

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Technická fakulta



**Ekonomické zhodnocení provozu kogenerační  
jednotky**

**Bakalářská práce**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. René Neděla

Autor práce: Kateřina Kaiserová

Praha 2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kateřina Kaiserová

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Ekonomické zhodnocení provozu kogenerační jednotky**

Název anglicky

**Combined heat and power and its economy**

---

### Cíle práce

Cílem práce je ekonomické zhodnocení provozu kogenerační jednotky.

### Metodika

- 1) Úvod
- 2) Seznámení se s problematikou kombinované výroby elektřiny a tepla
- 3) Základní funkce kombinované výroby elektřiny a tepla
- 4) Teoretický rozbor ekonomiky provozu kombinované výroby elektřiny a tepla
- 5) Praktický propoččet základních ukazatelů provozu kombinované výroby elektřiny a tepla
- 6) Závěr

## **Doporučený rozsah práce**

35str. včetně příloh

## **Klíčová slova**

KVET, kogenerace, kombinovaná výroba elektřiny a tepla, CF, IRR, NPV

---

## **Doporučené zdroje informací**

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie

D. Flin, Cogeneration A user's guide. The Institution of Engineering and Technology, London, 2010, ISBN 978-0-86341-738-2, p. 5

H. Scholleová, Ekonomické a finanční řízení pro neekonomy, ISBN:978-80-247-2424-9

J. Kadrnožka, Tepelné elektrárny a teplárny 2002

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2012/27/EU

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – TF

## **Vedoucí práce**

Ing. René Neděla

## **Garantující pracoviště**

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

**prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 16. 3. 2016

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: **Ekonomické zhodnocení provozu kogenerační jednotky** vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědoma, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědoma že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne:

.....

Kateřina Kaiserová

## **Poděkování**

Touto cestou bych ráda poděkovala svému vedoucímu Ing. Renému Nedělovi za jeho odborné vedení mé bakalářské práce, za jeho ochotu, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat celé mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a dodávala mi sílu. Velké díky také patří mým blízkým přátelům a hlavně mému příteli, který mi byl největší podporou.

**Abstrakt:** Bakalářská práce se věnuje problematice kombinované výroby elektřiny a tepla. V první části je popsán princip kogenerace a jsou sepsány její výhody a nevýhody. Další část je zaměřena na technologie, které se dají využít v kombinované výrobě elektřiny a tepla. Druhá polovina práce se zabývá výběrem kogenerační jednotky pro rodinný dům a následným ekonomickým zhodnocením provozu.

**Klíčová slova:** KVET, kogenerace, kombinovaná výroba elektřiny a tepla, CF, IRR, NPV

**Summary:** The bachelor thesis deals with the issue of combined heat and power. The first part describes the principle of cogeneration, its advantages and disadvantages. The next part focuses on technologies that can be used in the combined heat and power. The second half of the thesis deals with the selection of the cogeneration unit for the family house and its economic evaluation.

**Key words:** CHP, cogeneration, combined heat and power, CF, IRR, NPV

# Obsah

1. ÚVOD .....	- 1 -
2. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla .....	- 2 -
2.1. Výhody a nevýhody .....	- 3 -
2.2. Charakteristické parametry KVET .....	- 4 -
2.2.1. Teplárenský modul .....	- 4 -
2.2.2. Účinnost .....	- 4 -
3. Technologie KVET .....	- 5 -
3.1. Rozdělení kogenerace .....	- 5 -
3.2. Popis technologií .....	- 6 -
4. Ekonomika provozu kombinované výroby elektřiny a tepla .....	- 16 -
4.1. Analýza investice .....	- 16 -
4.2. Zelený bonus .....	- 18 -
4.3. Stanovení spotřeby energie a tepla .....	- 18 -
4.4. Výběr kogenerační jednotky .....	- 20 -
4.5. Výpočet ekonomiky provozu KJ .....	- 21 -
5. Ekonomické zhodnocení KJ .....	- 23 -
5.1. Náklady na KJ .....	- 24 -
5.2. Roční náklady na rodinný dům .....	- 24 -
5.3. Využití vyrobené elektrické energie .....	- 25 -
5.4. Využití zeleného bonusu .....	- 26 -
5.5. Zisk .....	- 26 -
5.6. Ekonomické vyhodnocení .....	- 27 -
5.7. Alternativa .....	- 28 -
Závěr .....	- 31 -
Citovaná literatura .....	- 33 -
Seznam použitých zkratk .....	- 35 -
Seznam obrázků .....	- 36 -
Seznam tabulek .....	- 36 -
Seznam grafů .....	- 36 -

# 1. ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je popsat princip kogenerace a ekonomicky zhodnotit provoz kogenerační jednotky. Cílem práce je zvolit konkrétní kogenerační jednotku pro určitý objekt, která je schopna pokrýt požadované potřeby energií a následně zjistit, zda je výhodné ji instalovat pro určitý objekt.

V první části je popsán princip kombinované výroby elektřiny a tepla s jejími výhodami i nevýhodami. Druhá část rozebírá všechny druhy technologie, které lze použít, s větším důrazem na spalovací motory. Následující kapitoly jsou zaměřeny na praktický příklad, kde je zvolen objekt, pro který je navržena vhodná kogenerační jednotka a dále je posuzována.

V části s praktickým příkladem jsou zjišťovány a počítány potřebné parametry k analýze investice. Poté je zhodnocena návratnost a výhodnost zvolené investice do kogenerační jednotky pro zvolený objekt.

Práce je převážně čerpána z odborné literatury, webových stránek a dokumentů. Užitečnou literaturou mi byla např. “KRBEK, POLESNÝ, Kogenerační jednotky – zřízení a provoz”. Velmi přínosnou webovou stránkou pro mou práci byla stránka Teplárenského sdružení České republiky <http://www.kombinovana-vyroba.cz> a stránka spol. TEDOM.

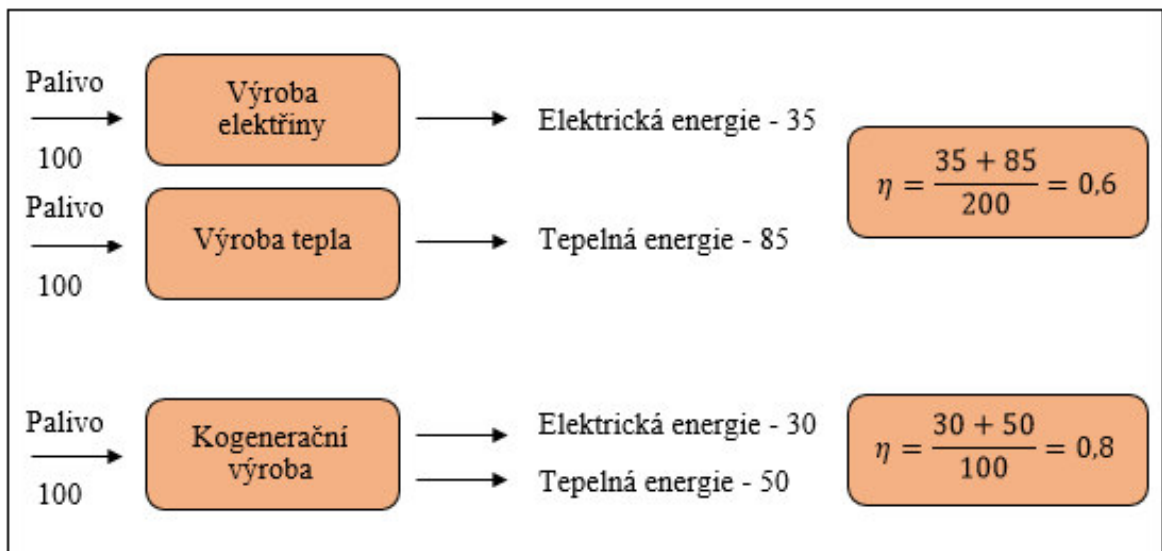


## 2. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Pojem kogenerace spočívá ve společné výrobě elektřiny a tepla (KVET). Vyznačuje se vysokým využitím energie v palivu, čímž se zvyšuje účinnost. [1] Díky tomu se minimalizují ztráty, které vznikají při monovýrobě elektrické energie. Využitím odpadního tepla se ušetří až 40% energie v palivu oproti oddělené výrobě elektřiny a tepla. [2]

Teplu, které je při samostatné výrobě elektřiny vypouštěno do ovzduší bez využití, představuje u KVET podstatné zvýšení celkové účinnosti. Energie paliva je využita až z 90 %. Účinnost využití energie u klasických zdrojů se pohybuje v rozmezí 30 – 40 % (viz obr. 1). [3] Po porovnání dvou oddělených výroben elektřiny a tepla (kotelny a elektrárny), a kogenerační jednotky, je zřejmé snížení energetických ztrát při výrobě (viz příloha 1).

Obr. 1 Účinnost přeměny primární energie [22]



Úsporu primárního paliva lze vyjádřit následujícím vzorcem:

$$UPE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_q^T}{\eta_r^V} + \frac{\eta_e^T}{\eta_r^E}} \right) * 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

kde:  $\eta_q^T$  - účinnost tepla z KVET

$\eta_e^T$  - elektrická účinnost KVET

$\eta_r^V$  - harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu tepla

$\eta_r^E$  - harmonizovaná referenční hodnota účinnosti pro oddělenou výrobu elektřiny [4]

## 2.1. Výhody a nevýhody

Jak již bylo zmíněno KVET výrazně zvyšuje účinnost využití primárního paliva oproti oddělené výrobě elektřiny a tepla (viz *obr. 1*). V kondenzační elektrárně je větší část energie paliva odvedena ve formě tepla jako pára z chladících věží do okolí. Zatímco při kombinované výrobě, tedy v teplárně, je toto teplo dále využito. Díky tomu je tento způsob výroby elektřiny a tepla v EU podporován. [5]

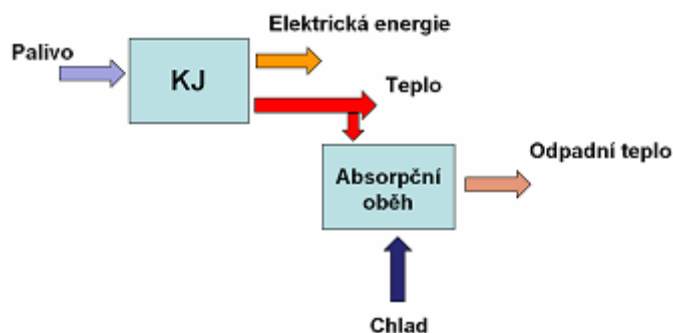
S úsporou primárního paliva souvisí úspora emisí znečišťujících látek (oxidy dusíku, oxidy síry, prach) a emisí oxidu uhličitého. KVET tak přispívá ke zlepšení životního prostředí. KVET je vhodné instalovat v klasických výtopnách, čímž se snižují tepelné ztráty v rozvodech. Kogenerační jednotky jsou obzvláště užitečné při likvidaci spalitelného odpadního materiálu nebo odpadního plynu. Je to tedy dobrý prostředek pro likvidaci odpadu ekologicky šetrným způsobem. [6]

Další výhodou tepláren je, že mohou být vybaveny zařízením pro tzv. ostrovní provoz, který v případě blackoutu zajistí nejnnutnější zásobování elektrickou energií nezbytnou např. pro udržení dodávek pitné vody. Mohou sloužit tedy jako záložní zdroj elektrické energie při výpadku. [5]

Přebytky vyrobené elektrické energie lze prodávat do veřejné rozvodné sítě na základě smluvního vztahu s distribuční společností a obchodníkem, a tím lze ovlivnit návratnost vložených investic. [7]

Kogenerační jednotku lze doplnit o absorpční chladicí jednotku, díky které je vyráběn i chlad. Tento princip se nazývá trigenerace viz *obr. 2*. Tímto způsobem lze využít energii i v létě, např. ke klimatizaci budov, k chlazení piva v pivovarech, apod. [8]

Obr. 2 Schéma trigeneračního systému [11]



Mezi nevýhody lze zařadit:

- Vyšší investiční náklady
- Nutnost zajistit ochranu proti hluku, v případě instalace přímo u spotřeby [7]

## 2.2. Charakteristické parametry KVET

### 2.2.1. Teplárenský modul

Teplárenský modul  $e$  představuje poměr mezi elektrickým výkonem tepelného stroje a dodávaným tepelným výkonem za určité časové období.

$$e = \frac{E}{Q_d} \quad (2.2)$$

Kde:  $e$  [-] teplárenský modul,  
 $E$  [GJ, MWh] elektrický výkon tepelného stroje,  
 $Q_d$  [GJ, MWh] dodaný tepelný výkon. [9]

### 2.2.2. Účinnost

$\eta_E$  - Účinnost výroby elektrické energie je definována jako podíl elektřiny vyráběné formou KVET k celkové spotřebě tepla v palivu. Vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$\eta_E = \frac{E}{Q_{pal}} \times 100 \quad (2.3)$$

Kde:  $\eta_E$  [%] elektrická účinnost  
 $Q_{pal}$  [GJ, MWh] spotřeba tepla v palivu [10]

$\eta_q$  - Účinnost výroby užitečného tepla je definována jako podíl užitečného tepla vyráběného formou KVET k celkové spotřebě tepla v palivu. Vypočte se dle vztahu:

$$\eta_q = \frac{Q_d}{Q_{pal}} \times 100 \quad (2.4)$$

Kde:  $\eta_q$  [%] užitečné teplo [10]

$\eta_{celk}$  - Celková účinnost zdroje KVET je definována jako podíl celkové elektřiny a užitečného tepla vyráběného formou KVET k celkové spotřebě tepla v palivu. Vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$\eta_{celk} = \frac{E+Q_d}{Q_{pal}} \times 100 \quad (2.5)$$

Kde:  $\eta_{celk}$  [%] celková účinnost [10]

### 3. Technologie KVET

#### 3.1. Rozdělení kogenerace

Dle elektrického výkonu lze KVET rozdělit na 3 typy:

- Velká kogenerace s výkonem do stovek MW<sub>e</sub>
- Střední kogenerace s výkonem do 1 MW<sub>e</sub>
- Mikrokogenerace s výkonem do 50 kW<sub>e</sub> [11]

Obvyklý rozsah elektrických výkonů je uveden v příloze 2.

#### Velká kogenerace

Známé pod názvem teplárenství (centralizované zásobování teplem CZT), kde součet tepelných výkonů zdrojů dosahuje jednotek až stovek MW a dle použitého typu tepelného stroje i odpovídající elektrický výkon. Zde se nejčastěji používají protitlaké parní turbíny, parní kondenzační odběrové turbíny, plynové turbíny a paroplynové cykly. Jedná se většinou o velké centrální soustavy zásobování tepelnou energií.

#### Střední kogenerace

Tepelný stroj dosahující elektrického výkonu v řádu desítek až stovek kW, nejvýše však do 1 MW, a tomu odpovídající tepelný výkon. Obvykle nejsou kogenerační jednotky napojeny na žádnou rozsáhlou teplárenskou soustavu a řeší v dané lokalitě požadavky konkrétních odběratelů. Jako tepelný stroj se nejčastěji využívají spalovací motory, zejména kvůli jejich kompaktnosti a jednoduché obsluze.

#### Mikrokogenerace

Zde je použit tepelný stroj o elektrickém výkonu od 1kW do 10 kW, využívané pro individuální použití jako je objekt velikosti rodinného domu, nejvýše však do 50 kW. Z tech-

nických důvodů je mikrokogenerace vázána na spalovací motory s vnitřním spalováním a na použití plynného paliva. [11]

## **Paliva**

V KVET lze využít téměř všechna dostupná paliva a energetické zdroje:

- Fosilní paliva (tuhá, kapalná i plynná)
- Jadernou energii (dodávky tepla z jaderných elektráren)
- Biomasu
- Komunální a jiné odpady
- Geotermální energii [12]

V důsledku toho se kogenerační zařízení mohou používat v široké škále situací.

## **3.2. Popis technologií**

Každá kogenerační jednotka se skládá ze čtyř základních částí:

- motoru (pohonné jednotky),
- elektrického alternátoru vč. zařízení pro připojení na veřejnou a spotřebitelskou síť,
- kotle nebo výměníků tepla vč. propojení na tepelné rozvodné sítě,
- řídicího a kontrolního systému [13]

Česká legislativa definuje základní technologie KVET. Dle vyhlášky č. 37/2016 Sb., která vychází ze směrnice Evropského parlamentu a rady EU/2012/27, se jedná o tyto typy technologií:

- spalovací motor,
- parní protitlaká turbína,
- parní kondenzační odběrová turbína,
- plynová turbína s dodávkou tepla,
- paroplynové zařízení s dodávkou tepla,
- mikroturbína,
- Stirlingův motor,
- palivový článek,
- parní stroj,
- organický Rankinův cyklus (ORC moduly). [4]

## Spalovací motor

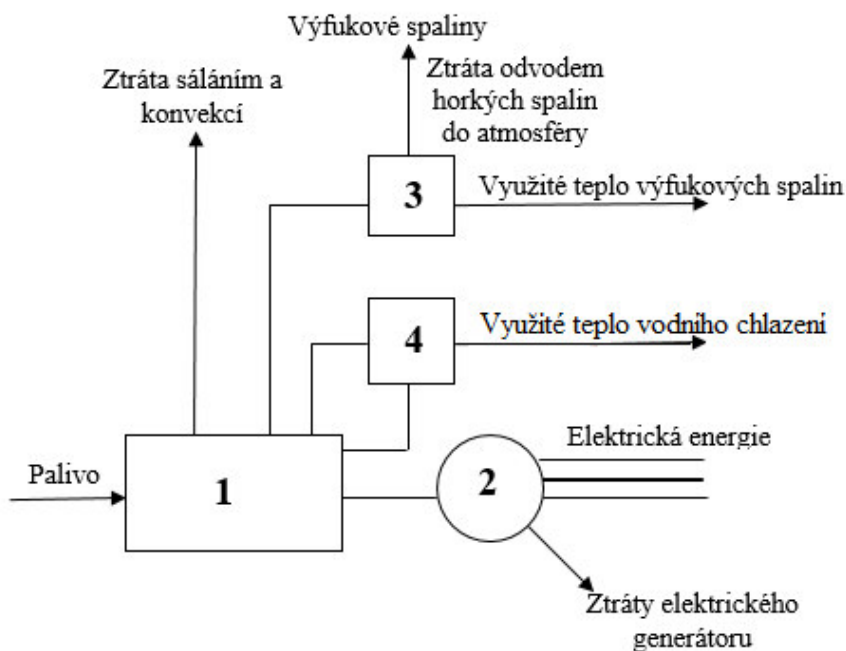
Spalovací motory, využívané v KVET, jsou pístové motory s vnitřním spalováním. Jsou odvozené od klasických mobilních spalovacích motorů. Rozdělují se do 2 skupin:

- vznětové motory,
- zážehové motory.

Vznětové motory (známé jako dieselovy nebo naftové) se vyznačují tím, že u nich dochází k zapálení paliva ve válci samovznícením při vstřiku do horkého stlačeného vzduchu. U zážehových motorů dochází k zapalování směsi paliv a vzduchu elektrickou jiskrou.

Mají-li být spalovací motory využity pro kogeneraci, je nutné je přeměnit pro spalování zemního plynu. Tuto změnu lze provést u obou druhů motorů. Jedná se především o změny palivového systému a spalovacího prostoru. Princip spalovacích motorů spočívá v tom, že nasátý vzduch je stlačen, po vstřiku a zažehnutí (vznícení) paliva se ohřeje, tím se značně zvýší jeho objem a při následné expanzi je tato tlaková energie přeměněna na mechanickou práci. Motor pohání elektrický generátor, který produkuje elektrickou energii, a současně produkuje odpadní teplo. Jedná se o teplo chlazení motoru, chlazení mazacího oleje a o teplo výfukových plynů. Princip toků energií u kogenerace se spalovacím motorem je zobrazen na obr. 3. [13]

Obr. 3 Schéma toků energií u kogenerační jednotky se spalovacím motorem [13]



1 spalovací motor; 2 elektrický generátor; 3 výměník tepla spaliny/topná voda;  
4 výměník tepla chladicí voda/topná voda

Tyto kogenerační jednotky jsou vyráběny v širokém výkonovém rozsahu od desítek kW až po několik MW. Nejvýhodnějším využitím odpadního tepla je ohřev topné vody prostřednictvím výměníků. Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek se spalovacími motory je uveden v *tabulce 1*. Spalovací motory nacházejí využití ve středních, případně i malých zdrojích. Jedná se o zdroje pro rozsáhlejší komplexy objektů občanské vybavenosti (plavecké a sportovní haly, nemocnice...), nebo sídlištní či areálové kotelny. Časté aplikace jsou i v čistírnách odpadních vod nebo u skládek komunálního odpadu. [10]

*Tabulka 1 Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek se spalovacími motory [10]*

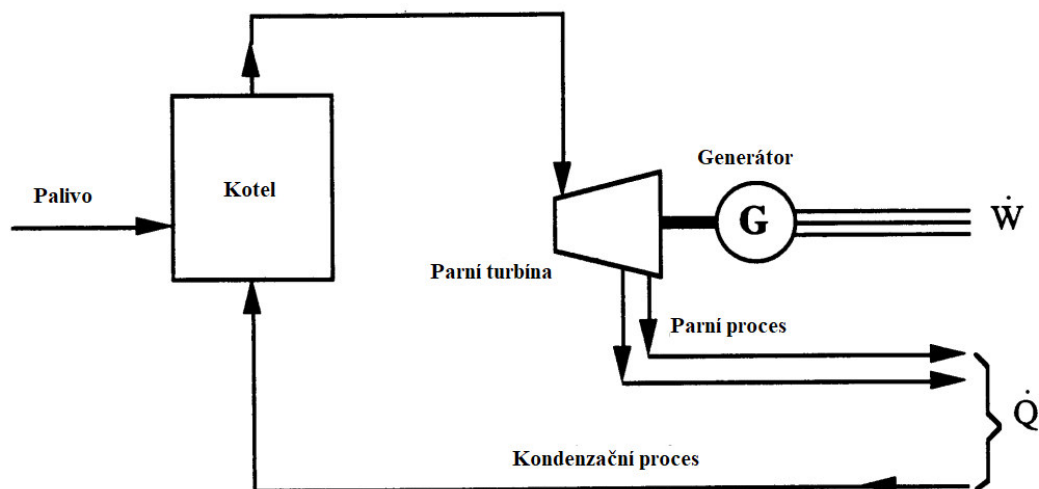
	Jedn.	<b>Pístové spalovací motory a výměníky tepla</b>		
Elektrický výkon jednotky	kW <sub>e</sub>	<b>10 ÷ 100</b>	<b>100 ÷ 1000</b>	<b>1000 ÷ 5000</b>
Tepelný výkon jednotky	kW <sub>t</sub>	20 ÷ 170	170 ÷ 1500	1400 ÷ 5500
Účinnost výroby el. energie	%	27 ÷ 32	33 ÷ 36	37 ÷ 41
Účinnost výroby tepla	%	48 ÷ 57	46 ÷ 54	45 ÷ 52
Celková účinnost jednotky	%	80 ÷ 84	82 ÷ 87	86 ÷ 89

### **Parní protitlaková turbína (PPT)**

Parní turbína je točivý stroj přeměňující část vstupní energie (páry) na energii mechanickou. Vysokotlaková pára procházející turbínou expanduje a produkuje mechanickou energii, která se používá k pohonu elektrického alternátoru. Vstupující pára musí mít vysoké parametry, tj. tlak i teplotu. Pára na výstupu z turbíny je využitelná pro dodávky tepla, a to buď ve formě horké vody ohřívané ve výměníku pára/voda, nebo přímo ve formě páry. Schéma zapojení je zobrazeno na *obr. 4*. [13]

PPT se vyrábějí v širokém výkonovém rozsahu od 10 kW až po cca 100 MW. Zdrojem páry nejčastěji bývá kotel na spalování fosilních paliv (uhlí, olejů, zemního plynu), nebo biomasy, může jím být i parogenerátor topený spalinami (např. na výfuku plynové turbíny), nebo jiný externí zdroj páry. [10] V případě PPT využíváme veškerou výrobu elektrické energie a veškeré teplo vystupující z turbosoustrojí. Účinnosti výroby elektřiny, výroby tepla a celkové účinnosti zdrojů jsou určovány zejména účinnostmi kotlů (výroby páry), účinnostmi turbíny, tepelnými a mechanickými ztrátami ve strojovnách. Přehled rozsahů účinností zdrojů KVET s PPT je uveden v *příloze 3*. [10]

Obr. 4 Základní schéma zapojení parní protitlakové turbíny [3]



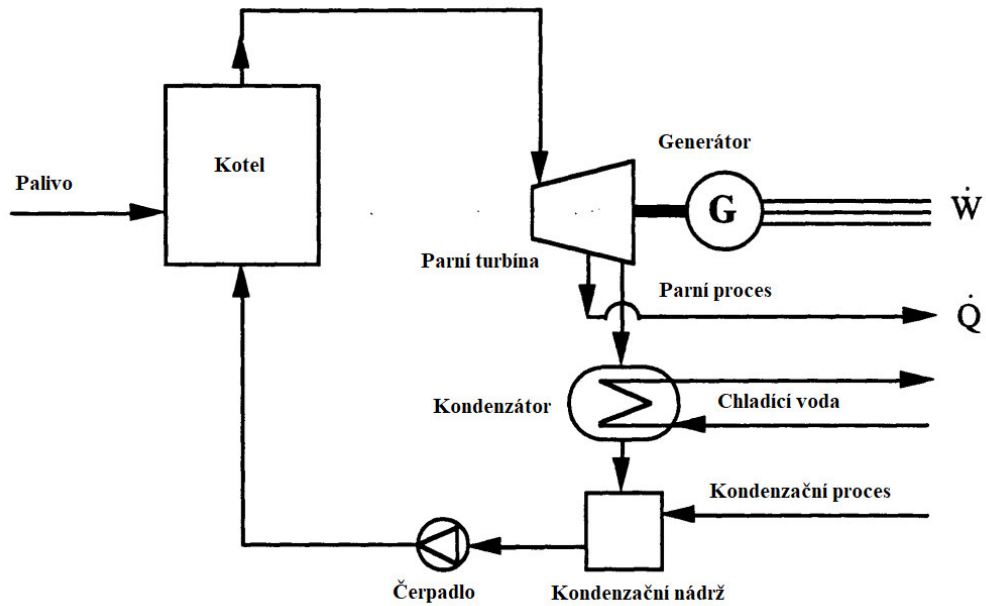
### Parní kondenzační odběrová turbína (POT)

Princip funkce POT je shodný s PPT. Veškeré množství páry vstupující do turbíny prochází jejími prvními stupni, kde postupně expanduje, čímž se přeměňuje část její energie na mechanickou práci. V místě, kde má pára ještě dostatečné teplotní a tlakové parametry využitelné pro teplotenské účely, se část jejího množství odebere (odtud název odběrová turbína), zbylá část zůstává v turbíně a pokračuje v expanzi (tedy ve výrobě další elektřiny). Základní rozdíl mezi PPT a POT tedy spočívá v tom, že POT obsahuje ještě tzv. kondenzační část. Schéma zapojení je na *obr. 5*.

Na rozdíl od PPT se POT nevyrábějí v tak širokém rozsahu. Jsou to stroje od několika MW až po několik 100 MW. Zdroj páry je zde shodný jako u PPT. Využívá se zde veškerá výroba elektrické energie a pouze větší či menší část tepla odebraná z turbosoustrojí. Celkové účinnosti zdroje závisí na množství odebíraného (využívaného) tepla. Oscilují tak mezi účinností při čistě kondenzačním provozu a účinností při maximálním odběru tepla. Přehled rozsahu dosahovaných účinností je uveden v *příloze 4*. Využívají se převážně ve velkých teplárnách zásobující systémy CZT. [10]



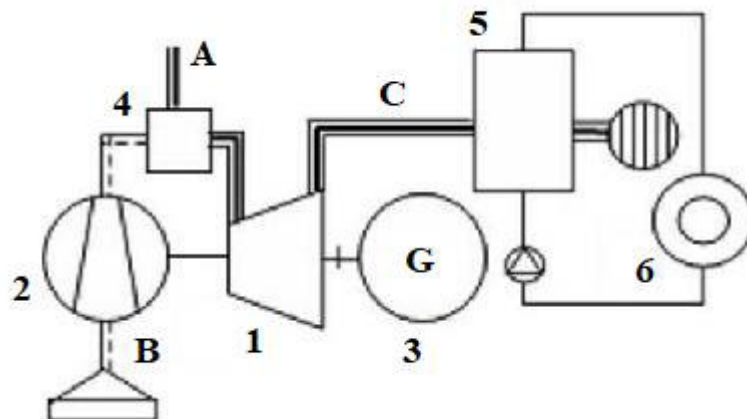
Obr. 5 Základní schéma zapojení parní kondenzační odběrové turbíny [3]



### Plynová turbína s rekuperací tepla

Plynová (spalovací) turbína je točivý stroj složený z kompresoru, spalovací komory, plynové turbíny, elektrického generátoru a pomocných zařízení (schéma zapojení na obr. 6). Kompresor nasává venkovní vzduch a stlačuje jej na požadovaný tlak. Stlačený vzduch pokračuje do spalovací komory, kde se v jeho proudu při stálém tlaku spaluje palivo. Tím vznikají spaliny o vysoké teplotě a tlaku, které pak v plynové turbíně expandují, čímž se energetický potenciál stlačeného vzduchu mění v mechanickou práci. [13]

Obr. 6 Schéma kogeneračního zapojení spalovací turbíny [13]



1 turbína, 2 kompresor, 3 el. generátor, 4 spalovací komora; 5 kotel na odpadní teplo; 6 spotřebič tepla  
A přívod paliva, B přívod vzduchu, C odvod spalin

Spaliny vystupující z turbíny mají zpravidla ještě dostatečnou teplotu využitelnou pro teplotní účely. Dají se využít přímo (např. pro technologické účely), nebo je lze zavést do kotle, ve kterém je vyráběna pára, nebo ohřívána topná voda, což je tzv. rekuperace tepla. Největší plynové turbíny byly konstrukčně odvozovány od parních turbín, výkonově menší plynové turbíny původně vycházely z konstrukcí leteckých proudových motorů. Nejčastěji používaným palivem je zemní plyn, vhodným palivem je též lehký topný olej.

Plynové turbíny se vyrábějí v širokém výkonovém rozsahu od stovek kW až po 300 MW. Elektrický výkon závisí na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu. Využitelný tepelný výkon, kromě teploty a množství výstupních spalin turbíny, závisí na tom, v jaké formě je požadováno užité teplo, zda ve formě páry, horké vody, nebo teplé vody. Celkové účinnosti výroby elektrické energie a tepla jsou limitovány technologickými prvky turbíny a konstrukčním uspořádáním. Rozsah dosahovaných účinností je uveden v *příloze 5*. [10]

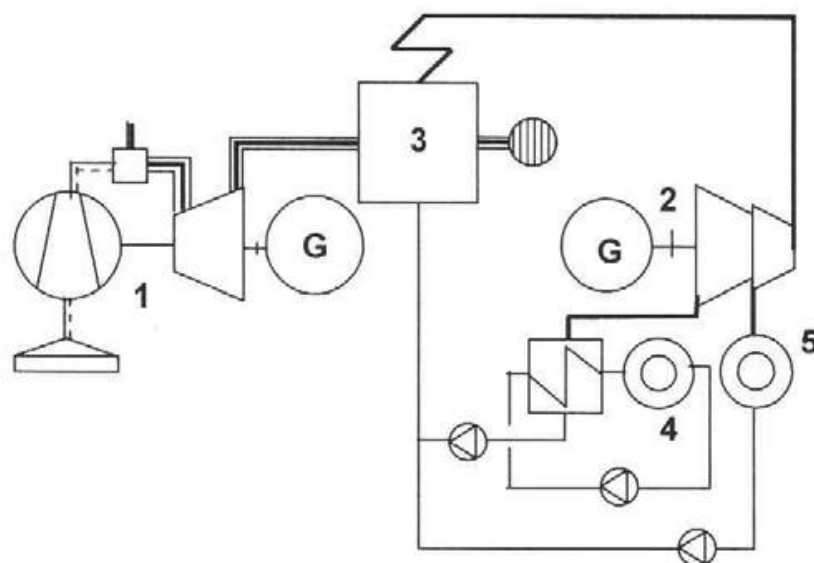
### **Paroplynové cykly**

Paroplynový cyklus je propojení parního cyklu a plynového cyklu, což z něho dělá poměrně složité zařízení. Tj. spojení spalovací turbíny a pracovního okruhu parní turbíny, čímž vzniká paroplynové zařízení, a tím dochází k sloučení výhod obou dílčích prvků. [13]

Jedná se o uspořádání tří technologických celků. První je plynová turbína, která pohání elektrický generátor (výroba elektřiny) a vypouští spaliny do kotle. Ve spalínovém kotli je vyráběna vysokotlaká pára, která je vedena do protitlakové, nebo odběrové parní turbíny. Parní turbína pohání další elektrický generátor (výroba elektřiny), pára z odběru nebo protitlaku parní turbíny je využívána pro dodávky užitého tepla. Schéma zapojení je znázorněno na *obr. 7*. [10]

Paroplynové cykly se vyrábí jako výkonově větší jednotky, řádově desítky až stovky MW. Vhodná paliva se odvíjejí od způsobu konstrukce. Elektrický výkon plynové turbíny závisí na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu, u parní turbíny se elektrický výkon odvíjí od množství a parametrů odebíraného tepla. Rozsah dosahovaných účinností je uveden v *příloze 6*. Nejčastějšími místy nasazení jsou velké průmyslové závody s nepřetržitou potřebou elektřiny a páry. [10]

Obr. 7 Schéma zapojení paroplynového kogeneračního zdroje se spalovací turbínou [13]



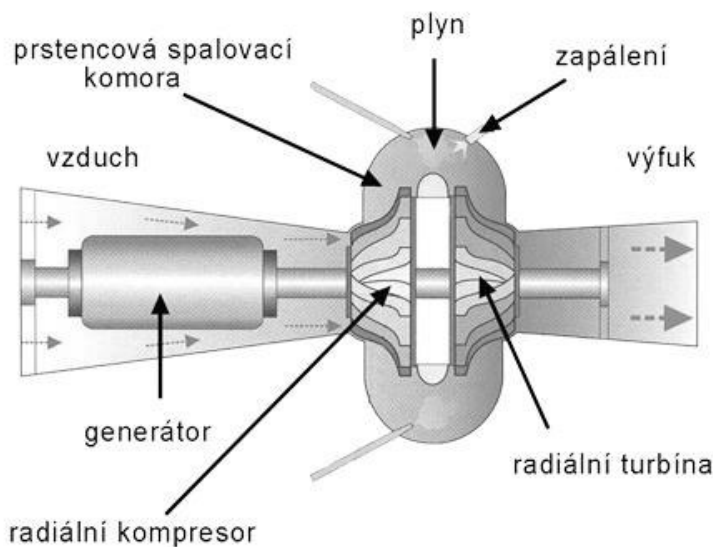
1 spalovací turbína; 2 parní turbína; 3 spalínový kotel; 4 spotřebitel tepla ve formě horké vody;  
5 spotřebitel tepla ve formě páry

## Mikroturbína

Mikroturbíny jsou vysokootáčkové stroje obsahující kompresor, turbínu, spalovací komoru, generátor a regenerační výměník. Mají pouze jednu rotační část a užívají vzduchem chlazená ložiska. Používají se vysokorychlostní generátory, které vydrží vysoké otáčky a tím není nutné používat převodovku, což znamená, že nepotřebují mazací olej. Využívá se především zemní plyn jako palivo, mohou však pracovat i s naftou, benzinem, nebo jinými vysoce výhřevnými čistými palivy. [13] [14]

Mikroturbíny se pro účely KVET zapojují obdobným způsobem jako malé spalovací turbíny (obr. 8). Užité teplo je vhodné ve formě teplé nebo horké vody. Jsou to jednotky o rozsahu 10 až 250 kW. Lze je použít jako decentralizované zdroje elektřiny pro výrobce i spotřebitele, ale také jako nouzové zdroje elektřiny. [13] Elektrická účinnost bývá v rozsahu 25-30 %, celková účinnost dosahuje hodnot 70-80 %, využitelný tepelný výkon bývá dvojnásobný, než je dosahovaný elektrický výkon. [10]

Obr. 8 Princip mikroturbíny [14]



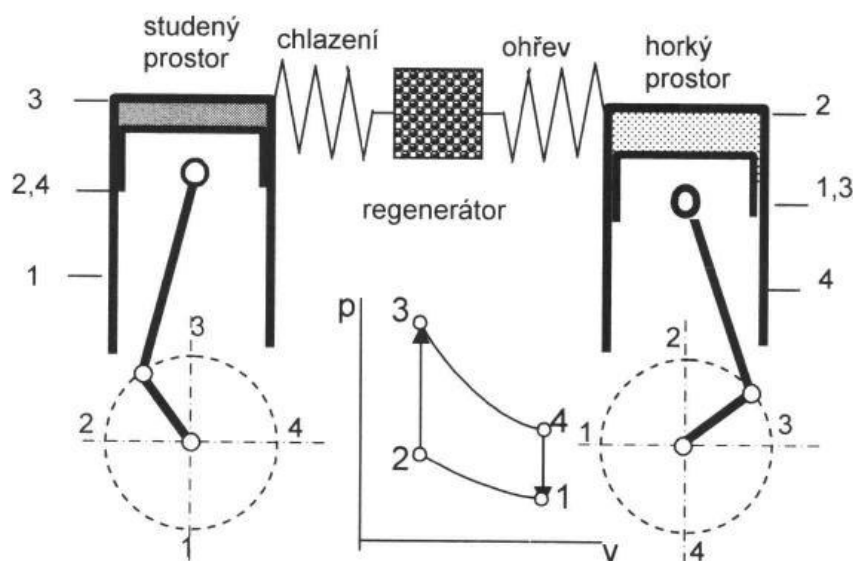
### Stirlingův motor

Stirlingovy motory (známé také jako teplovzdušné motory) jsou pístové motory s vnějším spalováním. Odlišují se od ostatních pístových strojů tím, že mají dva trvale vzájemně propojené zdvihové prostory s rozdílnou teplotou. To znamená, že motor má dvě komory, horkou a studenou. Tyto motory pracují s uzavřeným oběhem pracovní látky, tedy pracovní látka se během práce motoru nevyměňuje, pouze se přemísťuje z jednoho válce do druhého. Obvykle se jedná o inertní plyn (nejčastěji helium), který je střídavě ohříván a ochlazován. [10] [13]

Princip práce Stirlingova motoru je zobrazen na obr. 9. Hřídele v obou válcích se otáčejí synchronně, avšak kliky jsou pootočené o 90°, jednotlivé polohy klik a pístů jsou označeny čísly 1, 2, 3 a 4. Oběh Stirlingova motoru je posloupnost těchto ideálních dějů: izotermická komprese, izochorická komprese, izotermická expanze a izochorická expanze, což je zobrazeno v příloze 7. Regenerátor, který je součástí tohoto stroje, má schopnost teplo postupně přijímat a opět odevzdávat. [13]

Stirlingovy motory jsou výkonově menší jednotky, které mají uplatnění v malých a středních zdrojích KVET. Uplatnění těchto motorů lze do budoucna očekávat jako alternativu k v současnosti používaným pístovým motorům a to zejména tam, kde budou vyšší nároky na nehluknost nebo tam, kde bude k dispozici levný zdroj vysokopotenciální tepelné energie (např. ze spalování biomasy, plynů nevhodných pro vnitřní spalování, atd.) [10]

Obr. 9 Princip práce Stirlingova motoru [13]



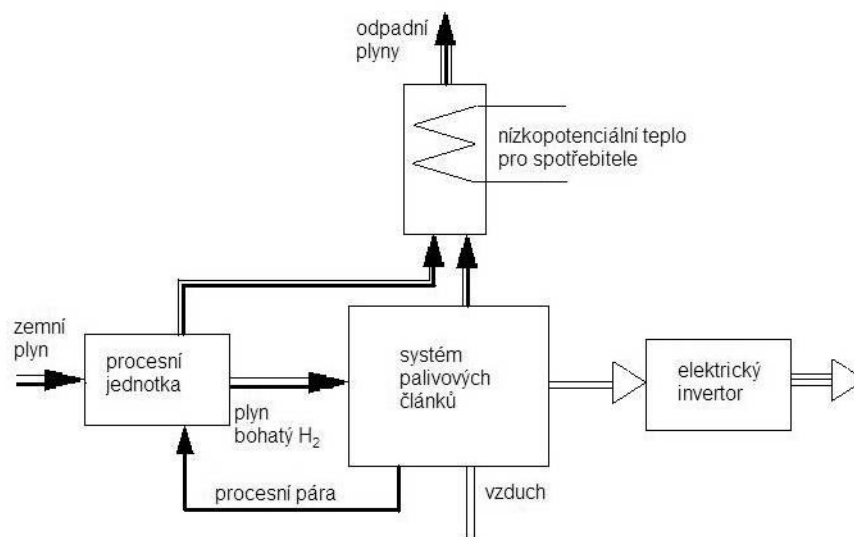
## Palivové články

Palivové články jsou založeny na chemické reakci plynu s kyslíkem (z okolního vzduchu). Elektrickou energii vyrábí přímou přeměnou chemické energie paliva. Tato přímá přeměna energie není limitována stejnými termodynamickými principy jako ve spalovacích motorech. Jsou tvořeny elektrodami (anoda a katoda) a elektrolytem (kyselina fosforečná, alkalické uhličitany a další). Pracují spolehlivě, tiše, s vysokou účinností a jejich provoz má minimální negativní vliv na životní prostředí. [14]

Nejvhodnějším palivem by mohl být nejlépe vodík, ale jelikož nebyly dosud vyřešeny problémy s jeho získáváním a skladováním, používá se místo něho zemní plyn. Zemní plyn musí být před použitím rozložen na vodík a oxidy uhlíku v konvertoru. Dále musí být systém doplněn o elektrický invertor pro přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý. Schéma je zobrazeno na obr. 10. [13]

Jejich rozsah elektrických výkonů je od 5 kW do 2 MW. Používají se zejména u mikrokogenerace. Jednotky s palivovými články současně nahrazují drahé nouzové elektrické agregáty.

Obr. 10 Schéma palivových článků pro KVET [13]



## Parní stroj

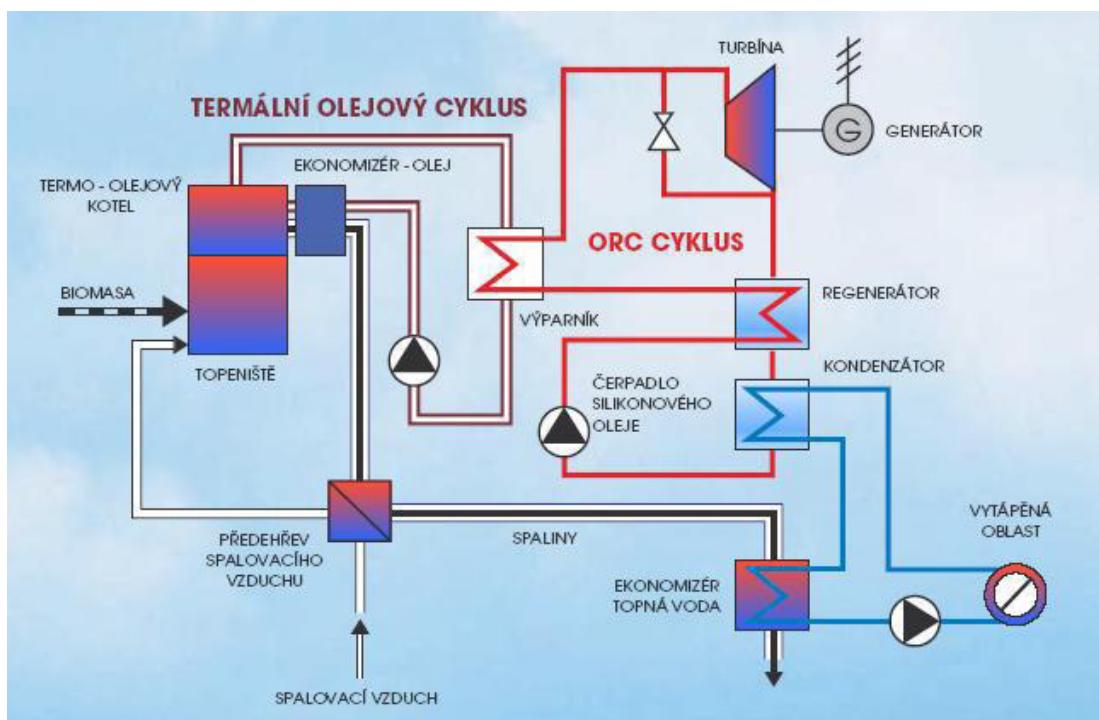
Patří k nejstarším strojům přeměňující tepelnou energii na energii mechanickou. V současné době jsou tato zařízení nahrazována, ale stále najdou svá uplatnění. Například v případech, kdy jeden zdroj vyrábí páru pro dvě tlakově a teplotně rozdílné úrovně užití, tj. část vyráběné „průmyslové“ páry, je redukována na páru „topnou“. Pro provoz postačuje sytá pára. Parní stroj se skládá z bloku motoru, válců, pístů a šoupátkového rozvodu. Moderní parní stroje jsou řešeny tak, že mají bezobslužný provoz. [13] [10]

## ORC moduly

Organický Rankinův cyklus (ORC) využívá jako pracovní látku organické látky namísto vody, respektive vodní páry. Mezi organické látky patří silikonový olej, alkany, freony, propan, toluen nebo čpavek. Tyto látky jsou charakteristické vyšší molární hmotností, molekulovou stavbou a poskytují vyšší účinnost cyklu. Tento zdroj KVET je výhodný pro výrobu elektrické energie v menších a středních zdrojích spalující biomasu. ORC moduly se využívají v bioplynových stanicích, kde je špatný odběr tepla. [10]

Pracovní cyklus je založen na principu Rankin Clausiova oběhu, tj. obdobném jako klasické parní oběhy s vodní párou. Pracovní látka je zahřata na určitou teplotu, dále putuje do výparníku, kde se odpaří a ve formě plynu je vedena do turbíny. Zde dochází k expanzi při nižším tlaku než voda, což snižuje teplotu v celém oběhu. Dále je plyn odváděn do regeneračního výměníku a kondenzátoru, kde je ochlazen a zkapalněn, a tím je uzavřen pracovní cyklus. Technologické schéma je zobrazeno na obr. 11. [13] [15]

Obr. 11 Schéma ORC cyklu [10]



## 4. Ekonomika provozu kombinované výroby elektřiny a tepla

V následující části práce bude popsáno, jakými nástroji lze analyzovat budoucí investice a jakým způsobem stát podporuje KVET. Dále bude určena spotřeba energie pro určitý objekt, která bude rozhodující pro návrh a ekonomické zhodnocení kogenerační jednotky (KJ). V této kapitole se určí nejlepší varianta KJ pro objekt a zjistí se, v jakých režimech může tato KJ fungovat.

### 4.1. Analýza investice

Pro hodnocení a výběr investic existují různé metody. Mezi nejčastěji využívané nástroje patří čistá současná hodnota, vnitřní výnosové procento a doba návratnosti. Princip výpočtů je založen na metodice diskontovaných peněžních toků (cash flow). Tyto metody jsou velmi užitečné při porovnání investic mezi sebou a následném výběru nejvhodnější z nich. Tato práce není zaměřena na porovnávání investic mezi sebou, ale na zhodnocení konkrétní investice, zda je výhodné ji realizovat.

## Čistá současná hodnota NPV (Net Present Value)

Ukazatel, který porovnává příjmy a výdaje z investice (cashflow), ale pouze v jejich současných hodnotách, což znamená, že je diskontuje diskontní mírou. Říká nám, kolik peněz nám přinese daná investice za zvolenou dobu životnosti.

Investice se nám vyplatí tehdy, je-li  $NPV \geq 0$ . Čím vyšší hodnota NPV, tím lepší. Pokud je  $NPV \leq 0$ , znamená to, že není výhodné investici realizovat.

$$NPV = -IN + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+d)^t} \quad [\text{Kč}] \quad (4.1)$$

Kde: IN - počáteční investiční výdaj,

CF<sub>t</sub> - cash flow v roce t,

n - počet let,

d - diskont, úroková míra

## Vnitřní výnosové procento IRR ( Internal Rate of Return)

Tento ukazatel počítá relativní procentní výnos, který investice přináší během svého provozu. Jinak řečeno počítá míru návratnosti investice. Je to taková diskontní sazba, při které je NPV=0.

Investice se nám vyplatí, je-li  $IRR \geq WACC$  (vážené náklady na kapitál), v našem případě d (diskont). Čím vyšší IRR, tím lepší je relativní výhodnost.

$$-IN + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad [\text{Kč}] \quad (4.2)$$

## Doba návratnosti PP (Payback Period)

Je to takové období (počet let), za které cash flow přinese hodnotu, která se rovná počátečním výdajům na investici. Výhodná investice je taková, která uhradí své výdaje, co nejdříve (nejdéle však do konce doby životnosti). [16]

$$PP = \frac{IN}{CF} \quad (4.3)$$



## 4.2. Zelený bonus

Na základně zelených bonusů je podporována kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Výši zelených bonusů vydává každoročně Energetický regulační úřad (ERÚ) v cenových rozhodnutích. Podpora se skládá ze dvou sazeb, základní a doplňkové. Doplňková sazba platí pouze pro určité výroby.

Celková výše se vypočte dle vzorce 4.4 (sazby pro rok 2018 jsou uvedeny v příloze 8). Chce-li výrobce elektřiny přiznat tento bonus, musí se zaregistrovat u operátora trhu.

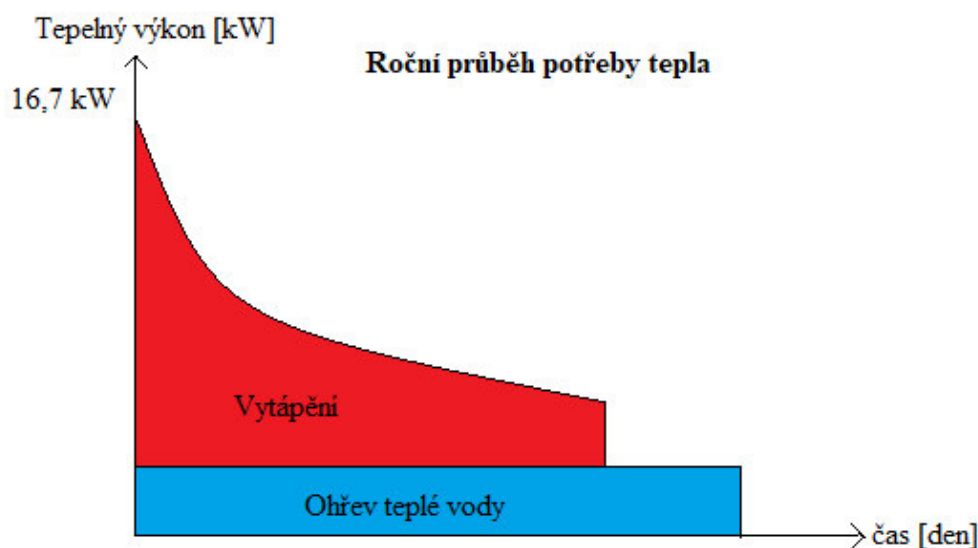
$$C_{zb} = E_{kvet} * (ZB_{zakl.sazba} + ZB_{dopl.I}) \quad [\text{Kč}] \quad (4.4)$$

Kde: $C_{zb}$	celková výše podpory na elektřinu z KVET
$E_{kvet}$	množství elektřiny z KVET
$ZB_{zakl.sazba}$	základní sazba zeleného bonusu
$ZB_{dopl.I}$	doplňková sazba I k základní sazbě zeleného bonusu [17]

## 4.3. Stanovení spotřeby energie a tepla

Pro praktický propočet jsem si vybrala rodinný dům o velikosti 205 m<sup>2</sup> nacházející se v obci Vráž u Berouna. Dům je dvoupatrový, postaven z cihel a tepelně izolovaný. V domě je instalován plynový kotel, který obstarává vytápění domácnosti a ohřev teplé užitkové vody (TUV). Elektrickou energii dodává do obce společnost ČEZ a.s. Tepelná ztráta objektu je 16,7 kW. Na obr. 12 je zobrazen průběh potřeby tepla.

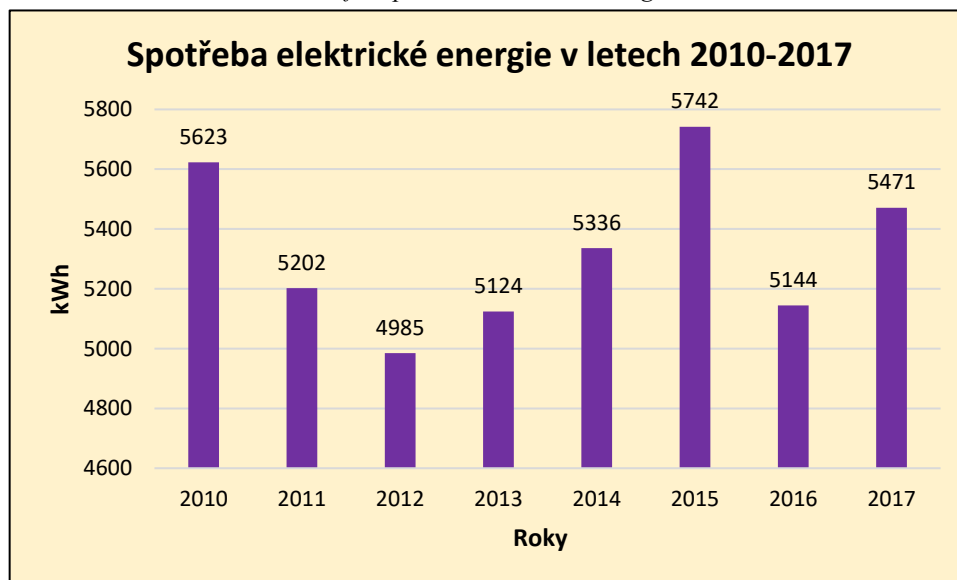
Obr. 12 Roční průběh potřeby tepla



## Spotřeba energie

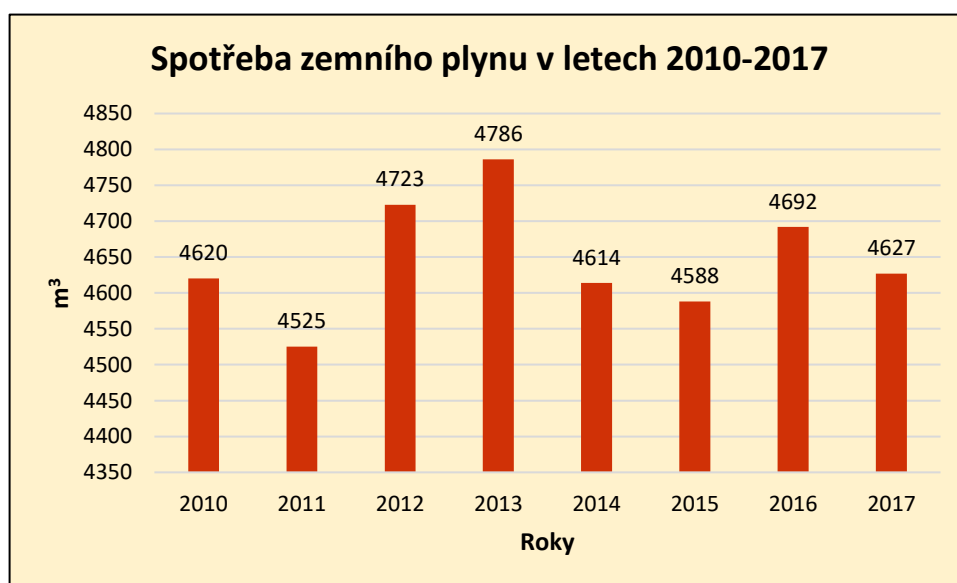
Spotřeba elektrické energie je určena dle vyúčtování za posledních 7 let. Z grafu 1 je zřejmé, že spotřeba se pohybuje v rozmezí 4,9 MWh až 5,7 MWh za rok. Pro další výpočty bude použita hodnota **5,7 MWh/rok**.

Graf 1 Spotřeba elektrické energie



Spotřeba tepelné energie je odvozena ze spotřeby zemního plynu v kotli. Hodnoty jsou z let 2010-2017, které byly odečteny z plynoměru. Spotřeba zemního plynu je uvedena v grafu 2, pro výpočet je použita nejvyšší hodnota 4 786 m<sup>3</sup>.

Graf 2 Spotřeba zemního plynu



Spotřeba na kWh =  $4786 * 10,55 = 50492 \text{ kWh} \rightarrow 50,49 \text{ MWh}$

Výhřevnost =  $50,49 / 1,11 = 45,48 \text{ MWh}$

Potřeba tepelné energie = Výhřevnost \* účinnost kotle =  $45,48 * 0,84 = 38,2 \text{ MWh}$

Spotřeba tepelné energie pro zvolený rodinný dům je **38,2 MWh za rok**.

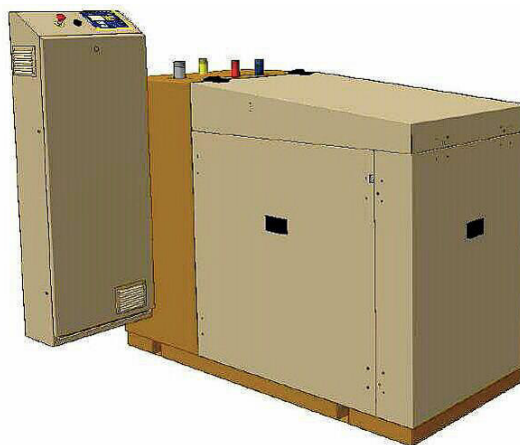
#### 4.4. Výběr kogenerační jednotky

KJ nahradí stávající plynový kotel a bude sloužit pro vytápění a ohřev TUV. Pro výběr je důležité, aby KJ pokryla celoroční nároky na tepelnou energii. Vyrobena elektrická energie bude využita pro pokrytí vlastní spotřeby a přebytek bude prodáván do sítě. Z toho důvodu byla vybrána KJ od společnosti TEDOM typu Micro T7 (viz obr. 13), což je nejmenší jednotka této společnosti, čímž se řadí do oblasti mikrokogenerace.

Micro T7 je jednotka se spalovacím motorem, který spaluje zemní plyn. Výrobu elektrické energie zajišťuje elektrický generátor. V tabulce 2 jsou uvedeny technické parametry. Nevýhodou této jednotky je cena, která se pohybuje kolem 500 000 Kč. TEDOM uvádí životnost jednotky na 15 let. [18]

K instalaci KJ do rodinného domu je zapotřebí mít spoustu povolení a dokumentace, stát se podnikatelem a vést administrativu - výkaznictví. Tyto dokumenty jsou potřebné  $\rightarrow$  žádost o připojení KJ do sítě, stavební povolení, licence pro výrobu elektřiny, osvědčení o původu elektřiny a tepla, registrace u operátora trhu s elektřinou, smlouva o výkup elektřiny, smlouva na úhradu příspěvku. [19]

Obr. 13 Tedom Micro T7



Tabulka 2 Technické parametry KJ Micro T7 [20]

Technické údaje		
Elektrický výkon	6,5	kW
Max. tepelný výkon	18,4	kW
Účinnost elektrická	27	%
Účinnost tepelná	66,3	%
Účinnost celková	93,3	%
Spotřeba plynu při 100% výkonu	2,85	m <sup>3</sup> /h
Spotřeba plynu při 75% výkonu	2,3	m <sup>3</sup> /h
Spotřeba plynu při 50% výkonu	1,6	m <sup>3</sup> /h

#### 4.5. Výpočet ekonomiky provozu KJ

KJ může pracovat ve 3 režimech (100%, 75%, 50% výkonu). V následujícím výpočtu bude zjištěno, kolik vyrobí elektrické a tepelné energie za určitý počet provozních hodin při těchto 3 režimech výkonu a jaká bude spotřeba zemního plynu.

Pro následující výpočty musí být určen počet provozních hodin za rok. Počet provozních hodin na den je 15 h.

Počet provozních hodin (PPH) za rok = PPH za den \* počet provozních dní v roce

PPH za rok = 15 \* 350 = 5 250 h

##### a) při 100% zatížení

###### Tepelná energie

Max. tepelný výkon KJ je 18,4 kW.

Výroba tepelné energie = max. tepelný výkon \* PPH za rok

Výroba tepelné energie = 18,4 \* 5 250 = 96 600 kWh → **96 MWh/rok**

###### Elektrická energie

Max. elektrický výkon KJ je 6,5 kW.

Výroba elektrické energie = max. elektrický výkon \* PPH za rok

Výroba elektrické energie = 6,5 \* 5 250 = 34 125 kWh → **34 MWh/rok**

#### Spotřeba zemního plynu (ZP)

Spotřeba ZP: 2,85 m<sup>3</sup>/h

Spotřeba ZP na rok: PPH za rok \* spotřeba ZP

Spotřeba ZP na rok: 5 250 \* 2,85 = **14 963 m<sup>3</sup>**

#### **b) při 75% zatížení**

##### Tepelná energie

Max. tepelný výkon KJ je 13,8 kW.

Výroba tepelné energie = max. tepelný výkon \* PPH za rok

Výroba tepelné energie = 13,8 \* 5 250 = 72 450 kWh → **72,4 MWh/rok**

##### Elektrická energie

Max. elektrický výkon KJ je 4,8 kW.

Výroba elektrické energie = max. elektrický výkon \* PPH za rok

Výroba elektrické energie = 4,8 \* 5 250 = 25 200 kWh → **25,2 MWh/rok**

#### Spotřeba zemního plynu (ZP)

Spotřeba ZP: 2,3 m<sup>3</sup>/h

Spotřeba ZP na rok: PPH za rok \* spotřeba ZP

Spotřeba ZP na rok: 5 250 \* 2,3 = **12 075 m<sup>3</sup>**

#### **c) při 50% zatížení**

##### Tepelná energie

Max. tepelný výkon KJ je 9,2 kW.

Výroba tepelné energie = max. tepelný výkon \* PPH za rok

Výroba tepelné energie = 9,2 \* 5 250 = 48 300 kWh → **48,3 MWh/rok**

##### Elektrická energie

Max. elektrický výkon KJ je 3,25 kW.

Výroba elektrické energie = max. elektrický výkon \* PPH za rok

Výroba elektrické energie = 3,25 \* 5 250 = 17 060,25 kWh → **17 MWh/rok**

#### Spotřeba zemního plynu (ZP)

Spotřeba ZP: 1,6 m<sup>3</sup>/h

Spotřeba ZP na rok: PPH za rok \* spotřeba ZP

Spotřeba ZP na rok: 5 250 \* 1,6 = **8 400 m<sup>3</sup>**

Tabulka 3 Porovnání vypočtených hodnot

Režim	100%	75%	50%
Spotřeba ZP	2,85 m <sup>3</sup> /h	2,3 m <sup>3</sup> /h	1,6 m <sup>3</sup> /h
Spotřeba zemního plynu na rok	14 963 m <sup>3</sup>	12 075 m <sup>3</sup>	8 400 m <sup>3</sup>
Jmenovitý el. výkon	6,5 kW	4,8 kW	3,25 kW
Max. tepelný výkon	18,4 kW	13,8 kW	9,2 kW
Vyrobena el. energie	34 125 kWh	25 200 kWh	17 060,25 kWh
Vyrobena tepelná energie	96 600 kWh	72 450 kWh	48 300 kWh

## 5. Ekonomické zhodnocení KJ

Tato část práce je zaměřena na ekonomické zhodnocení KJ pro konkrétní rodinný dům. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, jedná se o KJ typu Micro T7 od společnosti TEDOM pro rodinný dům o velikosti 205 m<sup>2</sup> v obci Vráž u Berouna.

Pro zvolený rodinný dům je potřeba, aby KJ vyrobila alespoň 5,7 MWh elektrické energie a 38,2 MWh (136,8 GJ) tepelné energie za rok. Nejlepší variantou režimu, ve kterém kogenerační jednotka bude pracovat, je 50% výkonu. Hodnoty při tomto výkonu jsou plně dostačující.

KJ při 50% zatížení vyrobí více tepelné energie, než-li je potřeba (viz *tabulka 3*). Z toho důvodu bude spočítána doba jejího provozu v závislosti na potřebě tepelné energie.

$$T_m = \frac{Q_r}{Q_{max}} = \frac{38200}{9,2} = 4\ 152\ h \quad (5.1)$$

Kde:  $T_m$  - doba využití maxima KJ [h]

$Q_r$  - celková roční potřeba energie na vytápění a ohřev TUV [kWh]

$Q_{max}$  - maximální tepelný výkon KJ [kW]

KJ jednotka bude pracovat necelých 277 dnů, namísto 350 dnů, které byly předběžně určeny pro analýzu provozu KJ.

### Výroba elektrické energie při 50% zatížení

Max. elektrický výkon KJ je 3,25 kW.

Výroba elektrické energie = max. elektrický výkon \* PPH za rok ( $T_m$ )

Výroba elektrické energie = 3,25 \* 4 152 = 13 494 kWh → **13,4 MWh/rok**

## 5.1. Náklady na KJ

Mezi náklady na KJ se řadí náklady na pořízení a roční náklady na provoz.

### Náklady na pořízení

Cena KJ:	485 000 Kč
Stavební úpravy:	16 000 Kč
Celkem:	<b>501 000 Kč</b>

### Náklady na provoz KJ

Do těchto nákladů patří náklady na zemní plyn (ZP) a provozní náklady. Dodavatelem ZP bude společnost Bohemia energy entity s.r.o., se kterou má rodina z rodinného domu zkušenost. Cena ZP je 10,08 Kč/m<sup>3</sup>.

#### Provozní náklady

Výrobce KJ udává, že měrné náklady na provoz a údržbu činí 0,45 – 0,65 Kč/kWh vyrobené elektrické energie. Pro výpočet je zvolena hodnota 0,5 Kč/kWh.

Provozní náklady = měrné náklady \* vyrobená el. energie

Provozní náklady = 0,5 \* 13 494 = **6 747 Kč/rok**

#### Náklady na ZP

Spotřeba ZP:	1,6 m <sup>3</sup> /h
Cena ZP:	10,08 Kč/m <sup>3</sup>
PPH za rok:	4 152 h

Roční náklady na ZP = PPH za rok \* spotřeba ZP \* cena ZP

Roční náklady na ZP = 4 152 \* 1,6 \* 10,08 = **66 963,45 Kč/rok**

## 5.2. Roční náklady na rodinný dům

V této části budou spočteny náklady na elektrickou a tepelnou energii bez použití KJ v rodinném domě. Tyto náklady budou představovat úsporu.

### Náklady na elektrickou energii

Dodavatelem elektřiny do domu je firma ČEZ a.s. Cena elektrické energie se skládá pouze z vysokého tarifu, protože tento rodinný dům nespadá do jiného tarifního pásma od firmy ČEZ.

Spotřeba elektrické energie: 5,7 MWh/rok  
Cena elektrické energie dle ceníku ČEZ: 3 862,5 Kč/MWh

Roční náklady na el. energii = spotřeba el. energie \* cena el. energie

Roční náklady na el. energii =  $5,7 * 3\,862,5 = 22\,016,25$  Kč/rok

### **Náklady na zemní plyn**

Dodavatelem ZP je společnost Bohemia energy entity s.r.o.

Roční spotřeba ZP: 4 786 m<sup>3</sup>/rok

Cena ZP: 10,08 Kč/m<sup>3</sup>

Náklady na ZP = roční potřeba ZP \* cena ZP

Náklady na ZP =  $4\,786 * 10,08 = 48\,242,9$  Kč/rok

### **5.3. Využití vyrobené elektrické energie**

Vyrobená elektrická energie se využije pro osobní spotřebu a přebytek bude prodán do sítě. Je počítáno s tím, že přebytek bude prodán celý. Lze uvažovat i nad variantou, že bude prodána všechna vyrobená elektrická energie a potřebná energie bude koupena od dodavatele.

Výkupní ceny pro KVET bývaly uváděny v cenovém rozhodnutí od ERÚ, ale již nejsou. Z toho plyne, že je potřeba se obrátit na konkrétní společnosti a zjistit jejich nabídky. V tomto případě byly posuzovány nabídky od společností Pražská plynárenská a Centropol Energy. Pražská plynárenská nabízí za výkup el. energie 250 Kč/MWh nebo 500 Kč/MWh. Druhá varianta ceny je podmíněna odebíráním elektřiny od Pražské plynárenské. Nabídka Centropol Energy je podstatně vyšší, a to 900 Kč/MWh. Byla vybrána vyšší nabídka, tedy od společnosti Centropol Energy.

KJ vyrobí celkem 13,4 MWh elektrické energie, z toho 5,7 MWh bude pro osobní spotřebu a zbytek tedy 7,7 MWh bude určen k prodeji.

#### **Varianta 1**

V této variantě bude prodána přebytečná energie.

Roční zisk =  $7,7 * 900 = 6\,930$  Kč

#### **Varianta 2**

Zde bude počítáno s tím, že se prodá veškerá vyrobená elektrická energie.

Roční zisk =  $13,4 * 900 = 12\,060$  Kč



Hodnota zisku druhé varianty vyšla vyšší než hodnota první varianty, ale v tomto případě se musí počítat s tím, že při variantě 2 bude muset být nakupována elektrická energie od dodavatele. Kvůli nízkým výkupním cenám a vysokým nákupním cenám elektrické energie je varianta 2 nevýhodná a nebude s ní dále počítáno.

#### 5.4. Využití zeleného bonusu

Na veškerou vyrobenou elektrickou energii lze čerpat zelený bonus, tedy finanční podporu od státu. Dle cenového rozhodnutí ERÚ činí zelený bonus 834 Kč/MWh. Jedná se o bonus ke zvolené KJ, která má instalovaný výkon do 200 kW a počet provozních hodin je do 4 400 h/rok.

$$\text{Zelený bonus} = 834 * 13,4 = \mathbf{11\ 176\ Kč}$$

#### 5.5. Zisk

V tabulce 4 je uveden přehled všech nákladů a výnosů, které byly určeny předchozími výpočty. Po odečtení nákladů od výnosů byl zjištěn zisk ve výši 14 654,7 Kč, který je vykazován každoročně s předpokladem, že se ceny jednotlivých položek nemění.

Tabulka 4 Přehled nákladů a výnosů

	[Kč]
Náklady na ZP	66 963,45
Provozní náklady	6 747
<b>Náklady celkem</b>	<b>73 710,45</b>
Úspora z nákupu elektrické energie	22 016,25
Úspora z nákupu ZP	48 242,9
Prodej elektrické energie	6 930
Zelený bonus	11 176
<b>Výnosy celkem</b>	<b>88 365,15</b>
<b>Zisk (výnosy – náklady)</b>	<b>14 654,7</b>

## 5.6. Ekonomické vyhodnocení

V této části bude zjištěno, zda je investice do KJ ekonomicky výhodná a jaká bude případně doba návratnosti. Informace potřebné k ekonomickému zhodnocení:

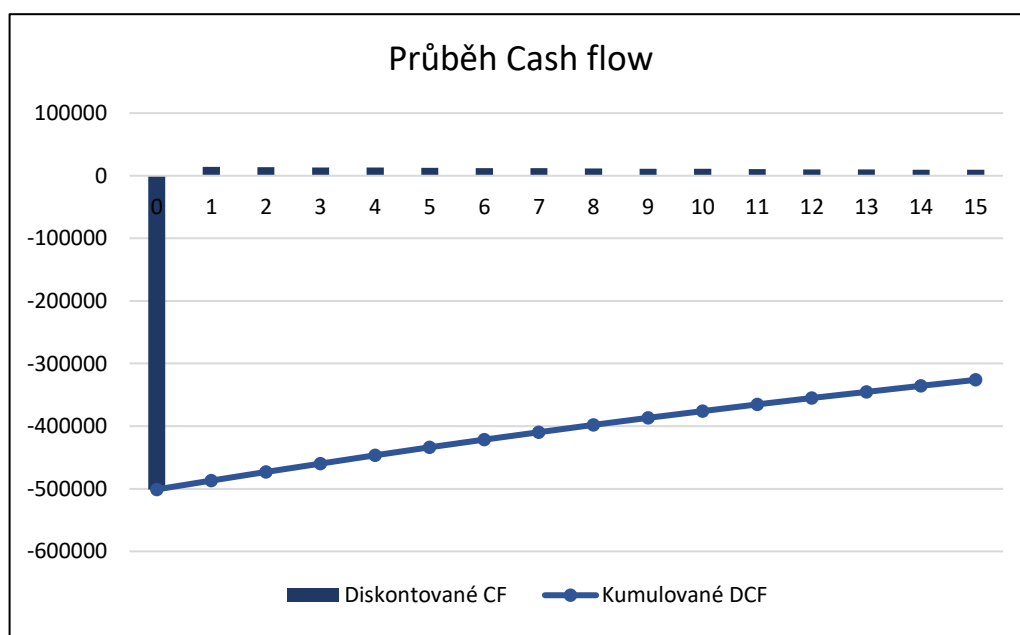
- Doba životnosti je 15 let
- Diskontní sazba 3 %
- Financování bude uskutečněno z vlastních zdrojů
- Počáteční investice: 501 000 Kč

Tabulka 5 Ekonomické zhodnocení

Parametr	Hodnota	Jednotky
Investice	501 000	Kč
Doba životnosti	15	Roky
Diskont	3	%
Doba návratnosti	34,1	Roky
NPV	-326 053	Kč
IRR	-11,5	%

Průběh cashflow je zaznamenám v grafu 3.

Graf 3 Průběh cash flow



Z výsledků je zřejmé, že investice pro rodinný dům je ekonomicky nevýhodná. Doba návratnosti investice (34 let) je mnohem vyšší než doba životnosti jednotky (15 let). Aby investice byla výhodná, musel by být ukazatel NPV vyšší než 0. V tomto případě je výsledné NPV -326 053 Kč, což není žádaný stav.

Největším problémem je vysoká pořizovací cena KJ. Dobrým startovacím můstkem by byla dotace, bohužel v této době neexistuje žádný dotační program, o který by mohla rodina požádat. Objekt spotřebuje málo elektrické energie a výkupní ceny jsou velmi nízké, tím je tedy prodej přebytečné elektrické energie finančně nevýhodný. Pro letošní rok vydal ERÚ nižší zelené bonusy, které také ovlivňují výsledek.

Lepší alternativou by mohlo být přepočítání provozních hodin dle potřeby elektrické energie. V této variantě by současně s KJ byl v provozu stávající plynový kotel, který by do-  
rovnával potřebu tepla. V následující kapitole bude zhodnoceno, zda by se tato varianta vyplatila.

## 5.7. Alternativa

KJ poběží současně s plynovým kotlem, který bude dodávat zbytek tepelné energie. Pro přepočet provozních hodin použijí vzorec 5.1, pouze zaměním tepelnou energii za elektrickou:

$$T_m = \frac{5700}{3,25} = \mathbf{1754 \text{ h}}$$

Výroba tepelná energie KJ =  $9,2 * 1754 = 16\ 136,8 \text{ kWh} \rightarrow \mathbf{16,1 \text{ MWh}}$

Kotel vyrobí tepelné energie =  $38,2 - 16,1 = \mathbf{22,1 \text{ MWh}}$

Spotřeba ZP KJ =  $1,6 * 1754 = \mathbf{2\ 806,4 \text{ m}^3}$

Spotřeba ZP kotel =  $\mathbf{2\ 768 \text{ m}^3}$

Náklady na ZP =  $(2806,4 + 2768) * 10,08 = \mathbf{56\ 190 \text{ Kč/rok}}$

Provozní náklady =  $5\ 700 * 0,5 = \mathbf{2\ 850 \text{ Kč/rok}}$

Úspory budou stejné jako v předchozí variantě.

Úspory z nákupu elektrické energie =  $\mathbf{22\ 016,25 \text{ Kč/rok}}$

Úspora z nákupu ZP =  $\mathbf{48\ 242,9 \text{ Kč/rok}}$

Zelený bonus je díky nižšímu počtu provozních hodin vyšší, a to  $1301 \text{ Kč/MWh}$ .

Zelený bonus =  $1301 * 5700 = \mathbf{7\ 415,7 \text{ Kč/rok}}$

Tabulka 6 Přehled nákladů a výnosů alternativy

	[Kč]
Náklady na ZP	56 190
Provozní náklady	2 850
<b>Náklady celkem</b>	<b>59 040</b>
Úspora z nákupu elektrické energie	22 016,25
Úspora z nákupu ZP	48 242,9
Zelený bonus	7 415,7
<b>Výnosy celkem</b>	<b>77 674,85</b>
<b>Zisk</b>	<b>18 634,85</b>

Informace k ekonomickému zhodnocení jsou stejné jako v předchozích výpočtech.

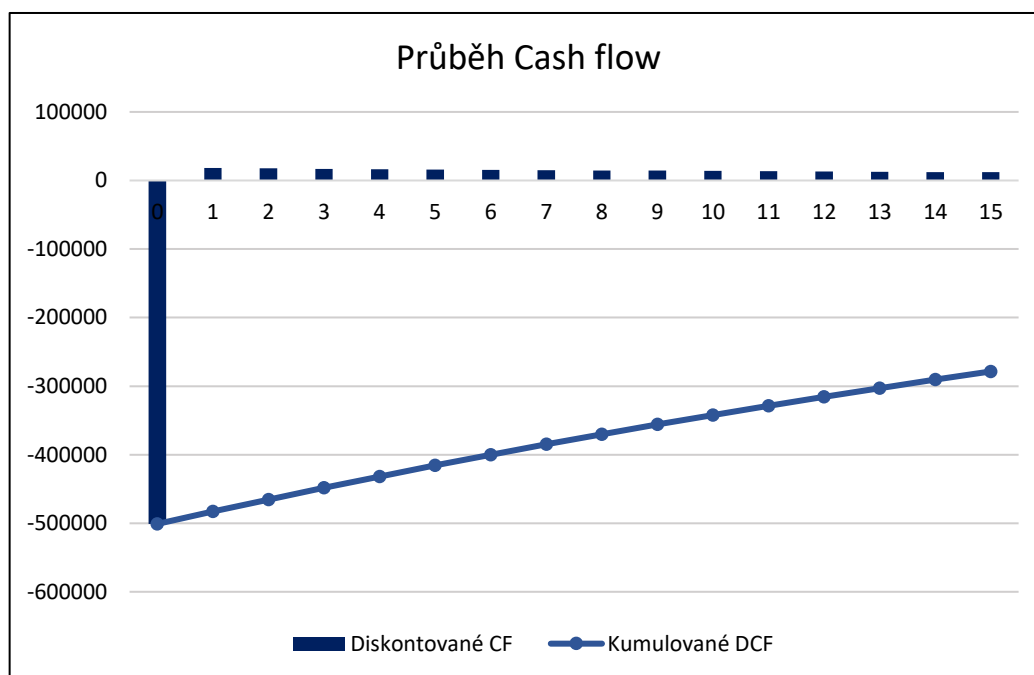
- Doba životnosti je 15 let
- Diskontní sazba 3 %
- Financování bude uskutečněno z vlastních zdrojů
- Počáteční investice: 501 000 Kč

Tabulka 7 Ekonomické zhodnocení alternativy

Parametr	Hodnota	Jednotky
Investice	501 000	Kč
Doba životnosti	15	Roky
Diskont	3	%
Doba návratnosti	26,8	Roky
NPV	-290 499	Kč
IRR	-6,5	%

Průběh cashflow je zobrazen v grafu 4.

Graf 4 Průběh cashflow alternativy



V tomto případě jsou výsledné hodnoty o poznání lepší, ale i přesto je stále investice ekonomicky nevýhodná ( $NPV < 0$ ). Pořizovací náklady by se vrátily o 11 let později, než je uváděná životnost KJ. Při kombinaci KJ a kotle by byly náklady na ZP menší než v případě využití jen KJ, a i přes nižší celkový zelený bonus a absenci výnosu z prodeje elektřiny by tato varianta byla přívětivější.

## Závěr

Cílem práce bylo popsat princip kombinované výroby elektřiny a tepla, a následně ekonomicky zhodnotit provoz kogenerační jednotky. Práce se zabývala problematikou KVET a jejími výhodami a nevýhodami. Byly popsány parametry, které jsou pro ni charakteristické, a její základní rozdělení. Představeny byly technologie kogeneračních jednotek a jejich možnost použití.

Další část práce se zabývala již praktickým příkladem. Nejprve byly popsány základní ukazatele hodnocení investic a bylo uvedeno, jak stát podporuje tuto výrobu. Dále se pro konkrétní rodinný dům v obci Vráž u Berouna vybrala nejvhodnější KJ, která by mohla nahradit stávající plynový kotel. Nejdříve se propočítalo, na jaký výkon bude KJ pracovat. Zjistilo se, kolik tepelné a elektrické energie vyrobí a jaké budou roční náklady na její provoz.

Byla vybrána nejmenší KJ od společnosti TEDOM, jednotka Micro T7, která splňovala všechny parametry. Byla propočítávána na 50% výkon, který byl dostačující pro zvolený rodinný dům. Aby bylo možné říci, zda je výhodné investovat do této KJ, muselo se provést ekonomické zhodnocení. Bylo zjištěno, v jaké výši jsou finanční úspory na tepelné a elektrické energii za rok a jak vysoký zelený bonus je pro letošní rok. Dále byly spočítány celkové náklady a výnosy z provozu za rok.

Po spočítání všech parametrů důležitých k ekonomickému zhodnocení se došlo k závěru, že KJ Micro T7 je pro tento rodinný dům ekonomicky nevýhodná. Doba návratnosti je 34 let, což znamená, že jednotka by musela být po životnosti (15 let) upravována, aby byla nadále schopna pracovat, nebo vyměněna za jinou. Z toho důvodu není výhodné do této KJ investovat. Nejvíce ovlivňujícím faktorem je zřejmě vysoká pořizovací cena KJ (485 000 Kč). Tuto situaci by vyřešila dotace, která by splatila významnou část, bohužel v dnešní době neexistuje dotační program, na který by rodina dosáhla. Po 15 letech, co je udávána životnost KJ, není splacena ani polovina pořizovacích nákladů. V nedávné době ERÚ snížil výši zelených bonusů, takže i tato hodnota je dost nízká. Příjem také zvyšuje položka prodej přebytečné energie, bohužel ale 900 Kč/MWh je nedostačujících a prodej se tedy nevyplatí.

Výhodou pro rodinný dům by byla nezávislost na odběru elektřiny ze sítě. Ale stále by tu byla závislost na dodávce zemního plynu, přičemž nikdy není zaručeno, že nemůže dojít k odstávce. Tím by byl rodinný dům odstaven jak od elektřiny, tak i od tepla pro vytápění nebo ohřev TUV.

Dle mého názoru by se KVET mohla více rozšiřovat. Je to velmi účinný systém, který chrání i životní prostředí. Hlavní překážkou zůstává pořizovací cena KJ. V případě, že by investiční náklady nebyly tak vysoké, můžeme předpokládat rozšiřování mezi více objektů. V dnešní době se stále vyvíjí technologie a za pár let můžeme očekávat ještě dokonalejší zařízení.

Přínosem této bakalářské práce je zjištění, že pro střední rodinný dům je instalace KJ ekonomicky nevýhodná. Zvolenou jednotku je lepší zavést buď v menším výrobním podniku, nebo např. v menším bytovém domě, kde bude vyšší spotřeba energie.

## Citovaná literatura

- [1] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla. *EkoWATT* [online]. Praha, 2007 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/uspory-energie/kombinovana-vyroba-elektřiny-a-tepla>
- [2] Výhody a využití kogenerace. *TEDOM* [online]. b.r. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/vyhody-a-vyuziti-kogenerace/>
- [3] Kogenerace – princip, technologie a výhody. *Oenergetice.cz* [online]. Jan Budín, 2015 [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody/>
- [4] *Vyhláška č. 37/2016 Sb. o elektřině z vysokoučinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů*. In: . Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2016.
- [5] Výhody kombinované výroby. *Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva* [online]. Teplárenské sdružení ČR, 2014 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=05&1515497728#>
- [6] FLIN, David. *Cogeneration: a user's guide*. 1st. pub. London: Institution of engineering and technology, 2010. IET renewable energy series. ISBN 978-0-86341-738-2.
- [7] *Kogenerační jednotky* [online]. Ostrava: Koudelka, 2004 [cit. 2018-01-21]. Dostupné z: [http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/kogeneracni\\_jednotky.pdf](http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/kogeneracni_jednotky.pdf)
- [8] Kogenerace - zaručená úspora energie. *Sunfin Praha* [online]. True Media, b.r. [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://www.sunfin.cz/cs/page/princip-a-vyhody-kogenerace/>
- [9] Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek. *Tzbinfo* [online]. Fiedler, 2011 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>
- [10] KARAFIÁT, Josef a kol. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla* [online]. Praha: ORTEP, 2006 [cit. 2018-01-19]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [11] Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu. *Tzb-info* [online]. Pospíšil, Fiedler, 2010 [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu>
- [12] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET, kogenerace). *Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva* [online]. Teplárenské sdružení ČR, 2014 [cit. 2018-01-21]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/>
- [13] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz*. 1. vyd. Praha: GAS, 2007. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [14] ŠUROVSKÝ, Jan. *Spalovací turbíny*. Česko: J. Šurovský, 2013. ISBN 978-80-260-4106-1.
- [15] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [16] SCHOLLEOVÁ, Hana. *Ekonomické a finanční řízení pro neekonomy*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: Grada, 2012. Expert. ISBN 978-80-247-4004-1.



- [17] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu pro rok 2018* [online]. b.r. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/3528415/Navrh\\_CR\\_POZE\\_na\\_rok\\_2018.pdf/720bab4d-96ae-4858-83f2-1aa4bb7ab887](http://www.eru.cz/documents/10540/3528415/Navrh_CR_POZE_na_rok_2018.pdf/720bab4d-96ae-4858-83f2-1aa4bb7ab887)
- [18] *TEDOM a.s.* [online]. b.r. [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.tedom.cz>
- [19] *Kombinovaná výroba elektřiny a tepla - podpora KVVET* [online]. ANAWE, 2013 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.mojekogenerace.cz/kombinovana-vyroba-elektřiny-a-tepla/>
- [20] *Kogenerační jednotky* [online]. 2017 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://www.tedom.com/wp-content/uploads/2017/12/P%C5%99ehled-kogenera%C4%8Dn%C3%ADch-jednotek-TEDOM.pdf>
- [21] *Jak funguje kogenerace. TEDOM* [online]. b.r. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: <http://kogenerace-old.tedom.com/jak-funguje-kogenerace.html>
- [22] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.

## Seznam použitých zkratk

KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
CZT	Centrální zásobování teplem
ORC	Organický Rankinův cyklus
PPT	Parní protitlaková turbína
POT	Parní kondenzační odběrová turbína
KJ	Kogenerační jednotka
NPV	Čistá současná hodnota
IRR	Vnitřní výnosové procento
PP	Doba návratnosti
TUV	Teplá užitková voda
ERÚ	Energetický regulační úřad
PPH	Počet provozních hodin
ZP	Zemní plyn
CF	Cash flow
DCF	Diskontované cash flow

## Seznam obrázků

Obr. 1 Účinnost přeměny primární energie .....	- 2 -
Obr. 2 Schéma trigeneračního systému .....	- 3 -
Obr. 3 Schéma toků energií u kogenerační jednotky se spalovacím motorem.....	- 7 -
Obr. 4 Základní schéma zapojení parní protitlakové turbíny .....	- 9 -
Obr. 5 Základní schéma zapojení parní kondenzační odběrové turbíny.....	- 10 -
Obr. 6 Schéma kogeneračního zapojení spalovací turbíny.....	- 10 -
Obr. 7 Schéma zapojení paroplynového kogeneračního zdroje se spalovací turbínou ..	- 12 -
Obr. 8 Princip mikroturbíny.....	- 13 -
Obr. 9 Princip práce Stirlingova motoru.....	- 14 -
Obr. 10 Schéma palivových článků pro KVET .....	- 15 -
Obr. 11 Schéma ORC cyklu .....	- 16 -
Obr. 12 Roční průběh potřeby tepla.....	- 18 -
Obr. 13 Tedom Micro T7.....	- 20 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek se spalovacími motory-	8 -
Tabulka 2 Technické parametry KJ Micro T7 .....	- 21 -
Tabulka 3 Porovnání vypočtených hodnot .....	- 23 -
Tabulka 4 Přehled nákladů a výnosů .....	- 26 -
Tabulka 5 Ekonomické zhodnocení.....	- 27 -
Tabulka 6 Přehled nákladů a výnosů alternativy .....	- 29 -
Tabulka 7 Ekonomické zhodnocení alternativy.....	- 29 -

## Seznam grafů

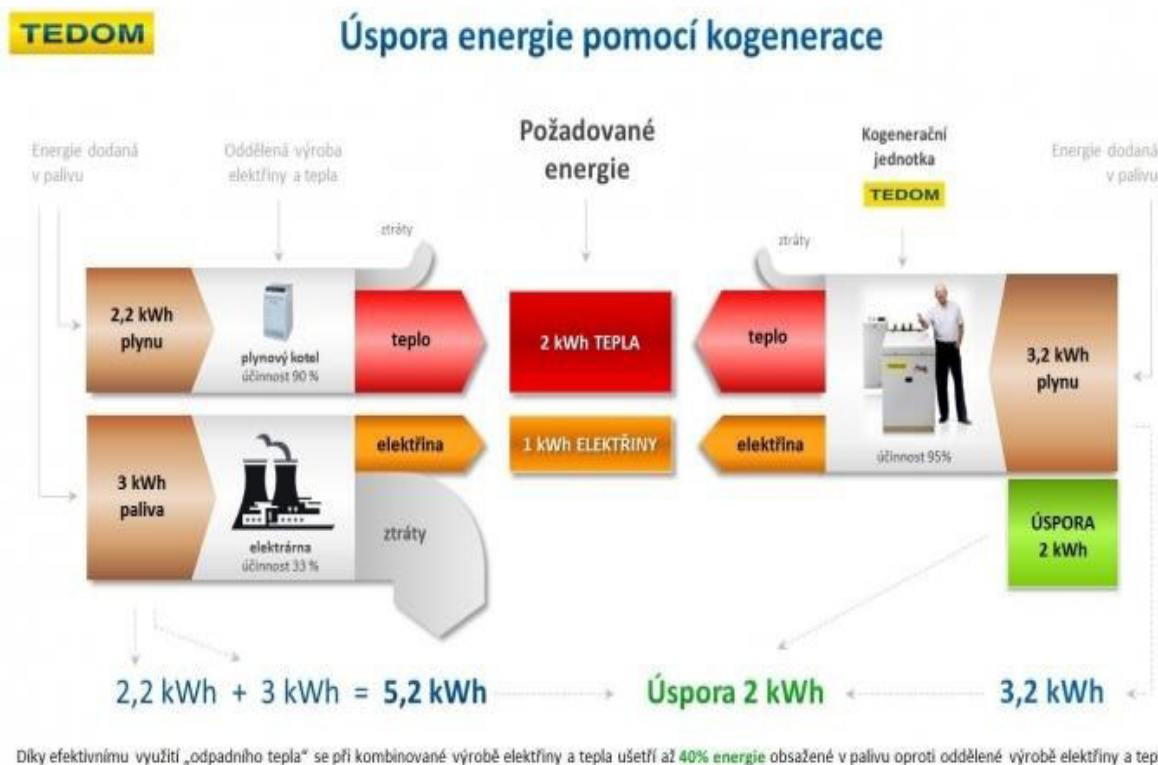
Graf 1 Spotřeba elektrické energie .....	- 19 -
Graf 2 Spotřeba zemního plynu .....	- 19 -
Graf 3 Průběh cashflow .....	- 27 -
Graf 4 Průběh cashflow alternativy .....	- 30 -

# **Přílohy**

## **Seznam příloh**

Příloha 1 Úspora energie pomocí kogenerace.....	- 1 -
Příloha 2 Rozsah elektrických výkonů.....	- 1 -
Příloha 3 Přehled běžných účinností zdrojů KVET s PPT.....	- 2 -
Příloha 4 Přehled rozsahu dosahovaných účinností zdrojů KVET s POT.....	- 2 -
Příloha 5 Přehled rozsahu běžně dosahovaných účinností plynových turbín.....	- 2 -
Příloha 6 Rozsah běžně dosahovaných účinností paroplynových cyklů.....	- 2 -
Příloha 7 Znázornění jednotlivých fází Stirlingova motoru.....	- 3 -
Příloha 8 Cenové rozhodnutí ERÚ pro rok 2018.....	- 3 -

## Příloha 1 Úspora energie pomocí kogenerace [21]



## Příloha 2 Rozsah elektrických výkonů [12]

Technologie kombinované výroby	Obvyklý rozsah elektrických výkonů [MWe]
Protitlaká parní turbína	3 - 60
Odběrová parní turbína	25 - 200
Parní stroj	0,2 - 2,5
Plynová turbína s rekuperací tepla	0,2 - 250
Paroplynové cykly	5 - 450
ORC moduly	0,2 - 5
Mikroturbíny	0,01 - 0,25
Palivové články	0,005 - 2
Stirlingův motor	0,001 - 0,03

**Příloha 3** Přehled běžných účinností zdrojů KVET s PPT [10]

	<b>Jedn.</b>	<b>Parní protitlakové turbíny</b>			
Výkonový rozsah zdroje	MWe	<b>0,01 ÷ 1,0</b>	<b>1,0 ÷ 6,0</b>	<b>6,0 ÷ 35,0</b>	<b>&gt;35,0</b>
Účinnost výroby el. en.	%	5 ÷ 15	10 ÷ 20	15 ÷ 25	20 ÷ 30
Účinnost výroby tepla	%	55 ÷ 70	55 ÷ 70	55 ÷ 70	60 ÷ 65
Celková účinnost zdroje	%	65 ÷ 75	75 ÷ 80	80 ÷ 85	85 ÷ 90

**Příloha 4** Přehled rozsahu dosahovaných účinností zdrojů KVET s POT [10]

	<b>Jedn.</b>	<b>Parní odběrové turbíny</b>			
Výkonový rozsah turbíny	MWe	<b>6 ÷ 30</b>	<b>30 ÷ 60</b>	<b>60 ÷ 200</b>	<b>&gt;200</b>
Minimální celková účinnost	%	25 ÷ 30	30 ÷ 34	34 ÷ 38	38 ÷ 42
Maximální celková účinnost	%	65 ÷ 75	60 ÷ 70	55 ÷ 65	50 ÷ 60

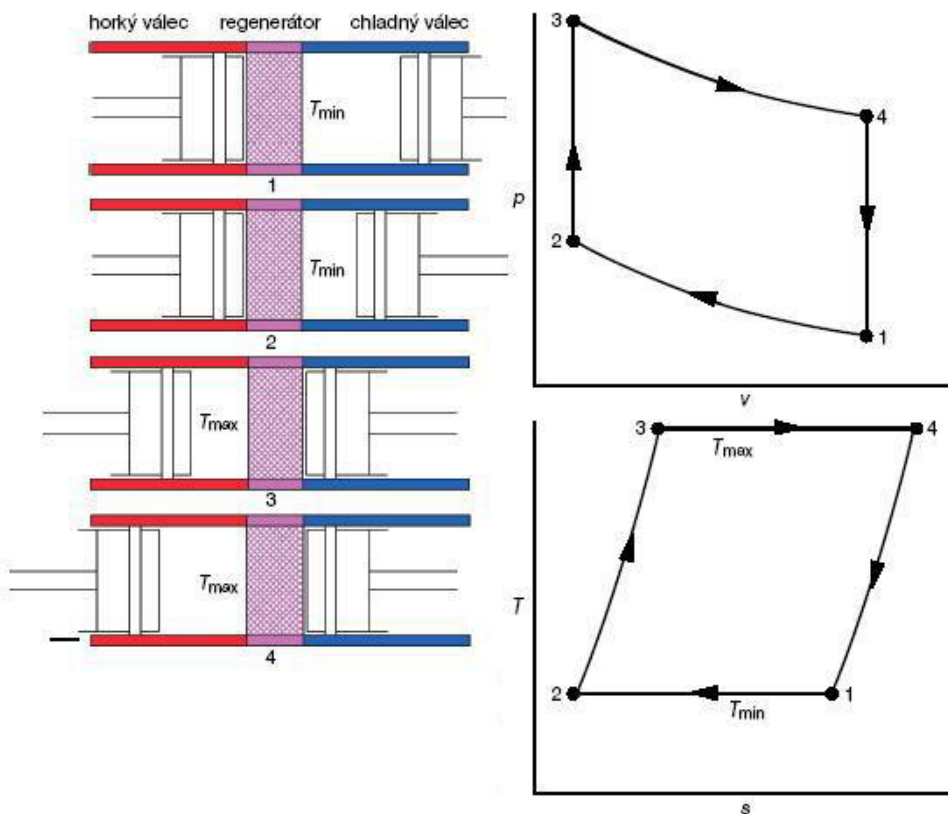
**Příloha 5** Přehled rozsahu běžně dosahovaných účinností plynových turbín [10]

	<b>Jedn.</b>	<b>Plynové turbíny s rekuperací tepla</b>		
Výkonový rozsah turbíny	MWe	<b>1 ÷ 10</b>	<b>10 ÷ 50</b>	<b>50 ÷ 240</b>
Účinnost výroby elektrické energie	%	25 ÷ 32	30 ÷ 35	33 ÷ 38
Účinnost výroby tepla	%	50 ÷ 61	49 ÷ 58	48 ÷ 57
Celková účinnost zdroje	%	82 ÷ 86	84 ÷ 88	86 ÷ 90

**Příloha 6** Rozsah běžně dosahovaných účinností paroplynových cyklů [10]

<b>Paroplynové cykly</b>	<b>Jedn.</b>	<b>S protitlakovou parní turbínou</b>	<b>S odběrovou parní turbínou</b>	<b>S kondenzační parní turbínou</b>
Účinnost výroby el. en.	%	40 ÷ 45	46 ÷ 50	51 ÷ 53
Účinnost výroby tepla	%	38 ÷ 46	10 ÷ 30	-
Celková účinnost zdroje	%	83 ÷ 86	60 ÷ 76	51 ÷ 53

## Příloha 7 Znázornění jednotlivých fází Stirlingova motoru [10]



## Příloha 8 Cenové rozhodnutí ERÚ pro rok 2018 [17]

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kW]		Provozní hodiny kogenerační jednotky [h/rok]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
		od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)		
	a	b	c	d	e	j	m
700		-	31.12.2018	0	200	3 000	1 301
701	Elektřina z KVET s výjimkou elektřiny z KVET vyrobené ve výrobně elektřiny podporované podle bodu (1) a/nebo (2.1.) cenového rozhodnutí a s výjimkou elektřiny z KVET vyrobené ve výrobně elektřiny spalující komunální odpad	-	31.12.2018	0	200	4 400	834
703		-	31.12.2018	200	1 000	3 000	878
704		-	31.12.2018	200	1 000	4 400	478
706		-	31.12.2018	1 000	5 000	3 000	547
707		-	31.12.2018	1 000	5 000	4 400	214
709		Elektřina z KVET vyrobená ve výrobně elektřiny současně podporované podle bodu (1) a/nebo (2.1.) cenového rozhodnutí a elektřina z KVET vyrobená ve výrobně elektřiny spalující komunální odpad	-	31.12.2015	0	5 000	-