

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra mechaniky a strojnictví



Bakalářská práce

Tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Autor: Daniel Malyšev

© 2022 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daniel Malyšev

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství

Název anglicky

Heat Pumps for Industry and Agriculture

Cíle práce

Sestavení práce rešeršního charakteru, která zmapuje technickou specifikaci tepelných čerpadel využívaných v současnosti v průmyslu a v zemědělství a trendy v jejich vývoji.

Metodika

1. Struktura práce by se co nejvíce měla přiblížit schématu:

- A. Úvod
- B. Materiál a metody
- C. Výsledky
- D. Diskuse
- E. Závěr

V práci rešeršního charakteru lze připustit sloučení bodů B a C. Podobně lze slučovat diskusi a závěr.

2. V bakalářské práci by měly být charakterizovány průmyslové a zemědělské technologie, ve kterých jsou využívána tepelná čerpadla a charakterizováno konstrukční uspořádání využívaných tepelných čerpadel. Na základě studia odborné a vědecké literatury by měly být stanoveny faktory bránící jejich početnějšímu nasazování.

3. Práci je vhodné doplnit fotografiemi, schématy, grafy a tabulkami. Jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je i obsah, abstrakt, seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a literatury.

Práce může být doplněna přílohami.

4. Při vypracování bakalářské práce je nutno dbát na respektování citačních pravidel dle ČSN ISO 690:2011.

5. Vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu.

Doporučený rozsah práce

45 stran včetně tabulek, obrázků a příloh

Klíčová slova

průmyslová tepelná čerpadla; topný faktor; druhotné zdroje energie

Doporučené zdroje informací

- BUFKA, Aleš, MODLÍK, Miloslav, VEVERKOVÁ, Jana, HODBOŤ, Josef. Trh tepelných čerpadel 1981 až 2019; druhy, vývoj, prodeje, výkony, tepelné faktory. In: www.tzb-info.cz [online]. 12.6.2020 [cit. 18.6.2020] Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/19284-tepelna-cerpadla-v-letech-1981-2019-druhy-vyvoj-prodeje-vykony-tepelne-factory>
- KISS, Anton A. a FERREIRA, Carlos A. Infante. Heat Pumps in Chemical Process Industry. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2016. 422 s. ISBN 978-1-4987-1895-0
- MINEA, Vasile. Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2016. 315 s. ISBN 978-1-4987-3499-8
- MINEA, Vasile. Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2018. 705 s. ISBN 978-1-138-04125-7
-

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 22. 6. 2020

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 6. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 02. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce
panu doc. Ing. Pavlu Neubergerovi Ph.D. za trpělivost při vedení práce, cenné připomínky,
odbornou pomoc, pomoc s vyhledáváním zdrojů a drahocenný čas, který mi věnoval.

Tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství

Abstrakt

Bakalářská práce obsahuje stručný popis funkce tepelného čerpadla a jeho základních komponent. Součástí popisu jsou i jednotlivé druhy tepelných čerpadel, které jsou rozděleny podle nízkopotenciálního zdroje tepelné energie (vzduch-vzduch, vzduch-voda, voda-voda, a další). Dále se práce zaměřuje na rozdělení a popis tepelných čerpadel využívaných v průmyslu a zemědělství. V práci jsou také rozebrány způsoby zapojení tepelných čerpadel, používaná chladiva, zdroje druhotného tepla včetně jejich využití. Na konci práce je uvedeno několik příkladů z praxe, kde se tepelná čerpadla využívají pro průmyslové a zemědělské účely.

Klíčová slova: Průmyslová tepelná čerpadla; topný faktor; druhotné zdroje energie

Heating Pumps for Industry and Agriculture

Abstract

The Bachelor thesis contains a brief description of the function of heat pump and its basic components. The description also includes individual types of heat pumps, which are divided by the low-potential source of thermal energy (air to air, air to water, water to water, etc.) Furthermore, the thesis focuses on the division and description of heat pumps used in industry and agriculture. The thesis also discusses the methods of connecting heat pumps, refrigerants used, waste-heat source, including their use. At the end of the thesis are given examples from practice, where heat pumps are used for industrial and agricultural purposes.

Keywords: Industrial heat pumps; coefficient of performance; waste-heat sources

Obsah

1. ÚVOD	8
1.1. CÍL PRÁCE	8
2. TEPELNÁ ČERPADLA.....	9
2.1. PRINCIP TEPELNÉHO ČERPADLA	9
2.2. HISTORIE TEPELNÝCH ČERPADEL	11
2.3. VÝMĚNÍK TEPLA	12
2.3.1. Druhy výměníků tepla	12
2.4. KOMPRESOR	15
2.4.1. Druhy kompresorů	15
2.5. EXPANZNÍ VENTIL	17
2.6. CHLADIVO	18
2.6.1. Rozdělení chladiv.....	19
2.7. TYPY TEPELNÝCH ČERPADEL.....	21
2.7.1. Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch	21
2.7.2. Tepelné čerpadlo vzduch – voda	22
2.7.3. Tepelné čerpadlo voda – voda	23
2.7.4. Tepelné čerpadlo země – voda.....	24
3. TEPELNÁ ČERPADLA PRO PRŮMYSL A ZEMĚDĚLSTVÍ	25
3.1. SYSTÉM ZAPOJENÍ TEPELNÝCH ČERPADEL	25
3.1.1. Jednostupňový systém zapojení	25
3.1.2. Vícestupňový systém zapojení.....	26
3.1.3. Kaskádní zapojení	27
3.2. POUŽÍVANÁ CHLADIVA	29
3.2.1. R744	30
3.2.2. R717	30
3.2.3. R718.....	30
3.2.4. HFO	30
3.3. VYUŽITÍ DRUHOTNÉHO TEPLA	31
3.3.1. Odpadní teplo	31
3.3.2. Další druhy druhotného tepla	32
3.4. POUŽÍVANÁ TEPELNÁ ČERPADLA	33
3.4.1. Nadkritické tepelné čerpadlo s chladivem CO ₂	33
3.4.2. Absorpční tepelné čerpadlo.....	34
3.4.3. Q-ton	36
3.5. POUŽITÍ V PRAXI	37
3.5.1. Použití v průmyslu	37
3.5.2. Použití v zemědělství	39
4. DISKUSE.....	43
5. ZÁVĚR.....	44
LITERATURA	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	49

1. Úvod

Možnost vytápění, chlazení a ohřevu teplé vody je denně využívána jak v domácnostech, tak v průmyslových procesech a různých zemědělských odvětvích. Konvenčně je tato možnost zajištěna elektrickým vytápěním, plynovým vytápěním, vytápěním fosilními palivy nebo lokálními kamny. Avšak kvůli zvyšujícím se cenám energií je snaha o co největší snížení jejich nákladů, zároveň je neméně důležitým aspektem snížení emisí CO₂, které při tomto způsobu vytápění vznikají. Proto je téma tepelných čerpadel velmi aktuální.

Tepelné čerpadlo je vhodnou alternativou pro vytápění, chlazení, ohřev teplé vody menších i větších objektů, protože potřebuje ke svému provozu velmi malé množství dodané energie, v porovnání s tím, kolik jí dokáže vyrobit. Nejenže tepelné čerpadlo získává teplo z nízkopotenciálního zdroje tepelné energie (vzduch, voda, země), ale dokáže využívat i druhotné teplo, což je klad zejména u průmyslových procesů, kde ho vzniká poměrně velké množství a není nijak dále využíváno. I přes veškeré výhody, je počáteční investice do tepelného čerpadla vysoká a návratnost není okamžitá, což odrazuje mnoho potenciálních zájemců. Kromě ceny může hrát roli stáří objektu, velké tepelné ztráty způsobené nedostatečnou izolací nebo další aspekty bránící jeho použití.

1.1. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vypracování rešerše, která by měla zodpovědět neodbornému čtenáři následující otázky:

- Co je tepelné čerpadlo a jak pracuje.
 - o Stručný úvod do problematiky tepelných čerpadel a jeho komponent
- Podle čeho se tepelná čerpadla rozdělují.
 - o Rozdělení tepelných čerpadel podle nízkopotenciálního zdroje tepelné energie.
- V čem jsou tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství odlišná od běžných tepelných čerpadel.
- Jaká tepelná čerpadla se používají v průmyslu a zemědělství
 - o Popis několika druhů tepelných čerpadel s jejich výhodami a nevýhodami.
- Kde se dají využít
 - o Popis instalovaných tepelných čerpadel v praxi

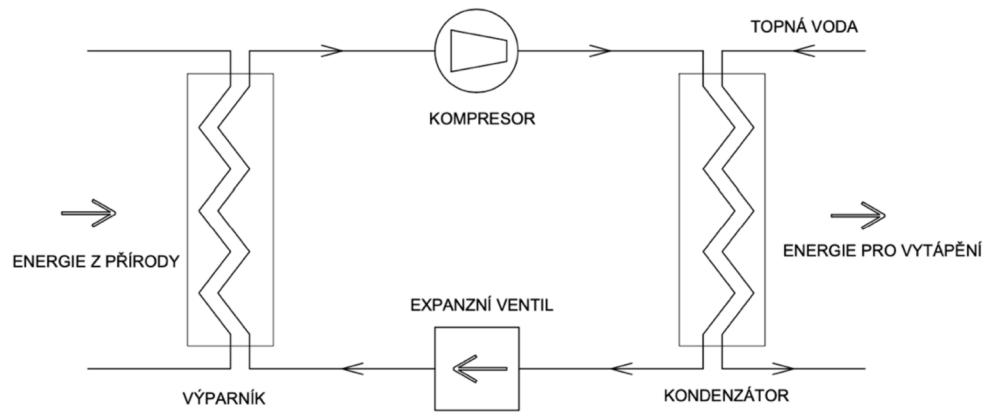
2. Tepelná čerpadla

Tepelné čerpadlo (TČ) je zařízení, které využívá tzv. nízkopotenciální zdroj tepelné energie (NPT) obsažené v okolním prostředí (zemi – geotermální teplo, vzduchu a povrchové vodě), zároveň je NPT obnovitelným, a tedy ekologickým energetickým zdrojem. TČ dokáže přečerpávat teplotní hladinu ze zdrojů nízkopotenciální tepelné energie na vyšší teplotní úroveň za pomoci obvykle elektrické energie. Kromě elektrické energie existuje řada jiných možností pohonu. Získané teplo lze využít například na ohřev teplé užitkové vody (TUV), vytápění, sušení ale i ohřev bazénové vody. [1] [2]

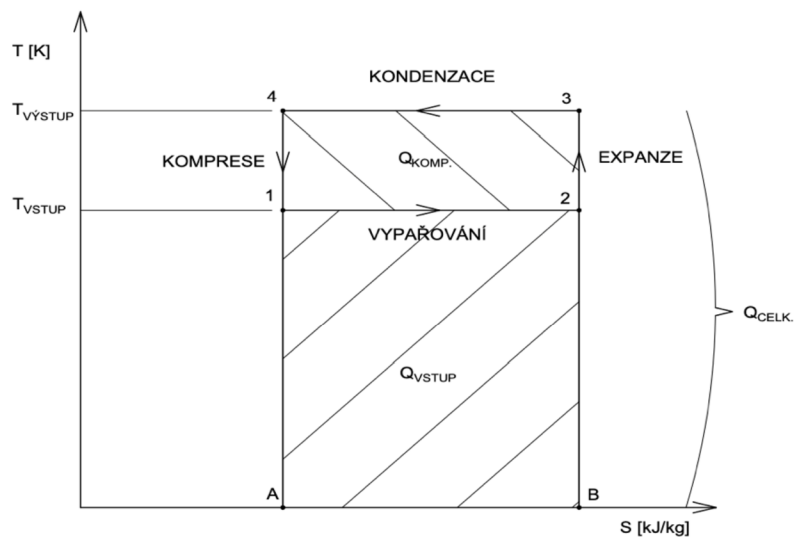
2.1. Princip tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo je cyklicky pracující stroj, kde celý proces probíhá v uzavřeném okruhu a všechny děje se opakují periodicky. Jeho princip vychází z druhé věty termodynamického zákona, která říká, že teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na teplejší. V celém okruhu jsou 4 základní komponenty a to výparník, kompresor, kondenzátor a expanzní ventil.

Na primární straně tepelného čerpadla je tepelný výměník tzv. výparník, jehož úkolem je odebírat teplo z nízkopotenciálního zdroje tepelné energie pomocí teplotnosného média (voda, vzduch, nemrznoucí směs) a předat ho chladivu (pracovní látka), které cirkuluje v okruhu. Kapalné chladivo je vstřikováno expanzním ventilem pod velkým tlakem do výparníku, kde je nižší tlak, což způsobí jeho rychlé odpařování. Zároveň se tím podchlazuje celý výparník na teplotu nižší, než je okolní prostředí, ze kterého je teplo odebíráno. Odpařené chladivo je poté nasáváno kompresorem, který plynné chladivo stlačí. Stlačením se plyn silně zahřeje a postupuje do sekundární strany tepelného čerpadla. Na sekundární straně se nachází druhý výměník tepla tzv. kondenzátor. Zde plynné chladivo předá svoji tepelnou energii ohřivanému médiu (voda, vzduch) a zkondenzuje. Avšak kapalné chladivo je stále ještě příliš horké na to, aby přijímalo teplo, proto je za kondenzátorem umístěn expanzní ventil, který redukuje tlak chladiva a tím dochází k poklesu jeho teploty. Poté je chladivo opět vstřikováno do výparníku, jak bylo popsáno na začátku odstavce a celý proces se opakuje. Obecné schéma kompresorového TČ je uvedeno na Obr. 1. [2]



Obrázek 1 Obecné schéma kompresorového tepelného čerpadla [2]



Obrázek 2 Teoretický pracovní cyklus tepelného čerpadla (Carnotův cyklus) [2]

T – teplota

S – entropie

T_{VSTUP} – teplota zdroje tepla [K]

T_{VYSTUP} – teplota na výstupu [K]

Q_{VSTUP} – energie získaná zvenku (přírody) při teplotě T_{VSTUP}

$Q_{KOMP.}$ – energie potřebná pro pohon kompresoru

$Q_{CELK.} = Q_{VSTUP} + Q_{KOMP.}$

Pracovní cyklus se skládá z následujících fází:

1–2 izotermické vypařování (vypařování při konstantní teplotě)

2–3 adiabatická (izoentropická) komprese (za stálého tlaku)

3-4 izotermická kondenzace (kondenzace při konstantní teplotě)

4-1 adiabatická (izoentropická) expanze (za stálého tlaku)

Významnou hodnotou je topný faktor – Coefficient of Performace (COP). Topný faktor je bezrozměrové číslo, které udává „účinnost“ tepelného čerpadla. Hodnota topného faktoru se pohybuje v rozmezí 2,5 – 5. Samozřejmě čím vyšší toto číslo je tím lepší „účinnosti“ tepelné čerpadlo dosahuje. Avšak tato hodnota není konstantní, mění se v závislosti na podmínkách, v nichž tepelné čerpadlo pracuje. [10]

Tuto hodnotu získáme z poměru celkové vstupní energie a energie pro pohon (1). [2]

$$e = \frac{Q_{CELK.}}{Q_{KOMP.}} = (Q_{VSTUP} + Q_{KOMP.})/Q_{KOMP.} = T_{VÝSTUP}/(T_{VÝSTUP} - T_{VSTUP}) \quad (1)$$

„Nejjednodušším vysvětlením principu TČ je jeho přirovnání k běžné domácí chladniče. Ta odebírá teplo potravinám v izolované skříni a převádí ho bez dalšího užitku do okolního prostoru žebrováním na své zadní straně“. [3]

2.2. Historie tepelných čerpadel

„V roce 1824 S. N. L. Carnot publikoval dílo „Úvahy o hybné síle ohně a strojích vyvolávajících tuto sílu“, kde mimo jiné popsal svůj známý Carnotův cyklus. Na základě jeho prací roku 1851 formuloval William Thomson (lord Kelvin) princip tepelného čerpadla, ale k jeho použití vedla ještě dlouhá cesta.

Jako první chladiva byla používána voda, dietyéter, metyléter, metylchlorid, kysličník uhličitý, kysličník siřičitý a jiné. V roce 1834 sestrojil J. Perkins zařízení pracující s dietyéterem, v roce 1859 vzniklo první zařízení na absorpčním principu pracující se čpavkem. Zatím ještě nešlo o žádné široké používání.

Teprve počátkem dvacátých let 20. století se rozšířilo používání chladicí techniky i do domácností. Používaným chladivem byl hlavně čpavek a kysličník siřičitý.

První prakticky použitelný systém tepelného čerpadla byl uveden do provozu až v roce 1924 ve Švýcarsku. Jako chladivo byl použit kysličník uhličitý, tlaky v systému byly až 9 MPa. Většího rozšíření doznala chladicí zařízení po roce 1932, kdy začala americká firma Kinetic Chemicals Inc. vyrábět první chladivo ze skupiny CFC, dichlordifluormetan, kterému dala obchodní název Freon R12.

V osmdesátých letech 20. století, kdy byl zjištěn a prokázán negativní vliv chloru na ozónovou vrstvu Země, nastal postupný útlum výroby těchto látek a začalo hledání jiných, méně

škodlivých sloučenin a jejich směsí, které by měly stejné nebo podobné termodynamické vlastnosti jako R12 a další.

Širšímu využívání tepelných čerpadel dlouhou dobu bránila vysoká cena zařízení ve vztahu k nízkým cenám energií. To platilo i u nás.

Větší rozšíření tepelných čerpadel nastalo až v osmdesátých letech minulého století, kdy docházelo ke zvyšování cen energií. “ [2]

V současnosti se TČ využívají nejen pro vytápění rodinných domů. Velké využití mají i v průmyslu, zemědělství nebo u bytových domů a administrativních budov.

2.3. Výměník tepla

V tepelném čerpadle se nacházejí dva výměníky tepla, jak bylo uvedeno v podkapitole 2.1. první výměník je označován jako výparník – zajišťuje odběr tepla nízkopotenciálního zdroje tepelné energie. Výparník můžeme teoreticky rozdělit na 2 části. V první části proudí teplonosné médium (nemrznoucí směs, vzduch, voda), které má nižší teplotu než okolní prostředí a tím je schopno z něj odebírat teplo. Toto získané teplo nesené médiem pokračuje do druhé části výparníku, kde ho předává chladivu.

Druhým výměníkem je tzv. kondenzátor, který funguje analogicky jako výparník. Silně zahřáté plynné chladivo zde předává svoje teplo uživatelskému médiu, které je chladnější. Posléze plynné chladivo poklesem teploty zkondenzuje a opouští kondenzátor v kapalně podobě.

Základní podmínkou pro správnou funkci výměníku tepla je dodržení druhé věty termodynamického zákona.

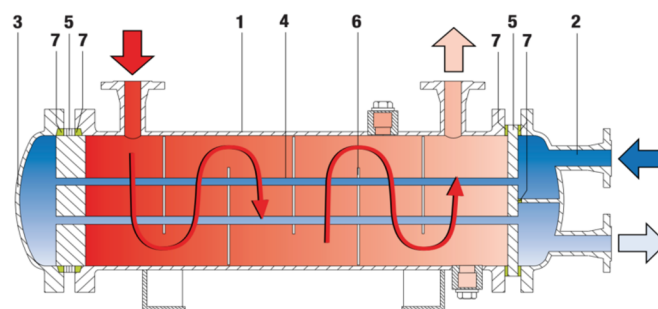
2.3.1. Druhy výměníků tepla

Trubkové výměníky

Jedním z nejstarších typů rekuperačních tepelných výměníků je plášťový tepelný výměník s rovnými trubkami. Výměník se skládá ze dvou oddělených tlakových prostor, a to z pláště (1) a vnitřních trubek (2). Pláštěm proudí médium (vzduch, voda apod.), které je nasáváno vstupním hrdlem. Průtok média mezitrubkovým prostorem je řízen přepážkami (6), tak aby vznikalo co nejvíce příčného proudění k trubkám, tyto přepážky mohou zároveň tlumit vibrace. Na konci prostoru pláště médium vystupuje výstupním hrdlem. Trubkami proudí

teplonosné médium, které odebírá teplo médiu proudící v plášti. Trubky bývají ocelové nebo mosazné s tloušťkou stěny 1,5 - 2,5 mm v závislosti na tlaku pracovních látek. Dalšími příklady trubkových výměníků tepla jsou např.: Člákový výměník, Spirálový výměník. Nevýhodou jsou problémy s teplotní dilatací trubek mezi pevnými trubkovnicemi. Proto je doporučený provoz omezen na menší teplotní rozdíly obou médií. [4] [11]

Konstrukční části trubkového výměníku tepla	
1 plášť výměníku tepla	5 trubkovnice
2 přípojná komora	6 přepážky
3 vratná komora	7 těsnění zařízení
4 vnitřní trubky	



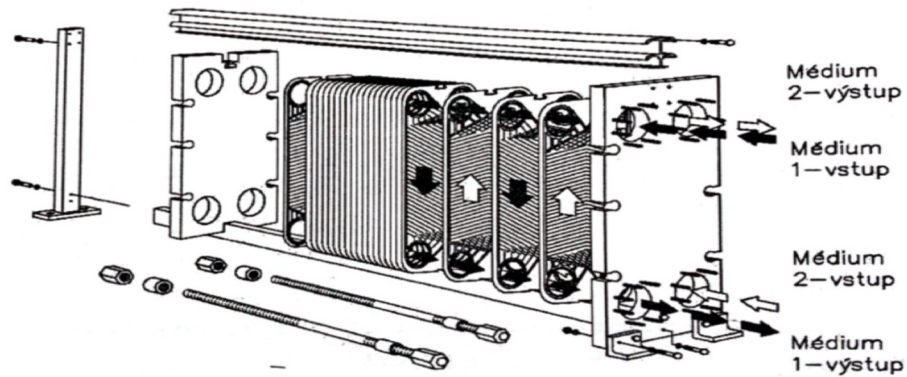
Obrázek 3 Trubkový výměník tepla s rovnými trubkami [11]

Deskové výměníky

Tyto výměníky obsahují rám, do kterého je vloženo požadované množství desek (obvykle 30 desek), které jsou k sobě pájené, svařované nebo staženy šroubovými svorníky. Desky jsou vyrobeny z ocelových plechů o tloušťce 0,4 – 1 mm a jsou do nich vytvarované prolisy. Součástí každé desky je i těsnění z pryže, silikonu, nitrilu, popřípadě azbestových vláken, které jsou umístěny na lemu desky. Po složení vzniknout z prolisů jednotlivých desek kanálky. Jednou skupinou těchto kanálků proudí zahřáté chladivo, které předává svojí energii druhému médiu, které proudí ve druhé skupině těsně přilehlých kanálků.

Nejvíce se deskové výměníky používají pro ohřev kapalin při provozních tlacích do 3,5 MPa a při teplotách do 150 °C, avšak některé typy mohou pracovat s teplotami do 270 °C.

Na obrázku je pro lepší představu znázornění proudění v deskovém výměníku. [4]



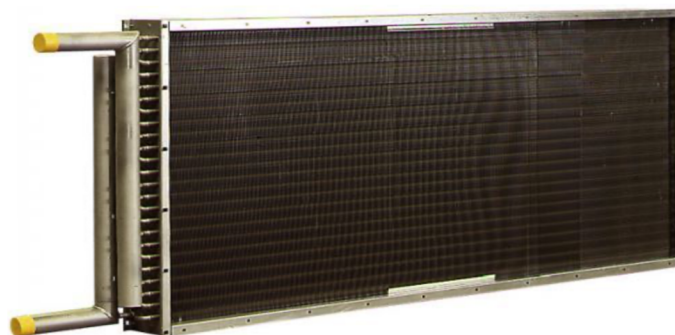
Obrázek 4 Schéma proudění v deskovém výměníku [4]

„Nevýhodou deskových výměníků jsou problémy s dosažením těsnosti při větších tlacích a požadavek na zvýšenou čistotu obou médií, aby nedocházelo k zanášení.“ [4]

Lamelové výměníky

Tyto výměníky se skládají nejčastěji z několika řad měděných trubek, které jsou obvykle proloženy hliníkovými lamelami. Lamely zvětšují teplosměnný povrch a tím zvyšují přenos tepla. Trubkové okruhy se obvykle spojují paralelně. [2]

Často se využívají u teplených čerpadel vzduch – voda, součástí tohoto výměníku bývá ventilátor, který zvyšuje odběr tepla z okolního prostředí.



Obrázek 5 Lamelový výměník tepla [1.]

2.4. Kompresor

Kompresor je umístěn za výparníkem a jeho účelem je stlačování par chladiva. Nasávané chladivo má obvykle teplotu v rozmezí -20 – 10 °C. Stlačené páry se silně zahřejí a pokračují do kondenzátoru, kde předají své teplo užitému médiu a zkapalní. Teploty páry na výtlaku se pohybují v mezích 60 – 100 °C.

Podle použitého chladiva a nastavených pracovních podmínek se mění tlaky v sacím a výtlacném potrubí. Sací tlaky se obvykle pohybují v rozmezích $0,1$ – $0,5$ MPa, u výtlaku je toto rozmezí $0,5$ – $2,5$ MPa. Kompresory při volném chodu jsou schopny dosahovat tlaků přes 3 MPa, proto jsou často opatřeny ochrannými prvky proti nárůstu tlaku jako jsou přetlakové ventily. Poměru sacího a výtlacného tlaku udává hodnotu, která vyjadřuje kompresní poměr.

Bez ohledu na typ kompresoru je sací výkon jedním z velmi důležitých parametrů. Je vyjádřen [$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$] přečerpaného plynu. Jde o objem nasávaných par vztažený k tlaku v sacím hrdle. Z vlastností chladiva a jeho tzv. objemové chladivosti v [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$], se dá stanovit celkový chladicí výkon kompresoru a tím i množství přečerpaného tepla. [2]

Pohon kompresoru zajišťuje nejčastěji elektromotor, avšak pohon může být zajištěn i spalovacím motorem nebo jiným motorem určeným k pohonu kompresoru TČ.

2.4.1. Druhy kompresorů

Hermetický pístový kompresor

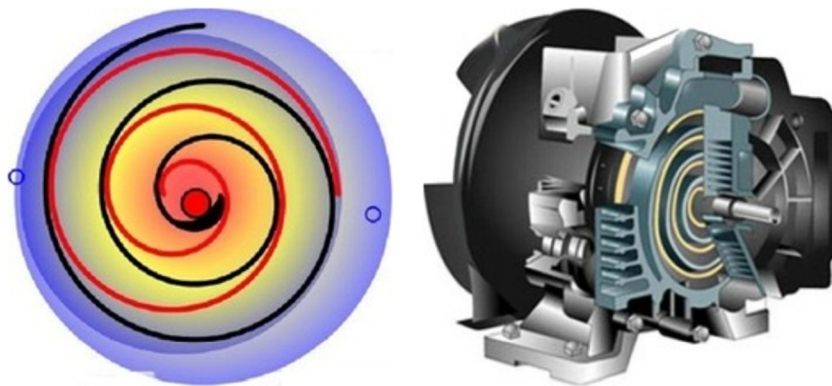
Tento typ kompresoru je vyráběn už po několik desetiletí. Tím že je kompresor hermetický, znamená že elektromotor i kompresor jsou na stejné hřídeli v uzavřené nádobě. To ovšem s sebou nese určité výhody a nevýhody. Jednou z výhod je těsnost, ta brání úniku chladiva do vnějšího prostředí, jelikož pouzdra bývají svařeny od výroby. Další výhodou je nízká pořizovací cena a malá konstrukční velikost. Poslední výhodou je živostnost, která je v celku dostačující vzhledem k pořizovací ceně, tyto kompresory jsou schopny sloužit i více než 15 let. Jednou z hlavních nevýhod je nepřístupnost k vnitřním součástem kompresoru, což činí kompresor neopravitelný. Mezi další nevýhody patří např.: hlučnost, menší topný faktor.

Tento typ kompresoru při jednom pracovním zdvihu pístu stlačí pracovní látku z tlaku sacího na tlak výtlačný. [5] [12]

Spirálové kompresory SCROLL

Nejpoužívanějším kompresorem v současnosti je tzv. SCROLL („spirálový“). Tento typ v podstatě nahradil dřívější pístové kompresory.

Hlavní rozdíl mezi pístovým a spirálovým kompresorem je, že spirálový má jen jednu pohyblivou část (spirálu), ta má definovanou trajektorii podle druhé nepohyblivé části (spirály). Nepohyblivá spirála je upevněna k tělu kompresoru, naopak pohyblivá spirála je spojena s klikovou hřídelí a obíhá po dráze, avšak se nejedná o rotační pohyb, nýbrž o pohyb translační. Při pohybu se mezi spirálami vytváří „kapsy“, které se posouvají směrem ke středu obou spirál. V důsledku zmenšování „kapes“ se zvětšuje tlak i teplota na potřebnou hodnotu. [6]



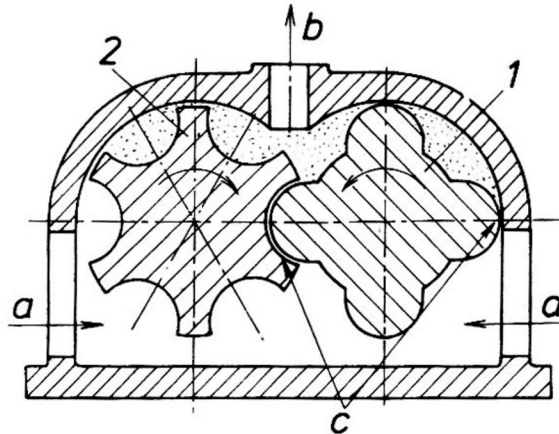
Obrázek 6 Spirálový kompresor SCROLL [13]

Šroubové kompresory

Šroubové kompresory se skládají ze skříně a dvou rotorů, které mají rovnoběžnou osu otáčení. Základním principem tohoto kompresoru spočívá v tom, že vnitřní a vnější rotor se otáčí v protiběžném smyslu, což má za následek nasávání vzduchu mezi rotory. Vzduch proudící kolem rotorů je stlačován vlivem zmenšování prostoru mezi rotory a skříní.

Geometrie obou rotorů, jak je zobrazeno na Obr. 7 není zcela symetrická, spíše naopak. Rotory tvoří šroubovitá tělesa o nestejném počtu zubů. Vnitřní (hnací) rotor má zpravidla méně zubů než vnější (hnaný) rotor. Počet zubů se u některých strojů může lišit.

Díky svým vlastnostem může tento typ kompresoru běžet ve vysokých otáčkách a vyvinout tak velký průtok při malých vnějších rozměrech. Šroubový kompresor je vhodný i pro použití na pracovištích v průmyslovém měřítku. [7]



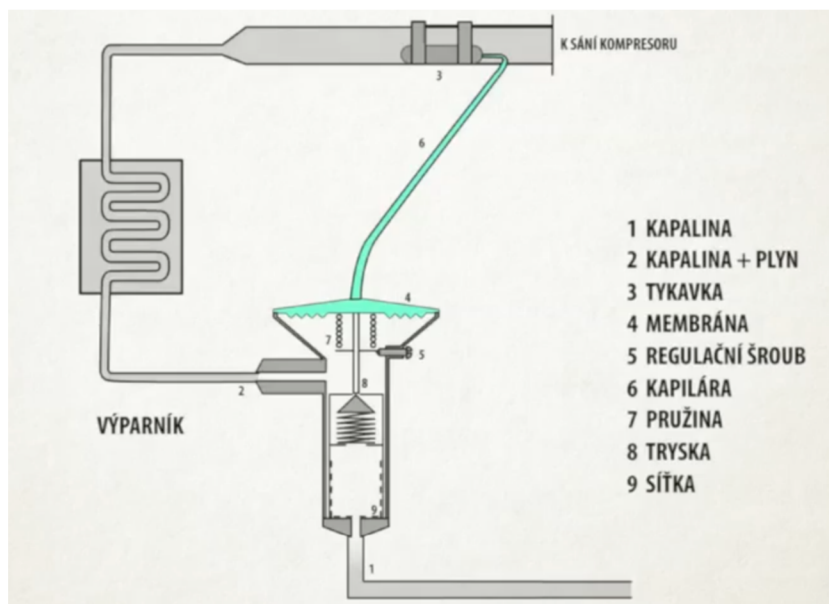
Obrázek 7 Příčný řez šroubového kompresoru [2.]

- 1 – Hnací motor
- 2 – Hnaný motor
- a – Sání
- b – Výtlak

2.5. Expanzní ventil

Přesný název je termostatický expanzní ventil (TEV), často označovaný jako vstříkovací ventil. Expanzní ventil se nachází za kondenzátorem, kde do něj vstupuje zkondenzované chladivo. Jeho úkolem je snížit tlak a tím i teplotu chladiva, zároveň reguluje přísun chladiva do výparníku, tak aby byl výparník správně plněn pro optimální pracovní stav. Konstrukční provedení je graficky znázorněno na obr. 8.

Hlavní částí termostatického expanzního ventilu je tryska, která je otevírána silou, vytvořenou vzájemným působením několika veličin. Tyto síly jsou vytvářeny tlakem plynů na membránu (4) ventilu a pružinou regulačního šroubu (5). Tlak na membránu, který ovlivňuje její činnost je vytvářen pomocí teplotního čidla (3), tzv. tykavka. Tykavka je malá nádobka naplněna vyhovujícím plynem, u kterého roste tlak s rostoucí teplotou. Tento zvýšený tlak je pomocí kapiláry (6) přenášen na membránu. Tlak nad membránou roste s rostoucí teplotou tykavky, tlak pod membránou se zvyšuje s vypařovací teplotou. Rozdíl těchto tlaků odpovídá přehřátí chladiva a vytváří sílu potřebnou ke stlačení pružin (7) a následnému otevření trysky ventilu. Pružiny se dají regulovat pomocí regulačního šroubu (5). [2] [14]



Obrázek 8 Schéma termostatického expanzního ventilu [14]

2.6. Chladivo

Při cirkulaci chladiva okruhem tepelného čerpadla, chladivo mění svoje skupenství z kapalného na plynné ve výparníku a posléze z plynného na kapalné v kondenzátoru. Příčiny změny skupenství byly popsány v kap. 2.3.

Chladiv existuje celá řada, a jejich výroba prošla jakousi evolucí. Dříve se hojně využívala báze s plně halogenovanými uhlovodíky (CFC), ta byla časem vyměněna za částečně halogenované uhlovodíky (HCFC). Postupně pod nátlakem zabezpečení minimálního škodlivého vlivu byly i částečně halogenované uhlovodíky nahrazeny fluorovanými uhlovodíky a jejich směsí. [8]

Velmi důležitým koeficientem je Ozone Depletion Potential (ODP). Tento koeficient vyjadřuje vliv plynů a par, a tedy i chladiv na poškozování ozónové vrstvy. Jako základní měřítko bylo použito chladivo R11 (freon), jehož koeficient ODP je stanoven na hodnotu 1. Čím je poměrné číslo látky nižší, tím menší je vliv chladiva na poškozování ozónové vrstvy.

Dalším důležitým koeficientem je Global Warming Potential (GWP). Jedná se o vyjádření vlivu látek na tzv. skleníkový efekt, který je příčinou oteplování Země. Číslo je vztahováno k CO₂/100 let, u kterého je stanoven GWP = 1. Jak se číslo zvyšuje, zvětšuje se i negativní vliv. [2]

2.6.1. Rozdělení chladiv

CFC – plně halogenované uhlovodíky

- R11, R12, R113, R114, R115, R13
- Tzv. freonová chladiva byla již zcela zakázána. [8]

HCFC – částečně halogenované uhlovodíky

- R22, R123, R124, R142
- Od roku 2010 platí pro tato chladiva zákaz, pro údržbu mohla být používána do roku 2014. [8]

HFC – fluorované uhlovodíky a jejich směsi

- R23, R32, R125, R134a, R152a, R143a, R407c, R404a, R410a, R417a, R507
- Složení těchto chladiv nenarušuje ozonovou vrstvu, proto v současnosti nahradila zakázané látky. [8]

HC – přírodní uhlovodíky a jejich směsi

- R170, R290, R600a, R171, R744, R1270 [9]
- Jsou zcela bez halogenidů, ale některé jsou hořlavé
- Nemají žádný škodlivý vliv na ozón a minimální vliv na skleníkový efekt. [2]

	Fluorované skleníkové plyny			GWP
Chladiva HFC	R23	CHF ₃		14800
	R32	CH ₂ F ₂		675
	R125	C ₂ HF ₅		3500
	R134a	CH ₂ FCF ₃		1430
	R152a	C ₂ H ₄ F ₂		124
	R143a	C ₂ H ₃ F ₃		4470
	R227ea	C ₃ HF ₇		3220
	R236fa	C ₃ H ₂ F ₆		6300
Směsi obsahující chladiva HFC	R404A	R125/R134a/R143a	44 / 4 / 52 %	3922
	R407A	R32/R125/R134a	20 / 40 / 40 %	2107
	R407B	R32/R125/R134a	10 / 70 / 20 %	2804
	R407C	R32/R125/R134a	23 / 25 / 52 %	1774
	R410A	R32/R125	50 / 50 %	2088
	R417A	R125/R134a/R600	46,6 / 50 / 3,4 %	2346
	R422D	R125/R134a/R600	65, 1 / 31,5 / 3,4 %	2729
	R427A	R32/R125/R143a/R134a	15 / 25 / 10 / 50 %	2138
	R437A	R134a/R125/R600/R601	78,5 / 19,5 / 1,4 / 0,6 %	1805
	R507	R125/R143a	50 / 50 %	3985
	R508A	R23/R116	39 / 61 %	13214
	R508B	R23/R116	46 / 54 %	13396

Tabulka 1 Chladiva jejichž složení nenarušují ozónovou vrstvu [9]

				GWP
Přírodní chladiva	R170	Ethan	C ₂ H ₆	6
	R290	Propan	C ₃ H ₈	3
	R600a	Isobutan	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	3
	R717	Amoniak (čpavek)	CH ₃	0
	R744	Oxid uhličitý	CO ₂	1
	R1270	Propylen	C ₃ H ₆	2

Tabulka 1 Tabulka 2 Přírodní chladiva [9]

2.7. Typy tepelných čerpadel

Typy tepelných čerpadel se rozlišují podle toho, odkud čerpadlo odebírá nízkopotenciální zdroj tepelné energie (zdroj energie) a kam ho dále předává (užitkové médium). Na základě toho rozlišujeme čtyři základní typy tepelných čerpadel:

- Vzduch – vzduch
- Vzduch – voda
- Voda – voda
- Země – voda

2.7.1. Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch

Jak už název napovídá, tak zdrojem energie je vzduch, který patří k prakticky neomezeným a dá se říci, že i neekologičtějším zdrojům tepelné energie, protože teplo odebrané z okolí je do něj opět vráceno tepelnými ztrátami objektu. Toto tepelné čerpadlo dokáže ohřívat nebo ochlazovat pouze vzduch, proto se řadí mezi tepelná čerpadla s výrazně nižší počáteční investicí a s podstatně rychlejší instalací. Dalším důležitým aspektem je topný faktor, který klesá při nízkých teplotách (-20 až -25 °C).

Díky tomu, že se používá spíše jako doplňující zdroj k elektrickému nebo plynovému kotli, dokáže snížit spotřebu energií a tím ušetřit nemalé sumy. [1] [15]



Obrázek 9 Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch [3.]

2.7.2 Tepelné čerpadlo vzduch – voda

Princip získávání energie je stejný jako u tepelného čerpadla vzduch – vzduch. Rozdíl je pouze v tom, že se neohřívá pouze vzduch (v některých případech), ale i užitková voda.

Toto tepelné čerpadlo je použitelné téměř všude, jen snad s výjimkou horských oblastí, protože stálá nižší teplota vede ke zmenšení topného faktoru, a to má za následek vyšší spotřebu energie a náklady na provoz tepelného čerpadla. Proto se doporučuje instalace tepelných čerpadel vzduch – vzduch, vzduch – voda spíše v mírných oblastech, kde nedochází k velkým tepelným poklesům.

Konstrukce tohoto čerpadla je rozdělena na primární (venkovní strana) a sekundární (vnitřní strana) strany (tzv. split), stejně jako u tepelného čerpadla vzduch – vzduch. Na primární straně se nachází výparník s ventilátorem a expanzním ventilem. V některých konstrukcích je součástí primární strany i kompresor, v takových případech je na sekundární straně pouze kondenzátor. [14] [15]



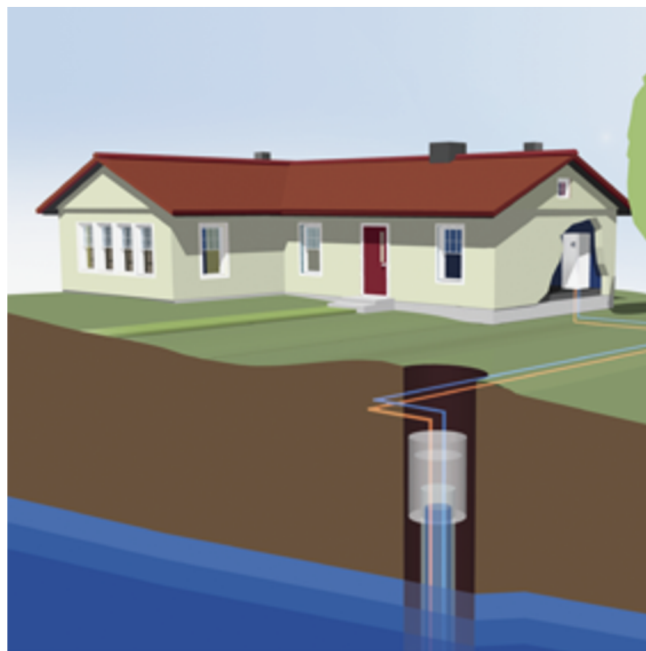
Obrázek 10 Tepelného čerpadla vzduch – voda [3.]

2.7.3. Tepelné čerpadlo voda – voda

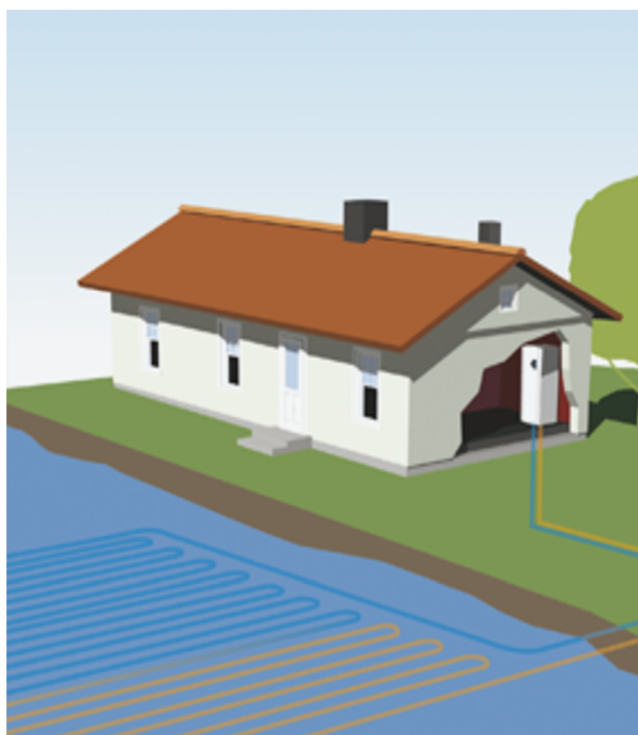
Jedná se o tepelné čerpadlo, které odebírá nízkopotenciální teplo z vody, a to buď z vody podzemní (studniční) nebo povrchové. Získané teplo čerpadlo předává užitkové vodě na sekundární straně, stejně jako u typu vzduch – voda.

Teplo z podzemních vod je využitelné v případě, kdy má voda vhodné složení, zároveň je čistá a celoročně má konstantní teplotu minimálně 8–10 °C. To je zároveň výhodou, protože díky stálé teplotě vody po dobu všech ročních období má tento systém nejvyšší průměrný roční topný faktor. To znamená, že výkon tepelného čerpadla bude po celý rok relativně stálý. Pro optimální chod tohoto čerpadla a z hlediska životního prostředí je třeba dodržet určité požadavky. Prvním z požadavků je, že čerpaná (ochlazená) voda nesmí být vracena do původní studny odkud byla čerpána, jinak by se studna vychladila. Vyčerpaná voda se musí vracet do země pomocí druhé tzv. vsakovací studny, která by měla být umístěna 8–10 m od studny první. Avšak dostupnost tohoto zdroje nebývá příliš četná, kvůli nízkému výskytu oblastí, kde by se tato technologie dala aplikovat.

Teplo z povrchové vody jako jsou potoky, řeky a rybníky musí splňovat stejné požadavky jako voda podzemní. Problémem často bývá čistota nebo množství vody, ale hlavně teplota. Teplota vody na tocích se během roku mění a v zimních obdobích může být teplota vody i nižší než 4 °C. To může vést k zamrznutí výparníku a v důsledku toho ke snížení jeho topného faktoru.



Obrázek 11 Tepelné čerpadlo využívající podzemní vody [3.]



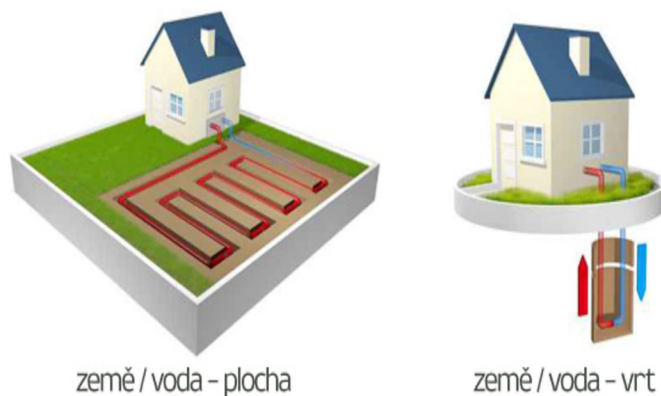
Obrázek 12 Tepelné čerpadlo využívající povrchové vody [3.]

2.7.4 Tepelné čerpadlo země – voda

Teplo obsažené v půdě, se většinou využívá nepřímo. Získává se v náležitém výměníku tepla tzv. kolektoru a převádí se uzavřeným okruhem s cirkulačním čerpadlem a nemrznoucí teplonosnou kapalinou. Kolektor je vyroben z PVC trubek a ukládají se:

- v hlubinném geotermálním vrtu – hloubka vrtu až 5 km
- nebo horninových vrtech – hloubka vrtu 150 m i více
- nebo jako plošný či výkopový v hloubce 1,5 – 2 m

Teplo ze země se odebírá zcela odlišným způsobem než ze vzduchu. Odběr tepla je spojen s vychlazováním zemního masivu kolem kolektoru. Teplota nízkopotenciálního zdroje tepelné energie zemního masivu kolem kolektoru je nižší než teplota vzduchu na povrchu. Avšak v otopném období je teplota vzduchu na povrchu nižší než teplota země kolem kolektoru. Díky tomu je topný faktor po celý rok stálější. Naopak střední hodnota v průběhu otopného období je u vzduchu většinou vyšší než teplota nízkopotenciálního zdroje tepelné energie odebíraného ze země. [1]



Obrázek 13 Tepelné čerpadlo země-voda [5.]

3. Tepelná čerpadla pro průmysl a zemědělství

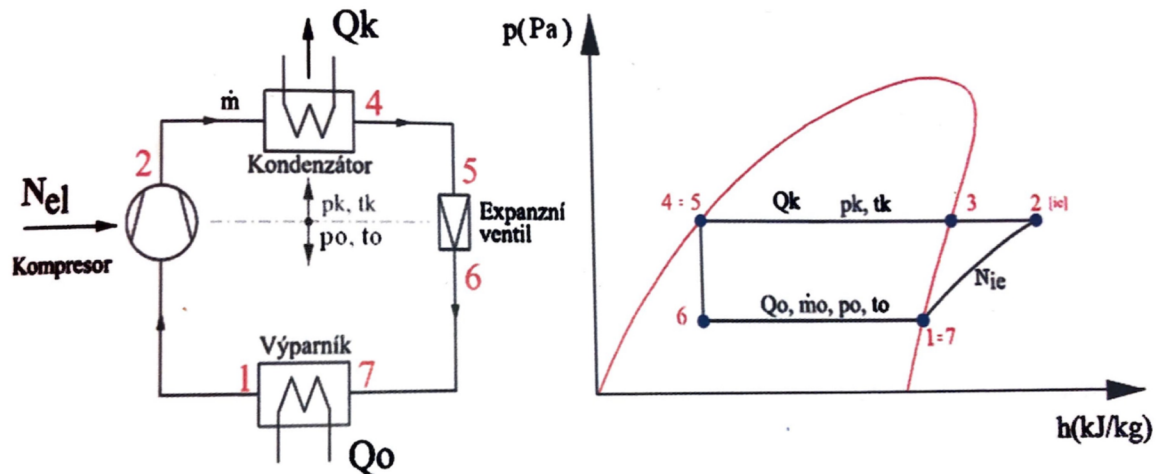
Průmysl se globálně řadí na druhé místo v produkci emisí CO_2 , což je 22 % z celkové světové produkce, proto je u něj potřeba k přechodu na uhlíkovou neutralitu. Použitím TČ nejen, že se může využít odpadní teplo z průmyslových a zemědělských procesů, ale sníží se i používání fosilních paliv a tím dojde k poklesu emisí CO_2 .

TČ v průmyslu a zemědělství se využívají tzv. nízkoteplotní a vysokoteplotní tepelná čerpadla. Nízkoteplotní TČ se aplikují v případech požadované výstupní teploty do $80\text{ }^\circ\text{C}$, na druhou stranu vysokoteplotní TČ jsou využívána v případech požadované výstupní teploty vyšší než $80\text{ }^\circ\text{C}$. Kromě konvenčního nízkopotenciálního zdroje tepelné energie se tato TČ zaměřují na rekuperaci druhotného tepla relativně nízkých teplot, především mezi $5\text{ }^\circ\text{C}$ a $42\text{ }^\circ\text{C}$ pro přívod teplé vody, horkého vzduchu, ohřev cirkulující vody a páry při teplotách vyšších než $100\text{ }^\circ\text{C}$. Nicméně počet průmyslových TČ realizovaných po celém světě je v posledních letech poměrně nízký. Příčinou je nedostatečná znalost technologie a integrace procesů, nízké informovanosti o spotřebě energie v závodech, relativně dlouhá návratnost a novým požadavkům na vysoké objemy, teploty, tlaky, topné faktory apod. [16] [17] [20]

3.1. Systém zapojení tepelných čerpadel

3.1.1 Jednostupňový systém zapojení

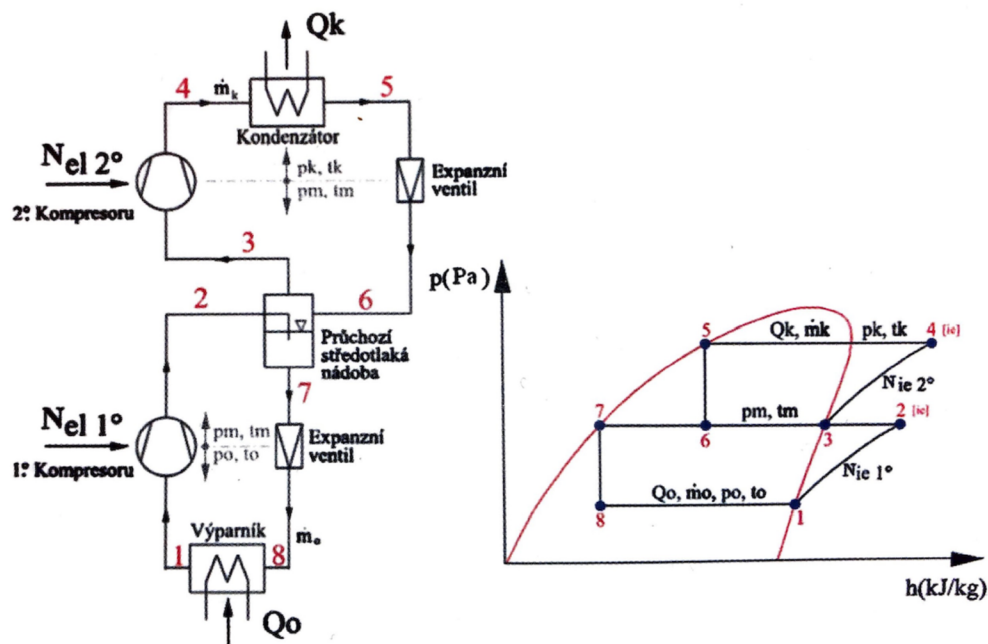
Jednostupňové zapojení je nejběžněji používané ve většině případů tepelných čerpadel. Běžně se nedá použít v průmyslovém a zemědělském měřítku, ale díky zapojení jednotlivých TČ do jednoho okruhu tzv. kaskády je možné docílit hodnot o větších objemech a teplotách. O zapojení TČ do kaskády více v podkapitole 3.1.3.



Obrázek 14 Schéma zapojení jednostupňového TČ a termodynamický cyklus [1]

3.1.2. Vícestupňový systém zapojení

Vícestupňový systém má ve svém okruhu více než jeden kompresor, což vede ke zvýšení teplotního vztlaku a zlepšení účinnosti kompresoru. Tento okruh se dvěma kompresory (Obr. 15) pracuje s průchozí středtlakou nádobou, která je umístěna mezi dvěma stupni okruhu. Páry chladiva odsávané z výparníku, jsou stlačovány kompresorem prvního stupně a pokračují do mezichladiče – středtlaké nádoby, kde se ochlazují díky směšování s chladivem o mezistupňové teplotě. Ochlazené páry chladiva jsou ze středtlaké nádoby odsávány kompresorem druhého stupně a stlačovány na vyšší tlak a výtlačnou teplotu. Poté plynné chladivo o vysoké teplotě, předá svoji tepelnou energii v kondenzátoru a zkapalní. Kapalně chladivo je následně škrceno expanzním ventilem do středtlaké nádoby, čímž jí ochladí na mezistupňovou teplotu. Škrčením zároveň vznikají mokré páry, které se v mezichladiči rozdělí na sytou kapalinu a na syté páry. Část seškrčeného chladiva ochladí horké plynné chladivo z prvního stupně – obvykle až k hranici sytosti par. Sytá kapalina ze středtlaké nádoby je následně seškrcena expanzním ventilem prvního stupně, přičemž vzniknou mokré páry. Ve výparníku se mokré páry vypaří a vzniknou z nich syté páry, které jsou následně odsávány kompresorem prvního stupně. [1] [16]

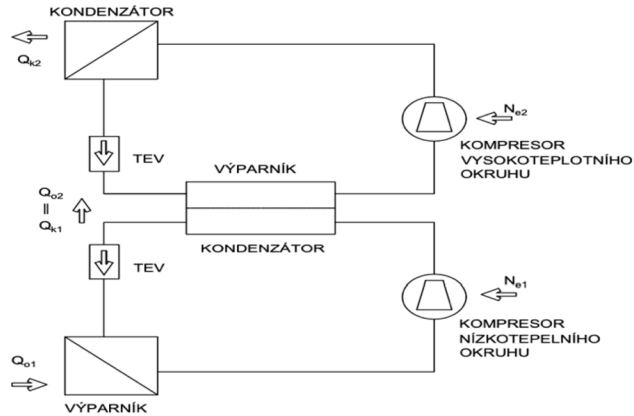


Obrázek 15 Schéma zapojení dvoustupňového systému [1]

3.1.3. Kaskádní zapojení

Jedná se o často používaný způsob zapojení tepelných čerpadel pro velké výkony. Tento systém se hojně využívá pro vytápění, popřípadě chlazení bytových domů, hotelů, bazénů, průmyslových zařízení, administrativních budov apod.

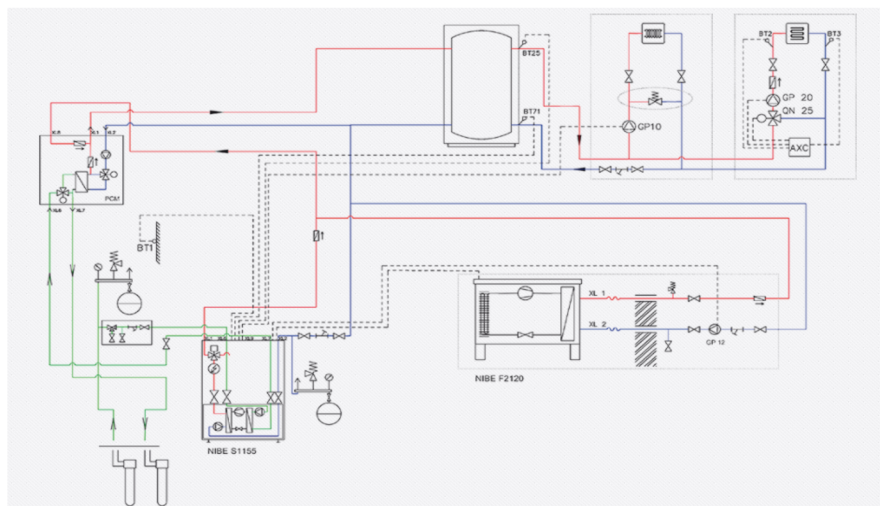
Kaskádní zapojení je propojení několika tepelných čerpadel do jednoho okruhu. Celý okruh se může skládat ze dvou i více jednostupňových či vícečetných okruhů. Tepelná čerpadla jsou vzájemně propojena tak, že výparník vysokoteplotního okruhu je zároveň kondenzátorem okruhu nízkoteplotního. V každém z okruhů cirkuluje jiné chladivo, které se volí v závislosti na vnějších podmínkách, tak aby bylo dosaženo co největší účinnosti. Zpravidla v kaskádě funguje „hierarchie“ TČ, čerpadlo v nadřazené pozici je označováno jako „master“, na druhé straně čerpadlo v podřazené pozici je označováno jako „slave“. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 16.[1]



Obrázek 16 Jednoduché schéma kaskádního okruhu zapojení [1]

Výhodou kaskády je možnost zapojení různých typů tepelných čerpadel, která mohou běžet souběžně, nebo mezi sebou přepínat v závislosti na změně vnějších podmínek. Mezi další výhody patří plynulá regulace výkonu kaskády v závislosti na aktuální potřebě tepla a velkou výhodou je možnost přechodu na částečný výkon v případě havárie jednoho z čerpadel.

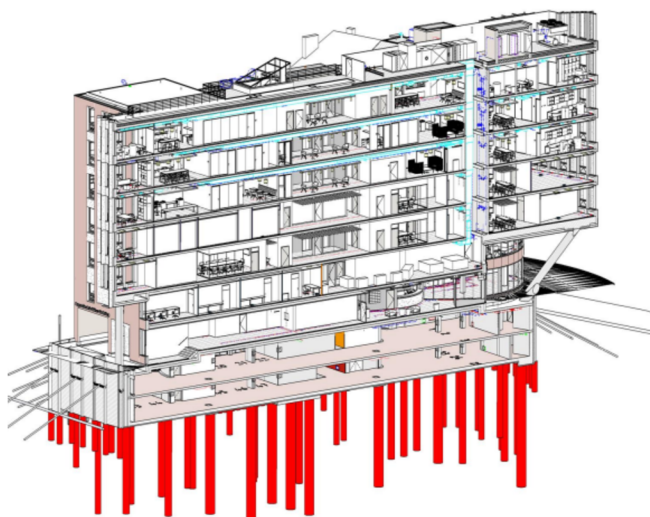
Jedním z příkladů je propojení tepelných čerpadel země-voda, vzduch-voda. Obě čerpadla mají svůj primární okruh, kdy okruh země-voda je napojen na zemní výměník (plošný kolektor nebo vrt) a okruh vzduch-voda je napojen na venkovní výměník. Řídící logika kaskády je následovná, pokud je teplota venkovního vzduchu nižší, než nastavená hodnota pracuje čerpadlo země-voda (pozice master), jestliže venkovní teplota překročí nastavenou hodnotu začne pracovat čerpadlo vzduch-voda (pozice slave). Díky tomu je průměr celoročního topného faktoru stabilnější. U tohoto systému lze vytvořit kaskádu až 8 TČ s maximálním výkonem 200 kW. Výsledky studií ukazují, že kombinací těchto dvou technologií lze docílit snížení spotřeby energie u obou čerpadel. [18] [19]



Obrázek 17 Schéma zapojení kaskády TČ země-voda a vzduch-voda od společnosti NIBE [18]

Dalším často používaným systémem propojením je vzduch-voda. V kaskádě může být zapojeno až 16 jednotek do jednoho okruhu. Vhodným příkladem kaskády vzduch-voda je tepelné čerpadlo Q-ton, které je popsáno v podkapitole 3.4.3.

U systému země-voda se často používá technologie vrtného pole, ta je zejména vhodná pro řešení ohřevu teplé užitkové vody u velkých budov. Provedení je uskutečněno vytvořením vrtů (množství vrtů se odvíjí od požadovaného výkonu nebo konstrukčních možností) o hloubce 100-250 m pod budoucím objektem. K vytvořeným vrtům jsou následně připojena tepelná čerpadla. Nevýhodou této technologie je omezená plocha pro vrtvy. Avšak nejvyužívanější technologií pro systém země-voda jsou plošné kolektory nebo geotermální vrtvy. Toto řešení je vhodné i pro velké výkony. Například kolektor o rozloze 15000 m² má topný výkon okolo 350 kW. [31]



Obrázek 18 Příklad vrtného pole [31]

3.2. Používaná chladiva

Nejběžněji používaná chladiva, zejména fluorované uhlovodíky (HFC), jsou omezena na výstupní teplotu maximálně 80 °C. Pro průmyslová tepelná čerpadla je k dispozici několik syntetických a přírodních chladiv. Přírodní vysokoteplotní chladiva jako oxid uhličitý (R744), čpavek (R717) a voda (R718) mají minimální škodlivý vliv na ozonovou vrstvu a globální oteplování, proto jsou zároveň velice šetrná k přírodnímu prostředí. Kromě těchto chladiv se používají syntetická vysokoteplotní chladiva skupiny HFO. [20]

3.2.1. R744

Oficiální název přírodního chladiva je R744 neboli oxid uhličitý. Chladivo R744 má hodnotu Ozone Depletion Potential (ODP) rovnou nule a hodnota Global Warming Potential (GWP) je rovna jedné. Další výhodou chladiva je jeho nevýbušnost, ne-toxicita, kompabilita s běžnými mazivy, vysoká výhřevnost a třikrát nižší cena na jednotku hmotnosti než fluorované uhlovodíky (HFC). Je také třeba zmínit jeho jedinečnou vlastnost, kterou je nízká kritická teplota 31 °C a relativně vysoký kritický tlak 7,47 MPa. Díky všem těmto vlastnostem a vzhledem ke stále přísnějším předpisům ohledně globálního oteplování se oxid uhličitý stává stále využívanějším chladivem. [21] [26]

3.2.2. R717

Amoniak (čpavek) je přírodní chladivo s excelentními termodynamickými a transportními vlastnostmi, široce používané v průmyslových chladících a topných systémech, protože může snadno zajistit teploty až 80 °C a dokonce 90 °C. Jeho předností je, že má vysokou hmotnost a objemovou chladivost, a zároveň výrazně nižší cena ve srovnání s ostatními chladivy. Velkými nevýhodami jsou výbušnost, hořlavost a jedovatost, avšak díky svému štiplavému zápachu jej lze snadno odhalit dříve, než se zvýší jeho koncentrace ve vzduchu. [16] [20]

3.2.3. R718

Voda je čisté chladivo s nulovým potenciálem škodlivého vlivu na ozonovou vrstvu (ODP=0) a stejně je tomu tak i u dopadu na globální oteplování (GWP=0). Toto chladivo je nehořlavé, chemicky stabilní, netoxické, bezpečné, běžně dostupné a recyklovatelné. Vodu lze v okruhu TČ využít nejen jako chladivo ale i jako teplosměnné médium, proto může být aplikováno přímé vypařování a kondenzace, což by vedlo ke zvýšení COP. I přes veškeré popsané výhody má R718 některé nevýhody oproti konvenčním chladivům. Mezi nevýhody patří nízká hustota plynné fáze, která vyžaduje relativně vysokou kapacitu kompresoru. Toto chladivo se může využívat například u průmyslových tepelných čerpadel na odsolování mořské vody pro rostliny. [20] [28]

3.2.4. HFO

Celým názvem hydrofluor-olefin, jsou chladiva, která byla navržena jako náhrada za stávající chladiva jako jsou R134a, R32, R236fa, R245fa a další ze skupiny HFC, která mají

vysokou hodnotu GWP a tím zhoršují dopad na globální oteplování. HFO jsou prozatím považovány za nejvhodnější náhradu za HFC chladiva z důvodu nízké hodnoty GWP. [30]

HFO-1234ze(E) a HFO-1234ze(Z)

Toto Chladivo má poměrně vysokou kritickou teplotu (109,35 °C), proto ho lze považovat za středně vysokoteplotní chladivo. Zejména chladivo HFO-1234ze(Z) má vysokou kritickou teplotu (kolem 150 °C), díky tomu je umožněno provozování podkritických cyklů při vysokých teplotách požadovanými průmyslovými tepelnými čerpadly. Proto se zdá být nejslibnějším chladivem s nízkým GWP v tomto oboru. [20] [29]

Chladivo	ODP	GWP	Kritická teplota [°C]	Kritický tlak [MPa]
Oxid uhličitý (R744)	0	1	30,98	7,47
Čpavek (R717)	0	0	132,25	11,48
Voda (R718)	0	0	373,95	22,06
HFC-236fa	0	6300	124,9	3,12
HFC-245fa	0	950	154,01	3,65
HFO-1234ze(E)	0	6	109,35	3,63
HFO-1234ze(Z)	0	<5	153,7	3,97

Tabulka 3 Vlastnosti vysokoteplotních chladiv [20]

3.3. Využití druhotného tepla

Teplo je možné získat z různých zdrojů jako je například odpadní teplo z průmyslových nebo zemědělských procesů, z odpadní vody, důlní vody apod. Tepelná čerpadla dokáží toto teplo využít pro další procesy a tím snížit náklady na energii. Zpravidla čím menší je rozdíl teplot mezi druhotným teplem a potřebné výstupní teplotě, tím teplené čerpadlo rekuperuje levněji. [33]

3.3.1. Odpadní teplo

Při procesu spalování paliva (výfukové plyny) nebo chemické reakce vzniká teplo, které již nelze efektivně nebo ekonomicky využít a říká se mu „odpadní teplo“. Technologie rekuperace je založena na přeměně odpadního tepla na jiné užitečné formy bez dodatečné

elektrické energie a je považována za účinné opatření pro ekologické a udržitelné způsoby rozvoje v průmyslových odvětvích.

Dalšími zdroji odpadního tepla je teplo z chlazení serverů, odpadního vzduchu svářecích strojů a jiných technologických procesů.

Tepelné zdroje lze rozdělit do tří skupin. První skupinou je tzv. nízko úroňové odpadní teplo (méně než 230 °C), druhou skupinou je středně úroňové odpadní teplo (230-650 °C) a třetí skupina je vysoce úroňové teplo více než (650 °C). [32] [33]

Nízko úroňové teplo (<230 °C)	Středně úroňové teplo (230-650 °C)	Vysoko úroňové teplo (>650 °C)
Petrochemický prům.	Prům. automobilové dopravy	Prům. palivových článků
Potravinářský prům.	Energetický prům.	Cementářský prům.
Textilní prům.	Sklářský prům.	Hutě
Papírnictví		

Tabulka 4 Klasifikace průmyslového odpadního tepla [32]

3.3.2. Další druhy druhotného tepla

Teplo z odpadní vody

Voda se v průmyslu a v jiných odvětvích využívá relativně často při různých procesech, jako je například chlazení při řezání nebo vrtání, praní zemědělských produktů, odpadní voda z veřejných bazénů nebo splašková voda z bytových domů a hotelů. Avšak není být podmínkou, že zdrojem tepla mohou být pouze odpadní vody z výše uvedených příkladů, mohou jimi být i důlní, šedé vody a prosakující vody z přehradní nádrže. [33]

Ostatní druhotné teplo

Kromě výše uvedených druhů druhotného tepla, je možné nalézt využitelné teplo i v kvasnicových procesech při výrobě vína nebo v kvasných a ležáckých tancích při výrobě piva (zde pracuje tepelné čerpadlo v režimu pivo/voda), dále je možné ho nalézt v chlazení mladiny nebo v podobě kondenzačního tepla z chladících jednotek. [33]

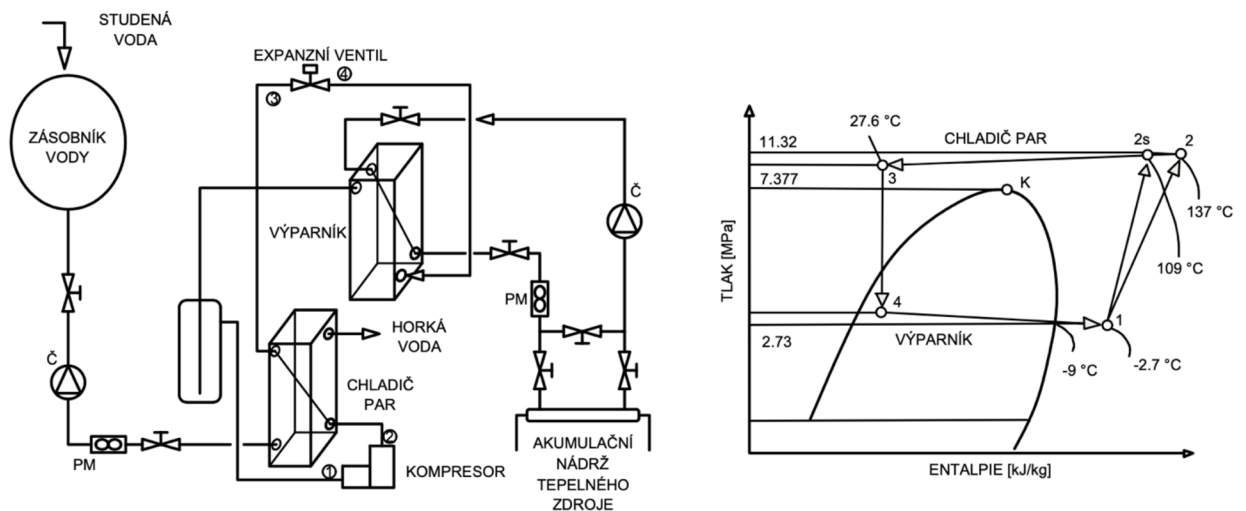
3.4. Používaná tepelná čerpadla

3.4.1. Nadkritické tepelné čerpadlo s chladivem CO₂

Tato TČ mají mnoho použití ve středně průmyslových a průmyslových budovách, kde je vyžadována teplá užitková voda s teplotou nad 60 °C. Tento typ dosahuje vyšší energetické efektivity v porovnání s kompresorovými tepelnými čerpadly s konvenčními chladivy.

Princípem tohoto čerpadla je stlačování chladiva kompresorem nad kritický bod. V okruhu vstupuje chladivo do kompresoru (bod 1), tam je přivedeno na vyšší tlak a teplotu (bod 2) neizotropickým kompresním procesem (body 1-2) (Obr. 16). Na základě měnicího se množství chladiva uvnitř vysokotlaké strany systému je řízen výstupní tlak. Škrćením ventilu se hmotnostní průtok CO₂ snižuje a CO₂ se hromadí ve vysokém tlaku a tím stoupá i teplota. Naopak otevíráním ventilu se tlak na vysokotlaké straně sníží, zatímco přebytečná náplň je shromažďována v kapalném stavu uvnitř nízkotlaké nádoby.

Body 1-2s znázorňují teoretický izoentropický děj. [20]



Obrázek 19 Schéma zapojení transkritického TČ; Termodynamický cyklus chladiva (Č – čerpadlo; PM – průtokoměr; K – kritický bod [20])

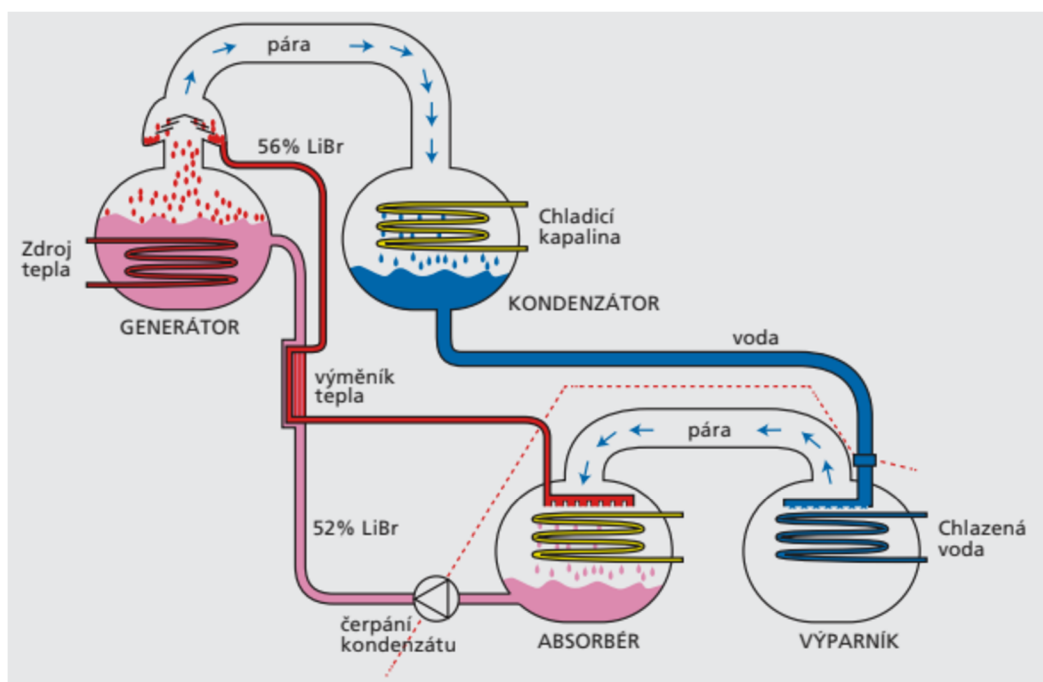
3.4.2. Absorpční tepelné čerpadlo

Toto čerpadlo je často využíváno průmyslu i zemědělství. Díky tomu, že dokáže využívat jako hlavní zdroj energie teplou vodu, páru, spaliny výfukových plynů, odpadní plyn nebo odpadní teplo jako takové, které by se za běžných podmínek nevyužilo. Kromě těchto zdrojů mohou využívat zemní plyn, hlubinné geotermální zásobníky nebo solární termiku. Avšak pro správnou efektivitu TČ je potřeba, aby zdroj tepelné energie měl teplotu 75 °C a více.

Základním rozdílem mezi absorpčními tepelnými čerpadly a čerpadly s kompresorem je absence kompresoru, jehož funkci nahrazuje tepelný proces, který je uveden na obr. 16. Další rozdíl je v používané pracovní látce, ta se skládá z chladiva a absorbentu. V současnosti se používají 2 kombinace pracovních látek. Prvním z nich je dvojice vody (chladiivo) a bromidu hlinitého (absorbent) – H₂O-LiBr, druhá dvojice je z amoniaku (chladiivo) a vody (absorbent) – NH₃-H₂O. [20] [27]

Pracovní cyklus toho TČ začíná ve výparníku, kde chladivo odebírá nízkopotenciální teplo a odpařuje se. Poté vede do absorbéru, tam chladivo předá svoje teplo absorbentu a zkapalní. Vzniklý roztok je odčerpán do generátoru, kde je ohříván zdrojem tepla. Chladivo se v důsledku zahřívání z roztoku odpaří a putuje do kondenzátoru, kde svoje teplo předá užitkovému médiu. Ochlazené chladivo se poté opět vrátí do výparníku a celý proces se opakuje. [22]

Mezi výhody absorpčního tepelného čerpadla se řadí velmi tichý chod, neboť neobsahuje žádnou mechanicky pohyblivou součást. Další výhodou je dlouhá životnost (minimálně 30 let) a dobrá návratnost investic. I navzdory výhodám není vždy první volbou, jelikož počáteční investice jsou vyšší než u běžných tepelných čerpadel. [27]



Obrázek 20 Schéma pracovního cyklu absorpčního tepelného čerpadla [22]

Absorpční TČ se vyskytují především v odvětví potravinářském, mlékárenském, pivovarnickém, lihovarnickém, chemickém nebo dokonce i k výrobě čokolády. Kromě toho se dají využít ve dřevařství (sušení), slévárenském průmyslu nebo při odsolování mořské vody.

I v zemědělství má toto TČ svoje hojně využití. Například v živočišné a rostlinné výrobě, kdy je třeba zajistit dobré klimatické podmínky pro chov zvířat nebo zajistit vhodnou teplotu pro klíčení růst rostlin. V tomto případě se využívá jako zdroj tepla biologické teplo zvířat (jejich tělesná teplota, dýchání), jejich exkrementy a mléko. U rostlinné výroby může být využito jako zdroj tepla např. odpadní teplo z kompostárny nebo lze využít spodní vodu.

Chladivo/absorbent	Adsorpce		
	H ₂ O/LiBr Jednostupňový	H ₂ O/LiBr Dvoustupňový	NH ₃ /H ₂ O (Čpavek)
Zdroj tepla [°C]	75–110	135–200	65–180
Výkon [kW]	10,5 – 20000	174–60000	14–700
COP vytápění	1,4-1,6	0,9-1,3	1,4-1,6

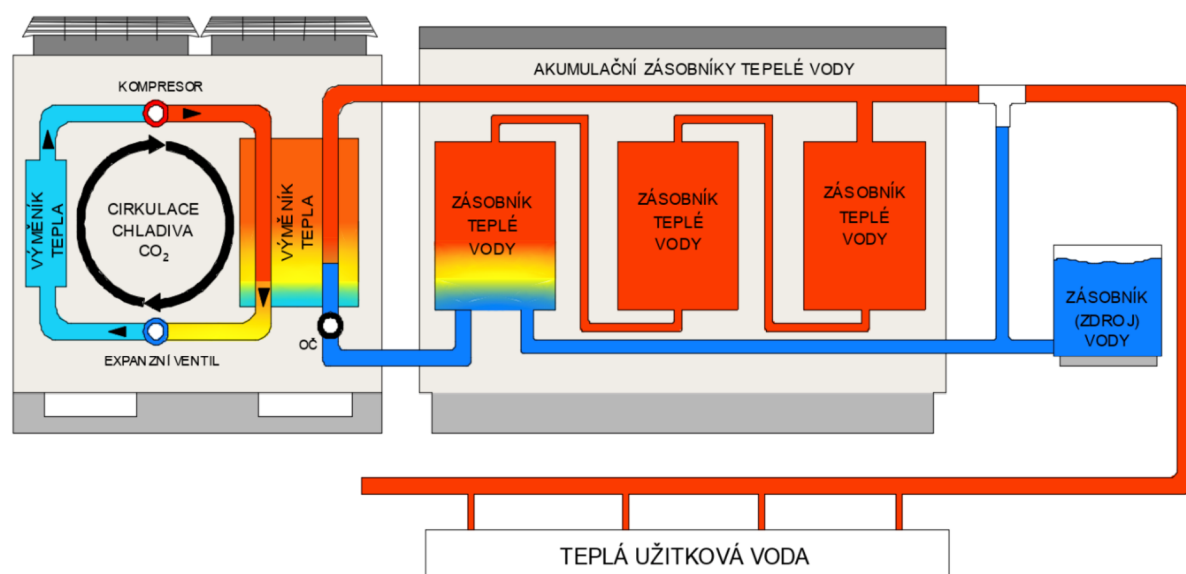
Tabulka 5 Charakteristiky adsorpčních tepelných čerpadel [25]

3.4.3. Q-ton

Q-ton je tepelné čerpadlo vzduch-voda vyvinuté japonskou společností Mitsubishi pouze pro ohřev teplé vody velkých objemů. Čerpadlo dokáže pracovat s velkou účinností i při nízkých teplotách bez velké spotřeby elektrické energie. Pracovní látkou je zde chladivo R744, neboli CO₂, podrobnosti byly již zmíněny v podkapitole 3.2.1. Tato TČ mají svá využití v obytných objektech (bytové domy, panelové domy, koleje) nebo v komerčních a průmyslových objektech (hotely, bazény, sportoviště, ohřev vody pro průmyslové účely, potravinářství). [23]

Q-ton disponuje dvoustupňovým kompresorem, kde prvním stupněm je rotační kompresor a druhým je spirálový kompresor (scroll). Mimo jiné poprvé byl představen ve spojení s tímto čerpadlem. Samostatná jednotka TČ může mít konstantní výkon 30 kW při teplotách od -7 °C do 43 °C, avšak kaskádní zapojení až 16 jednotek dosahuje maximálního výkonu 480 kW a je schopno ohřát 3000 – 100 000 litrů vody denně s výstupní teplotou 60-90 °C. Dosahované hodnoty z hlediska topného faktoru jsou velmi příznivé, při teplotě okolního vzduchu 16 °C je COP = 4,3 a při teplotě okolního vzduchu 3 °C je COP = 3.

Nejvyšší účinnosti je dosahováno, pokud je k TČ přiváděna voda s co nejnižší teplotou. Z toho důvodu je tepelnému čerpadlu přiváděna voda ode dna zásobníku, kde je nejchladnější. [23] [24]



Obrázek 21 Schéma tepelného čerpadla Q-ton (OČ – oběhové čerpadlo) [4.]

3.5. Použití v praxi

3.5.1. Použití v průmyslu

Prvním příkladem použití v praxi je tepelné čerpadlo voda-voda Aqua Master 180.2Z od společnosti Master Therm, které bylo realizováno v roce 2014/2015 v Ústavu jaderné fyziky Akademie věd v Husinci. Kaskáda 8 jednotek o celkovém výkonu 856 kW je chlazená novým urychlovačem částic TR24 a získané teplo je zpětně využito pro celoroční ohřev TV a vytápění budovy. [34]



Obrázek 22 Strojovna Ústavu jaderné fyziky Akademie věd [34]

Dalším příkladem je výrobní hala BOSCH v Českých Budějovicích. Pro vytápění haly a kanceláří o celkové rozloze 9000 m² je využito 11 tepelných čerpadel značky IVT o celkovém výkonu 600 kW. Zdrojem tepla je technologické odpadní teplo o teplotě 25 °C, které vzniká při výrobě automobilových součástí. Toto teplo je poté rekuperováno na vyšší teplotní hladinu 65 °C, které je snadno využitelné pro vytápění. [35]



Obrázek 23 Výrobní hala BOSCH v Č.B. [35]

Jak bylo zmíněno v podkapitole 3.4.3. tepelné čerpadlo Q-ton se dá využívat i v potravinářství, k tomu se vztahuje i tento příklad. V roce 2019 byl uveden do provozu objekt ekologické hovězí porážky s důrazem na welfare a ekologii. Přívod teplé vody, která je pro porážku důležitá zajišťují 2 TČ tohoto typu o výkonu 2x30 kW se sezónním topným faktorem (SCOP=3,3), kromě toho jsou využívány i elektrické topné patrony 9x30kW. Z toho vyplývá, že celkový výkon je 330kW. Avšak samotná tepelná čerpadla dokáží ohřívat vodu na teplotu 85 °C i při -25 °C, a to bez elektrických patron. Teplá voda je v objektu odebírána z akumulčních nádrží (obr. 21 a 24) o objemu 20 000 litrů na několik spotřebitelských okruhů. První okruh odebírá vodu o teplotě 45 °C a používá ji pro linku porážky hovězího dobytka VORAN. Druhý okruh odebírá vodu o teplotě 65 °C, která se využívá pro mytí linek a šaten. Poslední okruh využívá vodu o teplotě 85 °C pro sterilizaci a technologii „dršťkárny“. [36]



Obrázek 24 Akumulační zásobníky teplé vody v objektu na hovězí porážku [36]

Kromě kompresorových tepelných čerpadel, jsou v průmyslu a zemědělství značně využívána absorpční tepelná čerpadla. Tentokrát je příkladem Královopolská slévárna, jedna z největších brněnských továren, kde je využíváno zbytkového tepla. Výkon tepelného čerpadla je stanoven na 100 kW a hlavní funkcí bude chlazení technologie a ohřev teplé vody s vytápěním. Využití odpadního tepla je zde rozděleno do 3 kategorií:

- Využití tepla z nádrže určené pro chlazení pecí a k vytápění modelárny a současné chlazení chladicí vody.
- Využití zbytkového tepla z kompresorů odcházejícího vzduchovodem k vytápění šaten
- Využití zbylého tepla z nádrže pro chlazení pecí k vytápění haly [37]

Následující instalace je provedena v Číně v závodě na výrobu syntetického kaučuku Yanshan Petrochemical Corporation. K rekuperaci odpadního tepla v podobě páry o teplotě 98 °C je zde využíván absorpční tepelný transformátor (ATT). Rekuperované teplo se používá k ohřevu teplé vody z 95 °C na 110 °C. Jako pracovní látka se zde používá roztok H₂O/LiBr s tepelným tokem 5000 kW. [38]



Obrázek 25 Absorpční tepelné čerpadlo v závodě na výrobu kaučuku [38]

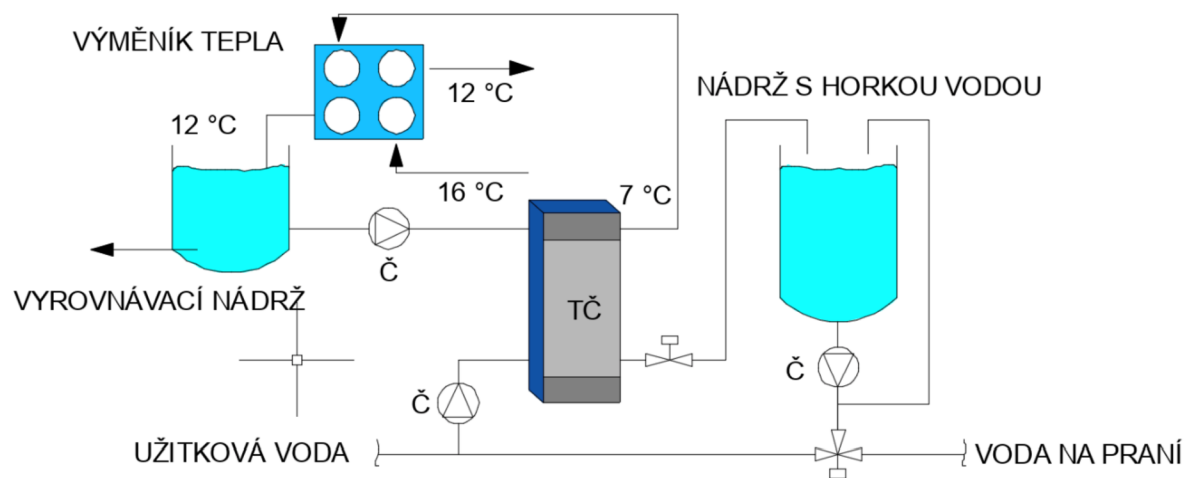
3.5.2. Použití v zemědělství

Následující příklad je z mlékárenství. Na mléčné farmě v Plaveckém Štvtku je denní produkce mléka 58 m³ za den. Nadojené mléko je nutné zchladit z 35 °C na 5-6 °C a přečerpát do akumulačních nádrží, kde se udržuje stálá teplota 5-6 °C. Jako odpadní teplo se zde využívá teplo z chlazeného mléka, které slouží jako primární zdroj pro kaskádu 3 TČ voda-voda IVT-GEO G248 s výkonem 177 kWt/132 kWch. Vyrobené teplo se zde používá pro přípravu teplé vody a pro vytápění. [36]



Obrázek 26 Fotografie dojící stanice z kraví farmy [36]

V Kanadské mlékárně byl navržen pilotní projekt o integraci nadkritického CO₂ tepelného čerpadla s výkonem 100kWt. Primárně by šlo o snížení spotřeby fosilních paliv. TČ by bylo umístěno mezi dva energetické systémy. Na jedné straně by byl okruh s prací vodou a na straně druhé okruh chlazení procesní vody. Zdrojem tepla by byl v tomto případě uzavřený okruh s vodou o teplotě 12 °C, který cirkuluje mezi vyrovnávací nádrží a výměníkem tepla. Rekuperací tohoto tepla by voda za tepelným čerpadlem měla teplotu 7 °C, což je teplota, která dokáže ochladit procesní kapalinu z 16 °C na 12 °C. Odebraná tepelná energie vodě by se na druhé straně TČ využila pro ohřev užitkové vody na teplotu až 85 °C. [39]



Obrázek 27 Schéma pilotního projektu využití nadkritického CO₂ TČ v mlékárně (Č – čerpadlo) [38]

V Německu ve Warngau se nachází komunální kompostárna, kde se bioodpad rozkládá na humus, celý proces probíhá v průmyslové hale. Kvůli větrání nepříjemného zápachu a pro zachování aerobního procesu rozkládání je vzduch nasáván skrze biologický odpad a tím podporuje jeho saturaci kyslíkem. Odváděný vzduch má teplotu mezi 30-65 °C v závislosti na stavu rozkladu. Tento odsátý vzduch je následně použit jako zdroj tepla pro absorpční tepelné čerpadlo, které dokáže navýšit získané teplo z přibližně 40 °C na 80 °C. Navýšená tepelná úroveň je vhodná pro vytápění a zásobování blízkých komerčních budov. [27]



Obrázek 28 Hala kompostárny (vlevo); Absorpční TČ kompostárny [27]

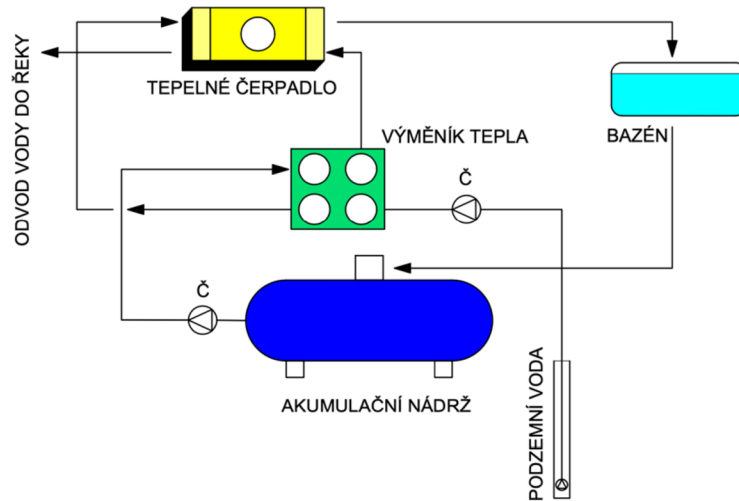
Jedním z posledních příkladů je provoz vinařství, který se nachází ve Velkých Pavlovicích. Tepelná čerpadle zde zajišťují teplo, ohřev teplé vody a chlazení pro výrobní halu a penzion, který je součástí vinice. Je zde nainstalováno TČ země-voda od značky IVT-Greenline HE E28 o výkonu topení/chlazení 70 kW. Dodávku nízkopotenciální energie zajišťují 4 hlubinné vrty, každý 150 m hluboký. Na systém TČ je napojena akumulční nádoba tepla 1000 l, akumulční nádoba chladu 1000 l a zásobník teplé vody 600 l. Přebytné teplo, které vzniká při práci TČ v režimu chlazení je ukládáno do akumulční nádrže tepla nebo do zásobníku teplé vody. V momentě, kdy jsou nádoby dosáhnou požadované hodnoty, je odpadní teplo předáno přes deskový výměník zpátky do vrtů a dochází k regeneraci vrtů. [36]



Obrázek 29 Fotografie vinice [36]

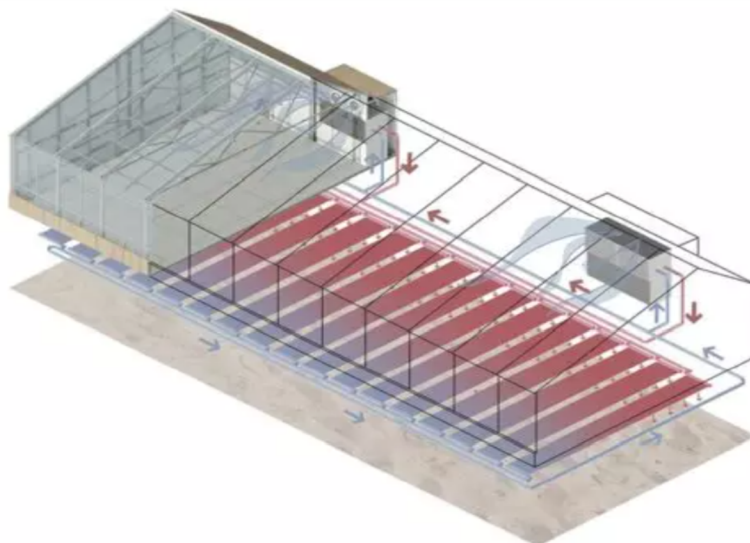
Předposlední příklad je spíše historický, a jedná se o Kanadskou rybí farmu lososů atlantských. Farma obsahuje několik bazénů s chovnou vodou o celkovém objemu 45 m³ a celkovým průtokem přibližně 10,5 l/s, z toho okolo 50 % tvoří podzemní voda. Použitý je zde systém dvoustupňové rekuperace s tepelným čerpadlem voda-voda. Čerstvá voda je čerpána přes deskový výměník tepla, který zvyšuje její teplotu z rekuperované tepelné energie odpadní vody procházející z rybních bazénů. Před vstupem predehřáté vody do bazénů, voda prochází

kondenzátorem tepelného čerpadla, kde odebírá tepelnou energii chladivu. Jak zdroj tepelné energie pro tepelné čerpadlo je využita voda z bazénů, která předtím prošla deskovým výměníkem tepla. Posléze je odvedena do řeky [39]



Obrázek 30 Schéma dvoustupňové rekuperace rybí farmy v Kanadě (Č – čerpadlo) [39]

Posledním příkladem je pilotní projekt společnosti Ceres – Greenhouse solutions, která se zabývá skleníky a jejich provozu v různých měřítkách. Podstatou tohoto projektu je vytápění, chlazení a odvlhčování uzavřených skleníků pomocí tepelných čerpadel EcoLoop. K TČ zeměvoda je připojen zemní okruh, který se nachází pod skleníkem, jak je uvedeno na obr. 31. Tento okruh přenáší tepelnou energii do nebo z tepelných čerpadel. Recirkulující voda v potrubí bude buď tepelnou energii ze země absorbovat (režim vytápění) nebo rozptylovat (režim chlazení). [40]



Obrázek 31 Model skleníku s tepelnými čerpadly a zemním okruhem [40]

4. Diskuse

Tepelná čerpadla jsou slibnou náhradou zdrojů tepla za elektrokotle, plynové kotle apod. Jak vyplývá z kapitoly 3.5., tepelná čerpadla mohou být a jsou využita v mnoha odvětvích jak průmyslu, tak i zemědělství. Dokonce i využití tepelných čerpadel vzduch-voda, která běžně nedosahují hodnot potřebných pro provoz v průmyslu či zemědělství, mohou být využita, jak dokládá instalace tepelného čerpadla Q-ton u projektu na hovězí porážku z roku 2019. Kromě využití chladiva R77 v TČ Q-ton, může toto chladivo být využito i nad kritickou izotermou (v nadkritické oblasti), díky tomu je dosahováno vyšší teploty, jak je popsáno v podkapitole 3.4.1. a posléze uvedeno na příkladu Kanadské mlékárny. Lze si také povšimnout rozmanitosti a možností způsobu zapojení tepelných čerpadel, popřípadě implementací, do již fungujícího provozu, jak je uvedeno na příkladu vinice ve Velkých Pavlovicích.

Jejich četnost instalací narůstá, nejen kvůli své schopnosti rekuperovat druhotné teplo, ale i kvůli snížení nákladů za energie jejichž ceny v poslední době rapidně stoupají. Nedílnou součástí je i snižování emisí CO₂ a tím snižování škodlivého dopadu na globální oteplování. A to je jednoznačným trendem budoucnosti ve vývoji chladiv, kde je kladen vysoký důraz na plnění ekologických požadavků. Tomuto vývoji přispívá i rozhodnutí Evropského parlamentu o ukončení používání uhlovodíkových chladiv do roku 2030 a přechod na přírodní chladiva nebo jiná chladiva s nízkou hodnotou GWP, která jsou podrobně popsána v kap. 3.2. Je důležité také zmínit, že EU řídí program dotací, které jsou určeny pro projekty na úsporu energií. Tyto projekty podporují stavební úpravy (zateplení, výměna oken apod.), výměnu technologií za úspornější, fotovoltaické elektrárny, tepelná čerpadla, zelené střechy, retenční nádrže a další. Hodnota této dotace se může šplhat i přes desítky milionů Českých korun.

5. Závěr

Cílem této práce bylo seznámit neodborného čtenáře s problematikou tepelných čerpadel, jejich rozdělení a použití v průmyslu a zemědělství s budoucím vývojem a trendy.

První část práce je věnována úvodu do problematiky tepelných čerpadel. Kapitola uvádí princip a historický vývoj tepelných čerpadel, kromě toho jsou zde uvedeny základní komponenty, ze kterých se skládá kompresorové tepelné čerpadlo s jejich popisem a druhy. Na konci kapitoly je uvedeno rozdělení TČ podle nízkopotenciálního zdroje tepla s uvedením kladů a protikladů.

Druhá část práce je věnována tepelným čerpadlům pro průmysl a zemědělství. Tato kapitola se zabývá rozdělením systému zapojení různorodých a sourodých tepelných čerpadel do jednoho okruhu. Dále jsou uvedena používaná chladiva u průmyslových a zemědělských tepelných čerpadel, která nemají škodlivý dopad na globální oteplování. Kromě toho jsou zde představeny někteří zástupci tepelných čerpadel využívaných v tomto sektoru a jejich popisem a možností využití. Konec této kapitoly uvádí příklady použití tepelných čerpadel v průmyslu a zemědělství.

Literatura

- [1] Kolektiv autorů. *Svaz chladicí a klimatizační techniky*, 2. vydání, Praha 2018 ISBN 978-80-260-0558-2
- [2] ŽERAVÍK, Antonín. *Stavíme tepelné čerpadlo*, 1. vydání, 2003, EURO-PRINT Přerov spol. s. r. o. ISBN 80-239-0275-X
- [3] TINTĚRA, Ladislav. *Tepelná čerpadla*, Praha 2003, ISBN 80-86165-61-2
- [4] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*, VUT Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9
- [5] DINCER, Ibrahim a Mehmet KANOGLU. Refrigeration system and applications [online]. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U. K.: Wiley, 2010, xvi, 464 p. [cit. 2022-02-18]. ISBN 04-707-4740-4.
- [6] ČERNÁ, Iveta. *Jak funguje SCROLL kompresor v tepelných čerpadlech?* [online]. [cit. 2022-02-21] Dostupné z: <http://www.vytapeni.cz/okenko/scroll-kompresor>
- [7] *Vysvětlení činnosti rotačních šroubových kompresorů* [online]. [cit. 2022-02-21] Dostupné z: <https://www.atlascopco.com/cs-cz/compressors/products/air-compressor/rotary-screw-compressor>
- [8] *Chladiva a jejich rozdělení* [online]. [cit. 2022-02-21] Dostupné z: <https://www.e-chladiva.cz/chladiva-rozdeleni-p112.htm>
- [9] KRAINER, Robert. *Chladiva používaná v tepelných čerpadlech*. 04.05.2015 [online]. [cit. 2022-02-21] Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/12647-chladiva-pouzivana-v-tepelnych-cerpadlech#:~:text=Chladivo%20cirkuluje%20v%20tepln%C3%A9m%20okruhu,op%C4%9Bt%20na%20kapaln%C3%A9%20v%20kondenz%C3%A1toru.>
- [10] *Topný faktor COP – účinnost tepelného čerpadla* [online]. [cit. 2022-03-01] Dostupné z: <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/topny-faktor-cop-ucinnost-tepelneho-cerpadla>
- [11] FUNKE, Quality Heat Exchangers, *Trubkový výměník tepla* [online]. [cit. 2022-03-02] Dostupné z: https://www.funke.de/pdf/cz/funke_shell_tube_he_cz.pdf
- [12] [online]. [cit. 2022-03-03] Dostupné z: <https://www.umt.fme.vutbr.cz/~svechet/main/storage/vp2/kompresory.pdf>

- [13] DADVID, Petr. *Kompresory pro tepelná čerpadla*. 26. 11. 2015 [online]. [cit. 2022-03-03] Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13498-kompresory-pro-tepelna-cerpadla>
- [14] DŘÍMAL, Petr. *Tepelná čerpadla, geotermální energie*, publi.cz; 2016 ISBN 978-80-88058-05-02
- [15] HERWIG, Bohumil. *Tepelná čerpadla vzduch – vzduch a vzduch – voda: jak fungují a kam se hodí?* 24.8.2013 [online]. [cit. 2022-03-05] Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/tepelna-cerpadla-vzduch-vzduch-a-vzduch-voda-jak-funguji-a-kam-se-hodi/>
- [16] JIANG, Jiantong. HU, Bin. WANG, R. Z.. Deng, Na. CAO, Feng. WANG, Chi-Chuan. *A review and perspective on industry high-temperature heat pumps*. 26. 08. 2021. [online]. [cit. 2022-03-15] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>
- [17] IEA HEAT PUMP CENTRE, *Application of Industrial Heat Pump, Final report – Part I*. 2014 ISBN 978-91-88001-92-4
- [18] ČERVÍN, Radek. *Kaskády tepelných čerpadel a kombinace systému vzduch-voda a země-voda*. 08. 01. 2021 [online]. [cit. 2022-03-18] Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/budoucnost-tepelnych-cerpadel-4-cast-detail-9812>
- [19] STIEBEL ELTRON spol. s r. o. *Přizpůsobující se výkon s vysokou účinností – kaskáda od STIEBEL ELTRON*. 17.01.2021 [online]. [cit. 22-03-18] Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/22531-prizpusobujici-se-vykon-s-vysokou-ucinnosti-kaskada-od-stiebel-eltron>
- [20] MINEA, Vasile. *Advances in Heat Pump-Assisted drying technology*. 2016 ISBN 978-1-4987-3499-8
- [21] WANG, Ji. BELUSKO, Martin. LIU, Ming. SEMSARILAR, Hesam. LIDDLE, Raymond. ALEMU, Alemu. EVANS, Michael. ZHAO, Chunrong. HUDSON, Julian. BRUNO, Frank. *A comprehensive study on a novel transcritical CO₂ heat pump for simultaneous space heating and cooling – Concepts and initial preformance*. Vydání 243. 01.09.2021 [online]. [cit. 22-03-19] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114397>
- [22] SYSTHERM S.R.O. SYMPATIK: absorpční a adsorpční chlazení. Plzeň, 2012. [online]. [cit. 22-02-20] Dostupné z: <http://systherm.com/wp-content/uploads/2019/07/systherm-pl-absorpcni-a-adsorpcni-chlazení.pdf>
- [23] PROJEKTUJ TEPELNÁ ČERPADLA. *Q ton vysokoteplotní vzduch/voda*. [online]. [cit. 22-03-20] Dostupné z: <https://www.projektuj-tepelna-cerpadla.cz/cz/q-ton>
- [24] COMPLETE. *Vysokoteplotní čerpadlo Q-ton*. [online]. [cit. 22-03-20] Dostupné z: <https://www.completecz.cz/novinky/vysokoteplotni-tepelne-cerpadlo-q-ton/>
- [25] Decarboni.se: SOLUTIONS TO CLIMATE CHANGE [online]. [cit. 22-03-21]. Dostupné z: <http://decarboni.se/search/all/thermally%20driven%20heat%20pumps>
- [26] DIABY, Ahmou Tidiane. BYRNE, Paul. MARÉ, Thierry. *Simulation of heat pumps for simultaneous heating and cooling using CO₂*. 14. 03. 2019 [online]. [cit. 22-03-22] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.03.010>
- [27] KÜHNE, Annette. *Thermally driven heat pumps for heating and cooling*. Universitätsverlag der TU Berlin 2013 ISBN (online) 978-3-7983-2596 [online]. [cit. 22-03-22] Dostupné z: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/4023>

- [28] ŠAREVSKI, Milan N. ŠAREVSKI, Vasko. *Characteristics of R718 refrigeration/heat pump systems with two-phase ejector*. 06.02.2016 [online]. [cit. 22-03-23] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.007>
- [29] ENTALPIA EUROPE. *Chladiva ze skupiny HFO (R1234yf, R1234ze) – význam a použití*. 02.07.2021 [online]. [cit. 22-03-24] Dostupné z: <https://entalpiaeuropa.eu/cs/chladiva-ze-skupiny-hfo-r1234yf-r1234ze-vyznam-a-pouziti/>
- [30] NAIR, Vipin. *HFO refrigerants: A review of present status and future prospect*. 15.06.2020 [online]. [cit. 22-03-24] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039>
- [31] PROJEKTUJ TEPELNÁ ČERPADLA. *Blesková nalejvárna*. [online]. [cit. 22-03-24] Dostupné z: <https://www.projektuj-tepelna-cerpadla.cz/cz/skoleni-bleskova-nalejvarna>
- [32] SU, Zixiang. ZHANG, Mingliang. XU, Peihang. ZHAO, Zhongkai. WANG, Zhiping. HUANG, Haozhong. OUYANG, Tiancheng. *Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilisation in various industries: A recent review*. 01.02.2021 [online]. [cit. 22-03-24] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113769>
- [33] GT-ENERGY. *Rekuperace tepla tepelnými čerpadly*. [online]. [cit. 22-03-24] Dostupné z: <https://www.gt-energy.cz/cz/rekuperace-tepla-tepelnymi-cerpadly>
- [34] MASTER-THERM. *Katalog průmyslových aplikací*. [online] 2015. [cit. 22-03-25] Dostupné z: <https://mastertherm.cz/ke-stazeni/>
- [35] IVT-TEPELNÁ ČERPADLA. *Komerční a průmyslové objekty*. [online]. [cit. 22-03-26] Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/komercni-a-prumyslove-objekty>
- [36] PROJEKTUJ TEPELNÁ ČERPADLA. *Příprava teplé vody 85 °C pro hovězí porážku*. [online]. [cit. 22-03-27] Dostupné z: <https://www.projektuj-tepelna-cerpadla.cz/cz/reference/17.priprava-teple-vody-85-c-pro-hovezi-porazku>
- [37] NEVESELÝ, Milan. *Využití odpadního tepla v průmyslu pro vytápění tepelnými čerpadly*. [online] 2012. [cit. 22-03-27] Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/111449-vyuziti-odpadniho-tepla-v-prumyslu-pro-vytapeni-tepelnymi-cerpadly>
- [38] MA, Xuenhu. CHEN, Jiabin. LI, Songping. SHA, Qingyun. LIANG, Aiming. LI, Wei. ZHANG, Jiayan. THENG, Guojun. FENG, Zhihao. *Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant*. [online] 2003. [cit. 22-03-27] Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00011-5)
- [39] IEA HEAT PUMP CENTRE, *Application of Industrial Heat Pump, Final report – Part 2*. 2014 ISBN 978-91-88001-93-1
- [40] CERES. *Introduction The EcoLoop: Ceres mostly energy – efficient heating and cooling systém yet*. [online] 03.09.2020. [cit. 22-03-29] Dostupné z: <https://ceresgs.com/introducing-the-ecoloop/>

Seznam obrázků

- [1.] CIAT. *Lamelové výměníky*. [online]. Dostupné z: <https://ciat.sk/images/Produkty/Vymenniky/lamelove-vymenniky/spn-3.jpg>

- [2.] *Příčný řez šroubovým kompresorem*. Doleček, Josef., Holoubek, Zdeněk. *Strojnictví II pro SOU*. 3. vydání. Praha: SNTL – NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1989. 165 s. ISBN 80-03-00036-X.
- [3.] *Typy tepelných čerpadel*. Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/typy-tepelnych-čerpadel>
- [4.] *Q-ton: vysoce účinné řešení*. Dostupné z: <https://mhiaa.com.au/q-ton-hot-water-solution/#:~:text=What%20is%20Q%2Dton%3F,a%20range%20of%20commercial%20applications.>
- [5.] *Typy tepelných čerpadel*. Dostupné z: <http://stavebnictvi-rodinne-domy.weos.cz/images/tepelne-čerpadlo-zeme-voda.jpg>

Obr. 1 Obecné schéma tepelného čerpadla – vytvořeno v programu AUTOCAD pro účely této práce podle předlohy ze zdroje [2]

Obr. 2 Teoretický pracovní cyklus tepelného čerpadla – vytvořeno v programu AUTOCAD pro účely této práce podle předlohy ze zdroje [2]

Obr. 3 Trubkový výměník tepla s rovnými trubkami [11]

Obr. 4 Schéma proudění v deskovém výměníku [4]

Obr. 5 Lamelový výměník tepla [1.]

Obr. 6 Spirálový kompresor SCROLL [13]

Obr. 7 Příčný řez šroubovým kompresorem [2.]

Obr. 8 Schéma termostatického expanzního ventilu [14]

Obr. 9 Tepelné čerpadlo vzduch – vzduch [3.]

Obr. 10 Tepelné čerpadlo vzduch – voda [3.]

Obr. 11 Tepelné čerpadlo využívající podzemní vody [3.]

Obr. 12 Tepelné čerpadlo využívající povrchové vody [3.]

Obr. 13 Tepelné čerpadlo země-voda [5.]

Obr. 14 Schéma zapojení jednostupňového TČ a termodynamický cyklus [1]

Obr. 15 Schéma zapojení dvoustupňového systému [1]

Obr. 16 Jednoduché schéma kaskádního okruhu – vytvořeno v programu AUTOCAD pro účely této práce podle předlohy ze zdroje [1]

Obr. 17 Schéma zapojení kaskády TČ země-voda a vzduch-voda od společnosti NIBE [18]

Obr. 18 Příklad vrtného pole [31]

- Obr. 19 a) Schéma zapojení transkritického TČ b) Termodynamický cyklus chladiva [20]
- Obr. 20 Schéma absorpčního tepelného čerpadla [22]
- Obr. 21 Schéma tepelného čerpadla Q-ton [4.]
- Obr. 22 Strojovna Ústavu jaderné fyziky Akademie věd [34]
- Obr. 43 Výrobní hala BOSCH v Č.B. [35]
- Obr. 24 Akumulační zásobníky teplé vody v objektu na hovězí porážku [36]
- Obr. 25 Absorpční tepelné čerpadlo v závodě na výrobu kaučuku [38]
- Obr. 26 Fotografie dojící stanice z kraví farmy [36]
- Obr. 27 Schéma pilotního projektu využití nadkritického CO₂ TČ v mlékárně [38]
- Obr. 28 Hala kompostárny (vlevo); Absorpční TČ kompostárny [27]
- Obr. 29 Fotografie vinice [36]
- Obr. 30 Schéma dvoustupňové rekuperace rybí farmy v Kanadě [38]
- Obr. 51 Model skleníku s tepelnými čerpadly a zemním okruhem [40]

Seznam Tabulek

- Tab. 2 Chladiva jejichž složení nenarušují ozónovou vrstvu [9]
- Tab. 3 Přírodní chladiva s negativním vlivem na ozón a skleníkové plyny [9]
- Tab. 4 Charakteristiky adsorpčních tepelných čerpadel. [25]
- Tab. 4 Klasifikace průmyslového odpadního tepla [32]
- Tab. 5 Vlastnosti vysokoteplotních chladiv [20]