



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

STANISLAV VÍTEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Stanislav Vítek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Trigenerace

v anglickém jazyce:

Trigeneration

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na oblast společné výroba el. energie, tepla a chladu. Vlastní náplní je porovnání trigeneračních technologií využívající pro produkci chladu kompresorové a absorpční chladicí oběhy.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat přehled používaných kogeneračních technologií.
2. Popsat realizaci trigenerační technologie pro společnou dodávku el. energie, tepla a chladu.
3. Porovnat trigenerační technologie užívané pro produkci chladu kompresorového a absorpčního oběhu.

Seznam odborné literatury:

Prof. Dvořák, Chladicí technika, skriptum ČVUT

Dvorský Emil, Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, 2005

Herold, Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC PRESS, 2000

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 15.11.2010

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je představit princip a přednosti kogenerace a následně trigenerace. Jsou zde popsány používané kogenerační primární jednotky, které přeměňují energii obsaženou v palivu na potřebnou formu energie. Další část práce se zabývá srovnáním kompresorového a absorpčního chlazení. Závěrem bakalářské práce je ekonomické zhodnocení nákladů u všech uvažovaných chladicích systémů s ohledem na životnost soustavy.

KLÍČOVÁ SLOVA

kogenerace, primární jednotky kogenerace, trigenerace, kompresorové chlazení, absorpční chlazení

ABSTRACT

The aim of this thesis is present procedure and advantages of cogeneration and trigeneration. There are described primary cogeneration units which transform energy contained in fuel to required form of energy. Another part of the work deals with comparison of cooling technologies, namely vapour-cycle and absorption cycles. At the conclusion of the bachelor thesis, the economic assessment is present for all considered for cooling systems with reference to durability of the system.

KEY WORDS

cogeneration, primary cogeneration units, trigeneration, compressor cooling, absorption cooling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÍTEK, S. Trigenerace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Blansku dne 26. 5. 2011

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu při konzultacích. Dále pak své rodině a přítelkyni za podporu.

OBSAH

Úvod.....	10
1. Kogenerace	11
1.1 Definice a princip kogenerace.....	11
1.2 Energetická bilance oddělené a kombinované výroby.....	12
1.3 Výhody kogenerace.....	12
1.4 Technologie a transformace energií	13
1.5 Rozdělení primárních jednotek (PJ).....	14
1.6 Primární jednotky s vnějším spalováním	16
1.6.1 Parní turbíny	16
1.6.2 Organický Rankinův cyklus.....	17
1.6.3 Plynové turbíny.....	18
1.6.4 Mikroturbíny	19
1.6.5 Paroplynový cyklus.....	20
1.6.6 Stirlingův motor.....	21
1.7 Primární jednotky s vnitřním spalováním	23
1.7.1 Spalovací motory	23
1.8 Primární jednotky bez tepelného oběhu	24
1.8.1 Palivové články.....	24
1.9 Vzájemné porovnání primárních jednotek	27
2. Trigenerace.....	28
2.1 Princip trigenerace	28
2.2 Výhody a nevýhody trigenerace.....	29
3. Chladírenské technologie	31
3.1 Kompresorové chlazení.....	32
3.1.1 Pístové kompresory.....	33
3.1.2 Šroubové kompresory	33
3.1.3 Odstředivé kompresory	34
3.1.4 Chladiva	34
3.2 Absorpční chlazení.....	35
3.3 Ejektorové chlazení.....	37
4. Porovnání absorpčního a kompresorového chlazení.....	38
5. Závěr	42
Zdroje informací	43
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	46

Úvod

V současné době energetika řeší dva hlavní problémy světového rázu. Jeden z problémů je energetická náročnost lidské populace. To je úzce spojeno s navyšováním počtu lidské populace na zeměkouli. Každý člověk je závislý na energii, aby mohl vykonávat své potřeby k žití. Potřeby jsou závislé i na komfortu a stylu lidského života. Jako druhý problém je chápán dopad výroby energie na životní prostředí. Tento problém je v současné chvíli velice často propírán širokou veřejností a občas i některé projekty z tohoto důvodu zkrachují.

V dnešní době rapidně ubývají lehce dostupná fosilní paliva. Z tohoto důvodu se hledají další technologie pro výrobu energie a zvyšování výtěžnosti z paliva. Obnovitelné zdroje se ukazují jako nedostatečné a navíc jsou s nimi spojeny problémy při začlenění do elektrické sítě. Proto vývoj energetiky směřuje ke zvýšení výtěžnosti z paliva, které by mělo být lehce dostupné a samotná konstrukce soustavy by neměla být příliš složitá, neboť hlavním faktorem je ekonomičnost provozu a prvotní investice.

Těmto požadavkům vyhovují technologie „kogenerace“ a „trigenerace“. Palivo je tu přeměněno na elektrickou energii a využitelnou tepelnou energii, kterou je možno přeměnit na chlad. Tento způsob sdružuje oddělené způsoby výroby energií a tak se šetří palivo, tudíž i výtěžnost z paliva. Jelikož se šetří palivo, tak se i tím snižuje dopad na životní prostředí.

V energetice se také začínají řešit způsoby výroby energií decentralizovaně (přímo u spotřebitele). Tyto zdroje energií mají zpravidla jen malé výkony. Druhým možným způsobem je výroba energie centralizovaně, kdy je vyráběná energie o velkých výkonech umístěna mimo odběratele.

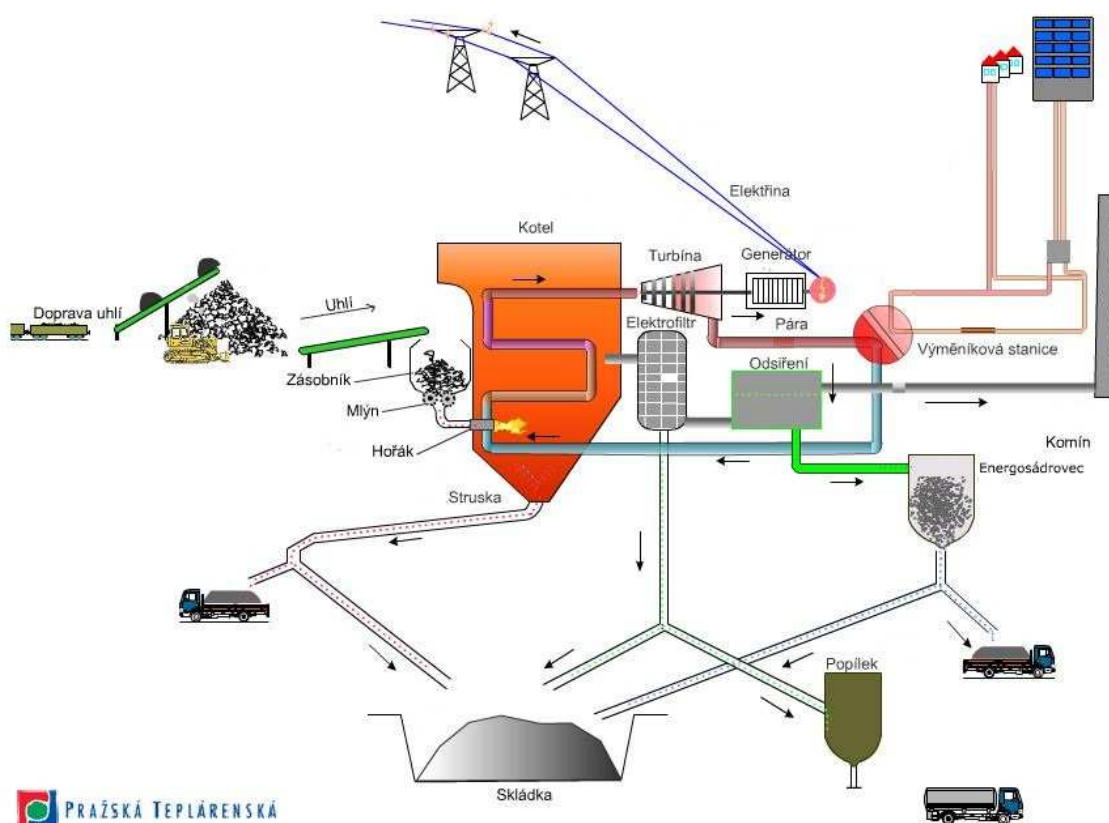
1. Kogenerace

Tepelná energie byla odjakživa důležitá k životu. Další energie, bez které si mnoho lidí už nedokáže život představit, je elektrická energie. Proto tyto dva druhy energie je potřeba stále vyrábět. Jde jen o to jakou technologií, aby byla vhodná z přírodního hlediska a také výhodná z hlediska ekonomického. Těmto požadavkům zcela vyhovuje kogenerace, kterou získáváme elektrickou a zároveň i tepelnou energii.

1.1 Definice a princip kogenerace

Dříve se tepelná i elektrická energie vyráběla a stále vyrábí odděleně. Proto vznikají dvoje ztráty. Díky kogeneraci, která tyto dvě energie vyrábí zároveň, razantně snižujeme ztráty i spotřebu paliva a s tím spojené množství emisí. Proto alternativní název pro kogeneraci je „kombinovaná výroba elektřiny a tepla“ (KVET).

Princip kogenerace je jednoduchý. Při oddělené výrobě elektrické energie v elektrárnách vznikají ztráty. Největší podíl ztrát má vypouštění odpadního tepla do okolí (chladicí věže). Kogenerace využívá i toto „odpadní teplo“ a posílá je do tepelné sítě na vytápění.



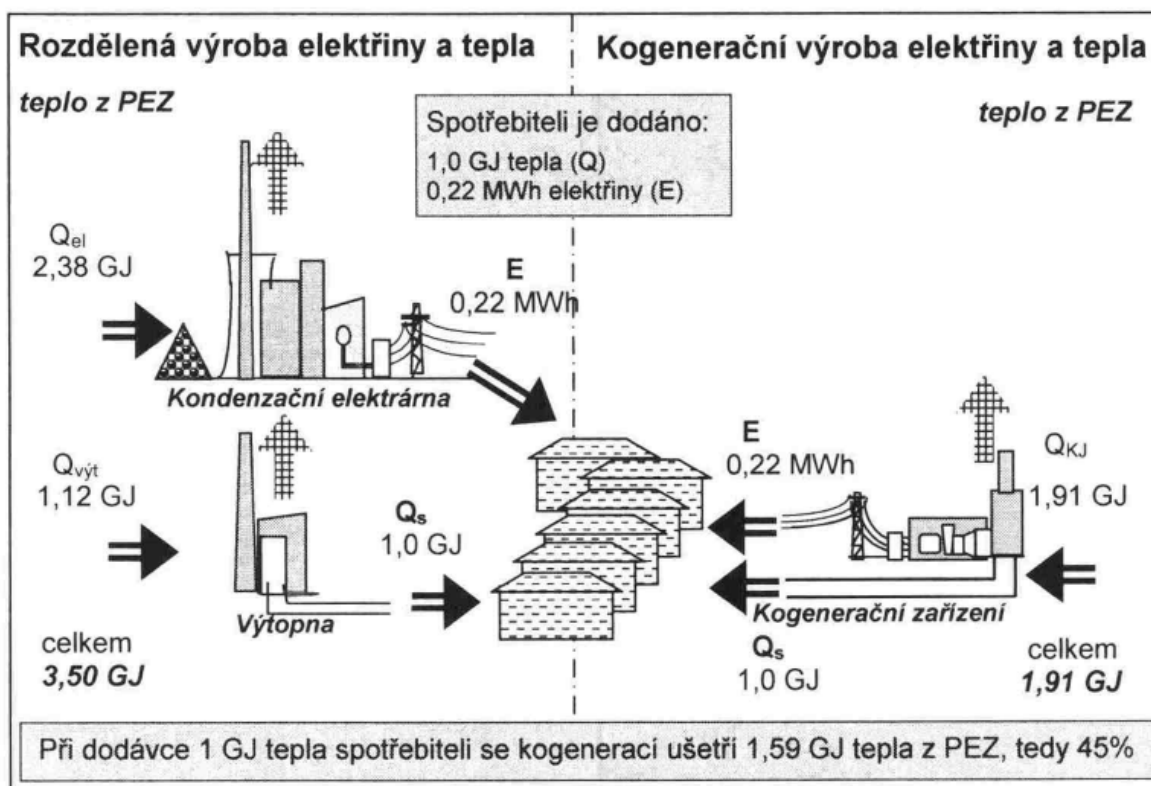
Obr. 1 Schéma kogenerační jednotky s kondenzační turbínou [10]

Jak je z obrázku zřejmé, uvolnění energie z uhlí dochází v kotli. Energie ze spalování uhlí je předávána pomocí soustavy trubek (výparník, přehřívák, ohřívák,...) ohříváné vodě, která se mění na páru. Vyrobená pára jde na turbínu, kde část své tepelné energie pomocí turbíny přemění na mechanickou energii, která je pomocí generátoru přeměněna na elektrickou energii. Zbylá tepelná energie „páry“ se ve výměníku předá jiné kapalině, kterou se vytápí obytné budovy.

1.2 Energetická bilance oddělené a kombinované výroby

Budeme vycházet z předpokladu, že při výrobě tepla ve výtopně se přeměna energie z primárního energetického zdroje (PEZ) přeměňuje s účinností 90 %. U výroby elektrické energie v kondenzační elektrárně dochází k přeměně energie s účinností 35 %.

Abychom měli konkrétní čísla pro lepší porovnání, budeme uvažovat, že spotřebitel bude odebírat 1,0 GJ tepla a 0,22 MWh elektřiny. Aby teplárna dodala 1,0 GJ tepla odběrateli, potřebuje 1,12 GJ v PEZ a aby kondenzační elektrárna dodala odběrateli 0,22 MWh elektřiny, tak potřebuje 2,38 GJ v PEZ. Při sečtení množství PEZ dojdeme k číslu 3,50 GJ. V případě kombinované výroby energií pomocí kogenerační jednotky pro potřebu spotřebitele potřebujeme v PEZ 1,91 GJ. Když porovnáme oba nároky na PEZ dojdeme k závěru, že s kombinovanou výrobou energií je možné ušetřit 45 % PEZ.



Obr. 2 Energetická bilance oddělené a kombinované výroby [6]

1.3 Výhody kogenerace

- Úspora paliva

K úspoře paliva dochází, jelikož se spotřebuje přibližně o 45 % méně paliva. K této úspoře dochází, protože tepelná a elektrická energie se vyrábí na jednom místě a z jednoho společného paliva. Vzhledem k tomu, že dochází k úspoře paliva, tak se i pozitivně mění celková účinnost. Dochází i ke snížení emisí jelikož se spálí méně paliva.

- Snadná aplikace i na starší zaběhlé procesy

Možnost napojit se na v současné době už zaběhlé provozy výroby energií. Například u kondenzačních elektráren stačí před chladicí věž (nebo místo ní) dát tepelný výměník, který bude propojen s tepelnou sítí.

- Možnost použití obnovitelných zdrojů energie

Jako palivo může být použita biomasa, bioplyn, štěpka, atd., ať už jen z části nebo z úplného pokrytí potřeb výroby.

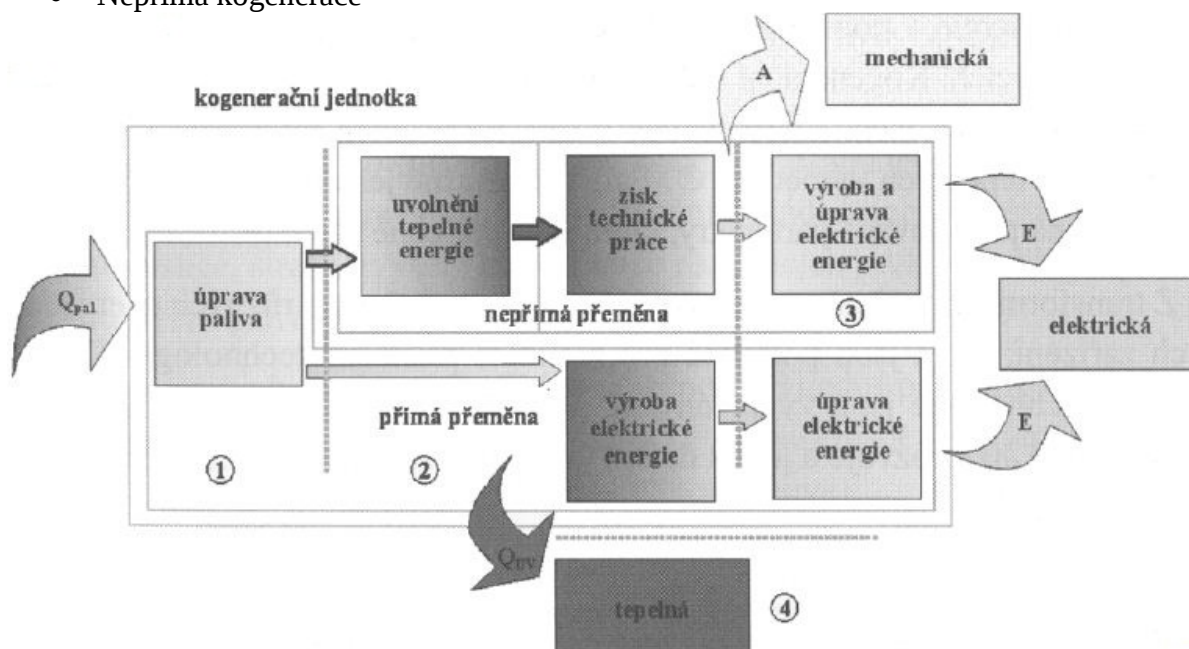
- Možnost decentralizované výroby energií

Jedna z možností použití kogenerace je pro odlehle usedlosti nebo jako denní výroba energií popřípadě i jako nouzový zdroj energie pro větší komplexy (školy, nemocnice, hotely,...).

1.4 Technologie a transformace energií

Kogenerace pracuje na základech termodynamiky. Z druhého zákona víme, že žádný stroj nepřetváří ekvivalentně energii paliva na energii získanou. Důvodem je např. únik tepla nedostatečnou izolací nebo tření pohyblivých částí. Z prvního zákona víme, že energie nevzniká ani nezaniká, jen se mění z jedné formy do druhé. Proto existují dva způsoby technologie přeměny energií v kogenerační výrobě:

- Přímá kogenerace
- Nepřímá kogenerace



Obr. 3 Technologie transformace energií v kogeneraci [3]

Při *nepřímé kogeneraci* se provádí transformace většinou ve třech krocích přeměny. Nejprve se uvolní teplo obsažené v palivu. Teplo přeměníme na technickou práci, která se dále mění na mechanickou energii, která se následně mění v generátoru na elektrickou energii.

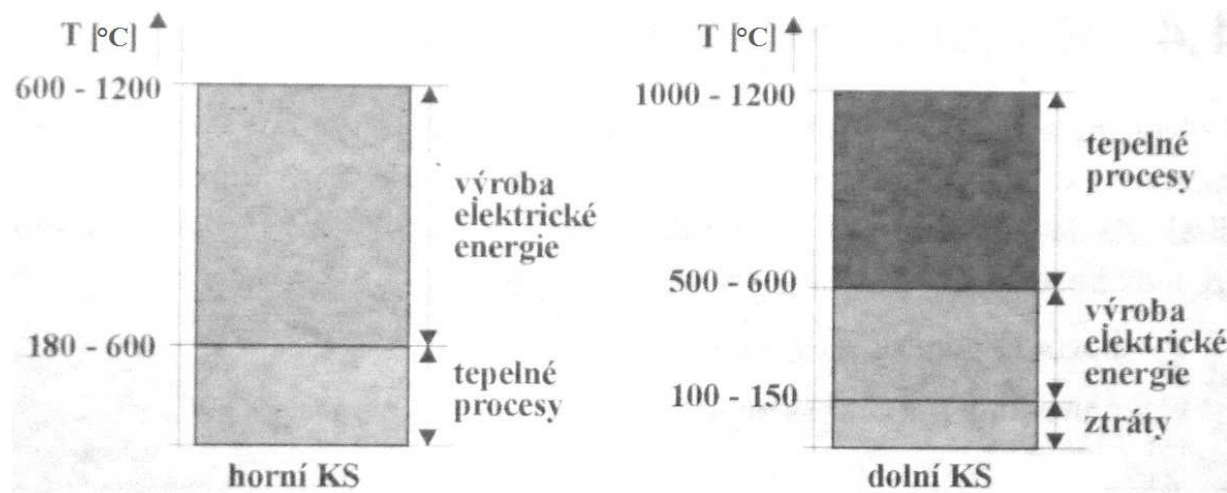
U *přímé kogenerace* dochází k přeměně energie z paliva přímo na elektrickou energii. Tento způsob přeměny se teprve vyvíjí. Tento způsob přeměny energie používají pouze palivové články.

Záleží i na tom jestli kogenerační jednotku využíváme hlavně na výrobu elektrické energie nebo elektrickou energii vyrábíme až na druhém místě. To znamená, že vysokoteplotní médium využijeme pro nějaký výrobní proces (např. v ocelárnách, sklárnách, cementárnách) a pak už ochuzené médium (nizkoteplotní) se pošle třeba na expanzní turbínu. Proto kogenerační systémy můžeme charakterizovat jako:

- Horní kogenerační systémy
- Dolní kogenerační systémy

Horní kogenerační systémy jsou ty, u kterých je hlavní prioritou výroba elektrické energie. Vysokoteplotní médium (spaliny, pára) se využívá pro pohon stroje na výrobu elektřiny.

Dolní kogenerační systémy jsou tudíž ty, kde se vysokoteplotní médium nejprve využije v technologickém procesu. Odtud odchází nizkoteplotní médium, které je svedeno na pohon stroje na výrobu elektřiny. Tyhle spojitosti jsou znázorněny v následujícím obrázku (obr. 4).



Obr. 4 Teplotní rozsah kogeneračních systémů [3]

Při výrobě energií se řeší i problém dopravy energie, neboť čím větší vzdálenost ke spotřebiteli tím jsou větší ztráty. Jelikož kogenerace může být použita jak pro velké výkony tak i pro malé, můžeme kogenerační systémy rozdělit:

- Centralizované systémy (dálkové)
- Decentralizované systémy (lokální)

1.5 Rozdělení primárních jednotek (PJ)

Kogenerační soustavy je možné rozdělit do 3 skupin podle elektrického výkonu:

- Mikro-kogenerace – výkon do 50 kW_E
- Mini-kogenerace – výkon do 500 kW_E
- Malá kogenerace – výkon do 1 MW_E
- Střední kogenerace – výkon do 50 MW_E
- Velká kogenerace – výkon nad 50 MW_E

Primární jednotky je možné rozlišovat podle druhu paliva, neboť každá jednotka pracuje trochu jinak a má i různé nároky na kvalitu paliva, ale o tom později.

Základní rozdělení paliv s příklady:

- Tuhá - pevná (uhlí, dřevo, brikety, štěpky, biomasa, ...)
- Kapalná (plynový olej, těžký topný olej, kapalné uhlovodíky, ...)
- Plynná (plynné uhlovodíky, koksárenský plyn, bioplyn, ...)

Každý kogenerační systém se skládá z těchto čtyř hlavních částí:

- Primární jednotky (motor, turbína, ...)
- Elektrického generátoru včetně zařízení pro připojení na elektrickou síť
- Kotle a výměníků tepla včetně propojení na tepelnou rozvodnou síť
- Řídicího a kontrolního systému

Primární jednotka je srdcem celého systému kogenerace. Ostatní podsystemy se odvíjejí na volbě primární jednotky.

Primární jednotky se mezi sebou porovnávají pomocí:

- **Celková energetická účinnost:** je definována jako poměr elektrické energie a užitečného tepla ku energii v palivu neboli spotřebě paliva.

$$\eta_{kogen} = \eta_e + \eta_t = \frac{E + Q}{Q_{pal}} [-]$$

(1) - Celková energetická účinnost [1]

$\eta_e [-]$ – elektrická účinnost
 $\eta_t [-]$ – tepelná účinnost
 $E [W]$ – vyrobená elektřina
 $Q [W]$ – užitečné teplo
 $Q_{pal} [W]$ – energie v palivu

- **Měrná spotřeba paliva na výrobu elektřiny a tepla:** je převrácenou hodnotou celkové energetické účinnosti.

$$q_{pal} = \frac{1}{\eta_{kogen}} = \frac{Q_{pal}}{E + Q} [-]$$

(2) - Měrná spotřeba paliva [1]

- **Teplárenský modul σ :** vyjadřuje poměr produkované elektřiny k produkovanému užitečnému teple. V zahraniční literatuře je teplárenský modul značen jako C_m faktor nebo jako poměr elektrické energie k teple e nebo také jako Power to Heat Ratio (PHR).

$$\sigma = C_M = e = PHR = \frac{E}{Q} = \frac{\frac{E}{Q_{pal}}}{\frac{Q}{Q_{pal}}} = \frac{\eta_e}{\eta_t} [-] \quad (3) - \text{Teplárenský modul [1]}$$

1.6 Primární jednotky s vnějším spalováním

U těchto primárních jednotek dochází ke spalování paliva mimo primární jednotku. Spalování paliva dochází například v kotli.

Do této skupiny primárních jednotek patří například:

- Parní turbíny
 - o Kondenzační turbíny
 - o Protitlaké turbíny
- Organický Rankinův cyklus
- Plynové turbíny
- Mikroturbíny
- Paroplynový cyklus
- Stirlingův motor

1.6.1 Parní turbíny

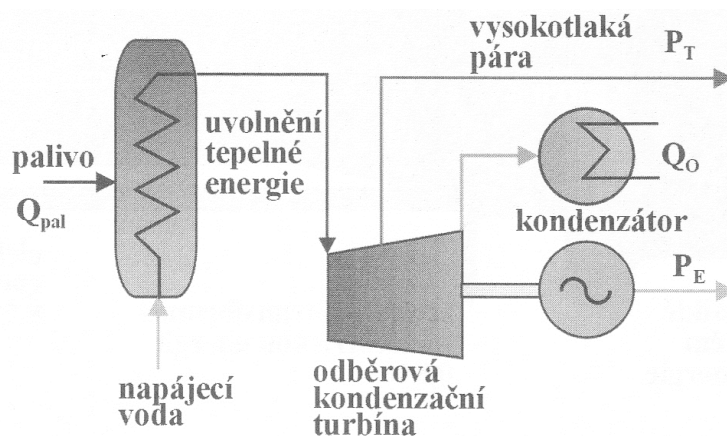
Použití parních turbín je jedním z nejstarších typů technologie v kogenerační výrobě. Parní turbíny pracují na principu Rankinova cyklu (RC). Energie z paliva se uvolňuje většinou ve spalovací komoře parního generátoru. Uvolněná energie se předává vodě, která přichází do parního generátoru o vysokém tlaku, kde mění své skupenství na páru. Vyrobená pára je vedena na turbínu, kterou roztáčí a následně pohání elektrický generátor, který vyrábí elektrickou energii. Dále je již potřeba odlišovat jaký typ turbíny je použitý.

Známe dva typy turbín:

- Kondenzační turbína
- Protitlaká turbína

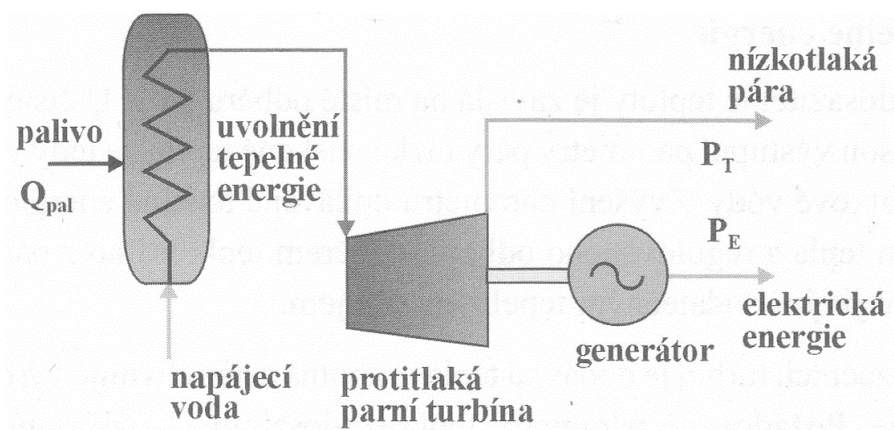
Typy turbín se od sebe odlišují tím, jestli je z turbíny odebírána vysokotlaká pára a zbytek páry jde do kondenzátoru. V tom případě se jedná o kondenzační turbínu. Jestli je veškerá pára využita v turbíně, kde na konci turbíny odchází nízkotlaká pára, jde o protitlakou turbínu.

Kondenzační turbína se používá, když se upřednostňuje výroba elektrické energie. Jelikož se v turbíně zpracovává většina teplotního spádu, přichází do kondenzátoru pára o nízkém tlaku (0,002 – 0,01 MPa), která se již nedá užitečně využít. Tento problém je možno řešit regulovaným odběrem páry z turbíny popřípadě u výstupu z parního generátoru.



Obr. 5 Zjednodušené schéma zapojení kondenzační turbíny [3]

U *protitlakých turbín* je nízký zisk elektrické energie, proto tento typ turbín je hojně využíván, tam kde chceme získávat převážně tepelnou energii. Z turbíny vychází pára o tlaku 0,11 - 0,6 MPa. Pokud potřebujeme vysokotlakou páru, je možnost zavedení regulovaného odběru páry jako u kondenzačních turbín. Nevýhodou protitlakých turbín oproti kondenzačním turbínám je, že výroba elektrické energie je závislá na odběru tepelné energie.



Obr. 6 Zjednodušené schéma zapojení protitlaké turbíny [3]

Výhody a nevýhody parních turbín.

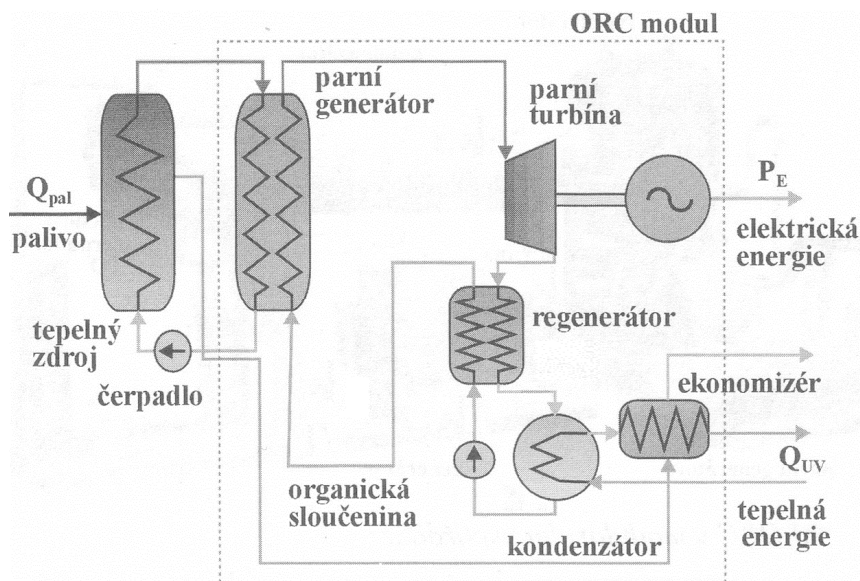
Výhody	Nevýhody
Vysoká účinnost	Nízký teplotní modul
Možnost použití i levných paliv	Vysoké náklady
Teplotní modul je flexibilní	Pomalý rozběh
Dlouhá životnost	Nároky na zastavovaný prostor
Možnost odběru specifických par	
Velký výkonový rozsah	
Možnost využití odpadního tepla	

1.6.2 Organický Rankinův cyklus

Organický Rankinův cyklus (ORC) pracuje na stejném principu jako parní turbíny, neboť mají podobný tepelný cyklus. Odlišuje se v použití teplotního média, které se odpařuje i při nižších teplotách (80 – 300 °C). V parních turbínách je teplotní médium voda, která se mění na páru. V případě ORC je pracovní látkou organická látka např. toluen, isooktan, isopentan nebo silikonový olej, který se odpařuje i při 40 °C. Nevýhodou organických látek oproti vodě je např. vysoká cena, nižší výparné teplo. Tento problém se řeší větším hmotnostním tokem. Látky jako např. toluen jsou zdraví škodlivé. Vzhledem k tomu, že pracovní látka se odpařuje při nízkých teplotách. Otevírá se nám cesta využití odpadového tepla, geotermálních zdrojů nebo i biomasy. Jako u parních turbín oddělený oběh pracovní látky zabraňuje znečišťování spalinami.

Organický rankinův cyklus pracuje tak, že se přivede nízkopotenciální teplo do parního generátoru, kde se odpaří např. silikonový gel, který pohání parní turbínu a ta roztáčí generátor. Za parní turbínou je regenerátor, kde se zbylé teplo obsažené v médiu předává na předehřívání silikonového gelu před vstupem do parního generátoru. Za regenerátorem je kondenzátor. V kondenzátoru dochází k odebrání výparného tepla teplotního média a je

předáváno vodě, která je určena k vytápění. Z kondenzátoru putuje silikonový olej přes regenerátor zpátky do parního generátoru. Tímto je uzavřen ORC cyklus.



Obr. 7 Zjednodušené schéma zapojení ORC [3]

Výhody a nevýhody ORC.

Výhody	Nevýhody
Dlouhá životnost	Vysoké náklady
Využití biomasy a obnovitelných zdrojů	Pomalý rozběh
Využití nízkopotenciálního tepla	
Vysoká pohotovost	

1.6.3 Plynové turbíny

Plynové turbíny jinak řečeno spalovací turbíny jsou v dnešní době nejpoužívanější primární jednotky v kogenerační výrobě. Plynové turbíny pracují na základě Braytonova cyklu. Na rozdíl od parních turbín se využívají k přenosu energie spaliny nikoliv pára.

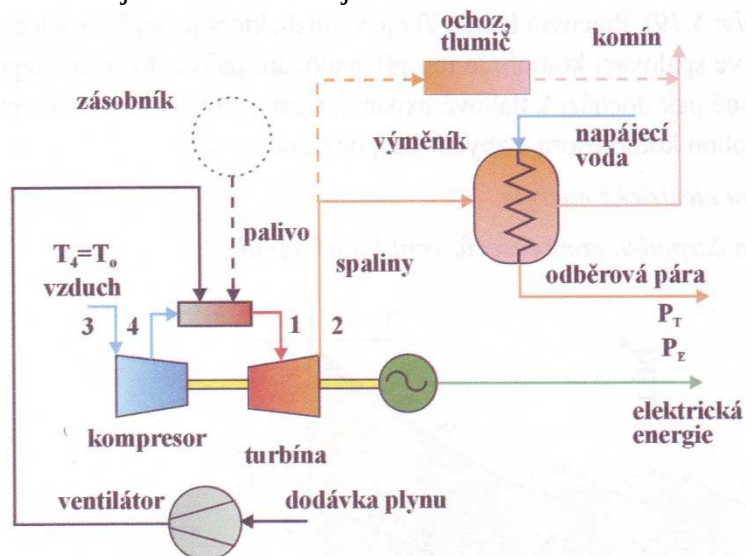
Před vstupem do spalovací komory je vzduch stlačen pomocí kompresoru. Ve spalovací komoře dochází ke spalování paliva, kde stlačený vzduch získává tepelnou energii. Spaliny proudí na turbínu, kterou roztáčí a dochází k expanzi. Vzniklá technická práce je použita na pohon kompresoru a na pohon generátoru. Spaliny z turbíny odchází na výměník spaliny – voda. Spaliny mají vysokou teplotu (450 – 500 °C), což je možné použít v dalších procesech jako vysokopotenciální zdroj tepla.

Možnosti využití vysokopotenciálního tepla ve spalínách:

- Výroba velmi horké vody
- Výroba páry o nízkém nebo středním tlaku
- Výroba páry v kombinovaných obězích s parními turbínami
- Pro vysoušecí procesy a další procesy, kde není vhodný přímý kontakt se spaliny

Vzhledem k vysokým tlakům a teplotám jsou i vyšší nároky na použité materiály, což zapříčiňuje zvýšení celkové ceny tohoto typu kogenerační jednotky.

Plynové turbíny jsou náročné na kvalitu paliva z důvodu čistoty spalin, které by mohly způsobovat erozi lopatek. Tento způsob výroby energie je často využíván k pokrývání energetických špiček nebo jako záložní zdroj.



Obr. 8 Zjednodušené schéma zapojení plynové turbíny [3]

Výhody a nevýhody plynových turbín.

Výhody	Nevýhody
Vysoká spolehlivost	Omezený výkonový rozsah
Výroba vysokopotenciálního tepla	Spalování probíhá za vysokého tlaku
Není potřeba chladit vodou	Vysoká hlučnost
Použití různých paliv (nafta, LPG, bioplyn, zemní plyn, koksárenský plyn,...)	Nízká účinnost při nízkém výkonu
Nízké emise	Vysoké nároky na čistotu paliva(spalin)
Možnost řízení el. výkonu	Dlouhodobé generální opravy
	Výkon turbíny klesá s rostoucí teplotou okolí

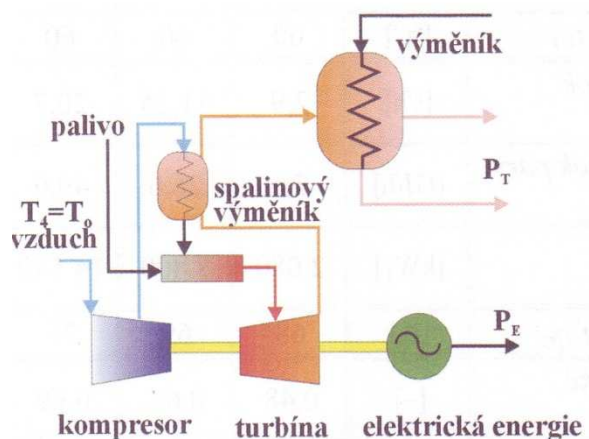
1.6.4 Mikroturbíny

Mikroturbíny pracují na podobném principu jako plynové turbíny, tudíž na Braytonovým cyklu. Mikroturbíny jsou ve své podstatě malé vysokootáčkové turboalternátory. Hlavním rozdílem jsou vysoké otáčky turbíny (cca 100 000 ot/min). Vzhledem k vysokým otáčkám je potřeba vysokootáčkový generátor, který je dále schopen úpravy parametrů elektrické energie. Dalším rozdílem je nižší teplota na vstupu do kompresoru a vyšší teplota vzduchu při vstupu do spalovací komory. U velkých plynových turbín jsou použity axiální kompresory a axiální proudění spalin. Ale u mikroturbín je použito radiálních kompresorů a proudění je také radiální. Teplota spalin odcházející z turbín se pohybuje v rozmezí 220 - 320 °C. Takle tepelná energie je možno využít pro:

- Absorpční chlazení
- Ohřev užitkové vody
- Ohřev topné vody
- Tepelné technologické procesy

Regulace výkonu turbíny se děje regulací otáček kompresoru a změnou teploty spalin na vstupu do turbíny. Za výhodu se dá považovat také rychlé najetí do stoprocentního výkonu, které je v průměru okolo 15 sekund.

Mikroturbíny jsou převážně vyráběny v USA, neboť tahle technologie vznikla právě v USA, při vývoji hybridních pohonů automobilů. U nás v Evropě však tahle technologie nachází uplatnění v decentralizované výrobě a to převážně v kogeneraci.



Obr. 9 Zjednodušené schéma zapojení mikroturbíny [3]

Výhody a nevýhody mikroturbín.

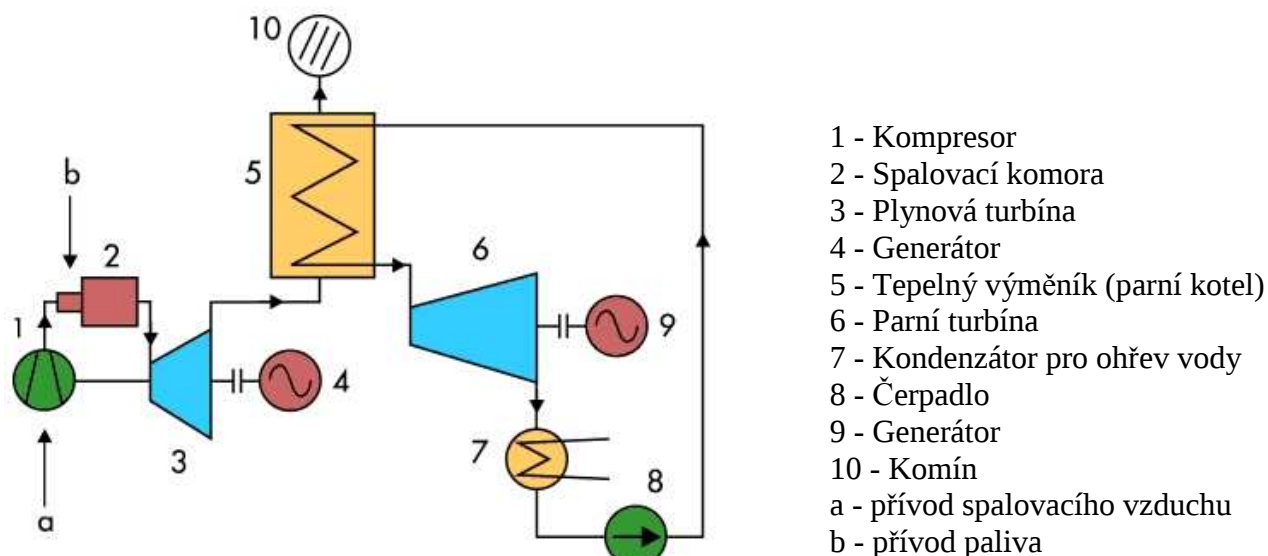
Výhody	Nevýhody
Vysoká spolehlivost kvůli počtu pohyblivých součástí Nízké emise Jednoduchá instalace Nízké nároky na údržbu Malá hmotnost a rozměry Použití více druhů paliv Možnost využití odpadního tepla Rychlý start	Vysoké investiční náklady

1.6.5 Paroplynový cyklus

Kombinací základních typu termodynamických cyklů vznikají nové kombinované cykly. Nejznámější je kombinace Braytonova cyklu s Rankinovým cyklem, této kombinaci se říká *paroplynový cyklus*. V praxi je tato kombinace složena z plynové turbíny, ze které vychází vysokopotenciální teplo ve formě spalin. Teplo obsažené ve spalinách je pomocí tepelného výměníku spaliny-voda předáno vodě, která se přemění na páru. Vyrobená pára pohání parní turbínu. Za turbínou je kondenzátor, kde je část zbylé energie obsažené v páře předána vodě určené například pro vytápění. Tímto způsobem získáme dva výstupy elektrické energie a jeden tepelný. Kdyby bylo potřeba větší produkce páry je možnost dát před výměník spaliny-voda přídatné spalování, čímž vzroste teplota spalin. V důsledku vyšší teploty spalin dochází ke zvýšení produkce páry a zároveň vzroste i teplota přehřáté páry.

Spojení těchto cyklů má za důsledek spojení výhod a snižuje nevýhody obou cyklů. Elektrická účinnost plynového oběhu se pohybuje v rozmezí 24 – 40 %. Elektrická účinnost

u parní turbíny se nachází v rozmezí 15 – 35 %. V případě paroplynového cyklu se elektrická účinnost pohybuje od 35 % do 45 %.



Obr. 10 Zjednodušené schéma zapojení paroplynového cyklu [11]

Výhody a nevýhody paroplynového cyklu.

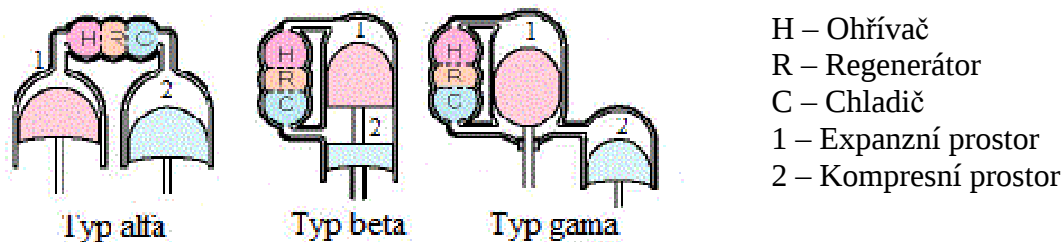
Výhody	Nevýhody
Široký výkonový rozsah Nízké emise Jednoduchá instalace Vysoká elektrická účinnost Vysoká spolehlivost Rychlý start	Vysoké investiční náklady Velké nároky na čistotu a suchost paliva

1.6.6 Stirlingův motor

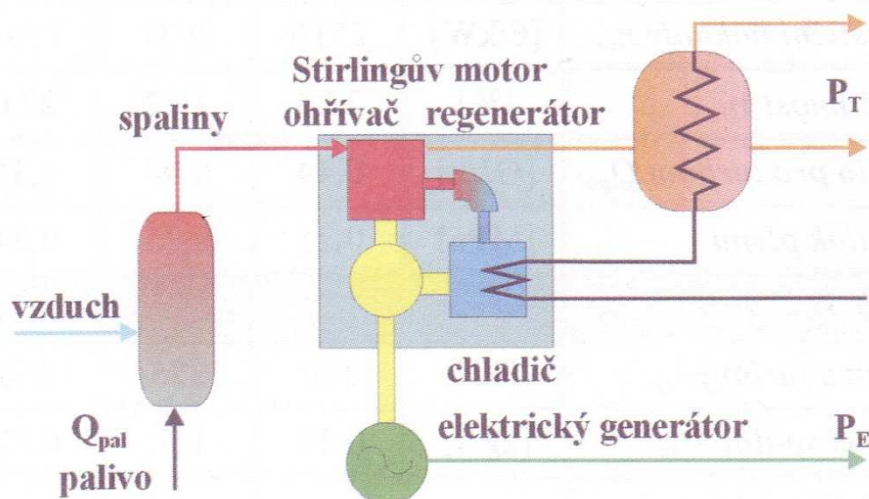
Tato technologie není ještě úplně vyvinuta, proto neexistuje široké uplatnění *Stirlingova motoru*, ačkoliv patent byl vydán už v roce 1816. U tohoto motoru dochází ke spalování mimo něj, neboť se jedná o „motor s vnějším spalováním“. Proto je možné použít různé druhy paliv. Stirlingův motor se skládá ze dvou pracovních prostorů (kompresní a expanzní) a ze tří výměníků tepla (ohřívač, regenerátor a chladič). Všechny části motoru jsou trvale propojeny. Spálením paliva mimo motor a následným přivedením tepelné energie k ohřívači dojde k předání energie pracovní látce (vzduch, helium, metan, CO₂). Tím se ohřívá náplň regenerátoru, který pojaté teplo postupně odevzdává, a tak se podstatně zvětšuje účinnost cyklu. Vzhledem k tomu, že se pracovní látka v ohřívači ohřívá, tím dochází k expanzi látky v expanzním prostoru, čímž se posune píst, který pootočí hřídeli. Na stejné hřídeli je upevněn i kompresní píst, který v kompresním válci stlačí pracovní látku, a tak dojde ke snížení teploty. Dojde až k ochlazení regenerátoru, tím se ukončí expanze látky a expanzní píst se vrátí do výchozí polohy. V chladiči je nejnižší teplota, naproti tomu nejvyšší teplota je v ohřívači a v regenerátoru teplota kolísá v závislosti na průběhu cyklu. Motor pracuje na principu stirlingova cyklu, který se blíží Carnotovu oběhu.

Jsou tři základní typy Stirlingova motoru:

- Typ α , který má dva písty v oddělených válcích. Válce jsou propojeny ohříváčem regenerátorem a chladičem. Tento typ motoru se vyvíjí hlavně pro automobilový průmysl.
- Typ β , který má výtlačný píst a píst v jednom válci. Výtlačný píst prohání pracovní látku mezi ohříváčem a chladičem. Tento typ je klasikou Stirlingova motoru.
- Typ γ , je podobný beta motoru jen s tím rozdílem, že gama motor používá dva oddělené válce. Nevýhodou tohoto typu motoru je velký mrtvý prostor.



Obr. 11 Zjednodušené nákresy jednotlivých typů Stirlingova motoru [12]



Obr. 12 Zjednodušené schéma zapojení Stirlingova motoru [3]

Výhody a nevýhody Stirlingova motoru.

Výhody	Nevýhody
Žádná vnitřní spalovací komora	Malé zkušenosti s nízkými výkony
Nízké emise	První stroje jsou velmi nákladné
Vhodný pro velkovýrobu	
Vhodný pro mikrokogeneraci	
Vysoká teoretická účinnost	
Výroba elektřiny nezávisle na výrobě tepla	
Jednoduchý provoz	
Vysoký výkon v závislosti na zkušenostech	

1.7 Primární jednotky s vnitřním spalováním

Spalování u primárních jednotek s vnitřním spalováním dochází přímo uvnitř jednotky. K hoření paliva většinou dochází ve válci motoru.

Mezi primární jednotky s vnitřním spalováním patří:

- Spalovací motory
 - Vznětový motor
 - Zážehový motor

1.7.1 Spalovací motory

Spalovací motory použité jako kogenerační jednotky je u nás nejrozšířenější typ kogenerační výroby energií. Důvodem je, že stačí použít repasovaný motor z automobilu, navíc se technologický rozvoj za poslední desetiletí posunul značně kupředu.

Existují dva druhy spalovacích motorů:

- Zážehový motor
- Vznětový motor

Oba motory se od sebe odlišují v několika základních bodech:

	Zážehový motor	Vznětový motor
Tepelný oběh	Ottův cyklus	Dieselův cyklus
Typ paliva	Benzín, plynné palivo	Nafta, plynné palivo
Způsob zapálení paliva	Zapálení dochází pomocí elektrické jiskry	Zapálení dochází samovolně díky dosažení zápalných hodnot

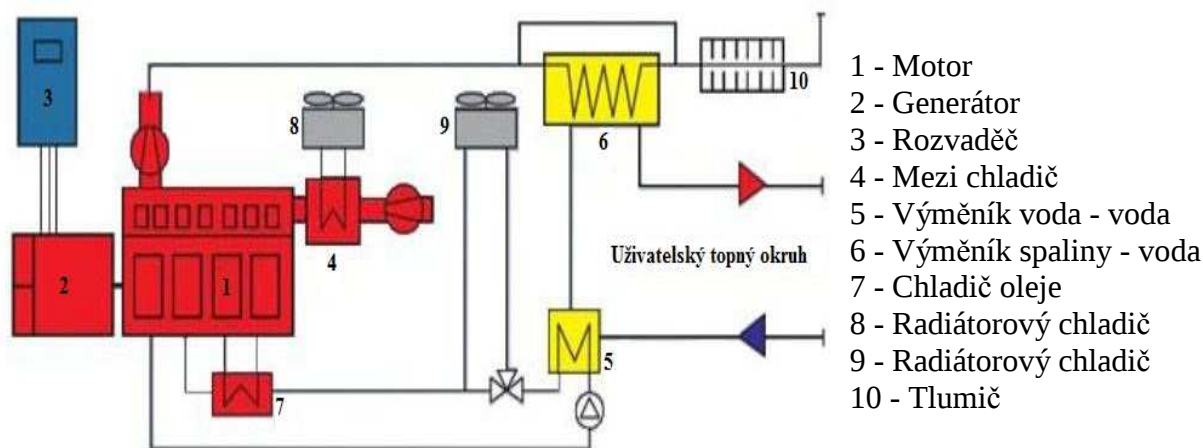
Použití plynného paliva je možné, ale jen po úpravě motoru. U vznětového motoru je přestavba náročnější oproti zážehovému motoru.

Celkově spalovací motory se od sebe liší v počtu taktů. Jsou buď dvoutaktní, nebo čtyřtaktní. V našem případě se využívají hlavně čtyřtaktní motory, neboť snáze splňují environmentální nároky. Dále se mohou odlišovat v počtu válců a jejich uspořádání, ale také podle rychlosti otáčení:

- Pomaloběžné: 55 – 275 ot/min
- Se středními otáčkami: 276 – 1000 ot/min
- Rychloběžné: 1001 – 3600 ot/min

Princip získání energií je jednoduchý. Přivádíme směs paliva a vzduchu do motoru. Palivo je zapáleno ve válci. Dojde k hoření tedy expanzi. Při expanzi se posune píst, který přemění tepelnou energii na mechanickou. Ta je pomocí ojnice přenesena na klikovou hřídel, která se otáčí. Na klikovou hřídel je napojen generátor, který vyrábí elektrickou energii. Tepelná energie je odebírána ze spalin v tepelném výměníku spaliny – voda. Ohřátá voda z výměníku se využívá na vytápění nebo na ohřev teplé užitkové vody (TUV).

Součástí kogenerační jednotky se spalovacím motorem je generátor a dva tepelné výměníky. Jedním výměníkem se chladí blok motoru a mazací olej, v druhém se „chladí“ spaliny (odebíráním tepla).



Obr. 13 Zjednodušené schéma zapojení spalovacího motoru [14]

Výhody a nevýhody spalovacích motorů.

Výhody	Nevýhody
Poměrně nízké investiční náklady	Vysoké nároky na údržbu
Široký výkonový rozsah 3 kWe až 4 MWe	Musí být chlazeny
Vysoká účinnost v širokém rozsahu zatížení	Vysoký teplotní modul (diesel)
Rychlý start	Vysoká úroveň nízkofrekvenčního hluku
Použití různých paliv	
Možnost použití v ostrovním provozu	

1.8 Primární jednotky bez tepelného oběhu

Získání energií dochází pomocí elektrochemické přeměny, kdy je chemická energie přímo přeměněna na elektrickou a tepelnou. Tato přeměna se nazývá „přímá transformace“.

Do této skupinky patří palivové články.

1.8.1 Palivové články

Využití palivových článků je v současnosti intenzivně vyvíjeno, neboť palivové články nabízejí velký potenciál, protože jsou ekologicky čisté, tiché a vysoce účinné. Výzkum je ale finančně velice náročný, proto probíhá jen ve velkých světových firmách. Využití palivových článků se hlavně uvažuje v automobilové dopravě, jako vodíkový pohon nebo v případě decentralizované výroby energie.

Soustava na využití palivových článků v kogeneraci, je tvořena palivovým procesorem, palivovými články, měničem proudu a systémem na rekuperaci tepla.

Existuje několik druhů palivových článků:

- Alkalické články (AFC)
- Články s tuhými polymery (PEMFC)
- Články s kyselinou fosforečnou (PAFC)
- Články s roztavenými uhličitany (MCFC)
- Články s tuhými oxidy (SOFC)

Každý palivový článek má své výhody a nevýhody. Některé jsou vypsány v následující tabulce (tab. 1) společně s dalšími vlastnostmi.

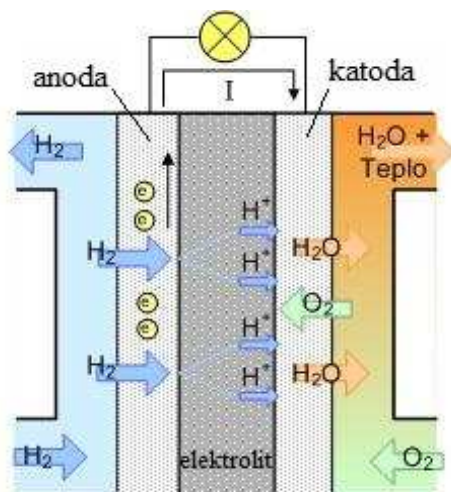
	Palivové články (60 – 120 °C)		Palivové články (160 - 220 °C)	Palivové články (600 – 1000 °C)	
Druh	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Použití	kosmonautika armáda	auta, ponorky, notebooky, KVET	KVET	KVET, loď, železnice	doprava, elektrárny
Charakteristika	žádné škodlivé emise; Vysoká el. účinnost; drahá výroba; nevhodný pro průmyslové využití; nízká životnost	minimální emise; nízká hlučnost; vysoký stupeň vývoje; vhodný pro hromadnou výrobu; drahé na výrobu	žádné škodlivé emise; nízká hlučnost; 3x dražší jako kogenerační zdroj, při trvalém provozu klesá účinnost	účinné využití obsažené energie; nízká hlučnost; nevyžaduje vstupní úpravu plynu; agresivní elektrolyt	účinné využití energie; nízká hlučnost; nevyžaduje vstupní úpravu plynu; tuhý elektrolyt; náročný na materiál
Elektrolyt	roztok KOH	protonová membrána	kyselina fosforečná	alkalické uhličitany	tuhý keramický systém
Palivo	čistý vodík	vodík, zemní plyn, metanol	vodík, zemní plyn	zemní plyn, bioplyn	zemní plyn, bioplyn
Oxidační Činidlo	čistý kyslík	atmosférický kyslík	atmosférický kyslík	atmosférický kyslík	atmosférický kyslík
Elektrická účinnost	60 – 90 %	43 – 58 %	37 – 42 %	> 50 %	50 – 65 %

Tab. 1 Porovnání vlastností palivových článků a jejich využití [1]

Mohlo by se zdát zavádějící použití zemního plynu, metanolu, bioplynu a generátorového plynu jako palivo, když palivové články potřebují vodík k reakci. Ten se však získává v palivovém procesoru například parním reformingem. Tento způsob výroby vodíku je na světě nejrozšířenější, neboť vychází nejlépe po ekonomické stránce.

Princip palivového článku lze nejlépe vysvětlit na palivovém článku s polymerní membránou (PEMFC). Tento palivový článek se skládá ze dvou elektrod, které jsou pokryty vrstvičkou uhlíku, která obsahuje platinu. Tato vrstvička zde slouží jako platinový katalyzátor. Elektrody jsou od sebe odděleny tenkou polymerní membránou, která propouští kladně nabitě ionty (protony). Úkolem polymerní membrány (elektrolyt) je nepropouštění elektronů. Vodík je přiváděn na anodu, kde pomocí katalyzátoru dochází ke štěpení na protony a elektrony. Protony procházejí skrze polymerní membránu. Elektrony jsou nuceny procházet vedlejším okruhem a mohou tedy konat užitečnou práci, čímž je vyráběna elektrická energie. Na katodě pak sloučením dvou protonů vodíku, dvou elektronů a atomu kyslíku vzniká voda (většinou ve formě páry). Na stranu katody je často přiváděn atmosférický kyslík. Tím je myšlený kyslík obsažený volně ve vzduchu. V následujícím obrázku (obr. 14) je znázorněn princip palivového článku (PEMFC).

TRIGENERACE

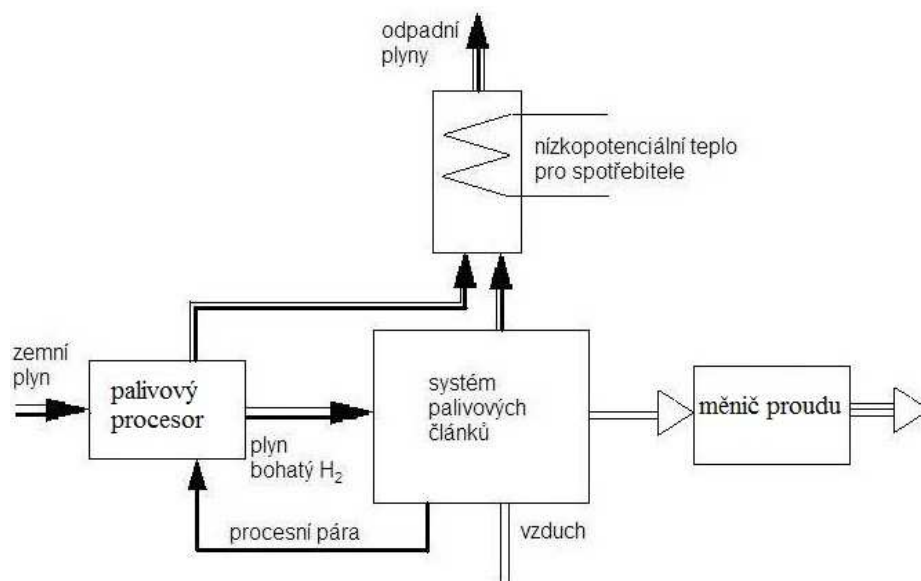


Obr. 14 Zjednodušené znázornění principu palivového článku (PEMFC) [15]

Je zřejmé, že u každého palivového článku probíhá jiná chemická reakce, ale principiálně jsou stejné. V následující tabulce (tab. 2) jsou vypsány chemické reakce.

	Reakce na anodě	Reakce na katodě
AFC	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
PEMFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
PAFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
MCFC	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
SOFC	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4 \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

Tab. 2 Přehled elektrochemických reakcí [16]



Obr. 15 Zjednodušené schéma zapojení palivového článku [6]

Výhody a nevýhody palivových článků.

Výhody	Nevýhody
Nízké emise a nízká uroveň hluku	Vysoké náklady
Vysoká účinnost	Nízká životnost, degradace
Automatický provoz a nízká údržba	Koroze v okolí elektrolitu
Flexibilita	Dlouhý start
Krátká doba instalace	Malá proudová hustota

1.9 Vzájemné porovnání primárních jednotek

V následující tabulce (tab. 3) jsou vypsány primární jednotky a u každé z nich důležité informace, jako je elektrický výkon, celková účinnost a teplotní modul. Vzhledem k hodnotám uvedených v tabulce, je možné se lépe rozhodnout, který typ primární jednotky by se mohl zvolit. Například, že některé jsou spíše pro decentralizovanou výrobu energií a některé jsou naopak vhodné pro centralizovanou výrobu energií, a tedy mají menší elektrický výkon.

Typ PJ	Elektrický výkon	Pohotovost	Elektrická účinnost		Celková účinnost	Teplotní modul
			Jmenovitý výkon	Poloviční výkon		
	[MW]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]
Parní turbíny	0,5 – 100	90 – 95	15 – 35	12 – 28	60 – 85	0,1 – 0,5
ORC	0,3 – 1,8	90 – 94	15 – 20	15 – 20	65 – 85	0,1 – 0,3
Plynové turbíny	0,1 – 100	90 – 95	25 – 40	18 – 30	60 – 80	0,5 – 0,8
Mikroturbína	0,025 – 0,25	90 – 95	30 – 40	20 – 30	65 – 85	0,6 – 0,85
Paroplynový cyklus	4 – 100	77 – 85	35 – 45	25 – 35	70 – 88	0,6 – 2,0
Stirlingův motor	0,003 – 1,5	85 – 90	35 – 50	34 – 49	60 – 80	1,2 – 1,7
Vznětový motor	0,07 – 50	80 – 90	35 – 45	32 – 40	60 – 85	0,8 – 1,4
Zážehový motor	0,015 – 2	80 – 85	27 – 40	25 – 35	60 – 80	0,5 – 0,7
Palivové články	0,04 – 50	90 – 92	37 – 45	7 – 45	85 – 90	0,8 – 1,0

Tab. 3 Vzájemné porovnání primárních jednotek pro kogeneraci [1], [3]

2. Trigenerace

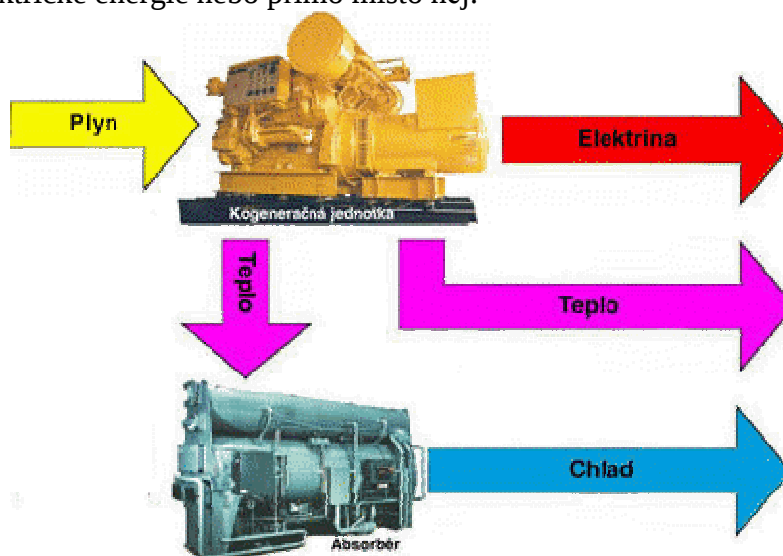
Jak už bylo zmíněno, lidé v současné době potřebují k životu tepelnou energii a dále i elektrickou energii, bez které se v dnešní moderní době neobejdeme. Lidská populace však začíná mít i nároky na celkový celoroční tepelný komfort. To znamená, že v teplém ročním období vznikají požadavky na chlad, proto vzniká poptávka po chladu a tím se otevírají možnosti pro nový trh. Aby se nový trh mohl nasýtit, je potřeba rozvíjet nové technologie, ale i inovovat staré technologie. Je však potřeba stále myslet, zda daná technologie neškodí příliš životnímu prostředí, které je potřeba chránit a dále na ekonomické hledisko.

V současné době je již vyvinuta technologie, která je schopna vyrábět zároveň tepelnou energii, elektrickou energii a dokonce i chlad. Tato technologie se zkráceně nazývá trigenerace, což je kombinovaná výroba elektřiny, tepla a chladu.

2.1 Princip trigenerace

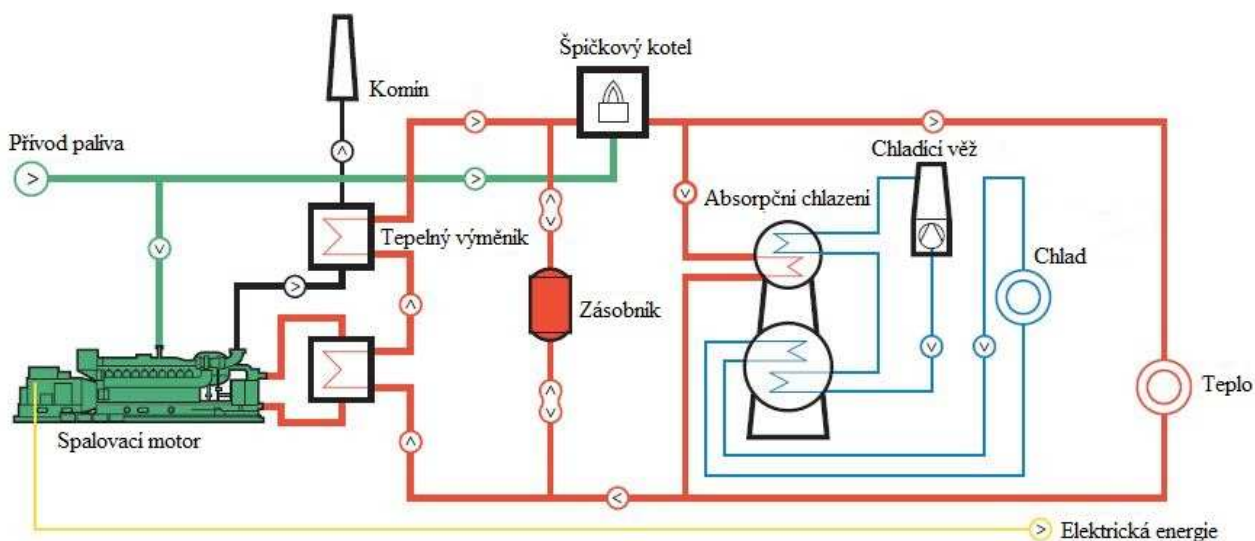
S chlazením se setkáváme dennodenně. Kupříkladu lednice, kde je potřeba skladovat potraviny při nižší teplotě, aby se brzy nezkazily, nebo v dopravních prostředcích, aby se motor nepřehříval. Jinak řečeno kdekoliv, kde je potřeba odebrat nežádoucí teplo či teplo, které je přebytečné. V současné době je výroba chladu pro potřebu tepelné pohody v domácnostech získávána pomocí malých klimatizačních jednotek, které využívají kompresorové chlazení. Jenže pokud je velký rozdíl teplot, musí kompresory pracovat na vysoký výkon, tudíž mají vysokou spotřebu elektrické energie. Proto může docházet k přetížení elektrické sítě z důvodu velkého počtu zapnutých klimatizačních jednotek. Tomu se dá předcházet centralizovanou výrobou chladu. Jako řešení tohoto problému se nabízí trigenerace, která sebou přináší i mnohé výhody.

Trigenerace je jen takovou nástavbou na kogeneraci. Tou nástavbou je myšleno zapojení chladicí jednotky za kogenerační jednotku a tím se dosahuje výroby chladu. Z kogenerační jednotky získáváme teplo a elektřinu. V případě zapojení absorpčního chlazení se využívá hlavně teplo k výrobě chladu. Další možností je zapojení kompresorového chlazení za generátor elektrické energie nebo přímo místo něj.



Obr. 16 Princip trigenerační jednotky s absorpčním chlazením [9]

Detailněji je princip trigenerace znázorněn na následujícím obrázku (obr. 17). V tomto případě je zapojen spalovací motor a absorpční chlazení. Do spalovacího motoru je přiváděno palivo, které je spalováno ve válcích motoru. Pomocí generátoru, který je poháněn spalovacím motorem, získáváme elektrickou energii. Spálením paliva vznikají spaliny, které ženeme na tepelný výměník spaliny - voda, čímž ohříváme vodu, kterou dále využijeme. Vlivem hoření paliva dochází k zahřívání motoru. Takto vzniklé teplo je potřeba odvádět, aby se motor nepřehříval. Tohoto docílíme pomocí tepelného výměníku olej – voda, který je předřazen tepelnému výměníku spaliny – voda. Pomocí tepelných výměníků získáváme ohřátou vodu, kterou je možno akumulovat v zásobníku nebo případně doohřívat pomocí špičkového kotle, který je určen k pokrytí špiček nebo i k rychlejšímu startu soustavy. Takto upravená voda je svedena do soustavy absorpčního chlazení, nebo také i do tepelné soustavy. Přívod vody do soustav je možno regulovat v závislosti na potřebě zákazníka.



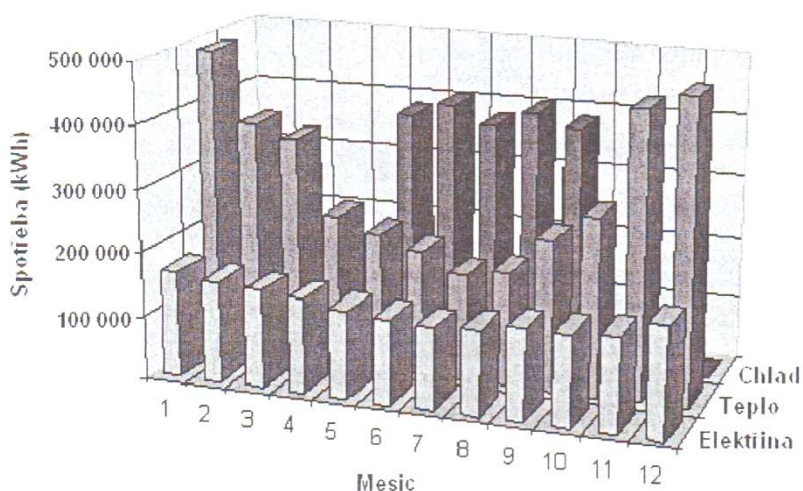
Obr. 17 Zjednodušené schéma zapojení absorpčního chlazení na kogenerační jednotku [17]

2.2 Výhody a nevýhody trigenerace

Výroba chladu pro klimatizaci se využívá hojně ve větších budovách či jejich komplexech. V současnosti tohoto komfortu využívají hlavně obchodní centra, veřejné budovy, hotely, nemocnice, administrativní budovy a najdou se i některé obytné domy. Požadavky na tento komfort se stále zvyšuje. Jelikož se většinou klimatizují větší komplexy budov, je potřeba dosahovat vysokých výkonů, neboť čím větší komplex tím větší energetické nároky. Proto k těmto komplexům, které fungují většinu dne a celoročně, je vhodná trigenerace. Ta je vhodná pro celoroční provoz. Elektrickou energii potřebujeme neustále, proto v kogenerační jednotce bude stále vznikat i tepelná energie. Tu využijeme hlavně v zimním období. V letních měsících můžeme pomocí přebytečné tepelné energie získat chlad a tím dosáhnout větší efektivity.

V současnosti je tahle technologie stále nákladná, hlavně v oblasti nízkého výkonu v porovnání s kompresorovým chlazením.

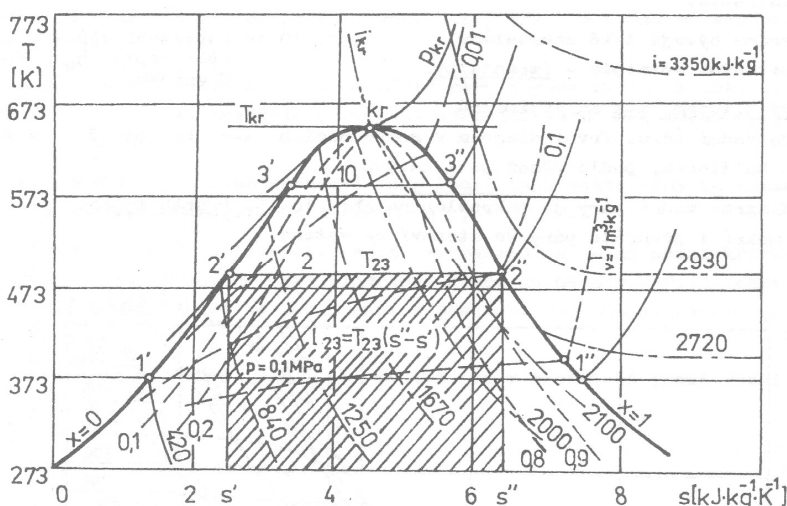
V následujícím diagramu (obr. 18) je znázorněno, jak se během roku mění spotřeba energií v závislosti na ročním období. Je z něj zřejmé, jak od ledna do července klesla spotřeba tepla, neboť se využívá hlavně na ohřev TUV. Následně opět stoupá z důvodu chladnějších měsíců. Dále je patrné, že sezóna klimatizace začíná v květnu a končí v září. Také je vidět spotřeba elektrické energie, která se během roku příliš nemění. V těchto budovách se vyloženě nabízí využití trigenerace.



Obr. 18 Průběh celoročního využití elektřiny, tepla a chladu ve veřejných budovách [1]

3. Chladírenské technologie

Chladírenské technologie pracují na základě měrného skupenského tepla. Měrné skupenské teplo je teplo, které pojme nebo odevzdá látka, aby změnila svoje skupenství. Velikost měrného skupenského tepla se mění v závislosti na tlaku, při kterém přeměna probíhá. Vlivem tlaku se také mění teplota varu. Čím je vyšší tlak, tím je vyšší teplota varu, ale menší měrné skupenské teplo. Tahle spojitost je zobrazena v T-s diagramu vodní páry (obr. 19).



Obr. 19 T-s diagram vodní páry [4]

Hlavními ději chlazení jsou kondenzace a vypařování.

Kondenzace probíhá v kondenzátoru za vyššího tlaku, aby bylo menší měrné skupenské teplo kondenzace. Tím je myšleno, kolik odevzdá látka tepla při změně skupenství z plynného na kapalně.

Vypařování probíhá ve výparníku za nižšího tlaku z důvodu, aby bylo větší měrné skupenské teplo výparné. Což je, kolik pojme látka tepla, aby změnila své skupenství z kapalného na plynné.

Velikosti měrného skupenského tepla kondenzace a měrného skupenského tepla výparného jsou stejné za předpokladu, že probíhají při stejném konstantním tlaku.

Aby bylo možné mezi sebou chladírenské technologie porovnávat, je potřeba znát chladicí faktor, který je dán obecným vztahem:

$$\varepsilon = \frac{Q_{chl}}{E} [-]$$

(4) - Chladicí faktor [1]

Q_{chl} – Chladicí výkon

E – Spotřebovaná energie

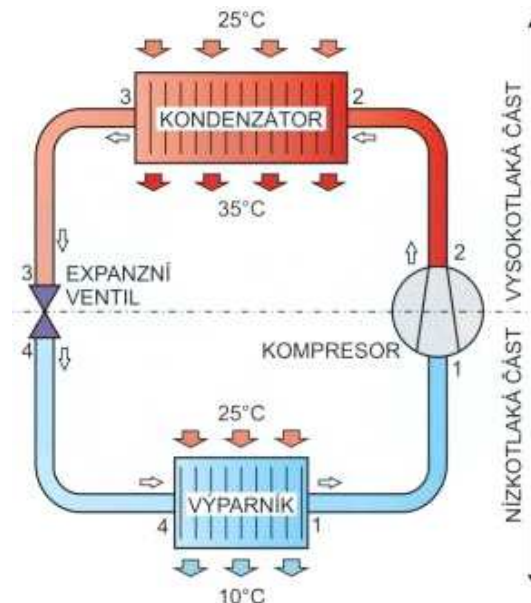
Chladicí faktor vyjadřuje poměr chladu ku energii dodané chladicí jednotce.

Chladicí technologie vhodné pro trigeneraci:

- Kompresorové chlazení
- Absorpční chlazení
- Ejektorové chlazení

3.1 Kompresorové chlazení

Tento způsob výroby chladu je nejběžnější. Jde o jednoduchý cyklus, ve kterém je plyn stlačován, kondenzován a po průchodu plynu expanzním ventilem je vypařován.



Obr. 20 Zjednodušené schéma kompresorového chlazení [18]

Z obrázku je patrné, že jde o uzavřený cyklus, ve kterém koluje pracovní látka (chladiivo). Cyklus je složený ze čtyř základních částí:

- Kompresor – komprese
- Kondenzátor (srážec) – kondenzace
- Expanzní ventil – expanze, škrcení
- Výparník – odpar, vypařování

V každé části cyklu probíhá důležitá fáze:

- Komprese – páry chladiva jsou ve stavu sytosti za nízkého tlaku a jsou stlačovány kompresorem na vyšší tlak, čímž se zároveň zvyšuje jejich teplota.
- Kondenzace – páry chladiva při vysokém tlaku a vysoké teplotě se v kondenzátoru ochlazují na nižší teplotu, tím dochází ke zkapalňování chladiva. Při tomto ději chladivo předává teplo do okolí. Teplo do okolí se odevzdává pomocí vodních či vzduchových chladičů. Kondenzace probíhá při konstantní teplotě (30 – 40 °C).
- Expanze – zkapalněné chladivo o vysokém tlaku expanduje v expanzním ventilu na nižší tlak.
- Vypařování – chladivo v důsledku nízkého tlaku se vypařuje ve výparníku, tím dochází k odebrání tepla z okolí neboli výrobě chladu. Odpařené chladivo je nasáváno kompresorem a tak je celý cyklus uzavřen.

Chladicí faktor pro kompresorové chlazení se určuje pomocí:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{Q_e} [-]$$

(5) - Chladicí faktor [5]

Q_o – Chladicí výkon [W]

Q_e – Mechanický výkon [W]

Kompresorové chlazení je vhodné pro decentralizovanou výrobu chladu, a to pro své malé rozměry a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je však spotřeba elektrické energie, která při horkých letních dnech razantně vzroste. Důvodem je velký teplotní rozdíl. Aby se dosáhlo požadované teploty, musí kompresor běžet na maximální výkon.

Pohon kompresorů většinou zajišťuje elektromotor. Pro velké výkony je možné použít spalovací motor nebo parní turbínu. Vzhledem k tomu, že kompresorové chlazení spotřebovává hlavně elektrickou energii, proto tento typ chlazení není příliš vhodný pro trigeneraci.

V kompresorových chladicích jednotkách se nejvíce používají tyto typy kompresorů:

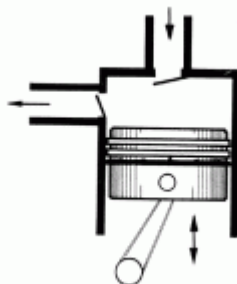
- Membránové ($< 1,5 \text{ kW}_{\text{ch}}$)
- Spirálové ($< 50 \text{ kW}_{\text{ch}}$)
- Pístové ($< 1,5 \text{ MW}_{\text{ch}}$)
- Šroubové ($< 7 \text{ MW}_{\text{ch}}$)
- Odstředivé ($< 25 \text{ MW}_{\text{ch}}$)

Membránové a spirálové kompresory mají malý chladicí výkon, proto se tyto typy kompresorů příliš nevyužívají v trigeneraci.

3.1.1 Pístové kompresory

Tento typ kompresoru je nejrozšířenější. Hlavními znaky jsou kliková hřídel, válce, písty, ventily a ojnice. Toto soustrojí transformuje rotační pohyb z klikové hřídele pomocí ojníc na přímočarý pohyb, který koná píst ve válci. Tím jak se píst pohybuje ve válci, dochází k čerpání média. Při pohybu válce se také mění tlak ve válci, čímž se otvírají a zavírají sací či výtláčné ventily (klapky). Nevýhodou pístových kompresorů je škodlivý prostor, neboť snižuje jejich účinnost. Škodlivý prostor nelze však úplně vyloučit, neboť zabraňuje dotyku pístu s hlavou válce, čímž by mohlo dojít k destrukci kompresoru. Konstrukčně se podobají spalovacím motorům.

Pro docílení požadovaných vysokých tlaků můžeme zapojit kompresory za sebou a to tak, aby pracovaly vícestupňovitě. Tím také dochází ke zvětšení kompresního poměru. Nevýhodou však jsou vyšší náklady na provoz.



Obr. 21 Princip pístového kompresoru [19]

3.1.2 Šroubové kompresory

Šroubové kompresory neboli axiální kompresory jsou díky svému maximálnímu chladicímu výkonu 7 MW_{ch} vhodné i pro velké chladicí jednotky a také tam, kde je použit amoniak. V těchto kompresorech není škodlivý prostor, proto mají vyšší účinnost, než jaké se

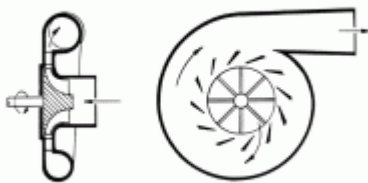
dosahuje u pístových kompresorů. Hlavní součástí šroubových kompresorů jsou dvě spolu zabírající šroubovice o velkém stoupání. Ke stlačování média dochází v mezerách šroubovic. Jejich nevýhodou je vysoká hlučnost a také velký odpor vůči pohybu při „volnoběhu“.



Obr. 22 Princip šroubového kompresoru [19]

3.1.3 Odstředivé kompresory

Odstředivé kompresory, jinak řečeno radiální kompresory jsou nejčastěji využívané ve velkých chladicích jednotkách. Důvodem je maximální výkon, který sahá až k 25 MW_{ch} a také jsou dobře přizpůsobivé na změny chladicího výkonu. Médium je nasáváno na nejmenším průměru oběžného kola a je vytlačováno na největším průměru. Ke zvýšení tlaku dochází pomocí spirálové skříně. Konstrukčně se podobají Francisově turbíně. Výhodami jsou spolehlivost, nízké provozní náklady a malé rozměry.



Obr. 23 Princip odstředivého kompresoru [19]

3.1.4 Chladiva

Pracovní látka je v kompresorovém chladicím zařízení neustále stlačována, zkapalňována a vypařována. Proto musí mít pracovní látka vhodné fyzikální, tepelné a chemické vlastnosti. Touto látkou je CFC (chlorofluorocarbon) neboli freon, který je však legislativně zakázán od roku 1987. Důvodem bylo zjištění, že úniky freonů způsobují rozklad ozónové vrstvy. K dalším legislativně zakázaným chladivům patří R 11, R 12, R 113, R 114, R 115, neboť jsou na bázi freonu.

Mezi povolené patří R 23, R 32, R 125, R 134a, R 143a a R 152a, které jsou na bázi HFC (fluorovaných uhlovodíků). Další povolené látky jsou ty, které se volně vyskytují v přírodě (H₂O, NH₃, CO₂ a C₃H₈). Žádná z povolených látek však nemá tak vhodné vlastnosti jako freon. Pouze amoniak (NH₃) se nejvíce podobá vlastnostem freonu. Amoniak je však toxický a proto jsou vysoké nároky na těsnost soustavy a je požadována vysoká bezpečnost.

3.2 Absorpční chlazení

Absorpční chladicí jednotky využívají teplo jako primární zdroj energie pro výrobu chladu, na rozdíl od kompresorového chlazení. V závislosti na použité technologii je možné využívat teplo obsažené ve spalínách, v horké vodě, nebo v páře. Absorpční chlazení je obzvlášť výhodné, když je k dispozici dostatek nízkopotenciálního tepla. Teplota přiváděného tepla se pohybuje okolo 100 °C. Chladicí médium není stlačováno mechanicky, ale je absorbováno do absorpčního média při nízkém tlaku, tedy při nízké výparné teplotě. V tomto systému jsou potřeba dvě pracovní látky:

- Chladicí látka – odpařuje se a kondenzuje. Musí mít nižší bod varu jako absorbent.
- Absorbent – absorbuje páry chladicí látky

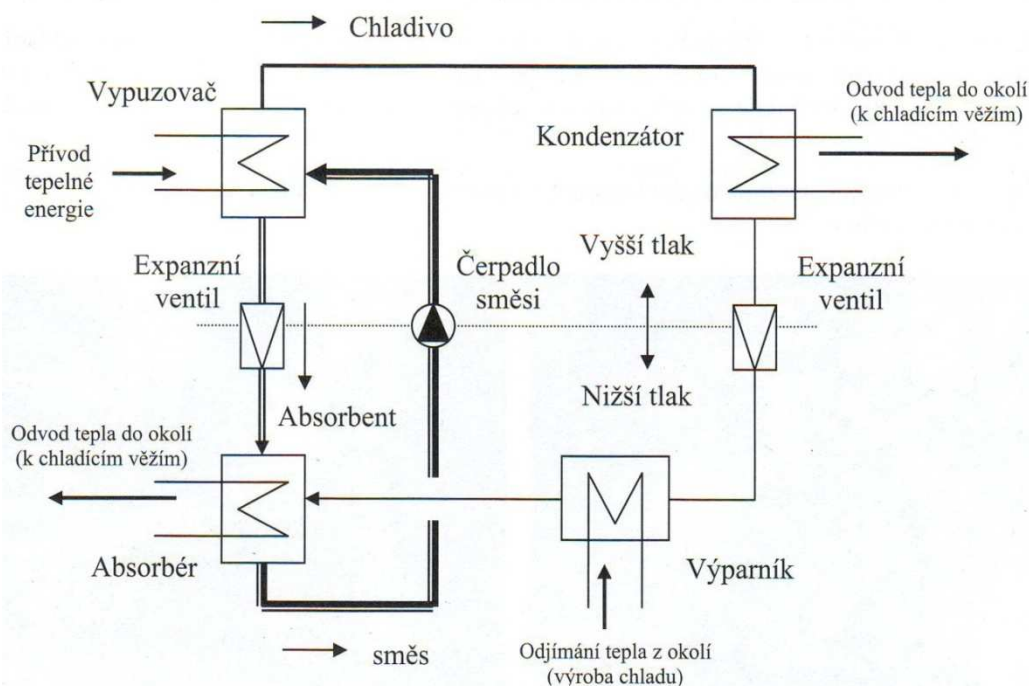
Pracovní dvojice (chladicí látka/absorbent):

- voda/LiBr pro teploty nad 0 °C (5 °C) používá se pro chlazení. Bromid lithný nemá žádný negativní vliv na životní prostředí, ale je velmi korozivní.
- NH_3 /voda pro teploty pod 0 °C (do -60 °C) používá se pro mražení. Amoniak má toxické účinky.

Přibližné teploty varu při 100 kPa:

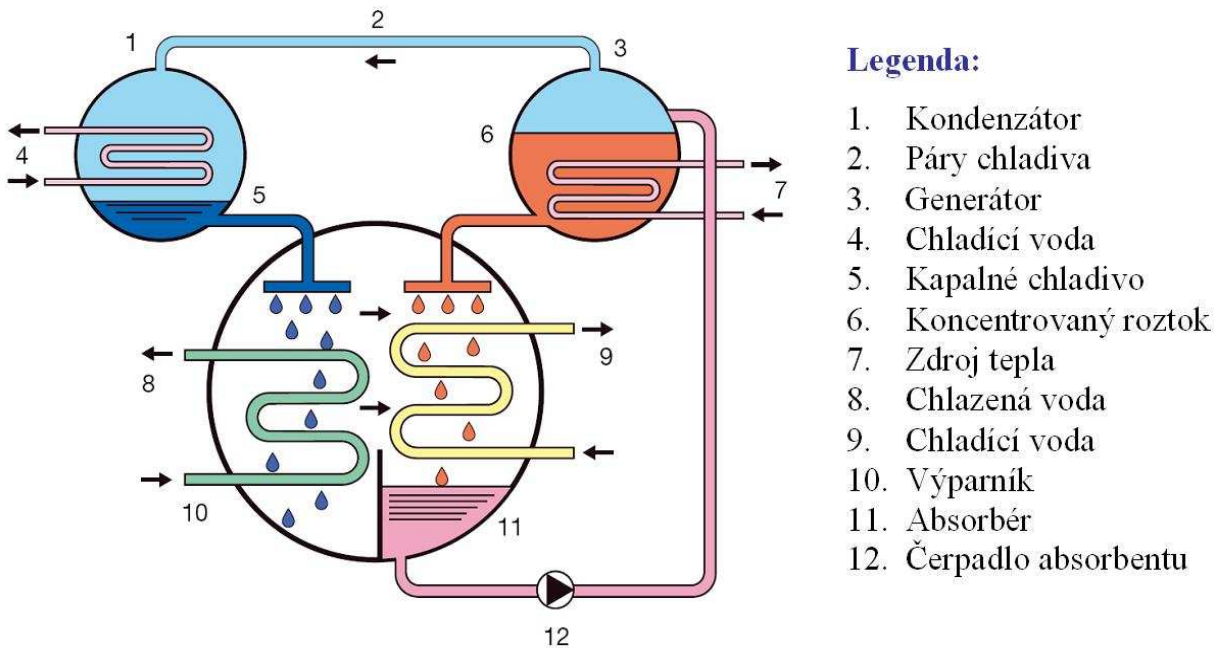
- Voda 100 °C
- Amoniak -33,34 °C
- Bromid lithný 1265 °C

V následujícím obrázku (obr. 24) je znázorněno zjednodušené schéma absorpčního chlazení, které se skládá z generátoru (také nazýván desorbér, ohřívač, vypuzovač, varník), kondenzátoru, výparníku, absorbentu, expanzních ventilů a čerpadla. Někdy bývá v systému zařazen také i tepelný výměník na predehřev směsi vracící se z absorbentu do ohřívače.



Obr. 24 Schematické zobrazení absorpčního chlazení [5]

V následujícím obrázku (obr. 25) je lépe zobrazena návaznost mezi fázemi a jejich technologické uspořádání.



Obr. 25 Zjednodušené znázornění absorpčního chlazení [20]

V každém zařízení se odehrává důležitá fáze (pro pracovní dvojici voda/LiBr):

- Generátor – směs chladicí látky (dále voda) a absorbentu je ohřívána zdrojem tepla. Směs se ohřívá a tím se odpařuje voda, čímž vzniká pára, která je odváděna do kondenzátoru. Neodpařená část směsi je svedena přes expanzní ventil do absorbentu, čímž ztrácí tlak. Ohřevem směsi se tlak zvýšil.
- Kondenzátor – v kondenzátoru je podobný tlak jako v generátoru. Přivedená pára z generátoru je ochlazována pomocí chladicí vody, tím dochází ke kondenzaci par. Zkondenzovanou vodu odvádíme do výparníku přes expanzní ventil, čímž se sníží tlak.
- Výparník – zkondenzovaná voda se důsledkem změny tlaku odpařuje a tím odebírá teplo chlazené vodě (vznik chladu). Odpařená voda přechází nebo je odvedena do absorbentu.
- Absorbér – páry vody přivedené z výparníku přichází do kontaktu s absorbentem, který je přiveden z generátoru. Absorbent pohlcuje páry vody. K pohlcování dochází pomocí nízkého tlaku a ochlazováním absorbentu chladicí vodou, která mění své skupenství (plynné na kapalné). Chladicí voda odebírá absorpční teplo. Tímto vzniklá směs vody a absorbentu je čerpána pomocí čerpadla zpátky do generátoru, čímž se uzavírá cyklus.

Chladicí faktor pro absorpční chlazení se určuje pomocí:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{(Q_t + Q_e)} [-]$$

(6) - Chladicí faktor [5]

Q_o – Chladicí výkon [W]

Q_t – Tepelný výkon [W]

Q_e – Mechanický výkon [W]

Výše popsaný princip procesu se týká jednostupňového absorpčního chlazení, který dosahuje účinnosti 60 – 80 % s chladicím faktorem 0,6 – 0,8 a teplotou přiváděné tepelné energie 65 °C – 140 °C. Je možné však dosahovat vyšších chladicích faktorů a to pomocí dvoustupňového absorpčního chlazení. Při dvoustupňovém absorpčním chlazení se dosahuje chladicího faktoru 1,2 – 1,4 ale je potřeba vyšší teplota přiváděné tepelné energie (do 170 °C). Dvoustupňové absorpční chlazení vyžaduje oproti jednostupňovému až o 45 % méně vstupní tepelné energie.

Jednostupňové absorpční jednotky se používají do chladicího výkonu 5,8 MW_{ch} a jednotky dvoustupňové se používají ve výkonech nad 5,3 MW_{ch}.

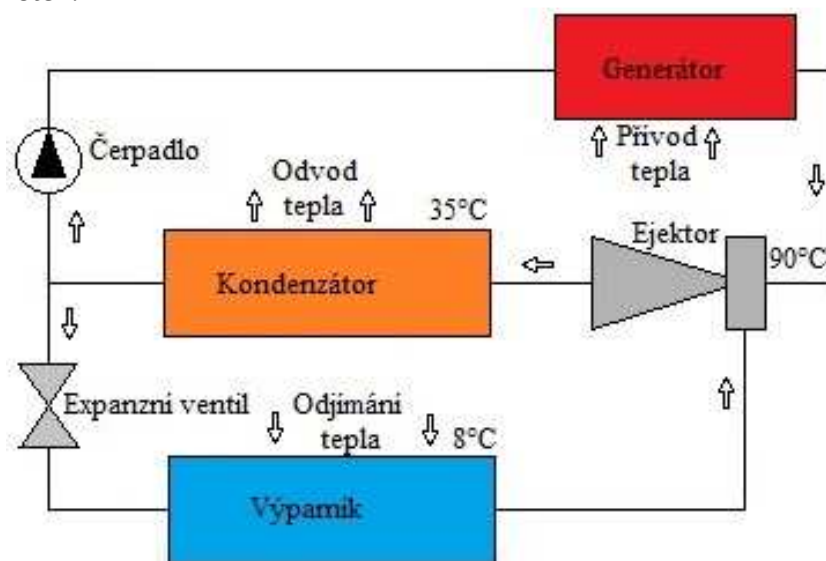
Dvoustupňové absorpční chlazení využívá druhého generátoru, který je ohříván párou z předešlého generátoru. Vlivem ohřevu se odpařuje jiná pracovní látka a tím se dostáváme do vyšších tlaků a teplot. Následovně jsou páry svedeny do druhého kondenzátoru, ze kterého je kondenzační teplo svedeno do prvního generátoru a kondenzát je sveden do prvního kondenzátoru. Následný proces je už totožný s jednostupňovým absorpčním chlazením. Tímto se zvyšuje chladicí faktor, neboť se využívá kondenzační teplo a proto je potřeba méně přiváděného hnacího tepla.

3.3 Ejektorové chlazení

V současnosti je tento způsob chlazení novinkou, přitom se už využíval ve 2. Světové válce. Ejektorové chlazení bylo utlumeno kompresorovým chlazením. Dříve byl využíván k výrobě ledu na lodích s parním pohonem.

V generátoru se voda přemění na páru. Pára je hnána do ejektoru, který nasává páry z výparníku. Průchodem ejektoru dochází ke zvýšení tlaku. V kondenzátoru dochází ke kondenzaci vody. Ta je následně vedena přes expanzní ventil do výparníku, čímž klesne tlak a dochází k odejímání tepla z okolí (vznik chladu). Zkondenzovaná voda je také hnána pomocí čerpadla zpátky do generátoru, čímž je cyklus uzavřen.

Ejektorové chlazení je v současné době rozvíjeno a proto nebude zahrnuto v porovnání chladicích jednotek.



Obr. 26 Zjednodušené schéma ejektorového chlazení

4. Porovnání absorpčního a kompresorového chlazení

V následující tabulce (tab. 4) jsou porovnány vlastnosti absorpčních a kompresorových chladících jednotek

	Kompresorové chlazení s kompresorem			Absorpční chlazení	
	pístovým	šroubovým	odstředivým	jednostupňové	dvoustupňové
Pohon	mechanický			teplá voda 65-140°C	pára, spaliny > 170°C
Oběhová látka	R 23, R 134a, R 143a, NH ₃ , ...			NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr
Chladicí faktor	4 – 6	4 – 6	5 – 8	0,6 – 7,5	1,2
Výkon (MW)	0 – 1,5	0,3 – 7	0,5 – 25	0,1 – 5,8	0,1 – 5,3
Plocha (m ² /kW)	0,006 – 0,016			0,01 – 0,03	
Hmotnost (kg/kW)	5,2 – 9,1			8,5 – 22	
Rozměry	malé			velké	
Spotřeba el. energie	vysoká (30 – 50 % výkonu)			nízká (5 % výkonu)	
Investiční náročnost	nízké			vysoká	
Nároky na obsluhu	žádné			žádné	
Nároky na servis	malé			velmi malé	
Životnost	nízké			vysoká	
Požadavky na teplo	žádné			vysoký	
Množství náplní	malé			velké	
Hmotnost	malá			velká	
Hlučnost	střední			nízká	

Tab. 4 Vlastnosti chladících jednotek [1], [7]

Hlavní předností absorpčního chlazení ve srovnání s kompresorovým chlazením je to, že stačí i méně hodnotné palivo, jako je odpadní teplo. Proto je levnější v ohledu na vstupní energii, oproti kompresorovému chlazení, který spotřebovává dražší elektrickou energii. V případě nahrazení kompresorového chlazení za absorpční, dochází k eliminování takzvaného „black-outu“ elektrické sítě, který by mohl nastat v důsledku velkého množství zapnutých klimatizačních jednotek v horkých dnech. Možné přetížení sítě způsobuje kompresor v kompresorových jednotkách.

V absorpčních jednotkách se nenachází kompresor, ale jen pouze čerpadla, která jsou méně energeticky náročná a také tichá oproti kompresorům. Čerpadla jsou tichá a skoro bez vibrací, protože mají oproti kompresorům minimum pohyblivých částí. Z toho důvodu absorpční jednotky dosahují větší životnosti a lepší spolehlivosti.

Dále absorpční jednotky mají dobrý regulační rozsah (10 – 100 %), ale jejich náběh je zdlouhavý, čímž se snižuje pružnost provozu.

Z hlediska pracovních médií vychází lépe absorpční jednotky, protože nevyužívají chladiva na bázi freonu, který je nebezpečný pro životní prostředí.

Mezi hlavní přednosti kompresorového chlazení patří malé pořizovací náklady, malé rozměry a hmotnost. Důvodem je jednoduchost a také bohaté zkušenosti s kompresorovými chladícími jednotkami.

Kompresorové chlazení dosahuje větších chladících faktorů oproti absorpčnímu chlazení. To je zapříčiněno velkým množstvím potřebného tepla k odpaření chladiva v generátoru u absorpční jednotky

Nevýhodou absorpčních jednotek je, že potřebují chladicí věže k chlazení chladicí vody. Tyto chladicí věže musí splňovat požadavky na chladicí vodu, proto potřebují mít velký povrch.

Na následujících čtyřech příkladech bude předvedena rozdílnost nákladů na výrobu 1 kW_{ch}. Hodnoty potřebné k výpočtu byly získány z informační příručky „Centralizované zásobování chladem“ [5].

Typ 1) Decentralizované kompresorové jednotky napájené ze sítě nízkého napětí

Jedná se o soustavu 100 decentralizovaných kompresorových jednotek, které jsou schopny dohromady vyrábět 1 000 kW_{ch}. Předpokládá se provoz 700 hodin ročně a chladicí faktor 4,5. Odvod odebraného tepla zajišťují vzduchové ventilátory. Elektrický tarif nastaven na 3 Kč/kWh.

Investiční náklady celkem	5 000 000 Kč
Roční náklady na opravu a údržbu celkem	300 000 Kč
Roční náklady na elektrickou energii	528 000 Kč
Technická životnost zařízení	10 let
Roční výroba chladu	700 000 kWh

Výpočet ceny 1 kWh_{ch} s ohledem na životnost soustavy:

$$\frac{\text{investice} + (\text{náklady na opravu a údržbu} + \text{náklady na el. energii}) \cdot \text{životnost}}{\text{roční výroba chladu} \cdot \text{životnost}} = \quad (7)$$

$$= \frac{5000000 + (300000 + 528000) \cdot 10}{700000 \cdot 10} = 1,897 \text{ Kč} / \text{kWh}_{ch}$$

Typ 2) Centralizovaná kompresorová jednotka napájená ze sítě vysokého napětí

Jedná se o jednu kompresorovou jednotku, která je schopna vyrábět 1 000 kW_{ch}, předpokládá se provoz 700 hodin za rok s chladicím faktorem 5,5. Odvod odebraného tepla je zajištěn vodou, která kondenzuje v chladicích věžích. Elektrický tarif nastaven na 2 Kč/kWh a stočné na 20 Kč/m³

Investiční náklady celkem	4 000 000 Kč
Roční náklady na opravu a údržbu celkem	200 000 Kč
Roční náklady na elektrickou energii	270 000 Kč
Roční náklady na vodu	100 000 Kč
Technická životnost zařízení	15 let
Roční výroba chladu	700 000 kWh

Výpočet ceny 1 kWh_{ch} s ohledem na životnost jednotky:

$$\frac{\text{investice} + (\text{náklady na opravu a údržbu} + \text{náklady na el. energii} + \text{náklady na vodu}) \cdot \text{životnost}}{\text{roční výroba chladu} \cdot \text{životnost}} = \quad (8)$$

$$= \frac{4000000 + (200000 + 270000 + 100000) \cdot 15}{700000 \cdot 15} = 1,195 \text{ Kč} / \text{kWh}_{ch}$$

Typ 3) Decentralizované absorpční jednotky s odběrem tepla z primární sítě centrálního zásobování tepla

Jedná se o soustavu pěti absorpčních jednotek, které jsou schopny dohromady vyrábět 1 000 kWh_{ch}. Předpokládá se provoz 700 hodin za rok s chladícím faktorem 0,7. Odvod odebraného tepla je prováděn pomocí vzduchových chladicích věží. Elektrický tarif je nastaven na 2 Kč/kWh tepelný tarif smluven na 0,71 Kč/kWh. Odvod odebraného tepla je zajištěn vodou, která kondenzuje v chladicích věžích.

Investiční náklady celkem	5 000 000 Kč
Roční náklady na opravu a údržbu celkem	200 000 Kč
Roční náklady na elektrickou energii	60 000 Kč
Roční náklady na tepelnou energii	720 000 Kč
Technická životnost zařízení	20 let
Roční výroba chladu	700 000 kWh

Výpočet ceny 1 kWh_{ch} s ohledem na životnost soustavy:

$$\frac{\text{investice} + (\text{náklady na opravu a údržbu} + \text{el. energii} + \text{tep. energii}) \cdot \text{životnost}}{\text{roční výroba chladu} \cdot \text{životnost}} = \quad (9)$$

$$= \frac{5000000 + (200000 + 60000 + 720000) \cdot 20}{700000 \cdot 20} = 1,757 \text{ Kč} / \text{kWh}_{ch}$$

Typ 4) Centralizovaná absorpční jednotka s odběrem tepla z vlastního zdroje tepla

Jedná se o jednu absorpční jednotku o chladícím výkonu 1 000 kW_{ch} s chladícím faktorem 0,8. Předpokládá se 700 hodin provozu za rok. Odvod odebraného tepla je zajištěn vodou, která kondenzuje v chladicích věžích. Elektrický tarif je nastaven na 2 Kč/kWh. Tepelný tarif vlivem vlastního zdroje tepla vychází na 0,36 Kč/kWh. Stočné je nastaveno na 20 Kč/m³.

Investiční náklady celkem	4 500 000 Kč
Roční náklady na opravu a údržbu celkem	150 000 Kč
Roční náklady na elektrickou energii	36 000 Kč
Roční náklady na tepelnou energii	315 000 Kč
Roční náklady na vodu	140 000 Kč
Technická životnost zařízení	20 let
Roční výroba chladu	700 000 kWh

Výpočet ceny 1 kWh_{ch} s ohledem na životnost jednotky:

$$\frac{\text{investice} + (\text{náklady na opravu a údržbu} + \text{el. energii} + \text{tep. energii} + \text{vodu}) \cdot \text{životnost}}{\text{roční výroba chladu} \cdot \text{životnost}} = \quad (10)$$

$$= \frac{4500000 + (150000 + 36000 + 315000 + 140000) \cdot 20}{700000 \cdot 20} = 1,237 \text{ Kč} / \text{kWh}_{ch}$$

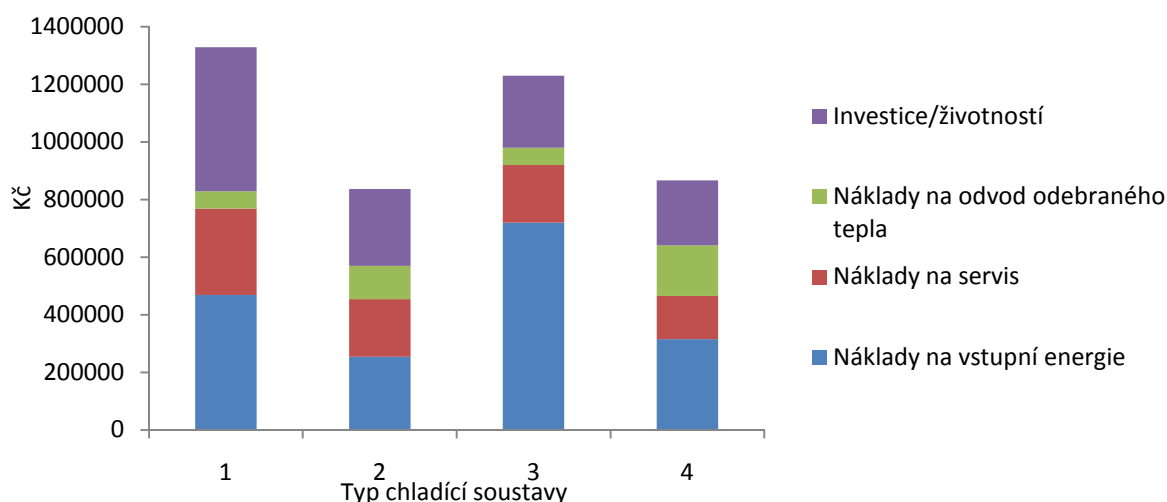
V následující tabulce (tab. 5) jsou vypsány výsledné hodnoty pro lepší porovnání

1) Decentralizované kompresorové chladicí jednotky	1,897 Kč/kWh _{ch}
2) Centralizovaná kompresorová chladicí jednotka	1,195 Kč/kWh _{ch}
3) Decentralizované absorpční chladicí jednotky	1,757 Kč/kWh _{ch}
4) Centralizovaná absorpční chladicí jednotka	1,237 Kč/kWh _{ch}

Tab. 5 Porovnání ceny 1 kWh_{ch}

Z předchozí tabulky vyplývá, že se nedá jednoznačně říci, který způsob výroby chladu je ekonomicky výhodnější v podmínkách České republiky. Potvrdilo se, že vlivem centralizace výroby dochází k levnější výrobě potřebné energie jak v decentralizované výrobě. Při rozhodování, jakou klimatizační jednotku zvolit z hlediska ekonomického rozhoduje mnoho aspektů (stavební úpravy, způsob chlazení, rozvody inženýrských sítí, životnost, atd.). Dalším důležitým aspektem ovlivňující ekonomickou výhodnost je cena vstupních energií. Ceny jsou určovány v závislosti na použité technologii výroby energie. V dnešní době existuje mnoho energetických strojů, které jsou schopny přeměňovat jednu energii na druhou. Jde jen o to, jaká energie bude vložena nebo v jaký druh paliva bude použit.

Poměr nákladů spojené s výrobou chladu pro jednotlivé typy jsou vykresleny v následujícím grafu, s přihlédnutím na investici.



Obr. 27 Graf zobrazující poměrné náklady na výrobu chladu za rok

5. Závěr

Cílem práce bylo představit princip a přednosti trigenerace. Na začátku práce byly zmíněny nevýhody oddělené výroby energií, hlavní nevýhodou je nízké využití energie obsažené v palivu. S touto nevýhodou je potřeba se zabývat. Důvodem je neustále se snižující zásoby lehce dostupných fosilních paliv. Vzhledem k tomu, že stále není žádná plnohodnotná náhrada, která by mohla fosilní paliva plně nahradit, je potřeba dosavadní zásoby šetřit a dosahovat co největšího jejího využití.

Mezi možné řešení se nabízí snižování spotřeby fosilních paliv a postupné nahrazování obnovitelnými zdroji. Dalším možným řešením je zvyšování účinnosti přeměny energie obsažené v palivu na energii potřebnou. Tyto výhody splňuje trigenerace a kogenerace.

Trigenerace je nástavbou kogenerace (kombinovaná výroba elektřiny a tepla), ke které je připojena jednotka na výrobu chladu. Tím dochází ke vzniku trigenerační jednotky. Značnou výhodou kombinované výroby elektřiny a tepla je zvýšení využití energie v palivu až o 45 %, důvodem je využití obou vzniklých energií.

Přeměně energie dochází pomocí primárních jednotek, které jsou uvedeny. Mezi hlavní primární jednotky patří spalovací motory, parní turbíny, plynové turbíny a organický rankinův cyklus.

Pomocí trigenerační jednotky jsme schopni vyrábět elektřinu, teplo a také chlad. Chlad je produkován pomocí absorpční nebo kompresorové chladicí jednotky. Chlad vzniká v důsledku odjímání tepla z chladicího média vlivem výparného tepla. Pro energetický průmysl je nejvhodnější absorpční chladicí jednotka. Důvodem je možné využití přebytečného tepla v letních měsících, kde absorpční jednotka pomocí přebytečného tepla vyrábí chlad.

Závěrem práce je porovnání absorpčního a kompresorového chlazení v obecném měřítku. Následně byly porovnány čtyři způsoby výroby chladu z hlediska ekonomického. Byly porovnávány náklady na výrobu 1 kWh_{ch} s ohledem na životnost. A následně byly porovnány roční náklady na provoz chladicí jednotky. Z výpočtů vyplývá, že se nedá jednoznačně říci který způsob výroby chladu je jednoznačně výhodnější. Hlavním faktorem ovlivňující ekonomickou výhodnost je cena vstupních energií. Absorpční chlazení může být značně výhodné v případě, kdyby nám vhodné teplo vznikalo jako druhotný produkt nebo také jako odpad.

V celkovém zhodnocení trigenerace je důležité podotknout, že vlivem velkého využití energie obsažené v palivu je možné docílit úspor a také snížení dopadů na životní prostředí. Proto je vhodné tuhle technologii dále rozvíjet.

Zdroje informací

- [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] KARAFIÁT, J.: *Centralizované zásobování chladem*, informační příručka ORTEP, s.r.o., 2005, 130 s.
- [6] KRBEK, J., POLESNÝ, B.: *Kogenerační jednotky zřizování a provoz*, [online], 1. vyd. Praha, 2007, 206 s., ISBN 978-80-7328-151-9.
URL: < http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf > [cit. 2011-3-26].
- [7] 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. 2011-3-20].
- [8] Gregor, J.: *Investiční náklady paroplynových zařízení*, [online],
URL: < <http://www.solicad.com/CZ/clanek/investicni-naklady-paroplynovych-zarizeni-56> > [cit. 2011-4-20].
- [9] *Trigenerácia* , Intech Slovakia s.r.o. [online],
URL:< <http://www.intechenergo.sk/sekcie/kogeneracia/trigeneracia/trigeneracia> > [cit. 2011-3-26]
- [10] *Kogenerace* , Pražská teplárenská a.s. [online]
URL: < http://www.prazskateplarenska.cz/informace_o_dodavce_tepla/schema-kogenerace/ >, [cit. 2011-3-7].
- [11] *Cyklus paroplynový* , Leccos [online]
URL:< <http://leccos.com/index.php/clanky/cyklus-paroplynovy> >, [cit. 2011-4-24].
- [12] *Types of Stirling Engines* , Koichi Hirata [online]
URL:< http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/type/type00_e.html >, [cit. 2011-4-26].

- [13] *Wie arbeitet der Stirlingmotor?*, Peter Fette [online]
URL: < <http://peterfette.gmxhome.de/howdo.htm> >, [cit. 2011-4-26].
- [14] *Kogenerace*, EkoW ATT CZ s.r.o. [online]
URL: < <http://www.ekowatt.cz/uspory/kogenerace.shtml> >, [cit. 2011-4-29].
- [15] *Palivové články*, Petr Dlouhý, Luděk Janík [online]
URL: < <http://www.hytep.cz/?loc=article&id=5> >, [cit. 2011-5-6].
- [16] *Palivové články*, Zdeněk Porš [online]
URL: < <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf> >, [cit. 2011-5-6].
- [17] *Trigeneration*, GE Energy [online]
URL: < http://www.gepower.com/prod_serv/products/ recip_engines/en/cogen_systems/refrigeration.htm >, [cit. 2011-5-12].
- [18] *Autoklimatizace*, OK servis Kaplánek s.r.o. [online]
URL: < <http://www.okservispv.cz/inpage/autoklimatizace/> >, [cit. 2011-5-12]
- [19] *Malý přehled dmýchadel*, Tuning.cz; klokana [online]
URL: < <http://www.tuning.cz/a363:maly-prehled-dmychadel/> >, [cit. 2011-5-15]
- [20] *Chlad*, Plzeňská energetika a.s. [online]
URL: < <http://www.pe.cz/index.php?goto=text&sekce=hOplF8Tr&tid=W35NJErn&lng=cz> >, [cit. 2011-5-16]

Přehled obrázků

- Obr. 1 Schéma kogenerační jednotky s kondenzační turbínou [10]
Obr. 2 Energetická bilance oddělené a kombinované výroby [6]
Obr. 3 Technologie transformace energií v kogeneraci [3]
Obr. 4 Teplotní rozsah kogeneračních systémů [3]
Obr. 5 Zjednodušené schéma zapojení kondenzační turbíny [3]
Obr. 6 Zjednodušené schéma zapojení protitlaké turbíny [3]
Obr. 7 Zjednodušené schéma zapojení ORC [3]
Obr. 8 Zjednodušené schéma zapojení plynové turbíny [3]
Obr. 9 Zjednodušené schéma zapojení mikroturbíny [3]
Obr. 10 Zjednodušené schéma zapojení paroplynového cyklu [11]
Obr. 11 Zjednodušené nákrety jednotlivých typů Stirlingova motoru [12]
Obr. 12 Zjednodušené schéma zapojení Stirlingova motoru [3]
Obr. 13 Zjednodušené schéma zapojení spalovacího motoru [14]
Obr. 14 Zjednodušené znázornění principu palivového článku (PEMFC) [15]
Obr. 15 Zjednodušené schéma zapojení palivového článku [6]
Obr. 16 Princip trigenerační jednotky s absorpčním chlazením [9]
Obr. 17 Zjednodušené schéma zapojení absorpčního chlazení na kogenerační jednotku [17]
Obr. 18 Průběh celoročního využití elektřiny, tepla a chladu ve veřejných budovách [1]
Obr. 19 T-s diagram vodní páry [4]
Obr. 20 Zjednodušené schéma kompresorového chlazení [18]
Obr. 21 Princip pístového kompresoru [19]
Obr. 22 Princip šroubového kompresoru [19]
Obr. 23 Princip odstředivého kompresoru [19]
Obr. 24 Schematické zobrazení absorpčního chlazení [5]
Obr. 25 Zjednodušené znázornění absorpčního chlazení [20]
Obr. 26 Zjednodušené schéma ejektorového chlazení
Obr. 27 Graf zobrazující poměrné náklady na výrobu chladu za rok

Přehled tabulek

- Tab. 1 Porovnání vlastností palivových článků a jejich využití [1]
Tab. 2 Přehled elektrochemických reakcí [16]
Tab. 3 Vzájemné porovnání primárních jednotek pro kogeneraci [1], [3]
Tab. 4 Vlastnosti chladících jednotek [1], [7]
Tab. 5 Porovnání ceny 1 kWh_{ch}

Seznam použitých zkratk

KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
PEZ	Primární energetický zdroj
KS	Kogenerační systém
RC	Rankinův cyklus
ORC	Organický Rankinův cyklus
LPG	Zkapalněný ropný plyn
TUV	Teplá užitková voda
AFC	Alkalické články
PEMFC	Články s tuhými polymery
PAFC	Články s kyselinou fosforečnou
MCFC	Články s roztavenými uhlíčitany
SOFC	Články s tuhými oxidy
PHR	Power to Heat Ratio

Seznam použitých symbolů

Q	[J]	teplo, tepelný výkon
E	[Ws]	elektrická energie
A	[J]	práce
η_e	[-]	elektrická účinnost
η_t	[-]	tepelná účinnost
η_{kogen}	[-]	energetická účinnost kogenerace
Q_{pal}	[W]	energie v palivu
σ	[-]	teplárenský modul
T	[°C]	teplota
p	[Pa]	tlak
P	[W, J/s]	výkon
Q_{chl}	[J]	chladicí výkon
ε	[-]	chladicí faktor
Q_o	[W]	chladicí výkon
Q_e	[W]	mechanický výkon
Q_t	[W]	tepelný výkon