uplatnenie nachádzajú doskové výmenníky tepla, a to ako v prípade vonkajšieho, tak i vnútorného zdroja. Medzi najpoužívanejšie sa radia zvarané a spájkované DVT [19]. Príklad doskového kondenzátora (konkrétne od firmy Alfa-Laval) je znázornený na obr. 6.



Obr. 6 Schéma doskového kondenzátora (prevzaté a upravené z [19])

Svoje uplatnenie nachádzajú i trubkové výmenníky so segmentovanými prepážkami a výmenníky tepla typu trubka v trubke, kde výmenník je tvorený dvomi koaxiálnymi trúbkami. Trubky sú vo všeobecnosti vyrábané z ocele alebo medi. Vnútrná trubka je charakteristická zväčšeným povrchom. Dôvodom je zväčšenie plochy prenosu tepla a podpora turbulencie. Tým sa zvyšuje súčiniteľ prestupu tepla aj samočistiaca schopnosť. Tieto výmenníky tepla sú často špirálového vinutia, aby sa dosiahlo menších fyzických rozmerov [19].

2.2.4 Prevedenie tepelného čerpadla

Kompresorové tepelné čerpadlá sa všeobecne rozlišujú i z hľadiska prevedenia, kedy sa rozlišujú dve základné konfigurácie. Jedná sa o prevedenie typu kompaktné alebo tzv. split.

Splitové prevedenie spočíva v rozdelení tepelného čerpadla na dve prepojené jednotky. V tomto prípade TČ pozostáva z dvoch prepojených, no oddelených jednotiek. Spravidla sa jedná o vonkajšiu a vnútornú jednotku. Vonkajšia jednotka je tvorená výparníkom a kompresorom. Vnútrnú jednotku potom tvorí kondenzátor. Najväčšia výhoda tohto prevedenia spočíva v minimalizácii hluku, kedy sú do interiéru inštalované prvky TČ, ktoré len minimálne tvoria hluk [22]. Nevýhodou sú potom zvýšené nároky na montáž takéhoto čerpadla, čo sa negatívne odráža na cene za montáž TČ [23].

Kompaktné prevedenie alebo inak nazývané monoblok spočíva v umiestnení všetkých komponentov do jednej ucelenej, kompaktnej jednotky. Teplo sa v tomto prípade prenáša do cieľového objektu prostredníctvom média na strane kondenzátora a za využitia obehových čerpadiel v prípade vody. Výhoda kompaktného prevedenia spočíva v jeho jednoduchosti, kedy je inštalácia TČ v kompaktnom prevedení častokrát rýchlejšia a tiež i lacnejšia z pohľadu nákladov na montáž [23]. Ďalšia výhoda spočíva v minimalizácii rizika potenciálneho úniku chladiva keďže sa v tomto prevedení zväčša jedná o hermeticky uzavreté chladivové okruhy [23].

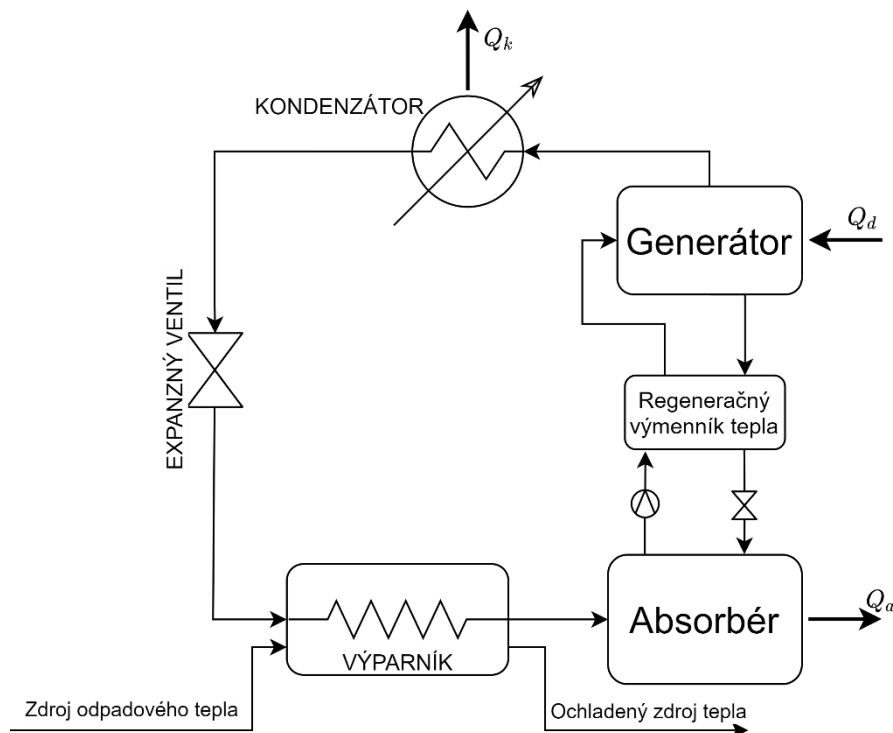
2.3 Sorpčné tepelné čerpadlá

Sorpčné tepelné čerpadlá využívajú medzimolekulárnych väzieb absorbentu či adsorbentu k pracovnej látke – chladive. Primárnym rozdielom v porovnaní s kompresorovými TČ, je rozličná hnacia sila, kde sorpčné TČ nepoužívajú

mechanický kompresor, ale hnacou silou je dodávaná tepelná energia. Táto tepelná energia umožňuje chladivu pri nižších teplotách viazať sa na absorbent či adsorbent a následne i jeho opätovné uvoľňovanie pri teplotách vyšších. V porovnaní s kompresorovými TČ, sorpčné TČ všeobecne dosahujú nižší podiel celkovo vyprodukovanej tepelnej energie a energie vlozenej, teda sú charakteristické nižším COP. Na druhú stranu vložená energie nemusí byť priamo produkovaná napríklad spaľovaním fosílnych palív, ale je možnosť využitia i odpadového tepla alebo využitím obnoviteľných zdrojov (slnecná energia). Rovnako tak i konštrukcia sorpčných TČ je z mechanického hľadiska jednoduchšia [24]. Popis vyššie už naznačuje, že v prípade sorpčných TČ je nutno rozlišovať absorpčné a adsorpčné (tiež zeolitové) tepelné čerpadlá.

2.3.1 Absorpčné tepelné čerpadlo

Ako je spomenuté vyššie, absorpčné TČ sa na rozdiel od kompresorových TČ poháňajú termálne. Čo sa komponentov samotného TČ týka, rozdiel spočíva v už spomínanom kompresore, ktorý v tomto prípade absentuje a miesto neho je do okruhu začlenený absorbér, generátor a regenerátor. Sústava týchto komponentov (v pravej časti) ako aj princíp absorpčného TČ je znázornený na obr. 7. Princíp činnosti je založený na separácii, respektíve destilácii dvoch zložiek zmesi, rozpustnej látky s vyšším tlakom pár a rozpúšťadla s nižším tlakom pár. Tieto zmesi sú vo všeobecnosti tvorené vodou (rozpustná látka) a bromidom lítnym (rozpúšťadlo) alebo amoniakom (rozpustná látka) a vodou ako rozpúšťadlo [19].



Obr. 7 Schéma absorpčného tepelného čerpadla

Na obr. 7 je znázornené schéma TČ, kde je rozpustenou látkou práve amoniak a voda potom predstavuje rozpúšťadlo. V absorbére dochádza k zmiešaniu, respektíve absorpcii amoniaku do vody. Aby mohla samotná absorpcia prebiehať, je nutno zmes ochladiť, t.j. odvádzať tzv. absorpčné teplo Q_a . Teplotne je toto teplo Q_a na úrovni tepla predaného v kondenzátore Q_k , z čoho plynie, že je ďalej využiteľné (typicky pre ohrev

vnútorných priestorov). Vytvorený kvapalný roztok je ďalej, pomocou čerpadla, čerpaný z absorbéru cez regeneračný protiprúdový výmenník do generátoru, kde sa destiláciou oddelí od vody pri dodanom teple v podobe spaľovania paliva alebo zo zdroja odpadového tepla. V generátore sa v dôsledku destilácie oddeľuje čpavok smerom ku kondenzátoru a ochudobnený roztok prechádza späť, cez regenerátor (kde predáva svoje teplo roztoku), do absorbéru. Odparený amoniak tak z generátora prúdi do kondenzátora, v ktorom predáva svoje teplo ďalšej látke (napríklad vode či vzduchu). Skondenzovaný amoniak potom prúdi cez expanzný ventil do výparníku, kde vplyvom stredne až vysoko potenciálového tepla dochádza k odpareniu amoniaku, ktorý tak v plynnom skupenstve prúdi späť do absorbéru a proces sa cyklicky opakuje.

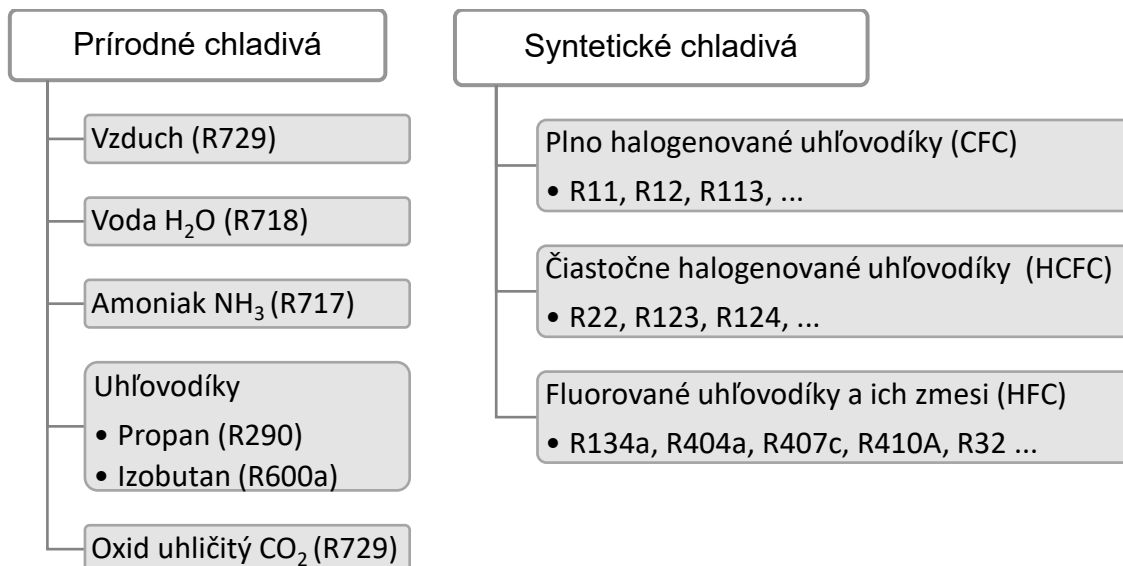
Z popisu je zrejmé, že absorpčné TČ pracuje s tromi zdrojmi tepla: teplo predané v kondenzátore (Q_k), teplo uvoľňované pri absorpcii (Q_a) a dodávané teplo v podobe hnacej sily čerpadla (Q_d). Napriek tomu, že pre činnosť je zvyčajne potrebné i čerpadlo, jeho spotreba elektrickej energie je vzhľadom k dodanému teplu (Q_d) zanedbateľná.

2.3.2 Adsorpčné tepelné čerpadlo

Princíp adsorpčného TČ je obdobný tomu absorpčnému. Zatiaľ čo u absorpčného sa teplo okolitému prostrediu odoberá pri rozpúšťaní plynu v absorbéru, tak u adsorpčného sa teplo odoberá prilnutím pracovnej látky (napríklad vody) na povrchu adsorbentu. V prípade TČ sa ako adsorbentov využíva predovšetkým zeolitu. Z toho dôvodu sa týmto TČ tiež hovorí zeolitové tepelné čerpadlá. Zeolit predstavuje piesčito-hlinitý kremičitan s výnimočnými fyzikálnymi sorpčnými vlastnosťami, ktoré vyplývajú z jeho osobitej kryštalickej (mikroporéznej) štruktúry. Charakteristický je tiež extrémne veľkým vnútorným povrchom. Vďaka týmto vlastnostiam je zeolit schopný opakovane adsorbovať a následne uvoľňovať veľké množstvo vody bez toho, aby sa zmenila pevnosť alebo štruktúra tohto materiálu [24].

2.4 Chladivá

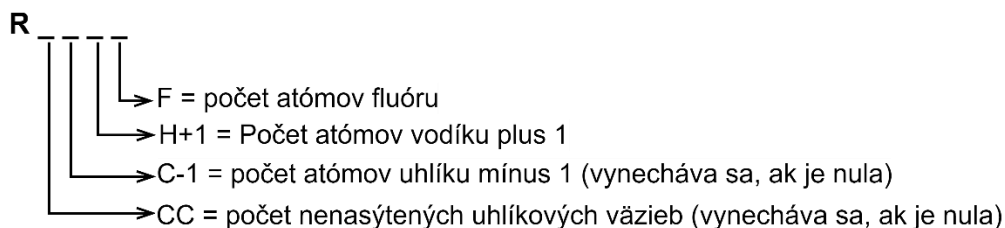
Prevádzku tepelného čerpadla ako takého umožňujú fyzikálne a chemické vlastnosti chladiva, ktoré tak priamo ovplyvňujú teplotu vyparovania a kondenzácie. Chladivo cirkuluje vo vnútornom obehu TČ a odoberá nízko potenciálové teplo vo výparníku pri nízkej teplote a predáva toto teplo kondenzátoru pri teplote vysokej. Ako chladivá sa všeobecne používajú látky charakteristické svojou nízkou teplotou varu. Z vlastností chladív sú smerodajné predovšetkým výparný tlak (p_v) a molárna hmotnosť (M_w). Výparný tlak by mal byť dostatočne vysoký pri aktuálnej teplote vyparovania, aby sa tak minimalizovali požiadavky na výkon a veľkosť kompresoru. V prípade molárnej hmotnosti sa zasa požaduje chladivo s nižšou hodnotou pretože čím, „ťažšia“ je tekutina, tým je nižší i objemový prietok v dôsledku čoho sa kladú vyššie nároky na veľkosť komponentov (potrubia, ventilov) [19]. V prípade chladív sa všeobecne rozlišujú prírodné (ekologické) a syntetické chladivá. Ich ďalšie rozdelenie a príklady jednotlivých chladív znázorňuje schéma na obr. 8.



Obr. 8 Rozdelenie chladív [20], [25]

Značenie chladív

Chladivá sa označujú písmenom R (z *angl. refrigerant*) a štvormiestneho číselného označenia, ktoré charakterizuje ich chemické zloženie podľa číselného systému ASHRAE [26]. Princíp značenia a význam jednotlivých číslíc je nasledovný:



Obr. 9 Značenie chladív [26]

V prípade izomérov (chemické zlúčeniny s rovnakým chemickým vzorcom, ale odlišnou štruktúrou) sa značenie dopĺňa o malé písmená a, b, c (napríklad R134, R134a). Naopak v prípade zmesí obsahujúcich rovnaké čisté zložky, ale s rôznym zastúpením týchto zložiek, sa označenie dopĺňa veľkým písmenom (napríklad R401A, R401B) [26]. Príkladom môže byť chladivo R134a (tetrafluóretán CH_2FCF_3), ktoré (podľa obr. 9) neobsahuje žiadne nenasýtené uhlíkové väzby, obsahuje dva atómy uhlíku, dva atómy vodíku, tri atómy fluóru a vzťahuje sa k izoméru a. Chladivá so značením R4xxx predstavujú zeotrópne zmesi, zatiaľ čo chladivá vo forme R5xxx značia azeotrópne zmesi. [26]

Medzi najpoužívanejšie chladivá patria chladivá zo skupiny HFC, teda uprednostňujú sa chladivá syntetického pôvodu. Na druhú stranu použitie chladív zo skupiny CFC (chlórfluorované uhľovodíky) je od roku 1996 striktne zakázané kvôli ich negatívnemu vplyvu na skleníkový efekt a poškodzovanie ozónovej vrstvy. Podobne ako CFC, tak i používanie chladív zo skupiny HCFC je v súčasnosti zakázané (od roku 2015) z rovnakého dôvodu. Tieto skutočnosti viedli k rozšíreniu chladív zo skupiny HFC, ktoré neobsahujú atómy chlóru čím sa predchádza poškodzovaniu ozónovej vrstvy. No na druhú stranu pôsobia ako skleníkové plyny a ako chladivá sa vyznačujú nižšou výkonnosťou. V dôsledku možných klimatických zmien a potreby znížiť negatívny ekologický dopad sa ustupuje od chladív obsahujúcich fluór, chlór, prípadne

i bróm, a skôr sa prechádza na chladivá ohľadupnejšie na životné prostredie, čo vedie k snahe využívať prírodné, ekologické chladivá. V súvislosti z možným ekologickým hodnotením chladív sa využívajú dva parametre. A síce ODP (z *angl. ozone depletion layer* – potenciál poškodzovania ozónovej vrstvy) a GWP (z *angl. global warming potencial* – potenciál globálneho otepľovania). ODP predstavuje relatívne číslo udávajúce potenciál chladiva k poškodzovaniu ozónovej vrstvy vzhľadom k referenčnému chladivu (R11). GWP popisuje vplyv daného chladiva na globálne otepľovanie v porovnaní s vplyvom plynu CO₂. V súčasnosti sa síce TČ s týmito chladivami aplikujú i v prevádzke, avšak sú to zatiaľ skôr ojedinelé aplikácie [19], [25].

2.5 Riadenie tepelných čerpadiel

Uplatnenie, efektivita či samotná voľba začlenenia tepelného čerpadla do vykurovacieho systému alebo procesu všeobecne, je, mimo jeho konštrukčného prevedenia či výkonu, daná spôsobom jeho riadení. V prípade tepelných čerpadiel je riadenie mimoriadne dôležité. Dôvodom je fakt, že čím je teplota ohrievanej látky menšia, tým je prevádzka TČ lacnejšia. Vychádza to z definície vykurovacieho faktoru (viď kap. 2.1.1), kedy chceme minimalizovať vstupnú energiu. Vhodným spôsobom riadenia TČ sa tiež predchádza zbytočnej prevádzke TČ, čoho dôsledkom môže byť prehrievanie ohrievanej látky, nadmerné opotrebovanie, zvýšený hluk a podobne. Vzhľadom k téme práce bude ďalší popis zameraný na kompresorové TČ, kde sa vedľa základnej dvojstavovej varianty využíva invertné riadenie. Oba spôsoby môže byť v oblasti vykurovania podriadené tzv. ekvitermnej regulácii.

2.5.1 Dvojstavová regulácia (štart/stop systém)

Bežne sú TČ založené na dvojstavovej regulácii, kedy tepelné čerpadlá pracujú buď na plný (100%) výkon alebo vôbec (0% výkon). V praxi to znamená, že TČ pracuje v polohe zapnuto či vypnuto, čoho dôsledkom môže byť príliš časté spínanie, ktoré tak vedie k zvýšenej spotrebe energie a skráteniu životnosti samotného TČ. Výhoda spočíva najmä v jednoduchosti systému, kedy nie je potreba žiadnych ďalších dodatočných komponentov či zariadení. Nevýhodou však je fakt, že pri zopnutí pracuje čerpadlo na maximálny výkon bez ohľadu na aktuálnu tepelnú potrebu. To v praxi znamená, že TČ zopne celý svoj výkon (napríklad 15 kW), aby uspokojilo potrebu domu napríklad 10 kW. Avšak táto nevýhoda nemusí byť vždy opodstatnená. Príkladom môžu byť niektoré aplikácie tepelných čerpadiel v priemyselnom sektore, kedy čerpadlo pracuje kontinuálne bez nejakej ďalšej regulácie na plný výkon alebo je v systéme prítomná akumulácia tepla.

2.5.2 Invertné riadenie

V tomto prípade je kompresor riadený a napájaný z invertoru, ktorý definuje frekvenciu otáčok kompresoru a tým aj jeho výkon na základe požadovaného tepelného výkonu. Invertor tak v najjednoduchšom slova zmysle predstavuje frekvenčný menič. Najväčším prínosom invertného riadenia TČ je skutočnosť, že sa jedná o plynulú reguláciu vykurovacieho či chladiaceho výkonu. Kompresor v tomto prípade prispôsobuje svoju rýchlosť, výkon v závislosti od aktuálnej potreby tepla. Invertný kompresor pracuje primárne s nízkymi otáčkami a v prípade potreby väčšieho tepla postupne zvyšuje svoj výkon. Frekvenčne riadený kompresor všeobecne poskytuje nižšiu úroveň hluku, vyšší COP a v neposlednom rade prináša i väčšiu úsporu elektrickej energie. Negatívom je však vyššia počiatočná cena. Sporná je i otázka životnosti. TČ s invertným riadením je síce charakteristické minimálnym počtom zopnutí, no vďaka tomu musí byť v prevádzke zhruba trojnásobne dlhšiu dobu, keďže

pracuje pri nižších nominálnych výkonoch. Nevýhodu v podobe vyššej ceny však možno vyvážiť tým, že frekvenčne riadené TČ výlučne nevyžadujú akumuláciu nádobu, ktorá sa bežne inštalujú práve z dôvodu obmedzenia počtu spínaní, kedy TČ na jeden štart ohreje väčšie množstvo

vody [27], [28]. No napriek tomu sú akumulčné nádrže vo väčšine aplikácií inštalované spolu s tepelným čerpadlom. Okrem vyššie uvedeného, akumulčná nádrž alebo jednoducho zásobník teplej vody plní nasledujúce funkcie:

- Oddeluje prietok tepelným čerpadlom a prietok vykurovacou sústavou, čím sa dosahuje stáleho prietoku tepelným čerpadlom a tým aj konštantný ohrev vody.
- Vhodne dimenzovaná akumulčná nádrž oplýva dostatočnou kapacitou množstva vykurovacej vody k zamedzeniu cyklovania prevádzky tepelného čerpadla pri nepriaznivých podmienkach v závislosti na aktuálnej potrebe tepla.

2.5.3 Ekvitermná regulácia

Ekvitermná regulácia je regulácia, v rámci ktorej hodnoty tepelných strát daného priestoru nahrádza aktuálna teplota vonkajšej teploty v bezprostrednom okolí [29]. Ekvitermná regulácia sa vyznačuje riadením v otvorenej slučke, kedy k dispozícii nie je žiadna spätná väzba o dosiahnutí žiadanej veličiny (teploty). V tomto slova zmysle sa skôr jedná o ovládanie ako reguláciu.

V praxi to znamená, že ak je vonku chladnejšie, výkon vykurovacieho média sa zvýši a naopak. Cieľom je kompenzácia tepelných strát objektu. Závislosť medzi teplotou vykurovacieho média vo vykurovacom systéme a vonkajšou teplotou vzduchu vyjadrujú ekvitermné krivky. Jedná sa o nelineárnu závislosť, ktorá sa odvíja od tepelnoizolačných vlastností, hmoty a dispozície vykurovacích priestorov a podobne. Ekvitermná regulácia sa vyznačuje stabilnou teplotnou úrovňou z dôvodu potlačenia dynamiky (kolísania) teplôt vo vykurovacom priestore, no súčasne to predstavuje, pri nesprávnom použití, i jej najväčšou nevýhodou [29]. Spomínaný spôsob riadenia je tak skôr vhodný pre prípady, kedy nedochádza k pravidelným, príliš veľkým výkyvom teplôt vykurovaných priestorov (napríklad učebne, zasadačky a podobne). Tento spôsob regulácie je zvyčajne nadradený radiacemu systému TČ, ktorému nastavuje požadovanú hodnotu (set point). Typicky je ním definovaná žiadaná teplota v akumuláčnej nádrži na teplú vodu, ktorú sa potom snaží TČ dosiahnuť.

3 Tepelná zát'az'

Zdroje odpadového tepla a možnosti jeho využitia závisia, ako je písané vyššie v kapitole 1, od mnohých faktorov. Primárnym kritériom je však teplota. Na to, aby sa teplota okolitého (vnútorného) prostredia alebo všeobecne odpadového prúdu dostala na požadovanú úroveň, je nutno tomuto prostrediu dodať energiu, tepelnú energiu. Zdrojom tepla všeobecne môže byť vlastne čokoľvek. Príklady niektorých týchto zdrojov sú uvedené vyššie (viď tabuľka 1 a tabuľka 2), no v týchto prípadoch sa jedná čisto o vnútorné zdroje tepla definované procesmi. Predmetom záujmu tejto práce je však zhodnotenie a ďalšie využitie práve odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu interiéru. Množstvo tohto tepla sa potom odvíja od tepelnej zát'aze priestoru. Z toho dôvodu je stanovenie miery tepelnej zát'aze a s tým súvisiace predstavenie dominantných zdrojov tepla celkom zásadné. Stanovenie tepelnej zát'aze je, okrem iného, zásadným krokom v prípade návrhu, napríklad vetracích, klimatizačných či vykurovacích systémov. Podkladom pre výpočet takýchto systémov sú výpočty tepelných strát a tepelných ziskov. Tepelné straty ako aj zisky predstavujú tepelnú zát'az riešeného objektu a výpočet zát'aze je ovplyvnený najmä týmito faktormi [30]:

- parametre vnútorného prostredia;
- parametre vonkajšieho prostredia;
- vnútorné zdroje tepla, prípadne i vlhkosti;
- tepelnoizolačné vlastnosti budovy;
- orientácia budovy voči svetovým stranám;

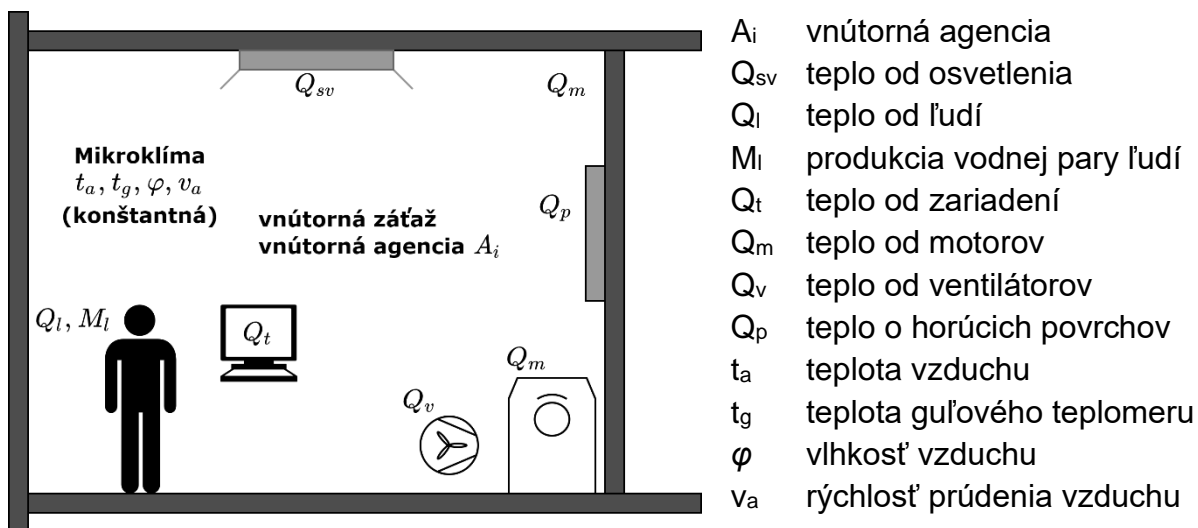
Definovanie alebo stanovenie tepelnej zát'aze predstavuje zásadný krok pri návrhu, pretože vedie na riešenie tepelnej bilancie. Podkladom pre výpočet tepelnej zát'aze je norma ČSN 730548, ktorá sa zaoberá výpočtom tepelnej zát'aze a tepelných ziskov priestorov s konštantnou vnútornou teplotou.

3.1 Tepelná zát'az' vnútorného prostredia

Pod pojmom vnútorné prostredie si možno predstaviť prostredie interiérov budov, teda fyzickú realitu, ktorá je tvorená sústavou troch javov, ktorými (podľa [31]) sú:

- Agencia: homogénna zložka fyzickej reality, ktorá vytvára toky a pôsobí na exponovaný subjekt (napr. teplo, vodné pary, toxické látky, svetlo a podobne).
- Pole prenosu, ktoré je tvorené priestorom, vzduchom či kontaktnými telesami.
- Exponovaný objekt (človek, stroj, zariadenie alebo iná entita reagujúca na prostredie).

Ako je písané vyššie, tepelná zát'az' je daná súčtom tepelných ziskov od jednotlivých zdrojov tepla a tepelných strát. Inak tomu nie je ani v prípade samotného vnútorného prostredia. Nevyhnutným krokom pri stanovení tepelnej zát'aze vnútorného prostredia je identifikácia alebo vytypovanie jednotlivých, konkrétnych zdrojov tepla. K vnútorným zdrojom tepla sa primárne radí tepelný tok vznikajúci od ľudí, osvetlenia, strojov a elektro zariadení, prípadne i prestup tepla zo susedných miestností [30], [32]. Súhrnné schéma a zložky vnútornej zát'aze popisuje obr. 10. V zmienenom obrázku sú spomenuté i mikroklimatické faktory, ktorých detailnejší popis je predmetom ďalších častí tejto práce (viď kapitola 4).



Obr. 10 Vnútorná tepelná záťaž (upravené z [33])

Nasledujúci text tejto kapitoly bude stručne popisovať spôsoby výpočtu a stanovenia tepelných ziskov od vybraných zdrojov tepla vnútorného prostredia. Informácie, vzťahy a všeobecne obsah nasledujúceho textu je spracovaný (pokiaľ nie je uvedené inak) na základe týchto zdrojov: [32]–[35].

3.1.1 Tepelná záťaž klimatizovaných priestorov

Tepelné zisky od ľudí

V prípade tepla produkovaného samotnými ľuďmi sa uvažuje len tzv. citeľné teplo, ktoré je podľa normy definované ako: „*teplo, spôsobujúce zmenu teploty vzduchu pri jeho stálej mernej vlhkosti.*“ Z definície teda plynie, že toto teplo je priamo závislé od teploty vzduchu v riešenom priestore. Toto teplo však tiež závisí od intenzity ľudskej činnosti a zložení skupiny ľudí. Výpočet tepla sa odvíja od pevne stanovenej hodnoty citeľného tepla muža (62 W) pri teplote vzduchu 26°C a pri mierne aktívnej práci. V prípade odlišnej teploty vzduchu sa vykonáva korekcia podľa rovnice 3.1.

$$Q_l = 6,2 \cdot n_l (36 - t_i) \quad [W] \quad (3.1)$$

kde, n_l je počet ľudí [-]

t_i je aktuálna teplota vzduchu [°C]

Vzťah uvedený vyššie je špecifický pre produkciu tepla muža konajúceho mierne aktívnu prácu. Za iných okolností, kedy sa v riešenom priestore nevyskytujú len muži, je nutno vykonať ďalšiu korekciu berúc v úvahu jednotlivé zastúpenie v skupine ľudí. U žien sa berie 85 % tejto hodnoty a u detí 75 %. Stále však zostáva upraviť výslednú hodnotu v závislosti od činnosti práce. Tieto korekcie sú uvedené v podobe tabuľky, ktorá je obsahom prílohy 1 normy ČSN 730548.

Tepelné zisky od osvetlenia

Pre výpočet množstva tepelnej energie od osvetlenia je nevyhnutné mať na pamäti fakt, že toto teplo sa počíta len pre priestory bez okien alebo priestory so zvýšenými požiadavkami na osvetlenie (napríklad prevádzky jemnej mechaniky). V ostatných priestoroch sa toto teplo berie v úvahu vtedy, kedy je umelé osvetlenie od okien vzdialené minimálne päť metrov. Pri výpočte tepla u osvetlenia sa počíta s tým, že sa celý jeho elektrický príkon mení na teplo. Toto teplo sa ďalej pomocou radiačného

a konvekčného mechanizmu prenosu tepla šíri ďalej do osvetľovaného priestoru. Napriek tomu, že sa berie v úvahu celý jeho elektrický príkon, nejedná sa o výpočet Joulovho tepla, ale postupuje sa podľa rovnice 3.2.

$$Q_{sv} = P \cdot c_1 \cdot c_2 \quad [W] \quad (3.2)$$

kde, P je celkový príkon osvetlenia [W]
 c_1 je súčiniteľ súčasnosti používania osvetlenia [-]
 c_2 je zvyškový súčiniteľ [-]

Zvyškový súčiniteľ je akýmsi ukazovateľom množstva tepelnej záťaže, ktorá sa priamo dostane do interiéru. Pre riešenia, kedy je vzduchotechnika riešená odsávaním pod stropom, potom sa uvažuje 70 %, teda c_2 je 0,7.

Tepelné zisky od elektronického vybavenia

Pod pojmom elektronické vybavenie sa rozumie, napríklad, výpočtové systémy, počítače, tlačiarne, skenery a iné. Podobne ako u osvetlenia, aj v tomto prípade dochádza k obmedzeniu, kedy je treba uvažovaný zdroj brať či nebrať v úvahu ako potenciálny zdroj tepla. V oblasti elektronického vybavenia sa za zdroj tepla uvažuje zariadenie, ktoré je charakteristické trvalým príkonom vyšším ako 100 W. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, i tu sa uvažuje, že celkový elektrický príkon bude tvoriť tepelnú záťaž. Množstvo potenciálneho tepla Q_t sa počíta obdobným spôsobom podľa rovnice 3.2. Rozdiel spočíva v súčiniteli c_2 , ktorý je nahradený súčinitelom c_3 vyjadrujúcim využitie (zaťaženie) danej technológie.

Tepelné zisky od technológie

Technológiou v tomto slova zmysle sa rozumie napríklad teplo produkované elektromotormi, kompresormi alebo inými technologickými zariadeniami produkujúcimi teplo, ktoré je nutno odvádzať. Tepelné zisky v tomto prípade sa stanovujú podľa rovnice 3.3.

$$Q_m = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot P \quad [W] \quad (3.3)$$

kde, P je elektrický príkon [W]
 c_1 je súčiniteľ súčasnosti [-]
 c_2 je zvyškový súčiniteľ pri odsávaní tepla [-]
 c_3 súčiniteľ zaťaženia stroja [-]

Koeficienty c_1 až c_3 sú, podobne ako v predchádzajúcich prípadoch, stanovené pre každý typ stroja či zariadenia samostatne. Súčiniteľ zaťaženia technológie c_3 zohľadňuje skutočnú spotrebu v prevádzke, ktorá sa v praxi od štítkovej maximálnej hodnoty môže značne líšiť.

Vyššie uvedené korekčné súčinitele c_1 až c_3 sa v praxi stanovujú na základe údajov od výrobcu, meraním skutočnej spotreby (t.j. skutočného príkonu), nepriamym stanovením napríklad z bilancie vetracieho vzduchu, bilanciou vzduchu alebo plynov využívaných danou technológiou alebo detailnou analýzou prevádzky.

Tepelné zisky od horúcich povrchov Q_p a materiálov Q_r

U teplých a horúcich povrchov, typicky u potrubí, umiestnených vo vyšetřovanom priestore dochádza k prestupu tepla Q_p do okolia konvekciou a radiáciou. Množstvo tepla sa v tomto prípade počíta podľa rovnice 3.4.

$$Q_p = \alpha \cdot S_p \cdot \Delta t_m \text{ [W]} \quad (3.4)$$

kde, α je súčiniteľ prestupu tepla radiáciou a konvekciou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

S_p je teplosmenná plocha [m^2]

Δt_m je stredný teplotný rozdiel [K]

Na druhú stranu, v mnohých podnikoch (napríklad pekárne) sa vyskytujú materiály či produkty charakteristické vysokou teplotou alebo všeobecne odlišnou teplotou v porovnaní s teplotou v miestnosti. Tieto materiály sa tiež vyznačujú hmotnostným prietokom a tepelnou kapacitou. Teplo od týchto materiálov sa potom, logicky, stanoví podľa bilančnej rovnice tepla.

3.1.2 Tepelná záťaž neklimatizovaných priestorov

Podobne ako tomu bolo i u klimatizovaných priestorov, tak i v tomto prípade, celková tepelná záťaž klimatizovaných priestorov Q_{za} pozostáva z dvoch zložiek, a síce z vnútornej a vonkajšej. Avšak v objektoch priemyselného sektora, ako sú napríklad výrobné haly, kotolne a podobne, sú tieto objekty zväčša relatívne dobre chránené voči vonkajšej klíme. To znamená, že vplyv vonkajšej tepelnej záťaže môže byť zanedbateľný. Rozhodujúca je potom tepelná záťaž tvorená vnútornými tokmi tepla od strojov a technologických zariadení, ktoré sa stanovujú obdobne, ako tomu bolo v prípade klimatizovaných priestorov (viď. kap. 3.1.1). Typicky je možné tieto toky tepla považovať za konštantné.

Kedže sa jedná o neklimatizovaný priestor, je nutno vhodným spôsobom zaistiť odvod tepelnej energie. K odvádzaniu tepelnej záťaže takýchto priestorov sa zväčša využíva vonkajší vzduch charakteristickým hmotnostným prietokom, ktorý sa stanovuje za ustáleného procesu a bez uvažovania akumulácie tepla do vnútorných hmôt budovy. Výpočet sa potom vykonáva samostatne, zvlášť pre letné a zimné obdobie. Základom výpočtu je bilančná rovnica tepla a rozhodujúcim parametrom je potom rozdiel teplôt vnútorného vzduchu a vzduchu privádzaného, pričom vnútorná teplota vzduchu je daná hygienickými (viď. ďalej kap. 4) a technologickými požiadavkami.

3.2 Tepelná záťaž vonkajšieho prostredia

Tepelná záťaž vonkajšieho prostredia je ovplyvňovaná predovšetkým slnečnou radiáciou a teplotou vonkajšieho vzduchu. Tepelnú záťaž vonkajšieho prostredia tvoria tepelné zisky a tepelné zisky stenami budovy. V prípade okien sa rozlišuje oknami prestup tepla oknom a prestup tepla oknom radiáciou. Tepelné zisky oknami však znižuje akumulácia tepla do stien budovy. Časť tepelných ziskov od slnečnej radiácie prestupujúcimi oknami totiž dopadá na vnútorné povrchy miestnosti kde sa tak do stien akumuluje. Množstvo tepla naakumulovaného do stien potom znižuje tepelné zisky od oslnenia. Tepelné zisky stenami nadobúdajú svoju dôležitosť najmä v prípade ľahkých fasád, u rozľahlých objektov ako sú priemyselné haly. V prípade tepelných ziskov stenami budovy je zásadným parametrom definujúci postup výpočtu hrúbka steny vyšetřovaného objektu, kedy rozlišujú steny ľahké, stredne ťažké a ťažké steny. Do výpočtov tepelných ziskov vonkajšieho prostredia vstupujú i premenné ako je oblasť vyšetřovanej budovy alebo poloha slnka. Výpočty sa potom vo všeobecnosti vykonávajú pre najvyššie vonkajšie teploty, ktorých sa v danej oblasti dosahuje.

3.3 Diskusia o tepelnej záťaži v priemysle

Výpočet tepelnej záťaže alebo množstva tepla všeobecne závisí, ako je písané vyššie, od mnohých premenných ako je napríklad rôznorodosť jednotlivých zdrojov tepla. V závislosti od vyšetrovaného procesu je tak nutné stanoviť podstatné – dominantné zdroje tepla a potom tiež tie zdroje, ktoré k celkovému tepelnému toku prispievajú len minimálne, prípadne je ich možné zanedbať. Príkladom takého zdroja môže byť produkcia tepla od ľudí ako aj produkcia tepla od osvetlenia. Tieto zdroje je možné v určitých prípadoch zanedbať. Ako je vyššie uvedené, teplo od ľudí závisí tiež od počtu ľudí a u osvetlenia je toto teplo významné len za určitých okolností. Pre účely malých a stredných podnikov, ktoré sú predmetom tejto práce je však viac než možné, že oba tieto faktory môžu byť úplne zanedbateľné. Pod pojmom malý či stredný priemyselný podnik si možno predstaviť, napríklad, pekáreň či práčovňu. Množstvo ľudí v takýchto prevádzkach je len zriedka vyššie. Rovnako tak i nároky na osvetlenie nemusia (ale môžu) byť zrovna vysoké. Na druhú stranu, významnejšie zdroje tepla môžu zastupovať samotné technológie charakteristické daným procesom. Príkladom tak môžu byť tepelné zisky od výpočtových systémov v prípade dátových centier alebo zisky od pecí v prípade pekární.

Ako už vyššie uvedený text naznačuje, výpočet tepelných ziskov či celkovej tepelnej záťaže predstavuje celkom zložitý proces. Pri určovaní tepelnej záťaže je nutno stanoviť významné – dominantné zdroje tepla a relevantne podľa vyššie uvedených vzťahov stanoviť množstvo tepelnej energie. Vzťahy uvedené v kap. 3.1.1 zväčša obsahujú rôzne konštanty pričom ich hodnoty sú všeobecné či volené len ako približné hodnoty. Rovnako tak sú tieto rovnice vytvorené na základe určitých predpokladov, ako napríklad v prípade tepelných ziskov od ľudí, kedy sa berie v úvahu len priemerný energetický výdaj priemerného človeka. Pri menších počtoch je tento predpoklad možno zanedbateľný, no v prípade vyšších počtoch sa tak môže dosiahnuť relatívne veľkej chyby. Ďalším podstatným faktorom je výška samotného vyšetrovaného priestoru. Faktom je, že so vzrastajúcou teplotou všeobecne klesá hustota plynov, inak povedané teplo prirodzene stúpa smerom nahor. To v praxi znamená, že teplota v úrovni napríklad 2 metrov môže byť značne odlišná od teploty u stropu (napríklad 10 metrov). Tento fakt tak môže mať zásadný vplyv na možnosti využitia odpadového tepla pre ďalšie účely.

V tejto kapitole tak bol doposiaľ popisovaný len jeden spôsob stanovenia tepelnej záťaže, a síce výpočtom prostredníctvom empirických či semiempirických vzťahov a zákonov. Takéto výpočty však môžu do riešenia vniesť značnú nepresnosť. Ďalším možným spôsobom je stanovenie tepelnej záťaže prostredníctvom merania za využitia a kalorimetrov. Ďalšou možnosťou je monitorovanie interiérovej a vonkajšej teploty a zároveň meranie prietoku odsávaného vzduchu. Z bilancia by potom bolo možné stanoviť celkovú tepelnú záťaž interiéru. Riešenia ponúkajú i nové technológie v tomto obore. Jednou z možností je využitie systému vytvoreného tímom z University od California Berkeley, tzv. backpack system. Táto technológia používa laserové senzory, termokamery a zabudované počítače pre vytváranie 3D tepelných máp vyšetrovaného priestoru. Tieto mapy potom umožňujú efektívne vyhodnotenie tepelných strát budovy, tepelných podmienok a v konečnom dôsledku i tepelnú záťaž [36].

Tepelná záťaž, teplota, vlhkosť a ďalšie parametre interiérových priestorov sú podstatným faktorom pri návrhu budov priemyselného sektoru. Mimo iné, tieto podmienky vplývajú na bezpečnosť práce a ochranu zariadení. Z toho dôvodu sú tieto všeobecne prezývané hygienické požiadavky častokrát diktované legislatívou. Konkrétne informácie a viac o tejto problematike popisuje nasledujúca kapitola 4.

4 Hygienické požiadavky na kvalitu vnútorných priestorov budov

Spolu s tepelnou záťažou, i keď nie ako jediným faktorom, súvisí i kvalita vnútorných priestorov budov. Stav a kvalita vnútorných, či už bytových, pracovných alebo iných priestorov predstavuje zásadný faktor pri návrhu a prevádzke zariadení. Hygienické požiadavky a tepelnú záťaž spája i fakt, že potenciálne zhodnotenie odpadového tepla z interiéru môže zásadne ovplyvniť tepelný komfort pracovníkov. Cieľom tejto kapitoly tak je vymedzenie faktorov a okrajových podmienok pre návrh akéhokoľvek systému ovplyvňujúci vnútorné prostredie. Tomu nasvedčuje i fakt, že hygienické a prevádzkové požiadavky sú prirodzene nadradené hľadiskám úspor energie [37]. Pôvodom a primárnym dôvodom riešenia tejto problematiky je zaistenie zdravia, výkonnosti a pohody človeka zdržiavajúceho sa v riešenom priestore.

4.1 Faktory vplývajúce na kvalitu vnútorného prostredia

Z hygienického hľadiska je kvalita vnútorných priestorov budov popisovaná prostredníctvom fyzikálnych, chemických a biologických ukazovateľov [37]. Medzi tieto faktory ovplyvňujúce vnútorné prostredie podľa [37], mimo iné, patria:

- teplota, vlhkosť a prúdenie vzduchu (spoločným slovom mikroklima);
- hluk a vibrácie;
- osvetlenie a zrková záťaž;
- chemické látky;
- prašnosť;
- elektrické a elektromagnetické pole;
- ionizácia vzduchu;

V úvahu treba brať i fakt, že nie všetky faktory sú si rovnocenné a to najmä v prípade subjektívneho vnímania, kedy majú všeobecne väčší vplyv faktory tepelne vlhkosť (tzv. mikroklimatické faktory). V tomto ohľade sú rozhodujúce práve tepelné podmienky, ktoré sa vyjadrujú prostredníctvom: teploty vzduchu, výslednej teploty guľového teplomeru, operatívnej teploty a podobne [38].

V prípade teplotne homogénneho prostredia bez zdrojov radiačného tepla je smerodajným ukazovateľom teplota vzduchu t_a [°C], ktorá slúži ako vzduchotechnický údaj a zároveň ako teplotné kritérium pre hodnotenie vplyvu tepelného prostredia na človeka. Pre projektovanie stavieb a posúdenie tepelného vplyvu prostredia na človeka sa používa výsledná teplota guľového teplomeru t_g [°C], ktorá popisuje teplotu v okolí ľudského tela. Na rozdiel od teploty vzduchu t_a výsledná t_g v sebe zahrnuje vplyv súčasného pôsobenia teploty vzduchu, teploty sálavých plôch a rýchlosti prúdenia vzduchu. Záťaž teplom pri práci na pracovisku sa hodnotí podľa priemernej operatívnej teploty t_o [°C], ktorou sa rozumie teplota vypočítaná ako priemer za efektívnu dobu práce [39]. Mimo zmienených teplôt sa v praxi ďalej využívajú tiež stereoteploty, korigované teploty (teplota korigovaná prúdiacim vzduchom), povrchovej teploty a vertikálnej diferencii teplôt [38].

Vlhkosť vzduchu sa vyjadruje prostredníctvom vlhkosti relatívnej, prípadne, i keď menej často, pomocou rosného bodu. Vlhkosť vzduchu sa bežne udáva v percentách a vyjadruje pomer tlaku vodnej pary vo vzduchu k tlaku vodnej pary v nasýtenom vzduchu.

Ďalším faktorom spadajúcim do „podkategórie“ mikroklimy je tiež prúdenie vzduchu, ktoré silno vplýva na vnútorné prostredie a u človeka spôsobuje ochladenie. Udáva sa v metroch za sekundu, pričom v pracovnom prostredí sa doporučuje nepresiahnuť rýchlosť prúdenia vzduchu viac ako $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [38]. Mimo samotnej rýchlosti prúdenia je v tomto ohľade dôležitý i smer, teda distribúcia vzduchu v priestore.

Spolu s jednotlivými faktormi ovplyvňujúcimi stav a kvalitu vnútorného prostredia prichádza otázka v súvislosti s ich meraním a interpretáciou tepelného komfortu. Postupmi a spôsobmi merania mikroklimatických faktorov sa zaoberá norma ČSN EN ISO 7726. Cieľom tejto normy nie je definovať alebo inak určiť stav vnútorného prostredia, ale jednoducho štandardizovať proces zaznamenávania informácií vedúcich k určeniu stavu a tepelnej záťaže vnútorného prostredia [40]. Všeobecne sa týka pôsobenia teplých, miernych, komfortných alebo chladných prostredí na človeka [40]. Na druhú stranu, interpretáciou tepelného komfortu a jeho analytickým stanovením sa zaoberá norma ČSN EN ISO 7730. Tieto normy však ani z ďaleka nepredstavujú jediné dokumenty súvisiace so stavom vnútorného prostredia. Viac o legislatívnych, právne záväzných dokumentoch uplatňujúcich sa v tejto problematike hovorí nasledujúca podkapitola.

4.2 Právne záväzné predpisy v oblasti kvality vnútorného prostredia

V závislosti od faktorov uvedených v predchádzajúcom texte sa stanovujú limity, ktorých cieľom je zabezpečiť požadovanú kvalitu vnútorného prostredia. Požadovaný stav a kvalita riešeného prostredia je tak zabezpečovaná dodržiavaním týchto limitov obsiahnutých v právne záväzných predpisoch, ako sú zákony, nariadenia vlády či normy. Celá problematika predstavuje zložitú hierarchiu právne záväzných predpisov obsahujúcich, mimo limitov, i ďalšie všeobecné informácie či ustanovenia v súvislosti so správnym stavom vnútorného prostredia. Všeobecne však platí, že požiadavky na kvalitu vnútorného prostredia budov sú dané zákonmi a podrobnejšie informácie vrátane limitov pre jednotlivé faktory potom určujú príslušné predpisy, ako nariadenia vlády či vyhlášky. V prípade, kedy sa jedná o oblasti, ktoré nie sú obsahom právne záväzných predpisov, prichádzajú na rad technické normy, ktoré však zatiaľ slúžia len ako odporúčania, keďže technické normy z princípu nie sú právne záväzným dokumentom (pokiaľ zmluva zúčastnených strán nehovorí inak).

Vo všeobecnosti, právne záväzných predpisov, ktoré riešia alebo aspoň zmieňujú hygienické požiadavky na kvalitu vnútorného prostredia je nespočetne a v niektorých prípadoch ani nie sú jednotné [41]. Medzi základné vybrané zákony v podmienkach Českej republiky patria:

- zákon č. 183/2006 Sb. v znení zákona č. 350/2012 Sb., o územní plánování a stavebním řádu (stavební zákon);
- zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví;
- zákon č. 262/2006 Sb., zákoník práce;
- zákon č. 309/2006 Sb., o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci;

Zmienené zákony predstavujú len zlomok zákonov uplatňujúcich sa v tejto oblasti, ako je spomenuté vyššie, ich množstvo je značné. V oblasti kvality vnútorného prostredia môžu niektoré jednotlivé požiadavky vychádzať napríklad i z atómového, chemického zákona, zákona o odpadoch a mnoho ďalších. Zjednodušenie však prichádza v podobe selektivity typu prostredia, kedy sa jednotlivé predpisy vzťahujú ku konkrétnemu typu prostredia. Súhrn platných predpisov stanovujúcich limity pre jednotlivé faktory v závislosti od vybraných typov prostredia uvádza nasledujúca tabuľka 3. Pričom pre účely tejto práce sú smerodajné informácie uvedené v prvých riadkoch zmienenej tabuľky, kedy sú predmetom záujmu pracovné priestory. A i v tom prípade sa prihliada na činnosť, čo znamená, že je nutno rozlišovať, či sa jedná o pracovné prostredie výrobné alebo nie. Limity sú tak stanovené v závislosti od triedy práce, kedy sa trieda práce značí rímskymi I až V (viď. tabuľka 4) podľa energetického výdaju človeka $M [W \cdot m^{-2}]$ [39], [42].

Tabuľka 3 Predpisy určujúce limity pre jednotlivé faktory vnútorného prostredia
(prevzaté a upravené z: [37], [38])

Typ prostredia	Platné predpisy	Existujúce limity pre:
Pracovné	NV č. 361/2007 Sb. NV č. 68/2010 Sb. NV č. 93/2012 Sb. NV č. 41/2020 Sb. NV č. 195/2021 Sb.	MKL, chemické látky, prašnosť, osvetlenie, vetranie, priestorové požiadavky
Stravovacie	vyhláška č. 137/2004 Sb. vyhláška č. 602/2006 Sb.	Žiadne limity nejestvujú
Školské	vyhláška č. 410/2005 Sb. vyhláška č. 343/2009 Sb.	MKL, osvetlenie, vetranie, priestorové požiadavky
Pobytové	vyhláška č. 6/2003 Sb.	MKL, chemické látky, prašnosť, výskyt mikroorganizmov
Vnútorné prostredie stavieb	vyhláška č. 20/2012 Sb.	Koncentrácia CO ₂ , vetranie
	NV č. 272/2011 Sb. NV č. 241/2018 Sb.	Hluk, vibrácie
	NV č. 1/2008 Sb. NV č. 160/2010 Sb.	Neionizujúce žiarenie

Pozn.: MKL = mikroklimatické faktory, NV = nariadenie vlády

V prípade predpisov uvedených pre pracovné prostredie je azda najpodrobnejšie spracovaným dokumentom nariadenie vlády č. 361/2007 Sb. a č. 93/2012 Sb., ktoré stanovuje podmienky ochrany zdravia pri práci. Kvalita a stav vnútorného prostredia budov je tu celkom detailne popisovaná, pričom sa kladie dôraz na mikroklimatické podmienky. Prípustné limity mikroklimatických faktorov v závislosti od typu (triedy) práce stanovuje tabuľka 4, kde teplota s indexom „o“, respektíve „g“ značia teplotu operatívnu, respektíve teplotu guľového teplomeru. Rýchlosť prúdenia vzduchu tu je vyjadrená pomocou označenia V_a a R_h zasa značí vlhkosť.

Tabuľka 4 Limity mikroklimatických faktorov v závislosti od triedy práce [42]

Trieda práce	Energetická zát'az M	$t_{\min} / t_{g\min}$	$t_{\max} / t_{g\max}$	V_a	R_h
	[W·m ⁻²]	[°C]	[°C]	[m·s ⁻¹]	[%]
I	≤ 80	20	27	0,01 až 0,2	30 až 70
IIa	81 až 105	18	26		
IIb	106 až 130	14	32		
IIIa	131 až 160	10	30		
IIIb	161 až 200	10	26		
IVa	201 až 250	10	24	0,1 až 0,5	
IVb	251 až 300	10	20		
V	≥ 301	10	20	-	

Požadovanú kvalitu vzduchu je možné regulovať mnohými spôsobmi, pričom najúčinnjším spôsobom ako ovplyvniť kvalitu vnútorného priestoru je vetraním (prirodzeným, núteným alebo hybridným).

Ako už bolo spomenuté, predstavené faktory popisujú, určujú stav vnútorného prostredia. Legislatívne dokumenty pre jednotlivé parametre diktujú požadované medze, ktoré by vyšetovaný priestor mal dodržiavať. Tieto medze dané legislatívou predstavujú limitné hodnoty jednotlivých parametrov. Hodnoty nachádzajúce sa mimo intervalov daných legislatívou sú považované za nevhodné a návrh technológie by mal tieto medze rešpektovať. Vymedzené hodnoty hygienických (napr. mikroklimatických) faktorov predstavujú predvolené – výpočtové hodnoty, na základe ktorých je možné identifikovať množstvo nadbytočnej tepelnej energie (v prípade teploty) a prispieť k prípadnej optimalizácii návrhu technológie.

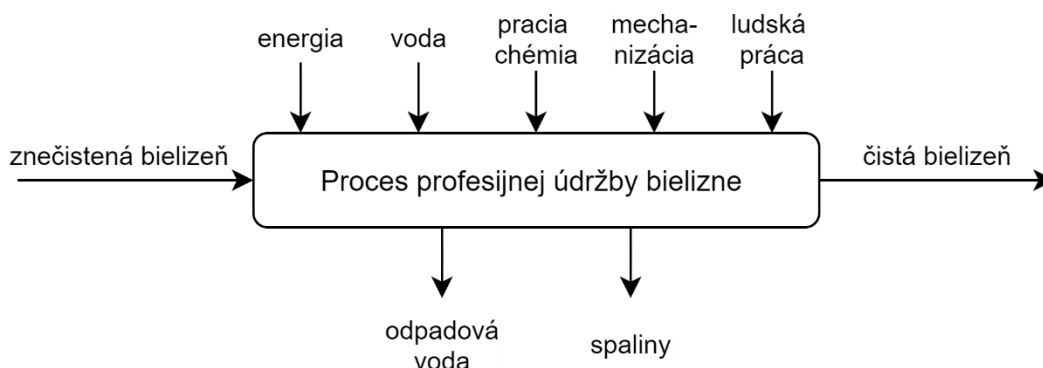
5 Prípadová štúdia – úvod do problematiky

Nasledujúca časť práce a jej kapitoly sa budú postupne zaoberať praktickou stránkou vyšetrovanej problematiky. Budú pritom využívané a postupne implementované poznatky z prechádzajúcich častí tejto práce. Cieľom nadchádzajúceho textu tak bude prípadová štúdia implementácie tepelného čerpadla vo vybranom procese s primárnym zameraním na zhodnotenie odpadového tepla vybranej prevádzky.

Pozornosť tohto celého textu sa vo všeobecnosti sústreďuje na malé a stredné podniky, pričom malé, respektíve stredné podniky možno definovať (podľa [43]) ako podniky, ktoré zamestnávajú menej než 10 osôb a ich ročný obrat nepresahuje 2 milióny eur, respektíve zamestnávajú menej než 50 osôb a ich ročný obrat nepresahuje 10 milión eur. Pod týmto pojmom, malý či stredný podnik, si možno predstaviť celú radu procesov z rôznych odvetví. Názorným príkladom tak môžu byť práčovne, pekárne, pivovary, sklárne, liehovary a mnoho ďalších.

Základom či pokladom pre prípadovú štúdiu je zvolená konkrétna prevádzka, a síce práčovňa. Dôvodom je predovšetkým predchádzajúca dlhodobá systematická výskumná činnosť Ústavu procesného inžinierstva FSI VUT v Brně v této oblasti. Práve práčovňa predstavuje typický príklad menšieho priemyselného podniku vyznačujúci sa svojou vysokou energetickou náročnosťou a to najmä z pohľadu potrebnej energie a vody. Proces definovaný práčovňou alebo, inak povedané, profesionálna údržba bielizne predstavuje „výhodu“ v podobe možnosti priameho využitia zhodnoteného odpadového tepla v procese (typicky pre predohrev napájacej vody práčok). V prípade kedy technológie a samotný proces umožnia zachytiť a ďalej využiť odpadové prúdy tepla, nemusí byť toto teplo efektívne využité priamo v procese. Tento fakt nasvedčuje tomu, že v prípade práčovne a podobným podnikom je možné týmto spôsobom predchádzať alebo skôr napomôcť ekonomickej bilancii prevádzky vo forme šetrenia prevádzkových nákladov a pozitívneho vplyvu na životné prostredie.

Chod profesionálnej práčovne bežne zabezpečuje elektrická energia a zemný plyn v podobe ohrevu vody a sušenia vzduchu. Značná časť energie však opúšťa proces v odpadových tokoch bez akéhokoľvek úžitku. Tieto odpadové prúdy môžu priamo a negatívne pôsobiť na životné prostredie. Príkladom je odpadová voda z pračiek, kedy je táto voda často krát kontaminovaná rôznymi pracími prostriedkami [44]. Schéma na obr. 11 stručne popisuje proces profesionálnej práčovne. Z diagramu sú zrejmé jednotlivé prvky procesu: suroviny (vľavo), produkty (vpravo), zdroje a spotrebný materiál (hore) a odpady (dole) [44].

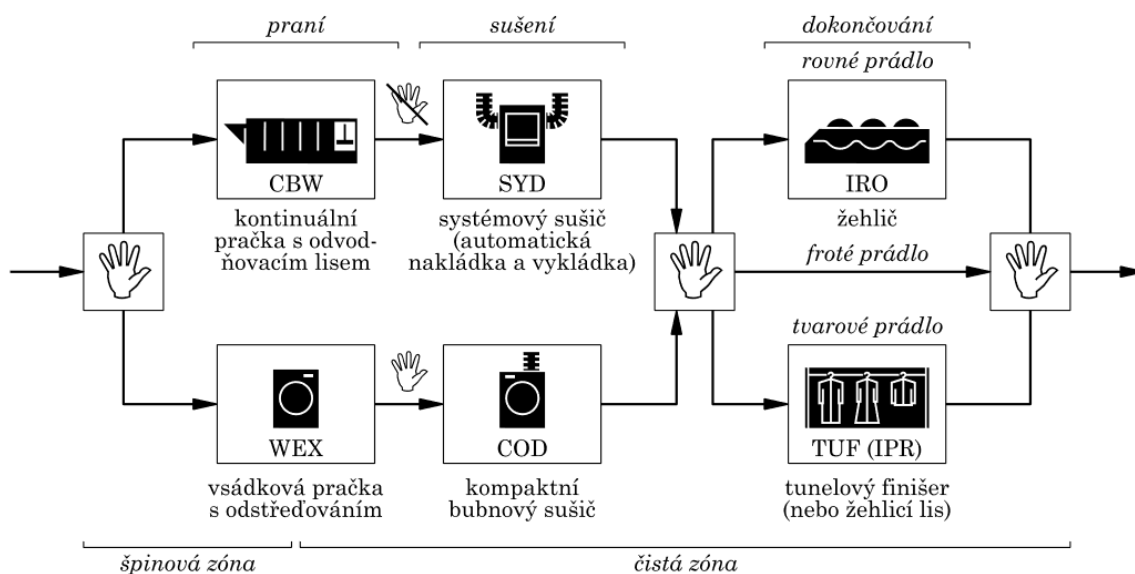


Obr. 11 Schéma procesu priemyselnej práčovne [45]

Čo sa pracovného postupu ako takého týka, tak ten v prípade priemyselnej práčovne pozostáva zo sledu dielčích jednotkových operácií. Bežný pracovný postup profesionálnej údržby bielizne je potom (podľa [45]) nasledujúci:

1. doprava znečistenej bielizne (od zákazníka do práčovne);
2. príjem a dočasné uskladnenie bielizne;
3. triedenie bielizne podľa materiálu a miery znečistenia;
4. pranie (zmáčanie, predpieranie , hlavné pranie, máchánie, finalizácia);
5. odvodnenie;
6. pedsušenie (pred žehlením) alebo sušenie do sucha (froté bielizeň);
7. triedenie rovnej a tvarovej bielizne;
8. dokončovanie (žehlenie a skladanie);
9. oprava (šitie) poškodených kusov a kontrola kvality;
10. balenie a dočasné uskladnenie;
11. expedícia bielizne (doprava čistej bielizne späť k zákazníkovi);

Ako už vyššie uvedený postup údržby bielizne napovedá, technologický proces a chod priemyselnej práčovne je typicky zabezpečovaný, mimo práčok, i sušičkami a žehličmi. Celkovo však je to, práve, delenie bielizne, ktoré určuje strojné vybavenie práčovne. Všeobecne sa bielizeň rozdeľuje do troch hlavných skupín a síce sa rozlišuje: rovná bielizeň (napríklad povlečenia, obrusy), tvarová bielizeň (príkladom košele, blúzky, nohavice) a tzv. froté bielizeň (napríklad uteráky, župany apod.) [45]. Pracovný postup popísaný vyššie a všeobecné technologické schéma je potom vecne znázornené na nasledujúcom obr. 12.



Obr. 12 Všeobecné technologické schéma prevádzky priemyselnej práčovne [45]

Vyššie uvedený text predstavuje len stručný popis či úvod do priemyselnej údržby bielizne a procesu práčovni ako takých. Prevádzka práčovni a problematika s tým spojená je možno pokladať za celkom obširné a aktuálne téma. Čo je, mimo iné, dôvodom vzrastajúceho záujmu o vývoj v tejto oblasti. Z toho dôvodu bola prevedená krátka rešerš na toto téma. Vybrané literárne zdroje, ako články a záverečné práce sumarizuje tabuľka 5 na nasledujúcej strane.

Tabuľka 5 Literárne zdroje na téma energetická stránka prevádzky profesionálnych práčovní

Autori (rok) názov	Popis
[44] Máša, V., Bobák, P., Kuba, P., Stehlík, P. (2013) <i>Analysis of energy efficient and environmentally friendly technologies in professional laundry service</i>	Autori článku predstavujú koncept profesionálnej práčovne a relevantné opatrenia z hľadiska energetickej náročnosti. Text článku sa zameriava i na posúdenie vplyvu na životné prostredie spolu s finančnými aspektami. Článok porovnáva prevádzky v troch európskych štátoch (Nemecko, Česká republika a Francúzsko).
[46] Bobák, P., Pavlas, M., Máša, V., Jegla, Z., Kšenzuliak, V. (2012) <i>Heat Recovery in Professional Laundry Care Process</i>	Autori tohto dokumentu sa zaoberajú rôznymi špecifickými problémami súvisiacimi s problematikou priemyselných práčovní, ktoré je nutno identifikovať pre návrh efektívneho systému rekuperácie tepla. V práci sa uvádza aj niekoľko návrhov na dizajn. Pozornosť je tiež venovaná metódam merania vrátane originálneho softvéru na spracovanie dát. V príspevku je prezentovaná aj prípadová štúdia návrhu výmenníka tepla pre rekuperáciu tepla na základe požiadaviek z reálnych prevádzok práčovne.
[47] Bobák, P., (2014) <i>Snižování energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla</i>	Autor sa vo svojej dizertačnej práci zaoberá procesom profesijnej údržby bielizne a spôsobmi ako znižovať požiadavky na energie a ďalšie prevádzkové komodity.
[48] Lima T. P., Dutra J. C. C., Primo A. R. M., Rohatgi J., Ochoa A. A. V. (2015) <i>Solar water heating for a hospital laundry: A case study</i>	Autori sa v článku zaoberajú myšlienkou využitia solárnej energie pre prípravu teplej vody v nemocničných práčovniach formou prípadovej štúdie. Článok prezentuje numerický model pre posúdenie technických a finančných aspektov solárneho systému pre ohrev vody.
[49] Bühler F., Holm F., Zühlsdorf B., Elmegaard B. (2020) <i>Energy integration and electrification opportunities in industrial laundries</i>	Autori v článku poukazujú na vysokú energetickú záťaž práčovní s cieľom elektrifikácie a dekarbonizácie celej prevádzky za účelom zníženia spotreby primárnej energie a uhlíkovej stopy. Text ďalej analyzuje procesy priemyselnej práčovne za účelom stanovenia požiadavkou na ohrev procesu a identifikácie zdrojov odpadového tepla. Primárnym prvkom pre prípadovú štúdiu elektrifikácie objektu sú v článku uvažované tepelné čerpadlá.
[50] Yandri E. a kolektív. (2020) <i>Potential Energy Efficiency and Solar Energy Applications in a Small Industrial Laundry: A Practical Study of Energy Audit</i>	Autori v článku analyzujú potenciál úspor primárnych energií (elektriny, vody, zemného plynu) priemyselných práčovní v zmysle energetického auditu. Na základe analýzy priemyselnej práčovne sú potom poskytnuté prípadné spôsoby a princípy riešení pre zníženie primárnej energie. Článok tak ponúka riešenia v zmysle využitia najmä obnoviteľných strojov.

Tabuľka 5 na predchádzajúcej strane predstavuje vybrané práce na téma priemyselných práčovní a ich vysokej energetickej záťaže. Všeobecne podkladov k tejto problematike je viac a to najmä v oblasti nakladania s odpadovými vodami z pracovničkého procesu. Vyššie uvedené a ďalšie články vyšetrovanej problematiky len potvrdzujú tvrdenie, že sa jedná o energeticky zaujímavý proces a celkom aktuálnu problematiku.

Ako z predchádzajúceho textu plynie, príklad, analýza vhodnosti a posúdenie výhod či nevýhod integrácie tepelného čerpadla do menšieho priemyselného podniku bude slúžiť prípadová štúdia zameraná na konkrétne vybranú prevádzku – práčovňu. Metodika prípadovej štúdie respektíve, koncepčný návrh integrácie tepelného čerpadla do zvolenej prevádzky bude pozostávať zo sledu niekoľkých na seba nadväzujúcich krokov:

1. popis a predstavenie základných informácií o zvolenom podniku;
2. analýza tepelnej záťaže a určenie aktuálneho množstva odpadového tepla;
3. voľba typu a vymedzenie účelu tepelného čerpadla;
4. stanovenie prevádzkových a hlavných parametrov tepelného čerpadla;
5. technicko-ekonomická rozvaha procesu, stanovenie počiatočných a prevádzkových nákladov a stanovenie teoretickej doby návratnosti implementácie TČ do zvolenej prevádzky;
6. zhrnutie a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov, posúdenie potenciálu aplikácie tepelných čerpadiel do vybraného procesu.

6 Prípadová štúdia I – Priemyselná práčovňa

V predchádzajúcej kapitole bol pre účely prípadovej štúdie zvolený konkrétny proces, profesijná údržba bielizne. Táto kapitola predstaví konkrétnu prevádzku, priemyselnú práčovňu v Českej republike. Vybraná práčovňa ponúka kompletný servis údržby bielizne ako pranie, sušenie a žehlenie. Zvoz a rozvoz bielizne je riešený individuálne podľa potrieb zákazníka. Práčovňa svoje služby poskytuje najmä hotelom, reštauráciám, penziónom, bytovniam, rekreačným strediskám a internátom.

6.1 Základné technické a prevádzkové údaje

Proces profesijnej údržby bielizne vybranej práčovne je charakteristický kapacitou približne 10 ton bielizne za deň. Dňom sa v tomto slova zmysle rozumie jedna osemhodinová smena. Spoľahlivý chod práčovne zabezpečuje elektrická energia a zemný plyn, ktoré sú, z hľadiska energií, kľúčovými vstupmi pre zabezpečenie požadovanej služby. Elektrická energia slúži ako hlavný zdroj v prípade napájania použitých strojov (práčky, sušičky apod.) a zemný plyn sa potom používa pre ohrev prácej kúpele. Mimo energií je hlavnou vstupnou surovinou voda. Vybraná prevádzka bola pôvodom navrhnutá pre maximálnu hodinovú spotrebu vody 15 m^3 za hodinu. Reálne sa však táto hodnota pohybuje okolo $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Pohon strojov je zväčša zabezpečovaný prísunom elektrickej energie, bežne zo siete. Zemný plyn slúži predovšetkým ako vstup do vyvíjača pary. Táto para sa potom využíva pre vytápanie žehličov a k priamemu ohrevu vodnej kúpele v tunelových práčkach formou priameho nástreku. Z hľadiska vody je prevádzka, ako už bolo spomínané vyššie, napájaná pitnou vodou o objemovom toku približne $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a teplote zhruba $11 \text{ }^\circ\text{C}$. Táto vstupná voda slúži ako napájacia voda dvoch tunelových pračiek situovaných v prevádzke. Aby dochádzalo k energetickej úspore, je táto voda predhrievaná výmenníkmi tepla. Vstupná voda sa tak, ešte pred vstupom do pračiek, rozdeľuje do dvoch paralelných prúdov, pričom jeden z nich prechádza výmenníkom tepla voda – vzduch a druhý zasa výmenníkom voda – voda. Teplonosnými médiami v prípade týchto výmenníkov sú odpadové prúdy z procesu. V prípade vody je to odpadová voda, ktorá ešte pred dosiahnutím nádrže na odpadovú vodu prechádza týmto výmenníkom, kde predáva svoje teplo. V prípade vzduchu je potom vstupná voda predhrievaná odpadovým, horúcim vzduchom z žehliča. Takto ohriate prúdy vstupnej vody sa potom stretávajú v zásobníku vody, akumuláčnej nádrži, kde teplota dosahuje hodnôt 40 až $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Z tohto zásobníka potom voda už priamo smeruje do spomínaných tunelových práčok. Po využití vody v pracovnom procese je voda považovaná za odpadovú. Ochladená odpadová voda potom opúšťa celkovo práčovňu o teplote približne $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Výmena vzduchu je v práčovni riešená len minimálne. Napriek tomu, že je v prevádzke inštalovaná vzduchotechnika a teoreticky tak i odvod ohriateho vzduchu z procesu. Prakticky sa výmena vzduchu rieši len prostredníctvom privádzania čerstvého vzduchu spomínanou vzduchotechnikou. Prívod čerstvého vzduchu zabezpečujú dva kompresory, pričom čerstvý vzduch z exteriéru je čerpaný, takticky, z miesta kde je väčšinu dňa tieň. Odvod či odťah vzduchu je riešený len prostredníctvom strešných klapkových okien, ktoré zabezpečujú prirodzenú výmenu vzduchu, i keď len v minimálnom množstve (vzhľadom na veľkosť budovy).

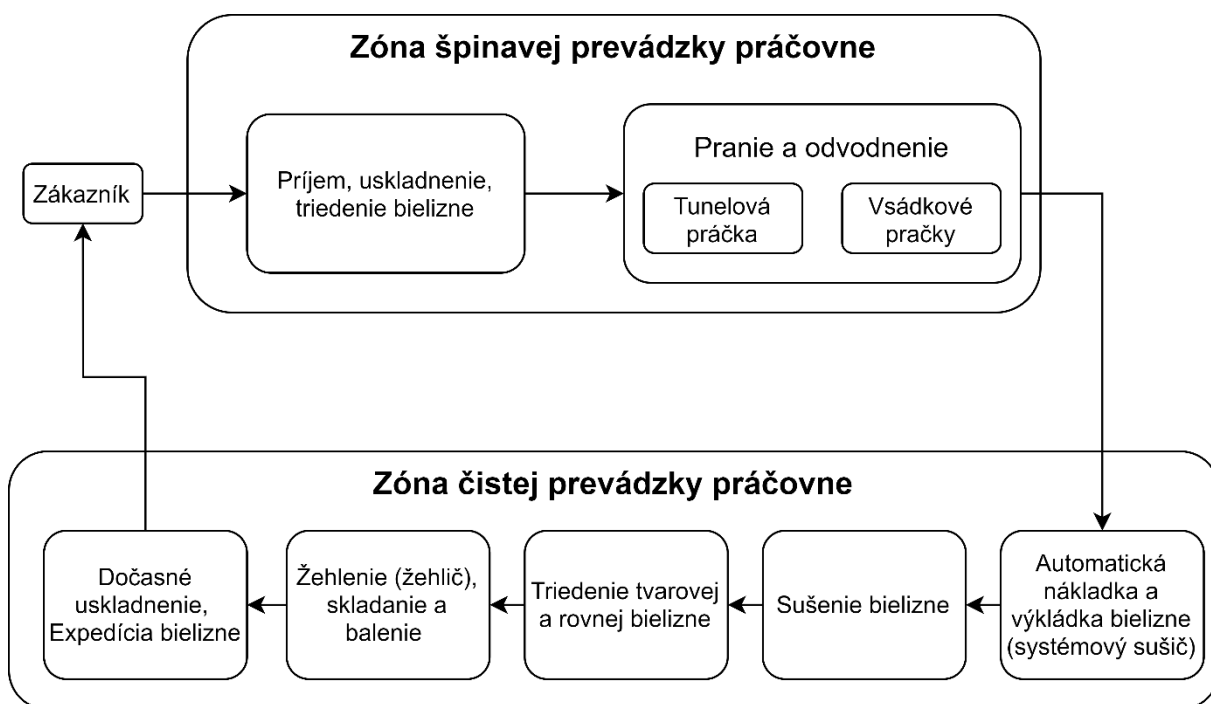
Fakt, že výmena vzduchu je riešená len v obmedzenom rozsahu, spôsobuje vyššie nároky z hľadiska mikroklimatických podmienok. Dôsledkom tak môže byť nedokonalá výmena vzduchu, zvýšená teplota alebo i vyššie hodnoty vlhkosti. Z hľadiska hygienických požiadavkou na vnútorné prostredie sa potom vnútorné

mikroklimatické podmienky a ich limity, predovšetkým teplota, pohybujú (podľa tabuľka 4) pri horných hraniciach.

Proces profesijnej údržby bielizne vybranej práčovne viacmennej odpovedá schéme uvedenej na obr. 12. Prevádzka však ako taká pozostáva z viac než jednej jednoduchej budovy. Napriek tomu, že sú tieto priestory spolu plne prepojené, pre účely koncepčného návrhu ich treba brať ako oddelené, separátne objekty. Princiipiálne je celá prevádzka rozdelená do troch základných zón:

- Zóna špinavej prevádzky práčovne – v týchto priestoroch sa nachádzajú práčky a tunelové práčky, priestory pre náklad a výklad bielizne
- Zóna čistej prevádzky práčovne – priestory slúžiace pre finalizáciu bielizne, nachádzajú sa tu sušičky a žehliče. Súčasťou tejto zóny je aj kotolňa s kompresormi a vyvíjačom pary.
- Administratívna časť práčovne – tieto priestory obsahujú kancelárie, sklady a technické miestnosti.

Predmetom diplomovej práce bude zóna čistej prevádzky práčovne keďže je v týchto priestoroch sústredená väčšina strojného vybavenia. So strojným vybavením potom priamo súvisí i množstvo odpadového tepla a tepelné zisky, ktoré sa v tomto priestore odhadujú najvyššie. Blokové schéma odpovedajúce vyšetrovanej prevádzke respektíve zóne čistej a špinavej prevádzky práčovne je potom znázornené na nasledujúcom obr. 13.



Obr. 13 Blokové schéma procesu vo vybranej práčovne

6.2 Tepelná energia

Nasledujúca podkapitola sa bude zaoberať hodnotením prevádzky z hľadiska nakladaní s tepelnou energiou. Primárnym výstupom tak bude stanovenie tepelnej záťaže a aspoň približne stanovené množstvo odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu.

Práčovňa ako proces je všeobecne charakteristický vysokou energetickou záťažou. Energetická záťaž v podobe elektrickej energie a zemného plynu respektíve pary sa postupne transformuje, mení na energiu tepelnú, ktorá sa v procese postupne akumuluje. Práčovnícky proces predstavuje významný zdroj tepelných ziskov. Drvivá väčšina tohto tepla je rozptýlená do okolitého prostredia a len zlomok je ďalej efektívne znovu využívaný.

Primárnymi nositeľmi tepelnej energie v práčovni sú para, voda a predovšetkým vzduch. V prípade zdrojov tepla je to trocha zložitejšie. Úlohou koncepčného riešenia je vytipovanie dominantných zdrojov odpadového tepla. V prípade vyšetrovanej práčovne, za dominantné zdroje tepla možno považovať predovšetkým **stroje nachádzajúce sa v prevádzke** ako sú práčky, sušičky, žehliče či kompresory. Všetko toto strojné vybavenie prevádzky predstavuje zásadný, i keď nie účelný, zdroj tepla. Tak ako uvádza predošlá kapitola 3, celková tepelná záťaž je tvorená tepelnými ziskami ako z interiéru tak aj z exteriéru.

Množstvo odpadového tepla v danej prevádzke je ovplyvňovaný viacerými faktormi, medzi tie základné a dominantné možno radiť tieto:

- typ, počet, zaťaženie strojov (práčky, sušičky, žehliče a pod.);
- pracovná doba prevádzky;
- spôsob výmeny vzduchu (prúdenie, rýchlosť a množstvo vzduchu);
- tepelné zisky z exteriéru;
- tepelnoizolačné vlastnosti budovy;

Vyššie zmienené faktory predstavujú len zlomok z celého radu faktorov, ktoré priamo či nepriamo vplyvajú na množstvo a kvalitu odpadového tepla generujúceho sa v interiéri. V závislosti od požadovanej úrovne a riešenia, potom jednotlivé faktory nadobúdajú svoju dôležitosť. V prípade veľmi detailného riešenia je nutno zahrnúť do výpočtu všetky potenciálne zdroje a faktory, ktoré by mohli potenciálne ovplyvniť množstvo tepelnej energie akumulovanej v interiéri. Na druhú stranu, aj v prípade kedy sa jedná len o približný odhad stanovenia množstva tepla, je nutno bezvýhradne vytipovať dominantné zdroje, faktory a neopomenúť tak zásadné vstupné parametre. Príkladom tak môžu byť aj tepelné zisky z exteriéru, ktoré nadobúdajú svoju dôležitosť v závislosti od stavu vyšetrovanej budovy a ročného obdobia.

Pri vyšetovaní tepelnej záťaže či množstva odpadového tepla nejakej konkrétnej prevádzky je, okrem vyššie zmienených zdrojov a faktorov, podstatné množstvo dostupných informácií a dát z reálnej prevádzky. Tieto informácie zásadným spôsobom vstupujú do výpočtov a tým priamo vplyvajú na presnosť a úroveň detailného riešenia. Za ideálnych podmienok by bola spracovaná celková tepelná bilancia prevádzky v zmysle identifikácie jednotlivých prúdov tepelnej energie a ich množstva a objemu od konkrétnych zdrojov. No k tomu by boli bezvýhradne potrebné detailné informácie o prevádzke, vrátane technického stavu budovy pre stanovenie tepelnej záťaže z exteriéru. Z tepelnou bilanciou idú ruka v ruke i merania, ktoré sú zásadným prvkom pri zostavovaní bilancie. Tzn. bolo by potreba zmerať viaceré toky prúdiace prevádzkou ako napríklad prietok vzduchu, množstvo sálajúceho tepla, skutočné príkony technológií či skutočnú teplotu interiéru.

Z vyššie zmienených dôvodov je pre výpočet aktuálne dostupného množstva odpadového tepla zvolený výpočet na základe bilančnej rovnice tepla (viď. rovnica 1.1). Týmto spôsobom sa dá relatívne presne stanoviť aktuálne, celkové množstvo odpadového tepla vo vyšetrovanom priestore. Výhodou tohto prístupu je predovšetkým jeho jednoduchosť v zmysle neuvažovania technologického vybavenia prevádzky. Spomínaný spôsob výpočtu vníma vyšetrovanú prevádzku ako tzv. black box, kedy nie je celkom podstatné čo je obsahom. Mimo toho, že nie sú analyzované jednotlivé, konkrétne príspevky od technológií, rovnako tak do výpočtu nevstupujú externé tepelné zisky. Počíta sa len aktuálne množstvo tepelnej energie obsiahnutom v interiéri v nezávislosti od zdroja v aktuálnom okamžiku. Vzorový výpočet potom uvádza nasledujúca rovnica 6.1.

$$Q_{OT} = \rho_{vz} \cdot V \cdot c_{p,vz} \cdot (T_{int} - T_{ref}) \quad (6.1)$$

kde, Q_{OT} je odpadového tepla [kJ]

ρ je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

V je objem vyšetrovaného priestoru [m^3]

$c_{p,vz}$ je merná tepelná kapacita vzduchu [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_{ref} je referenčná teplota [K]

T_{int} je reálna teplota vyšetrovaného priestoru [K]

Do výpočtu vstupuje niekoľko elementárnych premenných. Pričom len dva parametre súvisia priamo s vyšetrovanou prevádzkou. Reč tak je o objeme a teplote T_{int} . Objem sa stanoví na základe technickej dokumentácie budovy. Problém nastáva v prípade, kedy je prevádzka vybavená niekoľkými zariadeniami, ktoré tento celkový objem vzduchu znižujú. Dôsledkom toho sa stanovuje len približná hodnota objemu vyšetrovaného objektu. Na základe pôdorysu a informácií od majiteľa prevádzky bol stanovený objem vyšetrovaného priestoru – zóny čistej prevádzky pracovne približne na 3938 m^3 . Výpočet objemu sám o sebe vnáša do výpočtu nepresnosť. V prípade teplotnej diferencie sa uvažujú dve teploty T_{ref} a T_{int} . Teplota T_{ref} predstavuje referenčnú hodnotu teploty. Jedná sa tak o teplotu želanú, ktorá by za ideálnych okolností bola nameraná alebo udržiavaná v prevádzke. Hodnota tejto teploty T_{ref} sa stanoví na základe odporúčenia, ktoré je dané hygienickými požiadavkami – legislatívou. Limitné hodnoty potom uvádza vyššie zmienený text v kapitole 4, respektíve tabuľka 4. Hodnota teploty T_{ref} bola na základe odporúčenia stanovená na hodnotu $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na druhú stranu teplota T_{int} je teplota reálne nameraná a aktuálne popisujúca stav vnútorného prostredia. Ako bolo už spomenuté, za ideálnych podmienok by bola k dispozícii celá história teplôt interiéru. Z dôvodu absencie týchto dát bola teplota T_{int} stanovená na základe jednorazového merania. Pre účely tohto merania bol použitý digitálny prenosný teplomer GTH 175/Pt. Princíp merania spočíval v snímaní teploty v miestach vyšetrovaného priestoru tak aby meranie, respektíve hodnoty popisovali celú plochu. Na základe nameraných hodnôt bola stanovená priemerná teplota prevádzky T_{int} na hodnotu $33 \text{ }^\circ\text{C}$.

Merná tepelná kapacita vzduchu je potom funkciou priemernej hodnoty teplôt T_{ref} a T_{int} . Vzhľadom na neistoty spojené s celkovým výsledkom je hodnota mernej tepelnej kapacity $c_{p,v}$ odčítaná z tabuliek pre danú teplotu (priemer teplôt T_{ref} a T_{int}). K tejto priemernej hodnote sa rovnako tak vzťahuje i hodnota hustoty. Hustota sa stanoví obdobne, pre zmienenú teplotu podľa tabuliek suchého vzduchu.

Konkrétne vstupné hodnoty a výsledné množstvo odpadového tepla potom uvádza nasledujúca tabuľka 6.

Tabuľka 6 Vstupné hodnoty a výsledné množstvo odpadového tepla

	Symbol	Hodnota	Jednotka
Hustota vzduchu	ρ_{vz}	1,165	kg·m ⁻³
Objem priestoru	V	3 938	m ³
Merná tepelná kapacita	$C_{p,vz}$	1,01	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Referenčná teplota	T_{ref}	25	°C
Teplota interiéru	T_{int}	33	°C
Odpadové teplo	Q_{OT}	37 067	kJ

Výsledná hodnota daná rovnicou 6.1 tak udáva celkové množstvo odpadového tepla obsiahnutom vo vzduchu v danom okamihu. Zjednodušene sa jedná o tepelnú energiu, teplo, ktoré je vo vyšetrovanej prevádzke navyše. Nutno však brať v úvahu, že hodnota Q_{OT} nie je celkové množstvo odpadového tepla, ktoré sa zhodnotí, ale skôr celkové množstvo odpadového tepla, ktoré je aktuálne k dispozícii. Z vyššie uvedenej tabuľky plynie, že množstvo odpadového tepla je približne 37 000 kJ. Pre porovnanie, priemerná štvorčlenná domácnosť v bytovom dome v českej republike spotrebuje na ohrev vody a vykurovanie bytu približne 68 500 kJ tepla za deň [51].

Najpresnejší výsledok, respektíve výslednej hodnoty odpadového tepla by sa dosiahlo v prípade, kedy by boli k dispozícii ucelené, reálne dáta z prevádzky. Dátami v tomto slova zmysle sa rozumie priebeh a záznam aktuálnej teploty v prevádzke počas pracovných dní. Tieto dáta by, mimo iné, mohli poskytnúť a vytipovať konkrétne časy behom pracovného obdobia, kedy by sa odpadové teplo vyskytovalo v najväčšej miere. Rovnako tak by bolo dôležité zmapovať priebeh teplôt v závislosti od výšky vyšetrovaného priestoru. Tieto údaje by tak mohli teoreticky zamedziť nadbytočným stratám v podobe elektrickej energie pre pohon kompresoru tepelného čerpadla alebo inej technológie.

Na druhú stranu, negatívom výpočtu odpadového tepla podľa bilančnej rovnice je fakt, že sa jedná o energiu v priamom slova zmysle. Výsledná hodnota Q_{OT} tak vyjadruje množstvo tepelnej energie v danom okamžiku. To so sebou prináša negatívny efekt, kedy túto hodnotu nie je možné použiť napríklad pre návrh klimatizačných, vetracích alebo vykurovacích systémov. Pre tieto účely je nutno poznať, stanoviť tepelnú záťaž vyšetrovaného objektu. Teda vlastne tepelný výkon, ktorý je priebežne akumulovaný v interiéri. Metodika a praktický postup výpočtu tepelnej záťaže bol predstavený v kapitole 3, ktorá popisuje výpočet podľa normy ČSN 730548. Na základe tohto prístupu je možné stanoviť príspevky tepelnej záťaže od jednotlivých technológií vyskytujúcich sa vo vybranej prevádzke. Samotný výpočet sa potom riadi vzťahom podľa rovnice 3.3, respektíve nasledujúcej rovnice 6.2 .

$$Q_m = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot P \quad (6.2)$$

kde, P je príkon [W]

c_1 je súčiniteľ súčasnosti [-]

c_2 je zvyškový súčiniteľ pri odsávaní tepla [-]

c_3 súčiniteľ zaťaženia stroja [-]

Do výpočtu vstupuje príkon jednotlivých technológií, ktorý bol stanovený na základe výrobných štítkov daných technológií. Ďalej sa v rovnici 6.2 vyskytujú tri

súčinitele, koeficienty, ktoré korigujú daný príkon. Výsledná hodnota tepelných ziskov vybraných technológií sa potom stanoví súčinom týchto parametrov.

Dosiahnuté výsledky nemusia pôsobiť dôveryhodným spôsobom. Problém spočíva najmä v určovaní jednotlivých korigujúcich koeficientov c_1 až c_3 . Tie sa len s ťažkosťou dajú stanoviť celkom presne bez detailných znalostí prevádzky. Z toho dôvodu sú tieto súčinitele len odhadnuté na základe informácií od majiteľa prevádzky. Súčiniteľ využitia c_3 , ktorý rešpektuje skutočnú spotrebu sa v prípade sušičiek a kompresorov uvažuje rovnaký a síce 0,8. Zvyškový súčiniteľ c_2 rešpektuje skutočnosť, že sa časť tepelného výkonu nedostáva do okolitého prostredia z dôvodu priameho odsávania. Jeho hodnota je odhadovaná na 0,5. Súčiniteľ súčasnosti c_1 zohľadňuje súčasnosť prevádzky jednotlivých zariadení, v danej prevádzke sa predpokladá maximálne využitie a teda je tento súčiniteľ rovný 1. Výsledná tepelná záťaž vyšetřovaného priestoru a jednotlivé príspevky od vybraných technológií potom súhrne uvádza tabuľka 7. V tabuľke je, okrem tepelných ziskov od technológií, pre ilustráciu a porovnanie zahrnuté i teplo od ľudí. Všeobecne sa citeľné teplo od ľudí stanoví podľa rovnice 3.1. No ako uvádza popis v kapitole 3.1.1, výsledná hodnota sa musí korigovať v závislosti od činnosti (typu práce) osôb. Výsledný výpočet tepelných ziskov od ľudí sa tak potom riadi podľa nasledujúcej rovnice 6.3.

$$Q_l = (4,8 \cdot n_l(36 - t_{int})) \cdot 0,85 \quad (6.3)$$

kde, Q_l je tepelný zisk od ľudí [W]

n_l je počet ľudí [-]

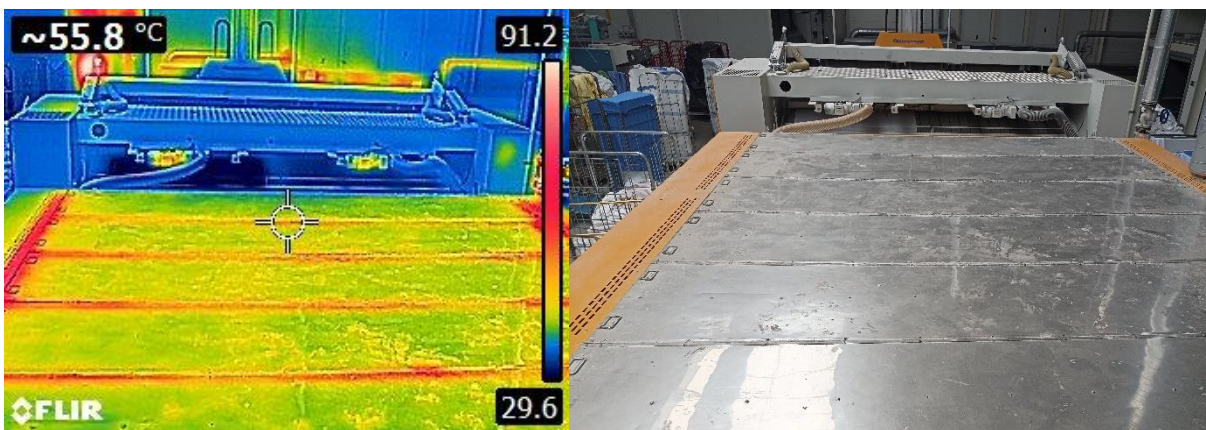
t_{int} je aktuálna teplota vzduchu [°C]

Pre vyšetřovaný prípad pracovne sa uvažuje činnosť človeka ako viacmennej stojaca, ľahká práca. Takto definovaný typ činnosti odpovedá pevne stanovenej hodnote citeľného tepla, podľa tabuľky 6 prílohy 1 normy ČSN 730548, 48 W. Do výpočtu vstupuje ešte počet ľudí, zamestnancov a aktuálna teplota vzduchu interiéru. V prípade vybranej pracovne sa uvažuje 18 zamestnancov, z čoho štyria sú muži. Fakt, že sa v prevádzke vyskytujú predovšetkým ženy znamená, že výsledná hodnota musí byť korigovaná – násobená konštantou 0,85 (viď. kapitola 3.1.1). Dosadenie do rovnice 6.2 tak bude na dvakrát, raz pri počte osôb $n_l = 4$ a druhý krát pri počte osôb 14 a výsledná hodnota sa ešte prenasobí koeficientom 0,85. Aktuálna teplota vzduchu vyšetřovanej prevádzky bola stanovená už vyššie na 33 °C.

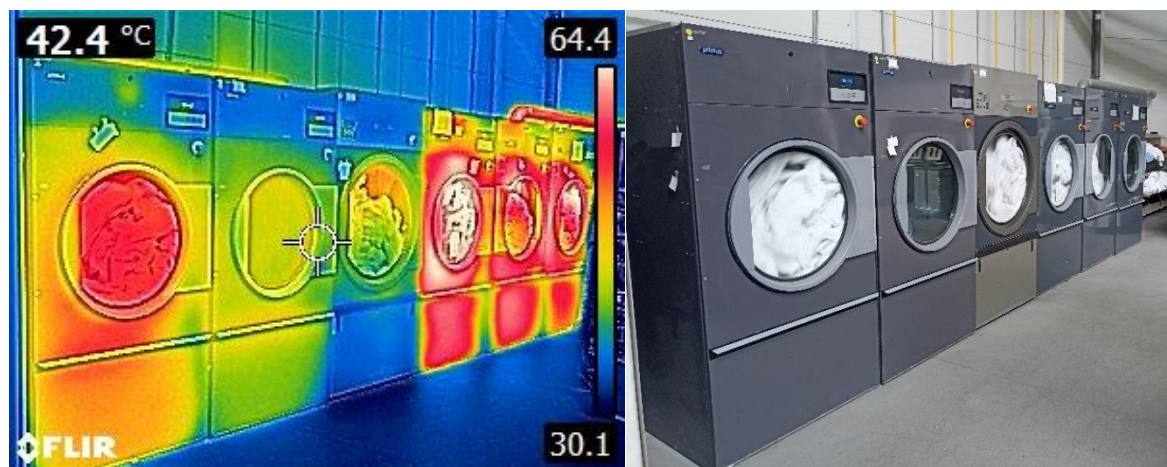
Tabuľka 7 Tepelná záťaž interiéru pracovne

Zdroj tepla	Počet [-]	P [kW]	c_1 [-]	c_2 [-]	c_3 [-]	Q_{TZ} [kW]
Sušička DX34	6	48	1	0,5	0,8	115,2
Sušička DX77	3	115,8	1	0,5	0,8	139
Žehlič HPM	2	47	1	0,5	1	47
Kompresor Alergo	1	3	1	1	0,8	2,4
Kompresor Renner	1	3	1	1	0,8	2,4
Generátor pary	1	1093	1	0,2	1	218,6
Zamestnanci	18	-	-	-	-	0,19
Suma						526

Výsledná tepelná záťaž interiéru vyšetrovanej prevádzky bola podľa predchádzajúcej tabuľky stanovená na hodnotu 526 kW. Nutno však pripomenúť, že sa jedná skutočne len o orientačnú hodnotu. Dôvodom sú neistoty vstupujúce do výpočtu v podobe súčiniteľov c_1 až c_3 . Ďalším dôvodom je tiež fakt, že nie sú uvažované všetky technológie vyskytujúce sa v prevádzke. Pre tento názorný príklad tak boli vybrané len tie zariadenia, ktoré majú potenciál najvyššej tepelnej záťaže. Do celkovej tepelnej záťaže sú však počítané i tepelné zisky od kompresorov a od ľudí napriek tomu, že tepelná záťaž od týchto zdrojov je v porovnaní s ostatnými rádovo nižšia. Vzhľadom k týmto výsledkom je tak možné konštatovať, že tepelné zisky od ľudí a technológií s rádovo nižším príkonom je vo vybranej prevádzke je možné zanedbávať. Napriek negatívnemu postojú k dôveryhodnosti výsledku je zrejmé, že tepelná záťaž vyšetrovanej prevádzky je tak či onak celkom vysoká. Vysoká najmä v porovnaní s tepelnou záťažou stanovovanou iných priemyselných hál. Napríklad priemyselná hala s šiestimi vypaľovacími pecami sa vyznačuje tepelnou záťažou 230 kW [52]. Správnosť výsledných hodnôt tepelnej záťaže však podporujú, i keď nie v priamom slova zmysle, záznamy termokamery počas návštevy vybranej práčovne zobrazené na nasledujúcich obrázkoch. Pričom fotografii na ľavej strane odpovedá záznam z termokamery na strane pravej nasledujúcich obrázkov. Pre ilustráciu budú zobrazené záznamy priemyselného žehliča a rady sušičiek.



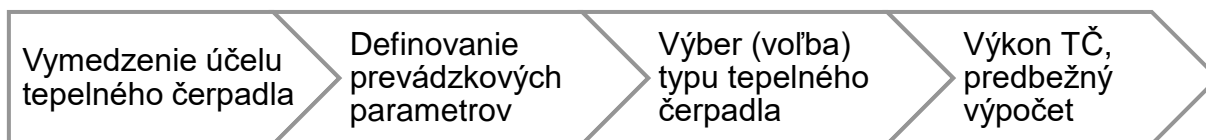
Obr. 14 Záznam termokamery žehliča Kannegiesser HMP 12-35-3



Obr. 15 Záznam termokamery sušičiek Primus DX34

7 Prípadová štúdia II – Integrácia tepelné čerpadla

Tepelným čerpadlám bola venovaná celá kapitola 2, ktorá popisuje základné princípy a vlastnosti tepelných čerpadiel. Okrem vyššie uvedeného, sa tepelné čerpadlá vyznačujú svojou univerzálnosťou. V praxi to znamená, že pre začlenenie tepelného čerpadla do prevádzky, či už stávajúcej alebo novo budovanej, nie sú zväčša vyžadované vysoké nároky v podobe fyzických rozmerov, zložitosti montáže alebo všeobecne náležitosti spojené s predprípravou miesta pre usadenie tepelného čerpadla. Samotnému návrhu či výberu tepelného čerpadla predchádza niekoľko krokov. Rámcový postup koncepčného riešenia potom ilustruje nasledujúci obr. 16.



Obr. 16 Postup koncepčného riešenia integrácie TČ

Schematicky zaznačený rámcový postup integrácie tepelného čerpadla znázornený vyššie popisuje len základné, nijako detailné, no za to nepostrádateľné kroky koncepčného návrhu. Jednotlivé fáze na seba priamo nadväzujú a v niektorých prípadoch sa i mierne prekrývajú. Preto je nutné brať proces koncepčného návrhu ako celok a aspoň čiastočne si uvedomovať následné kroky. Zmieneným postupom sa bude riadiť i obsah nasledujúceho textu tejto kapitoly a jednotlivým krokom či štádiám budú venované samostatné podkapitoly.

7.1 Vymedzenie účelu tepelného čerpadla

Azda prvým krokom v prípade návrhu každej technológie je vymedzenie účelu. Otázka potom môže znieť: aké sú požiadavky na predmetnú technológiu, aký účel má táto technológia, čo chceme dosiahnuť zaradením tejto technológie do procesu. Odpoveď na tieto otázky položí základy pre návrh koncepčného riešenia.

Vo vyšetrovanom prípade, vybranej prevádzky práčovne, sa naskytá niekoľko možností integrácie tepelného čerpadla. Tepelné čerpadlo tak, teoreticky, môže zastávať viac než jeden účel. Potenciálne by TČ mohlo plniť úlohu v podobe ohrevu napájacej vody do pračiek. Ďalšou možnosťou je využitie TČ s obráteným cyklom ako zdroj chladu, v tom prípade by TČ plnilo funkciu klimatizácie. Eventuálne by do budúca mohlo TČ slúžiť ako zdroj tepla pre odpadku.

Pre koncepčný návrh, ktorý je predmetom tejto práce je zvolená možnosť, kedy účelom tepelného čerpadla bude ohrev vody vstupujúcej do tunelových pračiek. Dôvodom tejto voľby je jednak jeho priamočiarosť a tiež jeho praktickosť. Chod práčovne sa bez tohto vybraného úkonu len ťažko obíde čoho dôsledkom je, maximálne využitie tepelného čerpadla.

S vybranými funkciami potom ide ruka v ruke i voľba pracovných médií, teda aké médium bude zdrojom nízko potenciálneho tepla a akému médiu bude toto zhodnotenú a navýšené teplo predávané. Čo sa pracovného média na strane výparníku týka, už predošlá kapitola naznačila, že predmetom prípadovej štúdie bude odpadové teplo obsiahnuté vo vzduchu. Teda primárnym médiom je vzduch interiéru. Na strane kondenzátora je to, podľa zvoleného účelu, voda. Ktojej vlastnosti sú z časti nastavené daným procesom.

7.2 Prevádzkové parametre

Druhým krokom je definovanie prevádzkových parametrov. Tieto parametre popisujú očakávaný alebo predpokladaný stav prostredia a podmienky za ktorých bude technológia prevádzkovaná. Jedná sa o vstupné hodnoty na základe ktorých sa volí alebo navrhuje konkrétna jednotka či celý systém. Tieto hodnoty sú špecifické pre každý jeden proces a konkrétnu prevádzku. Rovnako tak závisí i od typu navrhovanej technológie a parametroch, ktoré táto technológia vyžaduje. Vo všeobecnosti môže byť týchto parametrov mnoho, no nie všetky sú za každých okolností celkom potreba. Pre vybranú prevádzku pracovne a implementácie tepelného čerpadla budú rozhodujúce parametre vnútorného prostredia (vzduchu interiéru) a tiež špecifiká média, ktoré je na strane kondenzátora tepelného čerpadla – vody. Všeobecne budú predmetom záujmu práve tieto parametre:

- teplota vzduchu interiéru T_{int} ;
- teplota napájacej vody $T_{W,in}$;
- teplota vody na výstupe $T_{W,out}$;
- množstvo vody;

Teplota vzduchu v interiéri prevádzky T_{int} , teda skutočná teplota vzduchu bola už skôr stanovená a použitá pre výpočet množstva odpadového tepla (viď. tabuľka 6). Teplota napájacej vody je rovnako tak daná a jej hodnota plynie z popisu prevádzky v kapitole 6.1 ($T_{W,in} = 11 \text{ °C}$). Podobne je na tom i teplota na výstupe, tj. požadovaná výsledná teplota vody vstupujúca do pračiek, respektíve zdržiavajúca sa v akumuláčnej nádrži. Hodnota tejto teploty slabo kolíše v rozmedzí 40 až 45 °C, pričom teplota vody by nemala presiahnuť teplotu 45 °C kvôli negatívnemu vplyvu na tesnenie odvodňovacieho lisu. Množstvom vody sa v danom slova zmysle rozumie hmotnostný prietok. Ten je daný charakterom prevádzky na hodnotu $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. No vybraná prevádzka už oplýva vybranými technológiami pre predohrev vody do pračiek. A to za využitia odpadového tepla z žehliča a odpadovej vody. Pre koncepčný návrh sa bude uvažovať situácia bez výmenníku tepla voda – voda. Zmienovaný výmenník tepla zastával ohrev vody približne z 43 %, tzn. že tento výmenník bol schopný ohriať približne $4,3 \text{ m}^3$ vody za hodinu. Pri teoretickej integrácii tepelného čerpadla pre tieto účely by tak TČ potom malo pokryť minimálne rovnaký ohrev $4,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vody. Tento údaj tak bude smerodajným vstupom v prípade návrhu tepelného čerpadla. Konkrétne hodnoty prevádzkových parametrov uvádza nasledujúca tabuľka 8.

Tabuľka 8 Prevádzkové parametre

	Symbol	Hodnota	Jednotka
Teplota vzduchu interiéru	T_{int}	33	°C
Teplota vody na vstupe	$T_{W,in}$	11	°C
Výstupná teplota vody	$T_{W,out}$	40	°C
Hmotnostný tok vody	\dot{m}_w	4,3	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

7.3 Voľba typu tepelného čerpadla

Predmetom tejto podkapitoly bude výber, voľba tepelného čerpadla. Podľa kapitoly 2 sa naskytá hneď niekoľko možností. V tomto zmysle sa myslí výber TČ podľa pracovného cyklu, pracovných médií, prevedenia typu split alebo kompaktné a neskôr i výkonu.

Z hľadiska pracovného cyklu sa principiálne naskytajú dve možnosti, a síce kompresorový alebo sorpčný typ čerpadla. Jedným z primárnych ukazovateľov voľby,

výberu TČ je aktuálna situácia na trhu a s tým súvisiaca dostupnosť v prípade komerčných technológií. Všeobecne je možné konštatovať, že kompresorové TČ sú niekoľkonásobne viac rozšírené ako tie sorpčné a to aj v prípade priemyselného zamerania. Z toho dôvodu je pre účely koncepčného návrhu volený práve kompresorový typ tepelného čerpadla.

Ďalším krokom v prípade výberu TČ je voľba pracovných médií. Teda aký typ média bude na strane výparníku a kondenzátora. Z predchádzajúceho textu celkom jasne vyplýva, že sa bude jednať o tepelné čerpadlo typu vzduch – voda. Na strane výparníku tak bude interiérový vzduch ako nositeľ nízko potenciálového tepla. Na strane kondenzátora to bude napájacia voda.

Otázke prevedenia tepelného čerpadla sa venuje kapitola 2.2.4. Ako už popis v zmienenej kapitole naznačuje, oba spôsoby prevedenia (split i kompaktné) sa vyznačujú určitými výhodami i nevýhodami. Koncepčný návrh bude uvažovať tepelné čerpadlo v kompaktnom prevedení. Dôvodom je predovšetkým univerzálnosť tohto riešenia, čím je myslená jeho, relatívne, jednoduchá implementácia do stávajúcej prevádzky. Tepelné čerpadlo bude v tomto prípade tvoriť jeden celok bez nutnosti zložitej montáže v prípade osadenia TČ do prevádzky.

Pre účely koncepčného riešenia **bolo zvolené kompresorové tepelné čerpadlo typu vzduch – voda** v kompaktnom prevedení. S voľbou tepelného čerpadla však úzko súvisí i voľba pracovnej látky – chladiva. Vlastnosti jednotlivého chladiva majú mimoriadne vysoký vplyv na chod tepelného čerpadla a jeho vlastností. Výber chladiva je tak celkom zásadný pre dosiahnutie vysokého výkonu a zároveň nízkych prevádzkových nákladov vrátane nízkeho vplyvu na životné prostredie. V súčasnosti sa medzi najviac používané chladivá radia syntetické chladivá zo skupiny HFC (viď. kapitola 2.4, obr. 8), teda fluórované uhľovodíky a ich zmesi. Do tejto skupiny sa radia chladivá ako R410A, R32, R134a, R407c a ďalšie. Z prírodných chladív sa potom používajú zväčša R290 (propán) alebo R729 (oxid uhličitý). Pre účely koncepčného návrhu integrácie tepelného čerpadla budú postupne posudzované štyri chladivá z vyššie vymenovaných. Predmetom výpočtu tak potom budú chladivá R410A, R407C, R290 a R134a, ktoré sa radia k jedným z najpoužívanejších chladívam [53]. Z hľadiska dopadu na životné prostredie, respektíve z porovnania hodnoty GWP vybraných chladív plynie skutočnosť, že propán (R290) je z tohto hľadiska najprívetivejší, keďže sa hodnota GWP pohybuje rádovo v jednotkách. Najhoršie potom vychádza chladivo R410A, o niečo lepšie je na tom R407C a spomedzi syntetických chladív vychádza najlepšie R134a.

Termodynamické vlastnosti a diagramy tlaku v závislosti na entalpii (p-h diagramy) vybraných chladív potom uvádza napríklad [54] alebo voľne dostupný software Coolselector 2 ([55]), ktorý mimo iné obsahuje i kalkulátor termodynamických vlastností bodov termodynamického cyklu.

7.4 Výpočet tepelného čerpadla

V tejto fáze koncepčného riešenia je už známy účel, prevádzkové parametre i všeobecný typ tepelného čerpadla. Ďalším krokom tak je predbežný výpočet základných parametrov tepelného čerpadla. Avšak pred tým, ako sa pristúpi k samotnému výpočtu, je nutno stanoviť tepelný výkon, ktorým by TČ malo disponovať. Účelom TČ podľa predchádzajúceho textu je ohrev 4,3 m³ napájacej vody za hodinu z teploty približne 11 °C na približne 45 °C. Pre účely koncepčného riešenia sa zjednodušene predpokladá, že výkon tepelného čerpadla je rovný množstvu tepelného výkonu potrebného pre ohrev vody za daných podmienok. Výkon potrebný pre ohrev vody sa stanoví podľa bilančnej rovnice tepla (viď. rovnica 7.1).

$$Q_{OV} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{W,out} - T_{W,in}) \quad (7.1)$$

kde, Q_{OV} je tepelný výkon pre ohrev vody [kW]

\dot{m}_w je hmotnostný tok vody [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

$c_{p,w}$ je merná tepelná kapacita vody [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

$T_{W,in}$ je vstupná teplota vody [K]

$T_{W,out}$ je výsledná (požadovaná) teplota vody [K]

Do výpočtu vstupujú premenné ako je hmotnostný prietok, teploty popisované vyššie a merná tepelná kapacita vody, ktorá sa stanoví podobne ako tomu bolo v prípade výpočtu odpadového tepla – z tabuliek v závislosti od teplôt vody na vstupe a výstupe. Hmotnostný prietok vody sa uvádza v $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, avšak do výpočtu vstupuje v kilogramoch za sekundu. Z toho dôvodu je nutno túto hodnotu prepočítať v závislosti od hustoty vody. Vstupné hodnoty a výsledný tepelný výkon uvádza tabuľka 9.

Tabuľka 9 Vstupné hodnoty a tepelný výkon pre ohrev vody

	Symbol	Hodnota	Jednotka
Hustota vody	ρ_w	994,2	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Hmotnostný prietok vody	\dot{m}_w	1,188	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Merná tepelná kapacita vody	$c_{p,w}$	4,18	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Teplota vody na vstupe	$T_{w,in}$	11	$^{\circ}\text{C}$
Teplota vody na výstupe	$T_{w,out}$	45	$^{\circ}\text{C}$
Tepelný výkon pre ohrev vody	Q_{OV}	168,78	kW

Pre účely koncepčného návrhu sa uvažuje výkon kondenzátora zhodný s tepelným výkonom potrebným pre ohrev vody (t.j. $Q_{OV} = Q_{kond}$). **Podľa vyššie uvedenej tabuľky by tak navrhované tepelné čerpadlo malo disponovať tepelným výkonom aspoň 168,78 kW.** Pri porovnaní tohto minimálneho výkonu TČ a celkovej tepelnej záťaže (viď. tabuľka 7), ktorá bola stanovená na hodnotu 526 kW je možné konštatovať, že odpadové teplo vo vyšetrovanom priestore je dostupné a so značnou rezervou. Požadovaný výkon TČ odpovedá približne 32 % dostupného odpadového tepla.

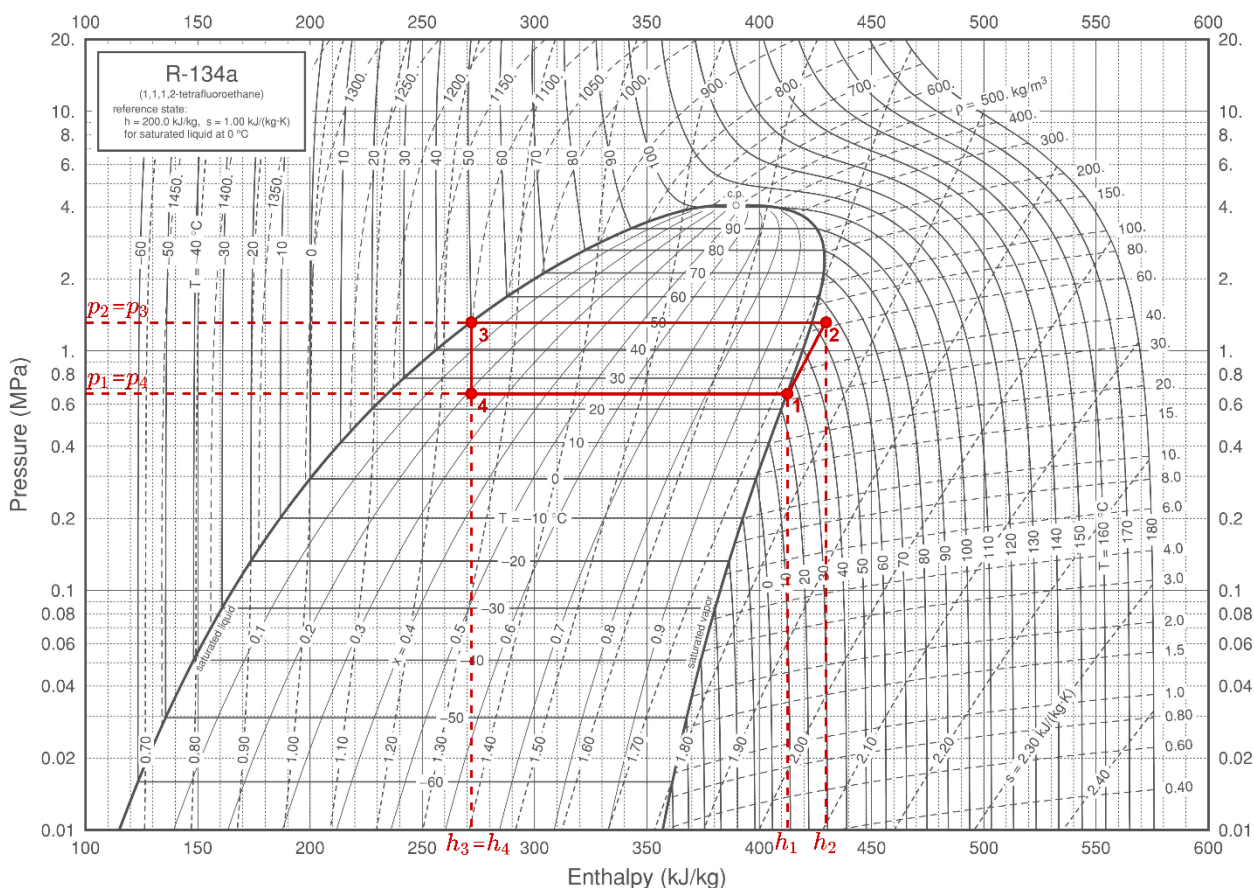
Navrhovaný výkon TČ (približne 170 kW) sa pre bežne používané TČ zdá byť celkom vysoká, no je treba si uvedomiť fakt, že sa jedná o priemyselnú aplikáciu a v tomto prípade tak hodnotu možno považovať za prívetivú. Bežne sa výkon tepelných čerpadiel využívajúcich sa pre bytové jednotky pohybuje v rozmedzí 5 až 20 kW. V takom prípade by bolo potrebné inštalovať aspoň 8 tepelných čerpadiel. I keď ani táto varianta sa principiálne nevyklučuje. Dôraz však bude kladený na tepelné čerpadlá priemyselného zamerania, ktoré môžu disponovať tepelným výkonom až 500 kW a vyššie. Na základe tohto faktu je zrejmé, že v prípade návrhu sú celkom široké možnosti, čo sa výkonu i počtu tepelných čerpadiel týka.

Predmetom nasledujúceho textu je výpočet obehu tepelného čerpadla. Ako už bolo zmieňované vyššie, pre výpočet budú uvažované štyri chladivá. Cieľom výpočtu tak je určenie základných parametrov tepelného čerpadla pre každé jedno zvolené chladiivo. Samotný výpočet je založený na princípe obehu TČ (vyparovanie, kompresia, kondenzácia, expanzia) a vlastnostiach vybraného chladiiva. Princíp výpočtu spočíva v zakreslení obehu TČ do p-h diagramu vybraného chladiiva, pričom sa vychádza z kondenzačnej a výparnej teploty. Kondenzačná teplota je zvolená

o 5 °C vyššia aká je požadovaná teplota ohrievaného média, vody $T_{w,out}$. Výparná teplota je potom totožná s požadovanou, referenčnou teplotou interiéru T_{ref} . Všeobecné schéma pracovného cyklu kompresorového tepelného čerpadla bolo znázornené už v kapitole 2.2 na obr. 3. Tento cyklus je znázornený v p-h diagrame chladiva R-134a na obr. 17. Obdobným spôsobom je možné tento cyklus zakresliť do všetkých diagramov vybraných chladív.

Pre výpočet sa uvažuje zjednodušený, ideálny Rankinov cyklus. Spolu s idealizáciou obehu tepelného čerpadla súvisia určité zjednodušenia. Návrh obehu TČ a jeho výpočet je založený na základe týchto zjednodušení, predpokladov:

- pracovná látka obehu je R134a, respektíve R410A, R407C, R290;
- pracovná látka v kondenzátore nie je podchladená;
- pracovná látka vo výparníku nie je prehriata;
- uvažuje sa izoentropická kompresia (dej 1-2);
- uvažuje sa izoentropická expanzia (dej 3-4);
- uvažuje sa izobarická kondenzácia a vyparovanie (deje 2-3 a 4-1);
- tlakové straty v potrubí a vo výmenníkoch sú zanedbateľné;



Obr. 17 Ideálny obeh tepelného čerpadla v p-h diagrame chladiva R134a (diagram prevzatý z [54])

Na základe obehu TČ znázornenom na obr. 17 sa následne z diagramu a tabuliek termodynamických vlastností vybraného chladiva ([55]) odčítajú vstupné, počiatočné údaje vstupujúce do výpočtu. Z diagramu a tabuliek sa tak za daných podmienok odčítajú hodnoty tlaku, entalpií, entropie a teplota v bode 2. Konkrétne hodnoty týchto vstupných údajov uvádza nasledujúca tabuľka 10. Pričom jednotlivé hodnoty sa stanovujú nasledovne. Pre bod 1 sa tlak, entalpia a entropia stanovujú na základe predpokladu, že sa jedná o sýtu paru pri výparnej teplote $T_1=25$ °C. Podobne sa tak stanovujú hodnoty týchto veličín pre bod 3, kde sa predpokladá stav nasýtenej kvapaliny

o kondenzačnej teplote $T_3=50$ °C. V ďalšom kroku sa stanoví charakteristické vlastnosti v bode 2, kedy sa predpokladá stav prehriatej pary pri tlaku p_3 a entropii s_1 . V poslednom kroku sa stanoví zvyšné vlastnosti pre bod 4 nachádzajúci sa v oblasti mokrej pary pri entalpii h_3 a výparnej teplote T_1 .

Tabuľka 10 Charakteristické vlastnosti vybraných chladív v jednotlivých bodoch obehu

Chladivo	Bod	Teplota [°C]	Tlak [kPa]	Entalpia [kJ·kg ⁻¹]	Entropia [kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
R134a	1	25	665,4	412,7	1,718
	2	52	1317	426,8	1,718
	3	50	1317	272,5	1,24
	4	25	665,4	272,5	1,247
R410A	1	25	1647	425,9	1,761
	2	60,5	3062	441,6	1,761
	3	50	3062	285,1	1,278
	4	25	1650	285,1	1,288
R407C	1	25	1019	419,4	1,746
	2	62,6	2211	437,6	1,746
	3	50	2211	276,9	1,252
	4	25	1149	276,9	1,261
R290	1	25	952,1	600,8	2,351
	2	52,5	1713	627,9	2,351
	3	50	1713	336,8	1,45
	4	25	952,1	336,8	1,465

Z vyššie uvedenej tabuľky plynie na prvý pohľad celkom zásadný rozdiel medzi chladivami a to najmä v pracovných tlakoch chladiva, ktoré sú v prípade R410A vyššie v porovnaní s ostatnými. Miernu odchýlku tiež možno pozorovať z hodnôt entropie chladiva R290, ktoré dosahuje v bodoch 1 a 2 zvýšených hodnôt.

Po odčítaní základných termodynamických vlastností chladiva sa pristúpi k samotnému výpočtu základných charakteristických vlastností tepelného čerpadla. Predmetom výpočtu budú základné parametre TČ ako je merný výkon výparníka a kondenzátora, izoentropická práca a príkon kompresora, hmotnostný prietok chladiva, tepelný výkon výparníka a výkonové číslo tepelného čerpadla, respektíve vykurovací faktor COP. Nasledujúci text tak stručne popisuje postup a predstavuje výpočtové vzťahy pre tieto parametre, pričom sa vychádza najmä zo závislosti tlaku na entalpii vybraného chladiva (viď. obr. 17). Nasledujú rovnice sú odvodené z diagramov jednotlivých chladív podľa [56].

Merný výkon výparníku v $q_{výp}$ [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] sa určí rozdielom entalpií v bodoch 1 a 4 podľa rovnice 7.2 .

$$q_{výp} = h_1 - h_4 \quad (7.2)$$

Merný výkon v kondenzátore q_{kon} [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] alebo merné kondenzačné teplo sa určí obdobne, rozdielom entalpií v bodoch 2 a 3 podľa vzťahu 7.3.

$$q_{kon} = h_2 - h_3 \quad (7.3)$$

Na základe merného výkonu a celkového výkonu kondenzátora sa potom stanoví hmotnostný prietok chladiva \dot{m}_{chl} [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] podľa rovnice 7.4.

$$\dot{m}_{chl} = \frac{Q_{kon}}{q_{kon}} \quad (7.4)$$

Merná izoentropická práca w_{iz} [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$], teda kompresia pár chladiva sa stanoví podľa rovnice 7.5 ako rozdiel entalpií v bodoch 1 a 2.

$$w_{iz} = h_2 - h_1 \quad (7.5)$$

Celkový teoretický príkon kompresora P_k [kW] sa stanoví ako súčin hmotnostného prietoku chladiva a mernej izoentropickej práce podľa rovnice 7.6 .

$$P_k = \dot{m}_{chl} \cdot w_{iz} \quad (7.6)$$

Príkon elektromotora pre pohon kompresora, respektíve skutočný príkon kompresora sa potom stanoví vzhľadom na predpokladanú účinnosť elektromotora podľa vzťahu uvedeného v rovnici 7.7 .

$$P_{sk} = \frac{P_k}{\eta_k} \quad (7.7)$$

Celkový tepelný tok, respektíve výkon výparníku $Q_{výp}$ [kW] sa stanoví podľa 7.8.

$$Q_{výp} = \dot{m}_{chl} \cdot (h_1 - h_4) \quad (7.8)$$

Záverom predbežného výpočtu je stanovenie vykurovacieho faktoru COP, ktorý sa stanoví podľa rovnice 2.1, respektíve podľa 7.9 .

$$COP_{T\check{c}} = \frac{Q_{kon}}{P_{sk}} \quad (7.9)$$

Výpočtové vzťahy uvedené rovnicami 7.1 až 7.9 tvoria ucelený systém koncepčného návrhu tepelného čerpadla. Do výpočtu skutočného príkonu kompresora (rovnica 7.7) vstupuje zatiaľ nedefinovaná účinnosť elektromotora, ktorá bola odhadnutá na 75 % ($\eta_k = 0,75$). Táto účinnosť spolu s výkonom kondenzátora a termodynamických vlastností chladiva v charakteristických bodoch obehu tak tvoria kompletné vstupné parametre. Po dosadení týchto parametrov sa doberie k jednotlivým výsledkom. Tieto výsledky pre vyššie zmieňované tri varianty udáva komplexne nasledujúca tabuľka 11.

Tabuľka 11 Vypočítané parametre tepelného čerpadla

Chladivo		R134a	R410A	R407c	R290	
	Symbol	Hodnota				Jednotka
Výkon kondenzátora	Q_{kon}	168,78	168,78	168,78	168,78	kW
Merný výkon výparníka	$q_{výp}$	140,2	140,8	142,5	264	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Merný výkon kondenzátora	q_{kon}	154,3	156,5	160,7	291,1	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Prietok chladiva	\dot{m}_{chl}	1,09	1,08	1,05	0,58	$\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Merná izoentropická práca	w_{iz}	14,1	15,7	18,2	27,1	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Celkový elektrický príkon	P_k	15,42	16,93	19,11	15,71	kW
Skutočný príkon	P_{sk}	20,56	22,58	25,49	20,95	kW
Tepelný výkon výparníka	$Q_{výp}$	153,35	151,85	149,66	153,06	kW
Vykurovací faktor	COP	8,21	7,48	6,62	8,06	-

Odpadové teplo obsiahnuté vo vzduchu sa využíva priamo, tzn. že výparníkom tepelného čerpadla prúdi vzduch z interiéru. Teplotu interiéru možno z väčšej časti považovať za konštantnú, teda aspoň počas pracovnej doby prevádzky. Dôsledkom toho sa predpokladá docielenie stabilného vykurovacieho výkonu a vykurovacieho faktoru tepelného čerpadla. To v prípade typického využitia TČ je len ťažko možné, keďže teplota nízko potenciálového tepla počas roka značne kolíše. Z výsledkov, ktoré uvádza tabuľka 11 je zrejmé, že vykurovací faktor COP vychádza najvyšší v prípade chladiva R134a, no i tak je táto hodnota celkom vysoká vo všetkých prípadoch. Na prvý pohľad by to mohlo indikovať fakt, že sa jedná o skreslené a nereálne hodnoty, no v skutočnosti je výsledná účinnosť (COP) tepelného čerpadla silno závislá od teplotnej diferencie (rozdiel teploty výparnej a kondenzačnej). Vo vyšetrovanom prípade sa uvažuje celkom nízky rozdiel týchto teplôt čoho dôsledkom je vyššia hodnota COP. Zároveň však nutno dodať, že sa stále jedná o zjednodušený výpočet, kedy sa predpokladá ideálny Rankinov cyklus. Pri porovnaní výsledkov jednotlivých chladív možno konštatovať že väčšina výsledných hodnôt nie sú príliš odlišné. Avšak celkom zásadného rozdielu sa dosahuje v prípade jediného prírodného chladiva – propánu (R290), ktorého výsledky dosahujú takmer dvojnásobného merného výkonu v prípade výmenníkov, takmer polovičného prietoku chladiva obehom TČ a zvýšenú prácu kompresora v porovnaní s ostatnými. Najvyšší príkon kompresora, ktorý indikuje i najvyššiu spotrebu elektrickej energie sa dosahuje v prípade chladiva R407C.

Výpočet bol prevedený pre celkový tepelný výkon kondenzátora odpovedajúci výkonu potrebného pre ohrev $4,3 \text{ m}^3$ vody za hodinu. Tento výkon bol určený na hodnotu 170 kW. V tomto prípade sa však naskytá viacero možností, ako je použitie jedného vysoko výkonového TČ alebo viacero TČ menších výkonov. O výbere konkrétnej varianty rozhodujú technické možnosti z hľadiska inštalácie zariadenia do vybranej prevádzky a ekonomické aspekty jednotlivých variantov. Z hľadiska výpočtu má toto výkonové rozdelenie dopad len na určité základné parametre TČ ako je hmotnostný prietok chladiva, príkon kompresora a tepelný výkon výparníka. Princiipiálne sa však bude jednať o hodnoty priamo úmerné výkonu, čo v preklade znamená, že pri polovičnom výkone budú aj zmienené parametre TČ polovičné.

Z hľadiska riadenie tepelného čerpadla sa ponúka niekoľko možností (viac o riadení TČ popisuje kap. 2.5). Pre účely vyšetrovanej aplikácie tepelného čerpadla prichádzajú v úvahu predovšetkým dve varianty, a síce sa ponúka tepelné čerpadlo so základným spôsobom riadenia on/off alebo pokročilejším frekvenčným meničom, teda

plynulou reguláciou otáčok kompresoru. Pokročilejší invertorové riadenie určite ponúka výhody pri aplikáciách v bytových jednotkách, no v prípade vyšetrovanej aplikácii by bola daná prednosť **systemu riadenia on/off**. Dôvodom je nižšia počiatočná investícia technológie a tiež predpoklad stáleho chodu technológie. Tepelné čerpadlo by tak v danom prípade fungovalo na plný alebo žiadny – nulový výkon. Riadenie TČ by spočívalo len zapnutí alebo vypnutí v závislosti na obmedzujúcich podmienkach. Formulácia obmedzujúcich podmienok by mohla byť eventuálne nasledovná:

- vypni TČ, pokiaľ je dostatočná teplota vody v akumuláčnej nádrži;
- vypni TČ, pokiaľ teplota okolia dosiahla referenčnej hodnoty;

8 Technicko – ekonomická rozvaha

Z predchádzajúcich kapitol sú už známe základné parametre popisujúce vybranú prevádzku a v dôsledku toho sú vypočítané základné charakteristické vlastnosti tepelného čerpadla. Cieľom tejto kapitoly je prístup k problému predovšetkým z ekonomického hľadiska, kedy sú stanovené základné náklady spojené s integráciou tepelného čerpadla do vybranej prevádzky. Hlavným cieľom je stanovenie potenciálnej doby návratnosti integrácie TČ do prevádzky, identifikácia počiatočných a prevádzkových nákladov.

Pre účely výpočtov a hodnotenia technicko – economickej analýzy v tejto kapitole sa pre ceny energií vychádza z faktúr za elektrinu a plyn poskytnutých majiteľom prevádzky. Na základe zmienených faktúr sú uvažované tieto ceny energií:

- elektrická energia: 4,71 Kč/kWh;
- zemný plyn: 4,518 Kč/kWh;

Z hľadiska prevádzky sa predpokladajú dve osemhodinové smeny počas pracovných dní a jedna smena v sobotu, t.j. celkovo sa tak uvažuje 4400 hodín/rok.

8.1 Obstarávacie náklady

Obstarávacie alebo počiatočné náklady sú spájané s nákupom danej technológie, vo vyšetrovanom prípade tepelného čerpadla. Vo všeobecnosti sa jedná o počiatočnú investíciu, kapitál, ktorým musí majiteľ prevádzky disponovať pre integráciu vybranej technológie do prevádzky. Pod pojmom obstarávacie náklady sa však skrýva viac než len samotné tepelné čerpadlo. Medzi ďalšie položky počiatočných nákladov nutno zaradiť i náklady za integráciu, teda montáž TČ do prevádzky, prípadne i predprípravu miesta spojenú s prípadným zásahom do prevádzky, ak by bolo potreba. Patria sem i ďalšie položky ako je príslušenstvo TČ (napríklad radiaci systém TČ, meracie systémy alebo senzory), teda pokiaľ nie sú súčasťou ceny tepelného čerpadla.

Ceny všetkých vyššie uvedených položiek však stanovuje výrobca a predajca, preto sa môžu značne líšiť. V praxi by sa postupovalo spôsobom, kedy by boli oslovené viaceré firmy, výrobcovia TČ so zadanými požiadavkami na tepelné čerpadlo. Následne by sa na základe dostupných ponúk zvolila vyhovujúca varianta v závislosti od ceny technológie vrátane montáže a príslušenstva, a tiež od ponúkaných služieb poskytovaných jednotlivými spoločnosťami ako je napríklad servis a údržba TČ.

Čo sa samotných cien týka, tie nie sú častokrát voľne dostupné. Pre účely tejto práce boli oslovení viacerí výrobcovia, spoločnosti s dotazom na tepelné čerpadlá vyhovujúce prevádzkovým parametrom a odpovedajúcemu tepelnému výkonu, ktorým má TČ disponovať. V závislosti od poskytnutých informácií je možné stanoviť aspoň orientačnú cenu takej technológie. Výška obstarávacích nákladov spojená s nákupom TČ a príslušenstva s cieľovým priemyselným využitím sa môže pohybovať v rozmedzí približne 1,2 mil. Kč až 2,5 mil. Kč. Pre účely ekonomického posúdenia zámeru budú celkové obstarávacie náklady uvažované v hodnote 1 500 000 Kč.

8.2 Prevádzkové náklady

Prevádzkovými nákladmi sa rozumie cena energie spotrebovanej pre ohrev požadovaného množstva vody. Pre účely ekonomického hodnotenia a následne potenciálnej návratnosti v nasledujúcej podkapitole budú uvažované dva spôsoby ohrevu vody, prvý je ohrev vody tepelným čerpadlom o parametroch, respektíve príkone kompresoru stanoveného v predchádzajúcej kapitole (viď. tabuľka 11) a druhým je ohrev vody spaľovaním zemného plynu. V prípade výpočtov budú

výsledné hodnoty vzťahované na celkové množstvo potrebnej vody za rok. Bude uvažovaných 4 400 pracovných hodín za rok pri spotrebe 4,3 m³ vody za hodinu.

V praxi sa pod pojmom prevádzkových nákladov skrýva oveľa viac ako je len spotreba elektriny pre chod danej technológie. Prakticky sem patria ďalšie úkony ako je napríklad údržba danej technológie či pohon prídavných zariadení (napríklad obehové čerpadlá). Pre účely koncepčného riešenia sa však predpokladá, že tieto a ďalšie faktory z hľadiska prevádzkových nákladov sú rovnaké v prípade ohrevu vody tepelným čerpadlom ako aj v prípade spaľovania zemného plynu. Na základe tejto predpokladanej rovnosti možno posudzovať prevádzkové náklady len z hľadiska spotreby energie.

8.2.1 Ohrev vody tepelným čerpadlom

Chod tepelného čerpadla zabezpečuje všeobecne kompresor. Vo vyšetřovanom príklade sa uvažuje kompresor poháňaný elektromotorom. Príkion kompresoru potom značne závisí od prevádzkových teplôt. Elektrický príkon kompresora bol súčasťou výsledkov výpočtu v kapitole 7.4, kde bol skutočný príkon stanovený v závislosti od použitého chladiva (viď. tabuľka 11) pri účinnosti elektromotora 75 %. Keďže je však cena elektriny účtovaná za kWh, je nutno prepočítať skutočný príkon kompresora, respektíve tepelného čerpadla na celkovú energiu pre ohrev vody. Ako uvádza text vyššie, výsledná energia v kWh sa bude vzťahovať k ohrevu množstva spotrebovanej vody za rok. Elektrický príkon TČ sa potom prepočíta podľa nasledujúcej rovnice 8.1, respektíve príkon sa vynásobí počtom pracovných hodín.

$$E_{OV,T\check{C}} = P_{sk} \cdot FPD \quad (8.1)$$

kde, $E_{OV,T\check{C}}$ je energia TČ [kWh]

P_{sk} je skutočný príkon tepelného čerpadla [kW]

FPD je ročný fond pracovnej doby [hod]

Na základe znalosti množstva poskytovanej energie tepelným čerpadlom a ceny elektriny sa po vynásobení týchto hodnôt docieli celkových prevádzkových nákladov. Výsledné hodnoty ako aj príkony TČ pri jednotlivých chladivách udáva nasledujúca tabuľka 12.

Tabuľka 12 Prevádzkové náklady tepelného čerpadla

Chladivo	R134a	R410A	R407c	R290	
Príkion kompresora (P_{sk})	20,56	22,58	25,49	20,95	kW
Energia TČ ($E_{OV,T\check{C}}$)	90 480,9	99 331,9	112 139,7	92 178,7	kWh
Prevádzkové náklady TČ	426 165	467 854	528 178	434 162	Kč

8.2.2 Prevádzkové náklady pri spaľovaní zemného plynu

Potenciálna návratnosť technológie tepelného čerpadla bude stanovená na základe porovnania prevádzkových nákladov tepelného čerpadla s potenciálnymi prevádzkovými nákladmi pri spaľovaní zemného plynu pre ohrev 4,3 m³ vody za hodinu. Tepelný výkon potrebný k ohrevu tohto množstva vody bol už skorej stanovený v kapitole 7.4 na hodnotu 170 kW. Podobne ako v prípade prevádzkových nákladov tepelného čerpadla, aj tento výkon bude prepočítaný na energiu potrebnú pre ohrev vody za celý rok. Táto energie sa stanoví ako súčin tepelného výkonu pre ohrev vody a celkovej pracovnej doby za rok (rovnica 8.2).

$$Q_{OV,ZP} = Q_{OV} \cdot FPD \quad (8.2)$$

kde, $Q_{OV,ZP}$ je energia potrebná pre ohrev vody za rok [kWh]

Q_{OV} je tepelný výkon pre ohrev vody [kW]

FPD je ročný fond pracovnej doby [hod]

Na základe znalosti energie ZP potrebnej pre ohrev vody za celý rok prevádzky pracovne, je možné stanoviť výsledný objem ZP, ktorý zohľadňuje výhrevnosť vybraného paliva – zemného plynu. Hodnota výhrevnosti ZP bola stanovená na $33,48 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ [57]. Objem spotrebovaného ZP sa vypočíta podľa rovnice 8.3.

$$V_{ZP} = \frac{Q_{OV,ZP}}{LHV_{ZP}} \quad (8.3)$$

kde, V_{ZP} je objem spotrebovaného zemného plynu [m^3]

$Q_{OV,ZP}$ je tepelná energia pre ohrev vody [MJ]

LHV_{ZP} je výhrevnosť zemného plynu [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]

Spotreba zemného plynu je prakticky meraná v objemových jednotkách (m^3) čo odpovedá výsledku vyššie uvedenej rovnice 8.3. Vyúčtovanie dodávok plynu však prebieha v jednotkách energetických (MWh). Dôvodom je fakt, že v praxi je ZP dodávaný z rôznych zdrojov čoho dôsledkom je nie príliš stabilná energia obsiahnutá v ZP a z jedného m^3 tak možno získať rôzne množstvo energie [58]. Z vyššie uvedených dôvodov je nutno túto hodnotu v m^3 prepočítať na kWh respektíve MWh. Prepočet objemu ZP (m^3) na energetické hodnoty (kWh) vysvetľuje príloha 1 vyhlášky č. 108/2011 Sb. ([59]). Zo vzťahu uvedeného v zmienenej vyhlášky vyplýva, že výsledná hodnota v kWh je funkciou:

- objemu plynu v m^3 ;
- objemového prepočtového koeficientu, ktorý zohľadňuje tlak, teplotu a kompresibilný faktor;
- priemerného hodnotu spalného tepla v $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ za účtovacie obdobie;

Z dôvodu absencie detailných informácií o tlaku a teplotách v plynomeri sa pristupuje k orientačnému výpočtu, prepočtu spotreby ZP v objemových jednotkách na jednotky energetické. Pričom sa využíva približného koeficientu pre prevod, a síce platí fakt, že jeden m^3 ZP je ekvivalentný $10,55 \text{ kWh}$ (vid'. rovnica 8.4) [58].

$$E_{OV,ZP} = V_{ZP} \cdot 10,55 \quad (8.4)$$

kde, $E_{OV,ZP}$ je energia zemného plynu [kWh]

Vstupné hodnoty ako aj výstupné údaje rovníc 8.2 až 8.4 a celkové náklady za zemný plyn potrebný pre ohrev vody v prevádzke za jeden rok uvádza nasledujúca tabuľka 13.

Tabuľka 13 Prevádzkové náklady pre ohrev vody spaľovaním ZP

Tepelný výkon pre ohrev vody	Q_{ov}	168,78	kW
Ročný fond pracovnej doby	FPD	4400	hod
Energia potrebná pre ohrev vody za rok	$Q_{ov,ZP}$	742 617,3	kWh
		2 673 422,28	MJ
Výhrevnosť zemného plynu	LHV _{ZP}	33,48	MJ/m ³
Objem zemného plynu	V_{ZP}	79 851,32	m ³
Energia zemného plynu	$E_{ov,ZP}$	842 431,45	kWh
Prevádzkové náklady ZP		3 806 105	Kč

Výsledná suma prevádzkových nákladov spojených s ohrevom vody spaľovaním zemného plynu už na prvý pohľad indikuje značný rozdiel v porovnaní s prevádzkovými nákladmi tepelného čerpadla. Tento rozdiel je skutočne zásadný a z porovnania plynie, že prevádzkové náklady TČ odpovedajú približne len 11 % prevádzkových nákladov v prípade spaľovania zemného plynu.

8.3 Potenciálna návratnosť

Azda najdôležitejším ekonomickým aspektom je doba návratnosti, ktorú možno definovať ako okamžik, v ktorom potenciálne výnosy dosiahnuté integráciou vybranej technológie prevýšia počiatočnú investíciu. Dobu návratnosti v najjednoduchšom slova zmysle je možné stanoviť ako podiel vstupných investícií, teda obstarávacích nákladov a toku hotovosti (cash flow). Tok hotovosti sa stanoví jednoducho rozdielom prevádzkových nákladov uvažovaných variantov, teda rozdielom prevádzkových nákladov spojených s ohrevom vody pomocou tepelného čerpadla a zemného plynu. Spôsob výpočtu jednoduchej doby návratnosti znázorňuje rovnica 8.5.

$$PB = \frac{IN}{CF} \quad (8.5)$$

kde, PB je doba návratnosti (z angl. *payback*) [mesiace]

IN sú obstarávacie náklady [Kč]

CF je mesačný tok hotovosti (z angl. *cash flow*) [Kč]

Prevádzkové náklady stanovené v predchádzajúcej kapitole súhrne uvádza nasledujúca tabuľka 14, ktorá okrem iného, uvádza tok hotovosti respektíve úsporu financií a výslednú jednoduchú návratnosť počítanú podľa rovnice 8.5.

Tabuľka 14 Zhrnutie nákladov, tok hotovosti a jednoduchá návratnosť

Chladivo		R134a	R410A	R407c	R290	
Obstarávacie náklady	IN		1 500 000			Kč
Prevádzkové náklady	OC _{TČ}	426 165	467 854	528 178	434 162	Kč
	OC _{ZP}		3 806 105			Kč
Ročný tok hotovosti	CF _r	3 379 940	3 338 252	3 277 927	3 371 943	Kč
Mesačný tok hotovosti	CF _m	281 662	278 188	273 161	280 995	Kč
Návratnosť	PB	5,33	5,39	5,49	5,34	Mesiac

Z výsledkov, ktoré uvádza tabuľka 14 je zrejmy značný a zásadný rozdiel prevádzkových nákladov tepelného čerpadla v porovnaní so zemným plynom. Chod tepelného čerpadla podľa vyššie uvedených výsledkov vychádza viac než sedemkrát lacnejší. Táto skutočnosť má logicky veľmi pozitívny vplyv na tok hotovosti, ktorý sa v závislosti od použitého chladiva pohybuje okolo čiastky 280 tisíc Kč za mesiac. Rovnako má tento značný rozdiel priamy vplyv na dobu návratnosti, ktorá vychádza skutočne nízka, v najhoršom prípade len necelého pol roka je potreba, aby sa vrátila počiatočná investícia.

Ďalším ukazovateľom doby návratnosti je tzv. diskontovaná doba návratnosti, ktorá vychádza z kumulovaného (diskontného) toku hotovosti. Kumulovaný (diskontovaný) tok hotovosti slúži pre hodnotenie návratnosti z hľadiska časovej hodnoty peňazí, teda zohľadňuje vplyv času, a okrem toho aj úrokovú mieru. Diskontovaný tok hotovosti sa potom stanoví podľa nasledujúcej rovnice.

$$CF'_t = \sum_{t=0}^{\tau} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (8.6)$$

kde, CF'_t je diskontovaný tok hotovosti [kč]

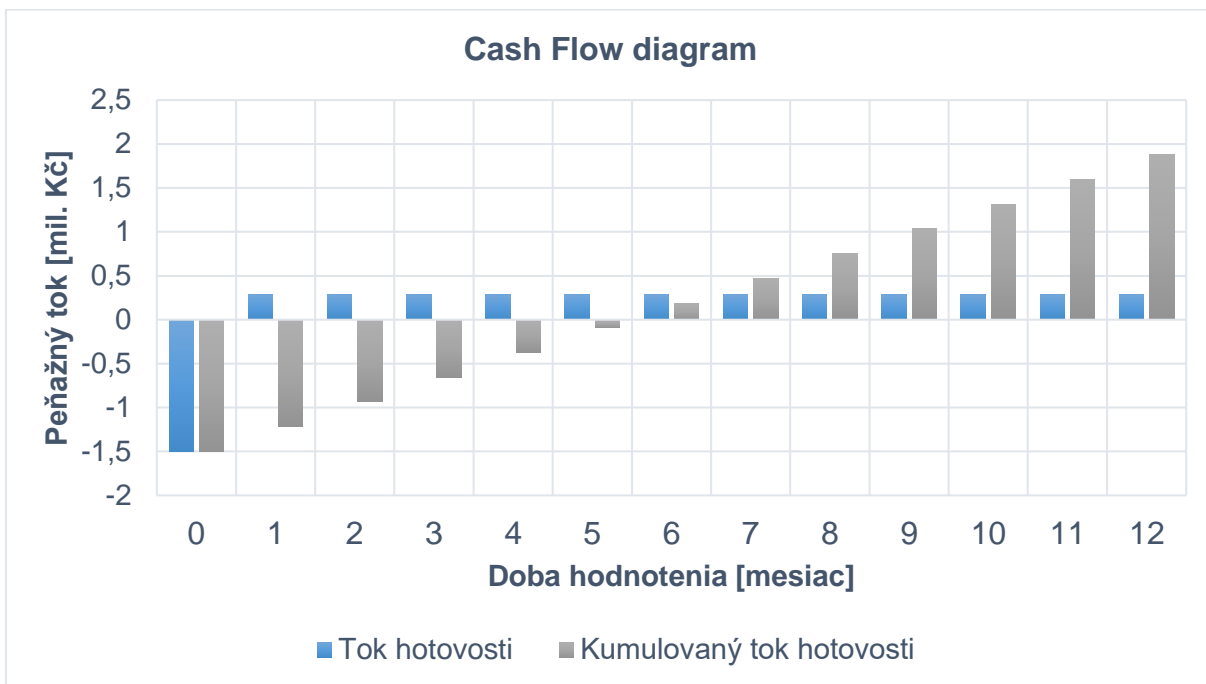
τ je doba hodnotenia [mesiace]

CF_t je tok hotovosti v mesiaci t [Kč]

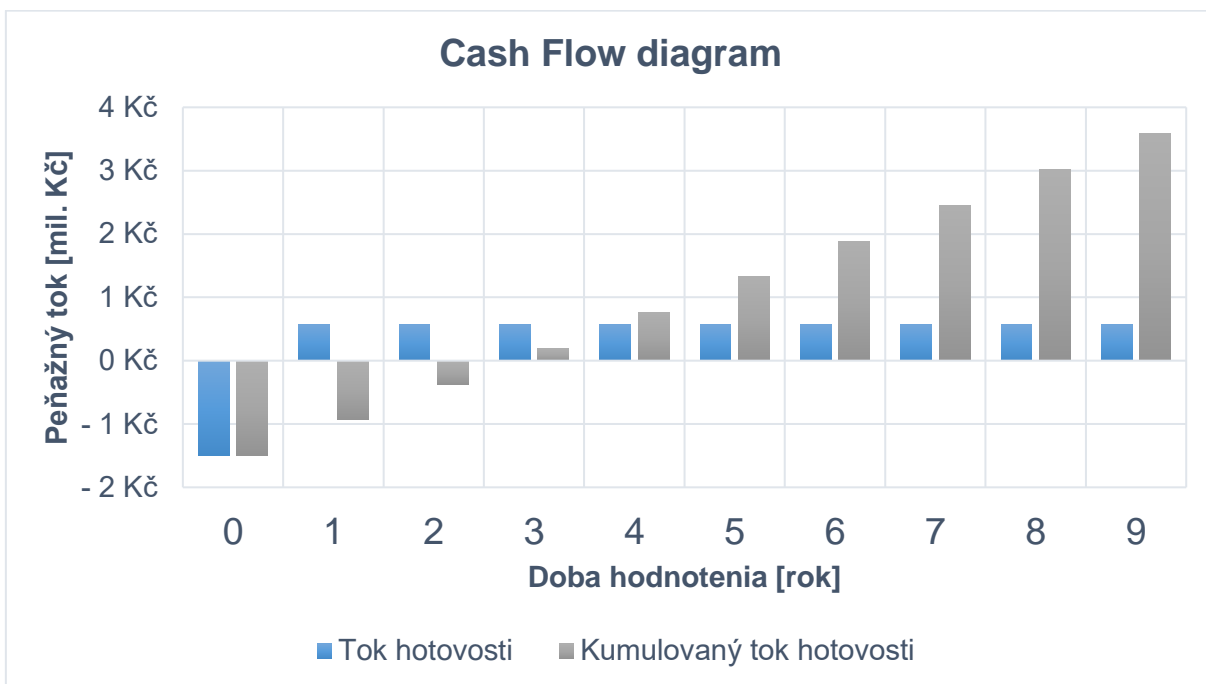
r je úroková miera [-]

Podľa vyššie uvedenej rovnice je možné identifikovať aktuálny stav toku hotovosti vo vybranom časovom okamžiku, mesiaci. Pre výpočet sa pre zjednodušenie neuvažuje úroková miera (t.j. $r=0$). Závislosť peňažného toku na čase respektíve dobe hodnotenia projektu potom prehľadne ilustruje cash flow diagram na obr. 18. Vzhľadom na dosiahnuté výsledky, ktoré uvádza tabuľka 14, je grafické znázornenie toku hotovosti v závislosti na dobe hodnotení vykreslené len pre prípad použitia chladiva R134a, ktoré spomedzi hodnotených chladív, z ekonomického hľadiska, dosahuje najpozitívnejšie výsledky.

Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že použitie tepelného čerpadla ako zdroj tepelnej energie pre ohrev požadovaného množstva vody v porovnaní so spaľovaním zemného plynu je pre tieto účely niekoľko násobne ekonomickejšou a úspornejšou variantou. Na výsledky má vplyv celá rada faktorov ako je cena danej technológie, ktorá je viacmennej len orientačná alebo aj cena energií. Práve cena energií môže (podobne ako obstarávacie náklady) zásadne ovplyvniť návratnosť počiatočnej investície. Výsledná návratnosť vyšetrovanej varianty vychádza značne pozitívne, kedy sa počiatočná investícia vráti ani nie do pol roka od integrácie. Práve cena energií však predstavuje silno variabilnú zložku nákladov a to predovšetkým v súčasnosti, kedy sú zaznamenávané značné nárasty cien týchto komodít. Pri ekonomickom hodnotení sú uvažované aktuálne, reálne ceny elektrickej energie a zemného plynu, ktoré boli pre účely tejto práce poskytnuté majiteľom prácovne. Nutno však podotknúť, že tieto údaje môžu, ale nemusia byť z časti zavádzajúce. Dôvodom je aktuálna ekonomická a politická situácia, kedy najmä v prípade zemného plynu došlo v poslednom období k značnému nárastu ceny tejto komodity. Dôsledkom toho je už viackrát zmieňovaná krátka návratnosť projektu. Pre porovnanie, je na nasledujúcej stránke znázornený tiež cash flow diagram odpovedajúci cenám z minulého roku, kedy bolo účtovaných 3,22 Kč/kWh elektrickej energie a 1,016 Kč/kWh zemného plynu.



Obr. 18 Cash flow diagram integrácie tepelného čerpadla pri aktuálnych cenách energií



Obr. 19 Cash flow diagram integrácie tepelného čerpadla pri minuloročných cenách energií

Pri porovnaní vyššie uvedených grafov je zrejмый rozdiel v návratnosti. Pri aktuálnych cenách (t.j. 4,71 Kč/kWh elektriny, 4,518 Kč/kWh ZP) energií sa doba návratnosti pohybuje v rádoch mesiacov. Avšak v prípade minuloročných cien (t.j. 3,22 Kč/kWh elektriny, 1,016 Kč/kWh ZP) energií sa potenciálna návratnosť pohybuje už v rádoch rokov, kedy sa počiatočná investícia plne vráti až po troch rokoch. Je treba upozorniť, že ani táto hodnota nie je z hľadiska potenciálu investícia špatná. Z vyššie uvedeného porovnania každopádne plynie dôležitosť aktuálneho vývoja cien komodít pri návrhu a následnej integrácii technológie do vybranej prevádzky.

9 Zhrnutie a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Po všeobecnom úvode do profesijnej údržby bielizne je pozornosť venovaná konkrétne zvolenej priemyselnej pracovne, respektíve popisu základných technických údajov. Jedná sa o priemernú priemyselnú pracovňu s kapacitou približne 10 ton bielizne za jednu osemhodinovú smenu. Na základe reálneho merania teploty v prevádzke bola stanovená priemerná **výpočtová teplota interiéru na hodnotu 33 °C**, ktorá pôsobila ako vstupná hodnota pre výpočet množstva odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu. Okrem teploty boli stanovené ďalšie základné údaje ako je napríklad spotreba, respektíve hmotnostný prietok vody. Vybraná prevádzka sa vyznačuje spotrebou 10 m³ vody za hodinu, pričom toto **množstvo vody je nutno pred použitím v procese ohriať ideálne na teplotu 45 °C**. Vybraná prevádzka však už oplýva technológiami pre ohrev tejto vody pomocou odpadných prúdov, no pre účely prípadovej štúdie sa predpokladá, že 4,3 m³·h⁻¹ je stále nutno ohriať. **Množstvo aktuálne dostupného odpadového tepla bolo stanovené podľa bilančnej rovnice tepla v závislosti od tabuľkových hodnôt vlastností vzduchu na hodnotu približne 37 MJ**, čo predstavuje viac než polovicu potrebného tepla pre ohrev a vykurovanie priemernej domácnosti v Českej republike. Ďalej bol vykonaný názorný výpočet tepelnej záťaže vyšetřovaného priestoru, kedy sa brali v úvahu hlavné zdroje tepelnej záťaže. Pre porovnanie boli vypočítané i tepelné zisky od ľudí. Ako však dosiahnuté výsledky napovedajú, tieto zisky od ľudí a potom aj od menších zdrojov tepla sú zanedbateľné v porovnaní so sušičkami alebo žehličmi. **Výsledná tepelná záťaž odpovedá tepelnému výkonu približne 526 kW**. Nutno však znova podotknúť že tieto výsledky sú len orientačné v závislosti s neistotami vstupujúcimi do výpočtu. Napriek tomu je však možné konštatovať, že sa jedná o značné množstvo voľne dostupnej nadbytočnej tepelnej energie, ktorá navyše môže spôsobovať diskomfort zamestnancov pri práci.

Po zmapovaní vybranej prevádzky z hľadiska tepelnej energie a prevádzkových parametrov sa pristupuje ku koncepcnému návrhu tepelného čerpadla, kedy sú postupne uvažované všetky zásadné otázky spojené s návrhom tohto typu technológie. Na základe jednotlivých krokov bol stanovený účel, prevádzkové parametre, konkrétny typ TČ a následne, v závislosti od termodynamických vlastností chladív, boli vypočítané základné parametre tepelného čerpadla pre danú aplikáciu. Pre cieľovú aplikáciu **bolo zvolené kompresorové tepelné čerpadlo s pracovnými médiami vzduchu (na strane výparníka) a vody (na strane kondenzátora)**. **Výpočet TČ je dimenzovaný na potrebný tepelný výkon pre ohrev 4,3 m³ vody za hodinu. Tomu odpovedá výkon približne 170 kW**. Výpočet bol následne vykonaný pre štyri najpoužívanejšie chladiva a tiež za predpokladu, že výkon kondenzátora TČ je zhodný s tepelným výkonom potrebným pre ohrev požadovaného množstva vody. Pri porovnaní požadovaného výkonu TČ a tepelnej záťaže je zrejmé, že vnútorné prostredie prevádzky je schopné zásobovať TČ potrebným nízkopotenciálovým teplom. Nutno však podotknúť, že odberom tepla z interiéru môže dochádzať k zmenám podmienok vnútorného prostredia, kedy klesá teplota, ale zároveň sa zvyšuje vlhkosť vzduchu. Z výsledkov plynie, okrem iného, vplyv jednotlivých chladív na výsledné parametre TČ. Napriek tomu, že boli brané v úvahu štyri rôzne chladivá, výsledky sa nie príliš líšia. **Z hľadiska spotreby elektrickej energie však vychádza najvhodnejšie chladivo R134a**, pri ktorom použití sa teoreticky dosiahne najúspornejšieho chodu.

Záverečné hodnotenie sa potom venuje ekonomickému hodnoteniu, ktorého cieľom bola stanovená teoretická návratnosť integrácie tepelného čerpadla. **Na základe porovnania ohrevu vody tepelným čerpadlom alebo spaľovaním**

zemného plynu bola výsledná doba návratnosti stanovená na necelého pol roka od uvedenie technológie do prevádzky. Výsledná prognóza je značne optimistická na čo má bezpochyby vplyv aktuálna cena energií. V závere je tiež znázornené porovnanie pri cenách elektriny a zemného plynu z minulého roka. Z vyššie uvedených výsledkov vyplýva, že pri cca štvornásobnom náraste ceny zemného plynu sa odhadovaná doba návratnosti zníži šesťkrát. Z toho plyne zásadnosť a dôležitosť aktuálnych cien komodít.

Vo všeobecnosti sa prípadová štúdia zameriava na hodnotenie vybranej prevádzky z hľadiska tepelnej energie, pričom bolo stanovené množstvo odpadového tepla obsiahnutom vo vzduchu a tepelná záťaž prevádzky od vnútorných zdrojov tepla – technológií. Pri návrhu tepelného čerpadla je uvažované teoreticky jedno vysoko výkonové tepelné čerpadlo. Prírodzene sa ponúka možnosť rozdeliť výkon medzi viaceré tepelné čerpadlá nižšieho výkonu. Výhoda rozdelenia výkonu spočíva predovšetkým v rovnomernom ochladzovaní vzduchu interiéru, no za cenu zvýšených tepelných strát vplyvom dopravy ohrievaného média a zvýšených nákladov na montáž. Integrácia jedného vysoko výkonového ponúka výhody z hľadiska montáže a tak celkovo jednoduchšej integrácie, kedy nie sú nutné takmer žiadne predprípravné práce. Z hľadiska potenciálnej doby návratnosti je možné konštatovať, že nepriaznivé súčasné ceny energií poskytujú jedinečnú možnosť implementácie tepelných čerpadiel do priemyselných podnikov ako náhradu za zemný plyn. Vzhľadom na súčasné ceny je prognóza doby návratnosti skutočne optimistická. Okrem priaznivej doby návratnosti, výhodou tohto konceptu sú aj relatívne nízke počiatkové náklady (pri súčasných cenách energií), čoho dôsledkom by tento spôsob mohol byť dostupný pre viaceré menšie a stredné podniky. Navyše sa týmto spôsobom dosiahne ekologickejšej prevádzky za cenu zníženia emisných faktorov a vypúšťajúcich škodlivín. Pozitívny vplyv na životné prostredie môže prinášať ďalšiu výhodu v podobe dotácií, ktoré v prípade ekonomického hodnotenia nie sú uvažované. Výsledná doba návratnosti by tak mohla byť ešte pozitívnejšia.

Vyššie prezentovaný prípad otvára dvere ďalším možnostiam, výskumom a optimalizáciám. Prírodzene sa ponúka možnosť využitia obnoviteľných zdrojov pre chod tepelného čerpadla. Napríklad posúdenie potenciálu solárnych panelov, či veternej energie v odľahlých oblastiach. Za takých okolností by v teoretickej rovine bolo dosiahnuté minimálnych prevádzkových nákladov a o to väčší prínos životnému prostrediu.

Nutno podotknúť, že sa jedná o zcela zaujímavý a nový prístup zhodnocovania odpadového tepla, ktorý podľa dostupných informácií nebol zatiaľ detailnejšie spracovaný. Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že tepelné čerpadlá majú skutočne veľký potenciál pre využitie odpadového tepla z priemyselných podnikov.

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo posúdenie potenciálu tepelných čerpadiel pre využitie odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu interiérov malých a stredných podnikov priemyselného sektora. V závislosti od znalostí a nevyhnutnej teórie, ktorej boli venované prvé časti tejto práce, bol potenciál využitia tepelného čerpadla posudzovaný na základe prípadovej štúdie, kedy bola zvolená konkrétna prevádzka, a síce priemyselná pracovňa ako typický predstaviteľ energeticky náročného procesu.

Koncepčný návrh bol riešený systematicky v niekoľkých, na seba nadväzujúcich, krokoch. V prvom kroku bol predstavený pracovnícky proces vybranej prevádzky, kedy boli stanovené základné technické a prevádzkové údaje ako je kapacita, hlavné energetické toky a vybavenie prevádzky. Na základe týchto údajov bolo stanovené aktuálne dostupné množstvo odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu interiéru prevádzky, ktoré odpovedá približne 37 kJ. V závislosti od technologického vybavenie bola stanovená tepelná záťaž interiéru o tepelnom výkone 526 kW. Ďalším krokom bol návrh tepelného čerpadla, ktorý spočíval v určení základných výkonových parametrov TČ za účelom ohrevu 4,3 m³ napájacej vody do pračiek za hodinu. Za daných prevádzkových parametrov bolo zvolené kompresorové tepelné čerpadlo v kompaktnom prevedení o minimálnom tepelnom výkone 170 kW, čo odpovedá približne 32 % tepelnej záťaže. Výpočet TČ bol vykonaný pre štyri najpoužívanejšie chladivá, čo odpovedá výslednému príkonu kompresora TČ priemerne 23 kW. V neposlednom rade bola pozornosť venovaná ekonomickým aspektom koncepčného návrhu. Hodnotenie návrhu z finančného hľadiska vychádza z porovnania ohrevu vody tepelným čerpadlom a spaľovaním zemného plynu. V závislosti od predpokladanej počiatočnej investície vo výške 1,5 milióna Kč a prevádzkových nákladov odpovedajúcich súčasným cenám energií bola vypočítaná jednoduchá doba návratnosti necelých 6 mesiacov. Vzhľadom k súčasným cenám energií možno konštatovať, že tepelné čerpadlo v danom prípade predstavuje optimálne riešenie.

Výstupné údaje dávajú základnú predstavu o energetickej a finančnej náročnosti tepelného čerpadla a vzhľadom na dosiahnuté výsledky koncepčného návrhu možno konštatovať, že využitie tepelných čerpadiel v obdobných oblastiach má skutočne vysoký potenciál. Dosiahnuté výsledky však ponúkajú priestor na optimalizáciu a ďalší výskum. Napríklad v oblasti obnoviteľných zdrojov, kedy príkladom môže byť posúdenie potenciálu využitia solárnej alebo veternej energie ako zdroj elektrickej energie pre chod tepelného čerpadla za účelom dekarbonizácie celého procesu. Prípadne sa naskytá možnosť posúdenie potenciálu implementácie a využiteľnosti sorpčných tepelných čerpadiel pre dané účely.

Využitie tepelných čerpadiel, pre účely zhodnotenia odpadového tepla obsiahnutého vo vzduchu interiérov priemyselných podnikov, sa zdá byť unikátnou myšlienkou, ktorá skýta veľký potenciál v prípade zvýšenia energetickej efektivity a ekologickejšieho nakladania s energiami. Je prekvapivé, že zatiaľ žiadna práca na toto téma nevznikla a možno konštatovať, že diplomová práca predkladá zcela unikátne riešenie s vysokým potenciálom nie len v pracovníckom procese.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BRODNY, Jarosław and Magdalena TUTAK. 2022. Analysis of the efficiency and structure of energy consumption in the industrial sector in the European Union countries between 1995 and 2019. *Science of The Total Environment* [online]. 808 (152052). Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972107128X>
- [2] SHAH, Yatish T. 2018. Waste Heat. *Thermal Energy* [online]. 1. CRC Press, p. 653-741. Dostupné z: DOI: 10.1201/b21860-14
- [3] PRASHAR, Anupama. 2019. Towards sustainable development in industrial small and Medium-sized Enterprises: An energy sustainability approach. *Journal of Cleaner Production* [online]. **235**, 977-996. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619323856>
- [4] JOHSON, I and W CHOATE. 2008. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry: report by U.S. department of energy—Industrial technologies program, prepared by BCS, Laurel, MD* [online]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf,
- [5] SU, Zixiang, Mingliang ZHANG, Peihang XU, Zhongkai ZHAO, Zhiping WANG, Haozhong HUANG and Tiancheng OUYANG. 2021. Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. *Energy Conversion and Management* [online]. **229**(113769). Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890420312929>
- [6] JOUHARA, Hussam, Navid KHORDEHGAH, Sulaiman ALMAHMOUD, Bertrand DELPECH, Amisha CHAUHAN and Savvas A. TASSOU. 2018. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 6, 268-289. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2451904918300015>
- [7] ADVANCED MANUFACTURING PROGRAM: Use Feedwater Economizers for Waste Heat Recovery. 2012. *Energy.gov* [online]. Advanced Manufacturing Office Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy Washington. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/steam3_recovery.pdf
- [8] JEGLA, Zdeněk. 2021. *DESKOVÉ VÝMĚNÍKY TEPLA (DVT), přednáška č. 2 předmětu „Navrhování procesních a energetických systémů“ (KNP)*.
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku, Transformační technologie, 2011-04, [last updated 2020-01-26]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/25.html>.

- [10] SYMPATIK® Absorpční a Adsorpční chlazení: Výroba chladu s využitím tepla [online]. In: . Dostupné z: http://systherm.com/wp-content/uploads/2019/07/systherm-pl-absorpcni-a-adsorpcni-chlazení.pdf?fbclid=IwAR2FLlojsra4fk904WPyewZ4CNWzwztmGZ1Jk47XOmk_oxRH6Cv0H
- [11] „Rekuperace tepla tepelnými čerpadly, odpadní teplo | GT Energy“. <https://www.gt-energy.cz/cz/rekuperace-tepla-tepelnymi-cerpadly> (cit 30. január 2022).
- [12] KOWALSKI, Piotr, Paweł SZALAŃSKI and Wojciech CEPIŃSKI. 2021. Waste Heat Recovery by Air-to-Water Heat Pump from Exhausted Ventilating Air for Heating of Multi-Family Residential Buildings. *Energies* [online]. 14(23). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/7985>
- [13] NAGPAL, Himanshu, Jan SPRIET, Madhu MURALI and Aonghus MCNABOLA. 2021. Heat Recovery from Wastewater—A Review of Available Resource. *Water* [online]. 13(9). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1274>
- [14] G. S. s.r.o, “História tepelných čerpadiel”, *GEOTHERM Slovakia s.r.o.*, 15. máj 2018. <https://www.geotherm.sk/historia-tepelných-cerpadiel/> (cit 13. január 2022).
- [15] KUBÍN, Miroslav. 2003. *Energetika: perspektivy - strategie - inovace*. Brno: Jihomoravská energetika, 540 s. ISBN: 80-239-0587-2
- [16] KŘENEK, Vladimír. 2006. *Člověk a energie*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 191 s. ISBN: 80-7043-489-9.
- [17] “Základní pojmy v tepelných čerpadlech : Abeceda tepelných čerpadel”. <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/pojmy-a-princip> (cit 13. január 2022).
- [18] „Topný faktor SCOP : Abeceda tepelných čerpadel“. <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/topny-faktor-scop> (cit 13. január 2022).
- [19] GRASSI, Walter. *Heat Pumps: Fundamentals and Applications*. 1. Switzerland: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-62198-2.
- [20] „Obnovitelné zdroje energie Budovy a energie - PDF Free Download“, adoc.pub. <https://adoc.pub/obnovitelne-zdroje-energie-budovy-a-energie365ff6c05e367f1029aab914c02ef9e266214.html> (cit 26. január 2022).
- [21] „Scroll Compressor“, Compressor and Parts Company. <http://www.capco-india.com/scroll-compressor/> (cit 19. máj 2022).
- [22] „Jak funguje splitové tepelné čerpadlo?“, Viessmann, 28. máj 2021. <https://www.viessmann.cz/cs/obytné-budovy/tepelné-cerpadlo/jak-funguje-tepelné-cerpadlo-split.html> (cit 01. február 2022).
- [23] „Je lepší splitové nebo kompaktní tepelné čerpadlo vzduch-voda?“, TZB-info. <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelná-cerpadla/22103-je-lepsi-splitové-nebo-kompaktní-tepelné-cerpadlo-vzduch-voda> (cit 25. apríl 2022).

- [24] „Tepelná čerpadla - základní informace“, TZB-info. <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/23093-tepelna-cerpadla-zakladni-informace> (cit 28. január 2022).
- [25] „Chladiva“, TZB-info. <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/333-chladiva> (cit 28. január 2022).
- [26] „ASHRAE FACTSHEET Update on New Refrigerants Designations and Safety Classifications“. <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/ashrae-refrigerant-designations>. Cit: 28. január 2022. [Online]. Dostupné z: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/refrigeration/factsheet_ashrae_english_20200424.pdf
- [27] „Proč je stále více a více tepelných čerpadel s plynulou regulací výkonu kompresoru?“, www.ivt-heatingsystems.cz, 01. máj 2019. <https://www.ivt-heatingsystems.cz/proc-je-stale-vice-a-vice-tepelnych-cerpadel-rizenych-frekvencnim-menicem/> (cit 30. január 2022).
- [28] „Tepelná čerpadla vzduch/voda - Průvodce porovnání nabídek : Abeceda tepelných čerpadel“. <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/porovnani-nabidky-vzduch-voda> (cit 30. január 2022).
- [29] „Prečo riadime vykurovanie neefektívne?“, ASB.sk, 22. november 2016. <https://www.asb.sk/stavebnictvo/technicke-zariadenia-budov/vykurovanie/preco-riadime-vykurovanie-neeaktivne> (cit 30. január 2022).
- [30] DRKAL, František, Miloš LAIN, Jan SCHWARZER a Vladimír ZMRCHAL, Vzduchotechnika. Praha, 2009. Cit: 27. február 2022. [Online]. Dostupné z: <http://svjvybiralova.cz/images/dokumenty/vzt/Vzduchotechnika.pdf>
- [31] „Vnitřní prostředí budov“, ASB Portal, 26. jún 2015. <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vetrani-a-klimatizace/vnitri-prostredi-budov> (cit 28. február 2022).
- [32] ČSN 73 0548 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů. 1986.
- [33] „Tepelné zisky od vnitřních zdrojů“, TZB-info. <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/3065-tepelne-zisky-od-vnitrnich-zdroju> (cit 27. február 2022).
- [34] DRKAL, František and Vladimír ZMRHAL. 2018. *Větrání*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 158 s. ISBN 978-80-01-06378-1.
- [35] „TB2A – Úkol č.1 Výpočet tepelného zisku klimatizovaného prostorutb 2a_tepelny-zisk.pdf“. Cit: 27. február 2022. [Online]. Dostupné z: http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/62/tb2a_tepelny-zisk.pdf
- [36] „Berkeley team takes its energy innovation to Capitol Hill“, University of California, 28. február 2014. <https://www.universityofcalifornia.edu/news/berkeley-team-takes-its-energy-innovation-capitol-hill> (cit 9. marec 2022).

- [37] MATHAUSOVÁ, Zuzana. „Požadavky na faktory vnitřního prostředí budov, Státní zdravotní ústav“, s. 53. Cit: 6. február 2022 [online]. Dostupné z: [http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/2_ekomonitor_faktory_novy.pptx .pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/2_ekomonitor_faktory_novy.pptx.pdf)
- [38] MATHAUSOVÁ, Zuzana. „Požadavky na jednotlivé faktory vnitřního prostředí budov, mikroklimatické podmínky, tepelná a chladová zátěž“, s. 12. Cit. 9. február 2022 [online]. Dostupné z: <http://www.uzitecneseminare.cz/userfiles/file/MATH%20WORD%20VZT%20Hradec15.pdf>
- [39] ČESKO. Nařízení vlády č. 361/2007 Sb., nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: <i>Zákony pro lidi.cz</i> [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 11. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>
- [40] Česká technická norma (ČSN), „ČSN EN ISO 7726 Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin“. 2002.
- [41] “Požadavky na kvalitu vnitřního prostředí budov - mikroklimatické podmínky a větrání”, TZB-info. <https://vetrani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vetrani-klimatizace/5593-pozadavky-na-kvalitu-vnitriho-prostredi-budov-mikroklimaticke-podminky-a-vetrani> (cit 23. február 2022).
- [42] ČESKO. Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 11. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-93>
- [43] *Uživatelská příručka k definici malých a středních podniků*. 2015. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie, 60 s. doi:10.2873/244305.
- [44] MÁŠA, Vítězslav, Petr BOBÁK, Pavel KUBA and Petr STEHLÍK. 2013. Analysis of energy efficient and environmentally friendly technologies in professional laundry service. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 15(3), 445-457. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10098-013-0618-2>
- [45] BOBÁK, Petr. 2014. „SNIŽOVÁNÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI PROCESU PROFESNÍ ÚDRŽBY PRÁDLA“, Zkrácená verze PhD Thesis, Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [46] BOBÁK, Petr, Martin PAVLAS, Vítězslav MÁŠA, Zdeněk JEGLA and Vladimír KŠENZULIAK. 2012. Heat Recovery in Professional Laundry Care Process. *Chemical Engineering Transactions* [online]. (vol. 29), s. 391-396. Dostupné z: DOI: 10.3303/CET1229066
- [47] BOBÁK, P. Snižování energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 95 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

- [48] LIMA, Thiago P., Jose Carlos C. DUTRA, Ana Rosa M. PRIMO, Janardan ROHATGI and Alvaro Antonio V. OCHOA. 2015. Solar water heating for a hospital laundry: A case study. *Solar Energy* [online]. 122, 737-748. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X15005381>
- [49] BUHLER, F., MULLER Holm, F., ZUHLSDORF, B., and ELMEGAARD, B. (2020). Energy integration and electrification opportunities in industrial laundries. In *Proceedings of ECOS 2020: 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/343935319_Energy_integration_and_electrification_opportunities_in_industrial_laundries
- [50] YANDRI, Erkata, Ratna ARIATI, Aep SAEPUL UYUN, et al. 2020. Potential Energy Efficiency and Solar Energy Applications in a Small Industrial Laundry: A Practical Study of Energy Audit. *E3S Web of Conferences* [online]. 190 s. Dostupné z: <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202019000008>
- [51] „Sdružení: Dodávky tepla domácnostem v aktuální topné sezoně stouply o desetinu“, oEnergetice.cz, Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/sdruzeni-dodavky-tepla-domacnostem-v-aktualni-topne-sezone-stouply-o-desetinu/> (cit 29. apríl 2022).
- [52] ZMRHAL Vladimír, František DRKAL, Miloš LAIN, Luděk MAREŠ. (2008). STANOVENÍ VNITŘNÍ TEPELNÉ ZÁTĚŽE PRŮMYSLOVÝCH HAL, 18. Konference Klimatizace a větrání. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav techniky prostředí. 6 s. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~zmrhavl/Publikace/Zmrhal1_KaV2008.pdf (cit. 06 máj 2022)
- [53] Weby24.cz, “Chladiva rozdělení | e-chladiva.cz”. <https://www.e-chladiva.cz/chladiva-rozdeleni-p112.htm> (cit 07. máj 2022)
- [54] GREEN, Don W. and Marylee Z. SOUTHARD. 2018. *Perry´s Chemical Engineer´s Handbook* [online]. Ninth edision. Mc Graw Hill, 2-192 -2-247 s. ISBN: 978-0-07-183409-4, MHID: 0-07-183409-5.
- [55] „Coolselector@2”. <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/> (cit 07. máj 2022).
- [56] PETRÁŠ, Dušan. 2009. *Obnovitelné zdroje energie pre nízkoteplotné systémy*. Bratislava: JAGA, 223 s. ISBN 978-80-8076-075-5.
- [57] „Výhřevnosti paliv“, TZB-info. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv> (cit 08. máj 2022).
- [58] Kurzy.cz, “Přepočet plynu m3 na MWh, m3 na kWh | Kurzy.cz”. <https://www.kurzy.cz/plyn/prevod-m3-mwh> (cit 08. máj 2022).
- [59] ČESKO. Vyhláška č. 108/2011 Sb., o měření plynu a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném uskladňování, neoprávněné přepravě nebo neoprávněné distribuci plynu. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 10. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-108>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK

Symbol	Význam	Jednotka
c_1	súčiniteľ súčasnosti	-
c_2	zvyškový súčiniteľ	-
c_3	súčiniteľ zaťaženia	-
CF	mesačný tok hotovosti	Kč
CF'_t	diskontovaný tok hotovosti	Kč
CF_t	tok hotovosti v mesiaci t	Kč
$COP_{T\check{c}}$	vykurovací faktor tepelného čerpadla	-
$c_{p,vz}$	merná tepelná kapacita vzduchu	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$c_{p,w}$	merná tepelná kapacita vody	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$E_{OV,T\check{c}}$	energia tepelného čerpadla	kWh
$E_{OV,ZP}$	energia zemného plynu	kWh
FPD	ročný fond pracovnej doby	hod
h_1	merná entalpia chladiva v bode 1 diagramu p-h	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
h_2	merná entalpia chladiva v bode 2 diagramu p-h	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
h_3	merná entalpia chladiva v bode 3 diagramu p-h	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
h_4	merná entalpia chladiva v bode 4 diagramu p-h	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
IN	obstarávacie náklady	Kč
LHV_{ZP}	výhrevnosť zemného plynu	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$
\dot{m}_{chl}	hmotnostný prietok chladiva	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_w	hmotnostný tok vody	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
P	príkion	kW
PB	doba návratnosti	mesiac
P_k	teoretický príkion kompresora	kW
P_{sk}	skutočný príkion kompresora	kW
q_{kon}	merný výkon kondenzátora	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Q_{kon}	tepelný výkon kondenzátor	kW
Q_m	tepelná záťaž od technológií	kW
Q_{OT}	aktuálne dostupné množstvo odpadového tepla	kJ
Q_{OV}	tepelný výkon pre ohrev vody	kW
$Q_{OV,ZP}$	energia potrebná pre ohrev vody	kWh
$q_{výp}$	merný výkon výparníku	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$Q_{výp}$	výkon výparníku	kW
r	úroková miera	-
T_{int}	teplota vzduchu vyšetřovaného priestoru	K
T_{ref}	referenčná teplota vzduchu	K
$T_{W,in}$	vstupná teplota vody	K

$T_{W,out}$	výsledná teplota vody	K
V	objem vyšetovaného priestoru	m ³
V_{ZP}	objem spotrebovaného zemného plynu	m ³
w_{iz}	izoentropická práca	kJ·kg ⁻¹
η_k	účinnosť kompresora	-
ρ_{vz}	hustota vzduchu	kg·m ⁻³
τ	doba hodnotenia	mesiac
BAT	Best available technology	
TČ	Tepelné čerpadlo	
WHR	Waste heat recovery	
ZP	Zemný plyn	