



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# **TRIGENERACE**

**TRIGENERATION**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JIŘÍ HADRABA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. ZDENĚK FORTELNÝ**

BRNO 2010



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je rešerší pojednávající o kogeneraci a následně trigeneraci. Jsou zde popsány převládající primární jednotky určené k transformaci energie paliva v kogeneračních jednotkách na elektřinu a teplo. Další kapitoly jsou věnovány strojnímu chlazení, absorpčnímu a kompresorovému. V neposlední řadě je zde rozebráno možné akumulování tepla a vliv trigenerace na životní prostředí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

trigenerace, kogenerace, výroba chladu, kompresorové chlazení, absorpční chlazení,

## ABSTRACT

This bachelor thesis is the recherche dealing with cogeneration and trigeneration consecutively. There are described prevailing primary units designated to the transformation of the energy of the fuel in cogeneration units to electricity and heat. The next chapters are dedicated to the absorbing and compression machine cooling. There are also analysed the possibilities of the heat accumulation and the influence of trigeneration on the enviroment.

## KEY WORDS

trigeneration, kogeneration, cool production, compressor cooling, absorption cooling,

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HADRABA, J. *Trigenerace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Fortelný.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Trigenerace* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Fortelného. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a literárních zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 26. 5. 2010

---

Jiří Hadraba



## PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Fortelnému za odborné vedení této práce, cenné rady a věnovaný volný čas. Dále také svým nejbližším, zejména rodičům, za podporu nejen při psaní bakalářské práce, ale i během celého mého dosavadního studia.

Děkuji.





## OBSAH

<b>Úvod</b> .....	12
<b>1. KOGENERACE</b> .....	13
1.1 Princip kogenerace .....	13
1.2 Energetická bilance kogenerace .....	14
1.3 Primární jednotky v kombinované výrobě .....	15
<b>2. TRIGENERACE</b> .....	19
2.1 Princip trigenerace .....	19
<b>3. STROJNÍ CHLAZENÍ</b> .....	21
3.1 Kompresorové chlazení .....	21
3.1.1 Pístové kompresory .....	23
3.1.2 Rotační kompresory .....	23
3.2 Absorpční chlazení .....	24
3.3 Pracovní látky .....	25
3.3.1 Chladiva .....	25
3.3.2 Pracovní dvojce .....	26
3.4 Porovnání kompresorového a absorpčního chlazení.....	27
3.5 Způsoby zásobování chladem .....	28
<b>4. DRUHÝ AKUMULACE VYROBENÝCH ENERGIÍ</b> .....	30
<b>5. VLIV TRIGENERACE NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ</b> .....	32
5.1 Mechanická energie .....	32
5.1.1 Hluk.....	32
5.1.2 Vibrace .....	33
5.2 Plynné škodlivé látky .....	33
5.3 Emisní částice .....	34
5.4 Tepelná energie .....	35
<b>ZÁVĚR</b> .....	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	37
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	39
SEZNAM TABULEK .....	39
POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY .....	40
POUŽITÉ PROMĚNNÉ .....	40

## ÚVOD

Technický rozvoj týkající se energetiky je současnou společností velmi podporován. K tomu přispívají důvody, jako jsou například energetické nároky spotřebitelů, omezené množství zásob fosilních paliv a především zátěž životního prostředí. Snahou většiny energetických inovací je zvýšit podíl využitelné energie z běžně dostupného paliva a vymyslet takové zařízení k transformaci energií, které není náročné na konstrukční materiál a je ekonomicky výhodné.

Právě touto cestou směřuje trigenerace a kogenerace, kde je palivo využito současně k výrobě elektřiny, tepelné energie a v případě trigenerace i chladu. Tento přístup může zvýšit podíl využitelné energie paliva až na dvojnásobek oproti běžné oddělené výrobě jednotlivých energií. Výrobu chladu lze realizovat zařízeními na mnoha rozličných principech, počínaje termoelektrickým až po způsob řídicí se levotočivým tepelným oběhem, který je používán výhradně v trigeneraci.

Vývoj energetiky je možné zaznamenat jako rozvoj do dvou směrů. První spočívá v centralizované výrobě energií, kde je zdroj postaven mimo odběratele. Tento systém má výhodu v použití jednoho centrálního zařízení k zásobování většího množství spotřebitelů. Druhý směr je orientován na decentralizovanou výrobu energií, tedy zdroj s malým výkonem je umístěn přímo u odběratele energií. Kombinované výroby lze použít v obou zde zmíněných případech.

V neposledním případě je také při výrobě tepla a chladu nutné myslet na jeho skladování. Při kombinované výrobě je totiž množství vyrobeného tepla a chladu přímo úměrné množství vyprodukované elektřiny, zatímco odběry jednotlivých energií uživatelem jsou na sobě nezávislé, tedy různé.

Způsob výroby energií pomocí trigenerace a její přínos pro světovou energetiku dosud není u laické veřejnosti příliš znám. Tato práce může posloužit osvětlení a seznámení s touto problematikou.

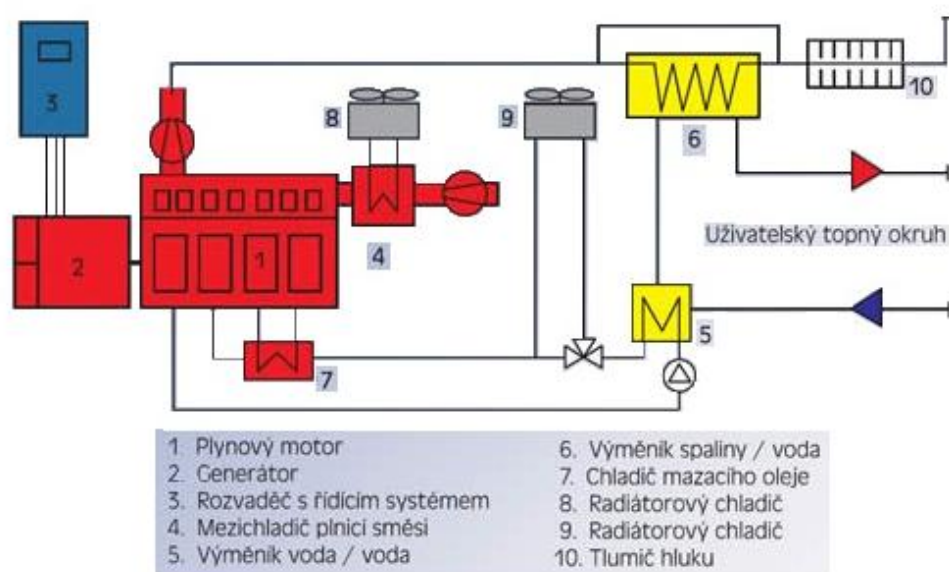
## 1. KOGENERACE

Elektrina a teplo jsou v dnešní době nepostradatelné. Proto je důležité se zabývat jejich výrobou a stále ji zdokonalovat tak, aby byla efektivnější, spolehlivější a s co nejmenšími dopady na životní prostředí. Dosažení těchto podmínek je možné pomocí kogenerace, kterou se vyrábí současně jak elektrina, tak i teplo.

### 1.1 Princip kogenerace

Základní princip kogenerace, nebo-li kombinované výroby elektrické a tepelné energie (KVET), spočívá v přeměně energie paliva (využitelná část paliva) na teplo a mechanickou energii. Tato transformace pracuje na základě druhého zákona termodynamiky, který říká, že žádný stroj nemůže konat práci ekvivalentní energii, kterou odebírá ze zásobníku. A to např. z důvodu tření pohyblivých částí reálného stroje a úniku tepla při jeho transportu ze zásobníku.

Kogenerace k získání vysokopotenciálního tepla využívá tepelných oběhů, kde přeměna energie paliva probíhá v tzv. primární jednotce (PJ). Soustava sestávající se z této jednotky, systému dopravy, získávání a úpravy vyrobených energií se nazývá kogenerační systém (viz obr. 1). Zde je primární jednotkou pístový motor na plynné palivo, který produkuje mechanickou a tepelnou energii. Mechanická energie je v generátoru přeměněna na elektrickou. V případě, že parametry elektřiny, jako např. frekvence a napětí, neodpovídají požadavkům zákazníka, musí být upraveny. Teplo vznikající při spalování v PJ se odvádí primárním potrubním systémem do tepelných výměníků, kde je předáno vodě v sekundárním potrubním systému, která je dopravována v podobě nízkopotenciálního tepla ke spotřebiteli. V závislosti na využití tepelné energie zákazníkem lze její spotřebu dělit na celoroční (např. ohřev vody v bazénu) nebo sezónní (např. vytápění v zimních měsících).



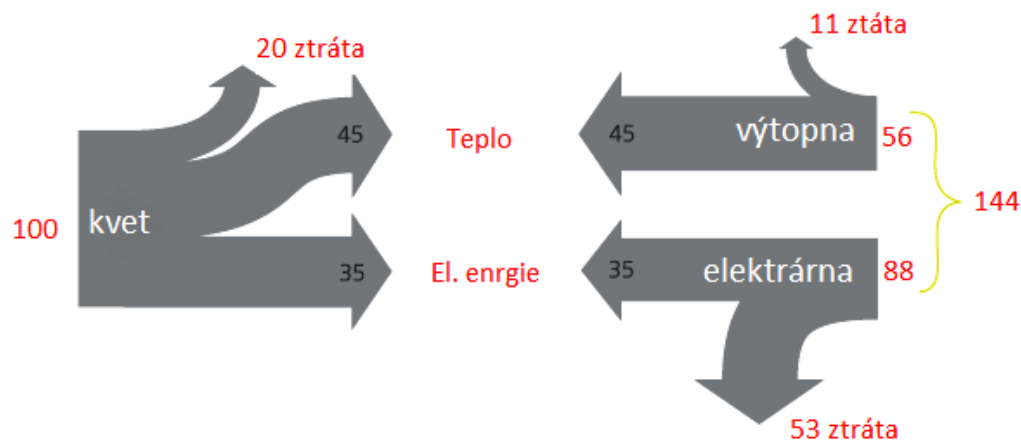
**Obr. 1** Blokové schéma kogenerační jednotky s pístovým motorem [11]

Konvenční způsob získávání el. energie v kondenzační elektrárně, která obsahuje kondenzátor k přeměně mokré páry na kapalinu, musí obsahovat chladicí okruh s chladicí věží. Přes tyto věže se vypouští přebytečné teplo do okolí, a tím se účinnost elektrárny snižuje v závislosti na zvyšujícím se množství ztrátového tepla. U vytápění budov (resp. sídlišť), kde by se dala přebytečná tepelná energie z elektráren spotřebovat, jsou často využívány výtopny, ty přemění energii paliva pouze na teplo. Paliva lze kogenerací využít lépe. KVET při výrobě el. energie využívá nízkopotenciálního odpadního tepla k dalšímu použití (např. vytápění budov, ohřev pitné vody, atd.). Tímto se odpadní teplo mění na využitou část energie, která zvyšuje účinnost procesu. Vyšší účinnost, tedy hodnotnější využití paliva, odpovídá snížení vypouštěných emisí do ovzduší a z ekonomického hlediska také nižším nákladům na palivo.

Kogenerační systémy, na rozdíl od velkých elektráren, které jsou většinou stavěny u zdroje paliva a přitom co nejdál od hustě osídlených oblastí, jsou používány v blízkosti tepelného odbytu. Její vzdálenost od odběratelů energií je závislá na systému rozvodu tepla. KVET se také často využívá v průmyslu, jako je např. chemický, hutní, sklárny atd., kde z výrobních procesů vzniká nevyužitě vysokopotenciální teplo. To lze zužitkovat k vytápění budov a k přeměně na mechanickou energii, která může pohánět generátor, kompresor a další stroje. Malé kogenerační jednotky jsou umístovány přímo v komplexech s odbytem tepla a elektřiny, např. nemocnice, hotely, obchodní střediska, atd., kde mohou plnit funkci záložního nebo i primárního zdroje tepelné a elektrické energie.

## 1.2 Energetická bilance kogenerace

Běžná tepelná elektrárna pracující na základě Carnotova cyklu má účinnost do 40%. U moderních tepelných elektráren pracujících s paroplynovým cyklem na zemní plyn, které dosahují vysokých teplot a tlaků, se do budoucna předpokládá procentuální využití přeměny tepelné energie získané z paliva na elektrickou až 60%. Dnešní kogenerační jednotky dosahují 80 až 90% účinnosti, ta je vyšší právě o teplo, které se v běžných tepelných elektrárnách bere jako ztrátové. Ve schématu znázorněném na obr. 2 je vyobrazeno porovnání kombinované a oddělené výroby při stejném počtu vyrobených jednotek energií, ty se od sebe liší rozdílným množstvím dodaného paliva, což je způsobeno odlišnými ztrátami ve výrobních zřízeních.



**Obr. 2** Přehled energií vznikajících při kogeneraci a oddělené výrobě tepla a elektřiny [12]

K možnému porovnání různých kogeneračních jednotek složí tzv. teplotní modul, který vyjadřuje množství vyrobené elektrické energie při daném množství tepla. Pro představu je v tab. 1 uvedeno několik druhů kogeneračních jednotek s příslušným teplotním modulem.

Druh kogen. technologie	obvyklá hodnota teplotního modulu
Paroplynový cyklus	0,6 – 1,5
Protitlaká parní turbína	0,30 – 0,55
Pístový motor s vnitřním spalováním	0,7 – 1,0

**Tab. 1** Porovnání teplotního modulu určitých primárních jednotek [1]

### 1.3 Primární jednotky v kombinované výrobě

Vhodnost použití kogenerační jednotky je do jisté míry závislá na zvolené primární jednotce, která, jak již bylo řečeno, slouží k přeměně energie paliva na ušlechtlejší formu energie (elektrickou nebo mechanickou) a teplo. Spotřebitel žádá tyto energie v určité kvalitě, množství a čase. To jsou důležité požadavky na PJ.

Kogenerační jednotky je možné dělit na jednotky malého a velkého výkonu. Jednotky velkého výkonu, tzv. teplotní, slouží jako centrální (dálkový) zdroj dodávaného tepla. Mezi nejčastěji používané PJ v teplotnách patří:

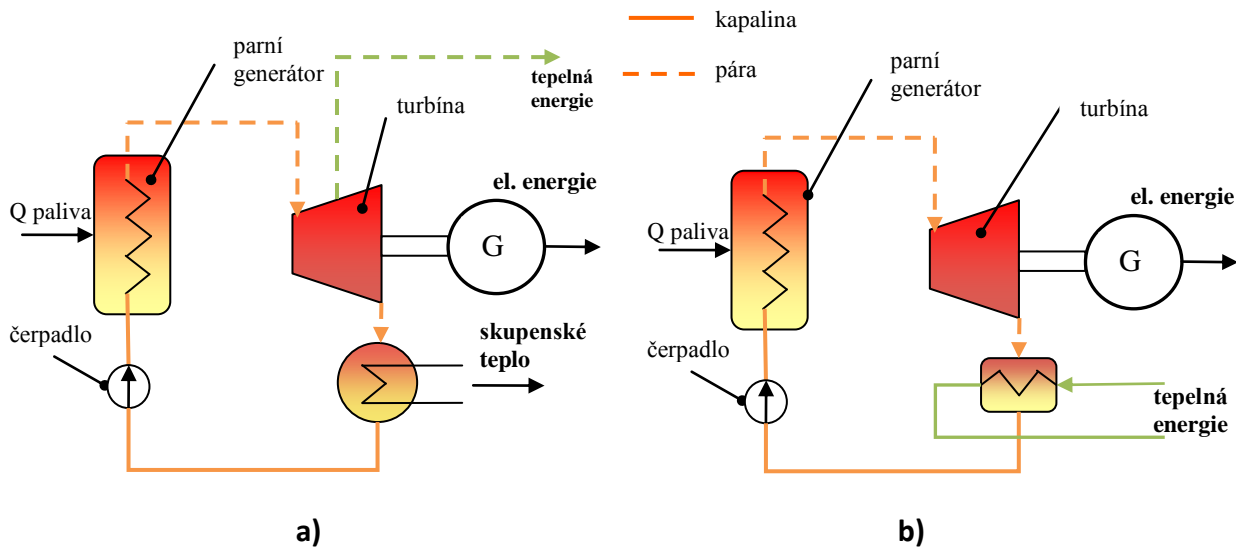
- parní turbína
- spalovací turbína

Kogenerační jednotky malého výkonu jsou preferovány jako decentralizované zdroje vytápění. Umisťují se přímo k odběrateli. Tento přístup snižuje tepelné ztráty vznikající dopravou tepla ke spotřebiteli. Mezi primární jednotky malého výkonu patří:

- pístové motory s vnitřním spalováním
- Stirlingův motor
- palivové články
- mikro - spalovací turbíny

**Parní turbíny** se dělí na protitlaké a kondenzační. Oba typy pracují s Rankinovým oběhem. Ten využívá vysokopotenciálního tepla, pomocí kterého přemění vodu o čerpadlem zvýšeném tlaku na páru. Její expanzí se roztočí parní turbína spojená s generátorem. Pára z výstupu turbíny se mění ve výměníku u turbíny protitlaké (obr. 3 a), nebo v kondenzátoru u kondenzační (obr. 3 b), zpět na vodu. Vzniklé skupenské teplo při této přeměně u oběhu s protitlakou turbínou je dopravováno potrubním systémem k jeho spotřebiteli, kdežto u oběhu s kondenzační turbínou je odváděno do chladících věží. Dále se cyklus opakuje.

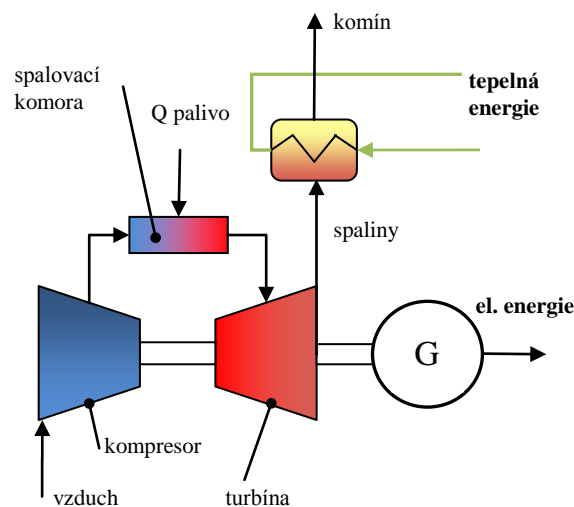
Kondenzační turbíny se přednostně využívají k výrobě elektřiny a teplo je až druhotné. Naopak turbíny protitlaké vyrábí teplo primárně a elektřina je až na druhém místě.



**Obr. 3** Oběh s parní turbínou **a)** protitlakou **b)** kondenzační

**Plynová turbína** (obr. 4) pracuje s Braytonovým cyklem. Pracovní látkou na rozdíl od parní turbíny není pára, ale jsou jí spaliny. Vzduch, který je nasáván z ovzduší a stlačován kompresorem, proudí do spalovací komory, ve které je ohříván teplem vzniklým od spalovaného paliva. Poté dochází v plynové turbíně k tlakové expanzi. Vznikající technická práce od rotace turbíny pohání prvotně kompresor, bez kterého by systém nemohl fungovat, a až na druhém místě zbytkem energie generátor el. proudu, popřípadě jiný stroj. Vzniklé spaliny odchází přes výměník tepla do ovzduší. Vysokopotenciální teplo získané ze spalin je možné využít k výrobě páry, kterou lze pohánět parní turbínu. Tento způsob se nazývá paroplynový cyklus.

Vlivem vysokých teplot spalin je plynová turbína náročnější na použitý materiál lopatek, avšak výhodou je teplotní modul pohybující se kolem jedné. Použitá paliva jsou omezena pouze na plynná a kapalná.



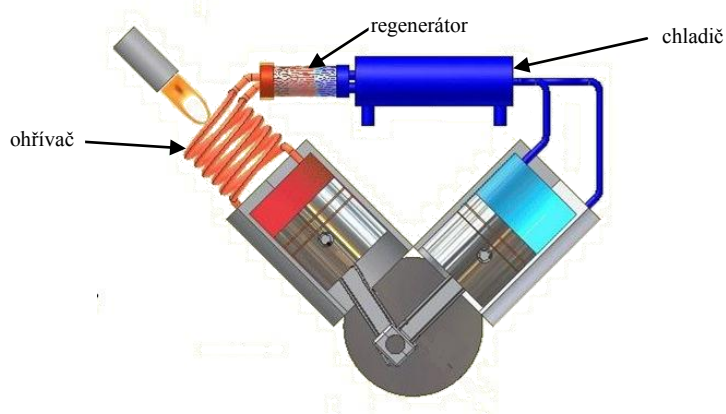
**Obr. 4** Oběh s plynovou turbínou

**Pístové motory** pracují s tepelným oběhem, kterým může být Ottův (zážehový motor) nebo Dieselův (vznětový motor), kde oba využívají, na rozdíl od ostatních zde zmíněných primárních jednotek, vnitřní spalování. Tyto motory pracují tak, že nasávají směs vzduchu a paliva do spalovací komory ve tvaru válce, poté ji stlačí a zapálí. Hořící plyn ve válci expanduje a stlačí píst spojený s klikovým mechanismem, který přemění pohyb přímočarý vratný na rotační, ten slouží k pohonu generátoru. Odčerpávání přebytečného tepla z výfukových plynů, oleje a chladicí kapaliny motoru probíhá ve výměnících tepla, které je nízkopotenciální. Ottův a Dieselův cyklus se od sebe odlišují v podmínkách zapálení směsi. Otto využívá elektrické jiskry, která zapaluje palivo smísené se vzduchem, při teoreticky konstantním objemu. Kdežto u Dieselova tepelného oběhu je samotné palivo vstříknuto do spalovací komory s tlakem zvýšeným na hodnotu jeho samovznícení.

Výhodou jsou relativně nízké pořizovací náklady, vysoká účinnost, široké výkonnostní rozpětí a snadná dostupnost, což je předurčuje k masovému používání. Možné nevýhody bývají vysoké náklady na údržbu a velké hodnoty nízkofrekvenčního zvuku.

**Mikroturbíny** jsou v podstatě plynové turbíny o malém výkonu. Pracující rovněž s Braytonovým oběhem, který obsahuje vyšší tlakový poměr. Vstupní vzduch do kompresoru má co nejnižší teplotu, kdežto vzduch proudící do turbíny má teplotu co nevyšší. Otáčky mikroturbíny se pohybují kolem  $10\,000\text{ min}^{-1}$ , z tohoto důvodu je třeba použít vysokofrekvenční generátor a následnou úpravu parametrů elektřiny. V případě zařazení rekuperátoru tepla, sloužícímu k předehřevu stlačeného vzduchu, je možné jeho vyřazováním a připojováním do oběhu regulovat teplotěnský modul.

Výhodou tohoto zařízení je malá zástavba a nízká hladina zvuku oproti klasickým plynovým turbínám. Lze je také použít jako PJ v mobilních kogeneračních jednotkách.



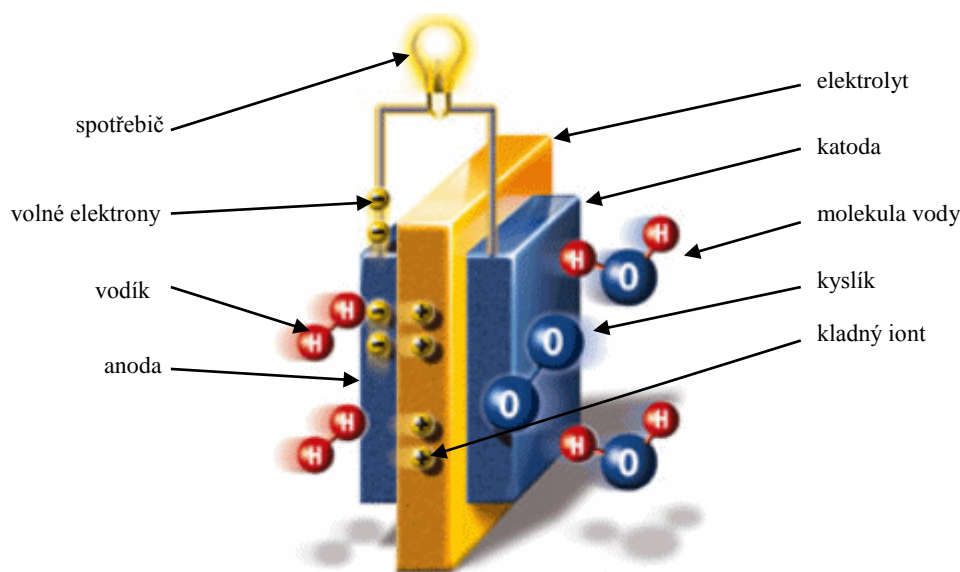
**Obr. 5** Stirlingův motor [13]

**Stirlingův motor** (obr. 5) je pístový motor s vnějším spalováním, ve kterém se uvolněná tepelná energie předává pracovní látce tepelného oběhu. Nejčastěji je to helium, vzduch, dusík nebo oxid uhličitý. Látka je střídavě stlačována ve studeném válci (kompresní prostor) a expanduje v horkém válci (expanzní prostor). Teplo je přiváděno do okruhu z vnějšího zdroje přes tepelný výměník (ohříváč). Tepelná energie, která není přeměněna na technickou práci

hřídele, je odváděna chladicí vodou ve studeném tepelném výměníku (chladiči). Plyn se přenáší z horké zóny do chladiče a zpět pomocí regenerátoru. [1]

Výhodou je možnost využití tepla z technologických procesů, nízká hladina hluku a tepelný oběh blízký se Carnotovu oběhu. Stirlingovy motory s malými výkony jsou ideální pro použití v domácnostech a mobilních jednotkách.

**Palivové články** (obr. 6) jsou od všech zde uvedených motorů rozdílné v tom, že nevyužívají k transformaci energie paliva tepelných oběhů, nelze je tedy porovnávat s Carnotovým cyklem. Princip palivových článků spočívá v přeměně chemické energie přímo na elektrickou. V podstatě se jedná o reakci, která je inverzní elektrolýze vody. Tedy palivo ( $H_2$ ) přiváděné na anodu oxiduje (odevzdá elektron) a jeho kladný iont přechází elektrolytem ke katodě, kde se současně okysličovadlo (kterým je kyslík obsažený ve vzduchu) přecházející přes katodu redukuje (přijímá elektron). Smísením reakčních produktů vzniká voda. Volné elektrony na elektrodách vyvolávají stejnosměrné napětí, které je třeba přetransformovat na střídavé pomocí vhodného přístroje (střídač). Palivové články pracují za různých teplot v závislosti na druhu paliva. V kogeneračních jednotkách se zejména využívají paliva jako vodík, zemní plyn, metanol a speciální plyny, kde se teploty chemické reakce pohybují v rozmezí 70 až 1000 °C. Jeden palivový článek má sám osobě malý elektrický výkon, proto se k dosažení požadovaného výkonu řadí několik článků k sobě. Palivové články jsou tiché, ekologické a dosahují vyšší účinnosti než tepelné motory.



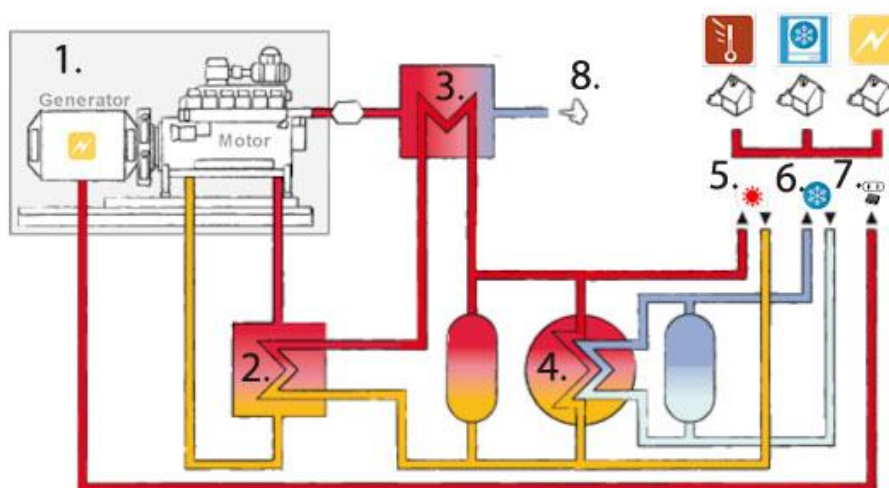
**Obr. 6** Princip palivového článku [18]



## 2. TRIGENERACE

### 2.1 Princip trigenerace

Zvyšující se požadavky na tepelný komfort v bydlení a stále nové technologie s nutností dodržování stabilní teploty mají za následek masové rozšiřování klimatizačních jednotek. Tyto jednotky je možné dělit podle prostředí použití na konformní (zdravotně hygienické) a technologické (průmyslové), kde oba typy klimatizací dosahují požadovaného mikroklimatu ohřevem nebo ochlazováním vzduchu. Právě teplo a chlad jsou v těchto systémech žadáným artiklem. S využíváním chladu se můžeme setkat např. i v automobilu, lednici nebo počítači, zkrátka všude tam, kde je nutno odebrat přebytečné (nežádoucí) teplo. Princip chlazení je založený na prvním zákonu termodynamiky, který říká, že teplo samovolně přechází z tělesa o teplotě vyšší (chlazená látka) na těleso o teplotě nižší (pracovní látka). U klimatizačních jednotek převládá kompresorové chlazení (viz. 3.1), které využívá k provozu elektřinu. To je při velkých rozdílech mezi teplotou referenční a okolní (horké letní dny) negativní, protože kompresory musí pracovat na vysoký výkon, s kterým se zvyšuje spotřeba elektřiny a při velkém počtu těchto klimatizačních jednotek hrozí kolaps elektrifikačních sítí.



**Obr. 7** Princip kombinované výroby elektřiny, tepla a chladu [14]

1. Pístový motor s generátorem, 2. tepelný výměník voda/voda odebírající teplo z chladicí soustavy motoru, 3. tepelný výměník plyn/voda odebírající teplo ze spalin, 4. absorpční chladicí jednotka, 5. 6. 7. odevzdané teplo, chlad a elektřina odběrateli, 8. spaliny

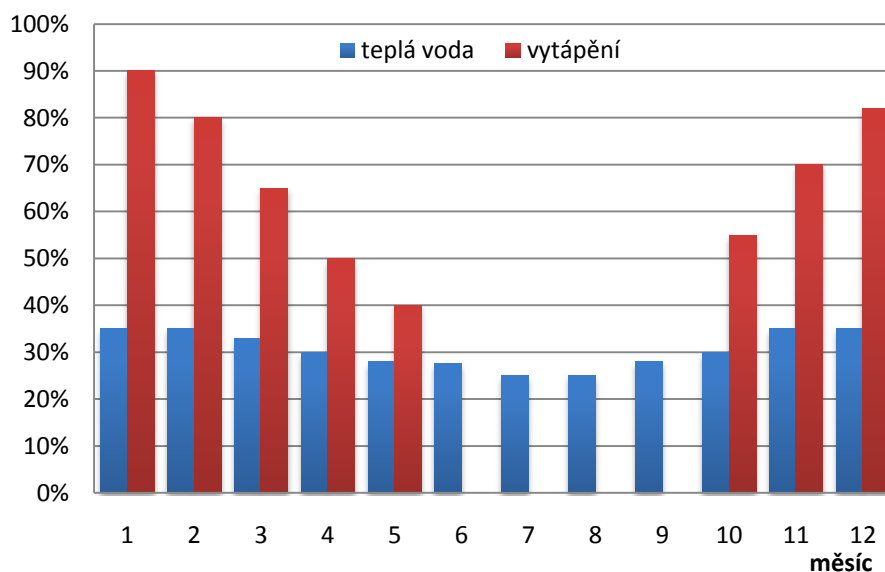
Trigenerační jednotky jsou možným řešením problému s dodávkou el. energie, tepla a chladu pro průmysl a domácnosti. Ve své podstatě je to soustava stávající z kogenerační a chladicí jednotky (kompresorové, absorpční nebo jejich kombinací). Na obr. 7 je znázorněn princip, kde spalovací motor, v tomto případě pístový, přemění spalováním palivo na teplo a mechanickou práci, která je el. generátorem transformována na elektřinu. Teplo z motoru a výfukových spalin je odváděno chladícím okruhem do tepelného výměníku 2 a 3, kde je předáno teplotněmu médiu (nejčastěji voda) proudícímu po směru hodinových ručiček v otopné soustavě. Z výměníku 3 proudí ohřáté médium do chladicí absorpční jednotky a ke spotřebiteli, odkud se vrací zpět do otopné soustavy a cyklus se opakuje. Absorpční

jednotka přemění dodané teplo na chlad, který ochladí medium vedené nízkoteplotním potrubním systémem ke spotřebiteli, poté se vrací zpět do chladicí jednotky.

Absorpční chlazení (viz. 2.2), využívající absorpci a desorpci plynů v absorbentu, pro výrobu chladu nepotřebuje kompresor. Vystačí si s el. energií pro pohon čerpadla o nižším výkonu a tepelným výměníkem k ohřevu absorbentu. Tento systém je závislý především na přísunu tepla. Tím se stává ideálním pro využití v trigeneraci.

Teplárny, využívající kogenerační jednotky k vytápění, ohřevu vody, a pro potřebu technologických procesů, se potýkají s problémem nižšího využití tepla v letním období. Například potřeba vytápění závisí především na venkovní teplotě a daném režimu topení budovy, kdežto spotřeba teplé vody záleží hlavně na počtu osob a využití objektu (např. nízká spotřeba na úřadech a vysoká ve sportovních zařízení se sprchami). Z obr. 8 je zřejmé klesání odběru tepla v určitém období, to je příčinou nuceného snížení výkonu z KVET. Trigenerační jednotky jsou možným řešením tohoto problému, protože upotřebí v letních měsících nevyužité teplo k výrobě chladu. Použitím trigenerace se také rozšíří sortiment nabídky tepláren o chlad, který je možné využít pro klimatizování budov.

spotřeba tepla



Obr. 8 Měsíční diagram spotřeby tepla [7]

### 3. STROJNÍ CHLAZENÍ

Strojní chlazení pracuje na základě výparného tepla kapalin za různých tlaků, kde jsou nejdůležitější děje kondenzace (přeměna plynu na kapalinu za dodávání tepla do okolí) a vypařování (přeměna kapaliny na plyn za odebrání tepla z okolí). Kondenzace probíhá v kondenzátoru za vyššího tlaku z důvodu zvýšení teploty zkapalňování par, zatímco vypařování probíhá ve výparníku za tlaku nižšího, tedy i nižších teplot.

Účinnost chlazení se nazývá chladicí faktor (v zahraniční literatuře označován jako COP-coefficient of performance), který je definován jako poměr tepla odebraného zařízením chlazené látky  $Q_{\text{chl}}$  a spotřebované energie  $E$ .

$$\varepsilon_{\text{chl}} = \frac{Q_{\text{chl}}}{E} \quad (3.1)$$

K zjištění hospodárnosti se zařízení porovnává s chladícím faktorem ideálního levotočivého Carnotova cyklu, který je daný poměrem teploty  $T_C$  zásobníku tepla odebíraného ku rozdílu teploty  $T_H$  zásobníku tepla dodávaného a teploty  $T_C$ . Kde  $T_H$  a  $T_C$  jsou shodné s teplotami v porovnávaném chladícím zařízení.

$$\varepsilon_{\text{chl}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (3.2)$$

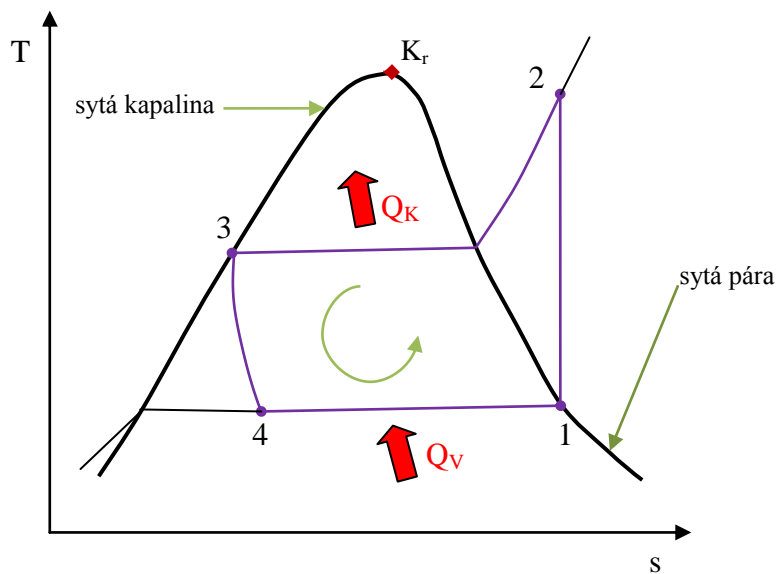
Strojní chlazení dělíme na:

- kompresorové
- s absorpčním oběhem

#### 3.1 Kompresorové chlazení

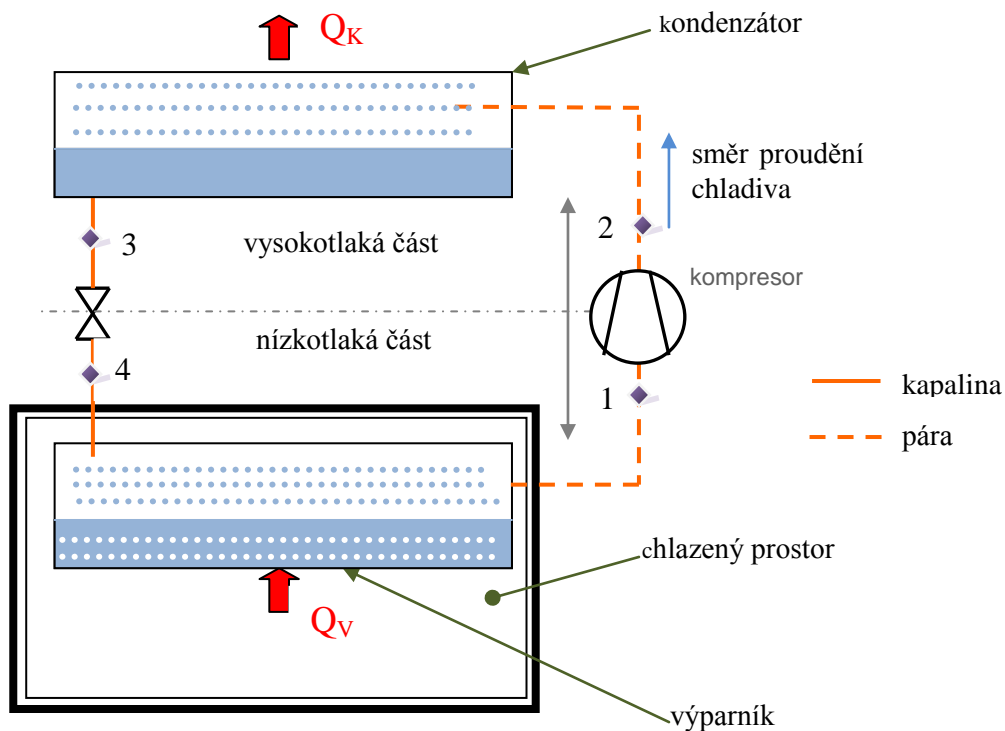
S tímto chlazením se většina z nás setkává každý den, například při otevření lednice nebo spuštění klimatizace v autě. První chladicí zařízení pracující s kompresí bylo sestrojeno už v roce 1834, ale příliš se neosvědčilo. Protože páry éteru, tehdy použitého jako chladiva (pracovní látka), tvoří se vzduchem výbušnou směs. To bylo vzhledem k jeho častým únikům velmi nebezpečné. Největší rozmach používání kompresorového chlazení nastal po tom, co se stala elektřina běžně dostupnou.

Ke správné funkci chlazení je třeba měnit tlak chladiva tak, aby docházelo k změně jeho skupenství za různých teplot. Kompresorové chlazení pracuje se čtyřmi základními komponentami, kterými jsou: kompresor, kondenzátor, škrťací ventil a výparník. Kompresor je stroj, který zajišťuje zvýšení tlaku plynného chladiva. Kondenzátor pracuje jako tepelný výměník, ve kterém odevzdává přehřátá pára do okolí skupenskou teplotu a díky tomu se mění v kapalinu. Škrťací ventil společně s kompresorem rozděluje okruh na dvě tlakové části a zabraňuje okamžitému vyrovnání tlaku mezi nimi. Výparník slouží obdobně jako kondenzátor k přeměně skupenství, ale tentokrát z kapalného, při odebrání tepla z okolí, na plynné.



**Obr. 9** T-s diagram kompresorového chlazení [4]

Kompresorové chlazení pracuje cyklicky s chladivem v levotočivém tepelném oběhu (obr. 9). Popis odehrávajících se dějů v chladicím cyklu začíná u kompresoru, který v ideálním případě stlačí sytou páru na přehřátou. Ta proudí přes kondenzátor, kde se při odevzdání tepla do okolí mění na sytou kapalinu. Ve škrtícím ventilu dojde ke snížení tlaku chladiva a následně ve výparníku k jeho odpaření, při odebrání výparného tepla (teplo potřebné k změně skupenství) z ochlazovaného prostoru. Pára proudí do kompresoru a celý cyklus se opakuje. Celý proces je též na obr. 10.



**Obr. 10** Kompresorové chlazení

Male rozměry tohoto chlazen, jsou ideln pro pouit v decentralizovanm zsobovan chladem. Nevýhoda je znateln předevřm v horkých letních dnech, kdy je nutné k výrobě chladu zvyřt výkon kompresoru, s kterm se zvyřje spotřeba elektřiny.

Chladící faktor kompresorového chlazen je dán poměrem odebíraného tepla výparníkem  $Q_v$  a energií dodanou kompresoru  $W$ .

$$\varepsilon_{\text{chl}} = \frac{Q_v}{W} \quad (3.3)$$

V kompresorovm chlazen se nejčastěji vyzuivaj kompresory, ktere je možné dělit na:

- pstov
- rotační

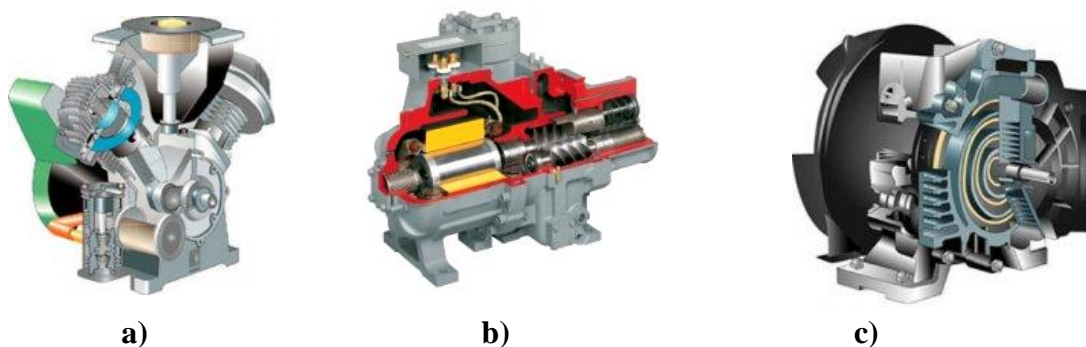
### 3.1.1 Pstov kompresory

Pstov kompresor (obr. 11 a) se vyznačuje, oproti rotačnímu, ventily a klikovm mechanismem, kter mn rotační pohyb pohonu na přmoar vratn pohyb pístu. Aby se při horní uvrat předeřlo styku pístu s ventilovou deskou a nsledne destrukci zřzen, je nutné dodržet mezi nimi vůli. Ta způsobuje vznik tzv. řkodlivho prostoru, kter expanzí při sn zmenřuje objem nasávaných par a snižuje uinnost kompresoru. Pro zvyřn tlaku mohou pstov kompresory pracovat jako vcestupnov. Výhodou je jejich vysok kompresní poměr a uinnost, ale nevýhodou jsou znan náklady na provoz, vibrace a hluk. Vyzuivaj se pro výrobu zkapalněných plynů a v decentralizovanm zsobovan chladem.

### 3.1.2 Rotační kompresory

Kompresory rotační postrádají řkodliv prostor, jenž se vyskytuje u pístových, a mají nemn kompresní poměr dan svojí konstrukcí. Můžeme je rozdělit na řroubov (obr. 11 b) a spirlov (obr. 11 c). řroubov kompresory jsou tvořeny dvěma spoluzabrajcmi řrouby s rznm profilem, počtem chod a velkm stoupáním. K stlačování plynu dochází v komorách mezi jednotlivými závity. Sn a výtlak probíhá otevřnmi kanály, nepotřebuje tedy ventily. Vyzuiv se v chladících jednotkách do chladícího výkonu  $7 \text{ MW}_{\text{ch}}$ , a to hlavn s amoniakem jako chladící látkou. Spirlov kompresory Scroll se skládají ze dvou spirál, kde je jedna pevn a druh pootoen o  $180^\circ$  kolem ní obíhající. Sací kanál je po obvodu pevn desky a vtlan ve středu pevn spirály. Jejich výhodou je nzk hlučnost, vysok uinnost a spolehlivost. Jsou nejrozřřenřm typem kompresoru v systému centralizovaného zsobovan chladem. Chladící zářízení s kompresorem Scroll mohou dosahovat ař  $25 \text{ MW}_{\text{ch}}$ .

K pohonu kompresorů se nejčastěji vyzuiv elektromotoru a v případě omezen přísunu elektřiny také spalovacího motoru nebo parní turbíny. Vzhledem k tomu, že kompresory nelze pohánět teplem z KVET, nejsou přlř vhodn pro trigeneraci.



**Obr. 11** Kompresor **a)** pístový, **b)** šroubový, **c)** pístový [15]

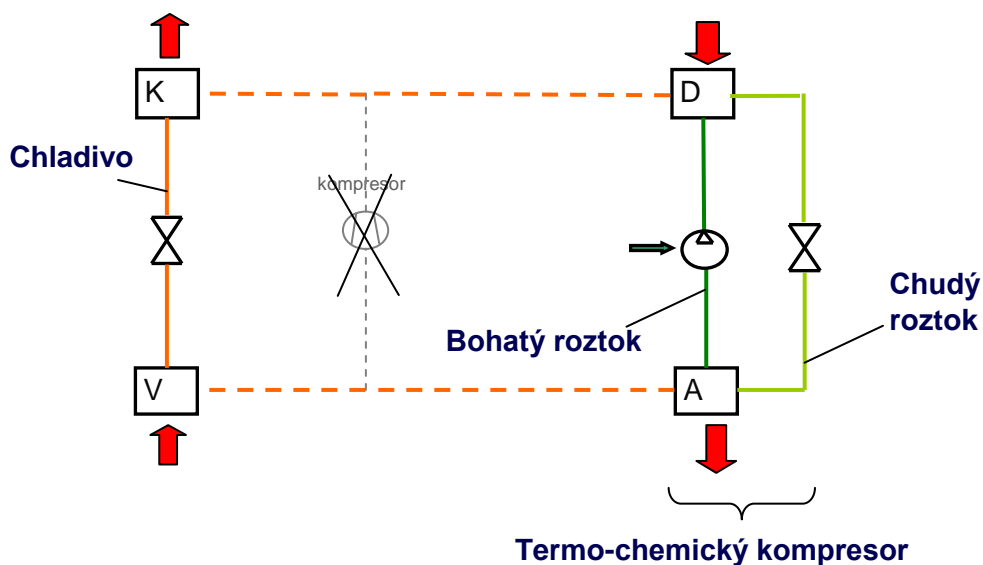
### 3.2 Absorpční chlazení

Z historického hlediska je absorpční chlazení o něco málo mladší než kompresorové. První patent na absorpční chladničku obdržel roku 1860 Francouz Ferdinand Carré, který už tehdy používal jako pracovní dvojici čpavek a vodu. V době, kdy nebyla elektřina standardem, se toto chladicí zařízení stalo velmi žádané, a to především pro skladování potravin při lodní přepravě. Díky elektrifikaci bylo absorpční chlazení kompresorovým utlačeno. Obrazně řečeno „znovuzrození“ absorpčních chladicích jednotek nastalo až během druhé světové války.

Absorpční chladicí jednotka, oproti kompresorové, využívá k chodu především nízkopotenciálního tepla ve formě horké vody, nízkotlaké páry nebo i horkého plynu. Elektřina je spotřebována pouze k napájení oběhových čerpadel s malým výkonem, zabezpečujících cirkulaci absorbentu a zkapalněné chladicí látky.

Tento systém chlazení je charakteristický dvěma okruhy, které mají jednu společnou větev. Ta obsahuje tzv. bohatý roztok pracovní dvojice (absorbentu a pohlcených par chladiva), který je oběhovým čerpadlem vhnán do desorbéru. Dodáním tepla bohatému roztoku v desorbéru se zvýší teplota absorbentu, který ze sebe vypuzuje absorbovanou páru chladiva. Ta proudí do kondenzátoru, kde za odevzdání tepla zkapalní a vtéká přes škrťací ventil do výparníku. V něm se změní kapalina zpět na páru při dodání tepla čerpaného z ochlazované látky. Vzniklá pára proudí do absorbéru, kam také vtéká z desorbéru samostatnou větví druhého okruhu chudý roztok, ten pohltí chladivo a je jako obohacený roztok čerpán zpět do desorbéru. Okruh obsahující chudý a obohacený roztok se nazývá tzv. termo-chemický kompresor. Dále se cyklus opakuje. Celý okruh je znázorněn na obr. 12.

Okamžitý chladicí výkon lze do jisté míry regulovat množstvím dodaného nebo odebraného tepla absorbentu. Protože se zvyšující se teplotou absorbentu klesá jeho schopnost rozpouštět v sobě plyny chladiva a naopak s klesající teplotou schopnost absorpce roste, je nutné zajistit odvod tepla z absorbéru.



**Obr. 12** Schematické znázornění absorpčního chlazení [9]

Absorpční chlazení lze dělit podle ohřevu na:

- přímé
- nepřímé

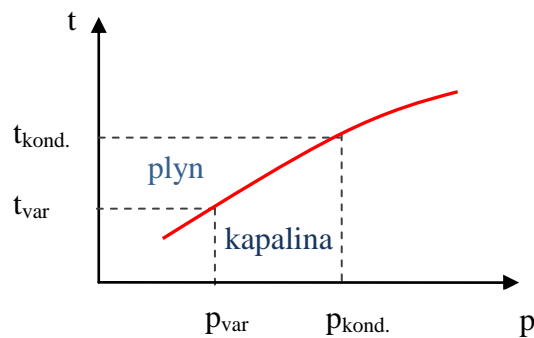
U přímého ohřevu je teplo, nutné k vypaření chladiva z desorbéru, dodáváno přímo z kotle. Jako palivo se používá nejčastěji propan-butan, zemní plyn a biomasa. Tento způsob je využíván u centralizovaného zásobování chladem. V trigeneraci a decentralizovaném zásobování chladem se využívá nepřímého ohřevu. Ten je specifický transportem tepla od jeho zdroje k desorbéru pomocí teplonosného média, kterým bývá nejčastěji voda nebo mokrá pára.

### 3.3 Pracovní látky

Pracovní látka je určena k přenosu tepla v uzavřeném chladicím okruhu. Jsou na ni kladeny nároky nejen z hlediska bezpečnosti a ekologické nezávadnosti, ale i termodynamických vlastností, které mohou ovlivnit chladicí faktor zařízení.

#### 3.3.1 Chladiva

Kompresorové chlazení využívá vhodné pracovní látky (chladiva), která dosáhne varu ve výparníku při tlaku  $p_{\text{var}}$  (obr. 13) a teplotě  $t_{\text{var}}$  (např.  $-5^{\circ}\text{C}$ ) nižší než je teplota okolí chlazeného prostoru. Zároveň musí kondenzovat za tlaku  $p_{\text{kond.}}$  dosažitelném příslušným kompresorem a při běžné okolní teplotě (např.  $20^{\circ}\text{C}$ ).



**Obr. 13** Závislost teploty chladiva na tlaku [4]

Chladiva je možné rozdělit na:

- syntetická
- přírodní

### Syntetická chladiva

Jsou to tzv. freony (fluorované uhlovodíky) a dělí se podle složení na CFC (chlorofluorocarbons), HCFC (hydrogenchlorofluorocarbons) a HFC (hydrogenfluorocarbons). První dva jsou již zakázané z důvodu obsahu chlóru, který rozkládá molekuly ozónu a tím podporuje oteplování Země. Používaným syntetickým chladivem je HFC, ten byl vyvinutý jako náhrada škodlivých druhů freonů a běžně se používá.

### Přírodní chladiva

Mezi nejpoužívanější přírodní chladiva patří amoniak ( $\text{NH}_3$ ), uhlovodíky a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Amoniak je vhodný jako chladivo z hlediska termodynamiky, ale jeho značnou nevýhodou je hořlavost a toxicita. V kompresorovém chlazení se používá omezeně. Uhlovodíky, jako jsou propan, propylen, izobutan, jsou také vhodné z termodynamického hlediska, ale jejich hořlavost a výbušnost omezuje nasazení v chladírenství. Oxid uhličitý je naopak ekologický a bezpečný, ale pro dosažení kondenzační teploty je zapotřebí vysokých tlaků, to je z ekonomického hlediska méně hospodárné.

### 3.3.2 Pracovní dvojce

U absorpčního chlazení se využívá roztoku, tzv. pracovní dvojice. Ta se skládá ze dvou látek chladící a absorpční, které mají dobrou schopnost vzájemné absorpce. Nejvyužívanější pracovní dvojice jsou:

- čpavek/voda ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ )
- voda/bromid litný ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ )

Historicky první pracovní dvojicí využívanou v absorpčních jednotkách je  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ , která se pro své dobré vlastnosti z hlediska chlazení používá do dnes. Čpavek má nižší výparné teplo než voda, a to přibližně o polovinu (rozdíl teploty varu obou látek je  $135\text{ }^\circ\text{C}$ ), proto je k chlazení nutné větší množství obíhajícího roztoku. Značnou nevýhodou je možné vznikání



vodní páry při varu čpavkového roztoku v desorbéru a jejich následný únik do oběhu, což snižuje účinnost chlazení. Tomu se dá zamezit vhodným konstrukčním řešením. Další nevýhodou je nutnost přetlaku v pracovním okruhu, vzhledem ke které je třeba počítat s možnými úniky amoniaku. Také jeho hořlavost, toxicita a v určitých koncentracích i výbušnost. Důležitá je rovněž agresivita čpavku vůči běžným barevným kovům, hlavně mědi. I přesto je tato pracovní dvojice hojně využívaná, a to především pro dosahování chladicí teploty pod bodem mrazu.

Velice dobrou pracovní látkou je voda a roztok LiBr. Tato pracovní látka je využívána převážně v oblasti klimatizační techniky. Vzhledem k tomu, že se jedná o velmi čistou pracovní látku bez zápachu, je zřejmé její přednostní použití v domácích aplikacích. Pracovní okruhy s LiBr pracují vždy v podtlaku, který dále umocňuje ochranu okolí proti případnému úniku látky. Naopak NH<sub>3</sub> pracují v přetlaku a proto je nutno uvažovat o možném úniku pracovní látky z oběhu. Samotný LiBr je pevnou látkou získávanou z mořské vody a je dobře rozpustný ve vodě. V absorpčních obězích je využíván vzniklý roztok, což umožňuje realizovat kontinuálně pracující zařízení. Nevýhody jsou agresivita LiBr vůči hliníku a jeho krystalizace na otápaných plochách. Výhodou je, že nevyžaduje škrtící ventil, a jeho nezávadnost.

### 3.4 Porovnání kompresorového a absorpčního chlazení

Rozdíl mezi těmito druhy chlazení je vstupní energie, kterou může být prioritně teplo nebo elektřina. Absorpční chladicí systém má větší rozměry než kompresorové chlazení stejného výkonu, proto vyžaduje větší zástavbu, to se také negativně promítne na pořizovacích nákladech. Absence rotačních částí v absorpčním chlazení zaručuje nízkou hladinu hluku a nižší riziko poruchovosti. Značnou nevýhodou může být potřeba většího objemu pracovní látky, která je v případě použití čpavku toxická. Porovnání chlazení je znázorněno v tab. 2.

	Absorpční oběhy	Parní oběhy
Rozměry	Velké	Malé
Spotřeba el. energie	Nízká (5% výkonu)	Vysoká (30-50% výkonu)
Investiční náročnost	Vysoká	Nízká
Nároky na obsluhu	Žádné	Žádné
Nároky na servis	Velmi malé	Malé
Životnost	Vysoká	Nízká
Požadavek vysokopotenciálního tepla	Vysoký	Žádný
Množství pracovních náplní	Velké	Malé
Hmotnost	Velká	Malá
Hlučnost	Nízká	střední

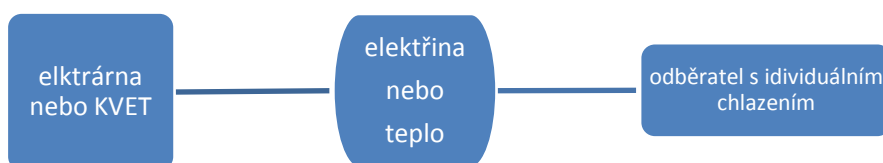
**Tab. 2** Porovnání chladicích oběhů [9]

### 3.5 Způsoby zásobování chladem

Zásobování chladem absorpční nebo kompresorovou chladicí jednotkou může probíhat způsobem:

- individuálně
- centrálně

Individuálně – individuální zásobování chladem spočívá v umístění kompresorové nebo absorpční chladicí jednotky přímo u spotřebitele a v jejím napájení příslušnou energií ze sítě (obr. 14). Tento způsob má výhodu v nízkých pořizovacích nákladech pro spotřebitele jako jednotlivce a jednoduché instalaci.



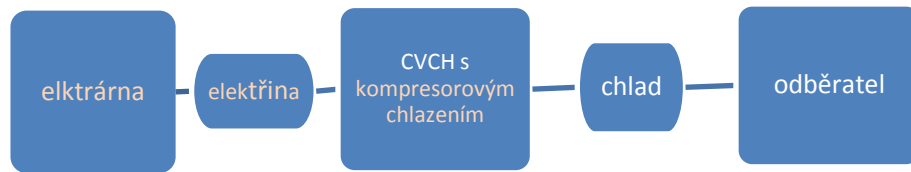
**Obr. 14** Individuální zásobování chladem

Centralizovaná výroba chladu (CVCH) – tento způsob zahrnuje výrobu chladu v tzv. chladicí stanici, která je umístěna mimo odběratele (obr. 15), nejčastěji přímo v teplárně. Chlad přenášený v teplotním médiu (nejčastěji vodou kolem 5°C) je dopravován ke spotřebiteli skrz izolovaný potrubní systém přenosu a rozvodu tepla. Po odevzdání chladu u spotřebitele se médium vrací zpět (voda cca 15°C) do chladicí stanice, kde je znovu zchlazeno. Nevýhodou tohoto systému je cena a nutnost vybudování rozvodného zásobovacího potrubí i centrální stanice.



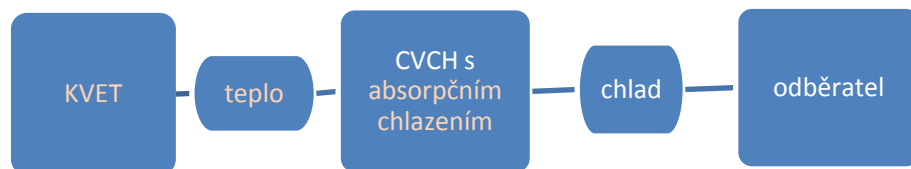
**Obr. 15** Soustava s centralizovanou výrobou chladu

CVCH v kompresorové chladicí jednotce – systém spočívá ve vybudování kompresorové chladicí stanice mimo odběratele (obr. 16). Kompresorové chladicí zařízení odebírající elektřinu z el. sítě zásobuje odběratele chladnou vodou. Toto zařízení má výhodu v poměrně malé velikosti a nižších pořizovacích nákladech oproti absorpční chladicí jednotce. Nevýhodou je vysoký odběr el. energie pro vyšší výkon.



**Obr. 16** Soustava využívající CVCH s kompresorovým chlazením

CVCH v absorpční chladicí jednotce – absorpční jednotka, umístěná mimo odběratele, využívá energie tepla z kogenerace (obr. 17). V absorpční jednotce pro klimatizační účely je využívána pracovní dvojice (viz. 3.3.2) LiBr/H<sub>2</sub>O, která zajišťuje teplotu vody okolo 5 °C bez negativního vlivu na životní prostředí. Výhodou je nezávislost na elektřině, tichý chod a využití kogeneračního tepla. Nevýhodou jsou velké rozměry, vysoké náklady na jednotku a přívodní potrubí tepla.



**Obr. 17** Soustava využívající CVCH s absorpčním chlazením

## 4. DRUHY AKUMULACE VYROBENÝCH ENERGIÍ

Vzhledem k tomu, že nelze docílit konstantního poměru mezi odběrem tepla a elektrické energie odběratelem, vznikají v síti dopravovaných energií špičky a propady. Ty je třeba kompenzovat, aby nedošlo k nedostatku konkrétních druhů energií. Elektřina je nejčastěji akumulována způsobem transformace na jiný druhu energie (např. na potenciální energii v přečerpávacích nádržích), kdežto teplo je většinou skladováno bez transformace. Dalšími důvody, které nabádají k použití akumulace, je vyrovnání výkyvů denní a noční spotřeby tepla, aniž by bylo nutné měnit hodnotu teplotního modulu. Totéž platí i pro zvýšení výroby elektřiny v kogeneračních jednotkách k pokrytí energetických špiček bez nutnosti vypouštění přebytečného tepla do ovzduší. Teplo se v teplotním prostředí nejčastěji akumuluje v podobě teplé vody.

Akumulace chladu je obdobná jako u tepla, avšak rozdílná v chladicí látce, kterou může být led, chladná voda nebo její roztok s eutektickou solí, ta snižuje teplotu fázové přeměny vody pod bod mrazu. Důvody skladování chladu jsou stejné jako u tepla, navíc přibývají problematiky, jako je např. snaha využívat běhu kompresorového chlazení v časovém úseku levnějšího tarifu elektřiny pro naakumulování chladu a jeho zužitkování ve špičce, která se pohybuje u klimatizačních jednotek v době po poledni.

V případě trigenerace se jeví jako ideální využití kombinované akumulace tepla a chladu, kde je možné zásobník využívat v zimních měsících ke skladování tepla a v letním období k akumulaci chladu.

Se skladováním tepelné energie jsou také spjaty nevýhody. Nejdůležitější z nich je ztráta tepla akumulací, která snižuje výkon celého systému.

Akumulátory tepla se vyznačují akumulací nádrží obalenou izolací, aby se minimalizovaly úniky tepla prostupem stěnou. V nádrži je konstantní objem teplotně stálé látky, nejčastěji vody (v dalším textu budeme předpokládat, že se jedná právě o vodu). Vzhledem k tomu, že její hustota klesá s rostoucí teplotou nad cca 4 °C, je teplejší voda lehčí, tudíž se drží výš než studená. Této zákonitosti se využívá v nádržích, kde je vrchem přiváděna voda teplá a ochlazená voda spodem. Tedy k odčerpání teplé vody jí stačí vytlačit vodou studenou a naopak. Mezi teplou a studenou vodou se vytvoří oddělovací vrstva s teplotním gradientem. Nejběžněji používanými akumulátory tepla jsou:

- atmosférický
- tlakový

**Atmosférický akumulátor** tepla je zařízení charakteristické tlakem v potrubí, který nepřesahuje 0,7 MPa, a teplotou vody v přívodním potrubí nižší jak 100 °C.

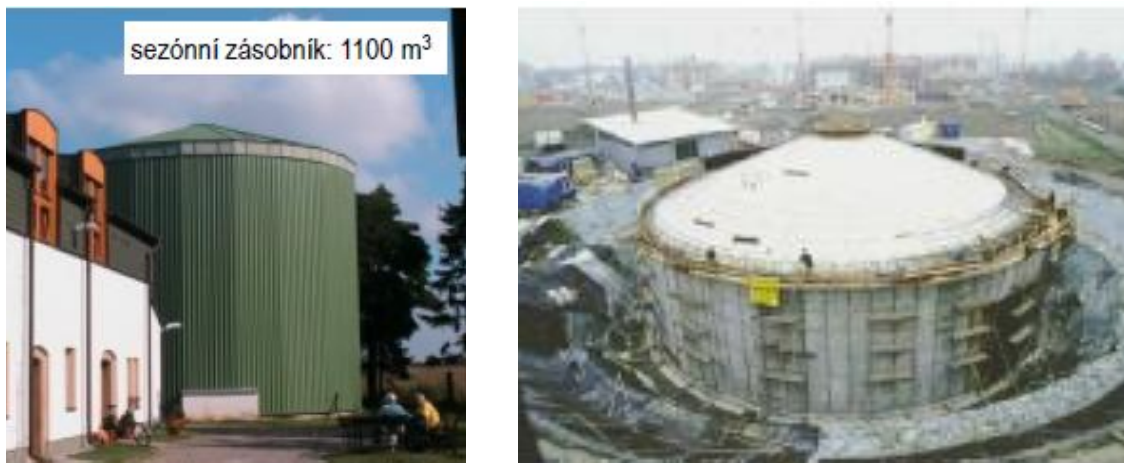
**Tlakový akumulátor** tepla pracuje s teplotou vody nad 100 °C a s tlakem vyšším, než je tlak vodního sloupce v zásobníku.

Tepelné akumulátory lze podle doby skladování tepla rozdělit na zásobníky:

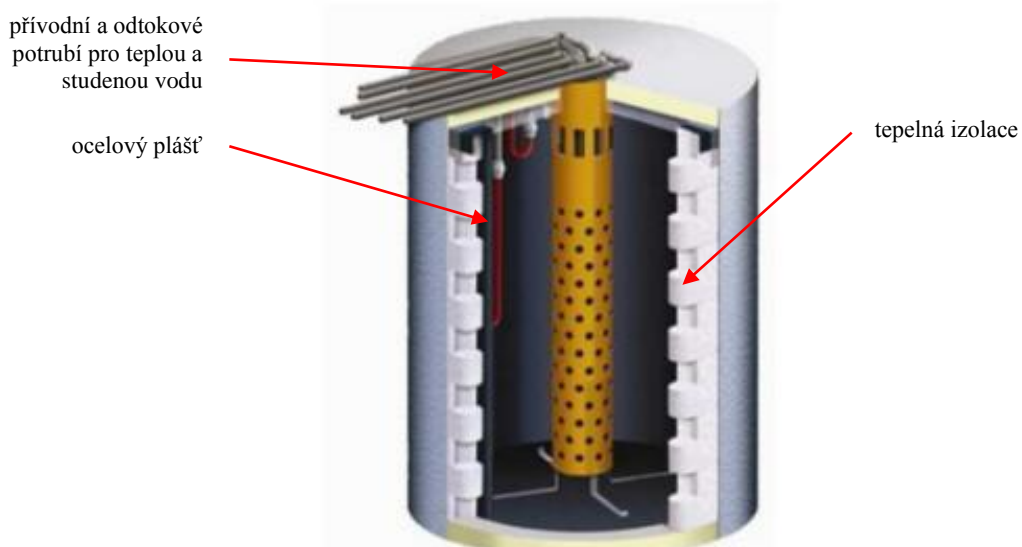
- krátkodobé
- dlouhodobé

**Krátkodobé zásobníky** se vyznačují akumulací tepla na několik hodin nebo dní. V případě jeho skladování do pitné vody se nazývají boilersy. V současné době jsou krátkodobé zásobníky nejvyužívanější.

**Dlouhodobé zásobníky** jsou charakteristické svojí velikostí a akumulací tepla trvající i několik měsíců, často se také označují jako tzv. sezónní. Tato technika ukládání tepelné energie se ocitá na samém prvopočátku svého vývoje a do budoucna se předpokládá její široké využití.



**Obr. 18** Sezónní zásobníky tepla [10]



**Obr. 19** Krátkodobý zásobník tepla [22]

## 5. VLIV TRIGENERACE NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Zejména v posledních desetiletích je trendem klást důraz na vliv výroby energií vůči životnímu prostředí. Důležitým faktorem k orientačnímu porovnání, zda jde o ekologický systém výroby, je procentuální využití energie paliva, nebo-li účinnost. Vzhledem k poměrně vysoké účinnosti trigeneračních a kogeneračních jednotek se dá říci, že jsou oproti běžným odděleným druhům výroby elektřiny, tepla a chladu na vyšší ekologické úrovni, a to hlavně díky nízkým ztrátám energie. Vzniklá úspora paliva se promítne nejen na ekonomické stránce, ale především na snížení emisí vypouštěných do ovzduší. Avšak, když se na tuto problematiku podíváme globálně, zjistíme, že životní prostředí není šetřeno pouze trigenerací samotnou, ale také snížením výroby a těžby paliva právě o množství, které je v kombinované výrobě energií ušetřené. V neposlední řadě se rovněž ušetří na energii potřebné k transportu paliva a škodlivých látkách, které vznikají při jeho dopravě. Mezi ekologické aspekty lze začlenit nežádoucí účinky:

- mechanické energie
- plyných škodlivých látek
- emisních částic
- tepelné energie

### 5.1 Mechanická energie

Nevýhodou strojů obsahujících pohyblivé části je vznik nežádoucích mechanických účinků, jako jsou:

- hluk
- vibrace

#### 5.1.1 Hluk

Je to jakýkoliv nepříjemný, rušivý nebo pro člověka škodlivý zvuk. Jde o mechanické vlnění pružného prostředí v kmitočtovém pásmu vnímaném lidským uchem. Projevuje se akustickým tlakem, který vyjadřuje zvýšení nebo snížení tlaku vzduchu oproti klidovému stavu (hodnotě atmosférického tlaku). Akustický tlak má oproti atmosférickému velmi malé hodnoty. V technické praxi se velikost hluku vyjadřuje v hladinách akustického tlaku  $L$  a jednotkou je decibel [dB(A)], kde A je označení použitého váhového filtru. Lidské ucho slyší hladinu akustického zvuku v rozmezí 0 až 120 dB (práh bolesti). [3]

U trigeneračních zařízení je hladina hluku závislá na využívané primární jednotce. Například při použití pístových motorů s vnitřním spalováním se běžně hladina hluku pohybuje kolem 95 dB(A). Dovolená hladina hluku závisí na místě a podmínkách použití PJ. Vyšší nároky jsou kladeny zejména na jednotky umístěné decentralizovaně, tedy přímo v obytných budovách, nebo v jejich těsné blízkosti.



**Obr. 19** Kogenerační jednotka v kontejnerovém provedení [17]

K snížení hladiny hluku se využívají akustické zábrany, kterými jsou např. tlumiče v sacím a výfukovém potrubí a hluková izolace PJ. Snížit hluk lze také minimalizováním počtu oken a dveří v místnosti, popřípadě zesílením stěn, podlahy a stropu. Úroveň dovoleného hluku trigenerační jednotky s akustickými zábranami je např. v neobývané místnosti cca 40 dB. Často jsou také využívány kogenerační jednotky umístěné v hlukově izolovaném kontejneru (obr. 19). V případě používání trigenerační jednotky je třeba vzít v potaz vznikající hluk v chladicí věži, do které je odváděno teplo z absorberu a kondenzátoru absorpční chladicí jednotky. Primárními jednotkami s nejnižší hladinou zvuku jsou palivové články.

### 5.1.2 Vibrace

Jsou charakterizované mechanickým kmitáním a chvěním pevných těles. Představují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Velikost vibrací se vyjadřuje výchylkou, rychlostí nebo zrychlením. Z praktických důvodů se vibrace nejčastěji definují hladinami jejich zrychlení v decibelech [dB]. [2]

Kmitání je třeba věnovat dostatečnou pozornost, a to zejména při umístění kogenerační jednotky do bytových nebo výrobních prostor. Při extrémních hodnotách vibrací by mohlo dojít až k narušení statiky stavby, proto je třeba jim předcházet. Možným opatřením je umístění PJ na elastickém základě s nejrůznějšími tlumícími chvění.

### 5.2 Plynné škodlivé látky

Zdrojem plynných škodlivých látek je zejména proces spalování paliva, kde mezi sebou reaguje hořlavá látka a kyslík. Vzhledem k tomu, že hlavním stavebním prvkem paliva je uhlík, vzniká při jeho hoření především oxid uhelnatý, oxid uhličitý a oxid siřičitý dále pak oxidy dusíku a také těkavé organické látky. Tyto prvky se dostávají do ovzduší spalinami, proto je třeba především u decentralizované výroby energie brát v úvahu lokální znečištění. To se dá snížit výběrem optimální primární jednotky. V tabulce 3 je několik těchto jednotek s uvedenými hodnotami škodlivých látek.

**Oxid uhelnatý** (CO) je jedovatý plyn, který je nebezpečný o to více, že nemá barvu, chuť ani zápach. Má nižší hustotu než vzduch, tudíž v zemské atmosféře stoupá. Do ovzduší je uvolňovaný zejména nedokonalým spalováním.

**Oxid uhličitý** (CO<sub>2</sub>) je těžší než vzduch. Není jedovatý, ale má podíl na skleníkovém efektu.

**Oxidy dusíku** (NO<sub>x</sub>) jsou zastoupeny oxidem dusnatým (NO), oxidem dusičitým (NO<sub>2</sub>) a v malé míře i oxidem dusným (N<sub>2</sub>O). Tyto oxidy jsou buď přímo životu nebezpečné, nebo jejich reakcí s vodou mohou vznikat silně korozivní kyseliny HNO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, (NO a NO<sub>2</sub> se dohromady označují jako NO<sub>x</sub>). [2]

**Oxid siřičitý** (SO<sub>2</sub>) je jedovatý plyn, který vzniká při spalování paliva, ve kterém je obsažena síra. Značně toxický je i pro rostliny.

**Těkavé organické látky** (vyjímaje metanu) jsou sloučeniny obsahující uhlík, které za současného slunečního záření tvoří spolu s oxidy dusíku fotochemické oxidanty. U spalování je obvykle tato skupina označována jako obsah nespálených uhlovodíků (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>).

Systém	Palivo	Emise (g/kWh <sub>e</sub> )					
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	TZL
Diesel motor	Nafta	738,15	4,08	15,56	0,91	0,46	0,32
Plynový motor	Zemní plyn	577,26	2,80	1,90	≈ 0	1	≈ 0
Spalovací turbína	Zemní plyn	808,16	0,13	2,14	≈ 0	0,1	≈ 0,07
Parní turbína	Uhlí	1406,40	0,26	4,53	7,75	0,07	0,65
Palivové články	Zemní plyn	505	0,03	0,03	≈ 0	0,05	≈ 0

**Tab. 3** Obvyklé hodnoty emisí některých primárních jednotek [1]

### 5.3 Emisní částice

Do této skupiny patří dva druhy znečišťujících částic označované jako (TZL), kterými jsou:

- pevné znečišťující částice
- kapalné znečišťující částice

Pevné znečišťující částice vznikají především nedokonalým spalováním. Spalovací proces opouští ve formě popela a sazí, které je nutno zachytit, aby se nedostaly do atmosféry. K tomuto účelu slouží nejrůznější filtry (např. tkaninové, elektrostatické odlučovače). U dieselového motoru se vzniku sazí předchází správným spalováním.

Kapalné znečišťující částice (uhlovodíky a sulfáty) se nejčastěji vyskytují spolu s pevnými a vznikají zkapalněním škodlivých částic při hoření.



V tabulce 3. jsou uvedené hodnoty TZL pro konkrétní primární jednotky. Porovnáním dat je zřejmé, že ideální jednotkou z hlediska emisí se jeví palivové články.

#### 5.4 Tepelná energie

Odpadní teplo vznikající při transformaci primárních zdrojů na elektrickou energii, které nelze využít pro tepelnou spotřebu, je nutno odvádět do okolí. [2] U trigenerace vzniká nežádoucí teplo zejména v absorpčních jednotkách, ze kterých se odvádí do atmosféry. K tomuto účelu slouží chladicí věže, u kterých je třeba dbát na jejich umístění, aby nedocházelo k příliš velké tepelné kontaminaci v jejich okolí. Také primární jednotky vydávají určité množství nežádoucího tepla, a to především sáláním. Proto je nutné vybudovat před jejich umístěním do uzavřených prostor systém odvětrávání.

## ZÁVĚR

Studie je zaměřená na výrobu energií pomocí trigenerace. Na začátku práce jsou zmíněna negativa spjata s oddělenou výrobou elektřiny a tepla, ta spočívají především v nízkém zhodnocení energie paliva. Touto problematikou je třeba se zabývat, a to z důvodu snižujících se zásob fosilních paliv. Vzhledem k dosavadní absenci jejich plnohodnotné náhrady je lidstvo na celém světě nuceno šetřit energie tak, aby stávající nevyčerpané množství neobnovitelných zdrojů vydrželo do doby, kdy budou nahrazeny.

Možná řešení této situace lze rozdělit do dvou směrů. První z nich je přímá náhrada neobnovitelných zdrojů obnovitelnými, jako je např. biomasa. Druhý směr se ubírá cestou zvyšování energetické účinnosti strojů, přeměňujících palivo na požadovaný druh energie. Do této kategorie patří trigenerace.

Trigenerace je v podstatě spojení kogenerace (kombinované výroby elektřiny a tepla) a absorpčního chlazení (výroby chladu). V případě, že je použita kogenerace v centralizovaném zásobování teplem, hovoříme o tzv. teplárenství. Výhodou kombinované výroby elektřiny a tepla oproti oddělené je až dvojnásobná účinnost zvýšená o využitou tepelnou energii, která se při konvenční výrobě elektřiny nevyužívá. Hodnota energetického zhodnocení paliva je rovněž závislá na použité primární jednotce, která také udává maximální množství vyrobené elektřiny při daném množství tepla.

V situaci, kdy je teplo záporné, hovoříme o chladu. Ten je možné získat mnoha různými prostředky. Pro energetiku jsou nejdůležitějšími způsoby chlazení absorpční a kompresorové, které má v trigeneraci nižší význam. Absorpční chladicí jednotky využívají k svému provozu teplo, které přemění na chlad. To je hlavním důvodem jejich spojení s trigenerací. V neposlední řadě je nutno se zabývat akumulací vyrobené tepelné energie tak, aby docházelo ke kontinuálnímu zásobování teplem a chladem v nejrůznějších domácích a průmyslových aplikacích.

K celkovému zhodnocení trigenerace je možné říci, že jejím využitím ve výrobě energií se dá docílit nejen úspor po stránce ekonomické, ale především i po stránce ekologické. Proto by se mělo věnovat jejímu zdokonalování více úsilí. Budoucnost trigenerace směřuje cestou co nejmenšího zatěžování životního prostředí při relativně vysokém energetickém zhodnocení paliva. V tomto směru ji umocňuje využití palivového článku jako primární jednotky.

V této práci by mohly být detailněji popsány statě, které jsou zmíněny pouze okrajově. Jsou jimi například primární jednotky a akumulátory tepla.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOLOUBEK, D.: *Kombinovaná výroba elektriny a tepla, trigeneracia a tepelná sieť*, TU Košice, 159 s., ISBN: 978-80-8073-775.
- [2] KRBEK, J.: *Zásobování teplem a kogenerace*, 1. vyd. Brno, 1999, 143 s. ISBN 80-214-1347-6.
- [3] DVORSKÝ, E. HEJTMÁNKOVÁ, P.: *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*, 1. vyd., Praha: BEN, 2005, 288 s., ISBN 80-7300-118-7.
- [4] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E., SEKANINA, B., KAVIČKA, F., JÍCHA, M.: *Termomechanika*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 286 s. ISBN: 80-214-2409-5.
- [5] ALEFELD, G., RADERMACHER, R.: *Heat conversion systems*, Boca Raton: CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-8928-3
- [6] BÄCKSTRÖM, M., *Technika chlazení*, 2. vyd., Praha, 1959, 680 s.
- [7] KARAFIÁT, J. a kol.: *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla* [online], Praha: ORTEP, s.r.o., 2006, URL: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>>, [cit. 2010-3-3].
- [8] KAMINSKÝ, J., KOLARČÍK, K.: *Kompresory* [online] URL: <<http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/PS/kompresory-skripta.pdf>>, [cit. 2010-3-25].
- [9] POSPÍŠIL, J.: *Obnovitelné zdroje energie v teplárenství, Dálkové zásobování chladem* [online], Brno, 2009, URL: <<http://oei.fme.vutbr.cz/teplarenstvi/papers2009/2009-TSCR-Pospisil-OEZ-v-teplarenstvi-a-zasobovani-chladem.pdf>>, [cit. 2010-3-20].
- [10] MATUŠKA, T.: *Solární tepelné soustavy pro přípravu teplé vody a vytápění*, [online], Praha, 2010, URL:<[http://solab.fs.cvut.cz/Dokumenty/Kestazeni/2010/solarni\\_soustavy\\_ECCB\\_2012.pdf](http://solab.fs.cvut.cz/Dokumenty/Kestazeni/2010/solarni_soustavy_ECCB_2012.pdf)> [cit. 2010-5-16].
- [11] *Kogenerace*, EkoWATT CZ s. r. o. [online] URL: <<http://www.ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml>>, [cit. 2010-4-14 ].
- [12] *Cogeneration – CHP*, Self Energy [online] URL: <[http://www.selfenergy.co.uk/decentralised-energy-generation/cogeneration\\_-\\_chp/](http://www.selfenergy.co.uk/decentralised-energy-generation/cogeneration_-_chp/)>, [cit. 2010-4-25].
- [13] *Wie arbeitet der Stirlingmotor?*, Peter Fette [online] URL: <<http://peterfette.gmxhome.de/howdo.htm>>, [cit. 2010-5-6].

- [14] *TRI - GENERATION – CHP- COMBINED HEAT & POWER*, 2G Bio – Energietechnik, [online]  
URL: <<http://2g-cenergy.com/trigen-more.html>>, [cit. 2010-5-10].
- [15] *Kompresory*, SAMAD-Průmyslová technika s.r.o. [online]  
URL: <<http://www.samad.cz>>, [cit. 2010-4-1].
- [16] *Měkké a tvrdé freony*, EkoList [online]  
URL: <<http://ekolist.cz/zddot152freon.htm>>, [cit. 2010-3-20].
- [17] *Kogenerační jednotky*, TEDOM s.r.o. [online]  
URL: <<http://kogenerace.tedom.cz/galerie.htm>>, [cit. 2010-5-10].
- [18] *Palivové články*, ENVIROS, s. r. o. [online]  
URL: <[http://www.enviros.cz/palivove\\_clanky/1\\_palivove\\_clanky.html](http://www.enviros.cz/palivove_clanky/1_palivove_clanky.html)>, [cit. 2010-4-4].
- [19] *Výroba elektřiny*, ČEZ s.r.o. [online]  
URL: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny>>, [cit. 2010-5-20].
- [20] *Zásobníky tepla*, TZBinfo [online]  
URL: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=1950&h=13&pl=49>>, [cit. 2010-5-16].
- [21] *Akumulace tepla v teplé vodě nebo v topné vodě?*, Topenářství, instalace [online]  
URL: <<http://www.techtranspt.com/data/files/topenarstvi-instalace-01-2007.pdf>> [cit. 2010-5-16].
- [22] *Vytápění nemovitostí*, Ave SOLAR [online]  
URL: <<http://www.avesolar.cz/vytapeni.htm>>, [cit. 2010-5-17].

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b>	Blokov schéma kogenerační jednotky s pstovm motorem [11]	13
<b>Obr. 2</b>	Přehled energií vznikajících př kogeneraci a oddlen výrobě tepla a elektřiny [12]	14
<b>Obr. 3</b>	Oběh s parní turbínou <b>a)</b> protitlakou <b>b)</b> kondenzační	16
<b>Obr. 4</b>	Oběh s plynovou turbínou	16
<b>Obr. 5</b>	Stirlingův motor [13]	17
<b>Obr. 6</b>	Princip palivového článku [18]	18
<b>Obr. 7</b>	Princip kombinovan výroby elektřiny, tepla a chladu [14]	19
<b>Obr. 8</b>	Msn diagram spotřeba tepla [7]	20
<b>Obr. 9</b>	T-s diagram kompresorového chlazen [4]	22
<b>Obr. 10</b>	Kompresorové chlazen	22
<b>Obr. 11</b>	Kompresor <b>a)</b> pstov, <b>b)</b> řroubov, <b>c)</b> pstov [15]	24
<b>Obr. 12</b>	Schematick znzornn absorpčního chlazen [9]	25
<b>Obr. 13</b>	Závislost teploty chladiva na tlaku [4]	26
<b>Obr. 14</b>	Individuln zásobování chladem	28
<b>Obr. 15</b>	Soustava s centralizovanou výrobou chladu	28
<b>Obr. 16</b>	Soustava vyuřvajc CSCH s kompresorovm chlazenm	29
<b>Obr. 17</b>	Soustava vyuřvajc CSCH s absorpčním chlazenm	29
<b>Obr. 18</b>	Sezónní zásobníky tepla [10]	31
<b>Obr. 19</b>	Krtkodob zásobník tepla [22]	31
<b>Obr. 19</b>	Kogenerační jednotka v kontejnerovm proveden [17]	33

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b>	Porovnání teplotenskho modulu určitých primárních jednotek [1]	15
<b>Tab. 2</b>	Porovnání chladících oběhů [9]	27
<b>Tab. 3</b>	Obvykl hodnoty emisí některých primárních jednotek [1]	34

## POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

PJ	primární jednotka
KVET	kombinovaná výroba energie a tepla
COP	coefficient of performance
CVCH	centralizovaná výroba chladu
TZL	pevné znečišťující částice

## POUŽITÉ PROMĚNNÉ

$\varepsilon_{CH}$	[-]	chladicí faktor
$Q_{chl}$	[J]	teplo, tepelný výkon
E	[J]	energie
T	[K]	absolutní teplota
W	[J]	dodaná energie
p	[Pa]	tlak
t	[°C]	teplota