

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nové perspektivní směry v oblasti trigenerační výroby

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii trigenerační výroby. V této práci jsou uvedeny nejvíce komerčně využívané možnosti tepelně aktivovaného chlazení. Dále se v této práci zhodnotí nové perspektivní směry v této oblasti a posléze je vypracována teoretická implementace těchto nových technologií.

Klíčová slova

Trigenerace, absorpce, výroba chladu, solární ohřev, inovace

Abstract

This bachelor thesis is focused on the technology of trigeneration production. In the thesis the most commercially exploited possibilities of thermally activated cooling are mentioned. Furthermore, the thesis will evaluate new perspectives in that field of study and then the theoretical implementation of these new technologies is elaborated.

Key words

Trigeneration, absorption, cold production, solar heating, innovation

Prohlášení

Já, Luboš Polančík, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod dohledem vedoucího práce a že jsem uvedl všechny zdroje použité k vypracování této práce.

.....

podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Luboš Polančík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Alešovi Hromádkovi, za cenné rady a připomínky a také své rodině, která mne velmi a nedocenitelně podporovala po celou délku mého studia.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 KOGENERACE	12
1.1 ÚVOD DO KOGENERACE	12
1.2 PARNÍ TURBÍNY	13
1.2.1 Protitlaková turbína	13
1.2.2 Kondenzační turbína.....	14
1.3 PLYNOVÉ TURBÍNY.....	15
2 TRIGENERACE	16
2.1 KOEFICIENT COP	16
2.2 ÚVOD DO TRIGENERACE	16
2.3 ABSORPČNÍ CHLAZENÍ.....	17
2.3.1 Pracovní látky pro absorpční chlazení	19
2.3.2 Několikastupňové absorpční jednotky	20
2.4 ADSORPČNÍ CHLAZENÍ.....	21
2.5 DESIKAČNÍ CHLAZENÍ.....	22
2.6 SROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ CHLAZENÍ	24
3 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE KE CHLAZENÍ	26
3.1 VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE PRO ABSORPČNÍ CHLAZENÍ	29
3.1.1 Solární kolektory.....	30
4 CHLADICÍ ZAŘÍZENÍ ZČU	34
4.1 VŠEOBECNÝ POPIS ZAŘÍZENÍ	34
4.1.1 Technický popis zařízení absorpční chladicí jednotky v areálu ZČU.....	34
4.2 VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ V AREÁLU ZČU BORY	35
4.2.1 Návrh implementace solárních kolektorů	35
5 ZÁVĚR	41
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	45
SEZNAM GRAFŮ	45

Seznam symbolů a zkratk

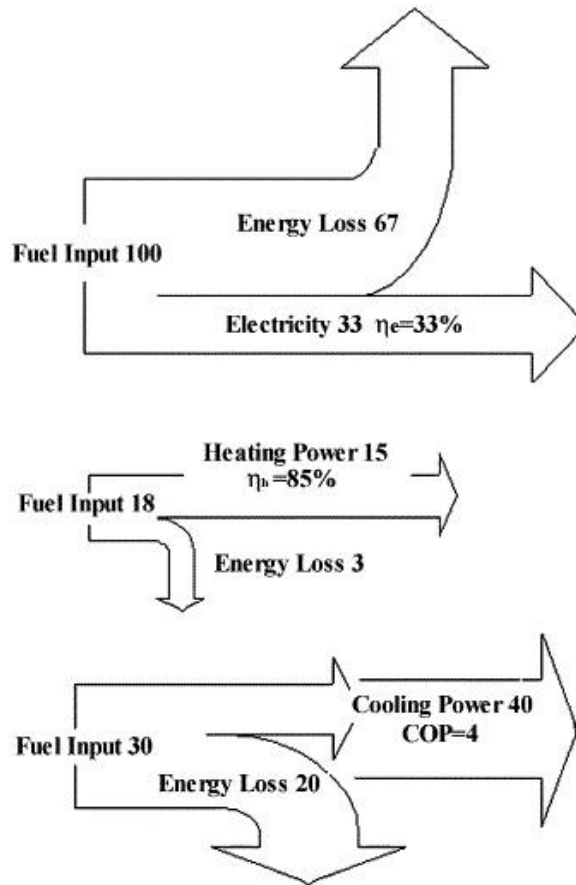
COP.....	Koeficient výkonu
η	Účinnost [%]
HRSG.....	tepelný rekuperační výměník
NH ₃	Amoniak
LiBr.....	Bromid lithný
LiCl.....	Chlorid lithný
Bar.....	Jednotka tlaku
MWh/m ²	Jednotka výkonu slunečního záření dopadající na jednotku plochy
FPC.....	Ploché deskový kolektor
ETC.....	Evakuovaný trubicový kolektor
LFR.....	Lineární Fresnelův reflektor
PTCs.....	kolektory parabolických žlabů
EEPC.....	Evakuovaný kolektor plochých desek
W.....	Výkon [W]
m ³ /h.....	Obíhající množství
l/s.....	Obíhající množství
kPa.....	Jednotka tlaku
V.....	Objem [m ³]
ρ	Hustota [kg/m ³]
t.....	Teplota [°C]
m.....	Hmotnost [kg]
Q.....	Energie [J]
N.....	Počet solárních kolektorů
S.....	Plocha [m ²]
Q _{1H}	Množství energie vyrobené za jednu hodinu solárními kolektory [GJ/h]
T.....	Čas [h]
k _p	Koeficient špatného počasí
U.....	Roční finanční úspora oproti současnému systému
NO _x	Oxidy dusíku
TZL.....	Tuhé znečišťující látky
SO _x	Oxidy síry
VOC.....	Těkavé organické látky
CO ₂	Oxid uhličitý

Úvod

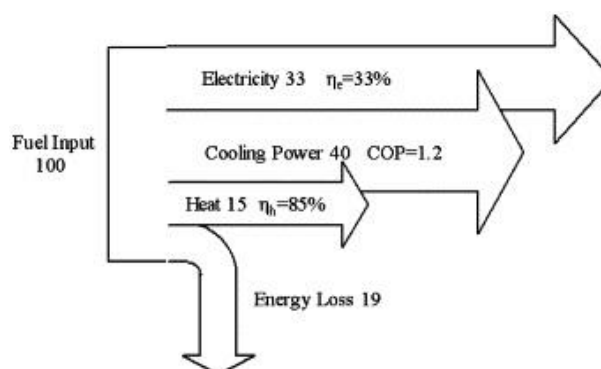
V dnešní době existuje trend, kdy se energetické a teplárenské závody snaží o co nejefektivnější využití paliva. Energetické a teplárenské závody samozřejmě také. Jednou z cest jak se toho u těchto podniků dá dosáhnout, je co nejefektivnější využití veškeré energie dodané z paliva. Nejdříve se vyšší efektivitu u tepláren dosáhlo tak, že energie získaná z kotlů se použila nejen k vytápění, ale i k výrobě elektrické energie. U elektráren se výroba elektřiny doplnila o výrobu tepla. Tento proces kombinované výroby elektřiny a tepla (dále jen „KVET“) se nazývá kogenerace. Použitím této technologie se dá zvýšit účinnost z hodnot 30 – 40% což jsou hodnoty typické pro klasickou elektrárnu až k hodnotám přesahující 90%. Jenže pouhý KVET nestačí a to hlavně kvůli letním měsícům, kdy je poptávka po dodávce tepla velmi malá. Tento problém vyřešila technologie zvaná trigenerace. Trigenerační systém je takový systém, který dokáže vyrobit nejen elektrickou a tepelnou energii, ale je také schopný dodávat chlad. Ten se vyrábí ze zbytkového tepla a díky tomu se dá tohle zbytkové teplo využít právě i přes léto. Neznamená to ale, že trigenerační jednotka vyrábí teplo pouze v zimě a v létě chlad. Trigenerační jednotka umí všechny tyto tři věci dodávat zároveň, avšak jako trigenerační systém se dá uvažovat i takový systém, který nám dává na výběr mezi kombinovanou výrobou elektřiny a tepla současně, nebo současnou produkci elektřiny a chladu. [1, 2]

Zmíněnou úsporu lze vidět, když porovnáme obrázky č. 1 a 2. Pokud konečný spotřebitel potřebuje 33% elektrické energie, 40% chladicí a 15% topné energie, bude tradiční cestou výroby spotřebováno 148% primární energie. Účinnost klasických elektráren se pohybuje okolo hodnoty 33%, a proto se na 33% elektrické energie musí spálit 100% paliva. Tradiční bojler potřebuje na 15% tepelné energie 18% paliva při účinnosti 85%. Pro výrobu 40% chladicí energie klasickou elektrickou klimatizací, které mívají koeficient výkonu COP okolo 4, potřebujeme 10% energie v podobě elektřiny. U klimatizace ale musíme vzít v úvahu i účinnost elektráren. Na klimatizaci bude tedy potřeba celkem 30% elektrické energie pro výrobu požadovaného chladicího výkonu. Pokud bychom stejného cíle chtěli dosáhnout pomocí trigenerační výroby, stačí dodat pouhých 100% paliva. Klíč k takovému využití energie leží právě ve využití zbytkového tepla. 34% energie ve formě zbytkového tepla přivedeme do absorpčního chladiče, který z toho zvládne vygenerovat 40% chladicího výkonu díky $COP=1,2$ což je hodnota typická

pro absorpční chladiče. Pro výrobu 15% topného výkonu bude třeba recyklovat dalších 18% energie v podobě zbytkového tepla při účinnosti 85% jako u klasických bojlerů. Po porovnání je vidět úspora 48% energie paliva, což je velmi vysoká hodnota. [5]



Obrázek 1 Výroba energií klasickými cestami [5]

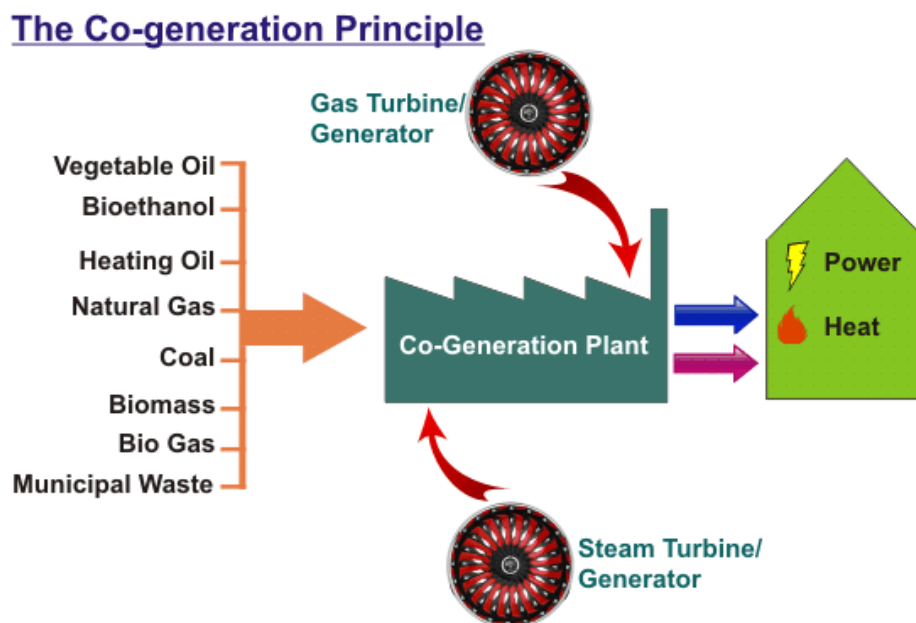


Obrázek 2 Výroba energií pomocí trigenerace [5]

K úplnému pochopení trigenerační výroby je nutné znát princip kogenerace, jelikož trigenerační systém je v podstatě kogenerační systém, doplněný například o absorpční jednotku a díky tomu jsme schopni vyrábět i chlad. Proto v této práci nejdříve vysvětlím princip kogenerace a až poté princip trigenerace. Na to bude navazovat popis různých druhů využívaných technologií právě pro tyto zařízení a prozkoumání nových perspektivních směrů, které by mohli výrobu ještě více zefektivnit, či zmenšit negativní dopad na životní prostředí a navrhnout implementaci těchto poznatků do již existujícího systému.

1 Kogenerace

1.1 Úvod do kogenerace

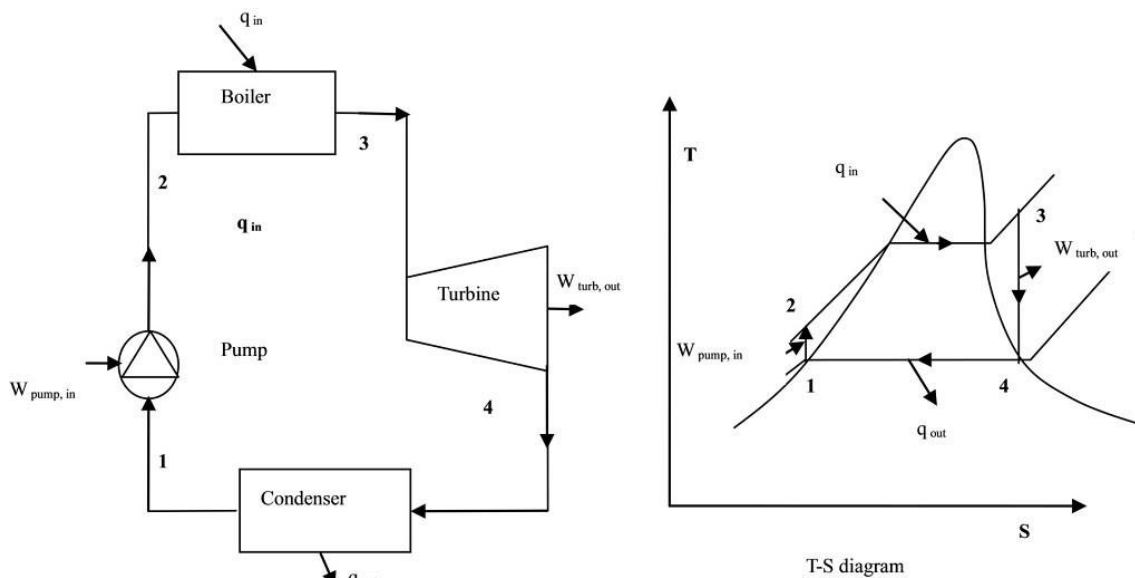


Obrázek 3 Schéma kogeneračního systému [3]

Z obrázku je patrné, že kogenerační jednotky využívají velkou škálu paliv. Výběr technologií pro samotnou kogenerační výrobu je také široký. Na obrázku 3 jsou představeny dvě základní varianty. Plynová turbína s generátorem a parní turbína s generátorem. Pro vysvětlení principu použijí výrobu pomocí parní turbíny doplněné o generátor.

Jako pracovní médium pro výrobu elektřiny se používá voda a její termodynamický cyklus zvaný Rankinův cyklus se dá popsat pomocí T-S diagramu a blokového schématu výroby na obrázku č. 4. Tlak vody je pomocí čerpadla zvýšen na požadovanou hodnotu a poté vstoupí do kotle, kde se pomocí tepla dodaného spalováním paliva vypaří a přehřeje na hodnoty vyšší než 100 °C. Takto přehřátá pára vstoupí do turbíny, kde expanduje, sníží svůj tlak a tím se vykoná mechanická práce, která turbínu roztočí a spolu s ní i elektrický generátor. V klasické elektrárně se pára na výstupu turbíny přivede do kondenzátoru, kde zkondenzuje a celý cyklus se opakuje. Při kondenzaci ale dochází k vypuštění tepelné energie do okolí bez dalšího využití. Kogenerační systém právě toto zbytkové teplo

využívá buď odvedením teplé páry do soustavy zásobování teplem, či do jiného technologického procesu, kde se tato pára může využít. [2]

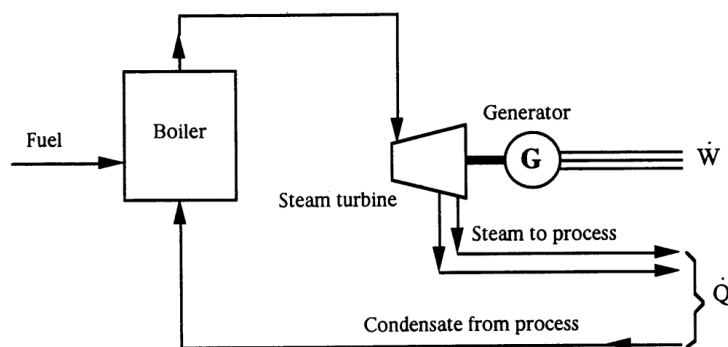


Obrázek 4 Blokové schéma výroby a T-S diagram [2] (Pump – čerpadlo, Boiler – kotel, Turbine – turbína, Condenser – kondenzátor)

1.2 Parní turbíny

1.2.1 Protitlaková turbína

Protitlaková turbína je nejjednodušší konfigurací pro kogenerační výrobu a její základní blokové schéma můžeme vidět na obrázku 5. Na první pohled je vidět rozdíl oproti klasické výrobě elektrické energie. Pára opouštějící turbínu neputuje do kondenzátoru, kde se veškeré teplo vypustí do okolí. Místo toho putuje pára do soustavy zásobování teplem, nebo do jiného technologického procesu, kde se pro ni najde využití. [2]

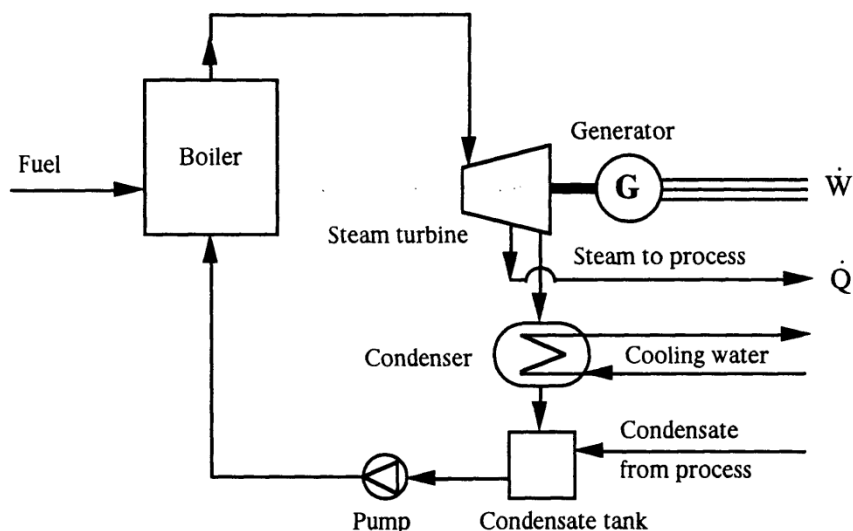


Obrázek 5 Základní blokové schéma KVET využívající protitlakovou turbínu [2]

Hlavní vlastností protitlakové turbíny je to, že veškerá pára opouštějící turbínu je použita pro topné účely. Nevýhodou této turbíny je, že její elektrický výstup je přímo ovlivněn poptávkou po dodávce topné energie. To je dáno nemožností regulace výstupu páry kvůli absenci jakéhokoli kondenzačního prvku, jak je tomu například v systému využívající kondenzační turbínu.

1.2.2 Kondenzační turbína

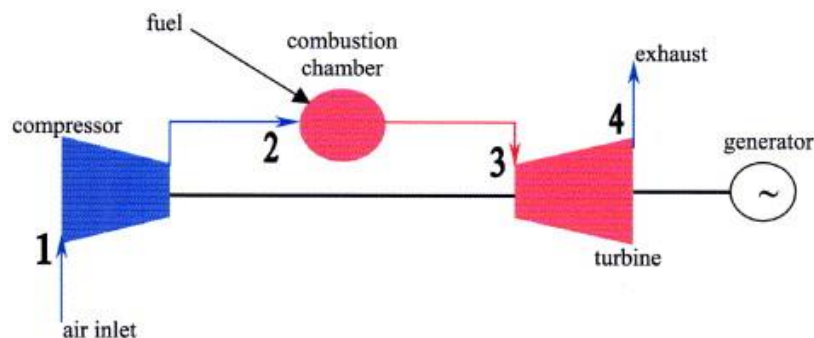
Kondenzační turbína je téměř shodná s protitlakovou. Obě pracují v axiálním směru a obě se využívají pro současnou výrobu elektrické energie a topného výkonu. Její jediný rozdíl je však v tom, že na výstupu turbíny se pára rozděljuje na páru pro kondenzační výrobu elektřiny a páru využitou v topných procesech. Díky tomu jsme schopni do jisté míry regulovat výrobu elektrické energie nezávisle na poptávce po topné páře. To má však za následek horší účinnost výroby a to z důvodu kondenzace nevyužité páry v kondenzátoru. Nejhorší účinnost je při čistém kondenzačním režimu, kdy se neodebírání žádná pára za turbínou a veškerá pára na výstupu turbíny zkondenzuje v kondenzátoru. Naopak nejvyšší účinnost systému je dosažena při veškerém využití páry, tedy při maximálním výkonu odběru. Páru na výstupu turbíny je možné odebírat na několika různých tlakových úrovních. Lze odebírat páru při nižším tlaku pro dodávky tepla využívané na vytápění, či odebírat páru na vyšších tlakových úrovních pro různé technologické účely. Schéma tohoto systému lze vidět na obrázku 6. [7]



Obrázek 6 Základní blokové schéma KVET využívající kondenzační turbínu [2]

1.3 Plynové turbíny

Plynové turbíny v režimu jednoduchého cyklu jsou již dlouho využívány pro omezenou špičkovou výrobu energie. Průmyslová zařízení navíc používají plynové turbíny pro výrobu elektrické energie přímo v místě závodu obvykle zkombinovanou s výrobou procesního tepla v podobě horké páry nebo vody. Schematický diagram plynové turbíny s jednoduchým cyklem je znázorněn na obrázku 7. Nejdříve se vzduch z okolního prostředí pomocí kompresoru stlačí na požadovanou tlakovou úroveň (bodě 1). Žádné teplo tomuto vzduchu není přidáno, avšak na výstupu je vzduch s vyšší teplotou než na vstupu kompresoru, protože byl výrazně stlačen. Takto stlačený vzduch vstoupí do spalovací komory (bod 2), tam se také vstříkuje palivo a dochází ke spalování. Proces spalování probíhá v podstatě při konstantním tlaku. Spalovací systém je navržen tak, aby umožňoval spalovanou směs promíchat tak, aby směs vstupovala do turbíny (bod 3) při smíšené průměrné teplotě. V turbíně je poté tepelná energie horkých plynů vystupujících ze spalovací komory přetřansformována na kinetickou (bod 4), kterou lze generátorem přetřansformovat na elektrickou energii. Výfukové plyny opouštějící turbínu na konci cyklu mívají teplotu v rozmezí 400-600 °C.[8]



Obrázek 7 Schematický diagram plynové turbíny [8]

Právě tyto výfukové plyny se dají dále využít pro výhřev vody na vytápění nebo jiné technologické účely.

2 Trigenerace

2.1 Koeficient COP

Jelikož tato práce je zaměřena na trigenerační práci s hlavním zaměřením na chlazení, je důležité vysvětlit, co znamená koeficient COP (anglická zkratka Coefficient of Performance), protože bude mnohokrát zmíněný. Koeficient COP se hlavně používá u topných a chladicích zařízení. Tento koeficient udává poměr mezi energií dodanou do zařízení potřebnou pro její fungování a energií z tohoto zařízení vystupující. U chladicích jednotek udává poměr mezi spotřebovanou elektrickou energií u klasických klimatizačních jednotek poháněných kompresorem, či dodanou tepelnou energií pro tepelně aktivované chladicí jednotky a jejich výstupním chladicím výkonem. Vzorec výpočtu je zobrazen v rovnici č. 1.[12]

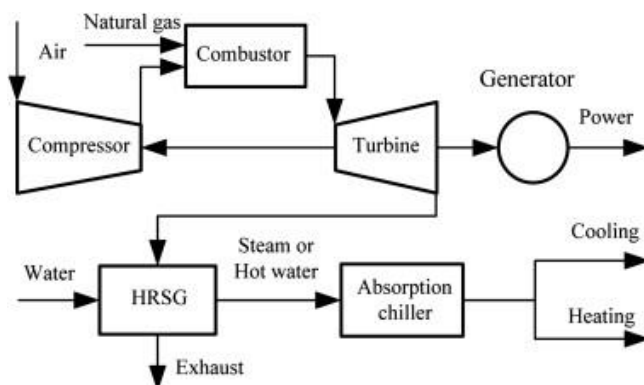
$$COP = \frac{\text{Chladicí výkon}}{\text{Příkon nebo dodaná tep. energie}} \quad (1)$$

2.2 Úvod do trigenerace

Kombinovaná výroba chladu, tepla a elektřiny je odvozená z kombinované výroby tepla a elektrické energie známé také jako kogenerace či KVET. KVET je technologie prověřená více než 100 lety provozu používaná hlavně ve velkých centralizovaných

elektrárnách, teplárnách a jiných průmyslových aplikacích. Konvekční metoda jak dodávat elektřinu a teplo byla taková, že se elektřina koupí ze sítě a teplo se získává z kotle, ve kterém se spaluje palivo. KVET se vyznačuje tím, že recykluje energii zbytkového tepla vzniklého v kotli nevyužitého turbínou, což může být až 60-80% z celkové energie v klasické elektrárně založené na spalování paliva a může ho díky tomu dále využít. Kogenerace je tedy definována jako kombinovaná výroba tepla a elektřiny ze stejného primárního zdroje energie. Rozdíl oproti trigenerační výrobě je takový, že se KVET doplní o možnost výroby chladu spolu s teplem i elektřinou. [5]

Typický trigenerační systém je zobrazen na obrázku č. 8. Jeho hlavními částmi jsou plynový motor, turbína, generátor, absorpční chladič a generátor páry ze zbytkového tepla HRSG (heat recovery steam generator). Turbína je poháněna spalováním zemního plynu a její vyrobená mechanická energie je přetransformována na elektrickou. Mezitím absorpční chladič, který je poháněn teplem dodaným z HRSG buď v podobě horké vody nebo páry, generuje teplo a to zejména v zimních měsících nebo chlad většinou v letních měsících. Tím pádem je tento systém schopný uspokojit elektrické, topné i chladicí požadavky pro celé město, čtvrtě či jednotlivé budovy.[4]



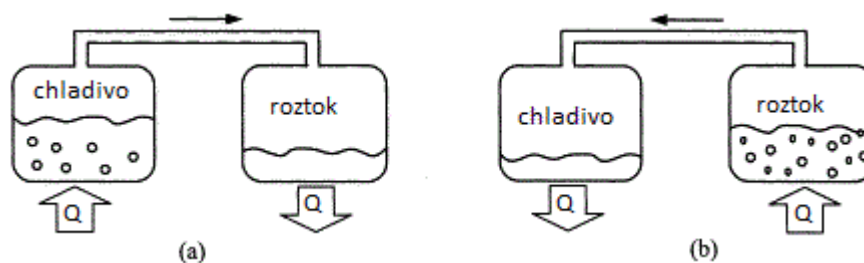
Obrázek 8 Blokové schéma typického trigeneračního systému [4]

2.3 Absorpční chlazení

Nejčastější metoda produkce chladu pomocí tepla se nazývá tepelně aktivované chlazení, ve které dominuje chlazení využívající sorpci. Využívá se jak absorpční chlazení, tak i adsorpční. Absorpce je proces, kde se látka v plynném jednom skupenství sloučí s látkou v jiném skupenství. Například k absorpci plynné látky druhou látkou v kapalném

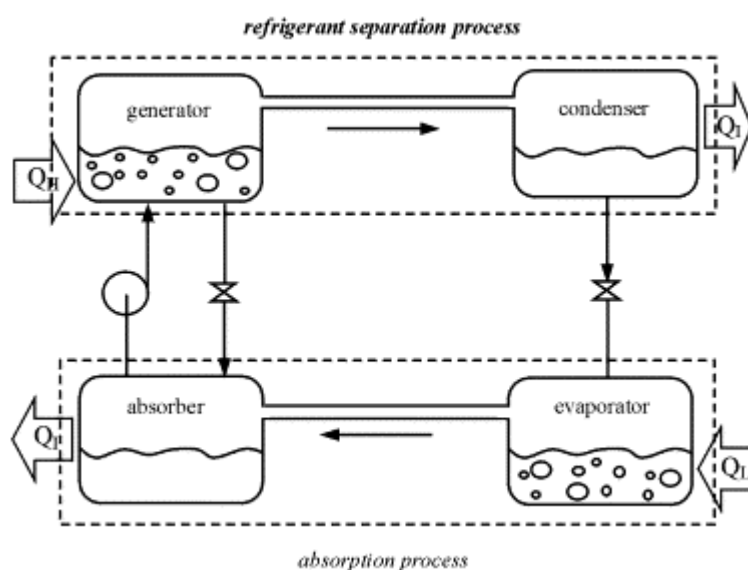
stavu. Počátky absorpčního chlazení sahají až do 18. století kdy se jako pracovní dvojice látek používala voda a kyselina sírová. Počátkem 20. století již bylo sorpční chlazení běžnou technologií, zejména proces využívající pracovní dvojici voda-amoniak. Postupem času se ale od tohoto typu chlazení pomalu ustoupilo, zejména kvůli nově dostupné a levné elektrické energii. To mělo za následek vytlačení tepelně aktivovaného chlazení na úkor elektricky poháněného kompresního chlazení. Avšak v posledních desetiletích se tepelně aktivované chlazení vrací zpět mezi využívané technologie, zejména kvůli obavám způsobených globálním oteplováním a ničením ozonové vrstvy chlorofluorouhlovodíky, které jsou potřebné k elektricky poháněnému chlazení. [4]

Jak již bylo zmíněno, absorpční chlazení používá ke své funkci dvojici pracovních látek, chladivo a absorbent. Na obrázku č. 9 (a) jsou dvě navzájem spojené nádoby. Jedna pouze s chladivem a druhá s roztokem obou látek. Roztok v pravé nádobě do sebe absorbuje výpary z chladiva. Absorbování výparů chladiva má za následek snížení teploty zbylého chladiva a to způsobuje chladicí efekt v levé nádobě. Jedná se však o exotermický proces, takže absorbent musí vylučovat teplo, aby si uchoval svou absorpční schopnost. Absorbent ale nemá nekonečnou kapacitu, když dojde k maximálnímu nasycení chladivem, je nutno tyto dvě látky separovat. Teplo je obvykle klíčem pro tento separační proces. Aplikuje se na pravou nádobu, aby se chladivo vysušilo z roztoku, jak je znázorněno na obrázku č. 9 (b). Výpary chladiva jsou kondenzovány odevzdáním tepla do okolí. Těmito procesy je možné dosáhnout chladicího efektu pomocí dodání tepelné energie, avšak nelze tento systém provozovat nepřetržitě, protože tyto procesy není možné provozovat zároveň.[6]



Obrázek 9 Obr. 9 Princip absorpce; (a) absorpce chladiva roztokem; (b) separace chladiva od roztoku [6]

Nepřetržitý chladicí efekt se dá dosáhnout kombinací těchto dvou procesů, jak lze vidět na obrázku č. 10. Systém je nutné doplnit o cirkulační čerpadlo, protože separační proces probíhá při větším tlaku, než proces absorpční. Koeficient výkonnosti COP se u těchto systémů z poměru chladicího výkonu a množství dodaného tepla plus elektrická energie potřebná k práci cirkulačního čerpadla. Avšak elektrická energie potřebná k chodu čerpadla je relativně velmi malá vůči dodané tepelné energii, a proto je možné ji při určování COP zanedbat.[6]



Obrázek 10 Nepřetržitý absorpční chladicí proces [6]

2.3.1 Pracovní látky pro absorpční chlazení

Výkon absorpčního chladicího systému je kriticky závislý na chemických a termodynamických vlastnostech dvojice pracovních látek. Základním parametrem je míra mísitelnosti v teplotním rozsahu cyklu. Dvojice pracovních látek by také měla být netoxická, chemicky stabilní a neexplozivní. Pracovní dvojice látek by nadále měla mít co nejvyšší rozdíl teplot varu pro stejný tlak. Dále se musí brát na vědomí vlastnosti, které ovlivňují přenos tepla a hmoty, například viskozita, tepelná vodivost a difúzní koeficient. Obě dvě látky by také měly být nekorozivní, levné a šetrné k životnímu prostředí. Existuje mnoho možných kombinací používaných látek a dnes nejběžnější používané jsou kombinace voda-NH₃ (amoniak) a voda-LiBr (bromid lithný).[6]

Již od vynalezení absorpčních chladicích systémů byla kombinace voda-amoniak široce používána a to hlavně díky velké stabilitě jak absorbentu (voda) tak chladiva (NH_3) pro velkou škálu provozních teplot a tlaků. To je dané také díky bodu mrznutí amoniaku -77°C . Amoniak má vysoké latentní teplo odpařování, které je nezbytné pro efektivní výkon systému. Nevýhod této pracovní dvojice je hned několik. Cyklus pracuje při vysokých tlacích, je korozivní vůči mědi a jejím slitinám. Dále těkavost vody má za následek to, že se voda odpařuje spolu s amoniakem při separačním procesu. Proto se do systému musí zakomponovat usměrňovač, který oddělí vodu od amoniaku, jinak by se usadila ve výparníku, kde by zhoršovala výkon systému. Na druhou stranu je tato možnost šetrná k životnímu prostředí a relativně levná.[6]

Na druhou stranu kombinace voda-LiBr používá jako chladivo vodu a LiBr jako absorbent. LiBr je netěkavá látka a neodpařuje se spolu s vodou při separaci, proto odpadá nutnost použití usměrňovačů. Velkou nevýhodou je ale to, že bod mrazu vody je při 0°C a to limituje použití pro chlazení pod tuto hodnotu. K dalším nevýhodám patří vysoká cena a náchylnost roztoku ke krystalizaci při vysokých koncentracích. Tato kombinace je také korozivní vůči některým kovům, ale to se dá ovlivnit přidáním různých přísad do roztoku.[6]

2.3.2 Několikastupňové absorpční jednotky

Popisovaný absorpční chladicí systém v kapitole 2.2 byl takzvaný jednostupňový absorpční cyklus. Existují však i vícestupňové varianty, jejichž hlavním cílem je zvýšení výkonu v případě, je-li k dispozici vysokoteplotní zdroj tepla. Pojmeme několikastupňové absorpční jednotky míníme to, že je cyklus konfigurován tak, aby teplo odvedené z prvního vysokoteplotního stupně systému bylo použito jako zdroj tepla pro další nízkoteplotní stupeň pro vytvoření dodatečného chladicího efektu. [6]

V minulosti bylo analyzováno několik typů vícestupňového absorpčního cyklu, dvoustupňové, třístupňové a čtyřstupňové. Pro jednu jednotku dodaného externího tepla je chladicí efekt $1 \cdot \text{COP}_1$. Pro každý jednostupňový absorpční chladič lze předpokládat, že teplo odváděné z kondenzátoru je přibližně rovné chladicímu výkonu. Přívod tepla pro další stupeň je tedy roven $1 \cdot \text{COP}_1$ a jeho chladicí účinek je roven $(1 \cdot \text{COP}_1) \cdot \text{COP}_2$. Za předpokladu že oba stupně mají stejný koeficient COP, lze rovnici pro dvoustupňový systém upravit do této podoby:

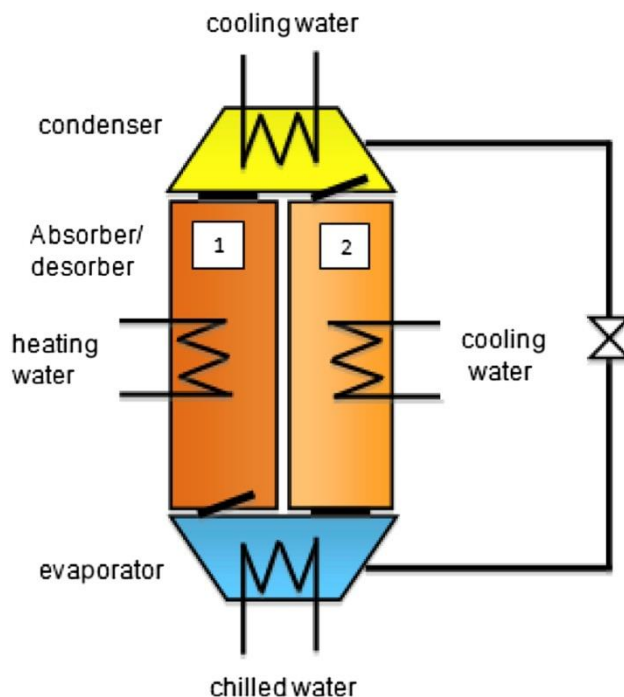
$$COP_{celkové} = COP_1 + (COP_1)^2 \quad (2)$$

Podle této analýzy má dvoustupňový absorpční systém $COP = 0,96$, když odpovídající jednostupňový systém má hodnotu $COP 0,6$ a nárůst COP pro třístupňové a čtyřstupňové systémy již nebude tak velký, avšak rozdíl ve složitosti systému bude markantní a proto se komerčně využívá téměř pouze dvoustupňové varianty.[6]

2.4 Adsorpční chlazení

Adsorpční chlazení je další variantou pro chlazení trigeneračním systémem. Ačkoli adsorpční technologie není tak vyvinutá jako absorpční, řada studií v nedávné době zkoumala možnost připojení kogenerační jednotky s adsorpční chladicí jednotkou k zajištění potřeb vytápění a chlazení. Jednoduchý adsorpční cyklus se skládá z adsorpčních lůžek, kondenzátoru, expanzního ventilu a výparníku. Stejně jako absorpční systémy, tak i adsorpční chladicí jednotky využívají dodávané teplo k zajištění kompresního účinku bez mechanických kompresních zařízení nebo jiných pohyblivých částí. Stejně jako v absorpčních chladicích jednotkách i v adsorpčních se pro práci systému využívají různé dvojice pracovních látek. Nejčastějšími používanými páry jsou silikagel-voda, zeolit-voda a aktivní uhlí-metanol.[9]

Jak již bylo zmíněno výše, adsorpční chladicí systémy jsou založeny na vlastnostech určitých pevných látek pojmout (adsorbovat) velké množství par v důsledku jejich velmi velké povrchové plochy spolu s pórovitostí. Následná separace adsorpční látky a chladicí se provádí pomocí ohřevu. Základní schéma adsorpčního systému lze vidět na obrázku 11.[10]



Obrázek 11 Základní schéma adsorpčního chladicího systému, 1- první adsorpční lůžko, 2- druhé adsorpční lůžko[10]

Cyklus začíná s chladivem nasyceným prvním adsorpčním lůžkem, které je zahříváno, aby se z něj uvolnilo chladivo, které následně vstoupí do kondenzátoru, kde je z chladiva odstraněno latentní teplo a zkapalní. Chladivo se poté, stejně jako v absorpčním cyklu, škrtí v expanzním ventilu a vstupuje do výparníku, kde se odpaří a tím vzniká požadovaný chladicí efekt. Výpary chladiva pak vstupují do druhého adsorpčního lůžka, kde jsou adsorbovány. Proces pokračuje tak dlouho, dokud není adsorbent v druhém lůžku zcela nasycen. Nakonec se přepnou přívody ohřívacího a chladicího vedení. To má za následek, že se celý cyklus opakuje s tím rozdílem, že do druhého lůžka přivádíme teplo a do prvního začne proudit chladicí voda, čímž se vytvoří polo kontinuální cyklus. [10]

2.5 Desikační chlazení

Desikační chlazení je dalším typem tepelně aktivovaného chlazení, které využívá látek schopných pohlcovat vlhkost vzduchu. Je schopné udržet příjemné klima a to za pomoci tepelné energie s co nejmenším využitím elektrické energie. Tato technologie je schopna aktivně odebírat vlhkost vzduchu a tím sníží jeho teplotu a latentní teplo.[11]

Vysoušedlo (desikant) je hygroskopická látka s vysokou afinitou k vodě. To znamená, že má schopnost pohlcovat a udržovat vlhkost. Vysoušedla mohou být jak kapalná, tak i v pevném skupenství. Jako pevná vysoušedla jsou používány polymery nebo pórovité materiály, například silikonový gel, LiCl, molekulární síta či zeolit. Chladicí systém s pevným vysoušečem pracuje na principu adsorpce vodní páry ze vzduchu. Vlhký vzduch nejprve vstoupí do vysoušejícího kola, kde se mu odebere vlhkost. Aby mohl systém pracovat nepřetržitě, je nutné vysoušedlo regenerovat a tím ho zbavit adsorbované vodní páry, aby nedošlo k úplnému nasycení. To se provádí zahříváním vysoušecího materiálu na teplotu regenerace, která se liší pro každý typ použitého materiálu. Energie potřebná pro regeneraci se může dodat několika způsoby. Vysoušedlo můžeme zahřát buď elektrickým ohříváčem, pomocí solární energie, nebo pomocí odpadního tepla. Za rotačním kolem je takto ovlhčený vzduch předchlazen pomocí tepelného výměníku a vstoupí do chladicí jednotky, kde se nadále chladí, než se dosáhne požadované teploty takto upravovaného vzduchu a poté vstoupí do místnosti, kterou chceme chladit. V další části se vzduch provede skrz tepelný výměník. V tepelném výměníku je tento vzduch v nepřímém kontaktu s chladicím vzduchem. To má za následek to, že sebe předehřeje a předchladí chladicí vzduch. Následně tento vzduch míří do ohříváče, kde se zvýší teplota na regenerační teplotu vysoušedla. Takto zahřátý vzduch se provede skrze vysoušecí kolo, zregeneruje ho a následně je vyveden do okolí. Tento chladicí systém je složen v podstatě ze čtyř hlavních komponentů a to z regeneračního zdroje tepla, rotačního odvlhčovače, výměníku tepla a chladicí jednotky. Základní schéma tohoto systému lze vidět na obrázku 12. Možné konfigurace a složení těchto čtyř základních prvků se může značně lišit v závislosti na vlastnostech chlazení a použitého vysoušedla.[11]

Tabulka 1 Srovnání různých tepelně aktivovaných druhů chlazení

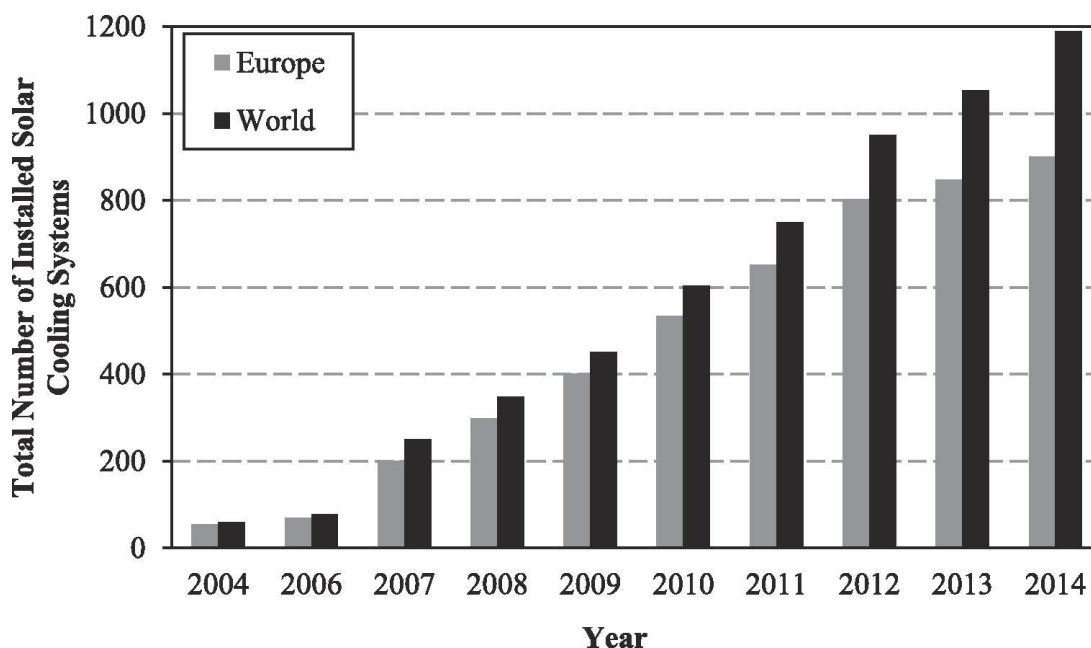
Chladicí technologie	Tepelný vstup	Chladicí výstup	COP	Použití
Absorpce LiBr–voda (jednostupňové)	pára 2–3 bary, horká voda 70–90 °C	chlazená voda 5–10 °C	~ 0.7	Velké trigenerační systémy pro průmyslové a komerční chlazení, dálkové chlazení a chlazení obytných budov
LiBr–voda (dvoustupňové)	pára 4–8 barů, horká voda 120–170 °C	chlazená voda 5–10 °C	~ 1.2	
LiBr–voda (třístupňové)	horká voda 200–230 °C	chlazená voda 5–10 °C	1.4–1.5	
Absorpce–NH ₃ (jednostupňové)	pára 2–16 barů, horká voda 80–200 °C	Glykolová voda <0 °C	~ 0.5	Vhodné pro chladicí aplikace v potravinářském a chemickém průmyslu, malé vzduchem chlazené jednotky pro obytné a lehké komerční budovy
voda–NH ₃ (dvoustupňové)	pára 8–16 bar, horká voda 170–220 °C	chlazená voda 5–10 °C	0.8–1.2	
Adsorpční silikagel–voda	horká voda 60–85 °C	chlazená voda 7–15 °C	0.3–0.7	Malé aplikace v obytných a komerčních budovách
Adsorpční aktivní uhlík–methanol	pára 2–4 bary, horká voda 80–120 °C	Glykolová voda <0 °C	0.1–0.4	Experimentální aplikace, výroba ledu a chlazení pro komerční aplikace
Kapalné desikační chlazení	horká voda 60–90 °C, horký vzduch 80–110 °C	Odvlhčený studený vzduch 18–26 °C	0.5–1.2	Poskytování tepelného komfortu a regulace vlhkosti v obytných budovách, aplikace pro sušení a odvlhčování
Desikační chlazení s pevným vysoušedlem	pára 2–4 bary, horká voda 60–150 °C	Odvlhčený studený vzduch 18–26 °C	0.3–1	Poskytování tepelného komfortu a regulace vlhkosti v obytných budovách, průmyslových aplikacích a procesech

3 Využití solární energie ke chlazení

Solární energie je rozsáhlým, obnovitelným a relativně nevyužitým zdrojem neustále dopadající na střechy všech budov světa. Celkové globální sluneční záření dopadající na zemskou plochu se skládá ze dvou složek, přímého paprsku a difúzního záření. Přímé paprsky mohou být koncentrovány a přeměněny na teplo o vysokých teplotách, zatímco difúzní záření je typicky sklízeno pomocí kolektorů, které pracují při teplotách menších než 100°C. Roční globální potenciál solárních zdrojů se pohybuje okolo hodnoty 1,6 MWh/m², což je mnohem více než průměrná globální hodnota spotřebovaného výkonu na jednotku plochy. Díky rostoucím obavám o životní prostředí kvůli spalování fosilních paliv a vládním politikám, rychle klesá cena fotovoltaických modulů na jednotku instalovaného výkonu. Nízké úrovně účinnosti (10-15%) a vysoká pořizovací cena baterií jsou však hlavními překážkami této technologie.[13]

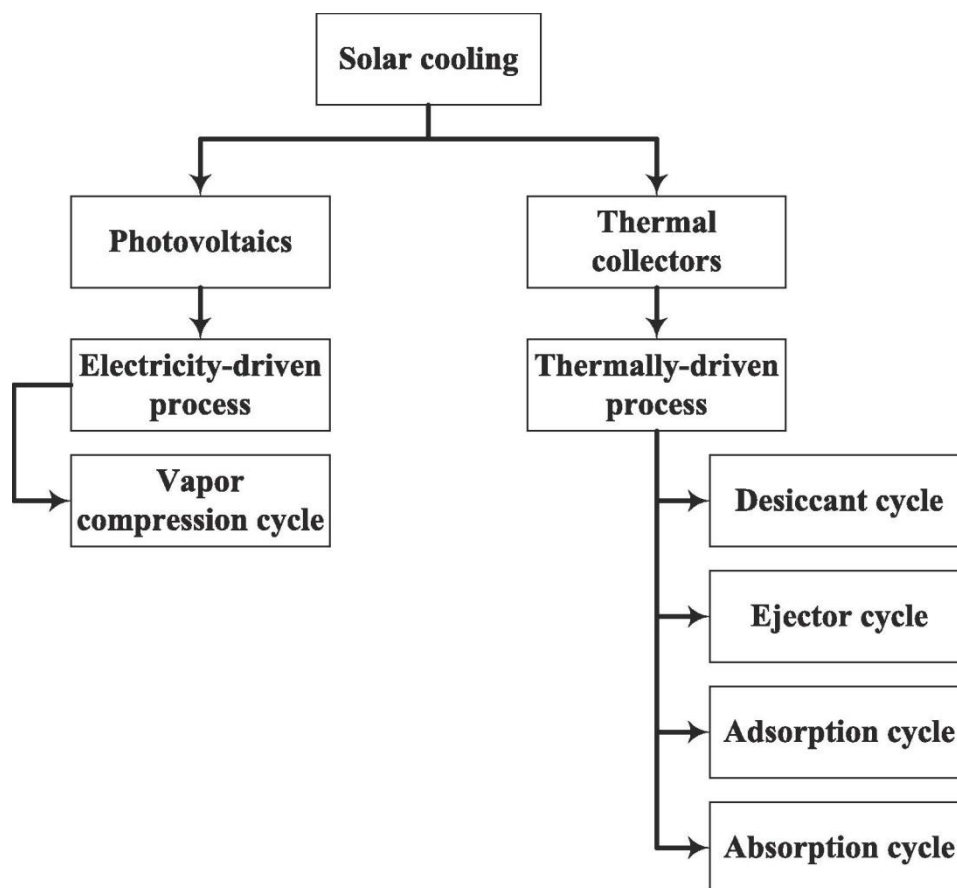
Také termální solární technologie je na vzestupu, i když za pomalejšího tempa, než využití solárního záření pro výrobu elektrické energie. Uplatnění termální solární energie můžeme najít v průmyslových procesech, jako ohřev teplé užitkové vody, vytápění a chlazení prostor. Ačkoli solární fotovoltaické systémy získaly více veřejného uznání, solární termální technologie stále představuje významnou část celosvětového instalovaného výkonu pro využití sluneční energie.[13]

Cílem solárně poháněných chladicích systémů je využití sluneční energie dopadající na střechy budov k chlazení prostorů uvnitř. Tato metoda je, vzhledem ke konvekčním klimatizačním jednotkám, velmi ekologicky šetrná a zájem o takto poháněné systémy za poslední roky velmi vzrostl, jak můžeme vidět na obrázku 13. Ten zobrazuje relativně nedávný výzkum globálního počtu solárně poháněných chladicích systémů, jejichž počet je odhadován na 1200 v roce 2014.[13]



Obrázek 13 Průzkum počtu instalovaných solárně poháněných chladicích systémů [13]

Sluneční energie může být využita k vytvoření chladicího efektu buď prostřednictvím chladicích procesů poháněných elektřinou, nebo tepelně řízených procesů. Na obrázku 12 můžeme vidět rozdělení hlavních technologií solárního chlazení. Nejběžnější solárně poháněnou chladicí technologií je využití parních kompresorů poháněných elektřinou dodanou z fotovoltaických článků, které mohou dosáhnout hodnot $COP \approx 6$. Tato technologie je relativně jednoduchá, protože má nízké náklady na údržbu a je vhodná zejména pro malé aplikace. Ačkoli cena solárních fotovoltaických článků se v posledních letech dramaticky snížila, vysoké pořizovací náklady baterií omezily výrobu chladicích systémů na fotovoltaické elektrárny pouze na dobu, kdy jasně svítí slunce. Nadále, podle nedávných studií nejsou tyto chladicí systémy konkurenceschopné, bez možnosti prodeje přebytečné energie vyrobené solárními panely, sloužící k pohonu těchto chladicích systémů.[13]



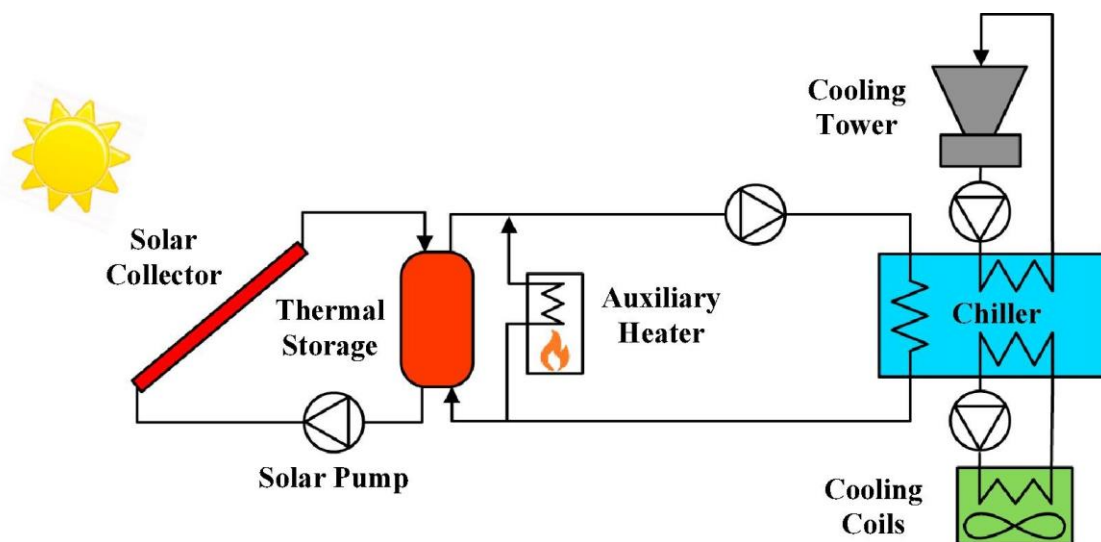
Obrázek 14 Rozdělení chladicích technologií poháněných solární energií [13]

Jak lze vidět na obrázku 14, potencionálních možností tepelně aktivovaného chlazení je více, než těch, poháněných elektrickou energií. Solární tepelné kolektory přeměňují sluneční energii na tepelnou, která může být využita k ohřevu látky pohánějící tyto chladicí systémy, čímž lze dosáhnout požadovaného chladicího efektu a úpravy vzduchu v budovách. Jak již bylo zmíněno výše, tepelně aktivované chladicí systémy, mají oproti elektrickým kompresorovým chladičům výrazně menší COP. COP tepelně aktivovaných systémů mívá hodnoty 0,6-1,8. Solární kolektory mají ale mnohem vyšší účinnost (35-70%), než fotovoltaické články. Navíc tyto systémy mohou být vybaveny tepelnými akumulátory, které jsou oproti bateriím na elektrickou energii výrazně levnější. Další výhodou tepelně aktivovaných chladicích systémů je to, že díky absenci kompresoru, tyto systémy vykazují menší hlučností a hodnotou vibrací. K dnešnímu dni je většina stávajících solárně poháněných chladicích systémů poháněná teplem získaným pomocí solárních kolektorů. V regionech, kde je potřeba chladit, ale i topit, je toto řešení výhodnější pro pokrytí celoročních požadavků na úpravu tepelné pohody uvnitř budov,

neboť tyto systémy dokážou jak chladit, tak i topit a proto jsou mnohem účinnější a ekonomicky výhodnějším řešením než systémy, které zvláště vytápějí a zvláště chladí.[13]

3.1 Využití solární energie pro absorpční chlazení

Absorpční chladiče jsou tradičně poháněny zemním plynem, průmyslovým odpadním teplem, či pomocí přímého zásobení teplotnosným médiem z teplárny ve velkých budovách po celá desetiletí. V uplynulých letech ukázkové projekty ukázaly obrovský potenciál využití solární energie pro pohon těchto chladičů. Typický absorpční systém poháněný solární energií se skládá ze čtyř základních složek: solárního tepelného kolektoru, absorpčního chladiče, pomocného ohříváče a tepelného zásobníku. Uvedený systém lze vidět na obrázku 15.[13]



Obrázek 15 Základní blokové schéma absorpčního chladiče poháněného solární energií[13]

Energie slunečního záření pohlcená solárními kolektory ohřívá teplotnosné médium v solární smyčce, cirkulované pomocí oběhového čerpadla. Tato tepelná energie se uchovává v tepelném zásobníku (akumulátoru) a odtud dále putuje teplotnosné médium do absorpčního chladiče, kde je využito pro chladicí proces. Vzhledem k tomu, že solární energie není vždy k dispozici v dostatečném množství, či dokonce téměř nulová, je nutno systém tohoto typu vybavit pomocným ohříváčem, který v případě nedostatku této solární energie sepne a dodá zbytek potřebné tepelné energie teplotnosnému médiu, nutné pro správnou funkčnost absorpčního chladiče. Díky pomocnému ohříváči a také díky tepelnému akumulátoru lze oddělit závislost dostupnosti solární energie na proměnlivé

potřebě pro chlazení budov. Tepelný akumulátor také zajišťuje jistou tepelnou rezervu, která zajistí plynulý chod chladiče i při proměnlivém počasí (například když mraky na pár minut zakryjí slunce) bez nutnosti spínání pomocného ohřívače.[13]

3.1.1 Solární kolektory

Solární kolektory lze rozdělit na dva základní druhy, koncentrační a nekoncentrační. Charakteristickou vlastností nekoncentračních kolektorů je to, že jejich plocha, která zachycuje sluneční záření je téměř stejná jako plocha absorbéru tepla. Tudíž celý solární panel tohoto typu absorbuje sluneční záření. Velkou výhodou těchto solárních kolektorů je to, že jejich instalace je poměrně snadná, jsou také poměrně rentabilní a nevyžadují složitý monitorovací systém, jako jeho koncentrační protějšek. Jednoduchost tohoto systému ale bohužel limituje maximální provozní teplotu okolo hodnoty 200°C a tím i limituje využitelnost této technologie.[13]

Koncentrační solární kolektory fungují na principu koncentrace a odrazení slunečních paprsků. Toho se dosahuje pomocí velké zrcadlové plochy zaostřující sluneční záření na mnohem menší plochu přijímače, kde je umístěn absorbér. Poměr zrcadlové plochy a přijímací plochy je znám jako poměr geometrické koncentrace. S rostoucím poměrem koncentrace je možné dosáhnout mnohem větších provozních teplot, než u nekoncentračních kolektorů. Provozní teploty těchto kolektorů se pohybují v rozmezí 200-1000°C aniž by docházelo k výrazným tepelným ztrátám. To však přichází za cenu optických ztrát a komplikovaných monitorovacích systémů, což má za následek mnohem vyšší investiční kapitálové náklady na jednotku plochy kolektoru. Obecné charakteristiky běžných typů solárních tepelných kolektorů dostupných na trhu jsou uvedeny v tabulce 2.[13]

Tabulka 2 Obecné charakteristiky běžných solárních kolektorů [13]

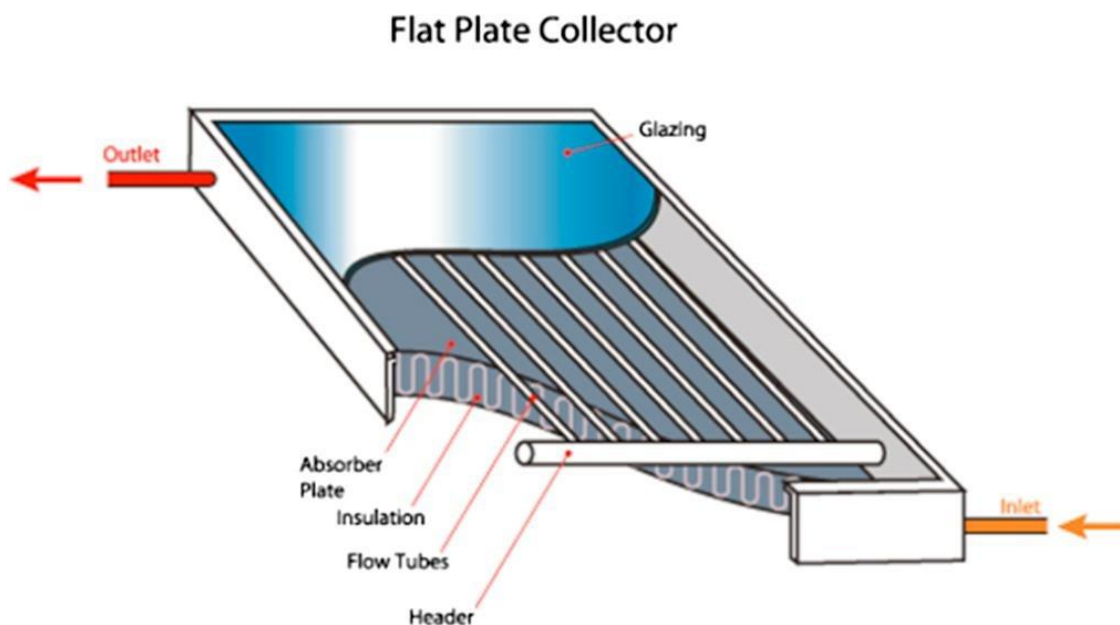
Monitorovací systém	Typ kolektoru	Typ absorberu	Poměr geometrické koncentrace	Rozsah provozních teplot (°C)
Žádný	Plochý deskový kolektor	Plochý	1	30–120
	Evakuovaný trubicový kolektor	Plochý	1	50–150
	Složený parabolický kolektor	Trubkový	1–5	60–240
Jednoosý	Lineární Fresnelův reflektor	Trubkový	10–40	60–250
	Parabolický žlabový kolektor	Trubkový	15–50	60–300
	Válcový kolektor	Trubkový	10–50	60–300

Volba typu solárního kolektoru kriticky závisí na počtu stupňů absorpčního chladiče, který chceme pohánět. Nízkoteplotní solární kolektory, jako jsou ploché deskové nebo evakuované trubicové kolektory (FPC a ETC), jsou vhodné pro poskytování horké vody pro jednostupňové absorpční chladiče. K pohonu vícestupňových absorpčních chladičů musí být použity kolektory, jejichž provozní teploty se pohybují okolo hodnot 200–240 °C. Na základě současné technologie jsou komerčně dostupné tři typy vysokoteplotních solárních kolektorů, které by mohly být potenciálně vhodné pro solární chladicí systémy, využívající absorpční chladiče jak dvoustupňové tak i třístupňové: lineární Fresnelův reflektor (LFR), kolektory parabolických žlabů (PTCs) a evakuovaný kolektor plochých desek (EFPC).[13] V následujících kapitolách popíši dva základní druhy komerčně dostupných nekoncentračních solárních kolektorů využitelné pro jednostupňové absorpční chladiče.

3.1.1.1 Plochý deskový kolektor (Flat plate collector - FPC)

Ploché deskové kolektory jsou nejjednodušší a také nejlevnější metodou získávání solární energie a její přeměny na tepelnou energii. Jak lze vidět na obrázku 16, kolektor tohoto typu využívá průhledného krytu, který umožní průchodu slunečních paprsků

k tmavé absorpční desce, která přetransformuje tyto paprsky na teplo. Teplo je dále přenášeno do systému trubek, díky kterým je možné toto teplo přenášet dále, pomocí teplotnosného média cirkulujícího tímto trubkovým systémem. Na spodní straně konstrukce se instaluje izolační materiál pro minimalizaci tepelných ztrát. FPC se obvykle používají pro nízkoteplotní aplikace, jako je poskytování teplé užitkové vody a vytápění prostoru, zatímco některé typy plochých kolektorů, jako jsou kolektory s dvojitým zasklením (jejichž pracovní teplota je 80–120 °C), by mohly být použity k pohánění jednostupňových absorpčních chladicích jednotek. Je třeba poznamenat, že tepelné ztráty spojené s těmito kolektory jsou při vyšších provozních teplotách nepřiměřeně vysoké, což je faktor, který nepříznivě ovlivňuje množství užitečného tepelného zisku a tím i tepelnou účinnost kolektoru.

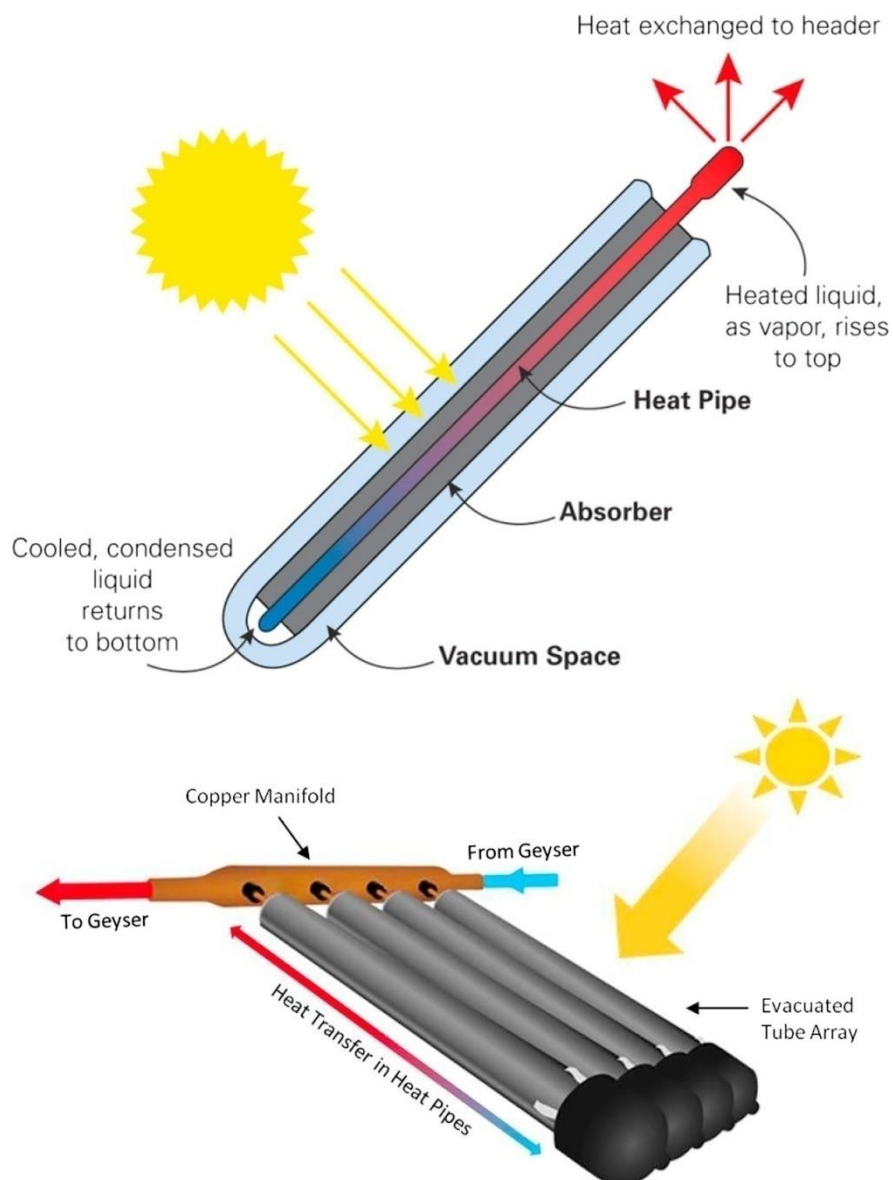


Obrázek 16 Plochý deskový kolektor (Flat plate collector - FPC)[13]

3.1.1.2 Evakuovaný trubicový kolektor (Evacuated tube collector ETC)

Kolektor tohoto typu se skládá z řad paralelně se řadících vakuově uzavřených skleněných trubek, které jsou připojeny do horizontálního rozdělovače umístěného na horní straně kolektoru, jak lze vidět na obrázku 17. Každá trubka obsahuje měděnou trubku a tmavý absorber, který přenáší teplo ze slunečního záření do teplotnosného média (například voda). Při přijímání tepla teplotnosným médiem, se právě toto médium vypařuje a stoupá na vrchol tepelné trubice, kde je nashromážděné teplo výparů přeneseno do proudu studené

vody, či jiného teplotnosného média, proudící potrubím rozdělovače. Po této tepelné výměně se pára uvnitř tepelné trubice ochladí, kondenzuje a vrací se zpět do kapaliny na dně tepelné trubice. Oproti plochým deskovým kolektorům mají nižší tepelné ztráty, díky vakuové izolaci kolem trubek absorbující sluneční záření a také díky válcové geometrii absorberů, které mají menší závislost účinnosti na úhlu dopadu slunečních paprsků. To má za následek, že ETC dosahují vyšších pracovních teplot (až 150 °C) s přijatelnou úrovní účinnosti než FPC. Díky tomu jsou ETC vhodnější pro pohon jednostupňového absorpčního chladiče, než FPC.[13]



Obrázek 17 Evakuovaný trubicový kolektor (Evacuated tube collector ETC)[13]

4 Chladicí zařízení ZČU

4.1 Všeobecný popis zařízení

Areál ZČU Bory využívá jako zdroj chladu absorpční chladicí jednotku s instalovaným chladicím výkonem 420 kW při pracovních teplotách chlazeného média 6/12 °C. Jako topné médium se používá horká voda, jejíž vstupní teplota do zařízení je 100 °C a na výstupu klesne tato teplota na hodnotu 85,6 °C ve výpočtovém množství 35,6 m³/hod. Dodavatelem této topné vody a také provozovatelem zařízení je společnost Plzeňská teplárenská a.s. Vlastní chladicí výkon jednotky je řízen regulačním ventilem na vstupu topné vody do generátoru, ovládaným autonomním řídicím systémem jednotky, jehož nastavení je závislé na vypařovací teplotě v zařízení.[20]

4.1.1 Technický popis zařízení absorpční chladicí jednotky v areálu ZČU

Absorpční chladicí jednotka

počet kusů:	1
typ:	CARRIER 16 JB 021
chladiivo:	demineralizovaná voda
absorbent:	LiBr (lithium-bromid)
chlazené médium:	Coolstar 20
počet regulačních stupňů:	plynulá regulace výkonu v rozmezí 15-100%
chladicí výkon =	420 kW
chlazené médium:	Coolstar 20
obíhající množství:	17,1 l/s
vstupní teplota:	12 °C
výstupní teplota:	6 °C
tlaková ztráta:	53 kPa
chladicí médium:	Coolstar 20
obíhající množství:	47,9 l/s
vstupní teplota:	28 °C
výstupní teplota:	33,2 °C
tlaková ztráta:	62,8 kPa
topné médium:	voda
obíhající množství:	9,9 l/s
vstupní teplota:	100 °C
výstupní teplota:	85,6 °C
tlaková ztráta:	26,9 kPa

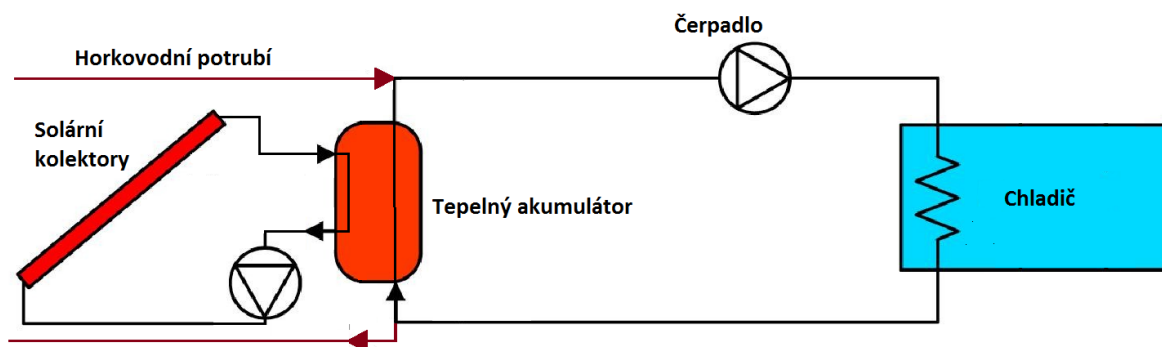
elektrický příkon:	8 kW (3x400V/50Hz)
provozní hmotnost:	7 294 kg
rozměry:	5 105 x 1 350 - 2 390 mm
[20]	

4.2 Využití solárních kolektorů v areálu ZČU Bory

V předchozích kapitolách jsou popsány možnosti pro využití energie slunečního záření pro pohon absorpčního chladicího zařízení skrze jejich absorpci pomocí solárních kolektorů. Této technologii by se dalo využít i v areálu ZČU Bory, nýbrž univerzita využívá právě absorpční chladič k chlazení vnitřních prostor. Použití solárních kolektorů pro pohon univerzitního absorpčního chladiče by znamenalo výrazné snížení provozních nákladů a snížení ekologické náročnosti chlazení, protože horká voda dodávaná Plzeňskou teplárenskou a.s. je ohřívána pomocí kotlů, které spalují fosilní paliva mnoha druhů. Takto spálené palivo však stojí peníze a po jeho spálení dochází k vypouštění produktů spalování (NO_x, TSL, SO_x, VOC, CO₂, stopové množství radonu atd.) do atmosféry vzniklých spalováním, což má za následek zhoršení kvality ovzduší v okolí teplárny (město Plzeň) a také to přispívá ke skleníkovému efektu a s tím spojeným globálním oteplováním. Výhody tohoto řešení jsou jednoznačné, avšak jsou spojeny s vysokými počátečními investičními náklady.

4.2.1 Návrh implementace solárních kolektorů

Sluneční záření je velice proměnlivé. Z tohoto důvodu nelze spoléhat na pouhé solární kolektory jako zdroj tepelné energie a je nutné mít i zdroj náhradní. Jelikož současné řešení dodávky horké vody pro absorpční chladič je přímá dodávka horkovodem, lze tento horkovod použít jako dodatečný zdroj tepelné energie. Má vize je taková, že horká voda dodaná horkovodem z teplárny nadále povede přímo do chladiče. Horká voda ohřátá pomocí solárních kolektorů by pak přispívala, či naprosto nahradila vodu dodávanou z teplárny. Schéma takového systému lze vidět na obrázku č. 18. V zimních měsících kdy není třeba chladit vnitřní prostory budov, je také možné tyto solární kolektory využít na ohřev vody či vytápění.



Obrázek 18 Schéma absorpčního chladiče poháněného solárními kolektory

Při dosažení maximálního výkonu absorpční chladicí jednotky v areálu ZČU Bory, proudí do chladiče o objemu $V = 9,9\text{l}$ horké topné vody za 1 sekundu o teplotě $t_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$. Teplota této vody na výstupu klesne na hodnotu $t_2 = 85,6\text{ }^\circ\text{C}$. Měrná tepelná kapacita vody je rovna $c = 4180\text{ J/kg}\cdot\text{K}$ [14] a hustota vody při $100\text{ }^\circ\text{C}$ je $\rho = 958,350\text{ kg/m}^3$. [15]

$$V = 9,9\text{l} = \mathbf{0,0099\text{ m}^3} \quad (3)$$

$$m = V \cdot \rho = 0,0099 \cdot 958,35 = \mathbf{9,487\text{ kg}} \quad (4)$$

$$Q_{in} = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2) = 9,487 \cdot 4180 \cdot (100 - 85,6) = \mathbf{571,081\text{ kJ}} \quad (5)$$

Jelikož výpočet Q_{in} je vztažen na množství energie spotřebované za jednu sekundu, lze tuto hodnotu uvažovat i jako výkon. To znamená:

$$Q_{in} = W_{in} = \mathbf{571,081\text{ kW}} \quad (6)$$

Dále známe i chladicí výkon $W_{ch} = 420\text{kW}$ a z těchto hodnot lze spočítat koeficient COP. Ve většině vědeckých publikacích a odborné literatuře se při výpočtu COP u absorpčních chladičů zanedbává elektrický příkon chladiče i čerpadel a počítá se pouze s energií spotřebovanou pro separaci chladiva od roztoku. Já jsem pro výpočet COP zvolil stejný postup.

$$COP = \frac{W_{ch}}{W_{in}} = \frac{420}{571,081} = \mathbf{0,735} \quad (7)$$

K úplnému pokrytí dodávky horké vody pro 100% výkon chladiče je třeba nainstalovat solární kolektory s výkonem minimálně 571,081kW. Jako dodavatele solárních kolektorů jsem vybral firmu Regulus spol. s.r.o. a jejich produkt Solární kolektor KPG1+. Tento kolektor má celkovou plochu $S = 2,515 \text{ m}^2$ a při osvitě 1000 W/m^2 dosahuje výkonu $Q_{\max} = 1883 \text{ W}$. Cena jednoho panelu činí 11 990 Kč bez DPH. Kolik panelů je třeba, se zjistí vydělením celkového potřebného výkonu hodnotou výkonu jednoho kolektoru. Z této hodnoty pak bude možné zjistit celkovou plochu S_k potřebnou pro solární kolektory. Celkový výkon všech kolektorů W_{total} je výsledkem vynásobení počtu kolektorů výkonem jednoho kolektoru. Samotné kolektory se budou montovat orientované směrem na jih pod sklonem 45° , a proto se jejich celková zastavěná plocha S_k musí vynásobit funkcí $\cos(45^\circ)$ abychom měli správnou hodnotu. [17]

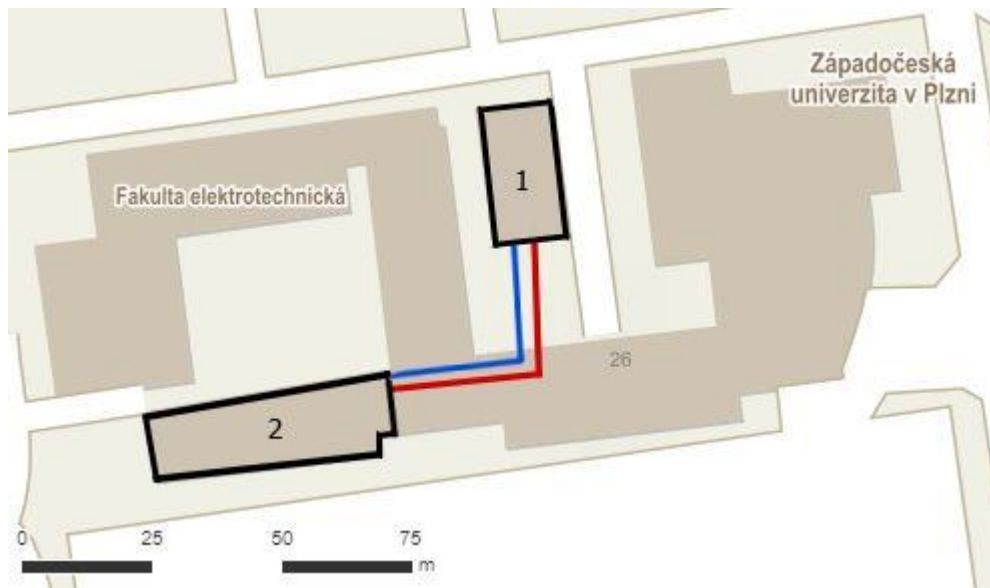
$$N = \frac{Q_{in}}{Q_{max}} = \frac{571\,081}{1883} = \mathbf{303,28 \approx 304} \quad (8)$$

$$S_k = N \cdot S = 304 \cdot 2,515 \cdot \cos(30^\circ) = \mathbf{540,426 \text{ m}^2} \quad (9)$$

$$W_{total} = N \cdot Q_{max} = 304 \cdot 1883 = \mathbf{572,432 \text{ kW}} \quad (10)$$

Celková cena za 304 solárních kolektorů typu Regulus KPG1+ činí 3 644 960 Kč bez DPH. Cenu instalace odhaduji na 15% z celkové ceny panelů, tudíž celkovou cenu panelů s instalací odhaduji na 4 191 704 Kč.

Samotná chladicí jednotka je umístěna v budově s označením 1 na obrázku č. 19, oblast 2 s celkovou plochou 653 m^2 je nevyužitá část střechy budovy FEL a mohla by být využita jako montážní plocha pro kolektory. Plocha této střechy je tedy výrazně větší, než plocha potřebná pro montáž solárních kolektorů a měla by stačit. Dále bude nutné přepravit horkou vodu z kolektorů do samotného chladiče a studenou vodu zpátky do kolektorů. To zajistí potrubní systém, sestávající se z potrubí pro studenou vodu putující zpět do kolektorů a druhým potrubím pro horkou vodu pohánějící chladič. Na obrázku č. 19 můžeme vidět mnou navrhovanou cestu potrubí (modrá barva pro studenou vodu, červená barva pro horkou vodu) mezi kolektory a chladičem. Jejich celkovou potřebnou délku lze odhadnout na hodnotu 170m, při započtení vodorovného potrubí a svislé části potrubí pro překonání výškového rozdílu střechy budovy FEL a umístění absorpčního chladiče.



Obrázek 19 Situační plán instalace kolektorů a přívodního potrubí

Cena tepelné energie dodávané společností Plzeňská teplárenská a.s. činí 512,9 Kč/GJ.[16] Díky tomuto údaji lze spočítat kolik energie Q_p musejí kolektory vyrobit, aby se navrátila jejich pořizovací cena. Dále je také známý celkový výkon kolektorů W_{total} , který je roven hodnotě 572,432 kW, což lze uvažovat jako 572,432 kWh a z této hodnoty je možné dopočítat, kolik energie Q_{1H} panely vyrobí za jednu hodinu optimálního provozu. Poté se hodnota Q_p vydělí hodnotou Q_{1H} a z toho se zjistí, kolik hodin optimálního provozu T_{opt} bude třeba k úplnému navrácení pořizovací investice.

$$Q_p = \frac{4\,191\,704}{512,9} = \mathbf{8172,55\ GJ} \quad (11)$$

$$Q_{1H} = 572,432 \cdot 3600 = 2060755,2\ kJ = \mathbf{2,06GJ/h} \quad (12)$$

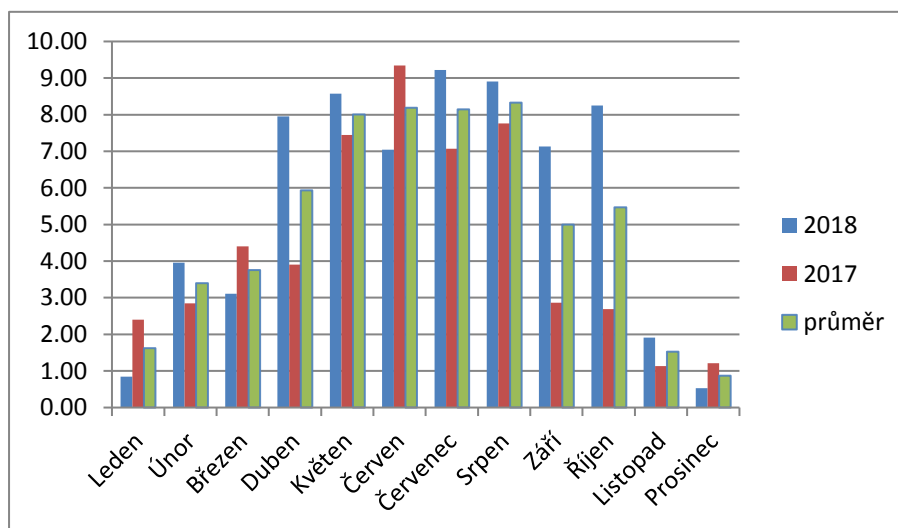
$$T_{opt} = \frac{Q_p}{Q_{1H}} = \frac{8172,55}{2,06} = \mathbf{3\,967,25\ h} \quad (13)$$

Hodnota T_{opt} tedy představuje počet hodin potřebných pro úplnou návratnost investice, avšak pouze při optimálním provozu, kdy panely pracují na 100%. Kvůli proměnlivé povaze počasí ale nejde přesně určit počet hodin, při kterých panely budou schopny pracovat při optimálním výkonu za jeden den. Abych určil počet hodin optimálního svitu, vzal jsem data za roky 2018 a 2017, ze kterých jsem určil průměrný počet hodin

optimálního svitu na jeden den v každém měsíci zvlášť a z toho jsem si zjistil celkovou sumu hodin optimálního svitu na jeden rok. Výsledek této analýzy dat najdete v tabulce 3. Pro lepší vizualizaci jsem data také vynesl do grafu č. 1. Data jsem čerpal ze zdroje [18].

Tabulka 3 Analýza optimálního slunečního svitu[18]

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Denní průměrný počet hodin na jeden den za rok 2018 [h]	0,84	3,95	3,11	7,96	8,57	7,04
Denní průměrný počet hodin na jeden den za rok 2017 [h]	2,40	2,85	4,40	3,91	7,44	9,34
Průměr [h]	1,62	3,40	3,76	5,93	8,01	8,19
	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
Denní průměrný počet hodin na jeden den za rok 2018 [h]	9,22	8,90	7,13	8,25	1,91	0,53
Denní průměrný počet hodin na jeden den za rok 2017 [h]	7,07	7,76	2,86	2,69	1,13	1,21
Průměr [h]	8,15	8,33	4,99	5,47	1,52	0,87



Graf 1 Analýza optimálního slunečního svitu [18]

Pro zjištění celkové sumy počtu hodin optimálního svitu jsem vzal průměrný počet optimálního svitu za jeden den za každý měsíc, vynásobil počtem dní v daném měsíci a jednotlivé měsíce pak sečetl.

$$T_{2018} = 0,84 \cdot 31 + 3,95 \cdot 28 + 3,11 \cdot 31 + 7,96 \cdot 30 + 8,57 \cdot 31 + 7,04 \cdot 30 + 9,22 \cdot 31 + 8,9 \cdot 31 + 7,13 \cdot 30 + 8,25 \cdot 31 + 1,91 \cdot 30 + 0,53 \cdot 31 = \mathbf{2\ 054,13h} \quad (14)$$

Stejným způsobem jsem zjistil počet hodin optimálního svitu pro rok 2017. V tomto byl počet hodin optimálního svitu $T_{2017} = 1\ 619,39$ hodin. Tyto dvě hodnoty jsem následně zprůměroval. Jelikož počasí považuji za velice nestálou proměnou, výsledný průměr jsem ještě vynásobil koeficientem „špatného počasí“ k_p , který byl určen na hodnotu 0,8 z důvodu respektování neoptimálních atmosférických podmínek. Výsledná hodnota T_k je tedy moje predikce počtu hodin optimálního svitu pro následující roky a tuto hodnotu použiji pro výpočet návratnosti investice.

$$T_k = \frac{T_{2018} + T_{2017}}{2} \cdot k_p = \frac{2054,13 + 1619,39}{2} \cdot 0,8 = \mathbf{1\ 469,4\ h} \quad (15)$$

K celkové ceně je také nutné připočítat pořizovací cenu akumulární nádrže a čerpadla, které se postará o cirkulaci vody a překonání výškového rozdílu. Vyhovující čerpadlo, které zvládne čerpat $35,6\text{m}^3/\text{h}$ a s vyhovující výtlačnou výškou vodního sloupce je Calpeda NM 50/16BE od dodavatele EuroClean s.r.o. Výtlačná výška tohoto čerpadla je 21 až 31m s čerpaným množstvím 30 až $66\text{m}^3/\text{h}$, což jsou hodnoty více než dostačující pro tuto aplikaci. Cena tohoto čerpadla je 28 445 Kč bez DPH. Jako vyhovující akumulární nádrž lze zvolit ROBC 3000 s celkovým objemem nádrže 2841l od stejného dodavatele jako solární kolektory (Regulus spol. s.r.o.). Cena tohoto zásobníku je 144 100 Kč bez DPH. [17, 19]

Celková cena projektu po přičtení ceny těchto dvou nedílných součástí tedy činí 4 364 249 Kč. Ke zjištění návratnosti investice lze posupovat jako při výpočtu hodnoty Q_p a T_{opt} . Návratnost v řádu let lze zjistit vydělením celkového počtu hodin nutný k vyrobení

dostatečného množství energie pro zaplacení celkové ceny realizace projektu hodnotou předpokládaného počtu hodin optimálního svitu pro následující roky T_k .

$$Q_c = \frac{4\,364\,249}{512,9} = \mathbf{8\,508,96\ GJ} \quad (16)$$

$$T_V = \frac{Q_c}{Q_{1H}} = \frac{8508,96}{2,06} = \mathbf{4\,130,56\ h} \quad (17)$$

$$T_R = \frac{T_v}{T_k} = \frac{4130,56}{1\,469,4} = \mathbf{2,8} \quad (18)$$

$$U = Q_{1H} \cdot T_k \cdot 512,9 = 2,06 \cdot 1469,4 \cdot 512,9 = \mathbf{1\,552\,529,83\ Kč} \quad (19)$$

Celková doba návratnosti tedy činí 2,8 let. Po úplném navrácení investice, tento projekt může uspořit až 1 552 529,83 Kč ročně ve výdajích za horkou vodu potřebnou pro pohon absorpčního chladiče v areálu ZČU Bory.

5 Závěr

Tato práce poskytuje přehled výhod trigenerační výroby s hlavním zaměřením na technologie tepelně aktivované výroby chladu. Ačkoli mají tyto technologie oproti klasickému kompresorovému, elektricky poháněnému chlazení výrazně menší koeficient COP, v dlouhodobém měřítku jsou tyto trigenerační způsoby výroby mnohem účinnější a ekologicky šetrnější v porovnání právě s konvenčními metodami výroby chladu, tepla a i elektrické energie. V této práci byly popsány nejvíce komerčně využívané způsoby využití zbytkového tepla pro výrobu chladu. Existuje mnoho dalších způsobů, jak docílit stejného cíle, využití zbytkového tepla k produkci chladu. Tyto další způsoby však nejsou nijak výrazně využívány a to zejména z důvodu jejich malých účinností a obrovských počátečních investic, které znemožňují jejich komerční využití.

Ačkoli výhody trigenerační výroby jasně vyplívají z obsahu této práce, je zde stále prostor pro zlepšení a lepší využití paliva spalovaného v teplotárenských kotlích. Ve třetí kapitole je popsána inovativní technologie využívající solární energii k pohonu absorpčních chladičů. Tento způsob výroby tepelné energie potřebné k jejich pohonu může

odlehčit teplárnám, které díky tomu budou moci spalovat méně paliva a tím ušetřit peníze, ale hlavně odlehčí přírodě, protože v důsledku spalování menšího množství paliva vypustí do atmosféry méně produktů spalování.

V poslední části práce jsem navrhnul právě využití solární energie pro pohon absorpčního chladiče v areálu ZČU Bory. Z analýzy vyplývá, že investice do solárních kolektorů na ohřev vody má velmi dobrou návratnost, přesněji 2,8 roku. Tento koncept, pokud by se nějak výrazněji uchytil a realizoval ve vícero případech, se mi jeví jako excelentní možnost pokrytí potřeb chlazení vnitřních prostorů budov. Do budoucna očekávám nárůst počtu klimatizačních jednotek nejen v ČR, ale i ve světě. Pokud by se tyto potřeby měli uspokojovat pomocí klasických kompresorových chladičů, spotřebovali by v budoucnu spoustu elektrické energie a to by mělo negativní dopady na energetickou soustavu. Nárůst spotřeby elektrické energie by byl spojen s výrazně vyššími emisemi CO₂, jelikož největší podíl na výrobě elektrické energie v ČR klasické konvenční elektrárny a teplárny. Pokud by se velké instituce jako například naše univerzita a další velké společnosti rozhodli klimatizaci svých budov řešit způsobem popsáním v této práci, znamenalo by to nejenom ekonomické výhody, ale také nižší ekologickou zátěž.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] doc. Ing. Jiří Pospíšil, PhD., doc. Ing. Jan Fiedler, Dr., Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu [online]. Poslední změna 31.5.2010 [Cit. 6.2.2019] Dostupné z <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu>
- [2] Kogenerace - princip, technologie a výhody, Jan Budín [online]. Poslední změna 21.4.2015 [Cit.6.2.2019] Dostupné z <https://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>
- [3] Electrical4U, Rankine Cycle or Closed Feed Water Heaters and Rankine Cycle Cogeneration [online] Poslední změna 9.1.2019 [Cit. 8.2.2019] dostupné z <https://www.electrical4u.com/rankine-cycle-for-closed-feed-water-heaters-and-cogeneration/>
- [4] Deng, J., R. Z. Wang, a G. Y. Han. „A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems". *Progress in Energy and Combustion Science* 37[online], č. 2 (2011): 172–203. [Cit. 15.2.2019] <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.05.003> dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128510000493>
- [5] Wu, D. W., a R. Z. Wang. „Combined cooling, heating and power: A review". *Progress in Energy and Combustion Science* 95 [online]. 32, č. 5 (2006): 459–95. [Cit. 18.2.2019] <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001> dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000244?via%3Dihub#fn2>
- [6] Srihirin, Pongsid, Satha Aphornratana, a Supachart Chungpaibulpatana. „A review of absorption refrigeration technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 [online], č. 4 (2001): 343–72. [Cit. 20.2.2019] [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00003-X). Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210100003X>
- [7] ing. Aleš Hromádka, Kombinovaná výroba tepla a elektřiny v Plzeňské teplárenské a.s. [online] Dostupné z <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/7252/1/Bakalarska%20prace%20Ales%20Hromadka.pdf>
- [8] Poullikkas, Andreas. „An overview of current and future sustainable gas turbine technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9[online], č. 5 (2005): 409–43. [Cit. 1.3{Citation}] Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000501?via%3Dihub#s0090>
- [10] Best, R., a W. Rivera. „A review of thermal cooling systems". *Applied Thermal Engineering* 75 [online] (2015): 1162–75. [Cit. 5.3.2019] <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.018>. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114006802?via%3Dihub#sec3>
- [11] Jani, D. B., Manish Mishra, a P. K. Sahoo. „Solid desiccant air conditioning – A state of the art review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 [online] (2016): 1451–69. [Cit. 10.3.2019] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.031>. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002665>
- [12] Ing. Miloš Lain, Ph.D., Celkové chladicí faktory klimatizačních systémů a jejich zlepšování [online] Poslední změna 9.7.2012, [Cit. 15.3.2019] Dostupné z <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/8797-celkove-chladici-faktory->

- klimatizacnich-systemu-a-jejich-zlepsovani
- [13] Shirazi, Ali, Robert A. Taylor, Graham L. Morrison, a Stephen D. White. „Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review". Energy Conversion and Management 171 [online] (2018): 59–81. [Cit. 18.3.2019] <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.091>. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418305752>
- [14] Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita [online], [Cit. 20.3.2019] Dostupné z <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/molekulova-fyzika-a-termika/tepelna-kapacita-merna-tepelna-kapacita.php>
- [15] Hustota destilované vody vs. Teplota [online] [Cit. 20.3.2019] Dostupné z <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [16] Cena tepla 2019 [online] [Cit. 20.3.2019] Dostupné z <https://www.pltep.cz/cena-tepla-pro-rok-2019/>
- [17] Sluneční kolektor KPG1+ [online], [Cit. 6.5.2019] Dostupné z <https://www.regulus.cz/cz/slunecni-kolektor-kpg1-plus>
- [18] Meteostanice Plzeň – Mikulka [online], [Cit. 6.5.2019] Dostupné z https://www.in-pocasi.cz/archiv/plzen_mikulka/
- [19] Odstředivé čerpadlo Calpeda NM 50/16BE [online], [Cit. 6.5.2019] Dostupné z <https://www.pumpy-cerpadla.cz/calpeda-nm-50-16be-400v-5-5kw-2900ot-odstredive-cerpadlo>
- [20] ing. Pavel Záhořík, Provozní předpis, Stanice chladu ZČU – zelený trojúhelník

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 VÝROBA ENERGIÍ KLASICKÝMI CESTAMI [5].....	10
OBRÁZEK 2 VÝROBA ENERGIÍ POMOCÍ TRIGENERACE [5].....	10
OBRÁZEK 3 SCHÉMA KOGENERAČNÍHO SYSTÉMU [3].....	12
OBRÁZEK 4 BLOKOVÉ SCHÉMA VÝROBY A T-S DIAGRAM [2].....	13
OBRÁZEK 5 ZÁKLADNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA KVET VYUŽÍVAJÍCÍ PROTITLAKOVOU TURBÍNU [2].....	14
OBRÁZEK 6 ZÁKLADNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA KVET VYUŽÍVAJÍCÍ KONDENZAČNÍ TURBÍNU [2].....	15
OBRÁZEK 7 SCHEMATICKÝ DIAGRAM PLYNOVÉ TURBÍNY [8].....	16
OBRÁZEK 8 BLOKOVÉ SCHÉMA TYPICKÉHO TRIGENERAČNÍHO SYSTÉMU [4].....	17
OBRÁZEK 9 OBR. 9 PRINCIP ABSORPCE; (A); (B) [6].....	18
OBRÁZEK 10 NEPŘETŘŽITÝ ABSORPČNÍ CHLADICÍ PROCES [6].....	19
OBRÁZEK 11 ZÁKLADNÍ SCHÉMA ADSORPČNÍHO CHLADICÍHO SYSTÉMU [10].....	22
OBRÁZEK 12 ZÁKLADNÍ SCHÉMA DESIKAČNÍHO CHLADICÍHO SYSTÉMU [11].....	24
OBRÁZEK 13 PRŮZKUM POČTU INSTALOVANÝCH SOLÁRNĚ POHÁNĚNÝCH CHLADICÍCH SYSTÉMŮ [13].....	27
OBRÁZEK 14 ROZDĚLENÍ CHLADICÍCH TECHNOLOGIÍ POHÁNĚNÝCH SOLÁRNÍ ENERGIÍ [13].....	28
OBRÁZEK 15 ZÁKLADNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA ABSORPČNÍHO CHLADIČE POHÁNĚNÉHO SOLÁRNÍ ENERGIÍ [13].....	29
OBRÁZEK 16 PLOCHÝ DESKOVÝ KOLEKTOR (FLAT PLATE COLLECTOR - FPC)[13].....	32
OBRÁZEK 17 EVAKUOVANÝ TRUBICOVÝ KOLEKTOR (EVACUATED TUBE COLLECTOR ETC)[13].....	33
OBRÁZEK 18 SCHÉMA ABSORPČNÍHO CHLADIČE POHÁNĚNÉHO SOLÁRNÍMI KOLEKTORY.....	36
OBRÁZEK 19 SITUAČNÍ PLÁN INSTALACE KOLEKTORŮ A PŘÍVODNÍHO POTRUBÍ.....	38

Seznam tabulek

TABULKA 1 SROVNÁNÍ RŮZNÝCH TEPELNĚ AKTIVOVANÝCH DRUHŮ CHLAZENÍ	25
TABULKA 2 OBECNÉ CHARAKTERISTIKY BĚŽNÝCH SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ [13].....	31
TABULKA 3 ANALÝZA OPTIMÁLNÍHO SLUNEČNÍHO SVITU[18].....	39

Seznam grafů

Graf 1 Analýza optimálního slunečního svitu [18].....	39
---	----