ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav energetiky

Trigenerace s využitím ORC

Combined cold, heat and power system based on ORC technology

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor:

Vedoucí práce: Ing. Jakub Maščuch Ph.D.

Jakub Krempaský

Praha 2016

Čestné prohlášení

Já, Jakub Krempaský, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Praze, dne .....

Jakub Krempaský

Anotační list

Jméno autora:	Jakub Krempaský
Název BP	Trigenerace s využitím ORC
Anglický název:	Combined cold, heat and power system based on ORC technology
Akademický rok:	2015/2016
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP/DP:	Ing. Jakub Maščuch Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 51 Počet obrázků: 20 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Trigenerace, organický Rankinův cyklus (ORC), výroba chladu, absorpce, adsorpce
Keyword:	Trigeneration, organic Rankine cycle (ORC), cooling, absorption, adsorption

Anotace: Tato bakalářská práce je rešerší pojednávající o možnostech výroby chladu v trigeneračním systému využívajícího Organický Rankinův cyklus. Jsou zde uvedeny některé možnosti výroby chladu a jejich spojení s trigenerační jednotkou. Vybrány jsou ty, které se zdají být z pohledu trigenerace perspektivní. V závěru je proveden bilanční výpočet trigenerace na základě modelu v UCEEB.

Abstract: This bachelor thesis consists of posibilities for cold production in trigeneration system based on organic Rankine cycle. There are described some possibilities for cooling and its connection to a trigeneration system. I chosed those which seems to be perspective for trigeneration. In conclusion there is a balance calculation for trigeneration model in UCEEB.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jakubovi Maščuchovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREMPASKÝ, J. *Trigenerace s využitím ORC. Praha*: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Maščuch Ph.D.

Obsah

Seznam použitých zkratek, veličin a indexů 9

1. Úvod a cíle práce 11

2. Trigenerace 13

3. Organický Rankinův cyklus 15

4. Přehled technologií chlazení 18

4.1. Absorpční chlazení 19

4.2. Adsorpční chlazení 22

4.3. Desikační chlazení 24

4.4. Chlazení ejektorem 27

4.5. Termoelektrické chlazení 29

4.6. Termoakustické chlazení 32

4.7. Magnetokalorické chlazení 34

5. Porovnání technologií 36

6. Energetická bilance 38

7. Závěr 44

8. Bibliografie 45

Seznam použitých zkratek, veličin a indexů

Zkratky

AMRR	Active magnetic regenerative refrigeration	Aktivní magnetické regenerativní chlazení
CCHP	Combined cooling, heating and power	Kombinace chlazení, vytápění a elektřiny
COP	Coefficient of performance	Koeficient výkonnosti
CZT		Centrální zásobování teplem
ERR	Energy Efficiency Ratio	koeficient energetické efektivnosti
EU	European Union	Evropská unie
GHG	Greenhouse gas	Skleníkové plyny
CHP	Combined heat and power	Kombinace vytápění a elektřiny
MCE	Magnetocaloric efect	Magnetokalorický efekt
MCM	Magnetocaloric materiál	Magnetokalorický materiál
ORC	Organic Rankine Cycle	Organický Rankinův Cyklus
Q	Heat transfer rate	Tepelný výkon
T	Temperature	Teplota
TEC	Thermoelectric cooling	Termoelektrické chlazení
TEG	Thermoelectric generator	Termoelektrický generátor
UCEEB	University Centre For Energy Efficient Buildings	Univerzitní Centrum Energeticky Efektivních Budov

Veličiny

T	K	teplota
P	W, Wh	výkon
B	T	magnetická indukce
Q	J	teplo
p	bar	tlak
l	m	délka
t	°C	teplota
S	m^2	obsah
V	m^3, l	objem

W	J	práce

Indexy

ab	absorbér
abs	absorpční
adm t	admise turbíny
vstup k	vstup kotle
c	chladící
c_1, c_2	celkem
cnd	kondenzační
e t	emise turbíny
e	elektrický
em ch	emise z absorpčního cyklu
výst k	výstup kotle
evp	vypařující
gen	generátor
h	odevzdané
ch	chladicí
k	kondenzátor
pal	palivo
pe	palivo elektrárny
pch	palivo kompresoru
pv	palivo výtopny
r	regenerátor
re	elektrická energie kompresoru
t	tepelný
tt	tepelné emise turbíny
vin	vstup výměníku
vout	výstup výměníku
výkon k	výkon kotle

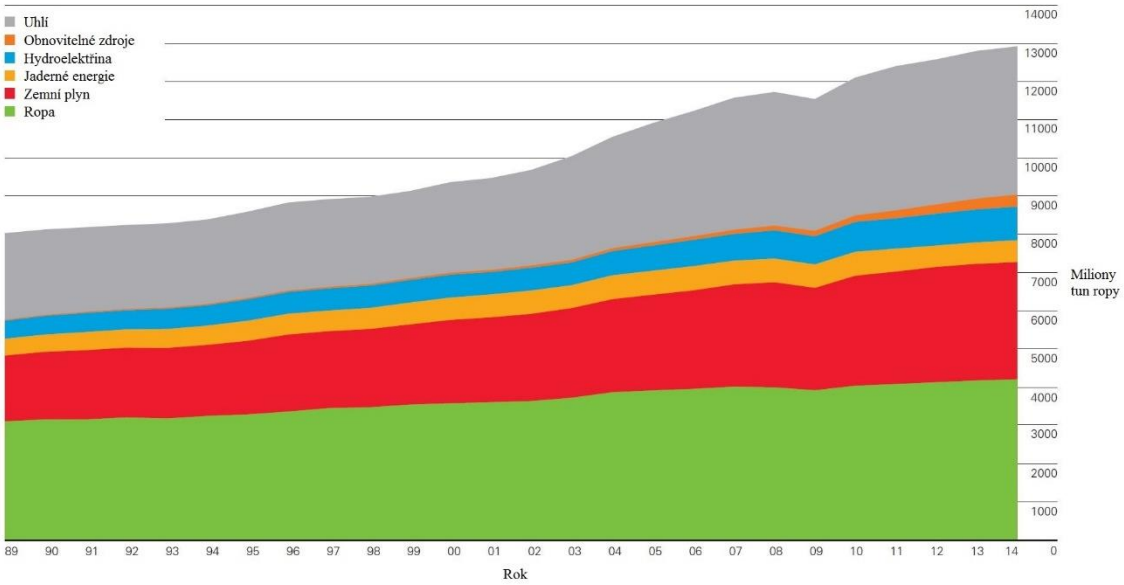
1. Úvod a cíle práce

Fosilní paliva, což jsou zejména uhlí, ropa a zemní plyn, jsou stále hlavním zdrojem energie pro lidské činnosti. Je to z důvodu jejich vysokého energetického obsahu, skladovatelnosti a dostupnosti. Jejich spotřeba takřka každým rokem meziročně roste a nezdá se, že by tento trend neměl pokračovat; viz obr. 1, který ukazuje vývoj světové spotřeby energie v řádu let podle jednotlivých zdrojů energie přepočtených na miliony tun ropy. [1; 2] Jsou zde ale vedlejší efekty spojené se spotřebou těchto zdrojů jako jejich dopad na životní prostředí, či jejich vyčerpatelnost. Odhad pokrytí spotřeby ropy v současné době známými zásobami je okolo 53,5 let, u zemního plynu asi 54,1 let a uhlí 110 let. [3] Proto nelze s těmito zdroji počítat v dlouhodobém horizontu.

S rostoucími obavami o životní prostředí a globální oteplování jsou stále vyšší požadavky na efektivitu využití zdrojů a ekologii. Proto se hledají a vyvíjejí nové možnosti v oblasti energetiky, které by tyto trendy uspokojily.

Jednou z možností jak těmto požadavkům vyhovět je princip trigenerace. Při klasické výrobě, kdy se vyrábí pouze elektřina, odejde velké množství energie ve formě zbytkového tepla do okolí. Toto teplo lze ale dál využít, například k vytápění nebo výrobě chladu. Tento princip je možné implementovat např. do komerčních budov k pokrytí jejich elektrických, tepelných a chladících potřeb. [4]

Nástrojem k výše uvedenému může být např. organický Rankinův cyklus (ORC). Jedná se o Rankine tepelný cyklus (RC), který místo vody používá jinou pracovní látku. Díky němu jsme schopni využít i nízko-potenciálové tepelné energie. Mezi tyto tepelné energie se řadí především odpadní teplo a obnovitelné zdroje tepelné energie ze slunečního zařízení, biomasy či geotermální energie. Vzhledem k současnému trendu maximálně využívat obnovitelné zdroje energie se tento způsob výroby elektřiny, tepla a chladu jeví jako perspektivní. Navíc při lokální kombinaci s trigenerací dokáže pokrýt spotřebu v jejím místě a tím minimalizovat přenosové ztráty. Eliminace přenosu elektřiny přes distribuční soustavy také eliminuje riziko výpadku dodávek elektřiny vlivem přírodních katastrof, či přetížení elektrické sítě a tím je zásobování elektrickou energií stabilnější a spolehlivější. Tato technologie je neustále předmětem dalšího zkoumání, kdy se řeší nové způsoby výroby o přijatelné účinnosti a výkonu. [4]



Obr. 1 Vývoj světové energetické spotřeby [3]

Cílem práce je analýza typů chlazení, které by bylo možné implementovat do zařízení pro trigeneraci pracující na principu ORC. Práce se primárně zabývá tepelně aktivovaným chlazením, jako je adsorpční a absorpční výroba chladu. Jsou zde ale dále doplněny další varianty, které mají oproti klasickým jiné výhody a případný potenciál vytvořit alternativu výroby chladu.

V další části je provedeno porovnání nejčastěji používané technologie výroby chladu s metodou výroby chladu z odpadního tepla.

V závěru práce jsem provedl bilanční výpočet trigenerační jednotky založené na ORC a porovnal spotřebu paliva s klasickou výrobou elektřiny, tepla a chladu.

2. Trigenerace

Při klasické výrobě elektrické energie je účinnost transformace tepelné energie na mechanickou a elektrickou poměrně nízká. Je to proto, že velká část tepelné energie zůstane po průchodu expandérem nevyužita a odvádí se ve formě tepla do okolí. Pro zvýšení účinnosti cyklu a tedy i využití tepelné energie na výstupu z turbíny se využívá princip zvaný kogenerace. Kogenerace spočívá v tom, že se současně s výrobou elektrické energie využívá i energie tepelná. To znamená, že teplo, které zůstane pracovní látce po průchodu turbínou, se dále využívá k ohřevu vody, vytápění nebo v technologických procesech. [5] Spotřeba této tepelné energie není rovnoměrná a je závislá na klimatických podmínkách a chování spotřebitelů. V letním období klesá u teplotně závislých spotřebičů na minimum, proto nárůst spotřeby chlazení se jeví perspektivní pro zrovnoměrnění spotřeby tepla, které je výstupem z výroby elektřiny. Celkově tím dochází k vyššímu využití instalovaného výkonu zařízení a eliminace jeho sezónnosti provozu.

„Pojem trigenerace je obecně používán pro popis spojené výroby elektrické, tepelné a chladící energie. Kombinace chlazení, ohřevu a produkce elektřiny umožňuje institucím jako firmy, elektrárny, nemocnice, hotely nebo obchodní centra uspokojit jejich elektrické, tepelné a chladící požadavky pomocí jednoduchých zdrojů energie jako ropa, uhlí, zemní plyn, biomasa nebo sluneční energie.“ [6]

„Systémy založené na kombinaci chlazení, výroby tepla a elektřiny jsou většinou založené na spojení jednotky na výrobu tepla a elektřiny, nazývané také jako primární jednotky, které generují elektřinu a teplo, a chladícího zařízení poháněné teplem, které produkuje chlad.“ Tyto zařízení zvyšují roční účinnost využití paliva, a tím redukují celkovou produkci emisí a látek škodlivých životnímu prostředí a pomáhají odstranit přetěžování distribuční sítě. [7]

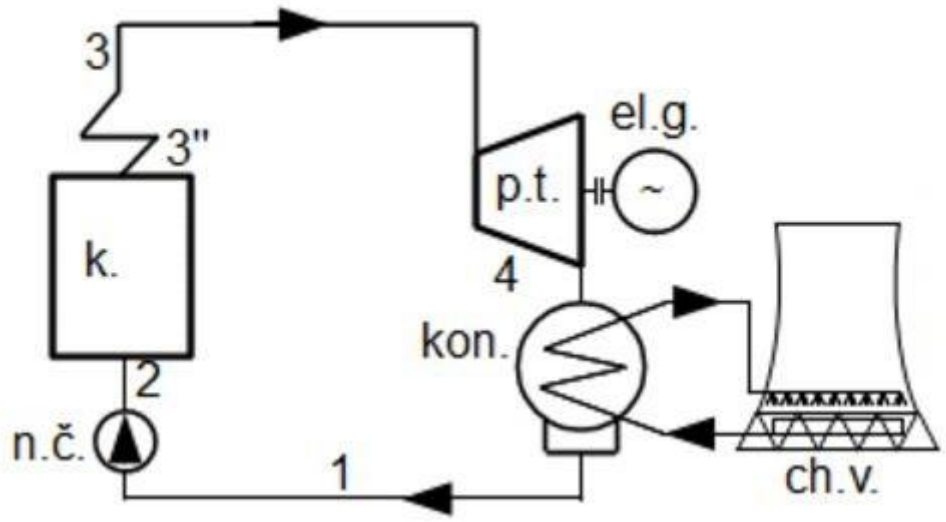
„Při maximálním využití energie paliva s minimálními ztrátami může trigenerace dosáhnout celkové účinnosti přeměny energie přes 70%, což je výrazně více než generování jednotlivých energií odděleně.“ [8]

Obr. 2 Princip trigenerace [9]

3. Organický Rankinův cyklus

Organický Rankinův cyklus (déle jen ORC) je upravený Rankine cyklu (RC), který používá jinou pracovní látku. RC cyklus je nejrozšířenější tepelný oběh používaný v energetice, který probíhá v několika na sobě navazujících zařízeních. Základní schéma je ukázáno na obr. 3. Nejprve se látka (z bodu 1) stlačí v čerpadle (bod 2) a následně se ohřeje až do stavu syté a přehřáté páry v kotli (bod 3). Pára pak jde do turbíny (bod 4), kde dochází k její expanzi a ochlazení a tím vykonání mechanické práce, která je generátorem převedena na elektrickou energii. Ve výměníku za turbínou pracovní látka (pára) odevzdává zbylé teplo chladicí kapalině a tím zkondenzuje nebo je odvedena k využití tepelné energie, kde zkondenzuje a ocitá se znovu v počátečním stavu (bod 1), čímž je cyklus uzavřen. [10]

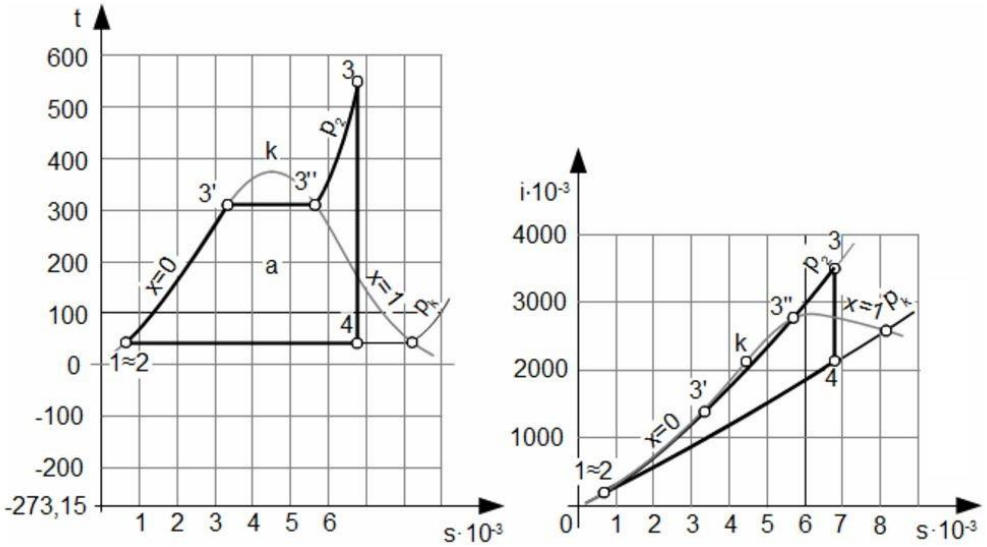
ORC se skládá ze stejných částí jako RC oběh (výměník, expanzní zařízení na produkci práce, kondenzátor a kompresor), ale liší se ve výběru pracovní látky v cyklu, kdy je místo vody použita organická látka. Stejně jako klasický oběh může být vylepšen mnoha způsoby v závislosti na konkrétní aplikaci. [11]



Obr. 3 Základní schéma RC cyklu v elektrárně [10] (k. – kotel, p. t. – plynová turbína, el. g. – elektrický generátor, kon. – kondenzátor, ch. v. – chladicí věž, n.č. – čerpadlo)

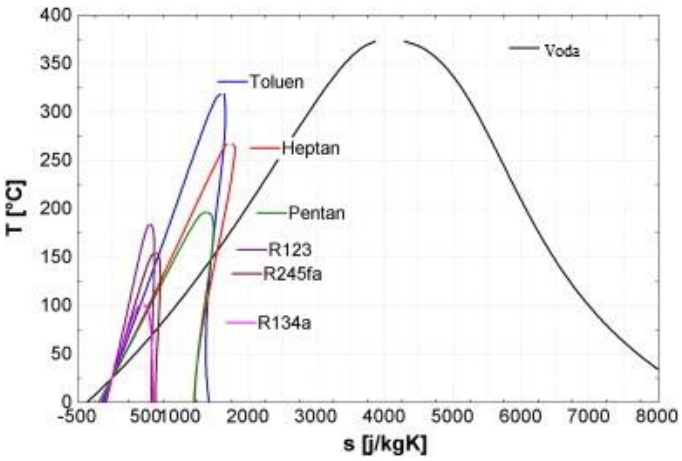
Parní turbíny, které mají výkony menší než zhruba 1,5 MWe, nedosahují velkých účinností, a tak je nevýhodné je pro některé zdroje tepla použít. Mezi tyto zdroje se řadí odpadní teplo nebo obnovitelné zdroje energie. To je hlavní rozdíl ORC od klasického parního oběhu, který je schopen produkovat elektřinu za uspokojivých účinnostech i při

nízkých tlacích a teplotách a tak využít potenciál těchto zdrojů. [10] Obnovitelné zdroje energie a odpadní teplo nejsou akumulovány na několika málo místech jako fosilní paliva, takže se tato technologie dá využít i při decentralizaci výroby elektřiny, tepla a chladu. [11]



Obr. 4 RC oběh v T-s a i-s diagramu vody [10]

Na obr. 5 je T-s diagram vody a některých látek používaných v ORC systémech. Rozdíl je ve tvaru nasycených křivek. Pro organické látky je sklon křivky pozitivní nebo izoentropický a pro vodu negativní. U vody s negativním sklonem této křivky je potřeba přihřívání, jelikož se při pozdějších částech expanze na turbíně objevují kapičky vody, které mohou turbínu poškodit. Druhá odlišnost je v rozdílu entropií mezi nasycenou kapalinou a nasyceným plynem u organických látek a vody. Vypařovací entalpie organických látek je nižší, a proto je potřeba k dosažení stejného množství tepla ve výparníku jako u vody většího průtoku organické látky, což vede k větší spotřebě čerpadla. [11]



Obr. 5 T-s diagram vody a některých látek používaných v ORC [11]

Výběrem pracovní látky se zabývá mnoho studií. [7; 11; 12] Ve většině případů se srovnávají termodynamické vlastnosti a vhodnost látek v konkrétním cyklu. Při výběru organické pracovní látky je zohledňováno několik parametrů. Nejdůležitějšími jsou výkon, vysoká hustota výparů, protože čím menší je hustota páry, tím je třeba většího průtoku, což vede k nutnosti pořízení výkonnějších zařízení cyklu. Důležitá je také nízká viskozita, která vede k vyšším tepelným koeficientům a nižším ztrátám vlivem tření ve výměníku. Dalšími kritérii jsou například: vysoká vodivost, bezpečnost, šetrnost k životnímu prostředí, zejména ohledně globálního oteplování a ničení ozonové vrstvy, dobrá dostupnost, cena a další. Množství látek, které lze v ORC použít, je velké. V komerčních systémech se ale používá pouze několik z nich. Obecně lze říci, že látky, které jsou komerčně používány, mají kritickou teplotu lehce větší, než je vypařovací teplota. Pokud je vypařovací teplota mnohem větší než kritická teplota, je hustota plynu nízká. [11]

Ačkoliv bylo vypracováno mnoho studií, žádná z nich nestanovila optimální látku pro ORC. Je to dáno tím, že některé studie uvažovaly s dopadem na životní prostředí, hořlavostí a toxicitou pracovních látek a jiné ne. Studie byly také prováděny při jiných pracovních podmínkách a předpokladech. Hlavní je, že výběr dané pracovní látky závisí na konkrétním použití ORC. Někdy je kladem důraz na výstupní energii a tak se maximalizuje výkon cyklu, jindy je kladem důraz na životní prostředí a tak je snaha zvýšit účinnost. Cílem této práce není výběr látky pro daný systém. Problematika jejího výběru pro danou jednotku vyžaduje hlubšího zkoumání a mnohdy i simulace. Mezi často komerčně používané látky patří: HFC-134a, HFC-245fa, n-pentan, Solkatherm, OMTS, Toulen. [11]

Použití ORC technologie je velmi vhodné v oblastech nízko-potenciálních zdrojů tepla, což vede k menším teplotám a tlakům, za kterých zařízení pracuje. Je také ekologické, jelikož efektivně využívá obnovitelné zdroje energie. Tyto systémy jsou navíc poměrně jednoduché a spolehlivé. Jako nevýhody jsou občas zmiňovány toxicita, hořlavost a bezpečnost pracovních látek. Dále také hraje významnou roli počáteční investice do zařízení. Účinnost výroby pouze elektrické energie je poměrně nízká. [11]

4. Přehled technologií chlazení

Pro výrobu chladu v obytných a komerčních budovách se dnes nejčastěji používá technologie chlazení kompresorem, která je primárně poháněna elektrickou energií. Je to z důvodu malých investic do zařízení, poměrně velkých účinností a bezpečného chodu. [13] Avšak vzhledem k vzrůstajícím novým požadavkům na výrobu energií, využití obnovitelných zdrojů energie a odpadního tepla se v kombinaci s trigenerací jeví jako vhodná alternativa chlazení poháněné primárně teplem.

Trigenerace s chlazením spotřebovávajícím primárně teplo má vysoké využití paliva a tím nízkou produkci měrných emisí, navíc se také redukují náklady spojené s distribuční sítí. Mezi hlavní chladicí oběhy poháněné teplem patří absorpční, adsorpční a desikační chlazení. [4]

Chladicí faktor COP

V praxi se rozlišuje několik typů COP a to podle typu dodané energie zdroji chladiče. U tepelně aktivovaného chlazení se zanedbává spotřeba elektrické energie chladiče a bere se v potaz pouze dodaná energie tepelná.

„Kvalita absorpčního oběhu se vyjadřuje pomocí chladícího faktoru tzv. COP, které vychází z termodynamického popisu absorpčního oběhu. Chladící faktor u absorpčního chladicího oběhu vyjadřuje poměr vyrobeného chladu ve výparníku a tepla dodaného vysokoteplotním zdrojem desorbéru.“ [14]

Naopak u chlazení využívající primárně elektrickou energie je hodnota COP definována jako:

„Celkový chladicí faktor reálného oběhu zdroje chladu COP je potom poměr chladicího výkonu Q_1 na výparníku vůči elektrickému příkonu kompresoru a kondenzátoru.“ [15]

Rozdíl ve výpočtu koeficientu COP je tedy v druhu energie, která pohání chladicí jednotku. V novější literatuře se pro chlazení místo COP objevuje zkratka ERR (Energy Efficiency Ratio), česky koeficient energetické efektivnosti. Je to z důvodu rozlišení chladicího faktoru zdroje chladu od topného faktoru zdroje tepla. [15]

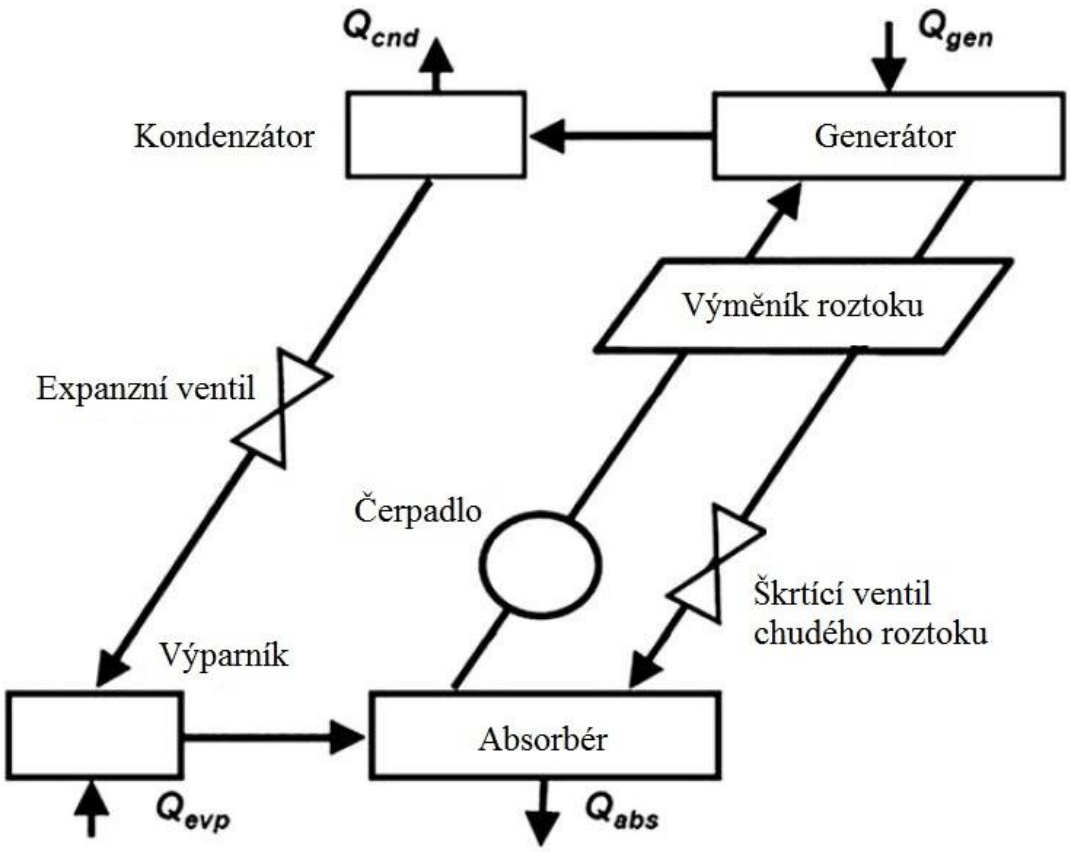
4.1. Absorpční chlazení

Absorpční chlazení pracuje na stejném principu jako kompresní chlazení s jedním hlavním rozdílem. Kompresní chladiče používají k zvýšení tlaku chladící látky mechanickou energii, jejímž zdrojem jsou elektromotory, spalovací a parní turbíny, kdežto absorpční chlazení používají v procesu k výrobě chladu teplo. To znamená, že u kompresních chladičů se spotřebovává elektrická energie a u absorpčních primárně teplo, což má několik výhod hlavně v použití při trigeneraci. [4]

Základním jevem pro absorpční chlazení je absorpce. *„Absorpce je proces, ve kterém látka v jedné fázi je sloučena s jinou látkou v odlišné fázi. Například plyny, které jsou pohlcovány kapalinou.* [16]*“*

Schéma základního a nejpoužívanějšího absorpčního cyklu je ukázáno na Obr. 6. V regenerátoru se využívá tepelná energie k vypaření chladící látky. Výpary chladící látky z regenerátoru, kde získávají teplo Q_{gen}, proudí do kondenzátoru, kde odevzdávají teplo Q_{cnd} a současně snižují svoji teplotu. Následně jsou vedeny skrz expanzní zařízení, kde se sníží jejich tlak a teplota, a míří do výparníku. Vlivem nízkého tlaku chladící látka odjímá teplo Q_{evp} z chlazené látky a vypařuje se. Tím nastává chladící efekt. Z výparníku pak páry míří do absorbéru, kde jsou pohlcovány do absorbentu za odevzdání tepla do okolí Q_{abs}. Směs páry z výparníku a absorbentu je pak pumpována čerpadlem do regenerátoru. Čerpadlo je v tomto případě jediné zařízení, které spotřebovává elektrickou energii. V regenerátoru je směs zahřívána odpadním teplem z primárního cyklu, čímž se docílí oddělení chladící látky a silného roztoku. Výpary z regenerátoru znovu míří do kondenzátoru, čímž se cyklus uzavírá. Chudý roztok naopak proudí zpátky do absorbéru, kde pohlcuje další výpary z výparníku. [16]

Pracovní látky v absorpčním chlazení by měly být chemicky stálé, netoxické a neexplozivní. Navíc by měly být dobře mísitelné. [17] Nejvíce používané látky v cyklu jsou voda + NH_3 (amoniak) a voda + LiBr (bromid lithný). Voda slouží jako chladící látka a NH_3 popřípadě LiBr jako bohatý roztok čili adsorbent. Výhoda NH_3 oproti LiBr je v bodu mrznutí amoniaku, který je -77,71°C, takže je díky tomu možné chladit při nižších teplotách, než u LiBr. Na druhou stranu ale pracuje při mnohem větších hodnotách tlaků okolo 1,5 - 2 MPa, zatímco pracovní dvojice voda + LiBr pracuje při tlacích okolo 1-10 kPa v závislosti na konkrétních teplotách cyklu. Dále je amoniak oproti LiBr toxický, zařízení s ním má složitější design a nedosahuje takových hodnot COP. [16]



Obr. 6 Schéma absorpčního chlazení [16]

Existuje několik studií a komerčně využívaných zařízení s výkony od několika kW až po řády stovek kW s hodnotou COP okolo 0,6 u jednostupňového absorpčního chlazení. Ty se hodí pro zdroje tepla mezi 80 – 120 °C. Velká zařízení se hodí zejména pro průmyslové aplikace, malé zase pro komerční a obytné účely. Hodnoty výkonu a účinnosti závisí hodně na konkrétní aplikaci zejména na požadované chladící teplotě a teplotě tepelné energie. U dvoustupňových chladičů se hodnoty COP pohybují okolo 1 až 1,2. Jsou použité zejména tam, kde je teplota tepelné energie okolo 120 – 170 °C. Hodí se hlavně pro obytné a malé komerční budovy. Tyto chladiče už ale dosáhly svého technologického maxima a tak se vyvíjí třístupňové systémy. Třístupňové absorpční chladiče nejsou zatím komerčně využívané, i když mohou produkovat chlad při hodnotách COP mezi 1,4 až 1,7. Je to z důvodu, že tlak přes 20 baru u amoniaku, který vede z vyšší teploty regenerace, může způsobovat bezpečnostní riziko. Teplota tepelného zdroje by měla být okolo 200 – 230 °C. [16]

Studie [18] zkoumala difúzní absorpční chlazení pomocí několika organických látek v porovnání s amoniakem. Cílem bylo snížení teploty ve výparníku a tlaku v systému

s využitím netoxického chladiva. Výsledkem bylo snížení COP oproti použití pracovní látky amoniak + voda, vyšší vypařovací teploty a snížení kondenzační teploty na 40 °C.

Studie [19] zkoumala několik komerčně dostupných zařízení na trhu. Zařízení byly jednostupňové a dvoustupňové absorpční chladiče s pracovními dvojicemi voda + LiBr a voda + amoniak a kompresní chladič. Zařízení byla poháněna zbytkovým teplem z mikro turbíny o výkonu 28 až 200 kW_e přímo z výstupu z turbíny nebo pomocí ohřáté vody. Ekonomicky vycházel nejlépe kompresní chladič s COP = 3, jelikož má mnohem menší investiční nároky než absorpční chladiče. Absorpční chladiče měly menší celkovou produkci CO_2, přičemž nejlepší variantou bylo použití dvoustupňového chladiče na vodu s LiBr. Pracovní dvojici amoniak s vodou není vhodné v této jednotce použít, jelikož zde nebyly potřeba chladící teploty pod 0 °C. Ekonomicky dvoustupňové chladiče vycházeli zhruba stejně jako jednostupňové. Navíc měli lepší COP a vyžadovali menší množství tepla.

Vzrůstající zájem o tuto technologie je zejména kvůli možnosti chlazení s využitím nízko-potenciálních zdrojů tepla o různých teplotách, tichému chodu, vysoké spolehlivosti, dlouhé životnosti a jednoduchému řízení výkonu. Systémy s dvojící pracovních látek LiBr + voda jsou široce využívané zejména pro klimatizaci vnitřních prostor. Hlavní problémy spojené s jejich použitím je krystalizace LiBr v absorbéru při vyšších teplotách. Dále jsou vysoké požadavky na těsnění, jelikož systém pracuje při nízkých tlacích. Třetí je v tom, že roztok LiBr má pouze úzkou šíři koncentrace, která je limitována jeho krystalizací, což vede k jeho maximální teplotě v absorbéru okolo 40 °C. Proto zde musí být účinná chladící věž, aby se teplota roztoku v absorbéru nedostala nad tuto hodnotu. Kombinace amoniak a voda jsou využívány hlavně pro velké průmyslové použití. Kvůli bodu mrznutí amoniaku se dají dobře využít v potravinářství při skladování potravin. Nevýhodou je hořlavost a toxicita amoniaku, nižší účinnost oproti LiBr, vysoké počáteční investice a možná koroze zařízení. [16]

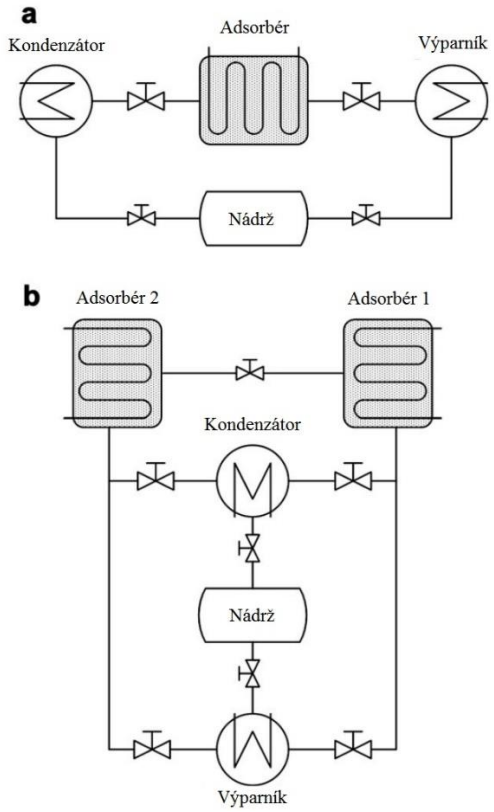
Na trhu jsou jíž dostupné některé absorpční zařízení s chladícím výkonem menším než 30 kW. Pro LiBr s vodou jsou to např. 4,5 kW Rotartica, 4,5 kW Abakus, 10 kW Sonnenklima Suninverseof, 15 kW EAW, 16 kW Broad BCT, 17,5 kW Yazaki WFC-SC5. Pro amoniak s vodou jsou to 8 kW AoSol, 12 kW Pink/Solar-Next, 17 kW Robur. Absorpční systémy s vodou a amoniakem se hodí zejména pro vysoké výkony. Oproti LiBr pracují za vyššího tlaku, ale s o něco menšími hodnotami COP. Dostupné jsou také chladící jednotky s pracovní dvojicí LiCl a voda vyvinuté švédskou firmou ClimateWell AB s výkony 2 až 10 kW. [20]

4.2. Adsorpční chlazení

„*Adsorpční chladiče jsou založeny na vlastnostech některých pevných látek adsorbovat velké množství páry z důvodu velkého povrchu a pórovitosti.* [21]“

Stejně jako absorpční chladiče využívají odpadní teplo k produkci chladu. Chladicí kapalina je adsorbována a resorbována v pevných adsorpčních panelech. Základní jednotka se skládá z adsorpčního panelu, kondenzátoru, škrtící ventilu a výparníku. Oproti absorpčním chladičům může být provozována teplem o nižší teplotě. Navíc je bez mechanických částí a tudíž bez hluku, čerpadla a spotřeby elektrické energie. Nemá problémy s korozí a krystalizací adsorbentu a malé objemy dělají adsorpční chlazení velmi atraktivní hlavně pro chlazení v malém měřítku. Mají velmi nízkou potřebu na údržbu a jsou poměrně dobře nastavitelné, takže regulace chladícího výkonu je snadná. Také mají nízké GHG emise. V základním seřízení jednotky s jedním adsorpčním panelem je produkce chladu nesouvislá. K souvislé produkci chladu musí být instalovány dva adsorbéry, kdy je jeden ohříván během resorpčního procesu a druhý je chlazen během adsorpčního procesu. [17] Jako úskalí této technologie se uvádí malá tepelná vodivost adsorbentů, nízký průtok pracovní dvojice, což způsobuje, že adsorpční kapacita mezi adsorpční fází a resorpční fází je poměrně malá. [16]

Schéma cyklu je na obr. 7. Chladivo je v adsorbentu, kde je izolováno od kondenzátoru a výparníku. Dodáváním externího tepla stoupá tlak látky, dokud nedosáhne hodnoty kondenzačního tlaku. Po dosáhnutí požadovaného tlaku je adsorbent spojen s kondenzátorem. Chladivo proudí z adsorbentu do kondenzátoru, kde mu odevzdává teplo, které může být dále využito. Při proudění a kondenzaci chladiva stále probíhá ohřev v adsorbéru, takže tento proces probíhá za konstantního tlaku. Po odevzdání tepla v kondenzátoru je látce snížen tlak škrtícím ventilem. Chladivo je vtaženo do výparníku, přičemž adsorbér je izolován od kondenzátoru a výparníku. Když je takto izolován, je mu chlazením vrácena teplota a tlak na hodnoty, při níž probíhá adsorpce. Jakmile je adsorbér regenerován dojde ke spojení s výparníkem. Chladivo ve výparníku odebírá teplo chlazené látce, vypařuje se a je adsorbováno regenerovaným adsorpčním panelem. [4]



Obr. 7 Schéma adsorpčního chlazení: a) základní adsorpční systém, b) adsorpční systém s nepřetržitým chodem [16]

Studie [22] provedla teoretické a experimentální vyhodnocení mikro CCHP systému s adsorpčním chlazením s pracovní dvojicí silikonový gel a voda. Výsledky ukazují, že chladící výkon a COP chladiče velmi závisí na průměrných hodnotách a fluktuaci elektrické zátěže a na průměrné hodnotě chladící zátěže. Čím byla fluktuace dodávky elektrické energie intenzivnější, tím se zhoršoval výkon a COP chladiče. Při zvětšení průměrné elektrické zátěže z 2 až 14 kW se hodnota COP zvětšila pouze o 15,4% až 18,4% v závislosti na použití a nepoužití vodní nádrže. S vyšší chladící zátěží se zvedal výkon chladiče. Při zvětšení z 1 kW na 9 kW se hodnota COP zvětšila z 0,09 na 0,46. Při nižší elektrické zátěži je vhodné před adsorpční chladič přidat vodní nádrž, která pomáhá zvětšit hodnotu COP. I když byl výzkum pouze teoretický, vykazuje velmi malou odchylku od experimentálních výzkumů na stejné téma.

Další analýza [23] zkoumala spotřebu exergie mikro-trigenerační jednotky s adsorpčním chladičem z ekonomického hlediska. Systém měl výkon 12 kW_e a 9 kW_c nebo 28 kW_t. Teplota vycházejících plynů z motoru byla 580 °C, COP je 0,3 - 0,4 pro 13°C chlazenou vodu a zdrojem tepla v rozmezí 60 – 95 °C. Pracovní dvojice byla silikonový gel s vodou. Mimo jiné výsledek porovnává výkon chladiče s výkonem elektrického chladící zařízení na trhu. Při stejném množství dodané chemické exergie

paliva do systému je adsorpční chladič s COP = 0,3 ekvivalentní k elektrickému chladícímu zařízení s COP = 2,51.

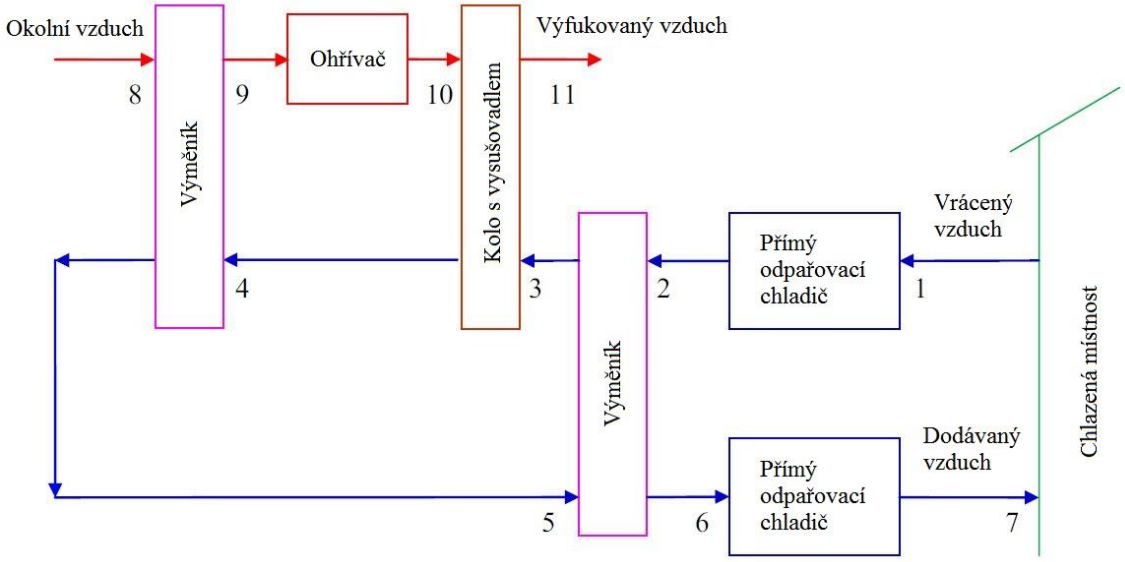
Ačkoliv jsou adsorpční chladiče méně vyvinuté oproti absorpčním zařízením, existuje několik komerčně dostupných jednotek: 2,5 kW KWECN, 10 kW SJTU, 7 a 10 kW Invensor, 8 a 15 kW SorTech. [20]

Nabídka zařízení s pracovní dvojící silikonový gel a voda v oblasti mikro výroby (méně než 10 kW) je poměrně omezená. Pokud se snižuje velikost produkované energie v řádech několika kilowatt, klesá spolu s tím i hodnota COP na 0,3. Nejvhodnější je použití této kombinace v zařízeních s výkonem 10 a 200 kW. [16]

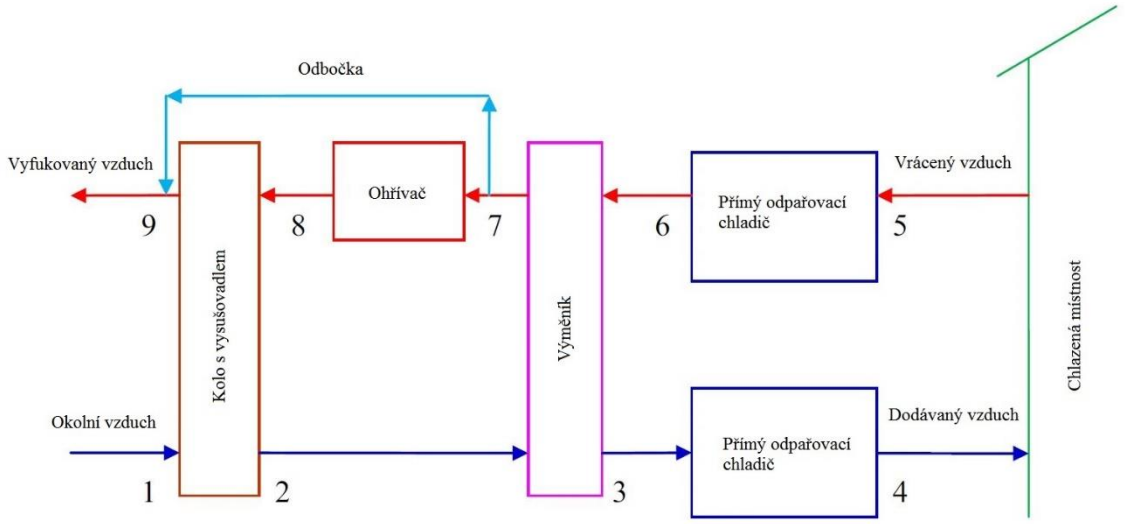
4.3. Desikační chlazení

Desikační chlazení je typ tepelně aktivovaného chlazení, které využívá látek pohlcující vlhkost vzduchu. Udržuje vlídné klima vnitřních prostor s využitím tepelné energie a minimálním využitím elektrické energie. Pomocí materiálů, které přitahují a udržují vlhkost, snižuje vlhkost proudící vzduchu do systému. Aktivní odebírání vlhkosti vzduchu vede k snížení jeho teploty a latentního tepla. [24]

Vysoušedlo je látka, která má schopnost pohlcovat a udržovat vlhkost vzduchu. Rozděluje se podle typu na pevné a kapalné. Jako pevné látky jsou běžně používány polymery nebo pórovité materiály jako silikonový gel, zeolit nebo molekulární síta. Kapalné vysoušedla jsou např. LiCl nebo CaCl. Tento systém se skládá ze čtyř částí: zdroj tepla, rotační odvlhčovač, tepelný výměník, a chladící jednotka. Postavení těchto částí v systému může mít více variant v závislosti na vlastnostech chlazení. Příkladem jsou obrázky 8 a 9. Navíc je možno toto chlazení provozovat v kombinaci s jiným chladicím systémem, například chlazením pomocí kompresoru. Pokud jsou tyto dva systémy zkombinovány, vede to k vyšším účinnostem chlazení. [24; 25]



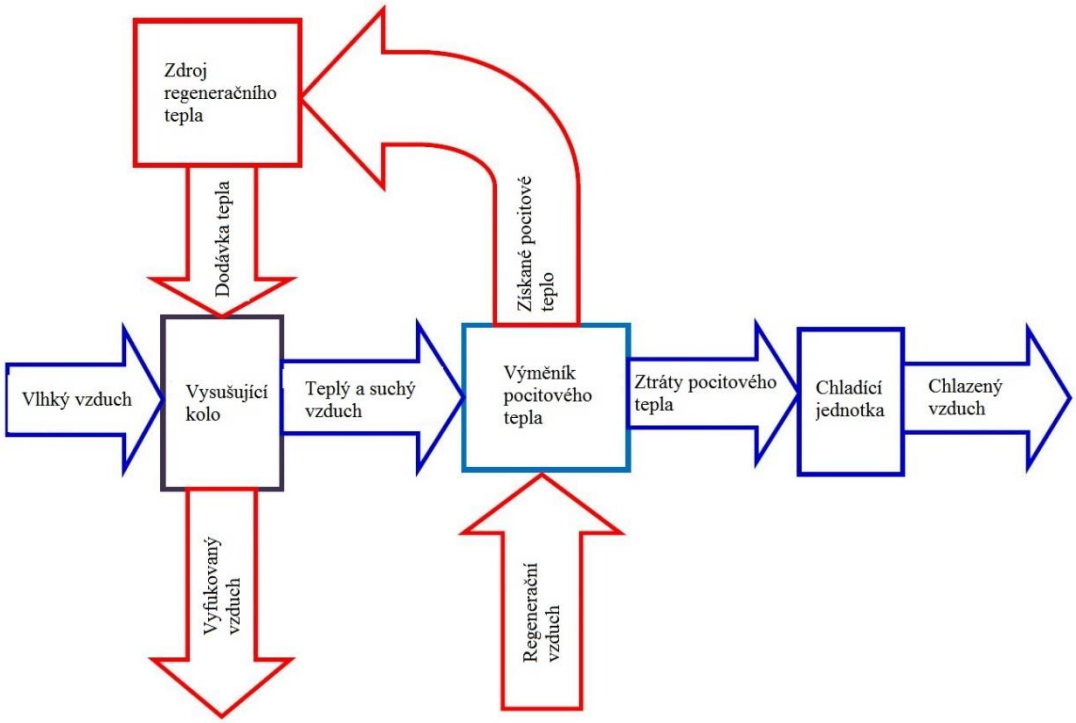
Obr. 8 Dunklův cyklus desikačního chlazení [24]



Obr. 9 Pennington cyklus desikačního chlazení [24]

Schéma zařízení je ukázáno na obr. 10. Vlhký vzduch prochází odvlhčovacím kolem, kde je mu odebírána vlhkost a zvětšena teplota. Rotační kolo musí být během procesu regenerováno, aby mohl cyklus pracovat nepřetržitě. Proto jsou z odvlhčovače odstraňovány vodní výpary tak, že se kolo zahřeje na svoji regenerační teplotu, která je závislá na typu odvlhčovače. Po průchodu rotačním kolem je odvlhčený vzduch předchlazen tepelným výměníkem a vstupuje do chladící jednotky, kde je dále chlazen. Po dosažení požadované teploty vstupuje do místnosti, kterou je třeba chladit. V další části je veden vzduch přes tepelný výměník, kde se dostává do nepřímého kontaktu s chladícím vzduchem, který chladí a sebe předehřívá. Po té míří do ohřívače, kde je mu

dodáváno teplo a zvětšována teplota. Z ohřívače je veden přes odvlhčovací kolo, které zahřívá a odstraňuje z něj vodní výpary, a následně je vyveden zpět do okolí. [24]



Obr. 10 Obecný princip desikačního chlazení [24]

Pevné odvlhčovače jsou používány spíše v komerčních klimatizacích a ventilačních systémech, kapalné odvlhčovače jsou používány v průmyslových a rezidenčních místech. Tento typ chlazení je ideální pro využití odpadního tepla, jelikož spotřebovává teplo pro regeneraci odvlhčovačů. [17]

Solární systémy se velmi hodí pro použití v kombinaci s desikačním chlazením pro klimatizace, jelikož regenerační teplota odvlhčovacích kol je v rozmezí 45 až 90 °C, což zhruba odpovídá produkci tepla solárních jednotek. Jedním z použití je desikační chlazení poháněné teplem ze solárních panelů v technologickém centru v Riesa v Německu. Solární panely mají pracovní plochu 20 m^2 a chlazená místnost má 330 m^3. Systém může pracovat na několik provozních způsobů, přičemž generuje teploty mezi 50 až 70 °C. Maximální chladící kapacita systému je 18 kW a COP = 0,6. Další použití je možné najít v [26], s tím, že chladící výkony se pohybují od několika kilowatt až po desítky kilowatt s hodnotami COP okolo 0,8.

Jelikož solární energie závisí hodně na počasí a umístění a produkce solárních panelů neprodukuje spolehlivé a stabilní dodávky tepla, instalují se tyto zařízení hlavně

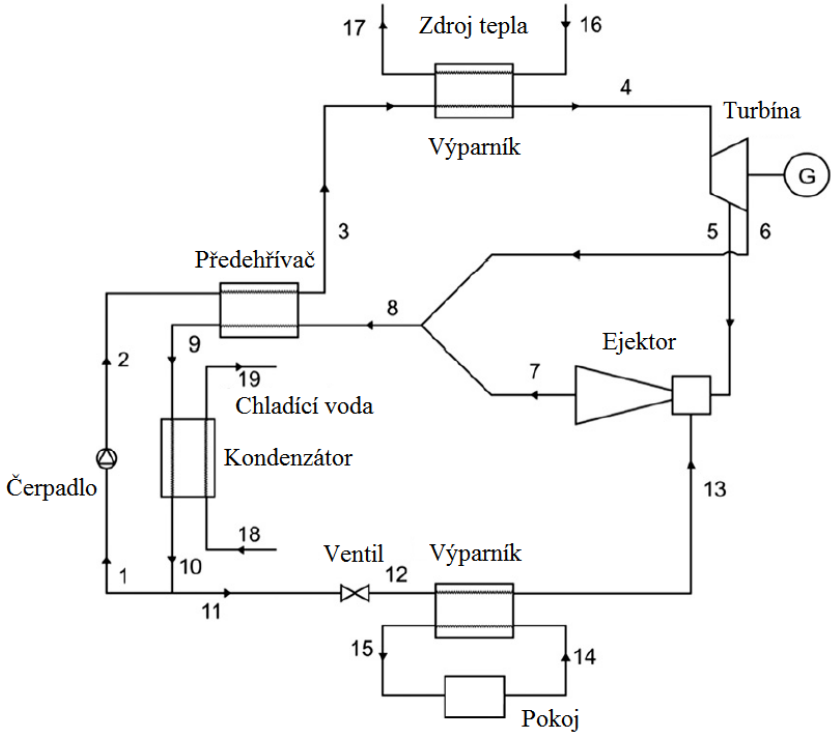
v kombinaci s odpadním teplem z elektráren či jsou napojeny na CZT. Tyto aplikace zažívají vzestup v oblastech s velmi vlhkým vzduchem. Jsou umísťovány například do supermarketů, sportovních arén, divadel a nemocnic. [26]

Vysušovací chlazení s kapalnými odvlhčovači je stálé spíše ve stavu zkoumání a testování a v komerční sféře není moc rozšířené. [20]

Desikační chlazení šetří vstupní energii, je ekologické a vhodné pro komerční a rezidenční budovy. Tento druh chlazení má velký potenciál pro zlepšení výkonu a spolehlivosti a proto zlepšování této technologie bude hrát velkou roli pro budoucí komerční použití. Zlepšení musí být zejména v oblastech zlevnění materiálů, vyšší odjímání vlhkosti ze vzduchu a stability na dlouhou dobu. [24]

4.4. Chlazení ejektorem

Začátek cyklu je stejný, jako u klasické parní elektrárny (obr. 15). Látka je stlačena a pumpována do výměníku (ze stavu 1 o stavu 2-3), kde získává teplo. Výměník je poháněn nějakým nízko-tepelným zdrojem. Ohřátá pracovní látka pak míří do expandéru (stav 3), v tomto případě do turbíny a expanduje. Tím vytváří mechanickou práci, která je generátorem přeměněna na elektřinu. Z turbíny míří primární látka do ejektoru, kde dochází k další expanzi (stav 4´). Tlak primární látky těsně za turbínou má trochu větší hodnotu než u klasických ORC zařízeních z důvodu přivedení páry z výparníku do ejektoru. Ve směšovací komoře ejektoru se pak míchá se sekundární látkou, která jde z výparníku, za konstantního tlaku. Při obnovení tlaku v difuzoru látka opouští ejektor a je vedena do kondenzátoru (stav 5), kde odevzdává teplo chladicí kapalině, což je většinou voda, pocházející z řek, jezer, přehrad apod. Po výstupu z kondenzátoru je látka rozdělena na dva proudy. Jeden míří zpět do kompresoru (stav 1) a je veden do výměníku, což uzavírá první cyklus. Druhý proud jde do škrtícího ventilu, který mu zajistí výparný tlak (stav 6). Následně ve výparníku produkuje chlad absorpcí tepla ze studené vody a míří zpět do ejektoru (stav 7). [27]



Obr. 11 Schéma chlazení pomocí ejektoru [27]

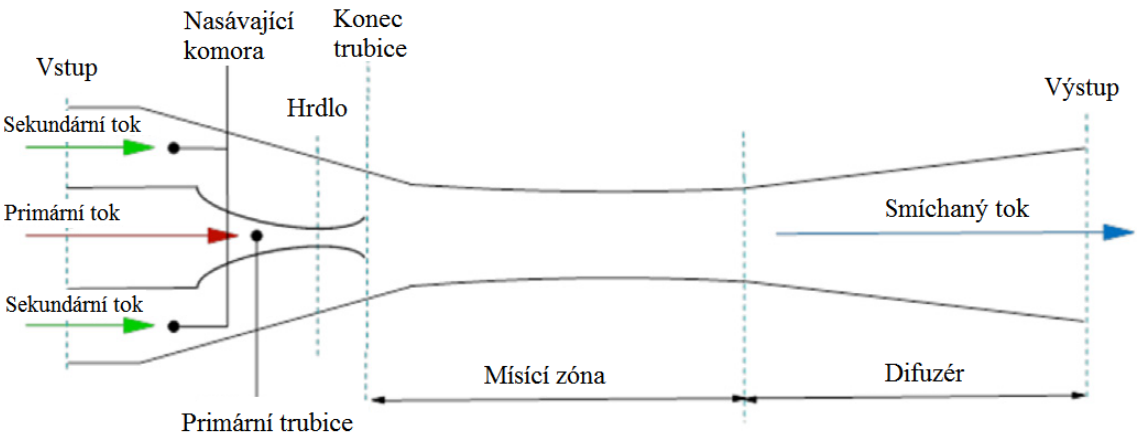
Při výběru pracovní látky je kladem důraz na termodynamické vlastnosti látky. Látka by měla mít vysoké skupenské teplo vypařování, vysokou kritickou teplotu a molární hmotnost. Důležitá je také viskozita a tepelná vodivost. Dále je pak sledován vliv na výkon cyklu, cena, dopad na životní prostředí a bezpečnost. [28] Většina pracovních látek ORC plní dobře roli chladiva v cyklu ejektoru. Studie Maizza and Maizza [29] ukazuje, že pracovní látka, která má kritickou teplotu nižší než 385 K není pro ORC vhodná. Je to z toho důvodu, že kdyby byla menší, byl by ve výměníku příliš velký tlak, což by sebou přineslo negativní dopady. Vypařovací bod by měl být okolo atmosférické teploty, aby tlaky ve výparníku a kondenzátoru nebyly velké. Čím jsou vyšší tlaky v celém systému, tím je kladena větší náročnost na zařízení a těsnění proti vytékání pracovní látky. [27]

Studie [30] pracovala s kombinací ORC a ejektorového chladícího cyklu s přidáním turbíny mezi tepelný rekuperátor, výparník a ejektor. Jsou zde zkoumány termodynamické vlastnosti, vliv na výkon a ztráty exergie. Největší ztráty exergie jsou ve výměníku, pak ejektoru (5,3 %) a pak v turbíně (5,07 %). Celková ztráta exergie je 72,5 % (26,3 % kvůli nevratnosti komponentů a 46,15 % kvůli výměníku a kondenzátoru). Ztráty ve výměníku jsou z důvodu přenosu tepla mezi konečným

teplotním rozdílem. To se dá částečně zlepšit zvětšením plochy pro přenos tepla. Ztráty v ejektoru jsou z důvodu tření v částech ejektoru.

Analýza ejektorového chlazení [28] studovala různé technologie chlazení pomocí ejektoru. Výsledkem je, že chlazení ejektorem v kombinaci s kompresorem jsou porovnatelné s konvenčními způsoby výroby chladu a mohou pracovat při teplotách pod 60 °C.

Výroba chladu pomocí ejektoru je vhodná kvůli spolehlivosti dodávek energie, nízkým nárokům na údržbu a nízkým investičním a provozním nákladům. Chlazení ejektorem není zatím běžně komerčně využívané, jelikož má nízký koeficient výkonu a vysokou degradaci výkonu, pokud nepracuje za ideálních navrhnutých podmínek. [28] Množství studií zabývající se tímto tématem je velká řada a tak lze očekávat budoucí pokrok této technologie.



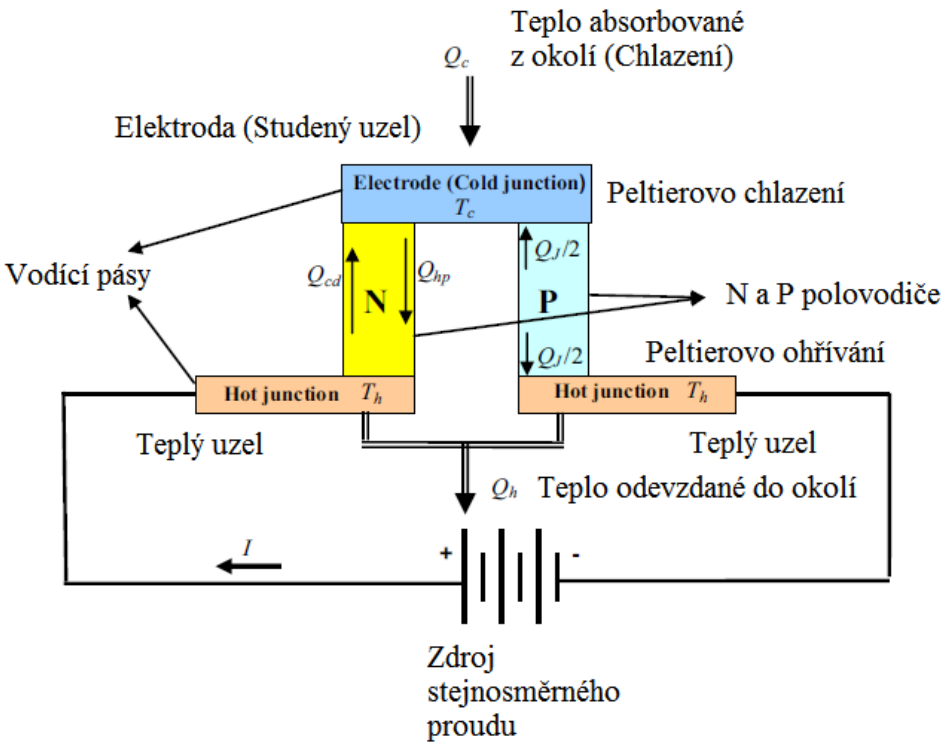
Obr. 12 Struktura ejektoru [28]

4.5. Termoelektrické chlazení

Termoelektrické chlazení je založeno na termoelektrickém jevu. Pro chlazení se využívá zejména Peltierův jev, který je obrácený k Seebeckově jevu. Peltierův jev popisuje vznik rozdílu teplot mezi dvěma odlišnými vodiči, kterými prochází stejnosměrný proud. V závislosti na směru proudu pak jeden vodič teplo uvolňuje a druhý pohlcuje. [13; 31]

Ze zdroje (DC SOURCE) na Obr. 11 teče stejnosměrný proud skrz N polovodič do P polovodiče a elektrony opačným směrem. Teplota T_c chladného uzlu se snižuje a je mu dodáváno teplo Q_c z okolí. Tento proces nastává, když elektrony prochází z P polovodiče v nižším energetickém stavu do N polovodiče s vyšším energetickým

stavem skrz studený uzel. Mezitím elektrony převádí absorbované teplo Q_h do teplého uzlu o teplotě T_h. Toto teplo Q_h je odevzdáno do okolí a elektrony se vrací na nižší energetický stav do P polovodiče. [32]



Obr. 13 Schéma chlazení pomocí termoelektrického jevu [32]

Schopnost materiálů chladit je měřena pomocí parametru Z. Parametr Z závisí na vlastnostech materiálu a absolutní teplotě. Dále roste se snižováním elektrického odporu a tepelné vodivosti. Za běžných podmínek ale tepelná vodivost a elektrická vodivost spolu přímo úměrně souvisí a tak je obtížné ho navyšovat. Bohužel zatím žádný z materiálů není schopen dosáhnout takových požadavků, které by se dali alespoň přirovnat ke kompresnímu chlazení kromě použití v menších aplikacích v řádech několika wattů. [13]

Diana Enescu a Elena Virjoghe [32] zkoumali výkon a vlastnosti termoelektrického chlazení. Z jejich studie bylo zjištěno, že termoelektrické chlazení při běžném domácím chlazení má hodnotu COP_e pod 0,5 pro rozdíl teplot polovodičů 20 K a víc. Proto nejsou tyto zařízení konkurenceschopné v porovnání s běžnými chladicími zařízeními jako třeba kompresní chlazení, u kterého dosahuje hodnota COP_e přes 2,5.

Jejich potenciál ale roste vzhledem k tomu, že mají dobře řiditelné vlastnosti. Částečnou zátěž systému při menších nárocích na výkon lze snadno měnit pomocí

proudu. Další výhodou je, že nejsou hlučné a jsou šetrné k životnímu prostředí. Mohou být taky použitelné v případech, kde je třeba měnit výrobu chladu a tepla, jelikož směr proudu zajišťuje výsledný produkt cyklu. [32]

Termoelektrické chladící zařízení jsou složeny z několika článků, které jsou například paralelně spojeny. Některá tato zařízení jsou dostupná na [33], kde obvyklé chladící výkony jsou do 300 W, lze najít ale i zařízení s výkonem 650 W pro medicínské a armádní účely. Velikost pro zařízení s výkonem 352 W je 55x55x3,7 mm. Obvyklá Carnotova účinnost zařízení je okolo 10 %, rozdíl teplot je až 70 K.

Termoelektrické chlazení v kombinaci s chlazením vzduchem nebo vodou jsou pro chlazení elektronických součástek velmi vhodné, jelikož májí malou velikost, tichý chod a spolehlivost. Elektronické přístroje jako počítač mají součásti, které se při provozu zahřívají a produkují tak velké množství tepla. Tyto součástky je třeba chladit, aby mohly spolehlivě fungovat. Výkon chladiče elektronické součástky je závislý hlavně na tepelné vodivosti mezi chladičem a okolním vzduchem. [34]

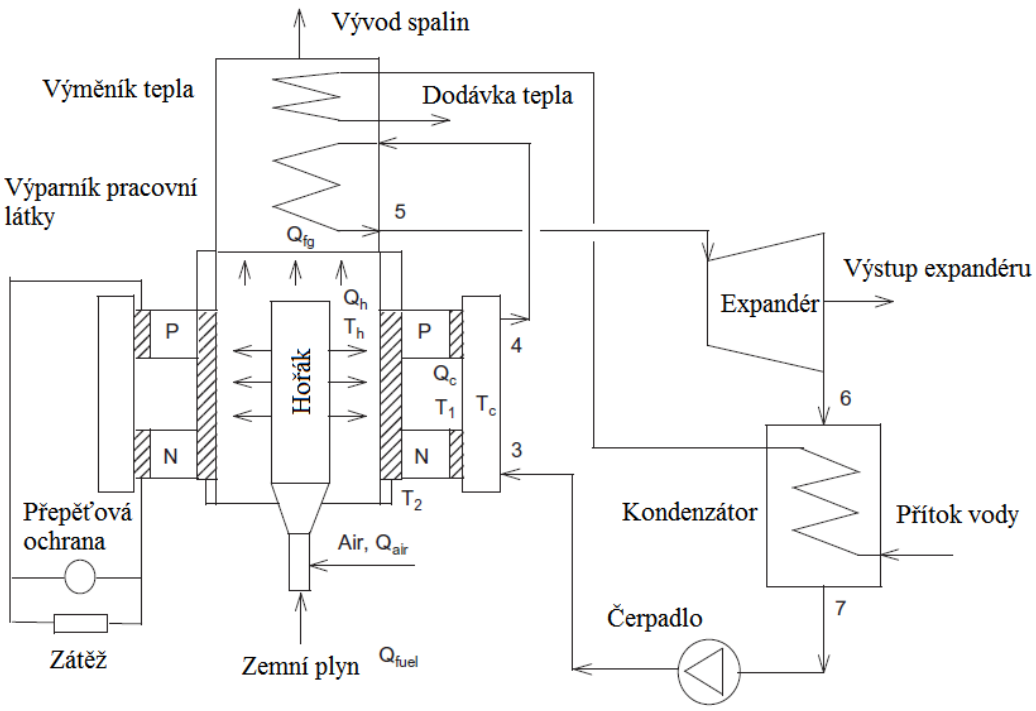
Chlazení v automobilech:

Při chlazení vzduchu v autech se v dnešní době nejčastěji používá chladící látka R-134a. Ta sice nemá dopad na ozonovou vrstvu, ale při úniku látky do okolí může mít negativní dopad na životní prostředí. Termoelektrické chlazení se svoji výhodou snadného přepínání mezí chlazením a ohříváním může být dobrou náhradou do automobilových klimatizací. [34]

Aplikace v potravinářství:

Jejich chladící výkon se pohybuje od několika wattů až po desítky kilowatt. Jsou dostupné pro menší ledničky, karavany, auta, chladiče vína a přenosné chladící zařízení. Studie [35] provedla zkoumání výkonu chlazení většího prostoru (115 l - 250 l) a dosáhla hodnoty COP_e = 1,2. [36]

Termoelektrické chlazení zatím zůstává v použití pouze v chlazení určitých elektronických zařízení, vojenských a vesmírných aplikací, popřípadě ve zdravotnictví. Je to ale perspektivní technologie a tak výzkum materiálů pro tento druh chlazení stále pokračuje. [4]



Obr. 14 Schéma spojení termoelektrického jevu a ORC k produkci elektřiny a tepla [37]

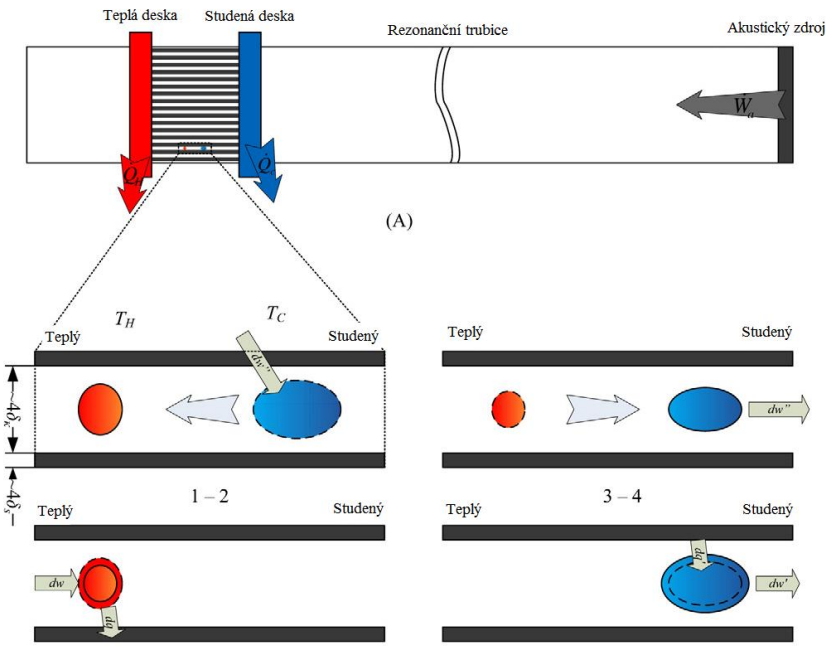
4.6. Termoakustické chlazení

Termoakustické chlazení je založeno na přeměně akustické energie na termální energii. Zařízení jsou umístěny v zapečetěné nádobě o konstantním tlaku a obsahují akustický generátor, který vyzařuje akustickou energie do rezonanční porézní nádoby. Ta produkuje chlad při nízké teplotě a odevzdává teplo chladiči. Teplé a studené výměníky v rezonátoru jsou umístěny tam, kde oscilační výkyvy pracovního plynu jsou nulové. Tyto výměníky jsou nastaveny do směru toku plynu. Desky mají vysokou tepelnou kapacitu, jsou také nastaveny toku plynu v rezonátoru a podporují tepelné toky mezi dvěma výměníky. [38; 13]

Stojaté vlnění přenáší určitý shluk plynu doleva a doprava a mezí tím ho stlačuje a rozpíná. Během toho co plyn osciluje mezi deskami, mění svoji teplotu. Určitý shluk plynu je stlačen, jeho teplota v důsledku stlačení vzroste a je vyšší než teplota desek. Z toho důvodu shluk plynu neodebírá teplo z desek. Podobně je tomu u jiného shluku, kde je plyn rozpínán a má menší teplotu než desky. Proto z desek odebírá teplo a přenáší ho z leva doprava s každým cyklem akustické vlny. Všechny ostatní shluky se chovají stejně. Absorbují energii ze stojatého vlnění a tím se stlačují a rozpínají, což vede k přenosu malého množství tepla každým shlukem ze studeného do teplého výměníku.

Pro dosáhnutí chlazení musí být plyn spojen s externí látkou, která vede teplo skrz výměník. Energie stojatého vlnění je dodávána skrz zesilovač. [38]

Jedním z nejdůležitějších parametrů v termoakustickém chlazení je délka rezonátoru, která se obvykle pohybuje v rozmezí 10 cm až 10 m a definuje provozní frekvenci systému. Dalším důležitým parametrem je vzdálenost mezi deskami, která udává povahu termální interakce mezi deskami a proudícím plynem. [38]



Obr. 15 Schéma termoakustického chlazení [35]

První využití termoakustického chlazení bylo uskutečněno v roce 2004, kdy spolupráce Poesse, Garret a Smith z Pennsylvania State University a Ben & Jerry's zmrzlinová firma vytvořila zařízení o výkonu 119 W. Po té byla vytvořena další zařízení většinou ale o malých výkonech. Podle několika studií [35; 36; 39], ale není zatím k dispozici žádné zásadní komerční využití této technologie pro výrobu chladu.

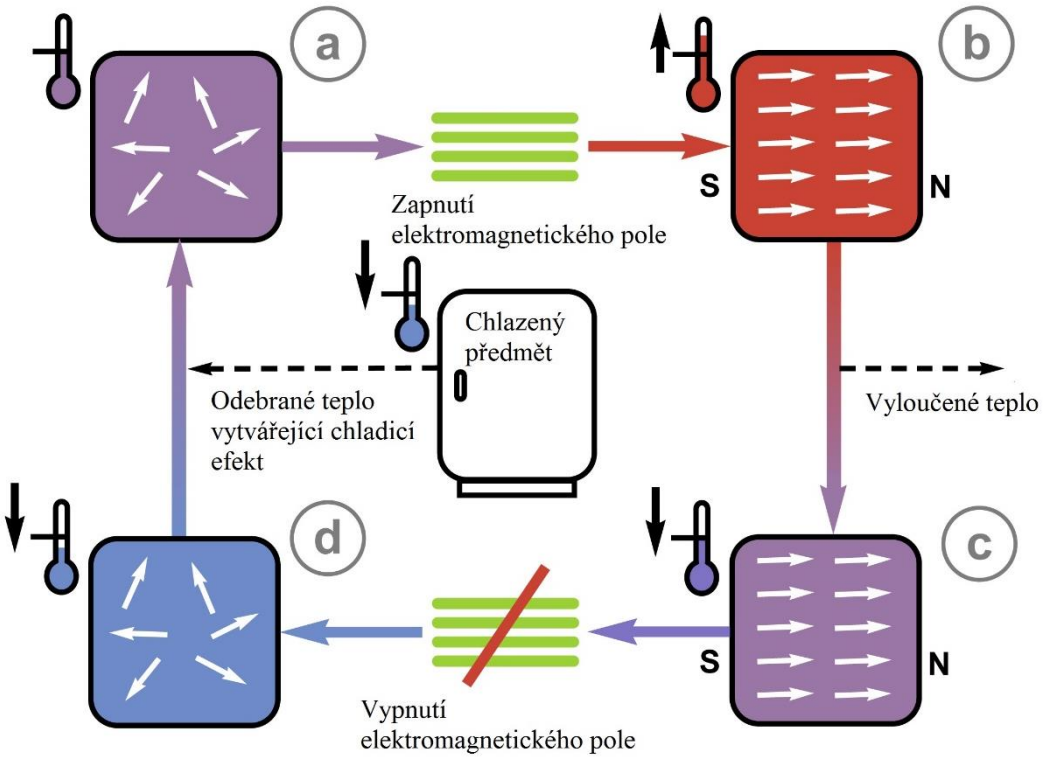
Ačkoliv se může termoakustický efekt zdát bezvýznamně malý, extrémně silným zvukem je možné vyprodukovat velké množství chladu. Tyto zařízení jsou ekologické, poměrně jednoduché, spolehlivé a nevyžadují vysoké investice. Důvody nezavedení na trh jsou nízká chladící kapacita, fyzická velikost, malá účinnost tepelného výměníku a tepelné vedení z tepelného výměníku do studeného výměníku. [13]

4.7. Magnetokalorické chlazení

Je založeno na magnetokalorickém efektu. Většina materiálů pracuje tak, že po přivedení magnetického pole k látce se začne ohřívat. Naopak pokud magnetické pole odebereme, začne se látka ochlazovat. Důležitou charakteristikou materiálů je Curieova teplota. To je teplota, kdy feromagnetické materiály ztrácí svůj trvalý magnetismus a stávají se paramagnetickými. Tento typ chlazení má největší efekt při teplotách blízkým Curieově teplotě. Pro chlazení je nevhodnější Curierova teplota blízká teplotě chlazené místnosti. Takový materiál je například gadolinium, který se často v těchto systémech využívá. [13]

Nejdůležitější součástí magnetického systému je magnetokalorický materiál (MCM). Pracovní látka si při protékání vyměňuje teplo s MCM (často jako pórovitá vrstva). Cyklus má čtyři stupně podle obr. 16. V prvním stupni (index a) je pracovní látka v klidu, je zapnuto magnetické pole a dochází k zahřívání látky. Dále je látka v magnetickém poli dopravována ze studené strany na teplou stranu. Během toho získává teplo z MCM a její teplota roste (index b). Dále pak míří do tepelného výměníku, kde odevzdává absorbované teplo do okolí a snižuje svoji teplotu (index c). V další fázi je magnetické pole vyrušeno a tok pracovní látky zastaven, což vede ke chlazení látky (index d). V poslední fázi je pracovní látka pumpována do chlazeného předmětu, kde vytváří chladicí efekt a končí zpět na začátku (index a). [40; 41]

JACOBS, S a další [40] provedl studii systému založeném na NdFeB magnetu s maximálním polem 1,44 T, který rotuje okolo 12 desek umístěných okolo obvodu kola. Každá deska má čtyři výstupy, teplý a studený vstup a teplý a studený výstup. Čtyři rotační disky regulují průtok pracovní látky a jsou spojeny s rotační části magnetu. Největší produkce systému je 3 kW při nulovém teplotním rozdílu. Při teplotním rozdílu 11 K je produkce 2,5 kW s COP_e = 1,9. Toto zařízení vytvořila Astronautics Corporation of America a je určeno k dodatečnému chlazení kritických komponent na lodi. Studie [41] zkoumala několik magnetických materiálů v porovnání s parním kompresním chlazením. Výsledky ukazují, že materiál $Gd_5Si_2Ge_2$ má vyšší hodnotu COP než parní kompresní chlazení, při stejných pracovních podmínkách. Studie také zjistila, že má o 40% nižší skleníkový efekt.



Obr. 16 Schéma magneticko-kalorického chlazení [42]

Pro větší komerční využití magnetokalorického chlazení musí být podniknuto více studií a zkoušek a hlavně vytvořeny nové materiály a koncepční návrhy. Je třeba hlavně zlepšit hysterezi, vazba na externí teplonosnou látku, vnitřní vodivost, a vysoké tlakové spády skrz regenerační látky. Magnetokalorické chlazení může produkovat chlad při větší účinnosti než kompresní chlazení. Navíc zde nejsou použity žádné skleníkové a ozonovou vrstvu ohrožující plyny, takže je poměrně ekologické. [13]

5. Porovnání technologií

Dnes je komerčně nejrozšířenější způsob výroby chladu pomocí kompresoru. Má velmi širokou oblast použití a je z hlediska výroby chladu nejvýhodnější. Základním prvkem je kompresor, který je poháněn elektrickou energií. V „Přehled technologií chlazení“ jsem uvedl některé další způsoby výroby chladu poháněné hlavně elektrickou energií. Ty ale do porovnání nezahrnuji kvůli jejich počáteční fázi vývoje a dosavadním neuplatnění se na trhu. Jako alternativní způsoby výroby chladu jsou dále technologie využívající primárně teplo. Z těchto alternativních možností výroby chladu je nejrozšířenější jednostupňové a dvoustupňové absorpční chlazení. Ostatní způsoby výroby chladu jsou mnohem méně dostupné nebo se pohybují spíše v teoretické a experimentální oblasti. [14]

Proto jsem pro porovnání vybral výrobu chladu pomocí kompresoru a absorpčního chlazení. Porovnání jednotlivých technologií podle vybraných aspektů jsou uvedeny v tab. 1.

	Kompresorové chlazení	Absorpční chlazení	
Parametr		Jednostupňové	Dvoustupňové
COP	3	0,65 - 0,8	1,1 - 1,4
Spotřeba elektrické energie[1]	cca 30 %	5%	5%
Pracovní látky	R 710, R 717, R 404a, a další	Voda - NH3, Voda - LiBr	
Teplota zdroje tepla	-	80 - 120 °C	120 - 170 °C
Rozměry	Malé	Velké	Velké
Hmotnost	Nízká	Velká	Velmi velká
Nároky na investice	Nízké	Vysoké	Vysoké
Životnost	Nízká	Vysoká	Vysoká
Nároky na servis	Malé	Velmi malé	Velmi malé
Nároky na obsluhu	Žádné	Žádné	Žádné
Hlučnost	Střední	Nízká	Nízká
Spotřeba chladící vody	U absorpčního chlazení je min. o 30 % větší		

Tab. 1 Porovnání kompresorového a absorpčního chlazení [14; 43; 44]

Zásadní rozdíl obou technologií je v chladicím faktoru COP, který je popsán v kapitole 4. COP u obou způsobů výroby chladu se liší v druhu energie, která pohání chladicí jednotku. U kompresorového chlazení je to tedy elektrická energie a u absorpčního je to hlavně tepelná energie, přičemž malá spotřeba elektrické energie

[1] Procentuální spotřeba elektrické energie k vyrobenému množství chladu

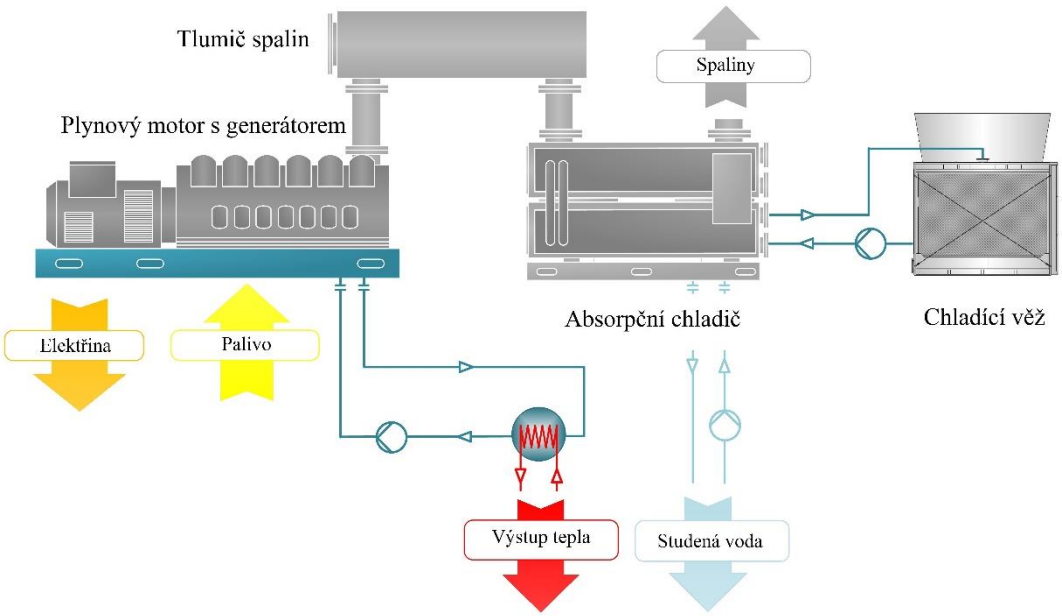
absorpční jednotky se při výpočtu čísla COP většinou zanedbává. Jak ukazuje tab. 1, spotřeba elektrické energie absorpční jednotky je okolo 5% vyrobeného chladícího výkonu.

Investiční nároky na instalaci absorpčních chladících zařízení jsou poměrně vysoké, což je z důvodu vysokých nároků na materiál a samotnou technologií. Proto je z ekonomického hlediska počáteční investice do absorpčních jednotek mnohem vyšší než u kompresorových. V průběhu provozu, ale dochází k návratnosti investice, vzhledem k vyšší životnosti absorpčních jednotek a případnému využití odpadního tepla místo elektrické energie. [43]

I když mají kompresorové chladicí jednotky většinový podíl na trhu, existuje snaha o vytvoření alternativy. Je to z důvodu, že chlazení pomocí kompresoru s sebou nese riziko ohrožení životního prostředí v případě úniku některých chladiv. Dále může vést k přetížení elektrických sítí v horkých letních měsících. Naopak proti tomu absorpční chlazení je vhodné k zapojení do třígeneračních jednotek k maximalizaci ročního využití kogeneračních zdrojů energie. [43]

6. Energetická bilance

V této části jsem provedl základní bilanční výpočet trigenerační ORC jednotky a porovnal jsem ho s klasickou výrobou elektřiny, tepla a chladu. Parametry ORC jednotky jsou založené na zařízení, které se nachází v UCEEB a které mi poskytl Ing. Jakub Maščuch Ph.D. Schéma principiálně podobného zařízení je na obr. 17. Hlavní rozdíl je ten, že místo plynového motoru s generátorem je v jednotce navržen výparník s expandérem.



Obr. 17 Trigenerace s absorpčním chlazením [45]

Pro výpočet bylo provedeno několik zjednodušujících předpokladů. Zanedbal jsem spotřebu elektrické energie absorpční jednotkou, kterou spotřebovává čerpadlo a chladicí věž. Je to z toho důvodu, že spotřeba elektrické energie je vzhledem k spotřebě tepelné energie a produkovaného chladu velmi malá. Jak je uvedeno v tab. 1, spotřeba elektrické energie se pohybuje okolo 5 % vyrobeného chladu. Dále jsem v bilanci zanedbal vlastní spotřebu elektrické energie parního kotle, tj. zejména napájecího čerpadla před kotlem a tepelné ztráty sáláním celého kogeneračního cyklu.

Výpočet jsem provedl tak, že jsem přivedl na vstupu do ORC jednotky 1000 kWh energie paliva a vypočetl výstupní hodnoty vyrobené elektřiny, tepla a chladu. Jednotku kWh jsem vybral z důvodu dalšího porovnání. Účinnost kotle je stanovena na 85%. Dále dochází vnitřní výměně tepla mezi kotlem a napájecím čerpadlem a proto se výstup z kotle stanoví:

$$Q_{výkon\,k} = Q_{pal} \cdot 0{,}85 = 1\,000 \cdot 0{,}85 = 850\ kWh$$
$$Q_{výst\,k} = Q_{výkon\,k} + Q_{vstup\,k} = 850 + 20 = 870\ kWh$$

Q_{pal} – teplo v palivu

$Q_{výst\,k}$ – výstup kotle

$Q_{výkon\,k}$ – výkon kotle

$Q_{vstup\,k}$ – vstup kotle

Z kotle tedy míří do turbíny 870 kWh tepelné energie. U expandéru je stanovena účinnost výroby elektrické energie na 3 % z vstupu do turbíny a elektrická energie vypočte:

$$P_e = Q_{výst\,k} \cdot 0{,}03 = 870 \cdot 0{,}03 = 26{,}1\ kWh$$
$$Q_{e\,t} = Q_{výst\,k} - P_e = 870 - 26{,}1 = 843{,}9\ kWh$$

P_e – vyrobená elektrická energie

$Q_{e\,t}$ – teplo obsažené v emisní páře z turbíny

$Q_{adm\,t} = Q_{výst\,k} -$ admise turbíny

Z tepla obsaženého v emisní páře z expandéru je polovina určena k výrobě chladu a druhá polovina k výrobě tepla. Teplo z turbíny se tedy rozděluje v poměru 1:1. Zvolil jsem střední poměr, jelikož přesné množství tepla určené k výrobě tepla a chladu závisí na ročním období, konkrétním místu použití jednotky a dané spotřebě uživatele.

Pro výrobu chladu v ORC jednotce jsem zvolil dvoustupňovou absorpční jednotku s pracovními látkami voda a LiBr. Hodnota COP takovéto jednotky se podle mnoha zdrojů uvedených výše pohybuje okolo 1,1 až 1,4, a proto jsem zvolil hodnotu COP = 1,3. Výkon absorpčního cyklu je vypočten:

$$Q_r = Q_{e\,t} \cdot 0{,}5 - Q_{em\,ch} = 843{,}9 \cdot 0{,}5 - 10 = 411{,}95\ kWh$$
$$Q_{ch} = Q_r \cdot COP = 411{,}95 \cdot 1{,}3 = 535{,}54\ kWh$$

Absorpční jednotka tedy produkuje 535,54 kWh chladu a vyloučí přes kondenzátor a absorbér do okolí teplo:

$$Q_k + Q_{ab} = Q_r + Q_{ch} = 411{,}95 + 535{,}54 = 947{,}5\ kWh$$

Q_r – teplo na vstupu do regenerátoru

Q_{ab} – teplo vyloučené absorbérem

Q_k – teplo vyloučené kondenzátorem

Q_{ch} – chladicí výkon

$E_{em\ ch}$- emise absorpčního cyklu

Pro výrobu tepla a horké vody je poskytnuto stejné množství tepla, jako je přivedeno na výrobu chladu. Tepelný výkon výměníku je roven:

$$Q_{vin} = Q_{tt} \cdot 0{,}5 = 843{,}9 \cdot 0{,}5 = 421{,}95\ kWh$$
$$Q_t = Q_{vin} - Q_{vout} = 421{,}95 - 10 = 411{,}95\ kWh$$

Q_t – tepelný výkon výměníku tepla

Q_{vin} – teplo na vstupu do výměníku

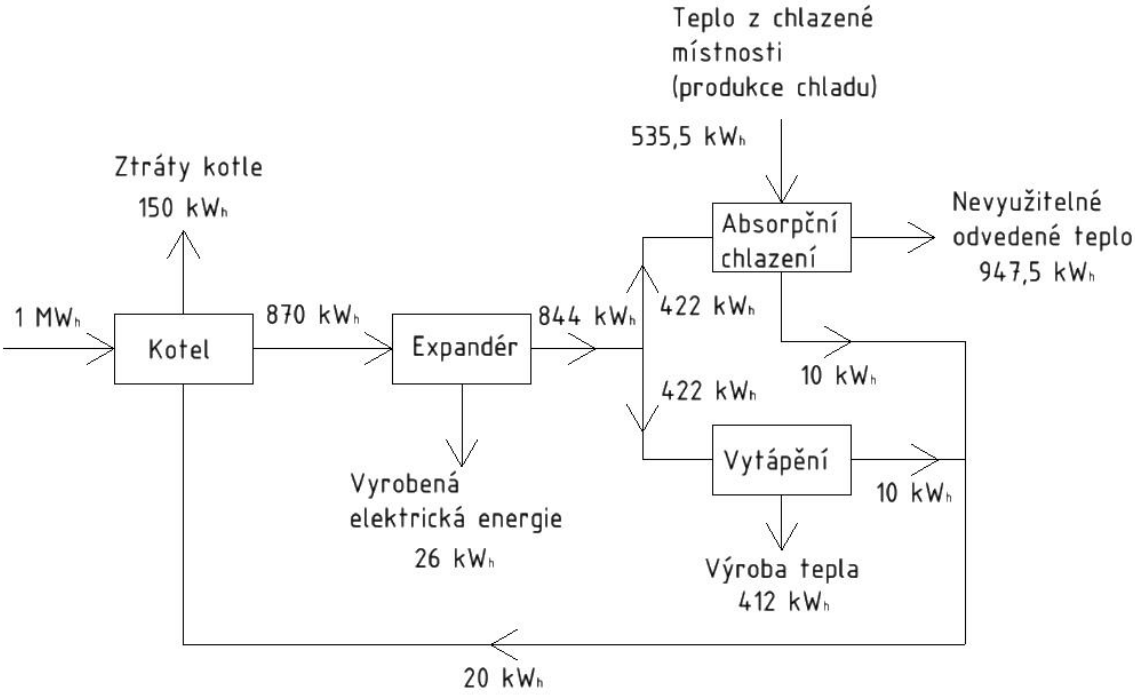
Q_{vout} – teplo na výstupu z výměníku

Celková vyrobená energie trigenerační jednotky:

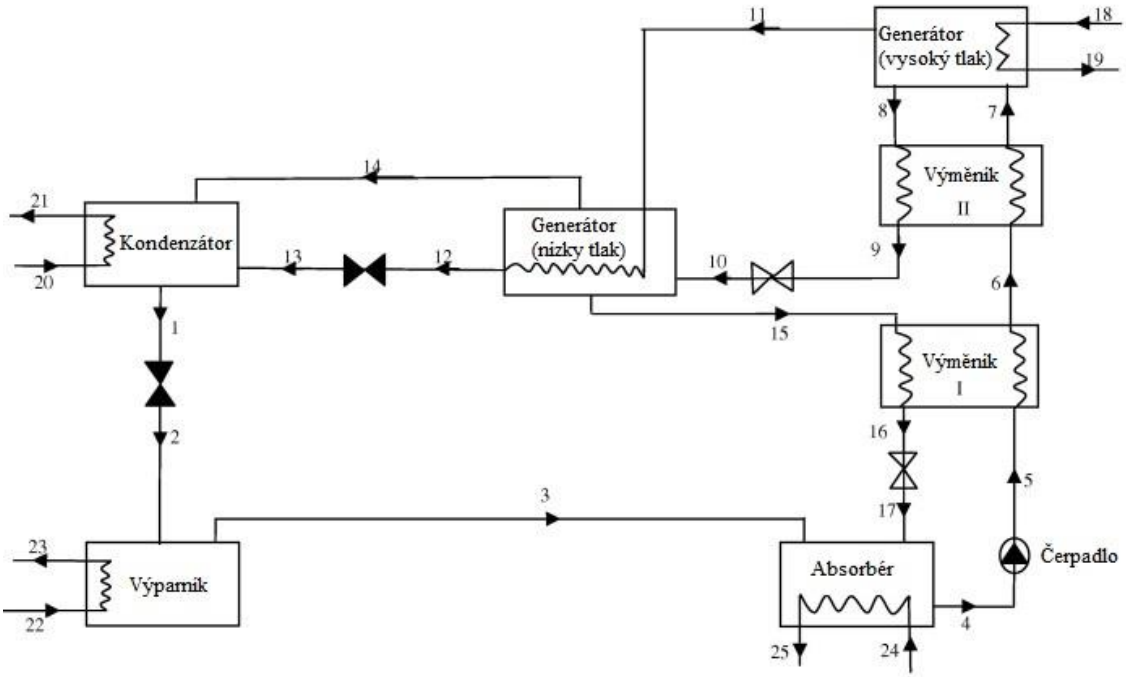
$$Q_{c1} = P_e + Q_{ch} + Q_t = 26{,}1 + 535{,}54 + 411{,}95 = 973{,}6\ kWh$$

Celková bilance trigenerační jednotky se zaokrouhlenými hodnotami je zakreslena na obr. 18. Vyprodukovaná energie trigenerační jednotkou je vyšší, než energie dodaná na vstupu. To je z důvodu využití nízkopotenciálního tepla z okolí, které je ve výparníku využito k výrobě chladu.

Množství tepla odvedeného z absorbéru a chladicí věže bylo zvoleno odhadem, jelikož jejich stanovení vyžaduje složitějšího výpočtu. Toto teplo je odvedeno do okolí a není dále využitelné z důvodu malého teplotního rozdílu mezi okolní teplotou a teplotou chladicí kapaliny.



Obr. 18 Energetická bilance v částech jednotky



Obr. 19 Schéma dvoustupňové absorpčního chlazení [46]

Dále jsem vypočetl vstupní energii paliva, která by byla potřeba k vyprodukování stejného množství elektřiny, tepla a chladu klasickým způsobem jako v trigenerační jednotce. Pro výrobu elektřiny jsem zvolil elektrárnu s účinností výroby elektrické energie 30%. Tato hodnota byla zvolena jako běžná hodnota účinnosti v dnešních elektrárnách. [47] Pro výrobu tepla jsem zvolil výtopnu, u kterých se hodnota účinnosti výroby tepla může pohybovat až 90%. [48] Proto jsem zvolil hodnotu účinnosti výroby tepla 85%. Chlad bude vyráběn pomocí kompresoru, což je v dnešní době nejběžnější metoda výroby chladu. Podle [49] je hodnota COP pro dostupné elektrické chladiče okolo 3 a proto byla zvolena hodnota COP = 3.

Spotřeba paliva v elektrárně na výrobu elektrické energie se vypočte z:

$$Q_{pe} = \frac{P_e}{30\ \%} = \frac{26{,}1}{30\ \%} = 87\ kWh$$

Q_{pe}- spotřeba paliva elektrárny

Spotřeba paliva ve výtopně na výrobu tepla se vypočte z:

$$Q_{pv} = \frac{Q_t}{85\ \%} = \frac{411{,}95}{85\ \%} = 485\ kWh$$

Q_{pv}- spotřeba paliva výtopny

Pro výrobu chladu je použit kompresor, který je poháněn elektrickou energií. Proto je potřeba do spotřeby kompresoru započítat také účinnost elektrárny pro výrobu elektrické energie z paliva. Pokud budeme brát účinnost elektrárny 30 % zmíněných výše, bude výpočet pro chlazení kompresorem vypadat:

$$Q_{re} = \frac{Q_{ch}}{COP} = \frac{535{,}54}{3} = 179\ kWh$$

$$Q_{pch} = \frac{Q_{re}}{30\ \%} = \frac{183}{30\ \%} = 595\ kWh$$

Q_{pch}- spotřeba paliva elektrárny

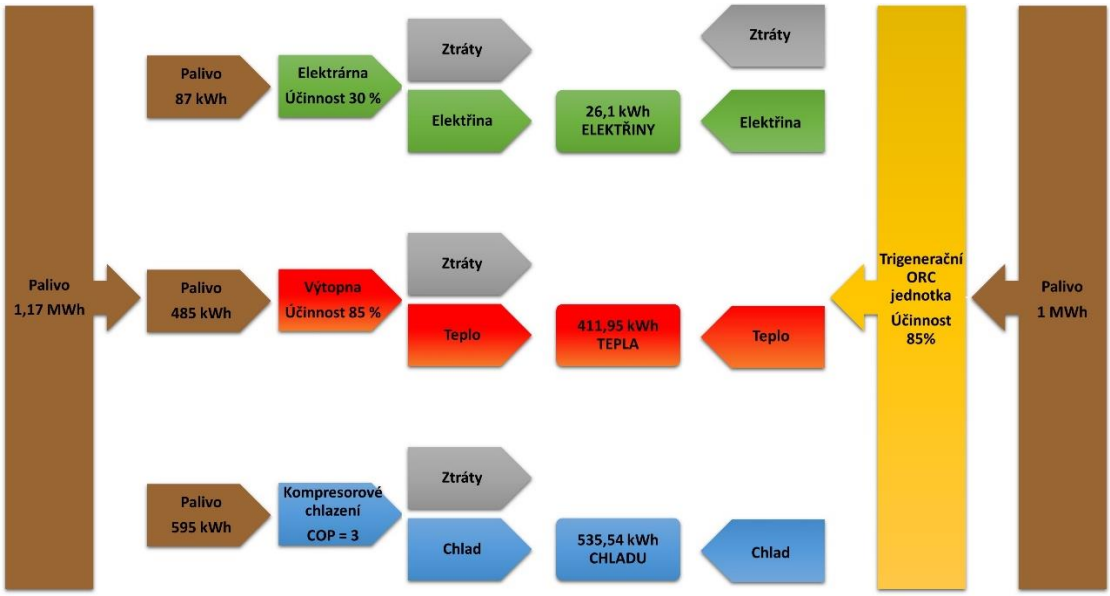
Q_{re}- spotřeba elektrické energie kompresoru

Kompresor tedy k výrobě 535,54 kWh chladu spotřebuje 183 kWh elektrické energie, na jejíž výrobu se spotřebuje 609 kWh paliva. Celková spotřeba paliva pro oddělenou výrobu elektřiny, tepla a chladu je vypočtena:

$$Q_{c2} = Q_{pe} + Q_{pv} + Q_{pch} = 87 + 485 + 595 = 1{,}17\ MWh$$

Výsledné vypočtené hodnoty jsou uvedena na obr 19. Je vidět, že ze vstupní energie 1 MWh vyrobí ORC jednotka 26,1 kWh elektřiny, 411,95 kWh tepla a 535,54 kWh chladu. Celkem tedy 973,6 kWh. Na druhou stranu oddělená výroba by ke stejnému vyprodukovanému množství potřebovala 1,17 MWh paliva. Úspora paliva je tedy:

$$U = 1 - \frac{Q_{c1}}{Q_{c2}} = 1 - \frac{1}{1{,}17} = 16\ \%$$



Obr. 20 Porovnání výroby elektřiny, tepla a chladu

7. Závěr

Tato rešerše poskytuje přehled komerčně používaných, ale i alternativních způsobů výroby chladu vhodných pro implementaci do ORC jednotky využívající princip trigenerace. Pozornost byla věnována hlavně tepelně aktivovaným chlazením jako absorpční, adsorpční a chlazení pomocí desikantů. Tyto typy chlazení jsou zatím nejvíce rozšířené hned po chlazení pomocí kompresoru, které drží většinový podíl v komerčních zařízeních na výrobu chladu. Z tepelně aktivovaných chlazení je nejvíce rozšířené jednostupňové a dvoustupňové absorpční chlazení, které má poměrně slušné hodnoty chladícího faktor COP a je vhodné pro využití v trigeneraci. Třístupňové absorpční chlazení stejně jako adsorpční chlazení a chlazení pomocí desikantů je zatím spíše ve stavu vývoje a komerčně je využíváno zřídka.

Ostatní zmíněné způsoby výroby chladu se pohybují spíše v teoretické a experimentální oblasti a nejsou komerčně rozšířené. Je to z několika individuálních důvodů jako nízká produkce chladu, či špatná účinnost. Mají ovšem potenciál být v budoucnu jednou z alternativních možností a jejich komerční průlom se dle různých studií odhaduje na deset a více let.

Na základě získaných informací bylo provedeno porovnání kompresního chlazení s nejperspektivnější technologií použitou v zařízeních využívajících princip trigenerace. Z porovnání je možné vyhodnotit, že obecně dostávají kompresorové jednotky přednost zejména kvůli své účinnosti, nízkým počátečním investicím, malým rozměrům a malé hmotnosti. Absorpční chlazení je ale pro využití v trigeneraci vhodnější, protože ho pohání teplo z výstupu z kogenerace.

V poslední části byl proveden bilanční výpočet trigenerační jednotky s ORC daných parametrů, který byl porovnán s klasickou výrobou elektřiny, tepla a chladu. Výpočet ukazuje, že trigenerace pro výrobu stejného množství elektřiny, tepla a chladu spotřebuje méně paliva, než při výrobě těchto energií zvlášť. To znamená, že má vyšší využití paliva než klasická výroba, což plyne hlavně z důsledku využití tzv. nízkopotenciální odpadní energie.

8. Bibliografie

[1] International Energy Statistics. *U.S. Energy Information Administration* [online]. Washington, b.r. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=1&pid=1&aid=2&cid=regions&syid=2000&eyid=2012&unit=TST

[2] WANG, Yaodong, Ye HUANG a Anthony ROSKILLY Trigeneration integrated with absorption enhanced reforming of lignite and biomass. *Fuel* [online]. 2009, **88**(10), 2004-2010 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.03.003. ISSN 00162361. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236109001288

[3] Statistical Review of World Energy. *BP* [online]. 2015 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf

[4] WU, D.W. a R.Z. WANG Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2006, **32**(5-6), 459-495 [cit. 2016-05-07]. DOI: 10.1016/j.pecs.2006.02.001. ISSN 03601285. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128506000244

[5] *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace

[6] AMERI, Mohammad, Ali BEHBAHANINIA a Amir TANHA. Thermodynamic analysis of a tri-generation system based on micro-gas turbine with a steam ejector refrigeration system. *Energy* [online]. 2010, **35**(5), 2203-2209 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.006. ISSN 03605442. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210000587

[7] MARAVER, Daniel, Sylvain QUOILIN a Javier ROYO. Optimization of Biomass-Fuelled Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Systems Integrated with Subcritical or Transcritical Organic Rankine Cycles (ORCs). *Entropy* [online]. 2014, **16**(5), 2433-2453 [cit. 2016-05-04]. DOI: 10.3390/e16052433. ISSN 10994300. Dostupné z: http://www.mdpi.com/1099-4300/16/5/2433/

[8] HUANG, Y., Y.D. WANG, S. REZVANI, D.R. MCILVEEN-WRIGHT, M.

ANDERSON, J. MONDOL, A. ZACHAROPOLOUS a N.J. HEWITT A techno-economic assessment of biomass fuelled trigeneration system integrated with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2013, **53**(2), 325-331 [cit. 2016-03-09]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.041. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431112002268

[9] Technology details, potential and experiences of Trigeneration. *Kogenerace TEDOM* [online]. Bangalore, b.r. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://kogenerace.tedom.com/trigeneracni-jednotky.html

[10] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace. *Transformační technologie* [online]. Brno, b.r., **2006** [cit. 2016-05-06]. ISSN 1804-8293.

[11] QUOILIN, Sylvain, Martijn BROEK, Sébastien DECLAYE, Pierre DEWALLEF a Vincent LEMORT. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **22**(22), 168-186 [cit. 2016-04-21]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.028. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113000592

[12] LI, Zishen, Weiyi LI a Borui XU. Optimization of mixed working fluids for a novel trigeneration system based on organic Rankine cycle installed with heat pumps. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2016, **94**, 754-762 [cit. 2016-05-04]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.145. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431115012065

[13] STEVEN BROWN, J. a Piotr DOMANSKI Review of alternative cooling technologies. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, **64**(1-2), 252-262 [cit. 2016-03-13]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.12.014. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431113008910

[14] POSPÍŠIL, Jiří. Chladicí oběhy, trigenerace, dálkové chlazení. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2016-05-12].

[15] LAIN, Miloš. Celkové chladicí faktory klimatizačních systémů a jejich zlepšování Zdroj: http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazeni/8797-celkove-chladici-faktory-klimatizacnich-systemu-a-jejich-zlepsovani. In: *Http://tzb.info.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazeni/8797-celkove-chladici-faktory-klimatizacnich-

systemu-a-jejich-zlepsovani

[16] 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* [online]. 2011, **37**(2), 172-203 [cit. 2016-05-09]. DOI: 10.1016/j.pecs.2010.05.003. ISSN 03601285. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128510000493

[17] LIU, Mingxi, Yang SHI a Fang FANG. Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **35**, 1-22 [cit. 2016-05-09]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.054. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114002263

[18] ZOHAR, A., M. JELINEK, A. LEVY a I. BORDE Performance of diffusion absorption refrigeration cycle with organic working fluids. *International Journal of Refrigeration* [online]. 2009, **32**(6), 1241-1246 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.01.010. ISSN 01407007. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700709000139

[19] BRUNO, Joan Carles, Víctor ORTEGA-LÓPEZ a Alberto CORONAS. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. *Applied Energy* [online]. 2009, **86**(6), 837-847 [cit. 2016-05-14]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.08.007. ISSN 03062619. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261908001980

[20] JRADI, M. a S. RIFFAT Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **32**, 396-415 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.039. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114000501

[21] BEST, R. a W. RIVERA A review of thermal cooling systems. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, **75**, 1162-1175 [cit. 2016-05-14]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.018. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431114006802

[22] LI, S. a J.Y. WU Theoretical research of a silica gel–water adsorption chiller in a micro combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Applied Energy*

[online]. 2009, **86**(6), 958-967 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.09.016. ISSN 03062619. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261908002389

[23] DENG, Jian, Ruzhu WANG, Jingyi WU, Guyong HAN, Dawei WU a Sheng LI. Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics. *Energy* [online]. 2008, **33**(9), 1417-1426 [cit. 2016-05-14]. DOI: 10.1016/j.energy.2008.05.001. ISSN 03605442. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544208001217

[24] JANI, D.B., Manish MISHRA a P.K. SAHOO Solid desiccant air conditioning – A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **60**, 1451-1469 [cit. 2016-05-05]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.031. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116002665

[25] JRADI, M. a S. RIFFAT Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scale tri-generation system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy* [online]. 2014, **71**, 80-93 [cit. 2016-05-05]. DOI: 10.1016/j.energy.2014.04.077. ISSN 03605442. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544214004903

[26] LA, D., Y.J. DAI, Y. LI, R.Z. WANG a T.S. GE Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(1), 130-147 [cit. 2016-05-14]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.016. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001737

[27] ZHENG, B. a Y.W. WENG A combined power and ejector refrigeration cycle for low temperature heat sources. *Solar Energy* [online]. 2010, **84**(5), 784-791 [cit. 2016-04-25]. DOI: 10.1016/j.solener.2010.02.001. ISSN 0038092x. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X10000459

[28] BESAGNI, Giorgio, Riccardo MEREU a Fabio INZOLI. Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **53**, 373-407 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.059. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115009223

[29] MAIZZA, V. a A. MAIZZA Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2001, **21**(3), 381-390 [cit. 2016-05-06]. DOI: 10.1016/S1359-4311(00)00044-2. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431100000442

[30] WANG, Jiangfeng, Yiping DAI a Zhixin SUN. A theoretical study on a novel combined power and ejector refrigeration cycle. *International Journal of Refrigeration* [online]. 2009, **32**(6), 1186-1194 [cit. 2016-04-25]. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.01.021. ISSN 01407007. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700709000371

[31] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

[32] ENESCU, Diana a Elena VIRJOGHE. A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **38**(38), 903-916 [cit. 2016-04-22]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.045. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114004973

[33] Kryotherm catalog. *Kryotherm* [online]. b.r. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://kryothermtec.com/assets/dir2attz/Kryotherm%20catalog.pdf

[34] ZHAO, Dongliang a Gang TAN. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, **66**(1-2), 15-24 [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431114000854

[35] BANSAL, Pradeep, Edward VINEYARD a Omar ABDELAZIZ. Status of not-in-kind refrigeration technologies for household space conditioning, water heating and food refrigeration. *International Journal of Sustainable Built Environment* [online]. 2012, **1**(1), 85-101 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.ijsbe.2012.07.003. ISSN 22126090. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212609012000088

[36] TASSOU, S.A., J.S. LEWIS, Y.T. GE, A. HADAWEY a I. CHAER A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal*

Engineering [online]. 2010, **30**(4), 263-276 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.09.001. ISSN 13594311. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431109002737

[37] QIU, K. a A.C.S. HAYDEN Integrated thermoelectric and organic Rankine cycles for micro-CHP systems. *Applied Energy* [online]. 2012, **97**(97), 667-672 [cit. 2016-04-23]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.072. ISSN 03062619. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911008750

[38] VERMA, S. Eco-friendly alternative refrigeration systems. *Resonance* [online]. 2001, **6**(11), 63-67 [cit. 2016-04-23]. DOI: 10.1007/BF02868245. ISSN 09718044. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF02868245

[39] ZOLPAKAR, Nor, Normah MOHD-GHAZALI a Mawahib HASSAN EL-FAWAL. Performance analysis of the standing wave thermoacoustic refrigerator: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **54**, 626-634 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.018. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115010977

[40] JACOBS, S., J. AURINGER, A. BOEDER, J. CHELL, L. KOMOROWSKI, J. LEONARD, S. RUSSEK a C. ZIMM The performance of a large-scale rotary magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration* [online]. 2014, **37**(37), 84-91 [cit. 2016-04-24]. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.09.025. ISSN 01407007. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700713002594

[41] APREA, C, A GRECO, A MAIORINO a C MASSELLI. Magnetic refrigeration: an eco-friendly technology for the refrigeration at room temperature. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2015, **655**, 012026- [cit. 2016-05-01]. DOI: 10.1088/1742-6596/655/1/012026. ISSN 17426588. Dostupné z: http://stacks.iop.org/1742-6596/655/i=1/a=012026?key=crossref.aa923cc0c8bda5f1ce6caa8798a336af

[42] Quantum materials show promise for greener, better refrigerators. *Cifar* [online]. 2014 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.cifar.ca/assets/quantum-materials-show-promise-for-greener-better-refrigerators/

[43] MENDRYGAL, Roman, Rostislav HEGAR a Václav ČÍŽEK. *Ekologická výroba tepla a elektrické energie*. [Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2013.

ISBN 9788090539280.

[44] ALLOUHI, A., T. KOUSKSOU, A. JAMIL, P. BRUEL, Y. MOURAD a Y. ZERAOULI Solar driven cooling systems: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **44**, 159-181 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.014. ISSN 13640321. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114010661

[45] Trigeneration with absorption cooling. *IEC Energy company* [online]. b.r. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: http://www.iec-energy.by/en/our-services/technology-equipment/energetics-systems/gas-reciprocating-engines-and-gas-turbine-plants/trigeneration-with-absorption-cooling

[46] BOOTHROYD, Peter. a Xuân Nam. PHạM *Socioeconomic renovation in Viet Nam: the origin, evolution, and impact of doi moi*. Singapore: Institute of Southeast Asian Studies, 2000.

[47] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049365.

[48] Způsoby výroby dálkově dodávaného tepla. *Naše teplo: Teplárenské sdružení České republiky* [online]. b.r. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.naseteplo.cz/?id=050505

[49] Energetické třídy. *AB klimatizace* [online]. b.r. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.abklimatizace.cz/energeticke-tridy/