Hybridní tepelná čerpadla

Ing. Luděk Jančík

Abstrakt

Článek přináší základní informace o hybridních tepelných čerpadlech - zařízeních kombinujících prvky kompresorových a absorpčních chladicích cyklů. Pracovní látka je vícesložková (chladivo + absorbent), transport a stlačování par chladiva zajišťuje kompresor. Výhodami oproti klasickým typům tepelných čerpadel jsou: vyšší potenciální účinnost mj. díky využití směšovacího tepla, vyšší dosažitelné teploty, nižší výstupní tlak z kompresoru, možnost plynulé regulace. Přínosem kromě vyšší účinnosti může být i využití odpadního tepla v teplotních oblastech dosud pro TČ nedosažitelných nebo neefektivních, případně nahrazení chladiv zakázaných z důvodu ochrany ozonové vrstvy při zachování původní účinnosti. Nutnou podmínkou pro dosažení konkurenceschopnosti vůči konvenčním typům je optimalizace hybridního cyklu s ohledem na kombinovaný přestup tepla a hmoty.

Přehled značek a symbolů

Č		čerpadlo	Qk	[W]	topný výkon
HTČ		hybridní tepelné čerpadlo	Qo	[W]	chladicí výkon
K		kompresor	Qt	[W]	výkon zdroje tepla
Pč	[W]	příkon čerpadla	R.V.		redukční ventil
Pe	[W]	příkon kompresoru	TČ		tepelné čerpadlo
Qa	[W]	tepelný výkon absorbéru			

Úvod

Tepelná čerpadla, jakožto zařízení schopná transformace tepelné energie z nižších teplotních hladin na vyšší, nabývají v současnosti na významu kvůli snahám o efektivnější hospodaření s energií, např. využitím odpadního tepla technologických procesů, motivovaným jak důvody ekologickými tak i ekonomickými. V praxi jsou již dobře zavedena především kompresorová tepelná čerpadla k vytápění budov, pracující při teplotách zdroje tepla cca 0 – 10 ^{o}C a teplotách výstupu 30 – 60 ^{o}C. Za těchto podmínek dosahují topných faktorů (poměr tepelné energie získané a mechanické práce dodané) orientačně 2,5 – 5 (čím nižší rozdíl teplot mezi zdrojem a výstupem, tím vyšší topný faktor).

V technologických procesech se však často setkáme s požadavky na podstatně vyšší teplotu výstupu (75 – 100 ^{o}C), kde je použití běžných typů kompresorových čerpadel problematické. Jedním z omezení jsou parametry používaných chladiv – většina běžných typů je použitelná maximálně do teplot okolo 80 ^{o}C. Určité typy chladiv sice umožňují provoz až do 120 ^{o}C, jsou to však bohužel právě chladiva poškozující ozonovou vrstvu a tím pádem zakázaná a nepoužitelná (např. R114). Dalším zdrojem komplikací jsou vysoké tlaky při vyšších teplotách výstupu, navíc i dosahované topné faktory bývají obecně nižší než u nízkoteplotních aplikací.

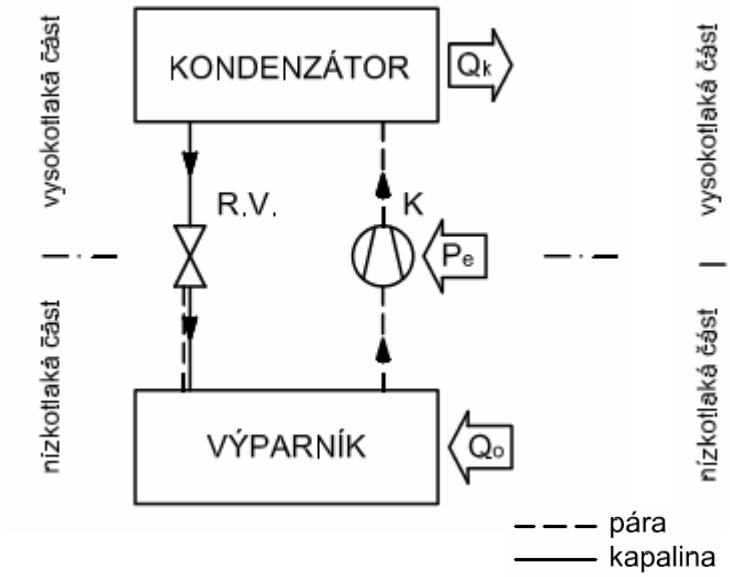
Odpovědí na tyto problémy v oblastech vyšších teplot může být právě nasazení hybridních tepelných čerpadel. Použití směsi chladiva a absorpční látky přináší mj. snížení tlaku při vyšších

teplotách, vyšší dosažitelné teploty než u samotného chladiva, zvýšení topného faktoru nebo výkonu díky využití směšovacího tepla, případně snížení kompresního poměru.
Nevýhodami se v současné době jeví velké rozměry ab- a desorbéru ve srovnání s tepelnými výměníky u tepelných čerpadel klasické konstrukce a dále i větší náročnost návrhu a následné optimalizace zařízení, vyplývající jednak z nedostatku prověřených experimentálních údajů a jednak z obecně větší teoretické náročnosti problematiky absorpčních chladicích oběhů a kombinovaného přestupu tepla a hmoty.
I přes tyto problémy však většina doposud zprovozněných hybridních tepelných čerpadel pracovala poměrně spolehlivě a pro vysokoteplotní aplikace i s podstatně lepšími topnými faktory – většinou min. o 20 % - než srovnatelná tepelná čerpadla klasické konstrukce, což dostatečně vysvětluje opodstatněnost hlubšího výzkumu této problematiky.

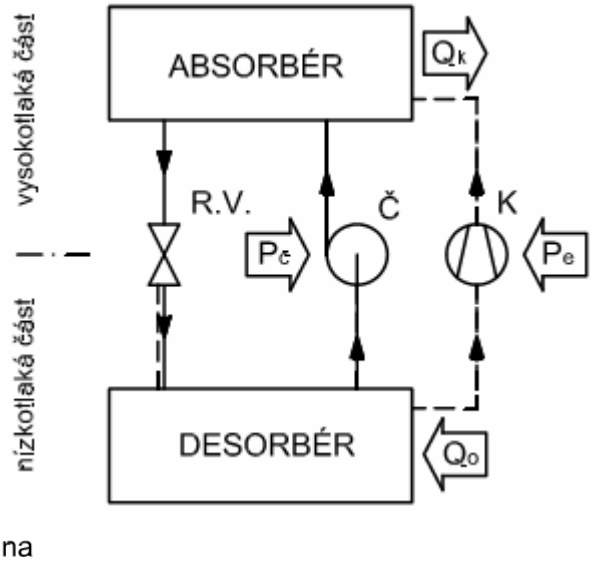
1. Teoretické základy hybridních tepelných čerpadel

1.1 Úvod do problematiky hybridních tepelných čerpadel

Hybridním tepelným čerpadlem rozumíme zařízení využívající princip jak parních kompresorových tak absorpčních chladicích oběhů k čerpání tepelné energie z nižší teplotní hladiny na vyšší. Zjednodušeně ho lze popsat jako kompresorové tepelné čerpadlo jenž místo čistého jednosložkového chladiva používá dvojici chladivo-absorbent, výparník je nahrazen desorbérem a kondenzátor absorbérem. Pro lepší představu slouží obr. 1.1 (kompresorové TČ) a obr. 1.2 (hybridní TČ). Princip hybridního chladicího cyklu nejlépe vynikne porovnáním s cyklem kompresorovým a absorpčním v následujících odstavcích.
V souvislosti s definicí hybridního TČ je dobré zmínit, že v zahraniční literatuře v anglickém jazyce se pro výše definovaný český výraz "hybridní tepelné čerpadlo" více než doslovný překlad "Hybrid heat pump" užívá označení "Absorption/compression heat pump".



Obr. 1.1 Kompresorové TČ



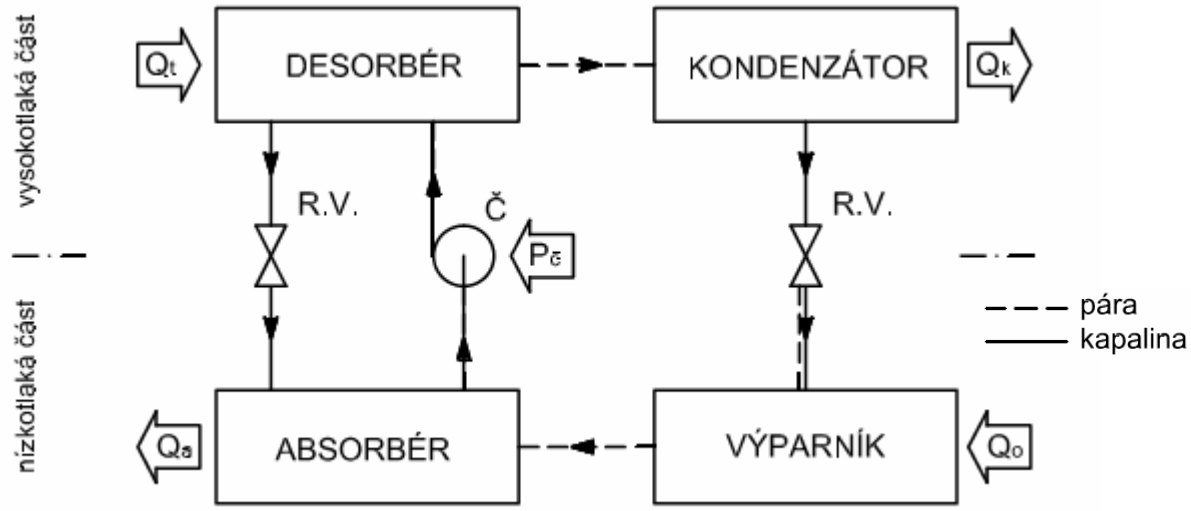
Obr.1.2 Hybridní TČ

1.2 Kompresorový chladicí oběh

Kompresorový chladicí oběh (schéma viz obr. 1.1) sestává z části nízkotlaké – výparníku a vysokotlaké – kondenzátoru, jež jsou propojeny kompresorem a redukčním ventilem, což umožňuje kontinuální pohyb chladiva i při zachování různých tlaků v obou částech okruhu. Ve výparníku dochází k vypařování chladiva za teoreticky konstantní teploty a tlaku, k tomuto procesu je odebíráno teplo z okolí. Páry jsou kompresorem stlačeny a dopraveny do kondenzátoru s vyšším tlakem oproti výparníku. V kondenzátoru páry kondenzují opět za teoreticky konstantního tlaku a teploty, přičemž do okolí odevzdávají energii - teplo odebrané okolí ve výparníku a práci kompresoru předanou při stlačení. Kondenzát se poté přes redukční ventil, snižující tlak na úroveň v nízkotlaké části okruhu, dostává zpět do výparníku a cyklus se opakuje.
Chladivo bývá ve valné většině případů jednosložkové.
Pro zvýšení účinnosti, výkonu a teplotního rozsahu se užívá např. ekonomizérů, podchlazení kondenzátu a kaskádového uspořádání okruhů (vícestupňové oběhy) - podrobnosti viz např. [1].

1.3 Absorpční chladicí oběh

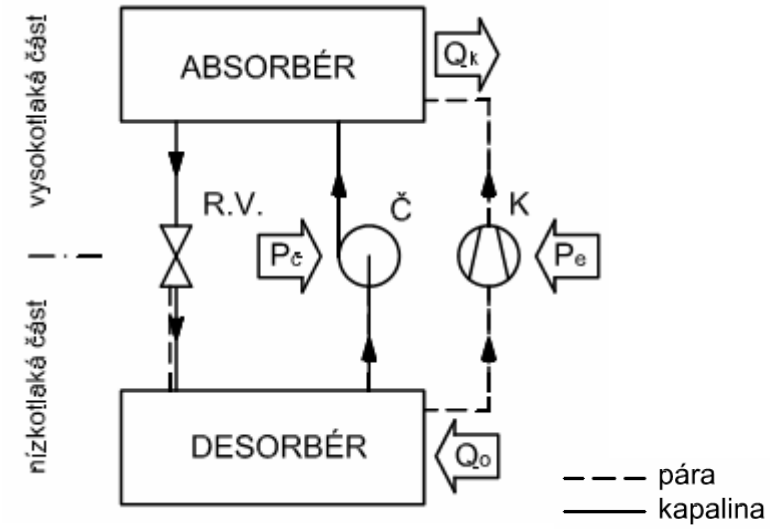
V absorpčním chladicím oběhu (viz obr. 1.3) se uplatní 2 pracovní látky (chladivo a absorbent), sice zde též najdeme kondenzátor a výparník, ovšem kompresor je zde nahrazen dvojicí absorbér-desorbér. Páry chladiva o nízkém tlaku z výparníku jsou absorbovány vhodnou látkou v absorbéru (též nazýván resorbér), přičemž u většiny běžně používaných látek při tom dochází k uvolnění tepelné energie. Vzniklý roztok (větš. nazývaný bohatý – vysoký obsah chladiva) je poté čerpadlem transportován do desorbéru (též nazýván generátor nebo vypuzovač) s tlakem odpovídajícím vysokotlaké části (kondenzátoru). Oproti kompresi plynu je k čerpání kapaliny při tomtéž tlakovém rozdílu zapotřebí méně mechanické práce. Roztok v desorbéru je za vysokého tlaku zahříván vhodným zdrojem tepla na teplotu, při které dochází k odpařování těkavější složky roztoku – chladiva – a jeho transportu do kondenzátoru. Zbylý absorbent (větš. nazývaný chudý roztok – nízký obsah chladiva) je přes redukční ventil dopraven rovnou zpět do absorbéru a cyklus se uzavírá.
I u absorpčních chladicích strojů se pro zvětšení teplotního rozsahu užívá vícestupňových zapojení a to jak sériových, tak paralelních - podrobnosti např. viz [1], [4].
Jak vidno z obr. 1.3, oproti kompresorovému oběhu se zde teplo odebírá a uvolňuje na několika místech a teplotních hladinách – konkrétně: odběr nízkopotenciální – výparník, odběr vysokopotenciální – generátor (desorbér), produkce nízkopotenciální – absorbér, produkce vysokopotenciální – kondenzátor. Větší počet energetických transformací je samozřejmě příčinou nižší účinnosti absorpčního cyklu ve srovnání s kompresorovým (od cca 0,4 u prostého cyklu do 1,2 pro vícestupňová zařízení s vnitřní výměnou tepla) , výhodou je však absence výrobně náročného kompresoru a tím pádem relativní mechanická a provozní jednoduchost, což zdůvodňuje např. rozšíření absorpčních chladniček pro domácí použití již koncem 19. století, důvodem použití dnes je pak možnost využití odpadního tepla technologických procesů.



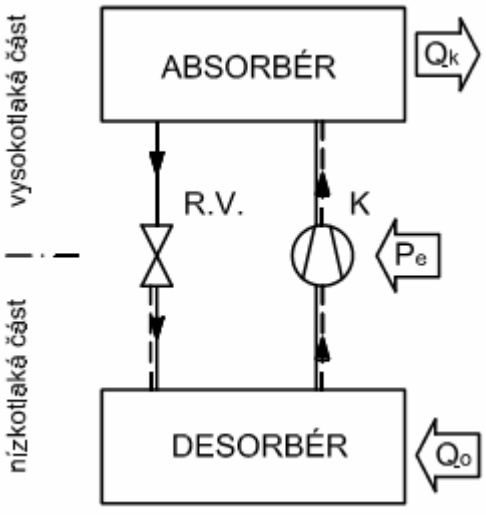
Obr. 1.3 Funkční schéma absorpčního chlazení

1.4 Hybridní chladicí oběh

Hybridní chladicí oběh vznikne z kompresorového, když použijeme vícesložkovou pracovní směs (chladivo + absorbent), na místo výparníku umístíme desorbér a místo kondenzátoru absorbér. Chladivo je mezi de- a absorbérem dopravováno kompresorem, absorbent je veden buď samostatným okruhem s pomocným čerpadlem (obr. 1.4) nebo společně s chladivem přes kompresor – tzv. mokrá komprese (obr. 1.5), tato koncepce však klade zvýšené nároky na návrh a konstrukci kompresoru, jež momentálně nejsou zcela uspokojivě vyřešeny, proto se s mokrou kompresí zatím setkáme spíše jen na výzkumných zařízeních. Dalšími možnostmi modifikací jsou podobně jako u předchozích dvou typů různé kombinace vícestupňových systémů – v praxi nejužívanější jedno- a dvoustupňový sériový okruh a okruh s vnitřní výměnou tepla mezi de- a absorbérem, podrobnosti viz např. [2].
Odlišnost hybridního chlazení oproti čistě absorpčnímu je zřejmá – u absorpčního chlazení se desorbér nachází ve vysokotlaké části a je mu přiváděno vysokopotenciální teplo, zatímco v hybridním cyklu je umístěn v části nízkotlaké a využívá teplo nízkopotenciální. Stejné závěry platí i pro absorbér, avšak v opačném „gardu“ – v HTČ je ve vysokotlaké části a produkuje teplo vysokopotenciální. Dochází zde tedy ke stejnému počtu transformací tepelné energie, jako v cyklu kompresorovém, což by mělo znamenat vyšší hodnoty chladicích faktorů blížící se kompresorovým a teoreticky je i převyšující, díky využití tepelné energie chemických reakcí při ab- a desorpci.
Další odlišností jsou poměry na výměnících - oproti kondenzátoru a výparníku jak kompresorového, tak absorpčního cyklu se zde jedná o výměníky s dvousložkovou pracovní směsí, přičemž při kondenzaci resp. odpařování chladiva z absorbentu dochází ke změně koncentrace a tím pádem i ke změně kondenzační resp. vypařovací teploty. Zásadním poznatkem je zde nekonstantní průběh teplot kondenzace a vypařování na straně chladiva, což sice přináší teoreticky možnou lepší účinnost výměníku při dosažení konstantní teplotní diference na celé ploše výměníku, nicméně návrh optimálního výměníku je podstatně složitější a odlišný od běžně užívaných postupů pro výměníky konvenčních typů.



Obr. 1.4 Hybridní TČ s odděleným oběhem chladiva a absorbentu



Obr. 1.5 Hybridní TČ s mokrou kompresí

2. Významné praktické realizace HTČ

Ačkoliv hybridní tepelná čerpadla jsou v běžném provozu prakticky neznámá, jejich princip není vůbec nový – první v literatuře (např. [2]) uváděné práce související s hybridním chladicím cyklem pocházejí jíž z r. 1895 (Osenbrück) a 1920 (Sloan a Roncin), podrobněji se touto problematikou zabýval Altenkirch již v r. 1950. Zde zmíněné příklady byly vybrány pro demonstraci možností hybridních tepelných čerpadel, počet realizovaných zařízení je mnohem vyšší – v [2] je jich uvedeno více než 10.

Stokar a Trepp (1987, Švýcarsko) zkonstruovali hybridní tepelné čerpadlo s dvojicí látek NH_3/H_2O, pracovní podmínky: chlazení vody z 40 ^oC na 15 ^oC, ohřev vody ze 40 ^oC na 70 ^oC. Absorbér i desorbér v podobě vertikálních trubkových výměníků se stékajícím filmem, oba také kromě výměníku tepla obsahovaly i akumulační prostor na roztok (desorbér) resp. chladivo (absorbér) za účelem redistribuce obou v rámci příslušného zařízení. Výkon zařízení bylo možno regulovat v rozmezí 5,2 -15,2 kW změnou koncentrace pracovní směsi. Pro zadané teplotní rozdíly dosahoval topný faktor hodnoty 4,3 při kompresním poměru 3,74. Topný faktor srovnatelného zařízení s chladivem NH_3, třístupňovým kompresorem a stejnou teplosměnnou plochou byl spočten na 3,3 , což znamená zvýšení top. faktoru o 23 %.

Nicméně hlavním záměrem tohoto projektu byla analýza kombinovaného přenosu tepla při ab- a desorpci. K dosažení vysokého stupně promísení par a roztoku a zlepšení účinnosti výměníku byla provedena uvnitř i zvenčí blíže nespecifikovaná „opatření na rozšíření plochy trubek“, přičemž film pracovního roztoku teče na povrchu, teplo odvádějící kapalina uvnitř trubek. Naměřené součinitele přestupu tepla ve stékajícím filmu činily 1190 $W/m^2.K$ v absorbéru a 980 $W/m^2.K$ v desorbéru.

Groll a Radermacher (1994) jako první experimentovali s hybridním cyklem s přímou výměnou tepla mezi ab- a desorbérem (direct desorber/absorber heat exchange – DAHX). V tomto cyklu se klouzavé teplotní diference ab- a desorpce překrývají a část absorbéru je schopna přímo zásobovat teplem část desorbéru. Cyklus DAHX umožnil kombinovaný přestup tepla a hmoty na obou stranách výměníku tepla mezi ab- a desorbérem. Tato konfigurace je i základem cyklu GAX (generator-absorber heat exchange), jenž je nyní považován za nejperspektivnější pro pokročilé absorpční NH_3/H_2O cykly.

Vlastní zařízení ohřívalo vodu v sekundárním okruhu z 58 na 74 ^oC, zdrojem tepla byla směs glykol/voda chlazená z 0 na –6 ^oC. Při tlakovém poměru 3,6 činil chladicí faktor 0,93 , ve srovnání

s klasickou technologií došlo ke snížení tlakového poměru o 74 %, dále bylo odhadnuto další zvýšení chladicího faktoru až o 44 % při použití kompresoru optimalizovaného pro danou aplikaci.
IFE + Hybrid Energy AS (2005) Významným uplatněním technologie HTČ z poslední doby je zařízení s pracovní dvojicí NH_3/H_2O o výkonu 300 kW v Norsku (viz obr. 2.1), jenž bylo navrženo ve spolupráci norského výzkumného energetického institutu IFE a společnosti Hybrid Energy AS. Jeho úkolem je využití odpadního tepla v mlékárně, je schopno transformovat tepelnou energii z teplotních hladin 20 – 60 ^{o}C na 75 – 100 ^{o}C. Provoz je údajně spolehlivý, dosahovaný topný faktor min. 3 v závislosti na teplotách vstupu a výstupu, díky optimalizacím konstrukce se podařilo značně snížit investiční náklady, udávaná doba návratnosti činí 2 – 5 let. Jedním z podstatných vylepšení oproti jiným doposud realizovaným HTČ je absorbér na bázi deskového výměníku s patentovaným tvarem vstupních kanálů, umožňující efektivní proces absorpce i při malých rozměrech zařízení. Dle posledních zveřejněných zpráv bylo toto zařízení objednáno další soukromou společností, což dokládá jeho praktický přínos. Více informací o daném zařízení lze najít na webových stránkách zde zmíněných společností – viz [3], [5] .

Obr. 2.1 – úspěšně provozované HTČ v mlékárenském provozu v Norsku – převzato z [5]

Závěr

Přestože se jedná o zařízení v praxi relativně neznámá, byly postaveny funkční exempláře hybridních tepelných čerpadel za použití v dané době dostupných komponentů a znalostí z oboru chlazení, přičemž jejich provoz byl hodnocen jako spolehlivý, většinou dosahovaly požadovaných výkonů a předpokládaného zvýšení účinností oproti tepelným čerpadlům klasické konstrukce.
Co se teorie týče, mezi různými autory panuje víceméně shoda o možných přínosech těchto strojů, tzn. zvýšení účinnosti chladicího cyklu především za vyšších výstupních teplot a možnosti náhrady chladiv pro vysokoteplotní oblasti zakázaných z důvodu ochrany ozonové vrstvy.
Další rozvoj hybridních tepelných čerpadel dle většiny autorů závisí především na jejich optimalizaci s ohledem na ekonomickou konkurenceschopnost vůči klasickým typům. Jako klíčový

komponent je zmiňován především absorbér a větší zapojení teorie kombinovaného přestupu tepla a hmoty do procesu jeho návrhu. V této souvislosti stojí za zmínku, že naprostá většina momentálně dostupných teoretických i experimentálních prací uvažuje pouze s jednoduchým trubkovým absorbérem s absorpcí do stékajícího filmu, přičemž i v tomto relativně dobře teoreticky popsaném případě se hlubší rozbor přestupních poměrů vyskytuje jen zřídka.
Že se takový rozbor vyplatí, dokládá zařízení popsané v předchozím odstavci – díky podstatnému zmenšení rozměrů a investiční náročnosti absorbéru se dočkalo i komerčního uplatnění. Když k tomu připočteme velké množství možných kombinací jejich komponent a oblastí nasazení, vychází nám v oblasti hybridních tepelných poměrně široké a slibné možnosti dalšího výzkumu.

Seznam literatury

[1] DVOŘÁK, Zdeněk. Chladicí technika. : I. díl . 1. vyd. Praha : SNTL, 1963. 301 s.

[2] GROLL, E. A. Current Status of Absorption/Compression Technology. In ASHRAE Transactions: Symposia. Philadelphia : 1997. s. 361-374.

[3] RISBERG, Tove . High temperature compression/absorption heat pump [online]. 2005-04-27 , 2006-08-03 [cit. 2006-12-10]. Dostupný z WWW: <http://www.ife.no/departments/energy_systems/projects/cahp/view>.

[4] SRIKHIRIN , Pongsid , APHORNRATANA, Satha , CHUNGPAIBULPATANA, Supachart . A review of absorption refrigeration technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2001, no. 5, s. 343-372.

[5] The hybrid heat pump [online]. c2000 [cit. 2006-12-10]. Dostupný z WWW: <http://sylow.ife.no/hybridenergy/hybridheatpump>.