

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Aplikace malé kogenerační jednotky v soustavě CZT**

## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na aplikaci malé kogenerační jednotky v soustavě centrálního zásobování teplem. Cílem této práce v první části je představit jednotlivé druhy malých kogeneračních jednotek, spolu s jejich provozně-technickými parametry. V další části práce jsou analyzována rizika a příležitosti představující provoz malé kogenerační jednotky. Jako hlavní část práce je návrh a začlenění jednotky do systému CZT, kde jsou vypočteny provozní veličiny a očekávané úspory při respektování ekonomického modelu. Následně je provedeno ekonomické posouzení výhodnosti malé kogenerační jednotky pomocí hlavních ekonomických ukazatelů.

## **Klíčová slova**

Malé kogenerační jednotky, kogenerace, centralizované zásobování teplem, spalovací motory, Organický Rankinův cyklus, mikroturbíny, palivové články, Stirlingův motor, Talbot systém, TEDOM, bod zvratu, vnitřní míra výnosu.

## **Abstract**

This study is focused on the application of small cogeneration unit in the district heating systems. The aim of this work in the first part is to introduce cogeneration units, along with their technical and economic parameters. In the next part of this thesis are analyzed risks and opportunities representing small cogeneration unit operation. Next here are, as the main part of the work, proposals MKJ integration into the central heating system, where are calculated values and the expected operational savings of individual proposals with respect to its business model. After that there is described the assessment of the economic advantages MKJ using of main economic indicators.

## **Key words**

Small cogeneration units, cogeneration, centralized heat supply, internal combustion engines, organic Rankine cycle, microturbines, fuel cells, the Stirling engine, system Talbot, TEDOM, break-even, internal rate of return.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr navazujícího studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a dalších informačních pramenů, které jsou uvedeny v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý použitý software, který byl použit při řešení diplomové práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.5.2014

Jméno přímení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Zbyňku Martínkovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat také konzultantovi Ing. Jiřímu Benešovi, Ph.D. za poskytnutí důležitých informací, rad a připomínek pro vypracování této diplomové práce.

Stejně tak děkuji společnosti TEDOM a.s. za poskytnutí potřebných dat.

V neposlední řadě chci poděkovat především své přítelkyni a rodině za pomoc a podporu během celého studia, díky kterým tato práce také vznikla.

## Obsah

Obsah.....	1
Seznam symbolů a zkratk .....	3
1 Úvod .....	4
2 Kogenerace.....	4
2.1 Princip kogenerace .....	5
2.2 Rozdělení kogenerace.....	6
3 Malé kogenerační jednotky .....	6
3.1 Konstrukční systémy MKJ .....	6
3.2 Použití malých kogeneračních jednotek (MKJ) .....	7
4 Zásobování teplem .....	8
4.1 Centrální zásobování teplem (CZT) .....	8
4.2 Decentralizované zásobování teplem (DZT).....	9
5 Základní rozdělení MKJ.....	9
5.1 Mikroturbíny.....	9
5.2 ORC – Organický Rankinův cyklus .....	12
5.3 Spalovací motory .....	14
5.4 Palivové články v kogenerační výrobě.....	17
5.5 Kogenerace pomocí tlakové energie.....	21
5.6 Stirlingův motor.....	22
5.7 Kogenerace v klimatizaci a výrobě chladného prostředí.....	25
5.8 Systém Talbot.....	27
6 Porovnání parametrů malých kogeneračních jednotek .....	28
7 Paliva.....	29
7.1 Základní parametry paliv .....	29
7.2 Využití biomasy.....	32
8 Rizika a příležitosti kogeneračních jednotek MKJ .....	35
8.1 Vhodnost nasazení.....	35
8.2 Provozní podpory se stálými investičními náklady.....	35
8.3 Příklady uplatnění.....	36
9 Aplikace MKJ do soustavy CZT .....	37
9.1 Vlastní návrh.....	39
9.2 Kogenerační jednotka pro provoz KJ – TEDOM Quanto D770 .....	42
9.3 Výpočet provozně-technických parametrů .....	43
9.4 Stálé investiční náklady MKJ: .....	45

9.5	Proměnné investiční náklady KJ .....	46
9.6	Příjmy z prodeje tepelné a elektrické energie KVET .....	49
9.7	Celkové shrnutí.....	52
10	Výpočet aplikovatelnosti malé kogenerační jednotky .....	55
10.1	Návrh aplikace MKJ v soustavě CZT .....	55
10.2	Návrh aplikace MKJ v soustavě DZT .....	58
10.3	Návrh aplikace MKJ v soustavě CZT a DZT .....	61
11	Kritéria hodnocení ekonomické efektivity .....	66
11.1	NPV - Net Present Value (Aktualizace finančních toků) .....	66
11.2	IRR - Internal Rate of Return (Vnitřní míra výnosu).....	66
12	Závěr.....	72
13	Použitá literatura: .....	74

## Seznam symbolů a zkratk

CZT	Centralizované zásobování teplem
DZT	Decentralizované zásobování teplem
ODV	Oddělená výroba energií
KVET	Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie
KJ	Kogenerační jednotka
MKJ	Malá kogenerační jednotka
NO <sub>x</sub>	Značení dvou hlavních znečišťujících oxidů dusíku NO a NO <sub>2</sub>
ORC	Organický Rankinův cyklus
SO <sub>x</sub>	Značení dvou hlavních znečišťujících oxidů síry SO a SO <sub>2</sub>
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
H	Vodík
HC	Úhlovodíky
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cells
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cells
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells
$P_E^{PC}$	Výkon palivového článku [W]
$U_{teo}^{PC}$	Teoretické napětí palivového článku [V]
I	Proud [I]
$U_{skut}^{PC}$	Skutečné napětí v palivovém článku [V]
$\eta_E^{PC}$	Elektrická účinnost přeměny palivového článku [%]
$\eta_{upal}$	Účinnost palivové soustavy
$\eta_{uE}$	Celková účinnost úprav elektrického proudu
$\eta_{vpal}$	Účinnost využitého paliva
$\eta_E^{PJ}$	Celková účinnost palivového článku [%]
$\eta_t$	Celková účinnost Stirlingova motoru [%]
$\phi$	Poměr teplot v komplexním a expansním prostoru
$\varepsilon$	Kompresní poměr [-]
$\eta_{uE}$	Celková účinnost úprav elektrického proudu [%]
$\chi$	Poissonova konstanta [-]
t	Teplota [°C]
p	Tlak [Pa]
T	Doba provozu MKJ [h]
$\delta$	Teplárenský modul [-]



## 1 Úvod

V posledních letech se neustále zvyšují elektrické i tepelné potřeby každého obyvatele. (Český statistický úřad, 2013, [online]) Tyto potřeby jsou přímo spjaté s charakterem elektrických a tepelných soustav, jejich provozováním a také cenovou dostupností energií. V současnosti existují dvě hlavní metody řízení a dodávek tepelné energie a to centralizované a decentralizované zásobování teplem. První z nich usiluje o efektivní a velkoobjemové tepelné dodávky vyrobené z primárních energetických zdrojů. Druhá z nich snižuje lokální závislost na centralizovaném zásobování tepla pomocí výroby tepelné energie přímo v místě spotřeby.

Tato diplomová práce pojednává o problematice výroby a zásobování tepelné energie z malé kogenerační jednotky do centralizovaného zásobování tepla. Práce vysvětluje především technické, ekonomické a ekologické výhody a nevýhody aplikovatelnosti MKJ v tomto systému pro potenciální využití v praktickém provozu. V hlavní části práce je proveden výpočet návrhu malé kogenerační jednotky, kde jsou zhodnoceny především provozní veličiny a ekonomické aspekty provozu, z nichž vyplývá ekonomická efektivnost provozu při použití v praxi.

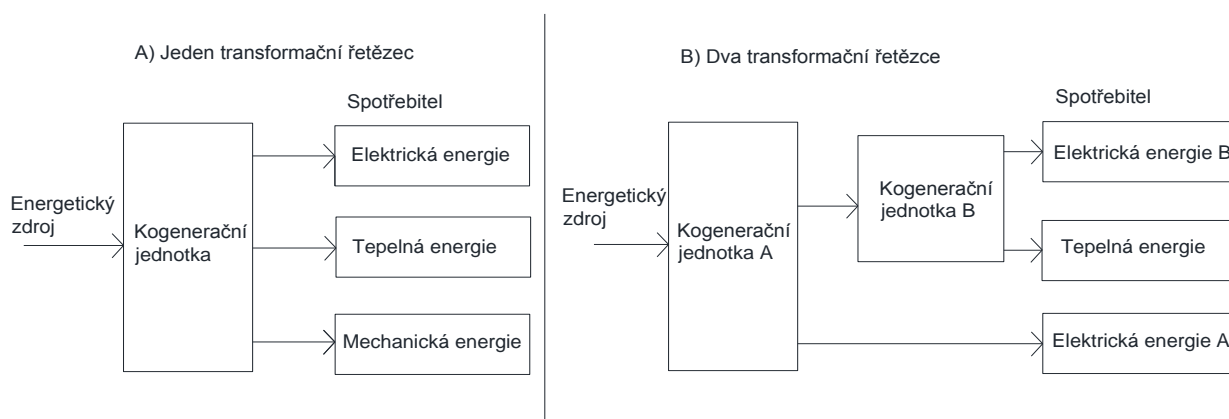
## 2 Kogenerace

Kogenerace je kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie (KVET). Tímto procesem je zajištěno vyšší využití energie z paliv. Úspora paliva může dosáhnout až 40%, díky tomu je také sníženo vypouštění škodlivých látek do životního prostředí, v porovnání s případem, kdy se vyrábí pouze elektrická nebo tepelná energie zvlášť. Z ekonomického hlediska to znamená, že spotřebitel za stejné množství paliva zaplatí jen 60% nákladů za primární zdroje energie. Na obr. 2.1, kde je graficky znázorněno porovnání účinnosti oddělených výroben energií (ODV) s kogenerační výrobou.



Obr. 2.1: Porovnání kogenerační výroby s oddělenou výrobou energií [15]

Kombinovaná výroba energií je tedy na základě vyšší využitelnosti energie obsažené v palivu z ekonomického hlediska velmi výhodná a může být technicky realizována pomocí jednoho nebo dvou transformačních řetězců jako je tomu na obrázku. 2.1.



Obr. 2.1: Základní výrobní řetězce KVET.

Pozn. Jeden transformační řetězec prezentuje klasické teplárny nebo spalovací KJ. Varianta se dvěma transformačními řetězci je prezentována KJ parního nebo plynového cyklu [2].

## 2.1 Princip kogenerace

### 2.1.1 Nepřímý způsob transformace energie

K výrobě tepelné a elektrické energie je potřeba palivo, které vykoná práci, jinými slovy, předá svou energii dále do technologického oběhu. Část předané energie v technologickém oběhu, ve formě vysokopotenciálního tepla, je přeměněna na mechanickou energii (pomocí turbín, atd.), která je použita na výrobu elektrické energie (pomocí generátorů). Účinnost výroby elektrické energie se pohybuje okolo 30% – 50%. Zbytek energie je ve formě nízkopotenciálního tepla (tzn. tepelné ztráty), které je odebíráno z tepelného oběhu pomocí tepelných výměníků a může se využít v pro vytápěcí účely, ohřev vody, sušení, atd. Z termo-fyzikálních zákonů nelze nízkopotenciální teplo efektivně využít pro výrobu elektrické energie.

Celý proces přeměny popsany v předchozím odstavci probíhá plynule a je stále opakován (tzn. opakující se tepelný oběh). Tento oběh může být rozdělen na otevřený oběh, kdy je transformace energie realizována pomocí protékající látky (vody), která díky ohřevu z kotle změní skupenství na páru, ta následně vykoná práci (expanduje), zkondenzuje a následně je odvedena z tepelného oběhu pryč, nebo na uzavřený oběh, který pracuje na podobném principu, až na skutečnost, že kondenzát je zpět přiveden do kotle a znovu se ohřívá [2].

### 2.1.2 Přímý způsob transformace energie

Tento způsob pojednává o přeměně energie obsažené v palivu přímo na elektrickou energii, která může být upravena na požadované parametry a využita. Tato technologie je v současnosti intenzivně vyvíjena. Pod přímou transformací si lze představit například energii produkovanou v palivových článcích, která je pomocí elektrochemické reakce přeměněna na elektrickou energii. Touto problematikou se tato práce zabývá v kapitole 5.4.

## 2.2 Rozdělení kogenerace

Kogenerační jednotky jsou definovány podle výkonu na mikro-kogeneraci (výkon do 50 kW<sub>E</sub>), mini-kogeneraci (výkon do 500 kW<sub>E</sub>), kogeneraci o malém výkonu (výkon do 1 MW<sub>E</sub>), kogeneraci o středním výkonu (výkon do 50MW<sub>E</sub>) a kogeneraci o velkém výkonu (výkon nad 50MW<sub>E</sub>) [2].

## 3 Malé kogenerační jednotky

MKJ jsou vysoce sofistikovaná zařízení, kde probíhá transformace energie z paliva na elektrickou a tepelnou energii. MKJ se v mnoha případech skládají z pohonné jednotky, výměníku tepla, zařízení pro úpravu paliva, alternátoru (asynchronní generátor, který umožňuje měnit parametry elektrické energie), rozvaděče a z mikroprocesorového řídicího a kontrolního systému. Jako pohon pro výrobu energie jsou nejčastěji použity spalovací motory, spalovací turbíny, parní turbíny, mikroturbíny, parní motory, palivové články, atd. Jednotky mohou být dále dovybaveny samočinnou regulací provozu, která poskytuje funkci automatického startu a odstavení. MKJ je možné rozdělit podle charakteru dodávek tepelné a elektrické energie na provoz základní, špičkový, záložní a specifický. Dále mohou být rozděleny podle způsobu provozu na průmyslovou, komunální nebo komerční sféru [2].

### 3.1 Konstrukční systémy MKJ

#### 3.1.1 Stavebnicový systém jednotky

Toto řešení se používá pro MKJ s většími výkony. Jednotka je dodána budoucímu provozovateli po jednotlivých dílech, které na sebe technologicky pasují a je smontována až na místě určení. Stavebnice obsahuje pouze nezbytné vybavení jednotky, doplňky jako odhlučnění apod. se musí pořídit zvlášť. Výhoda tohoto řešení je především jeho nízká

výrobní cena, ovšem ušetřené finance mohou být vynaloženy na stavební úpravy objektu, kde má být jednotka umístěna [2].

### 3.1.2 Modulový systém jednotky

Používá se pro jednotky s menšími výkony. Jednotka je dodána budoucímu provozovateli v jednom kompaktním, prostorově málo náročném modulu. Nespornou výhodou tohoto systému je, že jednotku lze velmi snadno a rychle sériově nebo paralelně propojovat s ostatními moduly, což má za následek nejen úsporu investičních nákladů, ale také velkou variabilitu dodávek tepelné a elektrické energie. Jednotky se mohou instalovat ve vnitřních i venkovních prostorech, ovšem rozhodující podmínky pro umístění zařízení je dáno nejpříjemnějším napojením do elektrické a tepelné sítě. Rozměry modulů jsou limitovány pouze rozměry strojovny, kde je jednotka umístěna [2].

## 3.2 Použití malých kogeneračních jednotek (MKJ)

Tepelná a elektrická energie z MJK může být spotřebována rovnou v místě výroby, tudíž zde odpadají veškeré ztráty způsobené transportem energií na určité vzdálenosti. Navíc ji lze použít kdykoliv je potřeba, tudíž potenciační uživatelé nejsou limitováni dodávkami tepla z CZT. V dalším případě je možné část nebo veškerou vyrobenou tepelnou a elektrickou energii o požadovaných parametrech, dodávat do systému CZT a do rozvodné elektrické sítě, z čehož vyplývají finanční benefity. A poslední, široce používaný případ je, že MKJ mohou pracovat jako záložní zdroje energie. Pro ekonomicky výhodný provoz MKJ je předpokládáno, že provozovatel by měl vždy prodat nebo efektivně využít veškerou vyprodukovanou tepelnou energii spolu s co největším objemem elektrické energie. V případě, že je prodávána nebo využita pouze elektrická energie, tak vždy nemusí nastat ekonomická návratnost MKJ, protože jsou tyto zařízení mnohdy oproti velkým KJ méně účinné, tudíž jejich provoz je dražší. Jednotky o menších výkonech se připojují na elektrizační síť 400V, zatímco jednotky o středních a velkých výkonech se připojují na hladinu 6 kV [2].

## 4 Zásobování teplem

Každá KJ může obsahovat vývody nízkopotenciálního tepla do topného systému. Limitující zde nejsou ani tak technologické možnosti, ale především jde o finanční stránku věci. Investiční náklady na potrubí pro dodávku tepla jsou ovlivněny tloušťkou a průměrem trubek a také náklady na zateplení a zapechování. Jak již bylo zmíněno v úvodu, existují dvě hlavní možnosti jak zásobovat uživatele teplem [2].

### 4.1 Centrální zásobování teplem (CZT)

V soustavě CZT jsou vzájemně propojené zdroje tepla s centrální tepelnou sítí, předávacími stanicemi a spotřebitelskými zařízeními. Dodávky jsou uskutečněny pomocí této centrální tepelné sítě, která dopravuje teplo pomocí teplonosné látky k odběrateli (parovody, horkovody, teplovody). Tepelné sítě se rozdělují na primární oběh (otevřený oběh), což znázorňuje potrubí mezi výrobnou tepla a předávací stanicí (výměňníkem) a sekundární oběh (uzavřený oběh), kde potrubí spojuje předávací stanice a odběratele. Tyto systémy jsou ekonomicky velmi výhodné, protože těží z velkokapacitní tepelné výroby, kdy se náklady snižují s velikostí produkce energie i při přenosu tepla na dlouhé vzdálenosti [2].

#### 4.1.1 Parovody

Parametry teplonosného média dosahují teplot do 240 °C a tlaku 1.8 MPa a jsou použity především pro průmyslové objekty. Proudění média je zajištěno pomocí dostatečně velké tlakové energie [2].

#### 4.1.2 Horkovody

Voda má teplotu v potrubí do 180 °C a je distribuována odběratelům přes výměňníkové stanice. Tlak v potrubí je 2,5 MPa. Cirkulace je zajištěna pomocí oběhových čerpadel [2].

#### 4.1.3 Teplovody

Teplovody slouží pro přímé napojení na spotřebitele tepla. Parametry proudícího média mohou dosahovat hodnot 110 °C při tlaku 1,6 MPa nebo 95 °C při tlaku 0,6 MPa, což je zvláště výhodné pro bytové objekty [2].

#### 4.1.4 Výměníkové stanice

Tyto stanice tvoří propojku mezi tepelnou sítí a spotřebitelem, nebo tepelnou sítí a výrobcem tepla. Dochází zde ke změně parametrů v teplotnosné látce. Dnes jsou používány převážně stanice, kde je teplosměnná plocha tvořena z pevně přitisknutých kovových desek na sebe, kterými prochází kanálky s teplotnosným médiem [2].

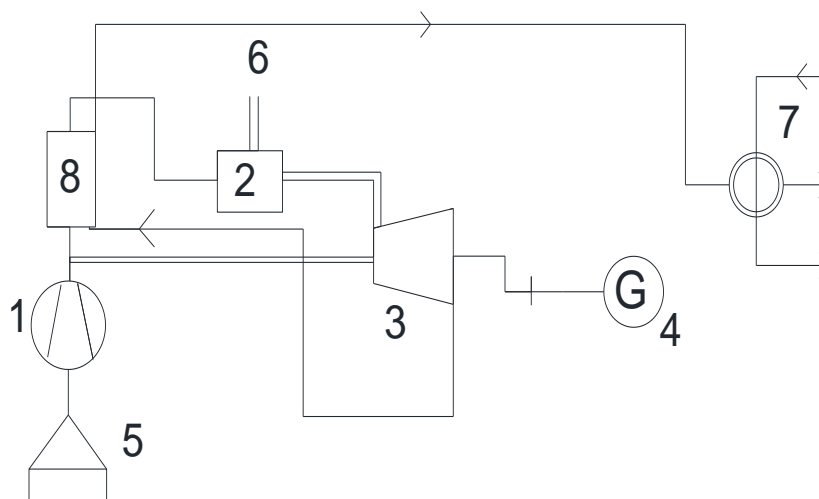
### 4.2 Decentralizované zásobování teplem (DZT)

V této soustavě je zdroj tepla umístěný v blízkosti místa spotřeby, který může vytápět byty, domy, haly nebo vytvářet teplo pro technologické účely atd. Veliká výhoda spočívá v tom, že oproti CZT si uživatel může kdykoliv zatopit bez ohledu na topnou sezónu. Toto řešení minimalizuje náklady na rozvod energie. Většinou bývá toto řešení oproti CZT ekonomicky méně výhodné, protože soustavy v DZT mají mnohdy horší účinnost a nemohou se vyrovnat velkoobjemové přenosové kapacitě tepla [2].

## 5 Základní rozdělení MKJ

### 5.1 Mikroturbíny

Jedná se o malé plynové turbíny využívající Braytonův oběh. Mikroturbíny jsou stroje o výkonech od 25 – 250 kW<sub>e</sub> a až 300 kW<sub>t</sub>. Mají kompaktní rozměry a jsou dobře odhlučněny. Teplárenský modul se pohybuje v hodnotách od 0,5 do 0,7. Jsou to vysokootáčkové stroje (až 100 000ot/min), které obsahují turbínu, vysokofrekvenční generátor, regenerační výměník tepla, kompresor a spalovací komoru. Stroje jsou převážně jednohřídelové a elektrickou energii dodávají do sítě pomocí frekvenčního měniče. Výhoda spočívá především ve vyšší účinnosti, která se docílí díky spalínovému výměníku (rekuperátoru), kde dochází k přehřevu spalovacího vzduchu. Jako palivo se může využít nafta, benzin, zemní plyn. Odpadní teplo plynoucí ze spalín dosahuje hodnot 220 – 320 °C, které zpracovává výměník tepla pro ohřev vody [3].



Obr. 5.1: Schéma mikroturbíny.

Pozn. 1 – Kompresor, 2 – Komora spalovací, 3 – Turbína, 4 – Generátor, 5 – Vzduchový přívod, 6 – Palivový přívod, 7 – Tepelný výměník, 8 – Spalinový výměník (rekuperátor) [2]

### 5.1.1 Účinnost

Elektrická účinnost výroby se řádově pohybuje 18 – 35 %. Celková účinnost mikroturbíny je v rozmezí 65 – 85%. Nutno dodat, že mikroturbíny jsou velmi náchylné na vnitřní ztráty a kvalitativní parametry paliva, tudíž účinnost se v průběhu provozu může měnit. Účinnost je také silně závislá na výstupních usměrňovačích nebo střídačích v elektrické části mikroturbíny a na okolních teplotách. Při vyšších teplotách okolí a nízkém zatížení soustrojí účinnost tedy rychle klesá [3].

### 5.1.2 Ekologie

Výsledné spaliny obsahují 11 – 19 kg/MWh CO, 742 – 926 kg/MWh CO<sub>2</sub> a 0,21 – 0,39 kg/MWh NO<sub>x</sub>, v závislosti na požadovaném výkonu a druhu a čistotě použitého paliva [2].

### 5.1.3 Údržba a životnost

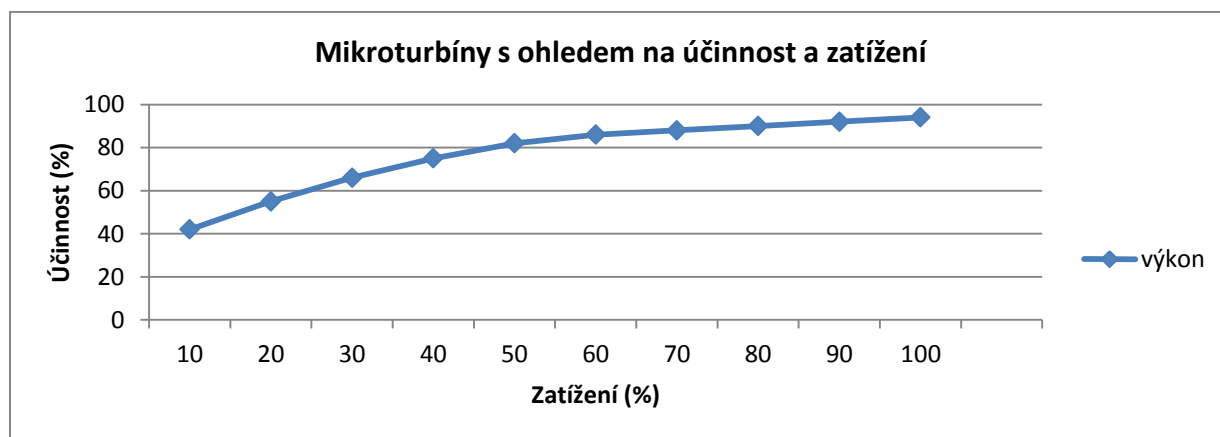
Údržba zařízení se pohybuje okolo 0,01 Euro/kWh. Generální diagnostika, opravy a servis se provádí jednou za 20 000 – 40 000 hodin provozu. Životnost stroje se v praxi pohybuje okolo 40 000 – 80 000 provozních hodin [2].

### 5.1.4 Ekonomické zhodnocení

Požizovací ceny mikroturbín jsou odvislé od výkonových parametrů a pohybují se v rozmezí 1400 – 2000 euro/kW. [2]

### 5.1.5 Částečné zatížení mikroturbín

Změna výkonu turbíny závisí na otáčkách kompresoru (rychlost průchodu pracovní látky) a na změně teploty spalin, které jsou přiváděny na vstup, které jsou limitovány z důvodu nedostatečného chlazení vstupních keramických lopatek. Na obrázku 5.2 je znázorněn pokles účinnosti s výkonem  $P_E = 30$  kW [2].



Obr. 5.2: Schéma mikroturbíny s ohledem na její účinnost a zatížení [2]

### 5.1.6 Použití

Tepelná energie je použita pro sušení, výrobu nízkotlaké a středotlaké páry a také pro vytápění a užitkový ohřev vody. Elektrická energie může být v praxi použita především pro nouzové osvětlení. Mezi největší výrobce těchto strojů patří společnost IR powerworks a také společnost Turbec [2].

Elektrický výkon - P(kWe)	100
Investiční náklady n (euro/kW)	1561
Elektrická účinnost n (%)	28
Celková účinnost n (%)	71
Teplota výstupních spalin z výměníku (°C)	60
Teplárenský modul	0,63

Tab. 5.1: Hlavní parametry mikroturbíny Turbec T100 [2]

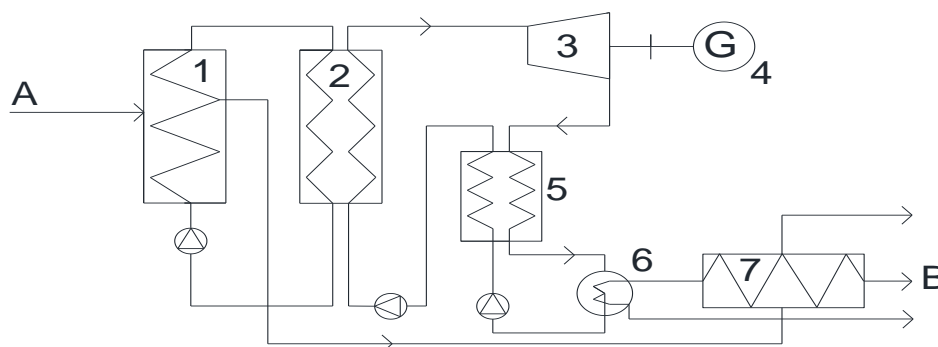


### 5.1.7 Závěrečné shrnutí

Mikroturbíny jsou schopny pracovat do plného výkonu do 15 s. Stroje jsou schopny rychle měnit výkon a to všechno při kompaktních rozměrech zařízení s relativně nízkými pořizovacími a udržovacími náklady. Zařízení má velmi dobrou provozní pružnost, ale pro ještě lepší zvýšení pružnosti se do obvodu zapojují přídatné akumulátory tepla, díky kterým je možno vyrábět nezávisle teplo a elektrickou energii. Palivo ke spalování musí být kvalitní a zbavené mechanických nečistot. V praxi může nastat problémem s nesourodostí spalovacího motoru a turbíny, z čehož plyne větší komplikovanost celého soustrojí. V současné době se u mikroturbín provádí výzkum na ještě účinnější potlačení produkce  $\text{NO}_x$ , který spočívá v tom, že se snižuje teplota spalování pomocí vstřiku vody nebo páry do spalovací komory.

## 5.2 ORC – Organický Rankinův cyklus

Jedná se o kogenerační zařízení, které v principu pracuje jako klasické parní elektrárny (Rankin – Clausiův cyklus), ovšem jako tepelné médium jsou použity organické silikonové oleje, které mají vhodnější termodynamické vlastnosti oproti vodě/páře.

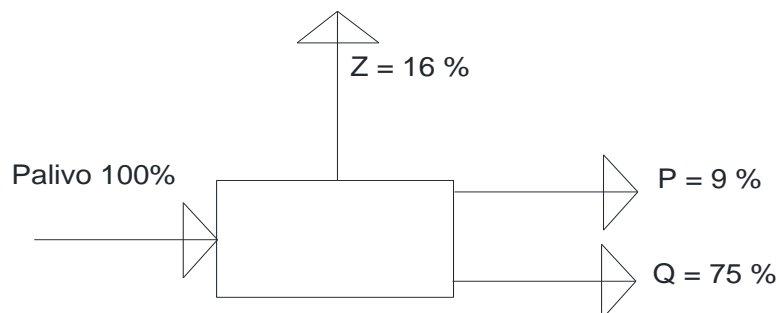


Obr. 5.3: Principiální schéma ORC modulu.

Pozn. A – přívod tepla, B – Odvod tepla, 1 – Tepelný zdroj (kotel), 2 – Parní generátor, 3 – Turbína, 4 – Generátor, 5 – Regenerátor, 6 – Kondenzátor, 7 – Ekonomizér [2]

Jak je uvedeno na obr. 5. 3. tepelná energie je do oběhu přiváděna okruhem silikonového oleje, který je přehříván v tepelném zdroji (kotel). Tento horký olej je vháněn do parního generátoru kde způsobuje odpařování organické vodní sloučeniny v paralelním okruhu, která následně pohání elektrický generátor (adiabatická expanse). Generátor pracuje za nízké rychlosti otáčení. Organická parní směs směřuje dále přes regenerátor do kondenzátoru, kde z kondenzuje, tudíž uvolní tepelnou energii obsaženou v organické vodě. Tato energie je

vyvedena přes ekonomizér a může být použita pro tepelné účely. Kotel obsahuje regulátor tepelné energie, díky kterému jsou přebytečné horké spaliny odváděny rovnou do vodního výměníku (ekonomizéru), kde uvolní svou tepelnou energii, která může být opět využita pro tepelné účely [3]. Na obr. 5.4 je znázorněno schéma KJ pracující s ORC.



Obr. 5.4: Schéma KJ pracující s ORC.

Pozn. Při 100% energie z paliva je ve výsledku produkováno 75% nízkopotenciální tepelné energie (Q), 9% elektrické energie (P) a 16% ztráty (Z) [2]

### 5.2.1 Použití

ORC jsou využity pro malé rozvody tepelné energie (např. vytápění, ohřev vody, sušení). Používají se převážně u KJ s nižšími výkony a nízkými dosahovanými výstupními teplotami, protože ORC cyklus je výhodný v tom, že při nízkých spalovacích teplotách, které jsou v tomto cyklu realizovány, lze dosáhnout vysoké účinnosti. Navíc díky používání silikonového oleje v primárním okruhu, se docílí lepších termodynamických vlastností. Použitá organická látka v sekundárním okruhu může být směs fluid uhlovodíků, toluenu, silikonových látek nebo čpavku či freonů, které mají vysoké molové hmotnosti a také lepší termodynamické vlastnosti. Elektrický výkon se pohybuje v rozmezí 200 – 1 500 kWe a tepelný výkon je udáván obecně od 1,8 až po 10 MW. V případě potřeby vyšších výkonů, lze jednotky provozovat paralelně. Zařízení se vyznačuje dlouhou životností, při velkých počátečních investičních nákladech (průměrně 2100 euro/kWe). Mezi hlavní výrobce na trhu se řadí společnost TURBODEN [2]. V České republice se lze s touto technologií setkat v kotelně na biomasu v Žatci.

### 5.2.2 Účinnost

Celková účinnost ORC se pohybuje do 85%, kdy elektrická účinnost dosahuje hodnot 9 - 20 %, ovšem je to velice závislé na parametrech paliva. Tyto systémy umožňují krátkodobé přetížení až na 120 %. Výstupní teplo má převážně stálé parametry [2].

### 5.2.3 Ekologie

Obsah škodlivých látek ve spalinách je dán parametry paliva. Při použití freonů v primárním okruhu je důležité zamezit úniku do životního prostředí. Častěji používaný termoolej je chemicky inertní, ovšem velmi hořlavý [2].

### 5.2.4 Údržba a spolehlivost

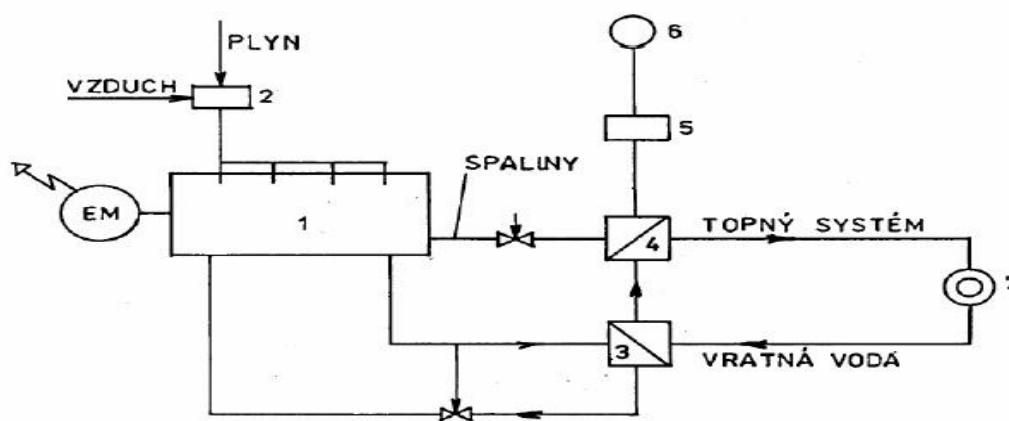
Nároky na údržbu se pohybují 0,01 Euro/kWh, při vysoké spolehlivosti zařízení. Životnost ORC je minimálně 10 let. Pohotovost systému je do 99% [2].

## 5.3 Spalovací motory

Jedná se o klasické pístové motory se spalováním prostorem uvnitř stroje, kde je spalována směs paliva a vzduchu. Převážně se používají motory čtyřtákní (sání, komprese, expanse, výfuk) a to z důvodu menšího zatížení životní prostředí, ale mohou se použít i motory dvoutákní [3].

### 5.3.1 Použití v kogeneraci

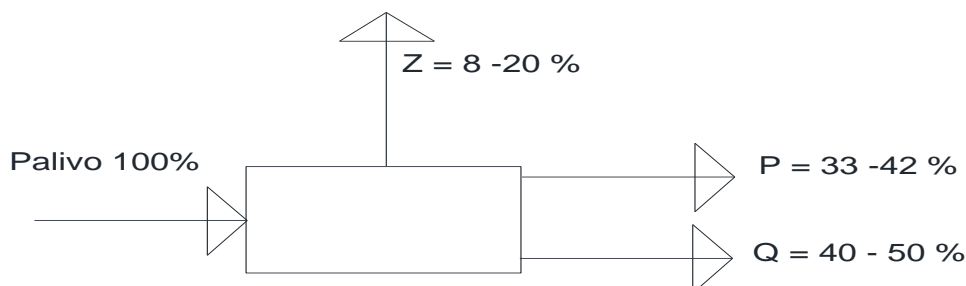
Při výrobě elektrické energie, kdy motor pohání generátor, vzniká současně velké množství odpadního tepla. Největší množství tohoto tepla je vyvedeno výfukovými plyny, které mají teplotu okolo 400 – 540 °C, tyto plyny procházejí speciální výměníkem, kde jsou schopny ohřát médium na teploty od 90°C - 120 °C. Další teplo je odebráno z hlavy motoru, bloku válců a mazacího ústrojí pomocí vody z vodního chladicího systému, která předává svou energii ve výměníku. Teplota systému se pohybuje také od 90 - 120 °C [2].



Obr. 5.5: KJ se spalovacím motorem.

Pozn. 1 – Spalovací motor s elektrickým generátorem, 2 – Směšovač (plyn/vzduch), 3 – Tepelný výměník (voda/voda pro chlazení válců motoru), 4 – Tepelný výměník (spaliny/ topná voda), 5 – Katalyzátor Nox, 6 - Odvod spalin, 7 – Tepelný spotřebič [2]

Elektrický výkon motorů se pohybuje obvykle v rozmezí 10 kW – 5MW, přičemž závisí na rychlosti otáčení hřídele, kdy se motory mohou dělit na pomaloběžné, středoběžné a rychloběžné. Na následujícím obrázku (obr. 5.6) jsou graficky znázorněny podíly energií v KJ.[2]



Obr. 5.6: Jednotlivé vyrobené podíly tepla, elektřiny a ztrát ve spalovací KJ [2]

Pozn. Z – ztráty, P – podíl výroby elektrické energie, Q – podíl výroby tepelné energie

### 5.3.2 Palivo

Může se použít benzin (zážehové motory) nebo nafta (vznětové motory), ale také zemní plyn, propan-butan, skládkový plyn, atd. Spalování plynu navíc způsobuje menší obsah NO<sub>x</sub> ve spalinách. U motorů s velkými výkony se používají dva spolupracující palivové systémy, kdy jedním je do spalovací komory přiváděna nafta nebo benzin (do 6 %) a druhým je přiváděn plyn [2].

### 5.3.3 Účinnost

Vyšší elektrické výkony jsou často spojovány s vyšší účinností stroje. Velikost účinnosti se odvíjí především od kompresního poměru  $\varepsilon$  a také od Poissonovy konstanty  $\chi$  [2]. Výpočet je následující:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}} \quad [-] \quad (5.1)$$

Kde:

$\varepsilon$  – kompresní poměr

$\chi$  – Poissonova konstanta

### 5.3.4 Zážehové motory

Motor obsahuje zapalovací svíčku, která uvnitř válce zapálí směs vzduchu a paliva. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 20 – 40 %. Tepelná účinnost stroje je do 65%. Výkonové rozpětí u těchto strojů dosahuje hodnot od 20 – 5000 kWe, s malou produkcí Nox. Spalování probíhá buď v otevřené spalovací komoře, kdy je celá směs zapálena ve

spalovacím prostoru nebo pomocí předzápalné komory, kdy je bohatší směs zapálena v malé komoře a díky tomu se zapálí i zbytek chudší směsi v celém prostoru. Platí zde přímá úměrnost, čím vyšší otáčky, tím vyšší výkon [3].

### 5.3.5 Vznětové motory

Zde dochází k samovznícení paliva díky horkému vzduchu a vysokému tlaku ve spalovací komoře. Palivo je tedy vstřikováno do válce, kde je stačený, horký vzduch. Elektrická účinnost je zde řádově v rozmezí 30 – 48 %, díky většímu kompresnímu poměru. Tepelná účinnost stroje je do 70%. Největší jednotkový výkon je do 25 MW. Produkce  $\text{NO}_x$  ve spalinách velmi závisí na řídicím systému a také na systému vstříku paliva [3].

### 5.3.6 Ekonomické zhodnocení

Cena motorových systémů se pohybuje v rozmezí 900 – 2000 euro/kWh, která je odvislá od požadovaného výkonu a velikosti jednotky. Rychloběžné stroje bývají levnější, ale to je kompenzováno vyššími nároky na palivo [2].

### 5.3.7 Údržba a spolehlivost

Celé soustrojí obsahuje součástky, které se mohou velmi rychle opotřebit. Je třeba tyto stroje kvalitně mazat a nepodcenit jejich údržbu po odpracování stanovených hodin (výměna mazacích olejů, seřizování ventilů, atd.). Údržba je stanovena na 0,01 – 0,02 Euro/kWh. Motorový chod způsobuje velké množství vibrací a jsou velmi hlučné, ovšem jsou také velmi spolehlivé a pružné. Pohotovost systému se drží na 95 % [2].

### 5.3.8 Škodlivé látky

Mezi tyto látky se řadí oxidy síry ( $\text{SO}_x$ ) a oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), které vznikají při vysokých teplotách spalování. Dále oxid uhelnatý (CO), způsobený nedostatečným spálením paliva a také uhlovodíky, které vznikají důsledkem studených míst v motoru, kterým neprojde tok plamene. V současné době se podnikají patřičné kroky k omezení těchto plynů [2].

#### 5.3.8.1 Primární opatření k omezení emisí

Jedná o snížení zatížení motorů, elektronické řízení zapalování chudé směsi, důkladné prohoření směsi a plné využití spalovacího prostoru bez studených míst. Při dimenzování se musí použít vhodný kompromis, aby zařízení bylo ekonomicky a ekologicky výhodné [3].

### **5.3.8.2 Sekundární opatření k omezení emisí**

Zde je důraz kladen na katalyzátory, které pohlcují velké množství NO<sub>x</sub>, HC, CO. Používá se katalyzátor dvojcestný, trojcestný (pro velké výkony) nebo katalyzátor selektivní s přídatkem čpavku, který je dávkován do katalyzátoru podle toho, jaká je momentální produkce NO<sub>x</sub>. Toto řešení je schopno snížit emise až o 80% [3].

### **5.3.9 Použití**

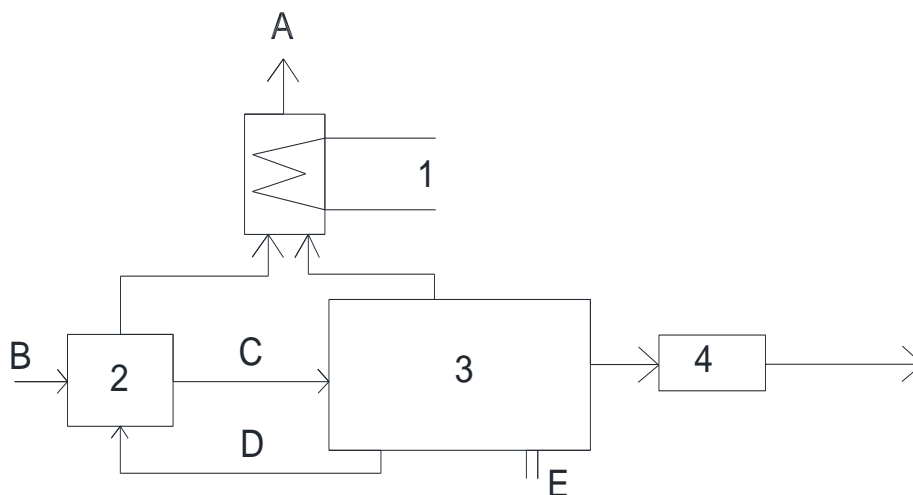
Stroje jsou velmi vhodné pro kogenerační účely. Používají se především na ohřev vody obvykle v teplotním rozsahu 90 - 120°C při nižším tlaku, kdy mohou dodávat teplo do systému CZT s DZT. Vyrábět páru i o vyšších tlacích je možné za použití navazující protitlaké parní turbíny. Největší možný maximální výkon, točivý moment a účinnost je dosažena, když mají stroje při spalování paliva malý přebytek vzduchu ve spalovací komoře, ovšem v tomto stavu produkují poměrně hodně NO<sub>x</sub>, uhlovodíků a také CO<sub>2</sub>. Proto je při dimenzování důležité použít vhodně zvolený kompromis mezi výkonem a produkcí škodlivých látek. Pro krytí proměnlivého zatížení se nasazuje více jednotek pro stabilní účinnost. Tyto MKJ v ČR jsou vyráběny společnostmi Škoda Mladá Boleslav, LIAZ, Zetor a v neposlední řadě společnost TEDOM.

## **5.4 Palivové články v kogenerační výrobě**

Výzkum palivových článků pro kogenerační účely probíhá již dlouhou dobu. Dnes se již s nimi lze setkat v praxi. Tyto galvanické články mohou přeměňovat energii z paliva na elektrickou energii pomocí elektrochemické reakce. Zisk elektrické energie velmi závisí na napětí jednotlivých článků a na celkové proudové zatížitelnosti systému. Teoreticky je možná 100% účinnost přeměny energie (účinnost elektrochemické reakce), ovšem v praxi je vždy část energie přeměněna na tepelnou energii ve formě vody nebo páry. Jako zdroj paliva se může použít vodík, který v kombinaci s kyslíkem vyrábí elektrickou energii. V současnosti jsou převážně používána jako paliva zemní plyn, LPG, bioplyn a etanol, které musí být rozloženy v palivovém článku na oxidy uhlíku a vodík. Tento rozklad provádí procesní jednotka. Spotřeba paliva a kyslíku je v přímé úměře s proudovou velikostí. Pro přeměnu vyráběného stejnosměrného proudu na střídavý je použit elektrický invertor.

V principu se vodík štěpí na protony a elektrony na anodě (záporná elektroda), která je pokrytá katalyzátorem, kde se atomy zbavují několika elektronů z valenční vrstvy. Tyto prvky dále procházejí elektrolytem ke katodě, která je rovněž pokryta katalyzátorem (vznik

elektrického proudu). Na katodě prvky reagují s absorbovanými atomy kyslíku a tím se vytvoří vodní pára, která lze transformovat pro tepelné využití. Na katodě tedy probíhá redukce (příjem volných elektronů). Na elektrodách se vůči sobě vytvoří elektrický potenciál (napětí). Každý jednotlivý článek je schopný dosáhnout napětí 1,187 V. Elektrický výkon je vyveden do elektrického měniče. Na obr. 5.7 je znázorněno schéma palivového článku [2].



Obr. 5.7: Schéma palivových článků v kogeneraci.

Pozn. A – Odpadní plyny, B – Zemní plyn, C – Plyn bohatý na  $H_2$ , D – Procesní pára, E – Vzduch, 1 – Nízkopotenciální teplo určené spotřebiteli, 2 – Procesní jednotka, 3 – Palivové články, 4 – Elektrický střídač [3]

#### 5.4.1 Procesní jednotka (reformátor)

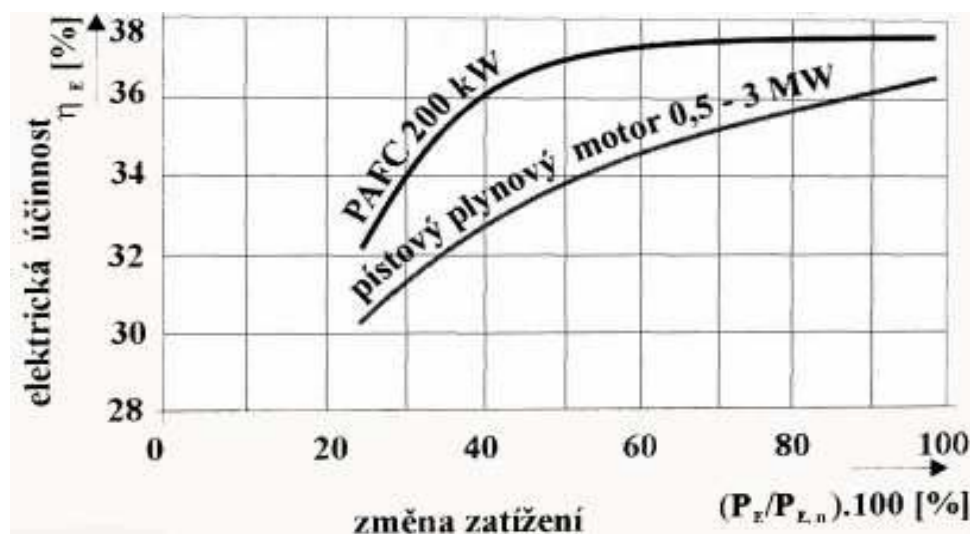
Jedná se o důležitý přístroj v případě používání vodíku jako paliva, protože přeměňuje vstupní palivo na oxidy uhlíku a vodíku. Výroba vodíku je v současnosti velmi investičně nákladná. Jednotlivé postupy pro reformování paliva se liší pouze zdrojem kyslíku obsaženým v palivu. Vodík je vyráběn pomocí vysoce endotermních chemických reakcí. Hlavní možnosti pro výrobu vodíku z paliva se nazývají parní, oxidační a auto-termické reformace [2].

#### 5.4.2 Rozdělení podle elektrolytu

##### 5.4.2.1 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)

Tyto články jsou zatím nejvíce rozvinuty pro použití v praxi. Jedná se o membránový typ. Jako elektrolyt je zde zastoupena kyselina fosforečná. Tento systém je schopen pracovat při teplotách 170 - 200°C. Elektrická účinnost tohoto systému je okolo 35 - 40% a tepelná účinnost je 50-75%. Zbytek jsou ztráty tvořené reformováním paliva a úpravou elektrické energie. Pořizovací cena jednotky je okolo 3900 Euro/kW<sub>E</sub>, kdy celkové investiční náklady se

pohybují okolo 4500 Euro/kW<sub>E</sub>. Celkové tepelné dodávky mají hodnotu 0,74 GJ/h (218 kW<sub>e</sub>). Systémy PAFC jsou vyráběny v USA a v praxi se začínají používat do kogeneračních jednotek o tepelném výkonu do 225kW a elektrického výkonu 200 kW [3].



Obr. 5.8: Porovnání spalovacího motoru a palivového článku PAFC s ohledem na změnu účinnosti a zatížení. [2]

#### 5.4.2.2 MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)

Jedná se o typ s rozemletými karbonáty. V tomto systému obsahují palivové články taveninu, která je tvořena alkalickými uhličitany (elektrolyt). Tento systém dosahuje elektrického výkonu do 250 kW<sub>E</sub>, při elektrické účinnosti 43%. Provozní teplota se pohybuje o hodnotách 660°C. Investiční náklady jednotky jsou okolo 4400 Euro/kW<sub>e</sub>, při celkových investičních nákladech 5000 Euro/kW<sub>e</sub>. Celkové tepelné dodávky mají hodnotu 0,44 GJ/h, kde tepelný výkon je 128 kW<sub>T</sub>. Princip je velmi podobný předchozímu případu. V blízké budoucnosti se očekává začlenění systému do praxe. Ovšem tento systém je dražší oproti předchozímu, ale elektrická účinnost systému dosahuje hodnot až 60%, což dává ekonomický potenciál u zařízení s vyššími výkony [2].

#### 5.4.2.3 SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)

Tento systém má oxido-keramické palivové články, které obsahují pevný elektrolyt (ytrium stabilizované zirkonem). Princip je stále podobný předchozím případům. Elektrický výkon je okolo 100 kW<sub>e</sub>. Pracovní teplota v tomto systému dosahuje hodnot 1000°C. Kanály distribuující plyn v článku obsahují katalyzátory, které rozkládají plyn na CO<sub>2</sub> a H. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 45%. Pořizovací náklady jednotky se pohybují okolo 2900 Euro/kW, při celkových investičních nákladech 3500 Euro/kW<sub>e</sub>. Celkové tepelné dodávky mají hodnotu 0,1 GJ/h, kde tepelný výkon je 56 kW<sub>T</sub>. Celková účinnost je do 70% [2].



### 5.4.3 Parametry palivových článků

#### 5.4.3.1 Účinnost palivových článků

Palivový článek tedy teoreticky může osahovat napětí 1,187 V ( $U_{teo}^{PC}$ ) [2][3].

Výkon článku je dán:

$$P_E^{PC} = U_{teo}^{PC} * I [-] \quad (5.2)$$

Kde:

$U_{teo}^{PC}$  – teoretické napětí palivového článku

$I$  – proud protékající obvodem

V praxi je ovšem tento výkon a napětí o něco menší, protože v jednotlivých částech článků jsou ztráty. Ztráty jsou také způsobeny odporem elektrolytu a odporem chemického složení anody a katody při průchodu proudu. Tento odpor se mění na teplo. Tudíž skutečné napětí ( $U_{skut}^{PC}$ ) je v nezátženém stavu 1,1V a v zatíženém stavu 0.5 – 0.6 V.

Účinnost elektrické přeměny:

$$\eta_E^{PC} = \frac{U_{skut}^{PC}}{U_{teo}^{PC}} [-] \quad (5.3)$$

Kde:

$U_{teo}^{PC}$  - napětí palivového článku

$U_{skut}^{PC}$  - skutečné napětí palivového článku

Celková účinnost je dána:

$$\eta_E^{PJ} = \eta_E^{PC} * \eta_{upal} * \eta_{uE} * \eta_{vpal} [-] \quad (5.4)$$

Kde:

$\eta_E^{PC}$  – účinnost elektrické přeměny

$\eta_{upal}$  - účinnost palivové úpravy

$\eta_{uE}$  - celková účinnost úprav elektrického proudu

$\eta_{vpal}$  – účinnost využitého paliva

Na elektrickou účinnost má velký vliv okolní teplota, především u vysokoteplotních palivových článků, kdy účinnost může klesnout až o 30% [2] [3].

#### 5.4.4 Použití dodávané tepelné energie

Tepelná energie z palivových článků je odebírána z reformátoru, z anody nebo katody a je použita především pro účely vytápění, ohřev horké vody nebo páry s ohledem na typ použitých článků.

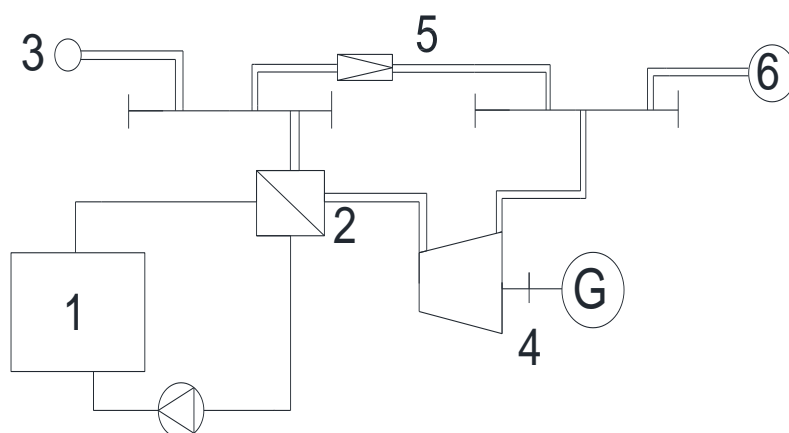
#### 5.4.5 Použití

Nespornou výhodou těchto zařízení je, že minimálně zatěžují životní prostředí. Zařízení obsahuje totiž odsiřovací stupeň, který je umístěn před reformátorem a slouží k odsíření zemního plynu. Síra by jinak mohla znečistit celé zařízení. Nedochozí k tvorbě  $\text{NO}_x$ , uvolňují se pouze malé organické částičky látky z reformátoru a anody. Údržba je v podstatě nulová, články pracují s velkou účinností a dlouhou životností (cca 80 000h). Pro potřebný výkon se palivové jednotky spojují. Pořizovací cena jednotek se pohybuje okolo 2400 – 5000 Euro/kW. V této ceně jsou zahrnuty měrné investiční náklady na blok palivového bloku, na úpravu paliva, na úpravu elektrické energie, na regenerační systém tepla a na úpravu vody. Dodávky tepelné i elektrické energie jsou značné a zároveň se mohou tyto systémy používat jako nouzové systémy namísto současných diesel agregátů. Očekává se velké rozšíření těchto systémů do budoucnosti, kdy mohou nahradit pístové motory. Palivové články jsou schopny přispívat tepelnou energií do systému CZT i DZT. Jednotka má velice kompaktní rozměry a je možné ji skladovat v malých prostorách.

### 5.5 Kogenerace pomocí tlakové energie

V principu je zemní plyn veden pomocí vysokotlakých dálkových plynovodů o tlaku od 2 – 7 MPa. Teplota v potrubí je velmi podobná okolnímu prostředí, ale díky snižování tohoto tlaku pro středotlaké a nízkotlaké rozvody pomocí regulačních stanic plynu se uvolňuje velké množství energie, které lze použít pro expansní turbíny. Pro lepší účinnost je doporučeno plyn předeřhát cizím zdrojem tepla.

Tento ohřev může být prováděn parou, která je odebírána z protitlaké či odběrové turbíny, odpadním teplem pocházejícího ze spalovacího motoru nebo vodou z horkovodního kotle či tepelného čerpadla [3].



Obr. 5.9: Schéma systému se zemním plynem a s ohřevem plynu pomocí horkovodního kotle.

Pozn. 1 – Plynový kotel horkovodní, 2 – Výměník plyn/voda, 3 – Vysokotlaký plynovod, 4 – Expansní turbína s generátorem, 5 – Redukční armatura, 6 – Nízkotlaký plynovod [2]

### 5.5.1 Použití

Tyto systémy se používají jako MKJ o malých a středních výkonech, které jsou doplněny o teplovodní akumulární zařízení, které umožňuje nezávislou výrobu elektrické i tepelné energie, což má za následek, že jednotky mohou pracovat podle požadavků elektrické i tepelné sítě.

## 5.6 Stirlingův motor

Této látce je předávána energie, která může být získána pomocí vnějších spalování paliva (ohřívák). Stirlingův motor obsahuje studenou a teplou komoru (levý a pravý válec), ve kterém neprobíhá proces spalování. Motor lze dělit podle konstrukčního uspořádání na typ alfa (převážně používaný), beta a gama [3].

### Typ Alfa

Kliky motoru svírají úhel  $90^\circ$  a pracovní medium v motoru se při práci pouze přemisťuje z prvního válce do druhého o stejném tlaku, ale rozdílných teplotách. Hřídel se otáčí synchronně u obou válců. Tento stroj obsahuje ohřívák, chladič a regenerátor [2][3].

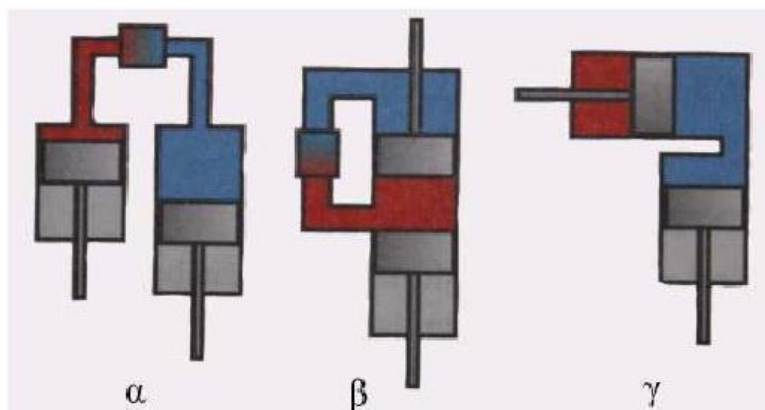
### Typ Beta

Oba písty jsou ve společném válci. Horní část je chlazená a dolní opět ohřívána. V praxi se téměř nevyskytuje [2][3].

### Typ Gama

Tato varianta je podobná typu beta, ovšem ve dvou válcích. Ohřívána je jen část válce přeháněcího. Pracovní válec a zbylá část přeháněcího válce se chladí [2][3].

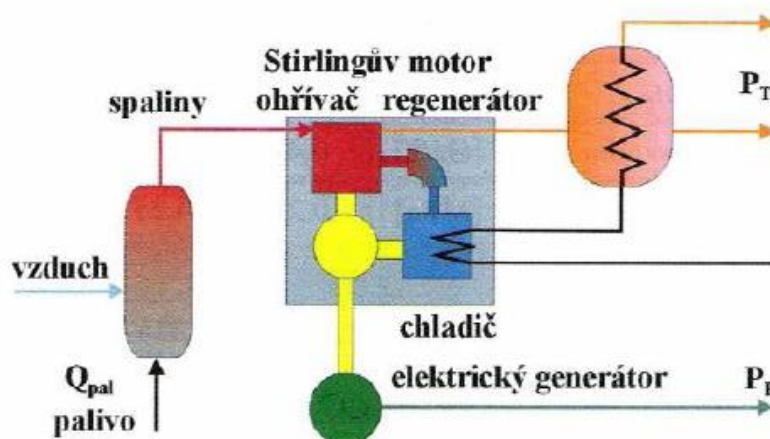
Na obr. 5.10 je grafické provedení jednotlivých typů.



Obr. 5.10: Schéma Stirlingova motoru, typ alfa.

Pozn. A – Studený prostor, B – Chladič, C – Regenerátor, D – Ohřívák, E – Horký prostor [2]

Následující obr. 5.11 znázorňuje princip Stirlingova motoru.



Obr. 5.11: Schéma Stirlingova motoru, typ alfa.

Pozn. A – Studený prostor, B – Chladič, C – Regenerátor, D – Ohřívák, E – Horký prostor [2]

### 5.6.1 Popis funkce

Nejprve je levý píst v dolní poloze a je zcela vyplněn pracovní látkou, která je chladná. V druhém válci je píst ve střední poloze válce, tudíž je z půlky zaplněn horkou pracovní látkou. Píst v druhém válci se pohybuje směrem vzhůru, přičemž přetlačuje horké médium přes regenerátor a chladič, kde je odváděno teplo. V prvním válci dochází k izotermické kompresi. Po této kompresi je médium zpět přetlačováno z levého do pravého válce, ovšem při tomto přesunu je médium ohříváno díky ohříváku a zvětšuje se pracovní objem látky. Tento děj je ideálně izotermický, až do doby, kdy je píst pravého válce v nejnižší poloze (je celý zaplněn médiem) a levý píst je zaplněn jen z poloviny. Následně je médium opět

přetlačeno do levého válce při stálém objemu a při výměně tepelné energie s chladičem. Následně se děj opakuje. V pracovním prostoru je stále stejné množství pracovního tepelného média (3/4) a plynu (1/4), které jsou stále vyměňovány mezi válci. Jako pracovní látka se používá nejčastěji vodík, helium, dusík, oxid uhličitý a v budoucnosti se počítá s využitím zkapalněné biomasy. Pracovní tlak ve válcích je v mezích 15 – 20 MPa a teplota média se pohybuje v rozmezí 630 - 730°C [2].

### 5.6.2 Účinnost

Účinnost je odvislá od parametrů motoru. Záleží na kompresním poměru, na použité pracovní látce a na rozdílu teplot z expanzního a kompresního prostoru. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 33 %. Celková účinnost je do 85 % [2][3].

$$\eta_t = \frac{\ln \varepsilon (\phi - 1)}{\frac{1}{\chi - 1} (\phi - 1) + \phi \ln \varepsilon} [-] \quad (5.5)$$

Kde:

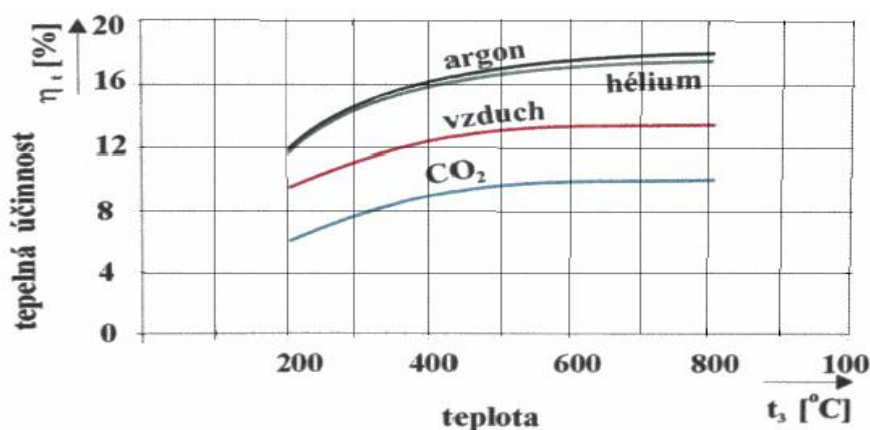
$\phi = T_3/T_2$  – jedná se o poměr teplot v komplexním a expanzním prostoru

$\varepsilon = V_1/V_2$  – jedná se o kompresní poměr

$\eta_{uE}$  - celková účinnost úprav elektrického proudu

$\chi$  – Poissonova konstanta

Na obr. 5.12, je vidět účinnost v závislosti na teplotě při používání jiných pracovních médií.



Obr. 5.12: Graf závislosti elektrického výkonu na elektrické účinnosti u Stirlingova motoru [2]

### 5.6.3 Zdroj tepla pro stirlingův motor

Využívá se teplo z jiného tepelného zdroje (např. pístové motory) nebo zbytkové teplo z technologických procesů. Další možností je, že se speciálně pro tento motor zhotoví kotelný, který dodává potřebnou tepelnou energii. Využít se může i sluneční nebo geotermální energie.

### 5.6.4 Tepelné a elektrické parametry

Elektrická energie je odebírána z generátoru, který roztáčí společná hřídel motoru. Elektrické výkony dosahují hodnot od 10 – 600 kWe (1 – 1,5 MWe při spalování biomasy). Výkon motoru je silně závislý na změně tlaku (množství pracovní látky) v pracovním prostoru. Teplárenský modul výroby je od 0,12 – 0,17. Chladič odvádí tepelnou energii, kdy tepelné výkony závisí na parametrech použitého paliva a dosahuje hodnot od 200 – 850 °C (do 10 kWt). Tepelná energie je použita pro vytápění a ohřev vody [2].

### 5.6.5 Provoz a údržba

Emisní parametry závisí na parametrech zdroje dodávaného tepla, ovšem je prokázána snížená produkce CO<sub>2</sub> oproti produkci z klasických zdrojů. [3] Motor je velmi tichý a bez rušivých vibrací. Stroje jsou v podstatě bezúdržbové (0,01 Euro/kWh) a při dodržení servisních harmonogramů nejvytíženějších částí jsou schopny pracovat v rozmezí 30 000 – 70 000 hodin. Motory mají dlouhou životnost, vysokou spolehlivost, pohotovost a navíc jsou velmi šetrné k životnímu prostředí. Nutno podotknout, že investiční náklady jsou poměrně vysoké v poměru na požadovaný elektrický i tepelný výkon. Pohybují se v rozmezí 900 – 1600 euro/kWh. Mezi výhody se řadí, že motor je za velmi krátkou dobu schopen najet na plný elektrický výkon.

V současné době jsou k dostání kogenerační stroje od firmy United Stirling, STM Power INC a český výrobce TEDOM Třebíč.

## 5.7 Kogenerace v klimatizaci a výrobě chladného prostředí

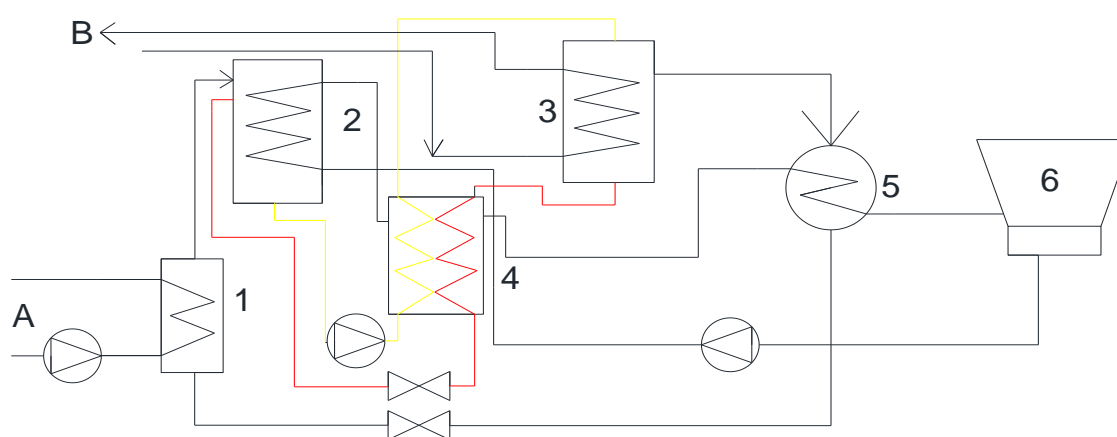
Přesněji řečeno se jedná o trigeneraci, protože se vyrábí elektrická energie, tepelná energie a také chlad. To je dáno spoluprací MKJ (standardně spalovací motor) a absorpční chladicí jednotky. Toto řešení umožňuje využití kogeneraci i v horkých letních dnech kdy není prakticky žádný odběr tepelné energie tím, že se vyrábí chladný vzduch (voda), který je používán v klimatizaci [3].

### 5.7.1 Kompresorové chlazení

Jako pohon se používá nejčastěji elektromotor. V tomto řešení se neprodukuje žádná elektrická energie. Princip je obdobný jako u tepelných čerpadel, ovšem liší se v teplotách v kondenzátoru a výparníku. Pro efektivní činnost je potřeba aby teplota v kondenzátoru dosahovala hodnot pod  $20^{\circ}\text{C}$  a teplota ve výparníku nabývala hodnot okolo  $-15^{\circ}\text{C}$ , která je požadována studeným prostorem [3].

### 5.7.2 Absorpční chlazení

Absorpčním chlazení obsahuje tři samostatné tepelné okruhy. V prvním oběhu se nachází varník, kam vstupuje topná voda z kogenerační jednotky o teplotě od  $90$  do  $140^{\circ}\text{C}$ . Tato voda ohřívá roztok absorbentu a chladiva ve druhém okruhu ( $20 - 46^{\circ}\text{C}$ ), který se začne následně vypařovat. Odpařená voda je vháněna do kondenzátoru kde kondenzuje a předá své teplo chladicímu zařízení. Kondenzát putuje dále přes škrtecí ventil do výparníku, kde je teplota snížena na  $6^{\circ}\text{C}$  při tlaku  $1\text{kPa}$ . V tomto výparníku kondenzát odebírá teplo z příchozího třetího okruhu, na který je napojena klimatizace ( $8^{\circ}\text{C}$ ), odpařuje se a zároveň drží požadovanou teplotu v třetím okruhu. Pára, která byla odpařena, putuje do absorbéru, kde je pohlcována absorbentem, což má za následek vytvoření tepla, které je odvedeno do kondenzátoru. Dále je roztok vháněn zpět přes regenerační výměník do varníku kde se ohřeje (teploty  $20 - 46^{\circ}\text{C}$ ), zde se většina roztoku opět vypaří, a je vháněn opět do kondenzátoru, přičemž se celý proces opakuje. Malá část roztoku se z varníku vhání zpět do regeneračního výměníku, kde se roztok přehřívá a putuje do absorbéru, kde se proces taktéž opakuje. Roztok chladiva a absorbentu obsahuje vodu a lithium-bromid nebo vodu a čpavek [2][3].



Obr. 5.13: Schéma absorpčního chladičského zařízení.

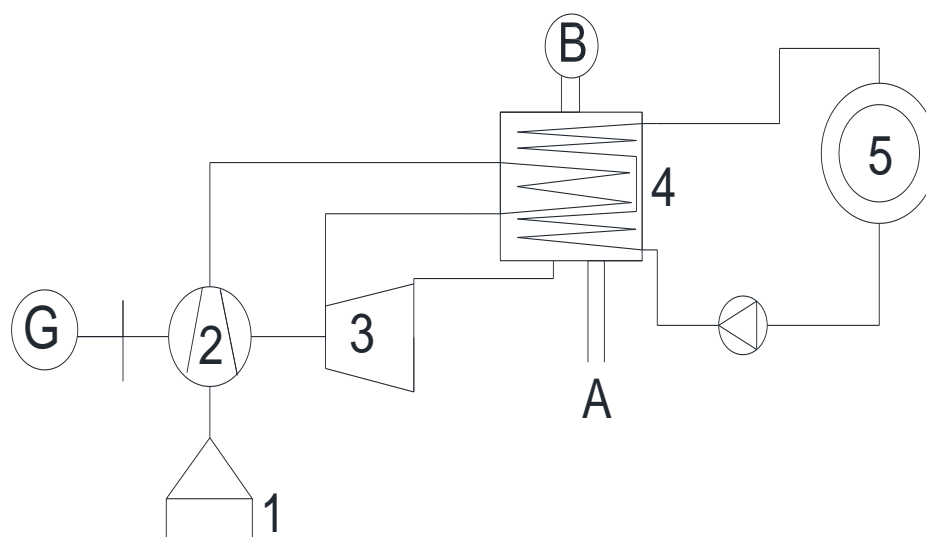
Pozn. A – Chladná voda  $8^{\circ}\text{C}$ , B – Horká voda z KJ, 1 – Výparník, 2 – Absorbér, 3 – Varník, 4 – Regenerační výměník, 5 – Kondenzátor, 6 – Chladicí zařízení[3]

### 5.7.3 Použití

Tyto systémy můžeme využít všude, kde se používá klimatizace (obchodní domy, nemocnice, metro, atd.). Velmi používané po celém světě je především absorpční chlazení, které má uplatnění v teplých oblastech. Největší výhoda je dána tím, že se mohou celoročně používat kogenerační jednotky, které jsou v podstatě stále v provozu, tudíž mohou být ekonomicky velmi zajímavé. Z technického hlediska lze tvrdit, že čím vyšší teplota je v prvním oběhu, tím je chladicí zařízení menší a levnější. Obě řešení jsou ekologická, netoxická, chemicky stálá a ekonomicky velmi zajímavá [2][3].

## 5.8 Systém Talbot

Tento systém využívá vzduchovou turbínu a používá se pro menší elektrické a tepelné výkony. V tomto systému lze nalézt kotel s teplosměnnými plochami, který ohřívá stlačený vzduch a topnou vodu. Dále soustrojí obsahuje vzduchovou turbínu vybavenou kompresorem.



Obr. 5.14: Schéma systému Talbot.

Pozn. A – Palivový přívod, B – Odvod spalin, 1 – Vzduchový přívod, 2 – Kompresor, 3 – Vzduchová turbína, 4 – Kotel, 5 – Spotřeba tepla[3]

Vzduch nasávaný pomocí kompresoru je stlačen a vyveden do kotle, kde se ohřeje spolu s palivem na teploty okolo 800°C a následně se spálí. Spaliny expandují na turbíně a pohání kompresor a generátor. Jako palivo se používá biomasa tvořena dřevní štěpkou, dřevními odpady. Palivo by mělo být v kotli rovnoměrně rozloženo [2].



## 6 Porovnání parametrů malých kogeneračních jednotek

Typ	Elektrický výkon	Pohotovost	Elektrická účinnost	Celková účinnost	Modul teplárenské výroby
	(kWe)	(%)	(%)	(%)	(-)
Mikroturbíny	25 – 250	90 - 95	18 - 35	65 -85	0,5 - 0,7
ORC	200 - 1500	65 -85	9,2	65 - 85	0,1 – 0,3
Zážehové motory	50 – 5000	80 - 85	20-40	60 - 80	0,5 - 0,7
Vznětové motory	20 – 5000	80 - 90	30 - 48	60 - 85	0,8 - 1,4
Palivové články	40 – 50000	90 - 92	35 - 40	85 - 90	0,8 - 1,0
Stirlingův motor	3 – 1500	85 - 90	35 - 50	60 - 80	1,2 - 1,7
Systém Talbot	1 – 200	85 - 95	20 - 30	65 - 90	0,5 - 0,8

Tab. 6.1: Porovnání nejrozšířenějších MKJ [2][3]

Mikroturbíny	
Výhody:	Nevýhody:
malé rozměry a hmotnost	investiční náklady
nízké náklady na údržbu	
vysoká spolehlivost v důsledku malého počtu pohyblivých se částí	
ucházející hlučnost	
palivová flexibilita	
ORC	
Výhody:	Nevýhody:
dlouhá doba životnosti	vysoké investiční náklady
malá citlivost na změnu zatížení	pomalý start
využití biomasy a obnovitelných zdrojů	nutnost pokrývat špičkové tepelného zatížení jiným zdrojem
Spalovací motory	
Výhody:	Nevýhody:
vysoká účinnost v širokém výkonovém rozmezí jednotek	vysoké náklady na údržbu
relativně nízké investiční náklady	
široký rozsah výkonů od 3 kWe	vysoký nízkofrekvenční hluk
rychlý nárůst na plný výkon (15)	
možnost provozu v ostrovním režimu	musí být stále chlazeny
možnost použití více paliv v provozu	
Palivové články	
Výhody:	Nevýhody:
flexibilita, vysoká účinnost v pásmu zatížení jednotky	pomalý start
možnost širokého použití paliv, které vyžadují úpravu na čistý vodík	vstupní investiční náklady
nízký hluk a emise	doba životnosti
Stirlingův motor	
Výhody:	Nevýhody:
produkuje velmi nízké emise	prozatím vysoké investiční náklady
výroba elektrické energii není závislá na výrobě tepla	lepší účinnost pro výkony nad 3 kWe
není potřeba dodatečný zdroj tepla	nízká mechanická účinnost motorů v rozmezí 350 - 800W

Tab. 6.2: Výhody a nevýhody nejrozšířenějších MKJ [2][3]

## 7 Paliva

Jednotlivé druhy a typy paliv jsou určeny pro jednotlivé druhy a typy MJK. Při výběru paliva pro konkrétní kogenerační systém je nutno hledět na co nejvýhodnější provozní, ekonomické a ekologické parametry. Paliva použita v MKJ musí být náležitě upravena pro ideální přeměnu energie [1][3].

### 7.1 Základní parametry paliv

#### 7.1.1 Úprava palivového složení

Z paliva se odstraňují nežádoucí prvky, jako jsou voda, síra, pevné částičky a oxid uhličitý. Dále jsou do paliv přidávány složky, které podporují chemickou reakci při hoření a provádí se také zušlechťování paliv, což má za následek zvětšení potenciální energie uvnitř paliva. Nositelé tepelného potenciálu jsou především vodík, uhlík a síra [2].

#### 7.1.2 Rozdělení paliv

##### 7.1.2.1 Paliva z neobnovitelných zdrojů energie

Neobnovitelné zdroje energie jsou definovány jako fosilními paliva (nerostné suroviny), ve kterých je ukryta energie. V ČR se získává povrchovou těžbou [2].

##### 7.1.2.2 Paliva z obnovitelných zdrojů energie

Tyto paliva představují nefosilní zdroje potenciální energie, která je využívána stále častěji pro energetické účely. Jedná se především o energii z alternativních paliv, které reprezentuje především biomasa [2].

##### 7.1.2.3 Rozdělení podle skupenství

Tuhá paliva se vyznačují relativně malým energetickým obsahem s vysokým podílem látek znečišťující okolní prostředí. Jedná se především o hnědé a černé uhlí. Dále se mezi tuhá paliva řadí biomasa, brikety, dříví, sláma, atd. Mezi kapalná paliva, která se vyznačují vysokým energetickým obsahem s nízkým podílem látek znečišťující okolní prostředí, patří produkty ze zemního plynu, jako jsou plynové a topné oleje, metanoly či jiné uhlovodíky. Dále sem patří produkty spojené s ropou. Plynná paliva zastupuje především zemní plyn, propan-butan, plynné uhlovodíky, koksárenský plyn, degazační plyn, atd. [2].

### 7.1.3 Nejdůležitější palivové parametry

Pro každou MKJ a její efektivní provoz je nutné znát palivové parametry, ze kterých je možné posoudit vhodnost paliva do daného zařízení. V následujících řádcích jsou popsány nejdůležitější parametry [2].

#### 7.1.3.1 Chemický parametr

Jedná se o reakci paliva s kyslíkem, respektive jak dobře prohoří směs paliva s kyslíkem ve spalovací komoře. Určující je zde tzn. reaktivita, která udává prvkové složení paliva, podle kterého je pak určeno množství přípouštěného vzduchu do spalovacího prostoru pro ideální prohoření [2].

#### 7.1.3.2 Energetický parametr

Tento parametr je výsledkem vzájemného energetického porovnání paliv, ze kterého vyplývá, kolik paliva je potřeba pro výrobu určité množství energie. Parametr je vyčíslen z termochemických oxidačních rovnic [2].

#### 7.1.3.3 Výhřevnost

Jedná se o tepelné množství, které je získáno z dokonale spáleného paliva. Výhřevnost se stanovuje rovnicí odvislé z prvkového složení daného paliva (svazová rovnice). Z výhřevnosti lze dále definovat účinnost zařízení. Pro tuhá paliva se jednotky udávají v MJ/kg a pro plynná paliva v MJ/m<sup>3</sup>. Čím více vody obsahuje palivo, tím je výhřevnost horší [2].

#### 7.1.3.4 Měrná hmotnost

Parametr, důležitý pro určení prostorové náročnosti paliva pro skladování, který souvisí s využitím a dodávacími cykly daného paliva [2].

#### 7.1.3.5 Zápalná teplota

Jedná se o teplotu, kterou musí palivo s okysličovadlem dosáhnout, aby probíhal ideální proces hoření (chemická reakce), bez přívodu tepla z okolního prostředí. U pevných paliv se tato teplota pohybuje okolo hodnot 200 – 600 °C, u paliv kapalných 210 – 600 °C a u paliv plyných 460 – 700 °C [2].

### 7.1.3.6 Teplota vzplanutí

Jedná se o teplotu, která udává vznik zápalné směsi. Teplota se pohybuje v rozmezí pokojových teplot až do teplot 200 °C, při uvažovaném atmosférickém tlaku. Tato hodnota udává třídu hořlavosti dané látky (tzn. těkavost) [2].

### 7.1.4 Ekonomické parametry paliv

Tyto parametry jsou potřeba ke stanovení celkové ceny paliva. Dále se do celkové ceny obvykle přičítá ještě pořizovací cena paliva, cena za úpravu paliva a ceny z manipulace, transportu a dostupnosti paliva [2]. Nejdůležitější parametry popisuje následující tabulka 7.1.

Palivo (tuhé palivo)	Výhřevnost (MJ/m <sup>3</sup> )	Zápalná teplota (°C)	Cena energie v palivu (Kč/GJ)
Hnědé uhlí (tuhé palivo)	15,6	350	40-80
Černé uhlí (tuhé palivo)	20,5	450	50-100
Sláma (tuhé palivo)	14,4	310	80-100
Dřevo (tuhé palivo)	18,6	280	70-150
Benzin (kapalina)	42,4	257	390-490
Nafta (kapalina)	42,8	316	410-510
Propan (kapalina)	46,3	470	289-388
Butan (kapalina)	47,7	372	270-370
Bionaftal (kapalina)	37,5	320	410-510
Zemní plyn (plyn)	35,7	650	150-350
Butan (plyn)	45,2	360	200-300

Tab. 7.1: Přehled nejpoužívanějších paliv [2]

### 7.1.5 Škodlivé látky způsobené spalováním

Jedná se o plyny, způsobené spalováním paliva za určitého poměru se vzduchem. Spaliny obsahují zbytky nespáleného paliva, oxidy síry, oxidy dusíku, oxidy kyslíku, oxid uhelnatý, vodní páru, atd. Největší problém fosilních paliv, je přítomnost oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) ve spalinách, který přispívá k oteplování planety. Velikost CO<sub>2</sub> závisí na poměru vodíku a uhlíku v palivu. Nejmenší poměr lze zaznamenat u plyných paliv. CO<sub>2</sub> není uvolněno do životního prostředí, pokud jsou spalována biopaliva (alternativní paliva). Další hlavní znečišťovatel životního prostředí je síra, která se musí držet v dovolených mezích při spalování. Spalování je možné rozdělit na dokonalé (dobré promíchání paliva se vzduchem), kdy je ve spalinách obsaženo velké množství CO<sub>2</sub> a na spalování nedokonalé (nedostatečné promíchání paliva se vzduchem), kde vzniká velká koncentrace CO [2].

## 7.2 Využití biomasy

Jedná se o obnovitelný zdroj energie. Biomasa je definována jako hmota rostlinného a živočišného původu. Rozděluje se do následujících dvou odvětví [1].

### 7.2.1 Biomasa určená pro spalování a zplyňování

Používá se dřevní štěpka, piliny, hobliny, sláma, kůra, atd., Za zmínku stojí, že některé rostliny (řepka olejná) a dřeviny (olše, topoly) jsou vypěstovány přímo pro účel spalování a zplyňování. Podíl využití těchto obnovitelných zdrojů v elektrárenských kotlích je rok od roku větší [1].

#### 7.2.1.1 Spalování

Spalování biomasy v kotli je ekonomicky nejefektivnější, ovšem po energetické stránce už tak efektivní není. Spalování biomasy je prováděno ve výtopnách a teplárnách v roštových a fluidních kotlích [1].

#### 7.2.1.2 Zplyňování

Po energetické stránce je tento způsob více efektivní než předchozí. Biomasa je transformována na plyny, které se poté využívají ve velmi efektivních kogeneračních zařízeních. Navíc z dřevních odpadů je možno vyrobit velmi kvalitní topný plyn. Na zplynění se používá především dřevo, sláma, kůra, řepka a dřevo. V těchto zdrojích je velké procento vlhkosti (minimálně 50%), pro lepší efektivitu je doporučeno zdroje vysušit minimálně do 20% původní vlhkosti [1].

#### A) Zplyňování v generátorech s pevným ložem

Ekonomicky výhodné. Zplyňování je prováděno za atmosférického tlaku při relativně nízkých teplotách. Kromě užitečných plynů se tímto řešením produkují také dehtové látky a zároveň fenolové vody, které se likvidují velmi těžko. Tento systém je vhodný pro dodávky plynu do spalovacích plynových motorů [1].

## B) Zplyňování ve fluidních generátorech

Jedná se o ekonomicky náročnou a složitou technologii, která je v posledních letech intenzivně zkoumána. V reálném provozu se prozatím tyto generátory nevyskytují, ale je pouze otázkou času, kdy se tak stane. Zplyňování je prováděno o teplotách 820 – 1000 °C při tlaku od 1.5 – 2.5 MPa. Odpadní plyny (dehet, fenoly, mastné kyseliny, atd) jsou při těchto teplotách rozložitelné a spalitelné, tudíž se užitečné plyny dají skladovat nebo přímo použít a spálit ve spalovacích turbínách a motorech. Užitečné plyny jsou 4 – 15% CO, 5 – 7% CH<sub>4</sub>, 8 – 12% H<sub>2</sub>, a dále inertní plyny. Výhřevnost (Q<sub>i</sub>) se pohybuje 4 – 6 MJ/m<sup>3</sup> [1].

### **7.2.2 Biomasa určena pro anaerobní fermentaci (Bioplyn)**

V této skupině se nacházejí průmyslové a komunální odpadní vody, skládky, jateční odpady, slamnatý kravský hnůj a odpady potravinářské výroby. V principu zde dochází k mikrobiologické transformaci organických složek z těchto odpadů za teplot od 35 – 45% a vzniká bioplyn, který obsahuje 55 – 60% metanu, 40 – 45% CO<sub>2</sub> a zlomkové množství dusíku a sirovodíku. Výhřevnost se pohybuje od 20 – 23 MJ/m<sup>3</sup>. Zbytek z těchto odpadů se používá jako kvalitní hnojivo [1].

#### **7.2.2.1 Skládky**

Ve skládkách se organické složky postupem času rozkládají. Za pomoci bakterií a kyslíku se uvolňuje bioplyn s 50 – 70 % metanu. Výhřevnost bioplynu je tedy dána obsahem metanu a dosahuje hodnot 18 – 25 MJ/m<sup>3</sup>. Plyn je odváděn pomocí sběrného potrubí do kogeneračních jednotek. Teplo z motorů je použito pro ohřev vody nebo vytápění [1].

#### **7.2.2.2 Čističky odpadních vod**

Zde vzniká bioplyn z procesu čištění vody, který může být využit kogenerační jednotkou (plynové motory, spalovací turbíny) s výkony do 4 MWe. Jsou schopny pracovat v nepřetržitém provozu a tím si zajišťují velkou ekonomickou efektivnost. Teplo z jednotek se používá na vyhřívání a vytápění, elektrická energie může být použita pro pohony čistírny [1].

#### **7.2.2.3 Bioplyn z exkrementů hospodářských zvířat**

Bioplyn je možné získat pomocí mokré technologie. Princip spočívá v tom, že se hnůj a jiné organické odpady smíchají s vodou a jsou dopraveny do bioreaktoru, kde nastává anaerobní fermentace. Získaný plyn je skladován v plynojemu, tuhé složky se používají

v zemědělství jako hnojení. Tento bioplyn je zpracován opět v plynových motorech.

Bioplyn lze také získat pomocí suché technologie. Hnůj je skladován ve velkých uzavřených nádobách. Díky mikrobiologickým procesům začne v nádobách vzrůstat teplota. Vzniklý bioplyn je odsáván do skladovacích plynojemů pro pozdější využití v kogeneraci [1].

### 7.2.3 Použití paliv

Paliva musí splňovat určité technické a ekonomické parametry (nízké finanční nároky na údržbu, těžbu, dostupnost, transport, atd.). Je potřeba, aby palivo mělo nízké nároky na úpravu palivového složení a mělo velkou výhřevnost. Z důvodu spolehlivosti stroje a dopadu na životní prostředí je požadováno, aby vyprodukované spaliny měly co nejmenší podíl znečišťujících látek. Pokaždé spaliny obsahují velké množství těchto látek, je třeba vystavět filtry, které zredukuje obsah škodlivin, ovšem to už je ekonomicky relativně náročné.

Bioplyn se používá jako palivo pro spalovací motory, parní stroje nebo spalovací turbíny. Ovšem v současnosti se prokázalo, že trvalé spalování bioplynu v motoru má na životnost motoru negativní vliv. Jedná se především o sloučeniny chloru a síry, které vzniknou v důsledku spalování a vytvoří žíravé kyseliny, které jsou agresivní a poškozují vnitřek motoru (písty, válce, pístní kroužky, atd.). Bioplyn také obsahuje částičky vody, které se negativně projevují korozi v plynovém okruhu motoru. Z toho důvodu se kogenerační jednotky na bioplyn vyrábí ze zvláštních odolnostních materiálů. Plyn prochází filtry, které jej čistí od pevných látek. Po vodíku je bioplyn nejekologičtější palivo, protože při spalování dochází k uvolnění pouze do 0,1% síry oproti spalování uhlí, kde se utváří okolo 2% síry [1].

Z ekonomického hlediska se biomasa vyznačuje nízkou energetickou hodnotou uvnitř paliva spojenou s vysokými finančními náklady na těžbu a pěstování. Velmi nákladný proces je také zplyňování paliva. Ovšem to je vše kompenzováno dotacemi za provozování MKJ na biomasu spolu s vyššími garantovanými výkupními cenami tepelné i elektrické energie. Ceny těchto paliv se různí podle aktuální nabídky a poptávky na trhu.

## 8 Rizika a příležitosti kogeneračních jednotek MKJ

Všechny zmiňované kogenerační jednotky mohou dodávat kromě elektrické energie také teplo ve formě teplé, horké vody nebo páry. Po ekonomické stránce velmi lukrativní řešení, navíc, takto spojená výroba má velmi příznivý vliv na životní prostředí, protože se více využije energie z paliva.[3]. Výkonový rozsah kogeneračních jednotek je od jednotek KW po desítky MW. Produkce tepla nemusí být žádána pouze po dobu 200 – 250 dní za rok (tzn. otopná sezona), ale také mimo otopnou sezonu, kdy teplo potřebují jednotliví odběratelé, nebo je teplo použito pro klimatizační účely. V diagramu potřeby tepla mohou kogenerační zařízení reálně dodávat 30 – 40 % tepelné energie po dobu průměrně 4000 hodin za rok, přičemž dodávky elektrické energie mohou pokrývat špičky v diagramu zatížení elektrickou energií.

### 8.1 Vhodnost nasazení

Vhodnost nasazení je dáno parametry kogeneračních jednotek a jejich vstupními a výstupními energetickými toky. Hledí se především na nízké požadavky na údržbu zařízení, vysokou tepelnou a elektrickou účinnost, nízké zatěžování životního prostředí, na úsporu paliva, a na spolehlivost a kvalitu dodávaných energií. Do vhodnosti nasazení by se měly uvažovat rizika v podobě klimatických podmínek. V důsledku meteorologických změn se mohou změnit parametry uvnitř kogenerační jednotky (teploty, tlaky, otáčky, atd.) a může se stát, že jednotky nemusí pracovat správně a efektivně. KJ musí dodržovat za provozu přísné emisní a hlukové limity, které jsou dány ze sbírky zákonů ČR. V ČR existuje sdružení COGEN Czech, které podporuje a pomáhá s řešením výstavby nových a modernizaci starších kogeneračních jednotek [2][3].

### 8.2 Provozní podpory se stálými investičními náklady

Instalace MKJ se vyplatí po ekonomické stránce především za předpokladu garance celoročního odběru tepla. Provozovatel MKJ má právo dostávat od státu tzn. zelené bonusy, což si lze představit jako dotaci na provoz MKJ. Díky zeleným bonusům, ke kterým se přičítá zisk za prodej tepelné a elektrické energie, je možno dosáhnout lepších ekonomických výsledků. Tato podpora je deklarována ve Státní energetické koncepci a také ve Státní koncepci životního prostředí. Výši těchto bonusů stanovuje každoročně Energetický regulační úřad.



S provozem MKJ samozřejmě souvisí také počáteční investice, které jsou relativně vysoké. I v tomto směru je možné docílit dotací na stálé náklady od Státní koncepce životního prostředí. Příspěvek pro fyzickou osobu na výstavbu MKJ činí nejvíce 30% z nákladů na pořízení KJ, ovšem jen do výše 3. mil. korun [9].

Tab. 8.1 znázorňuje závislost pořizovací ceny na instalovaném výkonu.

Výkon MKJ (kWe)	500	50	5
Cena MKJ (Euro/kWh)	760	1200	3100

Tab. 8.1: Závislost pořizovací ceny na výkonu MKJ [2]

V podstatě čím menší KJ, tím se prodlužuje doba návratu investic a uživatel se tyto stroje zpravidla nevyplatí provozovat. Do budoucnosti lze očekávat, že dojde ke snížení investičních nákladů na MKJ, spolu se zvýšením účinnosti. Bohužel největší hrozba, která může reálně nastat, je změna legislativy, která může zapříčinit konec nebo snížení podpory provozu a celkově špatné fungování systému s MKJ.

## 8.3 Příklady uplatnění

### 8.3.1 Chemické a papírenské objekty

V chemických a papírenských objektech je více než kdekoli jinde potřeba tepelná energie ve formě technologické páry na více tlakových hladinách. Aktuální spotřebovávané teplo má převážně stejný charakter (v létě jsou jen velmi malé tepelné odchylky ve spotřebě tepla), kromě plánovaných odstávek. Elektrická a tepelná energie vyrobená v MKJ je celá spotřebována v daném objektu, případný přebytek elektrické energie je distribuován do rozvodné sítě. Jako kogeneračního zařízení se používají spalovací turbíny. Pro papírenské provozy se používají KJ, které spalují biomasu [3].

### 8.3.2 Strojírenské objekty

V tomto odvětví se používají jako MKJ nejčastěji pístové spalovací motory, které produkují především elektrickou energii, která je spotřebována v objektu. Tepelná energie je používána pro vytápění a ohřev teplé vody. Jelikož mají tyto objekty především jednosměrný provoz, ekonomická efektivita kogeneračního zařízení je horší než v předchozích případech, neboť pracují menší časovou dobu než celý rok [3].

### **8.3.3 Nemocnice**

V nemocnicích je velká poptávka po elektrické i tepelné energii. Zatížení KJ je během celého roku převážně rovnoměrné a lze předpokládat, že se zde spotřebuje veškerá vyrobená elektrická a tepelná energie. Teplo je použito pro ohřev teplé vody a také pro chlazení a klimatizaci. Pracují zde spolu trigenerační zařízení a spalovací motory se synchronními generátory. KJ je schopna pracovat v ostrovním režimu. Ekonomicky velmi zajímavé řešení [3].

### **8.3.4 Penziony, hotely, ubytovny, koleje**

V těchto objektech se hledí především na potřebu tepelné energie na vytápění, teplou vodu a na klimatizaci. Navíc zde se spotřebovává poměrně velké množství elektrické energie v podobě osvětlení, atd. Tyto energie jsou spotřebovávány relativně rovnoměrně přes celý den. Zde se nasazují do provozu kogenerační jednotky s elektrickým výkonem do 100 kW. Opět se zde používají spalovací motory [3].

### **8.3.5 Obchodní budovy (nákupní centra)**

V těchto objektech je velmi velká spotřeba elektrické i tepelné energie. Teplo je spotřebováváno pro vytápění a pro klimatizační účely (velké chladicí výkony). Elektrická energie je použita především na osvětlení, pohony ventilátorů a větrání. Z toho důvodu jsou zde kogenerační jednotky ekonomicky velmi výhodné. Jako MKJ jsou opět použity spalovací motory [3].

## **9 Aplikace MKJ do soustavy CZT**

Aplikace MKJ se používá převážně pro krytí hlavního výrobního zdroje tepelné energie, v případě, kdy je hlavní zdroj mimo provoz a je nutné dodat požadované množství tepelné energie v požadovaném čase. Další možný provoz je paralelní chod MKJ s velkými energetickými výrobkami v CZT. V této variantě se nahrazuje jeden energetický zdroj druhým, ovšem z logiky věci musí být energetický zdroj pro MKJ natolik ekonomicky výhodný, aby mohla být MKJ pro uživatele ekonomicky výnosná a řádově v několika letech návratná.

Vlastní návrh a začlenění MKJ do soustavy je tedy složitý proces s mnoha variantami řešení. Nejvíce záleží na výkupních cenách za tepelnou a elektrickou energii, na výši zelených bonusů, na výdajích spojených se servisem a údržbou a především na nákupních cenách vstupního paliva v časovém horizontu několika let. Dále záleží na účinnosti a výkonu jednotky, na době provozu, atd. Vybudování jednotky navíc dává smysl pouze v případě, že se předpokládá celý odběr tepelná energie s možností dodávek elektrické energie do distribuční sítě. MKJ pracuje bez tepelných dodávek velmi zřídka, ale provoz je možný, díky tzn. venkovním chladičům, kde je teplo ochlazováno, ovšem provoz je zřídka kdy výnosný. V návrhu bude posouzena varianta MKJ s paralelním provozem s velkými výrobny v CZT.

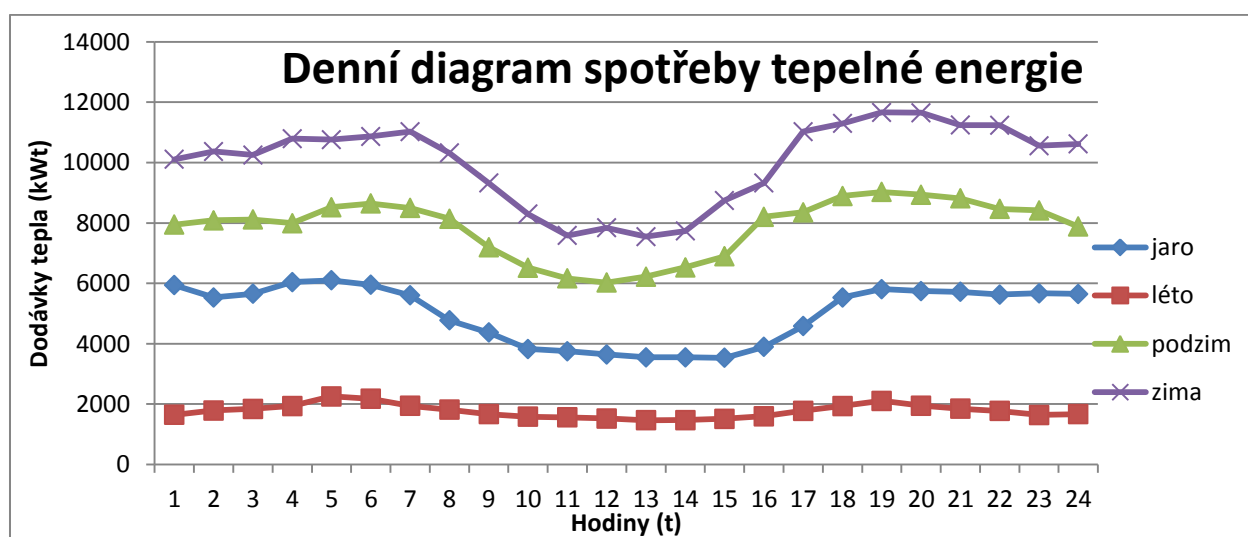
### **Obecný postup**

Postup návrhu spočívá ve zhotovení předběžného a detailního návrhu zařízení MKJ. Hodnotí se rozsah a vhodnost použití dané MKJ, kde se určuje typ, výkon, spolehlivost, účinnost, životnost a celkové investiční náklady dané jednotky. Návrh se dále zabývá proměnnými investičními náklady a to především druhem a spotřebou zvoleného paliva a možnostmi připojení do elektrické a tepelné sítě, kde hraje velkou roli vzdálenost ke spotřebiteli. Dále se uvažují vlastnosti daného objektu, kde má být MKJ umístěná. Zde jsou zahrnuty kompletní detaily o plánované výstavbě nebo rekonstrukci objektu. Dále by měly být v návrhu analyzovány také možné vlivy na životní prostředí a na lidské zdraví. Nejdůležitější část návrhu, obsahuje možnosti využití MKJ podle ročního období, která přímo souvisí s podrobnými detaily o požadované dodávce tepelné a elektrické energie. V této sekci jsou tedy zahrnuty aktuální diagramy denní spotřeby tepla a elektřiny v jednotlivých ročních obdobích a také je-li to požadováno diagramy spotřeby podle charakteru dne (pracovní dny, svátky, atd). Navíc se uvažují měsíční a roční diagramy spotřeby energií v horizontu minulých let a s výhledem do budoucnosti. Při dimenzování MKJ je nutno také zvážit její možné provozní režimy. V závěru je nutné spočítat teoretické výnosy z KJ při různých provozních stavech. Pro názornost různé provozní stavy mohou znamenat různé zatížení KJ, různý počet provozních hodin ročně, nebo také různé možnosti jak nakládat s vyrobenými energiemi (vlastní spotřeba, výkup do distribuční sítě, kombinace, atd.)

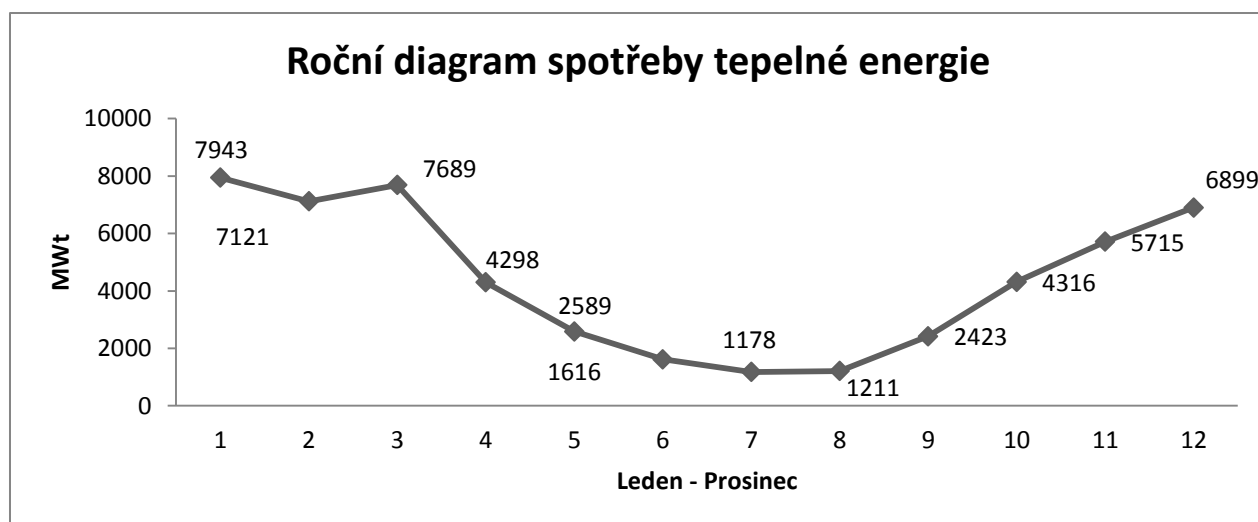
Při znalosti těchto parametrů je vypočítána ekonomická efektivnost a návratnost financí při různém provozu KJ podle diagramů spotřeby energií. Je velmi pravděpodobné, že tato analýza může vést k více správným závěrům. Je potom na investorovi, který závěr si zvolí [2].

## 9.1 Vlastní návrh

V návrhu je uvažován paralelní provoz MKJ s hlavní výrobnou tepelné energie v CZT. Veškerá tepelná energie produkovaná MKJ bude dodávána do CZT a veškerá vyrobená elektrická energie bude vykupována distributorem elektrické energie a za těchto podmínek bude následně zhotovena ekonomická analýza. Síť CZT představuje středně velké horkovodní sídlištní síť v Kadani. Teplota vody jdoucí do sídlištní tepelné sítě je v rozmezí 70 - 130 °C a voda proudící ze sídliště se pohybuje v rozmezí 44 - 70 °C, průtok je 203 t/hod. Navrhovaná KJ splňuje tyto požadavky pro dodávky tepelné energie do systému CZT. Celkový návrh KJ vychází z denního a ročního diagramu potřeby tepelné energie. Denní diagram potřeby tepelné energie se skládá z průměrných hodnot daného ročního období. Budu předpokládat, že KJ bude pracovat za průměrné roční teploty okolní  $t = 15\text{ °C}$  a tlaku  $p = 1,101325\text{ bar}$ . [5] V návrhu je počítáno s variantou, že vyprodukovaná tepelná a elektrická energie bude prodávána a nebude využita pro vlastní spotřebu. Na grafu. 9.1 a grafu. 9.2 jsou zobrazeny denní a roční diagramy spotřeby tepelné energie v síti CZT, na které tento návrh navazuje.



Graf. 9.1: Denní diagram potřeby tepla v jednotlivých ročních obdobích v Kadani



Graf. 9.2: Roční diagram potřeby tepelné energie v Kadani

V návrhu je vypočítána potřeba tepelné a elektrické energie, detailní ekonomická analýza, která bude zahrnovat investiční a provozní náklady, finanční návratnost.

V následujícím textu jsou vypsané varianty provozu MKJ, které budou ve výpočtu srovnávány a následně ekonomicky zhodnoceny, čímž se zjistí jejich potenciál pro použití v praxi.

#### A) Varianta 1

MKJ bude provozována po dobu plné pohotovosti  $T_1 = 7902$  h. Jedná se především o chod v základním pásmu diagramu potřeby tepla v každém ročním období. Od času  $T_1$  se odvíjí výše zeleného bonusu. [6] Jednotka může být vhodně doplněna o paralelní provoz s plynovým kotlem, který je vhodné využít především při tuhých mrazech, kdy MKJ nestačí dodat potřebné množství tepla.

#### B) Varianta 2

MKJ bude provozována maximálně  $T_2 = 4\,400$  h ročně. Čas  $T_2$  není zvolen náhodně, ale odvíjí se od něj vyšší zelený bonus.[6] Tento provoz lze charakterizovat jako polo-špičkový režim. V této variantě je také možný paralelní provoz s plynovým kotlem, nebo může být KJ doplněna o akumulaci tepelné energie, která pomáhá nárazově dodávat určité množství tepla při 100% zatížení KJ. Akumulace je vhodná zejména při špičkové potřebě tepla než je KJ schopna dodat. Záleží především na charakteru provozu.

### C) Varianta 3

MKJ bude v provozu maximálně do  $T_3 = 3\,000$ h ročně, opět se od této doby objeví vyšší zelený bonus.[6] Jedná se o špičkové zatížení KJ. Je doporučeno dovybavit jednotku o akumulaci tepelné energie, která může být využita v případě potřeby. V této variantě lze také MKJ dovybavit absorpčním chlazením, které může odebírat tepelnou energii mimo špičkové zatížení pro výrobu chladu, v případě, že by tepelná energie nebyla pro CZT potřeba.

V návrhu je uvažována MKJ představující spalovací motor na zemní plyn od společnosti TEDOM. Vhodnost nasazení MKJ byla posouzena podle ceny kogenerační jednotky a také podle dostupnosti a kvality záručního a pozáručního servisu a samozřejmě podle účinnosti dané jednotky. Navíc plynové spalovací motory mohou pracovat v ostrovním režimu. Tato MKJ plní emisní limity z Vyhlášky 117/97 Sb. MŽP ČR platný od 12. 5. 1997. [5]

Při prodeji tepelné energie do CZT a elektrické energie do distribuční sítě je nutné mít uzavřenou smlouvu s odběratelem tepelné a el. energie, musí splňovat řadu kritérií a parametrů a dále je nezbytné vlastnit státní autorizaci na prodej energií. [7]

## 9.2 Kogenerační jednotka pro provoz KJ – TEDOM Quanto D770



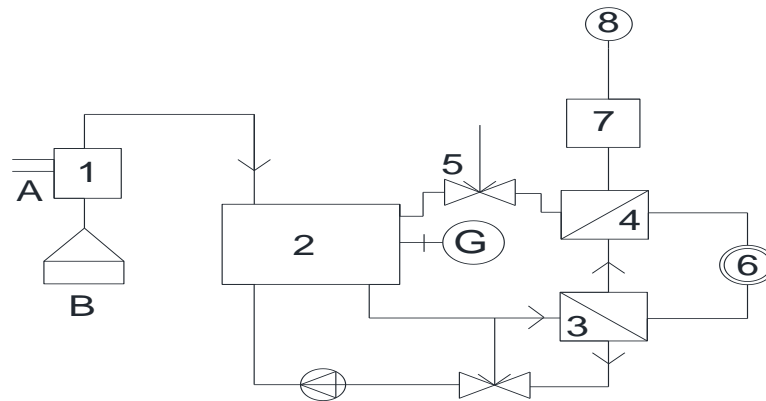
Obr. 9.1: Kogenerační jednotka Quanto D770 od firmy TEDOM s.r.o [5]

V následující tabulce 9.1 je vypsán přehled nejdůležitějších parametrů MKJ.

<i>Elektrický výkon (kW)</i>	800	<i>Délka (mm)</i>	4 057
<i>Tepelný výkon (kW)</i>	918	<i>Šířka (mm)</i>	1 481
<i>Tepelná účinnost (%)</i>	48,4	<i>Celková výška (mm)</i>	2 196
<i>Elektrická účinnost (%)</i>	42,2	<i>Celková hmotnost (kg)</i>	7 500
<i>Celková účinnost (%)</i>	90,6	<i>Spotřeba plynu při 100 % výkonu (m3/h)</i>	201
<i>Tepelné ztráty (%)</i>	9,4	<i>Spotřeba plynu při 75 % výkonu (m3/h)</i>	155
<i>Teplota vody vstup/výstup(°C)</i>	70/90	<i>Spotřeba plynu při 50 % výkonu (m3/h)</i>	109
<i>Teplota vrat. Vody vstup/výstup (°C)</i>	40/70	<i>Výhřevnost zem. plynu (MJ/m3)</i>	34
<i>Teplárenský modul</i>	0,872	<i>Množství spalovacího vzduchu (Nm3/h)</i>	3 295
<i>Frekvence (Hz)</i>	50	<i>Množství odchozích spalin (Nm3/h)</i>	3 410
<i>Napětí (V)</i>	400	<i>Emise CO při 5% O2 (mg/Nm3)</i>	650
<i>cos fi</i>	0,8 / 1,0	<i>Emise NOx při 5% O2 (mg/Nm3)</i>	500
<b><i>Cena (CZK)</i></b>	<b>10 000 000 Kč</b>	<i>Množství hluku (dB)</i>	101

Tabulka 9.1: Přehled nejdůležitějších parametrů KJ – TEDOM Quanto D770 [5]

Na následujícím obr. 11.4 je znázorněno schéma zapojení této MKJ.



Obr. 9.2: Schéma zapojení MKJ se spalovacím motorem.

Pozn. A – Přívod zemního plynu, B – Přívod vzduchu, 1 – Směšovací zařízení, 2 – MKJ, 3 – Výměník voda/voda (chlazení válců a oleje), 4 – Výměník spaliny/voda, 5 – Regulátor, 6 – Spotřeba tepelné energie, 7 – Katalyzátor  $NO_x$ , 8 – Vývod spalin [2]

Vybraná kogenerační jednotka představuje tedy plynový spalovací motor, který pohání elektrický generátor a teplo je využito pro teplovodní síť. Teplo z této jednotky je získáno díky odvodu tepla ze spalinových plynů a z chladicího obvodu oleje a bloku motoru. Teplota MKJ se dimenzuje na teplotu teplovodního systému vody s průměrnou hodnotou 90 °C. Vratná voda je vedena přes dva výměníky, kde se postupně v jednom ohřívá na průměrnou teplotu 70 °C a poté ve druhém na 90 °C. Z tohoto výměníku je teplo vyváděno zpět do topného systému. Jednotka je dále doplněna o elektrický rozvaděč, víceprocesorový řídicí a regulační systém, který zajišťuje plně automatický rozběh a chod a navíc dálkové sledování provozu. Samozřejmostí je u těchto jednotek automatické odstavení provozu [5].

### 9.3 Výpočet provozně-technických parametrů

Tyto výpočty vycházejí především z elektrického a tepelného výkonu, který je dodáván jednotkou ( $P_{el} = 800 \text{ kW}$ ,  $P_{tep} = 918 \text{ kW}$ ).

#### **Poměr elektrického a tepelného výkonu ( $\delta = \text{teplárenské využití/modul}$ ):**

$$\delta = \frac{P_{el}}{P_{tep}} = \frac{800}{918} = 0,872(-) \quad (9.1)$$

Kde:

$P_{el}$  – elektrický výkon (kW)

$P_{tep}$  – tepelný výkon (kW)



**Elektrická účinnost ( $\eta_E^{KVET}$ ) a tepelná účinnost ( $\eta_T^{KVET}$ ):**

$$\eta_E^{KVET} = \frac{P_{el}}{M_{pal} \cdot Q_i} * 100 = \frac{0,8}{0,05583 \cdot 34} * 100 = 42,2 \% \quad (9.2)$$

$$\eta_T^{KVET} = \frac{P_{tep}}{M_{pal} \cdot Q_i} * 100 = \frac{0,918}{0,05583 \cdot 34} * 100 = 48,3 \% \quad (9.3)$$

Kde:

$M_{pal}$  – množství spotřebovaného paliva ( $201 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 201/3,6/1000 = 0,05583 \text{ m}^3/\text{s}$ )

$Q_i$  - výhřevnost paliva ( $34 \text{ MJ}/\text{m}^3$ )

**Celková účinnost MJK  $\eta_C^{KVET}$ :**

$$\eta_C^{KVET} = \frac{P_{tep} + P_{el}}{M_{pal} \cdot Q_i} * 100 = \frac{0,8 + 0,918}{0,05583 \cdot 34} * 100 = 90,5 \% \quad (9.4)$$

**Hlučnost stroje ( $M_p$ ) na povrchu generátoru v 1 m:**

$$M_p = 20 \log \frac{p}{p_r} = 101 \text{ dB} \quad (9.5)$$

Kde:

$p$  = akustický tlak zvuku (Pa)

$p_r$  = referenční hodnota akustického tlaku = ( $2 * 10^{-5}$  Pa)

**Výpočet spolehlivosti a pohotovosti MKJ**

MKJ obsahující spalovací motor mají ročně nárok na 438 h odstávky na servis a údržbu ( $T_{OD,pln}$ ). U této jednotky se započítávat také odstávky z důvodu poruch, které podle výrobce čítají maximálně 420 h ( $T_{OD,npl}$ ).

**Pohotovost MKJ**

Jedná se o provozuschopnost KJ. Roční pohotovost je určena z doby pohotovosti ( $T_{ph}$ ).

$$T_{ph} = T - (T_{OD,pln} + T_{OD,npl}) = 8760 - (438 + 420) = 7902 \text{ h} \quad (9.6)$$

$$ph = \frac{T_{ph}}{T} * 100 = 90,21 \% \quad (9.7)$$

Kde:

$T$  – provozuschopnost stroje za dobu jednoho roku (8760 h)

$T_{OD,pln}$  – odstávky na servis a údržbu (438 h)

$T_{OD,npl}$  – odstávky z důvodu poruch (420 h)

$T_{ph}$  - pohotovost KJ

$ph$  - pohotovost jednotky

Spolehlivost MKJ

Jedná se o to, jaká je pravděpodobnost poruchy zařízení za sledované období ( $T = 8760$  h).

$$sp = \frac{T_{ph}}{T - T_{OD,pln}} * 100 = \frac{7902}{8760 - 438} * 100 = 94,95\% \quad (9.8)$$

Kde:

$sp$  – spolehlivost jednotky

Doba životnosti a provozu KJ

Životnost spalovacího motoru na zemní plyn je dána na hodnotu 15 let. Za předpokladu dodržování servisní a údržbových předpokladů stroje se doba životnosti může prodloužit na 18 – 20 let. V této práci budu uvažovat reálnou hodnotu do 15 let [2].

**9.4 Stálé investiční náklady MKJ:****A) Náklady na pořízení KJ před uvedením do provozu:**

Zvolená KJ se pohybuje v cenovém rozmezí od 8 do cca. 11 mil. Kč. Záleží především na cenách jednotlivých doplňků, které se mohou vázat k MKJ. V tomto případě je jednotka nadstandardně vybavena o parametry uvedené v příloze [8]. Dále jsou v nákladech započítány možné úpravy pro vybudování patřičného zázemí.

V následující tabulce 9. 2. jsou uvedeny nákladové položky související s pořízením MKJ.

Nákladové položky	Cena	Celkové investiční náklady (%)
Vlastní cena KJ:	10 000 000 Kč	70
Pomocná zařízení:	500 000 Kč	5
Stavební úpravy:	1 000 000 Kč	10
Připojení na tepelnou a elektrickou síť	500 000 Kč	5
Projektové, konstrukční a dodatečné náklady	1 000 000 Kč	10
<b>Celkem</b>	<b>13 000 000 Kč</b>	<b>100</b>

Tabulka. 9. 2: Celkové investiční náklady na výstavbu a instalaci KJ

## B) Porovnávání investičních nákladů na výstavbu v čase

Zde budou porovnány dvě možnosti financování výstavby KJ. Dobu výstavby je uvažována 4 roky. Celkové čerpání investic v jednotlivých letech udává následující tabulka.

Varianta	Investice po jednotlivé roky			
	1	2	3	4
<b>A</b>	650 000	3 250 000	4 200 000	4 900 000
<b>B</b>	5 200 000	3 900 000	3 250 000	650 000

Tabulka. 9. 3: Jednotlivé varianty investování v čase

### Varianta 1

$$r = 1 + p = 1 + 0,10 = 1,10$$

$$N_{ip} = \sum N_{it} * r^{T_v - \Delta T - t} = 650\,000 * 1,10^{4-1-1} + 3\,250\,000 * 1,10^{4-2-1} + 4\,200\,000 * 1,10^{4-3-1} + 4\,900\,000 * 1,10^{4-4-1} = \underline{13\,016\,045\text{ Kč}} \quad (9.9)$$

### Varianta 2

$$r = 1 + p = 1 + 0,13 = 1,13$$

$$N_{ip} = \sum N_{it} * r^{T_v - \Delta T - t} = 4\,900\,000 * 1,13^{4-1-1} + 4\,200\,000 * 1,13^{4-2-1} + 3\,250\,000 * 1,13^{4-3-1} + 650\,000 * 1,13^{4-4-1} = \underline{13\,799\,591\text{ Kč}} \quad (9.10)$$

Kde:

$T_v$  - doba výstavby

$p$  – úroková míra

$r$  – úročitel

$N_{ip}$  – celkové investiční náklady v čase

$N_{it}$  – náklady za rok

$\Delta T$  - počet let, o něž přesáhne výstavba zahájení provozu o jeden rok

$t$  - roky

Z těchto výsledků vyplývá, se mnohem více vyplatí varianta 1. postupného investování.

## 9.5 Proměnné investiční náklady KJ

### A) Výpočet nákladů na palivo pro MKJ :

Výpočet je složen z palivové výhřevnosti zemního plynu  $Q_i = 34$  MJ/kg. Jako distributor zemního plynu je uvažována společnost RWE GasNet, s.r.o. a jako dodavatel firmu RWE Energie, a.s. pro oblast západních a severních Čech. Spotřeba paliva je dimenzována na odběr paliva při zatížení 100%, což je 201 m<sup>3</sup>/h.

**Celková spotřeba zemního plynu/rok:**

$$M_{\text{pal}} = \text{spotřeba paliva} * \text{přepočet} * \text{doba provozu KJ} = 201 * 10,55 * 7902 =$$

$$\underline{16\,756\,586 \text{ (kWh/rok)}} \quad (9.11)$$

**Prodejní cena za 1 kWh:**

Cena dodávaného plynu je dána od společnosti RWE, která počítá s ročním odběrem nad 630 MWh/rok. Tato cena není fixní a mění se podle požadavků a smluvních dohod mezi velkoodběratelem a dodavatelem plynu, ale lze počítat s obecně dosazenou hodnotou 0,8 Kč/kWh. [11]

$$C_{\text{pal}}^{PL} = \underline{0,8 \text{ Kč/kWh}} \quad (9.12)$$

**Celková cena za plyn/rok s DPH při 100% zatížení KJ:**

$$C_{\text{pal}} = M_{\text{pal}} * C_{\text{pal}}^{PL} = 16\,756\,586,1 * 0,8 = \underline{13\,405\,269 \text{ Kč/rok}} \quad (9.13)$$

Kde:

$M_{\text{pal}}$  – Celková spotřeba zemního plynu za rok

$C_{\text{pal}}^{PL}$  – Cena paliva za 1 kWh

**Cena za plyn/rok pro všechny varianty:**

	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
Zatížení KJ	7902 h	4 400 h	3000 h
100%	13 405 269 Kč/rok	7 464 336 Kč/rok	5 089 320 Kč/rok
75%	10 053 952 Kč/rok	5 598 252 Kč/rok	3 816 990 Kč/rok
50%	6 702 634 Kč/rok	3 732 168 Kč/rok	2 544 660 Kč/rok

Tabulka. 9.4: Náklady na palivo za rok

**B) Náklady na přenosovou kapacitu plynu**

Při odebrání velkého množství plynu jako je tomu v tomto případě, si distributor navíc připočte k ceně za dodaný plyn ještě poplatek za rezervaci daného množství plynu, která je proměnná s velikostí odebraného plynu.

$$RS = M_{\text{pal}} / \text{přepočet} = 16\,756\,586 / 10,55 = 1\,588\,302 \text{ m}^3 \quad (9.14)$$

$$RK = \frac{RS}{115} = 13\,811,32 \text{ m}^3 \quad (9.15)$$

$$MP_{ps} = C_{\text{dop}}^{PL} * RK = 87 * 13\,811 = \underline{1\,201\,585 \text{ Kč/rok}} \quad (9.16)$$

Kde:

RS – skutečný roční odběr plynu ( $m^3$ )

RK – pevná přidělená roční kapacita

$MP_{ps}$  – měsíční plat za přidělenou kapacitu

$C_{dop}^{PL}$  – součet cena za pronajatou kapacitu [10]

### **Náklady na dopravu plynu (přenosová kapacita) pro všechny varianty:**

	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
Zatížení KJ	7902 h	4 400 h	3000 h
100%	1 201 585 Kč/rok	669 068 Kč/rok	456 183 Kč/rok
75%	901 189 Kč/rok	501 801 Kč/rok	342 137 Kč/rok
50%	600 792 Kč/rok	334 534 Kč/rok	228 091 Kč/rok

Tabulka. 9.5: Přehled cen za přenosovou kapacitu

### **C) Stálý měsíční poplatek**

Jedná se o poplatek za všechny ostatní služby spojené s dodávkami zemního plynu. Tento poplatek je různý pro různé charakteristiky odběrů zem. plynu. Pro toto řešení je poplatek stanoven na 150 Kč/měsíc ( $C_{pop}=1\ 800$  Kč/rok) [11].

### **D) Náklady na servis MKJ ( $N_{p4}$ ):**

Údržba je stanovena na 0,014 – 0,022 euro/kWh, což udává hodnotu 0,4 – 0,6 Kč/kWh na provoz a servis KJ. V tomto případě budu počítat s hodnotou na servis 0,4 Kč/kWh.

$$C_{provoz}^{KJ} = \text{náklady na servis} * \text{vyrobená tepelná energie} = 0,4 * 7\ 230\ 330 =$$

$$\underline{2\ 892\ 132 \text{ Kč/rok}} \quad (9.17)$$

### **Celkové náklady na servis pro jednotlivé varianty:**

	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
Zatížení KJ	7902 h	4 400 h	3000 h
100%	2 892 137 Kč/rok	1 610 400 Kč/rok	1 098 000 Kč/rok
75%	2 169 103 Kč/rok	1 207 800 Kč/rok	823 500 Kč/rok
50%	1 446 068 Kč/rok	805 200 Kč/rok	549 000 Kč/rok

Tabulka. 9.6: Přehled nákladů za údržbu

**Celková cena paliva**

$$C_{pal}^{konečná} = C_{pal} + MP_{ps} + C_{pop} + C_{provoz}^{KJ} = 13\,405\,269 + 1\,201\,585 + 1\,800 + 2\,892\,132 = 17\,500\,786 \text{ Kč/rok} \quad (9.18)$$

**Celkové ceny za proměnné náklady:**

	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
Zatížení KJ	7902 h	4 400 h	3000 h
100%	17 500 786 Kč/rok	9 743 804 Kč/rok	6 643 503 Kč/rok
75%	13 124 244 Kč/rok	7 307 853 Kč/rok	4 982 627 Kč/rok
50%	8 749 494 Kč/rok	4 871 902 Kč/rok	3 321 751 Kč/rok

Tabulka. 9.7: Přehled koncových cen za plyn

**9.6 Příjmy z prodeje tepelné a elektrické energie KVET**

Tepelnou energii z MKJ lze využít pro vlastní spotřebu nebo ji lze prodávat do soustavy CZT. Držitel licence na rozvod tepelné energie při splnění vhodných technických podmínek je povinen tuto energii vykupovat. Výkupní cena je definována podle lokality a především podle dohodnutých smluv mezi CZT a provozovatelem KJ.

Elektrickou energii lze použít také pro vlastní spotřebu, nebo ji lze dodávat do elektrické rozvodné sítě. Provozovatel distribuční soustavy je povinen elektrickou energii také vykupit, pokud splňuje kvalitativní parametry. Výše výkupních cen silové elektrické energie není fixně stanovena, záleží na dohodě mezi provozovatelem KJ a spotřebitelem energie. Dále do výsledné výkupní ceny el. energie zasahuje také Energetický regulační úřad (ERU), který pro KJ stanovuje výši tzn. zelených bonusů. Tyto bonusy oproti přímému prodeji zohledňují možnost vlastní spotřeby vyrobených energií [12].

V tomto návrhu, prodej elektrické a tepelné energie nebude probíhat přímo, nýbrž bude probíhat formou zelených bonusů. Pro bezporuchový provoz KJ je nutné, aby jednotka nepracovala pod 50% zatížení. Výpočet bude proveden pro 100%, 75% a 50% zatížení MKJ.

**Zelené bonusy na výrobu elektrické energie:**

Na MKJ se vztahuje podpora ve formě tzn. zelených bonusů. Jedná se o to, že za každou vyrobenou kWh dostává provozovatel MKJ finanční bonus, ke kterému se navíc přičítá také výkupní cena silové elektrické energie. Bonusy a podpory pro KVET se skládají ze sazby základní a doplňkové.

Základní sazba:

Pro KJ o instalovaném výkonu  $P_{el} = 800 \text{ kW}_e$  platí:

Rozmezí výkonů (kW)	Provozní doba KJ(h/rok)	Bonus (Kč/MWh)
200 - 1 000	3 000	1 150
200 - 1 000	4 400	750
200 - 1 000	8 400	140

Tabulka. 9.8: Základní sazba na výrobu elektrické energie [6]

Doplňková sazba:

Jedná se o sazbu za veškerou elektřinu z KVET.

Palivo do KJ	Datum uvedení KJ do provozu	Rozmezí výkonů (kW)	Bonus (Kč/MWh)
Zemní plyn	do 31.12.2014	0 - 5000	455

Tabulka. 9.9: Doplnková sazba na výrobu elektrické energie [6]

Součet obou sazeb elektrické energie:

Je dána vzorcem:

$$C_{zb} = P_{vyrel/rok} * (ZB_{zkl.sazba} + ZB_{dopl.n.sazba}) \quad (9.19)$$

Kde

$P_{vyrel/rok}$  – Elektrický výkon za rok (kW)

VýpočetA) Výkupní ceny ze zelených bonusůElektrická energie

Elektrický výkon KJ za rok při 100% zatížení:  $P_{el}^c = 800 \text{ kW}_e$

$$P_{vyrel/rok} = T_{ph} * P_{el} = 7902 * 800 = 6\,321,6 \text{ MWh/rok} \quad (9.20)$$

$$C_{zb,rok} = P_{vyrel/rok} * (ZB_{zkl.sazba} + ZB_{dopl.n.sazba}) = 6\,321,6 * (140 + 455) = 3\,761\,352 \text{ Kč/rok} \quad (9.21)$$

Celkový přehled cen elektrické energie ze „zelených bonusů“

Výkup el. energie	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
<b>Zatížení KJ</b>	<b>7902 h</b>	<b>4 400 h</b>	<b>3000 h</b>
100%	3 761 352 Kč/rok	4 241 600 Kč/rok	3 828 000 Kč/rok
75%	2 821 014 Kč/rok	3 181 200 Kč/rok	2 871 000 Kč/rok
50%	1 880 676 Kč/rok	2 120 800 Kč/rok	1 914 000 Kč/rok

Tabulka. 9.10: Výkupní ceny elektrické energie

**B) Výkupní ceny silové elektrické energie a tepla:****Elektrická energie**

Cena silové elektřiny není fixní. Záleží především na smlouvě mezi dodavatelem a spotřebitelem el. energie, tudíž její stanovení není v praxi vůbec jednoduché. Cena silové elektřiny byla stanovena jako průměrná cena nabízených produktů kvartálních cen base-loadové ceny elektřiny a očekávaných výchylek peakových kvartálních cen. Průměrná cena je tedy uvažována 40 Euro/MWh.

$$C_{silova} = 1,098 \text{ Kč/kWh}_e \text{ (40 Euro/MWh = 1 098 Kč/MWh)}$$

**Výpočet**

$$P_{vyrel/rok} = T_{ph} * P_{el} = 7902 * 800 = 6\,321,6 \text{ MWh/rok} \quad (9.22)$$

$$C_{sil,rok}^{elektřina} = P_{vyrel/rok} * C_{silova} = 6\,321,6 * 1,098 = \underline{6\,941\,118 \text{ Kč/rok}} \quad (9.23)$$

**Celkové prodejní ceny za silovou energii**

Cena za silovou energii	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
<b>Zatížení KJ</b>	<b>7902 h</b>	<b>4 400 h</b>	<b>3000 h</b>
100%	6 941 118 Kč/rok	3 864 961 Kč/rok	2 635 201 Kč/rok
75%	5 205 839 Kč/rok	2 898 721 Kč/rok	1 976 401 Kč/rok
50%	3 470 559 Kč/rok	1 932 481 Kč/rok	1 317 601 Kč/rok

Tabulka. 9.11: Ceny za silovou energii

**Tepelná energie:**

Tepelný výkon KJ za rok při 100% zatížení:  $P_{tep}^c = 915 \text{ kWh}_t$ . Měrná cena tepla je stejně jako energie elektrická závislá na mnoha parametrech a proto není fixně dána. Pro účely této práce budu počítat s hodnotou  $C_{teplo} = 1,3 \text{ Kč/kWh}_t$  (362 Kč/GJ), která zohledňuje přibližné výrobní náklady. [2]

**Výpočet**

$$Q_{vyrtep/rok} = T_{ph} * \text{přepočet} * P_{tep} = 7902 * 0,0036 * 915 = 26\,029 \text{ GJ/rok} \quad (9.24)$$

$$N_{rok}^{teplo} = Q_{vyrtep/rok} * C_{teplo} = 362 * 26\,029 = \underline{9\,422\,566 \text{ Kč/rok}} \quad (9.26)$$

Kde:

$Q_{vyrtep/rok}$  – Vyrobená tepelná energie za rok



**Celkové výnosy za teplo:**

Cena za teplo	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
<b>Zatížení KJ</b>	<b>7902 h</b>	<b>4 400 h</b>	<b>3000 h</b>
100%	9 422 592 Kč/rok	5 246 684 Kč/rok	3 577 294 Kč/rok
75%	7 066 924 Kč/rok	3 935 013 Kč/rok	2 682 970 Kč/rok
50%	4 711 283 Kč/rok	2 623 342 Kč/rok	1 788 647 Kč/rok

Tabulka. 9.12: Výkupní cena za teplo

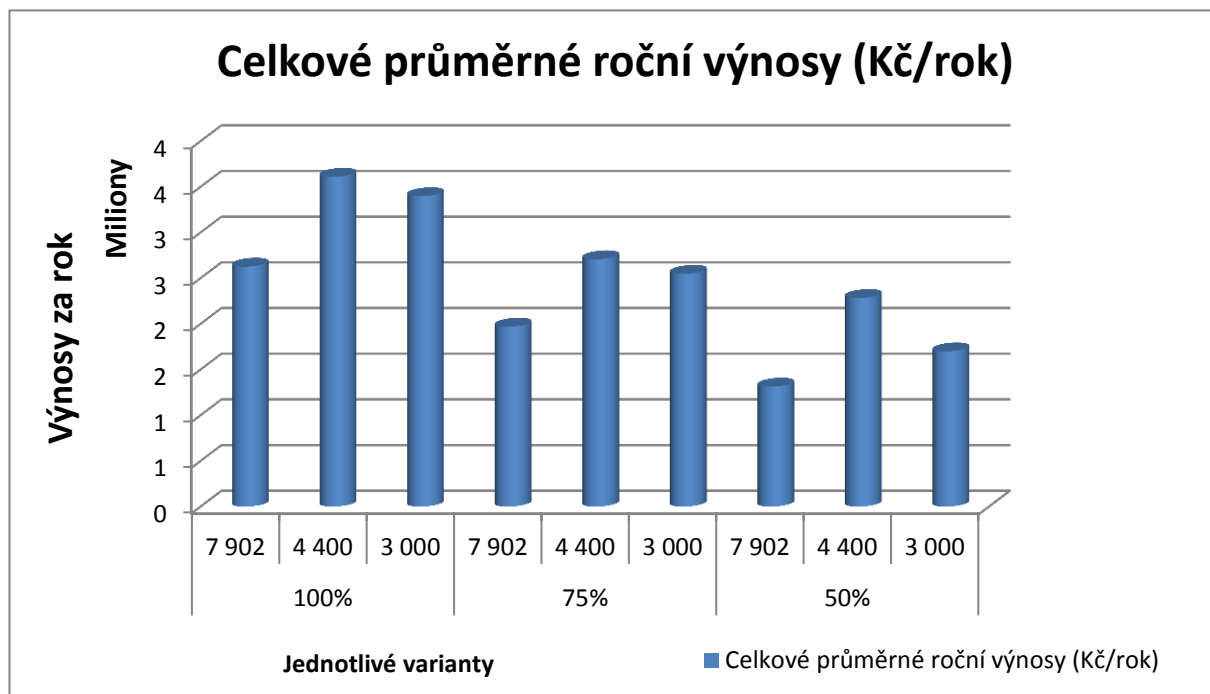
**9.7 Celkové shrnutí**

V následující tabulce je zveřejněna ekonomická efektivnost jednotlivých variant provozu.

Zatížení KJ	100%			75%			50%		
	7 902	4 400	3 000	7 902	4 400	3 000	7 902	4 400	3 000
Doba provozu (hodiny)	13 405 269	7 464 336	5 089 320	10 053 952	5 598 252	3 816 990	6 702 634	3 732 168	2 544 660
Náklady na palivo (Kč/rok)	1 201 585	669 068	456 183	901 189	501 801	342 137	600 792	334 534	228 091
Náklady na přenosovou kapacitu (Kč/rok)	2 892 137	1 610 400	1 098 000	2 169 103	1 207 800	823 500	1 446 068	805 200	549 000
Náklady na servis (Kč/rok)	3 761 352	4 241 600	3 828 000	2 821 014	3 181 200	2 871 000	1 880 676	2 120 800	1 914 000
Zelené bonusy - elektrická energie (Kč/rok)	6 941 118	3 864 961	2 635 201	5 205 839	2 898 721	1 976 401	3 470 559	1 932 481	1 317 601
Výnosy za silovou elektrickou energii (Kč/rok)	9 422 592	5 246 701	3 577 284	7 066 924	3 935 012	2 682 963	4 711 283	2 623 350	1 788 642
Výnosy za tepelnou energii (Kč/rok)	2 626 071	3 609 458	3 396 982	1 969 533	2 707 080	2 547 737	1 313 024	2 283 448	1 698 492
<b>Celkové průměrné roční výnosy (Kč/rok)</b>	4.místo	1.místo	2.místo	7.místo	3.místo	5.místo	9.místo	6.místo	8.místo
Aktuální ekonomické zhodnocení za rok									

Tabulka. 9.13: Ekonomické porovnání jednotlivých variant provozu

Pro lepší orientaci je ekonomické hodnocení jednotlivých variant uskutečněno také v následujícím grafu.



Graf. 9.1: Ekonomické porovnání jednotlivých variant provozu

Z těchto závěrů lze vyvodit, že jednotlivé varianty provozu KJ jsou různě ekonomicky výhodné. Nejlepší ekonomické hodnocení je při 100% zatížení KJ při provozu 4 400, 3 000 a 7 200 hodin ročně. Naopak nejhorší ekonomické parametry má KJ při 50% zatížení.

#### Teplárenský součinitel:

$$\alpha_{100\%} = \frac{Q_{MKJ}}{Q_{MAX}} = \frac{26\,029,188}{190\,797} * 100 = 13\% \quad (9.26)$$

$Q_{MKJ}$  – jmenovitý tepelný výkon MKJ

$Q_{MAX}$  - celkový tepelný výkon

Teplárenský součinitel	Provoz KJ	Provoz KJ	Provoz KJ
<b>Zatížení KJ</b>	<b>7902 h</b>	<b>4 400 h</b>	<b>3000 h</b>
100%	13,0%	7,6%	5,2%
75%	9,8%	5,7%	3,9%
50%	6,5%	3,8%	2,6%

Tabulka. 9.14: Teplárenský součinitel u jednotlivých variant

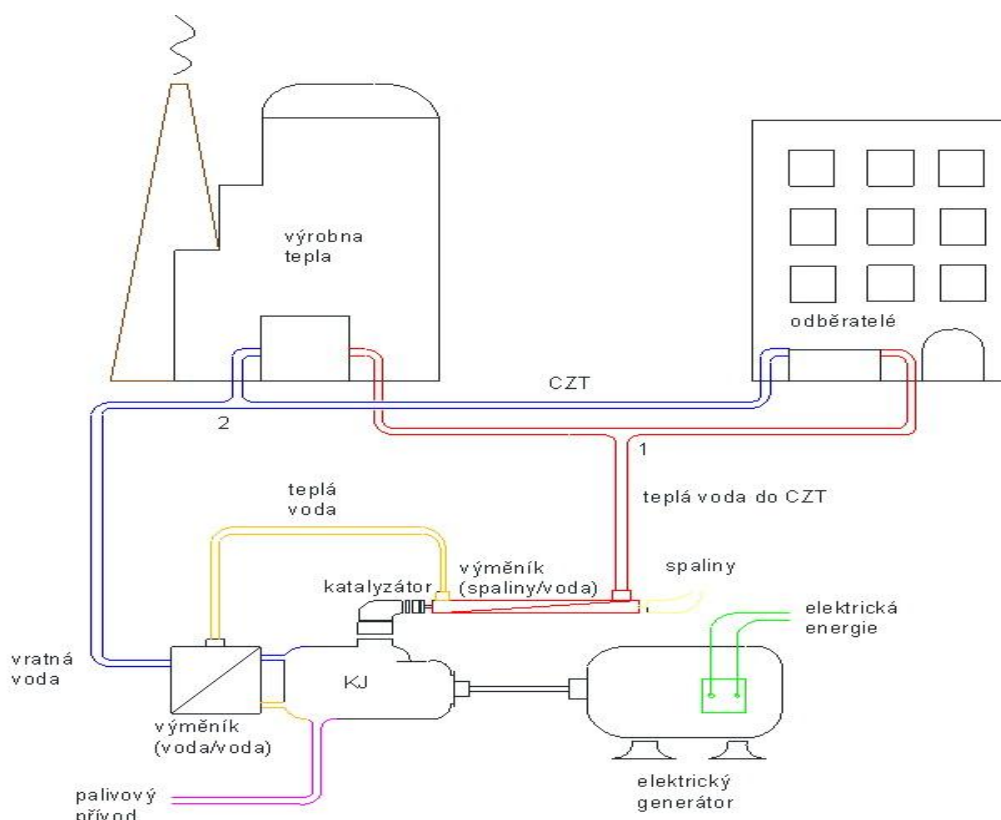
Z této tabulky vyplývá, že navrhovaná KJ pokrývá od 2,59% - 13% celkové tepelné spotřeby, podle zvolené varianty. Z tabulky. 9.14. vyplývá, že tato KJ nemůže v soustavě CZT samostatně dodávat tepelnou energii.

## 10 Výpočet aplikovatelnosti malé kogenerační jednotky

Ve výpočtu v předchozím příkladu bylo počítáno s výkupem veškeré elektrické a tepelné energie z MKJ. V praxi to vůbec nemusí platit. Výsledné energie mohou být použity částečně pro krytí vlastní spotřeby a částečně mohou být prodány, nebo nemusí být prodány vůbec. Jedná se tedy o mnoho možných variant provozu MKJ a z toho důvodu jsem v této práci sestrojil tři aplikace v MS Excel, pro různé použití, které počítají provozní veličiny a výsledné ekonomické zhodnocení přesně podle aktuálních požadavků uživatele.

### 10.1 Návrh aplikace MKJ v soustavě CZT

V tomto případě, byla naprogramována aplikace v MS Excel pro univerzální použití, která je schopna vypočítat potřebné tepelné dodávky do systému CZT a také dodávky elektrické energie do nadřazené sítě podle požadavků provozovatele. Jedná se o vytlačení velkého energetického zdroje jiným energetickým zdrojem, tudíž aplikace se především zabývá výpočtem provozně technických parametrů, ekonomickou efektivností a návratností provozu MKJ s ohledem na ekonomické ukazatele. V aplikaci je MKJ srovnávána s plynovým kotlem. Následuje výpis z aplikace.



Vstupní parametry: Stálé náklady				
		MKJ	Plyn. kotel	
Cena kogenerační jednotky:		13 000 000	13 000 000	Kč
Cena pomocného zařízení:		250 000	300 000	Kč
Cena za stavební úpravy:		150 000	200 000	Kč
Cena za připojení do elektrické sítě:		20 000	30 000	Kč
Cena připojení na tepelnou síť CZT		50 000	50 000	Kč
Dodatečné náklady:		-	-	Kč
Podpora na výstavbu KJ:		470 000	580 000	Kč
Vstupní parametry: Proměnné náklady				
		MKJ	Plyn. kotel	
Součet cen za odebíraný zemní plyn bez DPH: *	8,44		8,44	Kč/m3
	0,80	-	0,80	-
Součet cen za kapacitu bez DPH **		87	87	Kč/m3
Součet stálých měsíčních platů bez DPH **		150	150	Kč/měsíc
Spotřeba zem. plynu/biomasy při 100% výkonu KJ		201	100	m3/h
Průměrné roční zatížení KJ a kotle		100	100	%
Počet dní v provozu		330	330	dny
Počet hodin provozu denně		23,94546	23,94546	hodiny
Celkový počet hodin provozu		<b>7902,0018</b>	<b>7902,0018</b>	hodin/rok
Servis a údržba zařízení		0,4	0,4	Kč/kWh

### Vstupní technické parametry

Kogenerační jednotka + plynový kotel	MKJ	Plyn. kotel	
Elektrický výkon	800	-	kW
Tepelný výkon	915	915	kW
Zelený bonus na el. energii (zákl. sazba)	140	-	Kč/MWh
Zeleného bonusu na el. energii (dopl. sazba)	455	-	Kč/MWh
Zelené bonusy na teplo (biomasa)	0		Kč/Mwh
Výkupní cena silové el. energie	1,098	-	Kč/kWhe

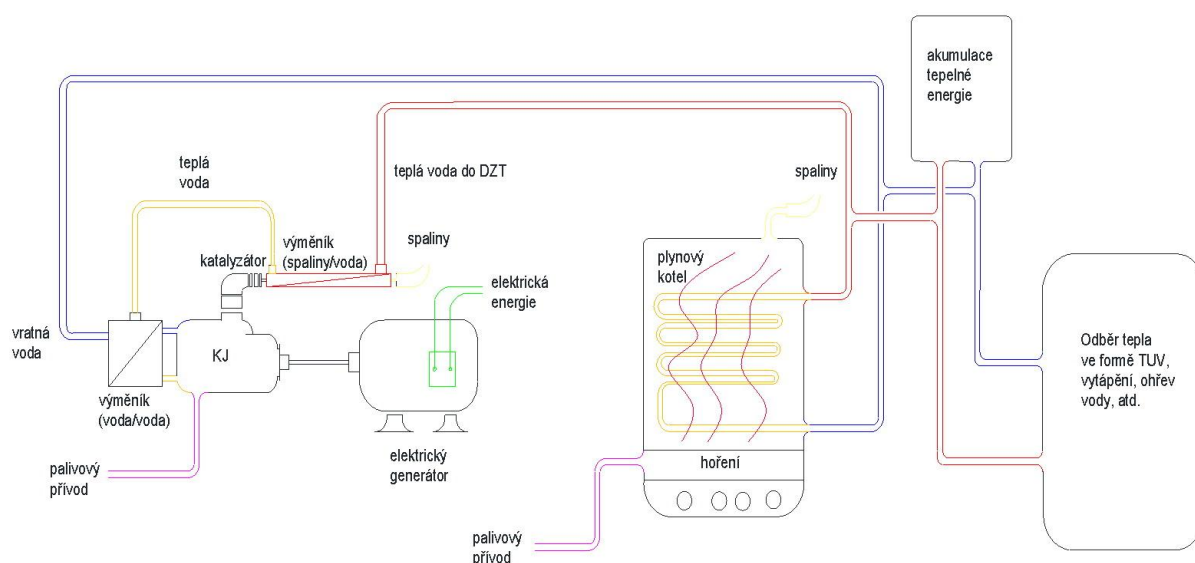
Společné parametry MKJ a plynový kotel			
Výkupní cena tepelné energie:***	<b>1 303,20</b>		Kč/MWht
	362,00	-	Kč/GJ
Celkový tepelný výkon soustavy: ****	-	190 797,0	GJ/rok
		<b>52 999</b>	MWh/rok

<b>Výstupní parametry: Výdaje</b>			
	MKJ	Plyn. kotel	
Celkové stálé náklady na pořízení	13 000 000	13 000 000	Kč
Spotřeba plynu za rok	16 757	8 337	MWh
Cena plynu	13 405 272	6 669 290	Kč/rok
Cena za přenosovou kapacitu plynu	1 201 585	597 804	Kč/rok
Roční cena za stálé měsíční platy	1 650	1 650	Kč/rok
Cena za servis a údržbu	2 892 133	2 892 133	Kč/rok
Celkové provozní náklady	17 500 640	10 160 876	Kč
<b>Výstupní parametry: Celkové zhodnocení</b>			
	MKJ	Plyn. kotel	
Celková dodaná elektrická energie	6 322	-	MWhe/rok
Celková dodaná tepelné energie z KJ	26 029	26 029	GJ/rok
Poměr dodávek tepelné energie do tepelné sítě	13,64	13,64	%
<b>Výstupní parametry: Výnosy</b>			
	MKJ	Plyn. kotel	
Výnosy ze zelených bonusů el. energie	3 761 353	0	Kč
Výnosy z prodeje silové el. energie	6 941 118	0	Kč/rok
Výnosy z prodeje tepelné energie	9 422 568	9 422 568	Kč/rok
Výnosy ze zelených bonusů tepelná energie	-	-	Kč/rok
Celkové roční výnosy	20 125 039	9 422 568	Kč
Roční výnosy s ohledem na provozní náklady	2 624 400	- 738 308	Kč/rok
<b>Výstupní parametry: Porovnání KJ a plynový kotel</b>			
	MKJ	Plyn. kotel	
Celkové stálé náklady na pořízení	13 000 000	13 000 000	Kč
rozdíl	Výhodnější plynový kotel		-
Celkové provozní náklady	17 500 640	10 160 876	Kč
rozdíl	Výhodnější plynový kotel		-
	7 339 764		Kč
Celkové roční výnosy s ohledem na proměnné náklady	2 624 400	- 738 308	Kč/rok
	Výnosnější KJ		-
Aktuální návratnost	Návratné	Nenávratné	-
	4,95	-	Let

Obr. 10.2: Aplikace pro výpočet parametrů MKJ v soustavě CZT

## 10.2 Návrh aplikace MKJ v soustavě DZT

Jedná se o použití MKJ spolu s plynovým kotlem a akumulací tepelné energie v DZT. Tato univerzální aplikace naprogramovaná v MS Excel je schopna vypočítat požadované tepelné a elektrické výkony v systému DZT. Následně lze pomocí tohoto programu nadimenzovat jednotlivé zařízení tak, aby byly kryty tyto požadavky pomocí souběžného chodu MKJ spolu s plynovým kotlem, nebo chodu každého zařízení zvlášť. Aplikace se dále zaměřuje na výnosy soustrojí při jasně formulovaných požadavcích provozovatele, kde je porovnávána výhodnost investice. Na následujících stránkách je zachycen princip fungování aplikace.



Vstupní parametry: Stálé náklady

	MKJ	Plyn.kotel	
Cena jednotky	13 000 000	13 000 000	Kč
Cena pomocného zařízení	250 000	300 000	Kč
Cena za stavební úpravy	150 000	200 000	Kč
Cena za připojení do elektrické sítě	20 000	30 000	Kč
Cena za připojení na CZT	50 000	50 000	Kč
Dodatečné náklady	-	-	Kč
Podpora na výstavbu	470 000	580 000	Kč

Vstupní parametry: Proměnné náklady					
	MKJ		Plynový kotel		
Součet cen za odebíraný zemní plyn bez DPH: *	8,44	-	8,440	-	Kč/m3
	0,80	-	0,80	-	Kč/kWh
Součet cen za kapacitu bez DPH: *		87	87		Kč/m3
Součet stálých měsíčních platů bez DPH: *		150	150		Kč/měsíc
Spotřeba zem. plynu/biomasy při 100% výkonu KJ:		201	70		m3/h
Servis a údržba zařízení		0,4	0,3		Kč/kWh

Vstupní požadavky v DZT			
MKJ + Plynový kotel			
Roční spotřeba elektrické energie v DZT	VT	NT	MWh/rok
	2500	900	
Výkupní cena elektrické energie v DZT	VT	NT	Kč/MWh
	1230	900	
Roční spotřeba tepla na vytápění a ohřev vody ***	0		GJ/rok
	16000		GJ/rok
Výkupní cena tepelné energie:****	1296		Kč/MWht
	360	0	Kč/GJ
Nákupní cena tepelné energie z CZT:xx	1332		Kč/MWht
	370	0	Kč/GJ
Nákupní cena elektrické energie od distributora: x	VT	NT	Kč/MWh
	1500	1000	

Výstupní parametry: Výdaje				
	MKJ	Plyn. kotel	MKJ + Plynový kotel	
Celkové stálé náklady na pořízení	13 000 000	12 000 000	25 000 000	Kč
Spotřeba plynu za rok	7 610	2 592	10 202	MWh/rok
Cena plynu	6 088 099	2 073 708	8 161 807	Kč/rok
Cena za přenosovou kapacitu plynu	545 708	185 877	731 586	Kč/rok
Roční cena za stálé měsíční platy	1 250	1 500	2 750	Kč/rok
Cena za servis a údržbu	1 148 400	314 496	1 462 896	Kč/rok
Celkové stálé náklady na provoz	7 783 457	2 575 581	10 359 039	Kč/rok

Výstupní parametry: Celková potřeba energií v DZT		
Roční výdaje na el. energii při VT	3 075 000	Kč/rok
Roční výdaje na el. energii při NT	810 000	Kč/rok
Celkové náklady na elektrickou energii	3 885 000	Kč/rok
Celkové náklady na tepelnou energii	5 760 000	Kč/rok

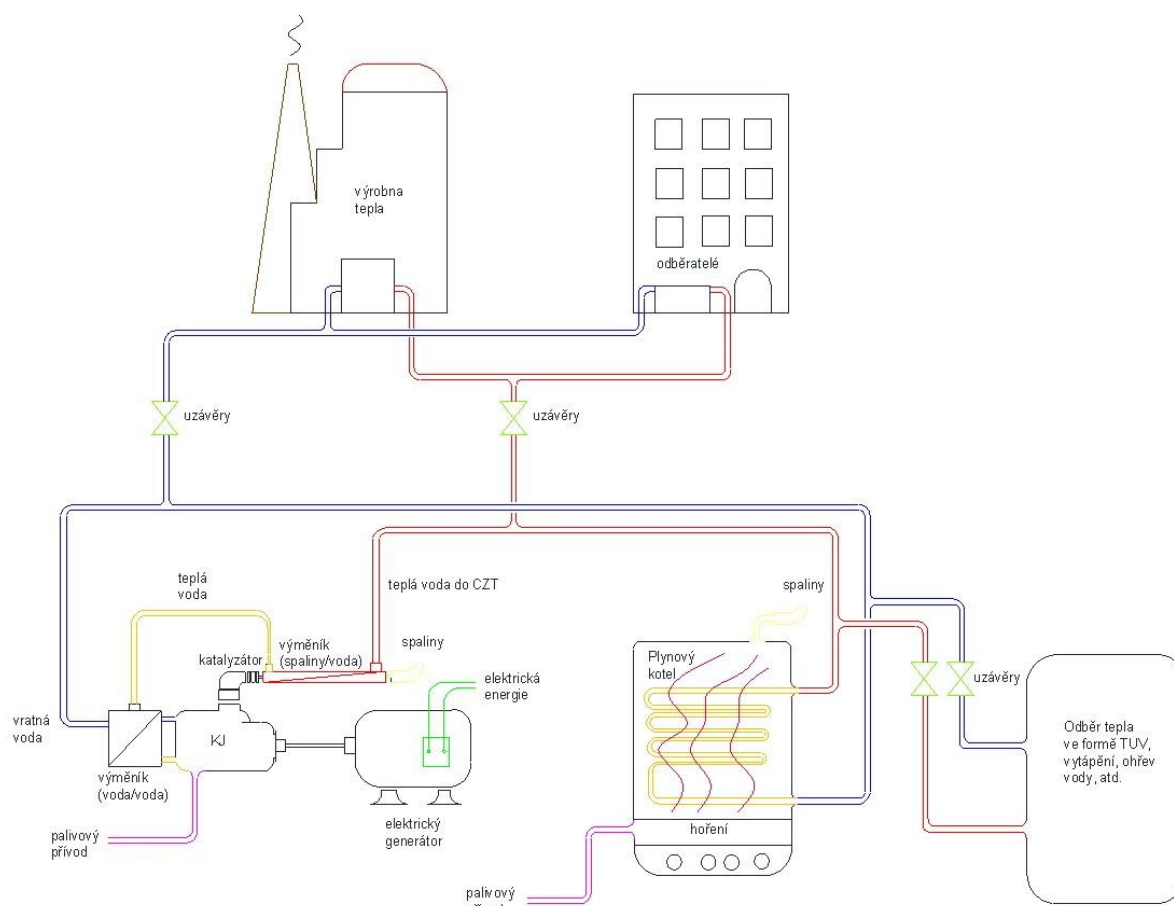


Výstupní parametry: vyrobená/požadovaná elektrická a tepelná energie					
	MKJ	Plyn. kotel	Společný chod obou zařízení	MWh/rok	MWh/rok
Celková vyrobená elektrická energie	3284	0	3284		
Požadovaná elektrická energie v DZT		3400			
Plnění požadavků dodávek elektrická energie xxx	96,6	0	96,6		%
Dodatečný nákup elektrické energie xxxx	Poddimenzováno 116	-	Poddimenzováno 116		-
Celková vyrobená tepelná energie	10336	5661	15997		GJ/rok
Požadovaná tepelná energie v DZT		16000			GJ/rok
Plnění požadavků dodávek tepelné energie xxx	65	35	100		%
Dodatečný nákup tepelné energie	Poddimenzováno 5664	Poddimenzováno 10339	Poddimenzováno 3		-
Přebytek/nedostatek tepelné energie	Výdej energie z akumul. nebo nákup tepelné energie z CZT	Výdej energie z akumul. nebo nákup tepelné energie z CZT	Výdej energie z akumul. nebo nákup tepelné energie z CZT		GJ/rok
<b>Výstupní parametry: Ekonomické zhodnocení</b>					
	MKJ	Plyn. kotel	Obě zařízení	Kč/rok	Kč/rok
Výnosy ze zelených bonusů el. energie	3 907 610		3 907 610		
Výnosy za prodej el. energie	3 497 147		3 497 147		
Výnosy za prodej tep. energii	3 720 816	2 037 934	5 758 750		
Ztráty vzniklé naddimenzováním u elektrické energie	-		-		Kč/rok
Nákup elektrické energie od distributora	145 367	4 250 000	145 367		Kč/rok
Nákup tepelné energie od distributora za předpokladu bez akumulace tepelné energie	2 095 828	3 825 457	1 285		Kč/rok
Očekávané celkové výnosy	11 125 574	2 037 934	13 163 508		Kč/rok
Očekávané celkové výnosy s ohledem na ztráty naddimenzování	8 884 378	6 037 523	13 016 856		Kč/rok
Ekonomická výhodnost nasazení	Návratné	Nenávratné	Návratné		-
Návratnost	11,8	-	9,4		Let

Obr. 10.3: Aplikace naprogramovaná v MS Excel pro výpočet parametrů MKJ v soustavě DZT

### 10.3 Návrh aplikace MKJ v soustavě CZT a DZT

Tato funkční a univerzální aplikace naprogramovaná v MS Excel má za úkol vypočítat ekonomickou výhodnost při kombinovaném způsobu provozování MKJ spolu s plynovým kotlem v CZT a DZT. Jedná se o typický příklad z praxe, kdy je velká výrobná tepelné energie v odstávce, a MKJ spolu s plynovým kotlem v kombinovaném nebo samostatném provozu dodává tepelnou energii do CZT. I zde je možnost dodávek elektrické energie do nadřazené sítě. Ovšem pokud je velká výrobná tepelné energie v provozu, není mnohdy potřeba dodávek tepla od MKJ nebo plynového kotle a z toho důvodu se může provozovat v DZT pro krytí vlastní spotřeby. Aplikace má za úkol vypočítat provozně-technické parametry spolu s ekonomickou výhodností provozu podle požadavků provozovatele.



Vstupní parametry: Stálé náklady			
	MKJ	Plyn.kotel	
Cena jednotky	13 000 000	13 000 000	Kč
Cena pomocného zařízení	250 000	300 000	Kč
Cena za stavební úpravy	150 000	200 000	Kč
Cena za připojení do elektrické sítě	20 000	30 000	Kč
Cena za připojení na CZT	50 000	50 000	Kč
Dodatečné náklady	-	-	Kč
Podpora na výstavbu	470 000	580 000	Kč

Vstupní parametry: Proměnné náklady			
	MKJ	Plynový kotel	
Součet cen za odebíraný zemní plyn bez DPH: *	8,44	8,440	Kč/m3
	0,80	0,80	Kč/kWh
Součet cen za kapacitu bez DPH: *	87	87	Kč/m3
Součet stálých měsíčních platů bez DPH: *	150	150	Kč/měsíc
Spotřeba zem. plynu/biomasy při 100% výkonu KJ:	201	70	m3/h
Servis a údržba zařízení	0,4	0,3	Kč/kWh

Vstupní technické parametry zařízení			
	MKJ	Plyn. kotel	
Elektrický výkon	800	-	kW
Tepelný výkon	915	1000	kW
Zelený bonus na el. energii (zákl. sazba)	140	-	Kč/MWh
Zeleného bonusu na el. energii (dopl. sazba)	455	-	Kč/MWh
Zelené bonusy na teplo (biomasa)	0	0	Kč/Mwh

Vstupní požadavky v CZT			
	MKJ	Plyn. kotel	
Průměrné roční zatížení zařízení	100	100	%
Počet dní v provozu	250	200	dny
Počet hodin denně	23,94546	23,94546	hodiny
Celkový počet hodin provozu	5986,365	4789,092	hodin/rok
Výkupní cena silové el. energie	1,098	-	Kč/kWhe
Společné parametry MKJ a plynový kotel			
Výkupní cena tepelné energie:***	1 303,200		Kč/MWht
	362,000	-	Kč/GJ
Celkový tepelný výkon soustavy:****	0	190 797	GJ/rok
		52 999,17	MWh/rok

Vstupní požadavky v DZT			
	MKJ	Plyn. kotel	
Průměrné roční zatížení zařízení	100	100	%
Počet dní v provozu	50	50	dny
Počet hodin denně	20	20	hodiny
Celkový počet hodin provozu	<b>1000</b>	<b>1000</b>	hodin
Společné parametry MKJ a plynový kotel			
Roční spotřeba elektrické energie v DZT	VT	NT	MWh/rok
	500	400	
Výkupní cena elektrické energie v DZT	VT	NT	Kč/MWh
	1100	850	
Roční spotřeba tepla na vytápění a ohřev vody ****	<b>0</b>		GJ/rok
	6 500		GJ/rok
Výkupní cena tepelné energie:***	<b>1332</b>		Kč/MWht
	370	<b>0,00</b>	Kč/GJ
Nákupní cena elektrické energie od distributora x	VT	NT	Kč/MWh
	1500	1000	
Nákupní cena tepelné energie:xx	<b>1368</b>		Kč/MWht
	380	<b>0</b>	Kč/GJ





## 11 Kritéria hodnocení ekonomické efektivity

Aby předchozí samostatný návrh aplikovatelnosti MKJ do soustavy CZT dostával ekonomický smysl, je třeba ho posoudit podle ekonomických kritérií ekonomické efektivity. Posuzuje se zde výhodnost jednotlivých variant provozování KJ v průběhu jejich životnosti. Základem pro posouzení efektivity jednotlivých variant je tabulka veškerých roční výnosů a výdajů jednotlivých variant [3].

### 11.1 NPV - Net Present Value (Aktualizace finančních toků)

Jedná se o časové rozložení výdajových a příjmových položek přepočtených pomocí úročitele k určité časové hodnotě za určité sledované období [3].

### 11.2 IRR - Internal Rate of Return (Vnitřní míra výnosu)

V tomto případě se jedná o metodu kritéria vnitřního výnosového procenta. Vyskytuje se zde úroková míra, která je srovnávána s diskontní sazbou s ČNB. Analyzuje se zde tedy nejvhodnější vnitřní úroková míra, při které je souhrnný diskontovaný cash-flow roven nule, ihned po skončení doby životnosti zařízení. V podstatě se hledá taková úroková sazba, kdy je čistá současná hodnota investice rovna 0. Nejvhodnější provoz KJ je pokavad' vnitřní úroková míra je vyšší než diskontní sazba u ČNB [3].

#### Pokračování návrhu – kritéria ekonomické efektivity

K výpočtu ekonomické efektivity podle těchto ekonomických ukazatelů se musí nadefinovat následující parametry. Hodnota zelených bonusů bude každoročně valorizována o 1%. Pro výpočet vhodného cash-flow se budu řídit vyhláškou č. 150/2007, která stanovuje valorizaci výkupní ceny elektrické energie na nejnižší hodnotě 2 % za rok. Pro výkupní ceny tepelné energie budu taktéž uvažovat valorizaci cen 2 % za rok. Diskontní sazbu budu v této práci uvažovat na hodnotě 5%. [14] [12]. Provoz jednotky je reálně stanoven na 15 let. V ekonomické efektivity budu posuzovat nejefektivnější variantu provozu KJ. (4 400 hodinový provoz při 100% zatížení, kdy je vykoupeno 100% elektrické i tepelné energie). Požadavky na údržbu a servis budou každoročně zvednuty o 2% na dodatečné výdaje. Provozní náklady na zemní plyn budou ročně zvednuty o 2%.

**Odpisy**

Tato výstavba KJ je podle platných zákonů ČR zařazena do 3 odpisové skupiny podle zákona o daních z příjmu. V tomto návrhu bude KJ odepisována po dobu 10 let s následujícími koeficienty.

Odpisy po dobu 1. roku

$$O_1 = \frac{N_c * 5,5}{100} = \frac{13\,000\,000 * 5,5}{100} = 715\,000 \text{ Kč} \quad (11.1)$$

Odpisy po dobu od 2. – 10 roku

$$O_{2-10} = \frac{N_c * 10,5}{100} = \frac{13\,000\,000 * 10,5}{100} = 1\,365\,000 \text{ Kč} \quad (11.2)$$

Kde:

$N_c$  – Celkové stálé náklady

$O_1$  – Odpisy po dobu 1. roku

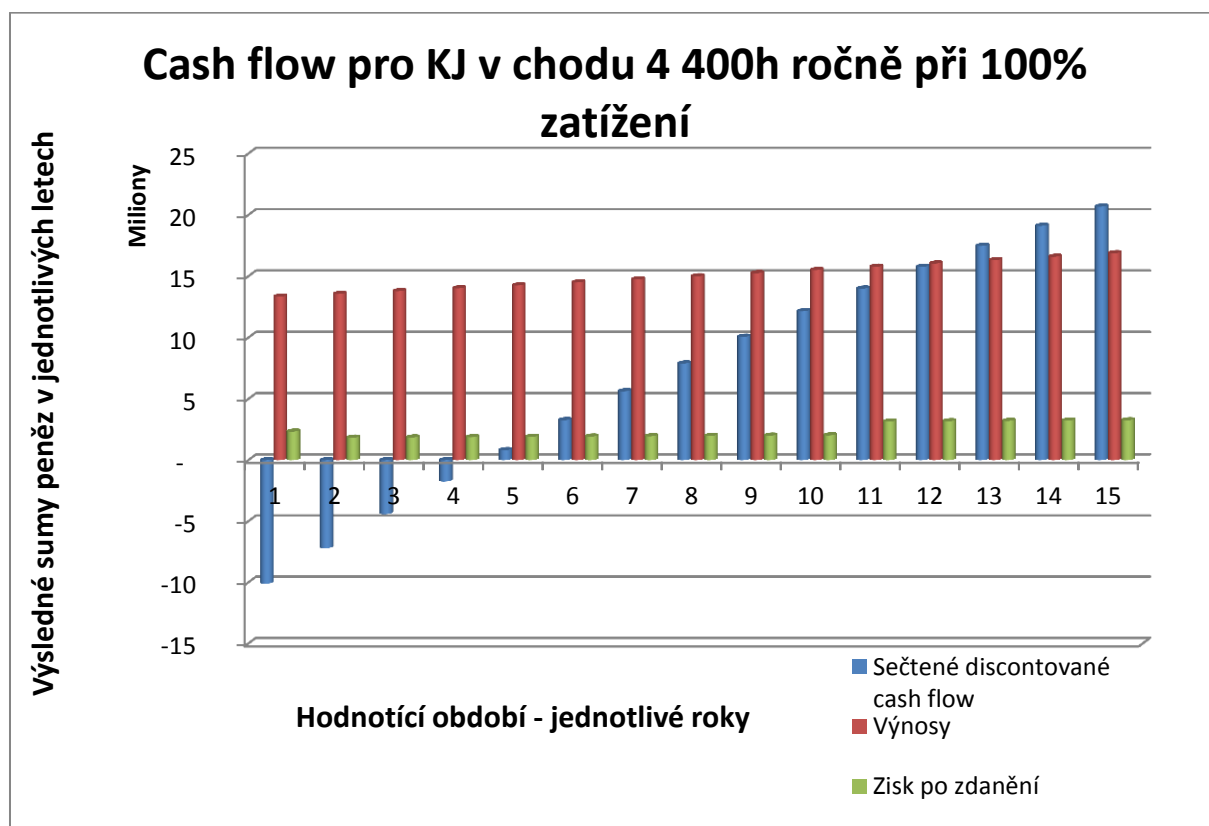
$O_{2-10}$  – Odpisy po dobu 2 – 10 let



Rok spuštění	Náklady (Kč)	Ópisy (Kč)	Výkupní cena elektriny	Výkupní cena tepla (Kč/kWh)	Výnosy (Kč)	Zisk před zdaněním (Kč)	Daň z příjmu (19%)	Zisk po zdanění (Kč)	Cash flow (Kč)	Diskontované cash flow (Kč)	Sečtené diskontované cash flow (Kč)	Diskont (%)	Diskontní index
Výstavba	13 000 000								- 13 000 000	- 13 000 000	- 13 000 000	5	1
1	9 743 804	715 000	1,10	1,30	13 341 394	2 882 590	547 692	2 334 898	3 049 898	2 904 665	10 095 335	5	0,9524
2	9 938 680	1 365 000	1,12	1,33	13 565 806	2 262 126	429 804	1 832 322	3 197 322	2 900 065	7 195 270	5	0,91
3	10 137 454	1 365 000	1,14	1,35	13 794 282	2 291 828	435 447	1 856 381	3 221 381	2 782 750	4 412 520	5	0,86
4	10 340 203	1 365 000	1,17	1,38	14 026 899	2 321 696	441 122	1 880 574	3 245 574	2 670 142	1 742 379	5	0,82
5	10 547 007	1 365 000	1,19	1,41	14 263 736	2 351 729	446 828	1 904 900	3 269 900	2 562 052	819 674	5	0,78
6	10 757 947	1 365 000	1,21	1,44	14 504 872	2 381 925	452 566	1 929 359	3 294 359	2 458 302	3 277 975	5	0,75
7	10 973 106	1 365 000	1,24	1,46	14 750 390	2 412 284	458 334	1 953 950	3 318 950	2 358 716	5 636 691	5	0,71
8	11 192 568	1 365 000	1,26	1,49	15 000 372	2 442 804	464 133	1 978 671	3 343 671	2 263 128	7 899 820	5	0,68
9	11 416 419	1 365 000	1,29	1,52	15 254 904	2 473 485	469 962	2 003 523	3 368 523	2 171 380	10 071 199	5	0,64
10	11 644 748	1 365 000	1,31	1,55	15 514 072	2 504 324	475 822	2 028 502	3 393 502	2 083 316	12 154 515	5	0,61
11	11 877 643	1 365 000	1,34	1,58	15 777 963	3 900 321	741 061	3 159 260	3 159 260	1 847 154	14 001 669	5	0,58
12	12 115 196		1,37	1,62	16 046 669	3 931 473	746 980	3 184 493	3 184 493	1 773 245	15 774 914	5	0,56
13	12 357 499		1,39	1,65	16 320 280	3 962 781	752 928	3 209 852	3 209 852	1 702 253	17 477 167	5	0,53
14	12 604 649		1,42	1,68	16 598 890	3 994 241	758 906	3 235 335	3 235 335	1 634 064	19 111 231	5	0,51
15	12 856 742		1,45	1,72	16 882 595	4 025 852	764 912	3 260 940	3 260 940	1 568 568	20 679 799	5	0,48

Tabulka 12.1 : Cash flow pro variantu provozu K1 4 400h ročně při 100% prodeji tepelné a elektrické energie

Pro názornost jsou vybrané parametry znázorněny v následujícím grafu 11.1



Graf. 11.1: Cash flow pro KJ v chodu 4 400h ročně při 100 % dodávkách elektrického a tepelného výkonu,

### Závěr ekonomické analýzy

Ekonomická analýza	Příslušná hodnota	
NPV CF	20 679 799	Kč
IRR	Vyšší než diskontní míra	-
T <sub>návr</sub>	5,5	roky

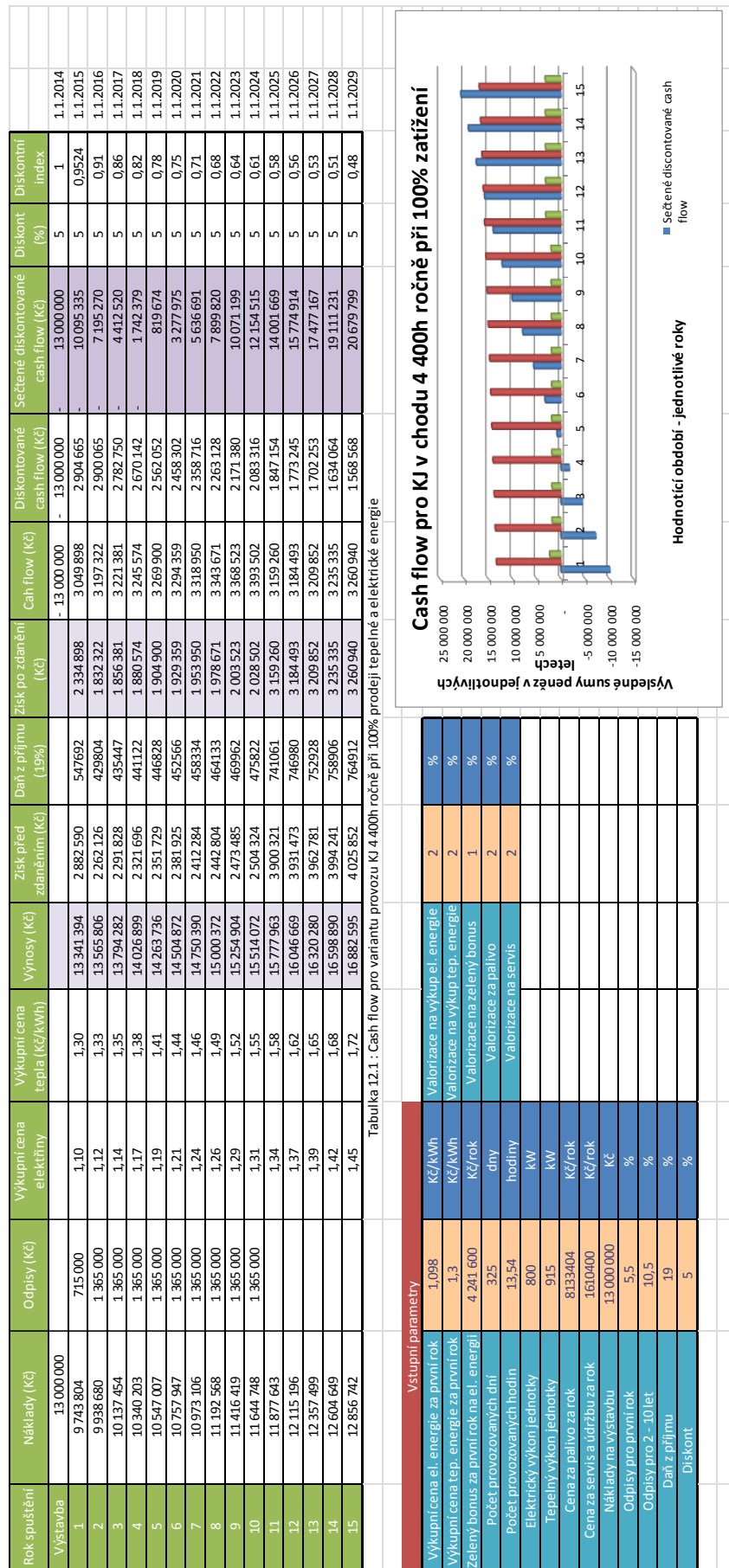
Tabulka. 11.2: Jednotlivé ekonomické ukazatele

Z těchto hodnot je patrné, že návratnost investice je v této analyzované variantě velmi rychlá. To je dáno výkupem veškeré elektrické i tepelné energie. Ekonomický ukazatel break – even (bod zvratu) nastává již po třetím roce. Za celou dobu provozu 15 let, je celkový zisk relativně výrazný. Ukazatel NPV CF je nejdůležitější kritérium (aktualizace finančních toků – Cash flow) udává hodnotu 29 796 226 Kč[3]. Ukazatel IRR je vyšší než-li diskontní míra, proto lze tvrdit, že je zajištěna ekonomická návratnost za dobu životnosti MKJ. Díky velké výstupní hodnotě ukazatele NPV CF, je možné tvrdit, že stávající zisky z MKJ jsou do budoucnosti schopny pokrýt případné nedostatky nebo akutní požadavky MKJ.

**Zhodnocení návrhu:**

Návratnost investic se tedy liší jednotlivými možnostmi provozu MKJ. Dle předpokladů vyšlo více správných řešení provozu v CZT. Nejlepší možný provoz MKJ je 4 400 h ročně, kdy pracuje na 100% zatížení a veškerá tepelná a elektrická energie je vykupována. Návratnost MKJ může být nižší za předpokladu zvýšení cen ze zelených bonusů a cen za silovou elektrickou energii a tepla.

Ovšem ne vždy je tato varianta v praxi provozována, z toho důvodu jsem k této práci naprogramoval další aplikaci v MS Excel, kde se dají vypočítat ekonomické ukazatele k různým variantám provozu a odběrům energií MKJ podle požadavků provozovatele po dobu 15 let v systému CZT. Následuje výpis z programu.



Obr. 11.1: Aplikace naprogramovaná v MS Excel pro výpočet ekonomických ukazatelů MKJ v soustavě CZT

Dle mého názoru, by se do finanční analýzy a jednotlivých kritérií měla započítávat ještě inflace. Inflace ovlivňuje všechny ceny daného zařízení. Ovšem je zde problém odhadnout výši inflace v budoucnosti, tudíž vznikají problémy s možností nesprávného odhadu cen daných prvků. Díky tomu se s ní ve většině případů nepočítá a používá se na nejvyšší jako doplňková informace.

Projekt navíc nestojí pouze na ekonomické stránce věci, tudíž i za pomoci ekonomických analýz nelze jednoznačně říci, jaké zařízení provozované po skončení životnosti bude stále spolehlivé a ekonomicky efektivní. Navíc další úskalí v provozování MKJ je v podobě měnících se ekonomických podmínek na jejich provoz do budoucnosti. Dalo by se tedy tvrdit, že při projektování a uvažování o výstavbě MKJ je nutné být dostatečně obeznámen s regionálním a světovým ekonomickým vývojem. Návratnost investic z jednotlivých MKJ se může pohybovat od 3 do 15 let, kdy v 15. roku provozování od výstavby se investice hodnotí stále jako přijatelná, protože se může stát, že návratnost nemusí také nastat vůbec.

## 12 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo řešit problematiku aplikovatelnosti malé kogenerační jednotky. Práce je tematicky rozdělena na pět částí.

V první fázi byl vysvětlen princip a dělení kogenerace a také zde bylo vysvětleno, proč je kogenerace pro uživatele přínosná a ekonomicky zajímavá. Následně byly pečlivě analyzovány jednotlivé MKJ určené pro výrobu tepelné a elektrické energie, jako jsou palivové články, mikroturbíny, ORC systémy, spalovací motory, Stirlingův motor, systém Talbot, atd. U těchto systémů byl především vysvětlen princip funkce, a dále byly popsány výkonové parametry, druhy použitého paliva, ekologická zatížitelnost, konstrukční uspořádání a ekonomické parametry.

Druhá část práce pojednává o rizicích a příležitostech provozu KJ. Ze začátku byly analyzovány jednotlivé možnosti spolupráce MKJ s chladicí a klimatizační technikou. Poté je uvedeno zhodnocení jednotlivých druhů paliv, která jsou spjata s kladným ekonomickým hodnocením MKJ, kde byly řešeny i možnosti využití biomasy. Dále jsou v práci informace ohledně různých možností provozu MKJ.

Třetí a čtvrtá část se zabývá návrhem MKJ, která je aplikována do CZT s respektováním ekonomického modelu. Byl vytvořen denní a roční diagram spotřeby tepelné energie v Kadani ze zadaných parametrů od mého konzultanta Ing. Jiřího Beneše, Ph.D. Následně byla navržena MKJ, kde jsou vypočteny její provozní, ekonomické a technické parametry pro jednotlivé varianty provozu MKJ v soustavě CZT. Tyto parametry byly vypočteny pomocí aplikace v programu MS Excel, kterou jsem vymyslel a navrhl. Tato aplikace je naprogramována pro univerzální použití.

Dále jsem naprogramoval další dvě aplikace v MS Excel. Jedna z nich pojednává o využití MKJ spolu s plynovým kotlem a akumulací tepelné energie v DZT. Aplikace v MS Excel je schopna vypočítat požadované tepelné a elektrické výkony v tomto systému. Následně lze pomocí této aplikace nadimenzovat MKJ a plynový kotel tak, aby byla pokryta vlastní spotřeba tepelné a elektrické energie pomocí souběžného chodu nebo chodu každého zařízení zvlášť. Aplikace se dále zaměřuje na ekonomické zhodnocení těchto strojů při jasně formulovaných požadavcích provozovatele. Druhá z nich má za úkol vypočítat provozně-technické parametry a ekonomickou výhodnost při kombinovaném způsobu provozování MKJ spolu s plynovým kotlem v CZT a DZT.

Poslední nedílná součást mé práce se zabývá ekonomickým hodnocením pomocí jednotlivých ekonomických ukazatelů (NPV CF, IRR,  $T_{\text{návr}}$ , break-even), který jsem vypočetl pro nejvýnosnější variantu MKJ. I pro ekonomické hodnocení jsem naprogramoval aplikaci v programu v MS Excel, která provádí výpočty jednotlivých ekonomických ukazatelů po dobu provozu 15 let, pro různé varianty použití MKJ spolu s plynovým kotlem v soustavě CZT.

Dle mého názoru budou MKJ v blízké budoucnosti velmi potřebné. Mohou se provozovat v paralelním provozu s velkým teplotěnským zdrojem energie v CZT, ovšem častěji se mohou použít pro dodávky tepla do CZT v případě výpadku velkého teplotěnského zdroje, kdy pokrývají potřebné dodávky tepelné energie. Jelikož se zde jedná o vytlačení jednoho energetického zdroje druhým, je nutné, aby energetický zdroj pro MKJ byl ekonomicky výhodný. Své uplatnění naleznou i v systémech DZT, kde mohou krýt vlastní spotřebu, a přebytky energií lze prodávat. Právě zde, v průmyslové sféře, mají dle mého názoru MKJ největší potenciál. O výhodnosti provozu rozhoduje státní podpora, nasmlouvané výkupní ceny tepelné a elektrické energie a samozřejmě ceny za palivo. V současnosti se tedy vyplatí provozovat MKJ v širokém pásmu provozů, ovšem za předpokladu správného využití elektrického a tepelného potenciálu jednotky, kdy se dosáhne úspory paliva, což vede ke zlepšení životního prostředí.

### 13 Použitá literatura:

- [1] Koppe, K., Juchelková D.: Energie biomasy, VŠB-TUO, Ostrava 2011, ISBN 978-80-248-2457-4
- [2] Dvorský, E., Hejtmánková, P.: Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, BEN, Praha 2005, ISBN 80-7300-118-7
- [3] Krbek, J., Polesný, B.: Kogenerační jednotky a provoz, GAS, Praha 2007, ISBN 978-80-7328-151-9
- [4] Krbek, J., Polesný, B.: Kogenerační jednotky malého výkonu v komunálních a průmyslových tepelných zdrojích, VUT, Brno 1997, ISBN 80-214-0889-0
- [5] TEDOM [online]. [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com>
- [6] Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/462894/CR\\_POZE\\_04\\_2013.pdf/fcc8b49f-c021-475a-b3b7-a375e0074b84](http://www.eru.cz/documents/10540/462894/CR_POZE_04_2013.pdf/fcc8b49f-c021-475a-b3b7-a375e0074b84)
- [7] Technická zařízení budov [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz>
- [8] Kadrnožka, J.: Energie a globální oteplování, VUT, Brno 2006, ISBN 80-214-2919-4
- [9] Paděra, J.: Kogenerační jednotky pro domácí využití, VUT 2008
- [10] Dvorský, E.: Přednášky Elektrárny 1. [cit. 2014-02-28] Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/>
- [11] RWE. [online]. [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.rwe.cz>
- [12] Velíšek, M.: Návrh integrace sluneční elektrárny do provozu malé teplárny spalující biomasu (TDK), ZČU 2013
- [13] M. C. evidence majetku. [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://odpisy-majetku.mcsoftware.cz/index.php?kat=odpisy>
- [14] Česká národní banka. [online]. [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.cnb.cz/cs/index.html>
- [15] Skupina ČEZ. [online]. [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/kogenerace/cs/o-kogeneraci/princip-a-vyhody-male-kogenerace.html>

