



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MOŽNOSTI MIKROKOGENERAČNÍ VÝROBY V MÍSTECH, KDE NEJSOU PRIMÁRNĚ DOSTUPNÁ PLYNNÁ, NEBO KAPALNÁ PALIVA

SOLUTIONS FOR USING MICRO COGENERATION IN PLACES WHERE ARE NOT
PRIMARILY AVAILABLE GAS OR LIQUID FUELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KUBÍNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JITKA MATĚJKOVÁ

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Kubínek

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

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

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

Možnosti mikrokogenerační výroby v místech, kde nejsou primárně dostupná plynná, nebo kapalná paliva

v anglickém jazyce:

Solutions for using micro cogeneration in places where are not primarily available gas or liquid fuels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mikrokogenerací se označuje kombinovaná výroba elektřiny a tepla v zařízeních do 50 kW elektrického výkonu. Práce se zaměřuje na možnosti jejich využití u rodinného domu.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provedení analýzy na možnosti kogenerační výroby malých elektrických výkonů v místech, kde není zejména možnost napojení na dodávku zemního plynu. Výstupem práce by měl být přehled dostupných technologií, které by bylo možné použít u rodinných domů či bytového domu a zhodnocení dané investice z hlediska návratnosti a počátečních a provozních nákladů.

Seznam odborné literatury:

PAVELEK, Milan et al. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011,

KRBEK, Jaroslav, Ladislav OCHRANA a Bohumil POLESNÝ. Zásobování teplem a kogenerace. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1999

KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky malého výkonu v komunálních a průmyslových tepelných zdrojích. 1. vyd. Brno: PC DIR, 1997, Firemní dokumentace

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jitka Matějková

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 21.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím mikrokogeneračních jednotek v místech, kde nejsou primárně dostupná plynná, nebo kapalná paliva. V rešeršní části jsou popsány dostupné technologie a aktuální stav trhu s mikrokogeneračními jednotkami, které využívají pevná paliva, především biomasu. V technicko-ekonomické části je návrh konkrétní jednotky, jejíž tepelný výkon odpovídá výpočtové tepelné ztrátě zvoleného objektu. Doba návratnosti dané jednotky se zplyňovačem a spalovacím motorem je určena pro případy, kdy je zvolená budova v současnosti vytápěna: hnědým uhlím, dřevní štěpkou, elektřinou a kombinací zemního plynu a koksu.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the usage of micro cogeneration units in the places where gas and liquid fuels are not primarily available. In the research part, the available technologies and the current condition of the market of micro cogeneration units, which use solid fuels, especially biomass, are described. In the technical-economical part, there is a design of the specific unit whose thermal output corresponds to the thermal rated loss of the chosen building. The payback period of the unit with a gasifier and with a combustion engine is estimated in the cases when the chosen building is currently heated by: lignite, wooden chips, electricity and the combination of natural gas and coke.

Klíčová slova

Mikrokogenerace, biomasa, parní motor, Stirlingův motor, parní turbína, ORC, spalovací motor, zplyňovač, mikroturbína, vzduchová turbína, palivový článěk, Power Pallets, ekonomická analýza, doba návratnosti.

Keywords

Micro cogeneration, biomass, steam engine, Stirling engine, steam turbine, ORC, combustion engine, gasifier, microturbine, air turbine, fuel cell, Power Pallets, economic analysis, payback period.

Bibliografická citace

KUBÍNEK, M. *Možnosti mikrokogenerační výroby v místech, kde nejsou primárně dostupná plynná, nebo kapalná paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jitka Matějková.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci, tj. Možnosti mikrokogenerační výroby v místech, kde nejsou primárně dostupná plynná, nebo kapalná paliva, vypracoval samostatně. Vycházel jsem z uvedené literatury, konzultací s vedoucí bakalářské práce a vlastních znalostí.

V Brně 24. května 2013

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jitce Matějkové za odborné vedení a rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi pomáhali se slohovými a gramatickými korekturami.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 9 |
| 2 | Kogenerace | 10 |
| 2.1 | Centralizovaná a decentralizovaná kogenerační výroba | 10 |
| 2.2 | Výhody a nevýhody kogenerace | 11 |
| 2.3 | Rozdělení kogeneračních jednotek | 12 |
| 3 | Mikrokogenerace | 14 |
| 3.1 | Použití mikrokogenerace | 14 |
| 3.2 | Paliva | 14 |
| 4 | Typy mikrokogeneračních technologií | 16 |
| 4.1 | Parní pístový stroj | 16 |
| 4.1.1 | Konstrukce a princip činnosti | 16 |
| 4.1.2 | Výhody a nevýhody | 17 |
| 4.1.3 | Jednotky na trhu | 17 |
| 4.2 | Stirlingův motor | 18 |
| 4.2.1 | Konstrukce a princip činnosti | 18 |
| 4.2.2 | Výhody a nevýhody | 20 |
| 4.2.3 | Jednotky na trhu | 20 |
| 4.3 | Parní turbína | 21 |
| 4.3.1 | Konstrukce a princip činnosti | 21 |
| 4.3.2 | Výhody a nevýhody | 21 |
| 4.3.3 | Jednotky na trhu | 22 |
| 4.4 | ORC cyklus | 22 |
| 4.4.1 | Konstrukce a princip činnosti | 23 |
| 4.4.2 | Výhody a nevýhody | 23 |
| 4.4.3 | Jednotky na trhu | 24 |
| 4.5 | Spalovací motory | 24 |
| 4.5.1 | Způsoby transformace pevných paliv | 24 |
| 4.5.2 | Konstrukce a princip činnosti | 26 |
| 4.5.3 | Výhody a nevýhody | 27 |
| 4.5.4 | Jednotky na trhu | 27 |
| 4.6 | Mikroturbíny | 29 |
| 4.6.1 | Konstrukce a princip činnosti | 29 |
| 4.6.2 | Výhody a nevýhody | 29 |
| 4.6.3 | Jednotky na trhu | 30 |
| 4.7 | Další technologie | 30 |
| 4.7.1 | System Talbott | 31 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.7.2 | Palivový článek | 31 |
| 5 | Technicko-ekonomická analýza zvolené MKJ u vybrané budovy | 33 |
| 5.1 | Tepelné ztráty objektu | 33 |
| 5.2 | Potřeba tepla | 37 |
| 5.3 | Volba MKJ | 38 |
| 5.4 | Spotřeba energií..... | 39 |
| 5.5 | Ekonomická analýza..... | 39 |
| 6 | Závěr | 44 |
| 7 | Seznam použitých zdrojů | 45 |
| 8 | Seznam použitých zkratk a symbolů | 48 |
| 9 | Seznam obrázků | 50 |
| 10 | Seznam tabulek | 51 |
| 11 | Seznam grafů..... | 52 |
| 12 | Příloha | 53 |

1 Úvod

Pro udržitelný ekonomický rozvoj a životní úroveň lidí je charakteristický růst spotřeby energií. Vzhledem ke klesající zásobě primárních energetických zdrojů a přísnějším ekologickým měřítkům na kvalitu ovzduší, musí lidstvo využívat jiné technologie a zdroje než na jaké bylo v minulých desetiletích zvyklé. Byly nastoleny dvě cesty, které mají společně tento nový trend naplnit. Jedná se o užívání obnovitelných zdrojů energie a efektivnější využívání primárních energetických zdrojů, které je zastoupeno kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla (kogenerace). V případě českých domácností, jejichž spotřeba energetických zdrojů je přibližně ze 3/4 určena na výrobu tepla a ohřev teplé užitkové vody, je mikrokogenerace tou vhodnější volbou. Nejpříznivěji vzhledem k výše zmíněným důvodům vychází mikrokogenerace využívající obnovitelný zdroj energie, jakým je například biomasa. MKJ kombinovaná s některými dalšími zařízeními (akumulace tepla, akumulace elektřiny, solární panely, aj.) může být základem ostrovního systému. V takové situaci je daný objekt zcela nezávislý na dodávkách elektřiny a tepla z rozvodných sítí.

Cílem této práce je zanalyzovat situaci ohledně použití mikrokogeneračních zařízení v místech, kde není možnost připojení na dodávku zemního plynu nebo jsou i jinak nedostupná plynná a kapalná paliva. Zaměřím se na to, jaké technologie jsou v takovém případě pro mikrokogeneraci dostupné, a jak je rozvinut jejich trh. Soustředit se budu především na technologie využívající jako palivo biomasu. V druhé části práce se budu zabývat tím, za jak dlouho se vrátí počáteční investice do vybrané jednotky. Pro volbu jednotky využiju výpočet tepelných ztrát zvoleného objektu a výpočet potřeby tepla. Ekonomickou analýzu provedu jako rozvahu nákladových a příjmových položek vyplývajících ze spotřeby energií za referenční období.

2 Kogenerace

V podmínkách České republiky se značná část primárních energetických zdrojů (PEZ) spotřebovává na výrobu tepla pro vytápění bytových i nebytových prostor a přípravu teplé užitkové vody (TUV). Vzhledem k podstatnému zaměření naší ekonomiky na průmysl je významná i spotřeba PEZ na výrobu tepla pro technologické účely v různých oborech. Nejběžnější způsob získání tepla je spálení vhodného paliva, při kterém dojde k uvolnění tepelné energie. Tato energie je pak transportována teplonosným médiem ke spotřebiteli. Účinnost dnešních kotlů malých výkonů je při správné konfiguraci velmi vysoká (70–97 %). I přesto lze dosáhnout lepšího využití potenciálu paliva, protože část energie ve formě tepla (exergie) může být použita ke konání práce. Kogenerace, tedy kombinovaná výroba elektrické energie a tepla (KVET), využívá exergii paliva a to k pohonu tepelného stroje. Mechanická práce se pak transformuje v elektrickém generátoru na elektrickou energii [1].

Důležitou veličinou, která ovlivňuje všechny parametry kogeneračních zařízení, je *teplárenský modul*. Jedná se o poměr velikosti vyprodukované elektrické energie a tepla dodaného spotřebiteli (1). Význam této veličiny je obdobný jako tepelná účinnost při hodnocení elektráren [1].

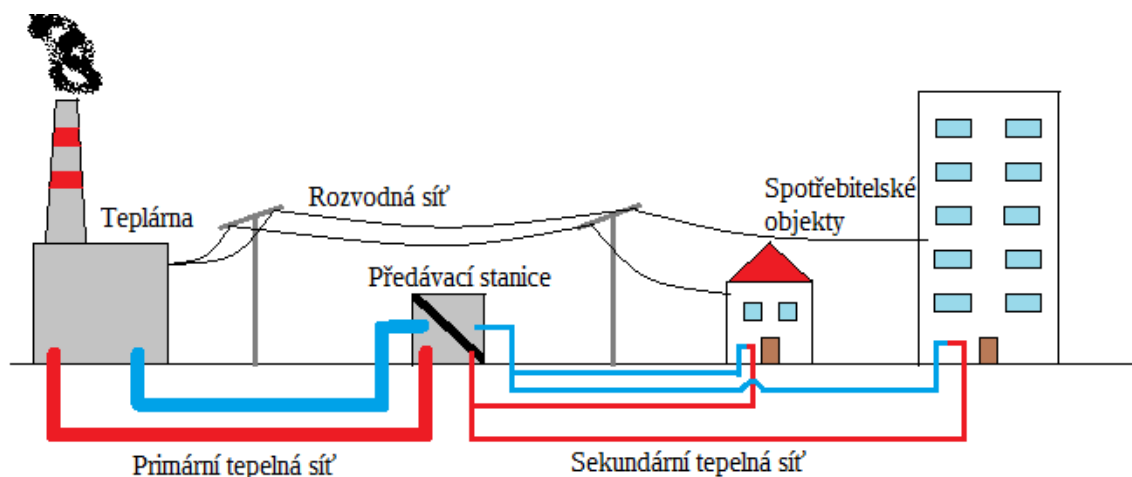
$$\sigma = \frac{E_{tep}}{Q_d} \quad (1)$$

legenda: σ [-] – *teplárenský modul*
 E_{tep} [W] – *vyprodukovaná elektrická energie*
 Q_d [W] – *teplo dodané spotřebiteli*

Systém společné výroby elektrické energie a tepla je výhodnější oproti oddělené výrobě v elektrárnách a výtopnách v mnoha směrech. Tyto výhody můžeme zejména pozorovat v energetických, ekonomických a ekologických aspektech. Proto některé firmy využívající ve své výrobní technologii teplo, které má na konci procesu dostatečně dobré parametry, přidávají za poslední aparát kogenerační jednotku. Tento model, kdy se nejdříve využije teplo, ze kterého se až posléze vyrobí elektřina, se nazývá *horní kogenerační systém*. Daleko běžnější je pro používané technologie kvůli potřebě vyšších teplot tzv. *dolní kogenerační systém*, kdy se nejdříve z uvolněného tepla vyrobí elektrická energie a teprve zbylé teplo se využije pro další účely jako vytápění nebo přípravu TUV [2].

2.1 Centralizovaná a decentralizovaná kogenerační výroba

Centralizovaná kogenerační výroba se skládá z kogenerační jednotky o velkém výkonu (nebo více jednotek o menších výkonech), připojení k existující přenosové soustavě elektrické energie a tepelné sítě, která spojuje zdroj tepla s vytápěnými objekty. Toto je jednoduchý popis běžné teplárenské soustavy. Výhodami centralizované výroby oproti výrobě decentralizované jsou rychlejší návratnost investice do kogenerační jednotky, použití technologie na čištění spalin a vysoký komín, který zajistí rozptyl emisí do větší oblasti. Za hlavní nevýhody jsou považovány vysoké investice do rozvodných tepelných sítí a údržby, potřeba čerpací práce, při použití páry jako pracovního média, obtížnější regulace a tepelné ztráty v rozvodných sítích. Vzhledem k faktu, že ztráty v tepelných sítích jsou větší než ztráty přenosové soustavy, se doporučuje budovat teplárenské objekty blíže ke spotřebitelům tepla [3].



Obr. 1: Schéma centralizované teplotné soustavy

Decentralizovaná kogenerační výroba má díky umístění kogenerační jednotky přímo do objektu spotřebitele výhodu v tom, že u takové výroby nenastávají ztráty transportem tepelné a elektrické energie. Oba druhy energií se spotřebovávají na místě výroby, popřípadě se nadbytek elektrické energie dodává do přenosové soustavy. Nevýhodou může být lokální zvýšení imisí v ovzduší, které lze minimalizovat použitím vhodného typu paliva.

2.2 Výhody a nevýhody kogenerace

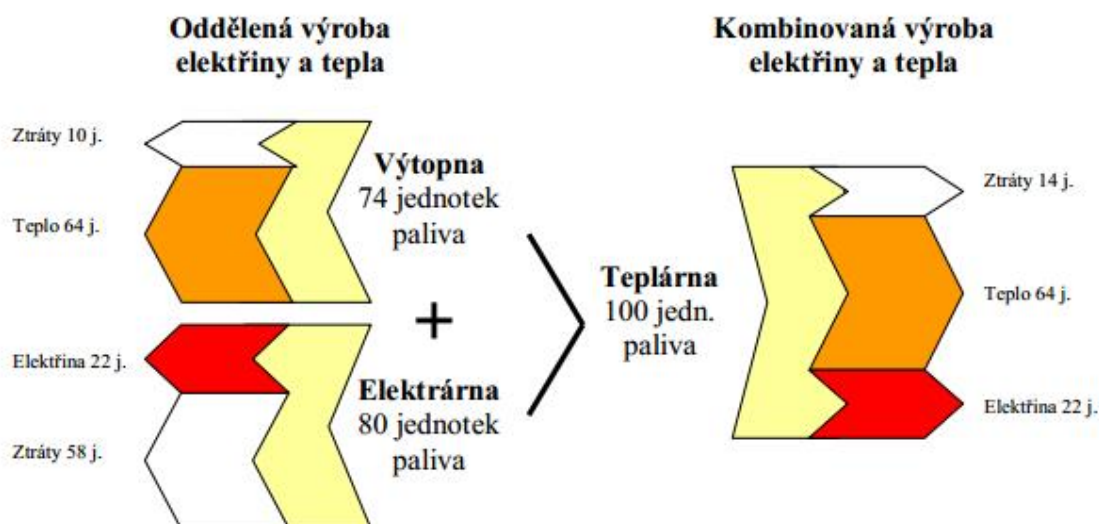
Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla sebou přináší řadu kladů, díky kterým předčí oddělenou výrobu v elektrárnách a výtopenách. Jsou to především tyto výhody:

- úspora primárních energetických zdrojů,
- snížení vypouštěného množství znečišťujících látek do ovzduší (v globálním měřítku),
- větší ekonomické zhodnocení investice,
- snížení ztrát způsobených přenosem a distribucí energií,
- přispění ke stabilizaci a bezpečnosti přenosové soustavy.

Snížení spotřeby primárních energetických zdrojů je největším přínosem kogenerace. S tím jsou komplementárně spojené výhody ekologického a ekonomického charakteru. Jak vidíme na obr. 2, úspora PEZ se běžně pohybuje někde v okolí 30–40 %. Tuto úsporu můžeme vyjádřit pomocí vztahu (2).

$$Q_u = Q_d \left[\left(\frac{1}{\eta_{výt}} - \frac{1}{\eta_{tep}} \right) + \sigma \left(\frac{1}{\eta_{el}\eta_{re}} - \frac{1}{\eta_{tep}} \right) \right] \quad (2)$$

legenda: Q_u [W] – úspora tepla z PEZ,
 $\eta_{výt}$ [-] – tepelná účinnost výtopy,
 η_{tep} [-] – tepelná účinnost kogenerační výroby,
 η_{el} [-] – tepelná účinnost elektrárny,
 η_{re} [-] – účinnost rozvodu elektřiny.



Obr. 2: Znárodnění efektu KVET [4]

Na druhou stranu musíme poukázat na některé nevýhody, díky kterým zatím nedošlo k většímu rozšíření menších decentralizovaných jednotek do bytových objektů, úřadů, hotelů a podobně. Jedná se o následující negativní aspekty:

- velká počáteční investice,
- nutnost zálohy tepelného výkonu v případě poruchy.

2.3 Rozdělení kogeneračních jednotek

Kogenerační jednotky můžeme dělit podle mnoha hledisek. Mezi ty základní patří jmenovitý elektrický výkon, typ paliva, účel použití a v neposlední řadě technologie, na které je jednotka postavena. Rozdělení kogeneračních jednotek podle elektrického výkonu je zobrazeno v tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení kogenerací podle jmenovitého výkonu [2]

| Název kogenerace | Rozmezí jmenovitého elektrického výkonu |
|-----------------------------|---|
| Mikrokogenerace | < 50 kW _e |
| Mini-kogenerace | 50–500 kW _e |
| Kogenerace malého výkonu | 0,5–1 MW _e |
| Kogenerace středního výkonu | 1–50 MW _e |
| Kogenerace velkého výkonu | > 50 MW _e |

Podle účelu použití se kogenerační jednotky dělí na:

- základní zdroje,
- špičkové zdroje,
- záložní zdroje.

Podle paliva, které jednotka spaluje, se uvádí rozdělení na:

- zařízení spalující primární paliva (plynné, kapalné nebo pevné),
- zařízení spalující sekundární paliva (odpady).

Používané technologie kogeneračních zařízení a jejich typické parametry jsou vypsány v tab. 2.

Tab. 2: Kogenerační zařízení podle použité pohonné jednotky a jejich typické základní parametry [2], [5], [6]

| Pohonná jednotka | Rozsah výkonů (MW_e) | Teplárenský modul |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Odběrová parní turbína | 5–300 | 0,2–0,4 |
| Protitlaková parní turbína | 0,1–100 | 0,1–0,4 |
| Spalovací turbína | 0,5–250 | 0,4–1,2 |
| Mikroturbína | 0,025–0,25 | 0,6–0,85 |
| Paroplynové zařízení | 10–400 | 0,8–2 |
| Spalovací motor | 0,01–10 | 0,5–1,1 |
| Parní motor | 0,02–1 | 0,1–0,3 |
| Stirlingův motor | 0,001–0,03 | 0,3–0,7 |
| ORC | 0,3–1,8 | 0,1–0,3 |
| Palivové články | 0,005–2 | 1–2 |

3 Mikrokogenerace

Mikrokogenerace je naprosto individuální přístup k decentralizované kogenerační výrobě. Při maximálním elektrickém jmenovitém výkonu do 50 kW_e uvažujeme umístění takových jednotek přímo do budovy, ve které se budou energie spotřebovávat. Tak odpadají všechny ztráty způsobené transportem tepla a elektřiny.



Obr. 3: Schéma mikrokogenerační jednotky v domě [7]

3.1 Použití mikrokogenerace

Použití mikrokogenerační výroby v místech, kde není přípojka na dodávku zemního plynu, je v dnešní době stále raritní záležitostí. „Použití jiných levnějších druhů paliv, jakým je například bio-palivo (pevné, plynné), je vázáno na investičně náročná a zatím v praxi málo ověřená řešení“ [8]. Můžeme však nalézt aplikace, kde by použití právě takové mikrokogenerace bylo vhodné. Jedná se o tyto objekty:

- horské hotely, penziony a chaty,
- školy, úřady nebo rodinné domy v odlehlých usedlostech,
- čistírny odpadních vod,
- pily, zemědělské podniky a další subjekty disponující odpadní biomasou.

3.2 Paliva

V místech, kde není zavedena plynofikační soustava, nebo kde nejsou dobře dostupná kapalná paliva, se využívají paliva tuhá. Taková paliva můžeme rozdělit na obnovitelné a neobnovitelné zdroje. Mezi neobnovitelné tuhé zdroje řadíme hnědé uhlí, černé uhlí a méně se vyskytující a využívající rašelinu či lignit. Na vytápění objektů se také hojně využívá koks, což je kvalitní černé uhlí po speciální tepelné úpravě. U prodejců se dá koupit uhlí různých velikostí od uhelného prachu přes běžné kusové uhlí až po brikety. Naproti tomu obnovitelným tuhým zdrojem je biomasa, kterou dělíme podle druhu na dřeviny, stébelniny a traviny a ostatní. Pro spalování využíváme biomasu ve formě štěpky, pelet, briket či kusového dříví. Výhodou biomasy je ekologičnost. Udává se, že množství emisí oxidu uhličitého vznikající při spálení biomasy je přibližně stejné jako množství oxidu uhličitého spotřebovaného rostlinami při fotosyntéze. Nevýhodou je snadnější navázání vody na palivo. Tím rychle klesá výhřevnost. Proto je zapotřebí mít k dispozici vhodné uskladňovací prostory.

Některé mikrokogenerační technologie, jako např. mikroturbíny nebo spalovací motory, nedokážou spalovat tuhé palivo. Lze však využít technologií na zpracování takových surovin na paliva plynná nebo kapalná. Pro zpracování uhlí se jedná o procesy extrakce a hydrogenace na výrobu kapalných produktů a technologii zplyňování. Biomasu

můžeme upravovat zplyňováním, rychlou pyrolýzou, kvašením nebo anaerobní fermentací. Většina z výše uvedených technologií jsou pro domácí použití v mikrokogeneraci z důvodů náročnosti a nákladovosti nepoužitelná. Nejlépe se jeví možnost zplyňování tuhého paliva a následného spalování takto vzniklých plyných produktů.

4 Typy mikrokogeneračních technologií

S mikrokogenerací se v praxi můžeme setkat stále velmi zřídka. V posledních letech, kdy se čím dál tím více zaměřujeme na omezování vypouštěných spalin a snižování spotřeby primárních energetických zdrojů, se řada firem rozhodla začít s vývojem mikrokogeneračních jednotek. Díky tomu, že se jedná o relativně nový proud, se vývoj zaměřuje na více možných technologií, které připadají pro kogenerační výrobu o tak malém výkonu v úvahu.

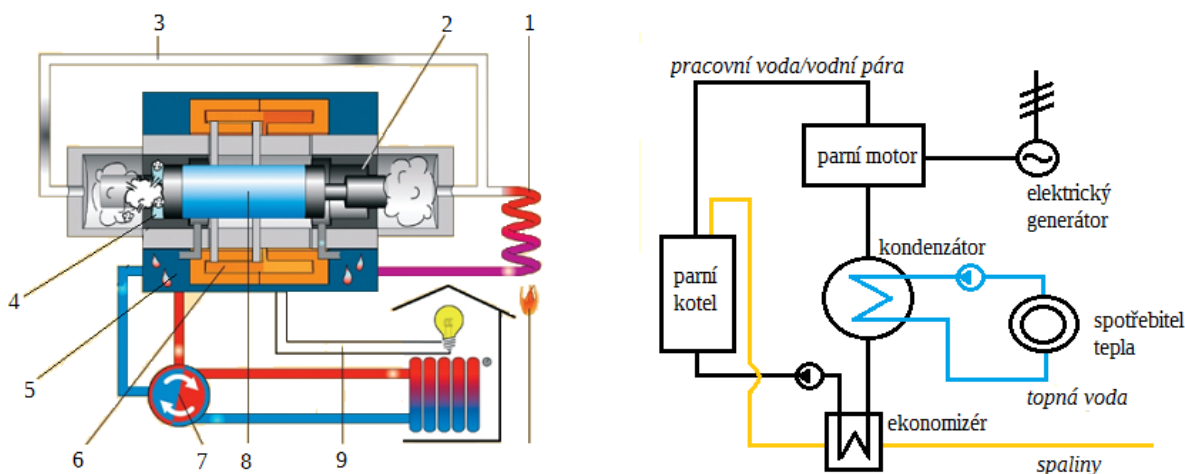
4.1 Parní pístový stroj

Parní stroj se stal symbolem průmyslové revoluce. Byl to první tepelný stroj, který nahradil práci lidí, zvířat, vody či větru. Byl například využíván jako pohon lokomotiv, důlních výtahů a čerpadel a taky elektrických generátorů v prvních elektrárnách. Z energetiky byl vytlačen nástupem parních turbín na začátku 20. století. Dneska se technologie parních motorů vrací do energetiky v podobě kogeneračních jednotek malých výkonů, kde se v případě malého tlakového spádu předpokládají v některých ohledech lepší vlastnosti než u parních turbín. S výhodami se také parní stroj používá v redukčních stanicích páry, kde nahrazuje redukční ventily nebo jednostupňové turbíny (tzv. točivé redukce) [9].

4.1.1 Konstrukce a princip činnosti

Parní pístový stroj se skládá z parního vyvíječe, rozvodu páry, bloku motoru, válce s pístem a kondenzátoru. K tomuto je pak připojen elektrický generátor.

Přivedená voda do parního vyvíječe (parní kotel) se ohřívá a postupně vypařuje. Pára je následně odvedena do sací komory, odkud je distribuována pomocí šoupátkového mechanismu nebo sacího ventilu do válce motoru. Ve válci dochází k expanzi páry, která zvětšuje svůj objem, a tím tlačí na píst. S pístem je spojen klikový mechanismus, který pohání elektrický generátor. V případě lineárního parního motoru se generuje elektrický proud tím, že píst z magnetického materiálu prochází při svém pohybu cívku, ve které se díky změně magnetického indukčního toku vytváří indukované napětí. Když se píst dostane do opačné úvratě, otevře se výfukový otvor a pára odchází do kondenzátoru, kde se teplo předá otopnému médium. Toto médium můžeme ještě ohřát ve výměníku umístěném ve spalinovodu. V dnešních mikrokogeneračních jednotkách se používá jednoválcový dvojčinný motor, kdy je pára vháněna střídavě nad a pod píst. Tato koncepce snižuje rozměry motoru a zvyšuje jeho účinnost [9], [10].



Obr. 4: Schémata PM, zleva: lineární [10], nelineární

1 – vyvíječ páry, 2 – jedna strana pístu, výfuk, 3 – rozvod páry, 4 – druhá strana pístu, nasávání, 5 – kondenzátor, 6 – cívka, 7 – tepelný výměník, 8 – píst, 9 – elektrické vedení

4.1.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- tepelný stroj bez vnitřního spalování ⇒ využití jakéhokoliv paliva,
- nízká hlučnost,
- možnost použití v oblasti mokré páry,
- jednoduchá konstrukce.

Nevýhody:

- vysoké tlaky páry,
- nutnost úpravy vody,
- může docházet k znečištění páry olejem.

4.1.3 Jednotky na trhu

Na trhu s parními motory pro mikrokogenerační účely se například pohybuje rakouská firma Button Energy Energiesysteme GesmbH nebo firma PolyComp, a.s. z Poděbrad. Zatímco rakouská firma dodává kompletní zařízení, jednotky od PolyCompu se dodávají bez parního kotle či jiného vyvíječe páry.

Tab. 3: Technické údaje jednotek PM [10], [11]

| Firma | Button Energy Energiesysteme | Polycomp |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Název jednotky | Bison-powerblock | PM-VS |
| Elektrický výkon [kW] | 0,3–2 | 22, 45 |
| Tepelný výkon [kW] | 3–16 | podle parního vyvíječe |
| Palivo | dřevní pelety | podle parního vyvíječe |
| Max. tlak vstupní páry [Mpa] | 3 | 1,5 |
| Max. teplota vstupní páry [°C] | 350 | 210 |



Obr. 5: Jednotky s parním motorem, zleva: Bison-powerblock [10], PM-VS [11]

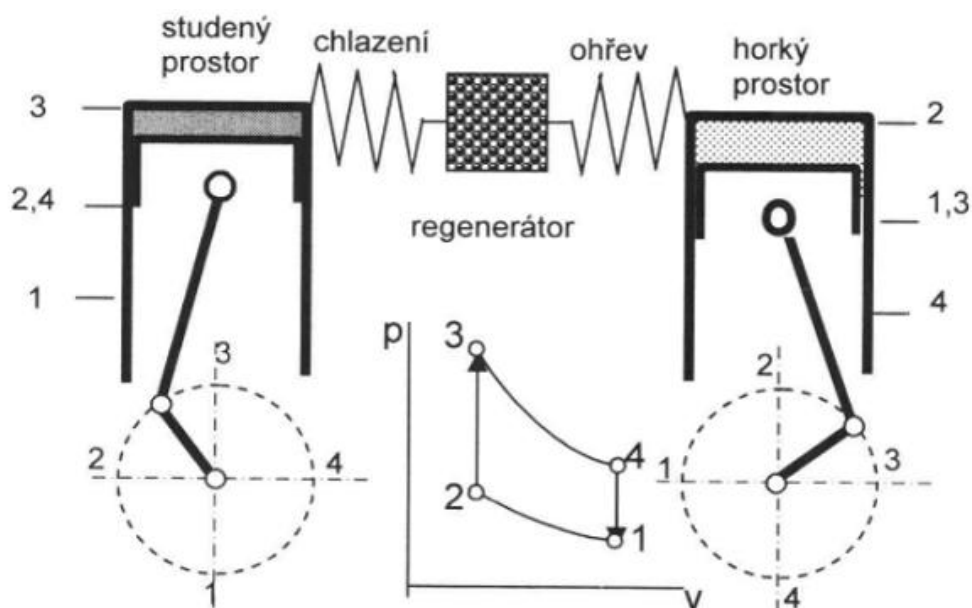
4.2 Stirlingův motor

Stirlingův (teplovzdušný) motor je dalším zástupcem tepelných strojů s vnějším spalováním. Patentován byl již v roce 1816 skotským pastorem Robertem Stirlingem. Ze začátku byl využíván v mnoha aplikacích, ale postupně byl vytlačen spalovacími motory s vnitřním spalováním, které mají jednodušší konstrukci a větší poměr výkon/hmotnost. V posledních 20 letech se vývoj v oblasti tohoto motoru soustřeďuje na stacionární využití v mikrokogeneraci. Důvodem je možnost použití jakéhokoliv typu paliva dokonce i slunečního záření [12].

4.2.1 Konstrukce a princip činnosti

Stirlingův motor se skládá ze dvou vzájemně propojených zdvihových prostorů, ve kterých se nachází písty a pracovní látka. Tou bývá nejčastěji inertní plyn, např. helium, ale používá se i vodík, dusík nebo vzduch. Protože se pracovní látka nevyměňuje, pouze přemísťuje z jednoho zdvihového prostoru do druhého, nazývá se tento oběh uzavřený. Dalšími hlavními částmi motoru pak jsou ohřívák, chladič a regenerátor. Ohřívák a chladič jsou povrchové tepelné výměníky, které slouží k přivádění tepla pracovní látce ze spalin nebo koncentrovaných slunečních paprsků, respektive k odvádění tepla z pracovní látky pryč. Regenerátor je tepelný výměník umístěný mezi ohřívák a chladič. Při průchodu pracovní látky z teplé části motoru do studené se matrice regenerátoru nahřeje a zároveň tak předchladí daný plyn. Díky tomu se v chladiči musí odvézt menší množství tepla. Naopak při průchodu ze studené části do teplé se pracovní plyn předehřeje z matrice regenerátoru, čímž se regenerátor vybijí a je připraven pro nový cyklus. V ohříváku je pak nutné dodat menší množství tepla, než by bylo zapotřebí v motoru bez regenerátoru. Tento proces pak zvyšuje celkovou účinnost cyklu [12].

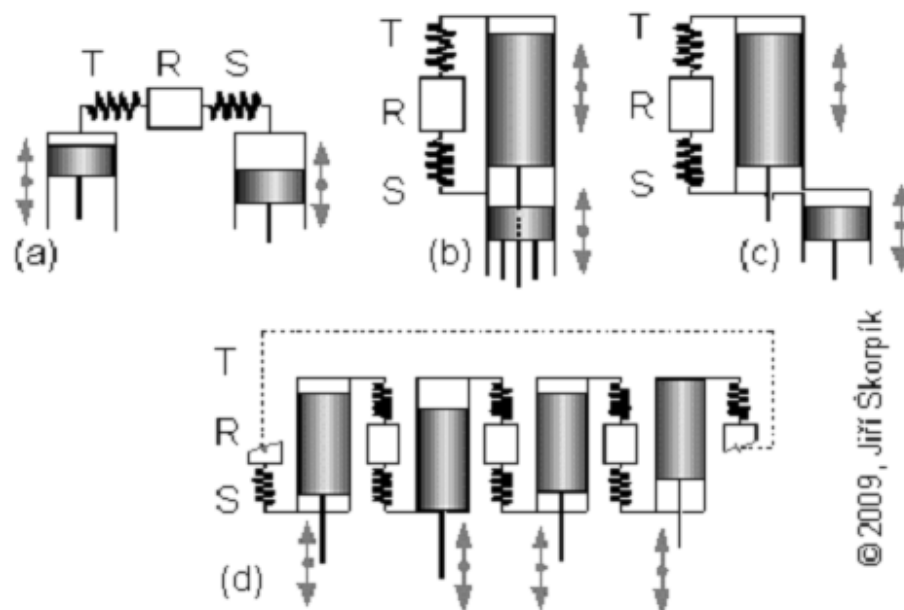
Princip činnosti můžeme sledovat na obr. 6. Hřídele se vůči sobě pohybují synchronně, ale kliky jsou pootočené o 90°. V poloze 1 se píst na studené straně motoru nachází v dolní úvratí, tudíž je celý pracovní prostor válce vyplněn studenou pracovní látkou. Horký prostor ve druhém válci je naplněn přibližně do poloviny. Při pohybu pístů do polohy 2 dochází k vytlačení plynu přes regenerátor a chladič do studeného válce, čímž se médium ochladí. Současně v levém válci dochází ke stlačení plynu. Tato komprese je ideálně izotermická. Pracovní látka nyní zaujímá pouze 1/2 studeného pracovního prostoru. Mezi body 2 a 3 je médium pouze přetlačováno přes regenerátor a ohřívák do horké komory (izochorická komprese). Když se všechny pracovní plyn přetlačí do pravého válce, zaujímá stále stejný objem, ale má daleko větší teplotu a tudíž i tlak. V tomto momentě začne médium expandovat a tlačit písty do polohy 4. Tento děj se blíží izotermické expanzi. V poloze 4 tak plyn zabírá celý objem pravého válce a přibližně polovinu levého. Následuje izochorická expanze, kdy je většina pracovní látky přetlačena do studeného válce a cyklus se dostane do původní polohy 1 [5].



Obr. 6: Schéma Stirlingova motoru [5]

Podle konstrukčního uspořádání rozlišujeme několik modifikací Stirlingova motoru. Koncepčně nejjednodušší je modifikace α . Jedná se o motor se dvěma válci jako na obr. 6 s tím rozdílem, že obě ojnice jsou připojeny na jednu hřídel. U modifikace β je pouze jeden válec, ve kterém se nacházejí 2 písty. Jeden píst je pracovní a druhý slouží pouze k přemísťování pracovní látky z chladné části válce do teplé. Modifikace γ funguje stejně jako modifikace β . Rozdíly jsou v tom, že γ -modifikace má dva válce a objem válce na studené straně nemůže být nikdy nulový. Dvojčinný Stirlingův motor je založen na modifikaci α , kdy se využívá i prostor pod pístem. Tento prostor (studená část) je spojený s teplým prostorem dalšího válce [12].

V kogeneraci je motor spojen hřídelí s elektrickým generátorem. K vytápění a ohřevu TUV se využívá teplo odváděné chladičem, popřípadě může být další tepelný výměník umístěn do proudu spalin.



Obr. 7: Základní modifikace Stirlingova motoru [12]

(a) – α -modifikace, (b) – β -modifikace, (c) – γ -modifikace, (d) – dvojčinný motor, T – teplá strana, S – studená strana, R – regenerátor

4.2.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- použití jakéhokoliv paliva,
- nižší servisní náklady díky dlouhým servisním intervalům,
- vysoká spolehlivost,
- tichý chod,
- nižší emise než u spalovacích motorů s vnitřním spalováním,
- nulová spotřeba oleje.

Nevýhody:

- problémy s těsněním tlakového prostoru válců a únikem pracovní látky,
- obtížná regulace výkonu,
- trvalé tepelné namáhání ohříváku,
- vysoký plnicí tlak pracovního plynu,
- vyšší cena kvůli použitým materiálům, technologickým postupům a náročnější montáži.

4.2.3 Jednotky na trhu

Vývojem jednotek na bázi Stirlingova motoru spalující biomasu se v uplynulých letech zabývala spousta firem. Technické problémy a vysoká pořizovací cena však zatím zmařily jakýkoliv pokus o hromadnou sériovou výrobu. Pár kusů instalovala dánská firma Stirling DK, na americkém trhu nabízí svůj výrobek firma Stirling Biopower. U české firmy Tedom z Třebíče a švýcarské firmy Stirling Systems došlo k testování jednotek v praxi, vývoj byl však pozastaven a jednotky se na trhu zatím neobjevily. Firma Sunmachine z Rakouska nemůže svoji jednotku prodávat kvůli insolvenční podané na její německou předchůdkyni.

Tab. 4: Technické údaje vybraných jednotek se Stirlingovým motorem [13], [14], [15]

| Firma | Sunmachnine | Stirling Systems | Stirling DK |
|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| Název jednotky | Sunmachine Pellet | SOLO Stirling 161 | SD4 |
| Elektrický výkon [kW] | 1,5–3 | 2–9,5 | 35 |
| Tepelný výkon [kW] | 4,5–10,5 | 8–26 | 140 |
| Palivo | dřevní pelety | dřevní pelety | dřevní štěrpa, bioplyn |
| Elektrická účinnost [%] | 20–25 | 22–24,5 | 17,5 |
| Celková účinnost [%] | cca 90 | 92–96 | 89,2 |
| Použité médium | | helium | helium |



Obr. 8: Jednotky se Stirlingovým motorem, zleva: Stirling DK-SD4 [15], Sunmachine Pellet [13], Tedom 180V1 [16], SOLO Stirling 161 [14]

4.3 Parní turbína

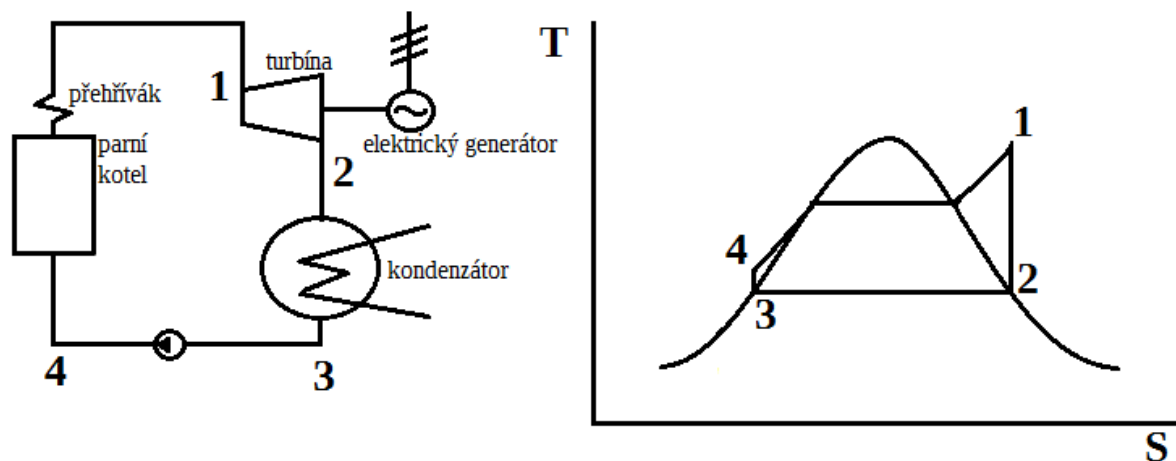
Parní turbíny jsou dnes nepoužívanější technologií na výrobu elektrické energie. Jsou jednou ze základních částí zařízení tepelných a jaderných elektráren a většiny tepláren. Ve velké energetice nahradily ostatní technologie krátce po svém vynalezení na počátku 20. století. Pro kogeneraci o velkém výkonu se používají parní protitlaké turbíny nebo turbíny s regulovaným odběrem páry. Uplatnění parních turbín v mikrokogeneraci není příliš rozšířeno. Důvodem jsou velké okrajové ztráty při malých konstrukčních rozměrech lopatek. Rozšířenější je využití malých parních turbín při redukcí páry, kde jsou i malé dosažené účinnosti lepší než úplné maření energie ve škrtkách ventilech.

4.3.1 Konstrukce a princip činnosti

Parní turbína je rotační stroj skládající se ze statorové a rotorové části. Na rozváděcích (statorových) lopátkách dochází ke kontinuální změně entalpie na kinetickou energii proudící páry. Silovým působením takto urychlené páry na profily rotorových lopatek vzniká krouticí moment, který se hřídelí přenáší na elektrický generátor. Pára pak odchází do kondenzátoru, kde předá své teplo otopnému médiu. Voda z kondenzátoru putuje do parního kotle, kde dochází k výparu. Takovýto cyklus se jmenuje Rankinův-Clausiusův cyklus (RC oběh).

Pro malé průtoky páry, entalpické spády a tudíž i malé výkony se většinou používají jednostupňové turbíny. V současné době se používají turbíny následujících konstrukcí:

- axiální turbíny s akčním nebo Curtisovým stupněm přímo spojené s generátorem,
- vysokootáčkové axiální a radiální turbíny spojeny s generátorem přes převodovku,
- radiální turbíny spojeny s vysokootáčkovým generátorem [5].



Obr. 9: Schéma oběhu s parní turbínou a RC cyklus v T-S diagramu

Velkou nevýhodou u parních turbín o malém výkonu je jejich nízká termodynamická účinnost. Krátké lopatky u takto malých turbín jsou daleko více ovlivněny mezní vrstvou turbulentního proudění páry než lopatky dlouhé u turbín o velkém výkonu.

4.3.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- lze použít jakékoliv palivo,
- dlouhá životnost.

Nevýhody:

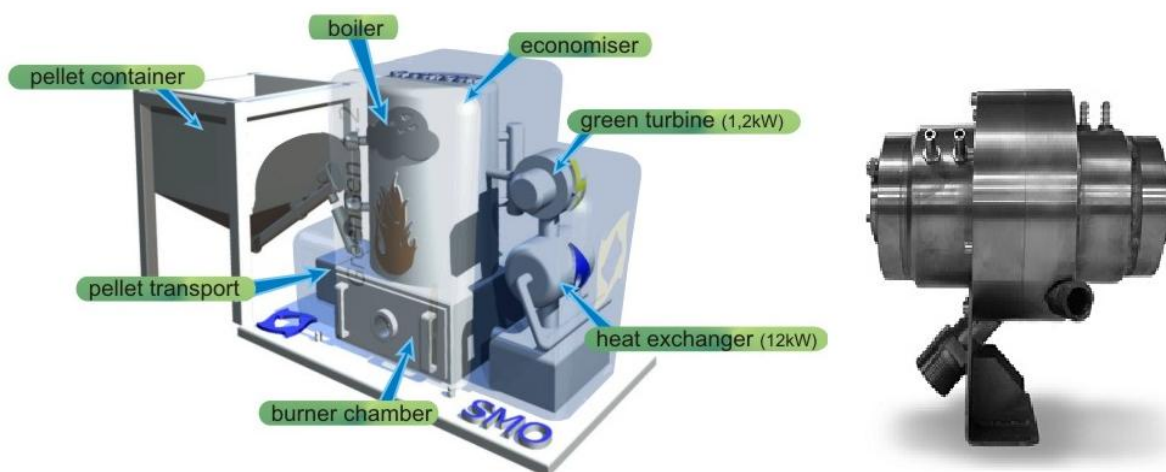
- malá elektrická účinnost a malý teplárenský modul,
- velké investiční náklady,
- úprava vody.

4.3.3 Jednotky na trhu

Donedávna nebyly na trhu kromě točivých redukcí žádné parní turbíny, které by se daly výkonově použít v mikrokogenerační technologii. To se změnilo v roce 2008, kdy si nizozemská firma GREEN TURBINE™ nechala patentovat svou parní turbínu o výkonu 1,2 kW. V tělese turbíny je rovnou zabudovaný i generátor. Firma dále nabízí jednotku o výkonu 2,5 kW a ve vývoji je i 15kW turbína. Společně s belgickou firmou SMO bvba hodlá GREEN TURBINE™ na podzim 2013 začít prodávat kompletní mikrokogenerační jednotku GreenGen na dřevní pelety.

Tab. 5: Technické údaje jednotek GreenGen [17], [18]

| Název firem | GREEN TURBINE™ a SMO bvba |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Název jednotek | GreenGen 1.2/2.5 |
| Elektrický výkon [kW] | 1,2 / 2,5 |
| Tepelný výkon [kW] | 15 / 30 |
| Elektrická účinnost [%] | 7,5 |
| Celková účinnost [%] | >92 |
| Vstupní tlak páry do turbíny [MPa] | 0,52 |
| Vstupní teplota páry do turbíny [°C] | 200 |



Obr. 10: Jednotka GreenGen 1.2 [17] a parní turbína Green Turbine 1.2 [18]

4.4 ORC cyklus

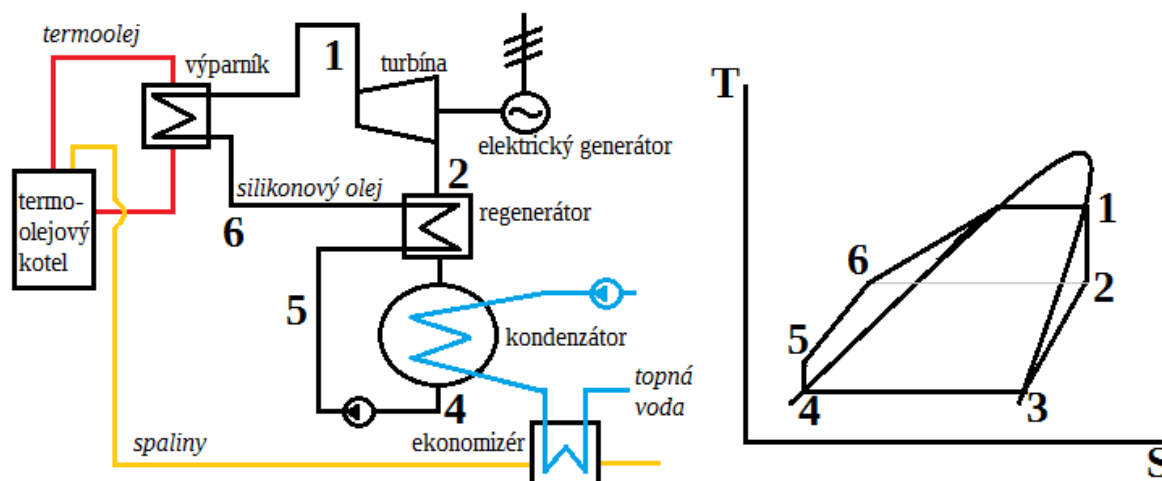
ORC, neboli Organický Rankinův-Clausiusův cyklus, je obdobou RC cyklu s parní turbínou. Rozdíl je v použitém médiu. Zatímco RC cyklus využívá vodu respektive vodní páru, v ORC zařízení jsou použity organické látky – oleje. Výhodou je, že i při nižších výstupních parametrech (teplota, tlak) z výparníku, mají tyto speciální oleje velký měrný objem. Díky tomu mohou být použity v turbíně delší lopatky, které nejsou tolik ovlivněny mezní vrstvou proudění. „Pokud zohledníme potenciální možnosti pro nasazení ORC v ČR,

lze uvažovat zejména s aplikacemi pro výrobu elektrické energie v menších a středních zdrojích spalujících biomasu, kde s ohledem na velikost kotle a kvalitu biomasy není možno vyrábět vysokotlakou přehřátou vodní páru“ [4].

4.4.1 Konstrukce a princip činnosti

ORC jednotka má dva okruhy. V prvním okruhu se v kotli ohřívá termoolej přibližně na 300 °C. Tento olej předává své teplo ve výparníku silikonovému oleji, který je pracovním médiem ve druhém okruhu. Vypařený silikonový olej se přivede na pomaloběžnou turbínu, kde expanduje a koná práci. Díky specifickým termodynamickým vlastnostem končí expanze v oblasti přehřáté páry, tudíž odpadá problém s erozí lopatek kapičkami mokré páry. Pára za turbínou prochází regenerátorem, kde ohřívá z kondenzovaného silikonového oleje před vstupem do výparníku. Poté již pára vstupuje do kondenzátoru. Tepelná energie se transportuje vodou, která nejprve ochlazuje páry silikonového oleje v kondenzátoru a následně jí je dodáno v ekonomizéru teplo ze spalín.

Kromě silikonového oleje může být použita v sekundárním okruhu spousta jiných organických látek, jako jsou alkany, freony, pentan, toluen, čpavek, atd. Musí se však jednat o látky chemicky stabilní a neagresivní vzhledem k použitým materiálům. Volba vhodného média závisí především na vstupních a výstupních teplotách cyklu a na dostupnosti dané látky na trhu. Takovéto médium se v cyklu nemusí nijak upravovat a navíc může sloužit zároveň k mazání turbíny.



Obr. 11: Schéma ORC zařízení a cyklus v T-S diagramu

4.4.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- využití při nižších teplotách a tlacích pracovního média,
- lze využít jakékoliv palivo nebo využít nízkopotenciální odpadní teplo,
- expanze do oblasti přehřáté páry,
- dlouhá životnost,
- dobrá regulovatelnost,
- díky nízkým otáčkám absence převodovky,
- vyšší účinnost oproti cyklu s vodní párou pro nižší výkonnostní parametry.

Nevýhody:

- pořizovací cena,
- složitost cyklu,
- nároky na těsnost,
- menší bezpečnost kvůli použití hořlavých olejů.

4.4.3 Jednotky na trhu

Na trhu s ORC mikrokogeneračními jednotkami se objevují hlavně americké firmy. Jedná se například o společnosti ElectraTherm a Infinity Turbine LLC. Vývojem v této oblasti se zabývá i česká firma MikroORC Systémy s.r.o. Její jednotka MikroORC Unit je zatím stále testována, proto se ještě nevyskytuje na trhu.

Jednotka Green Machine od ElectraThermu pracuje v rozmezí elektrického výkonu od 20 do 65 kW. Tři tato zařízení jsou instalována i v České republice, a to v Moravské Třebové, Břeclavi a Strážnicích. Firma Infinity Turbine LLC nabízí tři výkonové řady svých ORC zařízení. Jsou to jednotky ITmini s výkonem do 0,9 kW, IT10 s výkonem 10 kW a IT50 s výkonem 60 kW (z toho 10 kW slouží k vlastní spotřebě).



Obr. 12: ORC jednotky, zleva: Green Machine [19], IT10 [20], MikroORC Unit [21]

4.5 Spalovací motory

Spalovací pístové motory jsou obecně známé z automobilového průmyslu. Velice hojně využívaná je však i jejich stacionární aplikace v podobě kogeneračních jednotek. V oblastech malých a středních výkonů je tato technologie u zařízení KVET vůbec nejpoužívanější. Obdobně jako u automobilů se i v kogeneraci uplatňují jak vznětové tak zážehové motory. V obou případech se jedná o objemové stroje s vnitřním spalováním, jejichž pracovní cyklus se periodicky opakuje. Vnitřní spalování vyžaduje plynná nebo kapalná paliva, jako jsou např. zemní plyn nebo topné oleje. S výhodou se pak jednotky na bázi spalovacích motorů uplatňují tam, kde vznikají plynná paliva jako produkt různých biochemických procesů. Takovými místy jsou čistírny odpadních vod, skládky nebo bioplynové stanice. V oblastech, kde nejsou primárně dostupná plynná nebo kapalná paliva, lze také využívat spalovací motory. Součástí zařízení pak ale musí být i aparát k transformaci pevných paliv na paliva plynná nebo kapalná.

4.5.1 Způsoby transformace pevných paliv

Jak už bylo zmíněno výše, transformovat můžeme oba nejčastěji používaná pevná paliva – uhlí i biomasu. Pro přeměnění uhlí na kapalně palivo se používají metody *hydrogenace a extrakce*. Tyto metody jsou však technologicky i finančně dosti nákladné,

proto se nepředpokládá, že by byly záměrně aplikované spolu s mikrokogenerační jednotkou. Využití v této oblasti tak lze předpokládat pouze pro proces *zplyňování*. Tento proces má stejný princip jak u uhlí tak biomasy (viz níže).

Nejjednodušším způsobem získání energoplynu (plyn vzniklý zplyňovacím procesem) je *zplyňování v generátoru s pevným ložem*. Do generátoru je za atmosférického tlaku přivedeno palivo společně se zplyňovacím médiem (nejčastěji vzduch) v podstechiometrickém množství. Při teplotě přibližně 500 °C pak dochází k nedokonalému spalování, přičemž vznikají plynné produkty, které je dále možno využít. Tento plyn obsahuje CO, CO₂, CH₄, H₂, N₂, vodní páru a malé množství nerozložených nižších uhlovodíků. Dále se v něm však vyskytují nežádoucí pevné zbytky po spalování a vyšší uhlovodíky jako dehet či fenoly, které se před použitím v kogenerační jednotce musejí odstranit. Při zplyňování pomocí vzduchu má takto vzniklý energoplyn výhřevnost 4–6 MJ/m_N³, což je dáno velkým obsahem dusíku. Pokud bychom zplyňovali kyslíkem, byla by průměrná výhřevnost 14–18 MJ/m_N³. Podle způsobu přívodu zplyňovacího média vzhledem k sesuvnému pohybu paliva rozlišujeme generátory na souproude a protiproude [22].

Pokročilejším způsobem získávání energoplynu je *zplyňování ve fluidních generátorech*. Ke zplyňování dochází ve fluidní vrstvě při teplotách 850 °C až 1000 °C. Při těchto teplotách dochází k rozložení fenolů a dehtů na spalitelné plyny, získaný energoplyn tak má vyšší čistotu i vyšší výhřevnost (při zplyňování za pomoci vzduchu až 8 MJ/m_N³). Nejčastěji se dnes používají fluidní generátory pracující za atmosférického tlaku, ale existují i generátory zplyňující při tlaku 2,5 MPa. Oba druhy se aplikují u jednotek vyšších výkonů, než je tomu u generátoru s pevným ložem [23].

Dalším termickým způsobem pro transformaci biomasy je *pyrolýza*. Jedná se o fyzikálně-chemický děj za nepřístupu médií obsahující kyslík. Podstatou je ohřev biomateriálu na teplotu, kdy se začnou přítomné organické látky štěpit na jednodušší molekuly. V závislosti na teplotě můžeme pozorovat tři části tohoto procesu: do 200 °C probíhá vysoušení a výpar vody. V rozmezí 200 °C až 500 °C dochází k odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních látek za vzniku plynných a kapalných organických produktů, přičemž většina uhlíku setrvává v pevné formě. V poslední fázi při teplotách 500 °C až 1200 °C dochází k rozštěpení zbylých kapalných látek a pevného uhlíku na stabilní plyny [24]. Na stejném principu funguje i *rychlá pyrolýza*. Rozdíl je v rychlosti jednotlivých dějů. U rychlé pyrolýzy dochází k extrémně rychlému přívodu tepla do suroviny, krátkému pozdržení vzniklých par v reakční zóně a co nejrychlejšímu ochlazení. Tímto postupem získáme kapalný pyrolytický olej (bio-olej), který má výhřevnost 16–19 MJ/m_N³ [25].

Kromě termických způsobů přeměny biomasy existují dále biochemické procesy jako *alkoholové kvašení* nebo *anaerobní fermentace*.

Při *alkoholovém kvašení* dochází k přeměně glukózy, fruktózy nebo sacharózy na etylalkohol a oxid uhličitý působením enzymu obsažených v kvasinkách. Tento proces probíhá bez přístupu vzduchu. Alkohol je produkován jako odpadní látka, a nad určitou úroveň koncentrace je pro kvasinky toxický, proto ho musíme odvádět, nejlépe kontinuálně. Využit pak lze přímo jako palivo kogeneračních jednotek.

Anaerobní fermentace je proces využívaný v bioplynových stanicích. Jedná se o mikrobiologickou přeměnu zvířecích exkrementů a jiné vhodné biomasy na bioplyn. Proces probíhá za anaerobních podmínek při teplotě okolo 35 °C. To je teplota přirozeného prostředí bakterií, produkujících při svých metabolických pochodech bioplyn. Z toho důvodu se jedná o podmínky, kdy jsou zmíněné bakterie neaktivnější. Kromě využitelného plynu vznikne i stabilizovaný hnůj, který lze použít v zemědělství. Rozlišujeme dva druhy anaerobní fermentace – mokrá a suchá. *Mokrý způsob* je vhodný pro biomasu s velkým obsahem vody, jako je kejda z vepřínů a drůbežáren. V homogenizační nádrži se tato odpadní biomasa smíchá s vodou a vytvoří se tak čerpatelný substrát, který se přivede do bioreaktoru, kde probíhá samotný fermentační proces. Bioplyn se shromažďuje u střechy reaktoru a je odváděn do

zásobníku. Tekutý zbytek se rozdělí na kvalitní hnojivo a cirkulační vodu, která je vedena zpět do homogenizační nádrže. Tento proces je kontinuální, proto se hodí pro větší bioplynové stanice. Naproti tomu *suchý způsob* je cyklický. Méně vlhká biomasa, např. slamnatá kravská mrva, je umístěna do válcového koše. Po naplnění se tento koš uzavře zvonem a utěsní. Díky metabolismu bakterií se zvýší teplota na optimální teplotu, při které bude opět docházet k uvolňování největšího množství bioplynu. Ten je odváděn z prostoru pod zvonem do zásobníku. Přibližně po měsíci dojde k ustávání tvorby bioplynu a snížení teploty v reaktoru. Po odklopení zvonu lze vyndat z koše zbytek biomasy ve formě kvalitního hnoje [25].

4.5.2 Konstrukce a princip činnosti

Stacionární pístové spalovací motory vycházejí z klasických mobilních spalovacích motorů. Jsou však speciálně uzpůsobeny jiným pracovním podmínkám. Aby se zajistila vysoká spolehlivost a dlouhá životnost, mají stacionární motory masivnější konstrukci a pracují při konstantních nízkých otáčkách. Navíc díky tomu může být motor spojen s generátorem přímo bez převodovky. Další úpravy se pak týkají palivového systému a spalovacího prostoru.

Princip činnosti je ale stejný jako u mobilních motorů. U zážehových motorů se nejprve do oblasti válce nasává směs paliva se vzduchem, kterou následně stlačí píst. K zapálení směsi pak dojde elektrickou jiskrou. U vznětových motorů se ve válci nejprve stlačí vzduch, čímž stoupne jeho teplota. Poté dojde ke vstřiku paliva do válce, kde se vlivem vysoké teploty samo vznítí. Následující fáze jsou již shodné pro oba typy motorů. Zapálená směs paliva a vzduchu expanduje a přitom tlačí na píst, který je přes ojnici a klikovou hřídel spojen s elektrickým generátorem. Tak se tlaková energie přeměňuje na mechanickou a posléze elektrickou. Poslední fází je pak výfuk spalin.

Teplu potřebné pro vytápění a ohřev TUV se získává ve dvou stupních. V prvním stupni jsou zařazeny výměníky oleje a bloku motoru. Ve druhém stupni je topná voda popřípadě TUV ohřívána spalinovým výměníkem, který dává zhruba 50% podíl na tepelném výkonu jednotky.

V případě spalování sekundárně vzniklých tekutých paliv je důležitou součástí MKJ technologie na úpravu a čištění paliva před vstupem do motoru. Například při využití zplyňování se musí výsledný energoplyn ochladit na určitou teplotu, mechanicky zbavit prachových částic použitím cyklonu nebo filtru, a také je třeba zredukovat obsah dehtu na co nejnižší mez. K odstranění dehtu se používají katalytické metody nebo mokré vypírky (vodou, olejem). V opačném případě by mohlo dojít k poruše motoru v důsledku abraze, zanesení dehtem, korozi, atd.

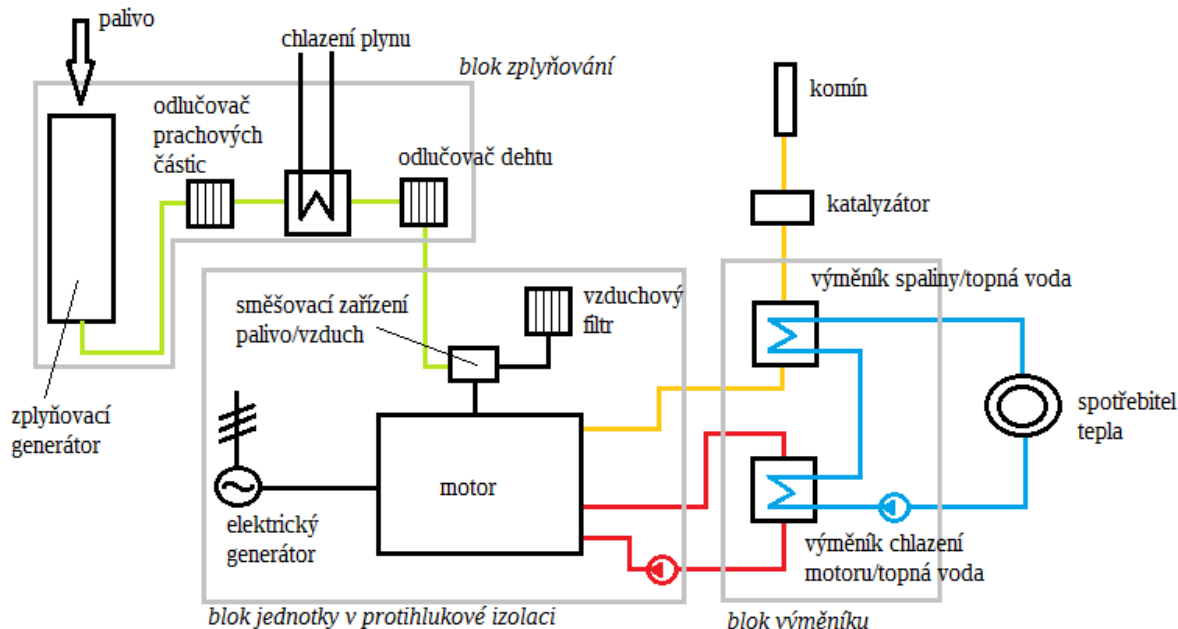
Tab. 6: Požadavky na kvalitu plynu pro pístové spalovací motory [22], [26]

| | |
|--|---------|
| Max. relativní vlhkost [%] | 80 |
| Max. přívodní teplota [°C] | 40 |
| Max. obsah NH ₃ [mg/m _N ³] | <50 |
| Max. obsah dehtu [mg/m _N ³] | <50 |
| Max. obsah H ₂ S [mg/m _N ³] | <50 |
| Max. obsah prachových částic [mg/m _N ³] | <5 (50) |

Z důvodu tvorby relativně velkého množství oxidů dusíku při spalování za vysokých teplot ve spalovacím motoru je neméně důležitým prvkem čištění spalin. Primární opatření proti vzniku oxidů dusíku, oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků jsou konstrukční přizpůsobení motoru jako optimalizace pracovního prostoru válců, odstranění mrtvých

koutů, ..., nebo optimalizace provozních parametrů, do kterých lze počítat zvýšení přebytku vzduchu, optimální nastavení zážehu, aj. Sekundárním opatřením je samotné čištění spalin pomocí oxidačního katalyzátoru.

„Provozem spalovacích motorů vznikají nevyvážené síly a tyto motory proto potřebují speciálně navržené uložení na základ absorbuující vzniklé vibrace. Problémem je také hluk, zejména nízkofrekvenční složky, které mají nepříjemný dopad na lidský sluch. Motory je proto nutné vybavit kvalitní hlukovou izolací“ [5].



Obr. 13: Schéma jednotky se spalovacím motorem a zplyňovacím generátorem.

4.5.3 Výhody a nevýhody

Výhody:

- rychlé najetí a odstávka,
- velká regulace výkonu,
- vysoká elektrická účinnost a teplotní modul i u jednotek nižších výkonů,
- nízké investiční náklady na instalovaný výkon.

Nevýhody:

- spalování pouze plyných nebo kapalných paliv,
- větší hlučnost a vibrace,
- častější servis,
- větší opotřebení pohyblivých dílů,
- větší spotřeba oleje,
- u sekundárně získaných paliv je nutná úprava tohoto paliva před vstupem do motoru,
- vznik NO_x .

4.5.4 Jednotky na trhu

Kompletní mikrokogenerační jednotky se spalovacím motorem a zplyňovacím generátorem se na českém trhu zatím nevyskytují. Takovéto jednotky se dají zakoupit na americkém trhu, kde je nabízí například firma Victory Gasworks nebo ALL Power Labs. V Evropě se výrobou MKJ na bázi zplyňování zabývá finská společnost Volter. Domácí firmy prozatím nabízejí mikrokogenerační jednotky pouze na bioplyn. Lídři v tomto směru jsou

firmy Tedom a.s. a Motorgas s.r.o. S technologií založenou na zplyňování by měla přijít brněnská firma GB Consulting, s.r.o., která vyvíjí zplyňovač zaručující téměř nulové hodnoty dehtu ve výsledném energoplynu.

Tab. 7: Vybrané jednotky se spalovacími motory [27], [28], [29], [30], [31]

| Název firmy | Tedom a.s. | Motorgas s.r.o. | Victory Gasworks | ALL Power Labs | Volter |
|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| Název jednotky | Mikro T30 | MGM 40 | Victory grid | Power pallets | Volter 30 |
| Palivo | bioplyn | bioplyn | dřevní štěpka | dřevní štěpka | dřevní štěpka |
| Množství paliva [1/kWh _e] | 0,5 m _N ³ | 0,5 m _N ³ | 1,2 kg | 1,2 kg | 1 kg |
| Elektrický výkon [kW] | 25 | 28,9 | 5 | 10/20 | 30 |
| Tepelný výkon [kW] | 47,5 | 43,3 | | 30/60 | 80 |
| Elektrická účinnost [%] | 31,6 | 30,7 | | 20 | 21–23 |
| Celková účinnost [%] | 91,6 | 76,8 | | 80–90 | 80–90 |



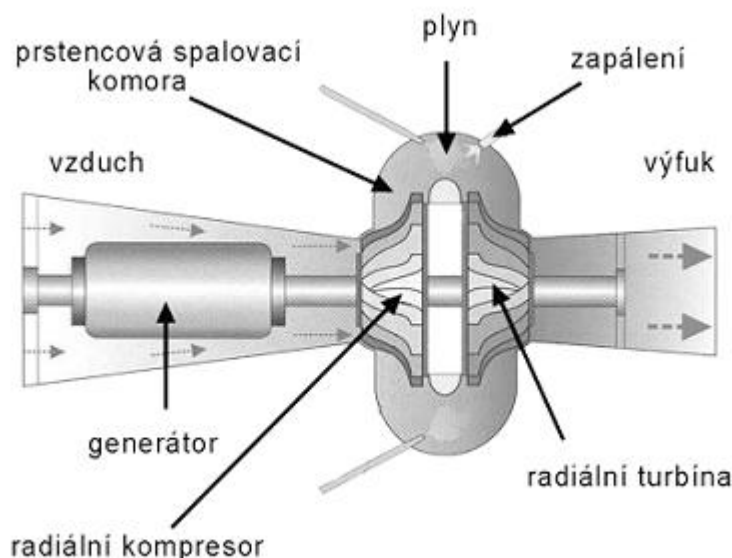
Obr. 14: Jednotky se spalovacími motory, postupně: MGM 40 [28], Volter 30 [31], Power Pallets [30], Mikro T30 [27], Victory grid [29]

4.6 Mikroturbíny

Jako mikroturbíny jsou označovány vysokootáčkové jednostupňové spalovací turbíny do výkonu 250 kW_e. Jedná se o relativně novou technologii s vnitřním spalováním, která by měla konkurovat v oblasti mikrokogenerace a malé kogenerace spalovacím motorům. Vysoká pořizovací cena zatím brání výraznějšímu rozmachu mikroturbín. Ty však mají na rozdíl od spalovacích motorů daleko vyšší potenciál rozvoje.

4.6.1 Konstrukce a princip činnosti

Spalovací vzduch je přiváděn přes jednostupňový radiální kompresor do spalovací komory, kde se mísí s palivem. Pokud je toto palivo plynné, je zapotřebí ho také stlačit na požadovanou hodnotu. Směs ve spalovací komoře následně shoří a horké spaliny expandují na jednostupňové radiální turbíně. Turbína a kompresor jsou na společné hřídeli s rotorem vysokofrekvenčního generátoru. Pro využití elektrické energie je zapotřebí za generátor zařadit měnič frekvence. Teplo odcházejících spalin se využívá na předehřev spalovacího vzduchu (rekuperace tepla) a ohřev otopné vody a TUV. Díky vzduchovým ložiskům a jedinému pohyblivému dílu mají mikroturbíny dobrou spolehlivost, nízké provozní náklady a jednodušší obsluhu.



Obr. 15: Schéma radiální mikroturbíny [32]

Kromě klasických plynných paliv (zemní plyn) a kapalných paliv ve formě aerosolu se pro pohon mikroturbín používá spalování bioplynu vznikajícího v bioplynových stanicích, čističkách odpadních vod, nebo skládkový plyn vznikající rozkladem odpadu. Možné je i použití energoplynu. Ten však musí být podobně jako u spalovacích motorů před vstupem důkladně vyčištěn. V případě mikroturbín se klade větší důraz na odstranění prachových částic.

4.6.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- dlouhá životnost a spolehlivost (jeden pohyblivý díl),
- díky vzduchovým ložiskům odpadá olejové hospodářství,
- nižší množství spalin, hluku a vibrací než v případě spalovacích motorů,

- kompaktnost,
- možnost rychlých a častých startů a regulace výkonu.

Nevýhody:

- vysoká pořizovací cena,
- nižší elektrická i celková účinnost oproti spalovacím motorům.

4.6.3 Jednotky na trhu

Na trhu mikrokogeneračních jednotek s mikroturbínami se aktuálně vyskytuje pouze americká firma Capstone, která nabízí jednotku CR30 spalující bioplyn popřípadě skládkový plyn. Stejná firma vyrábí i jednotku o polovičním výkonu, která je zatím navržena pouze pro spalování zemního plynu. V příštím roce hodlá nizozemská firma Micro Turbine Technology B.V. dát do prodeje svoje zařízení Ener twin, které momentálně intenzivně testuje.

Tab. 8: Parametry kogeneračních jednotek s mikroturbínami [33], [34]

| Název firmy | Capstone | Micro Turbine Technology |
|-------------------------|----------|--------------------------|
| Název jednotky | CR30 | Ener twin |
| Elektrický výkon [kW] | 30 | 3 |
| Tepelný výkon [kW] | 60 | 14,4 |
| Elektrická účinnost [%] | 23–25 | 15 |
| Celková účinnost [%] | 68–70 | 87 |



Obr. 16: Zleva: jednotka a mikroturbína Capstone [33], jednotka Ener twin [34]

4.7 Další technologie

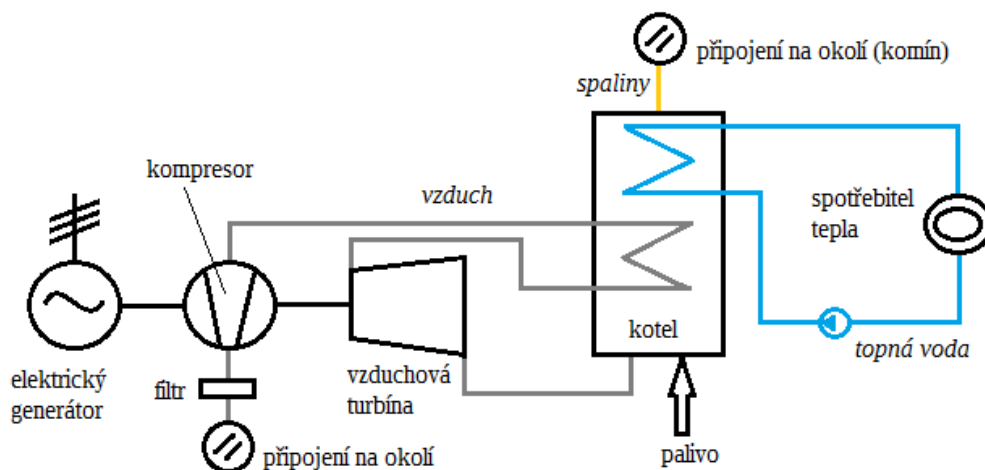
Kromě výše zmíněných kogeneračních technologií můžeme na trhu mikrojednotek objevit zařízení, která nejsou z pohledu dnešních spotřebitelů tolik vyhledávaná. Může to být z důvodu malé rozšířenosti, jako např. u vzduchových turbosoustrojí, nebo vysoké ceny v případě palivových článků, které jsou v intenzivním vývoji.

4.7.1 Systém Talbott

Společnost Talbott vyrobila mikrokogenerační jednotku využívající vzduchovou turbínu v modifikovaném cyklu běžné spalovací turbíny. Tato jednotka se skládá z kotle a vzduchové turbíny s kompresorem. Nasátý vzduch je stlačen kompresorem a veden do výměníku v kotli, kde je ohřán na přibližně 800 °C. Poté expanduje na vzduchové turbíně. Ta pohání společnou hřídeli kompresor a elektrický generátor. Teplý vzduch, který opouští turbínu, je použit jako spalovací vzduch v kotli. Kromě výměníku spaliny-vzduch je v kotli ještě výměník spaliny-voda, a tak získáváme i teplo [5].

Výhodami tohoto systému jsou možnost spalování různých typů paliv a při dobrém vyčištění vzduchu to, že nedochází k erozi lopatek turbíny (nemůžou se tam objevit kapičky). Na druhé straně má tato jednotka relativně větší rozměry a nižší elektrickou účinnost, protože stejně jako v případě spalovací turbíny pohání kromě generátoru i kompresor.

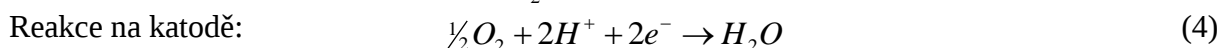
Dnes tato zařízení vyrábí na Slovensku společnost TESS s.r.o. pro mikrokogeneraci ve dvou variantách BG25 a BG50, které vyrobí 25 kW_e a 80 kW_t respektive 50 kW_e a 95 kW_t [35].

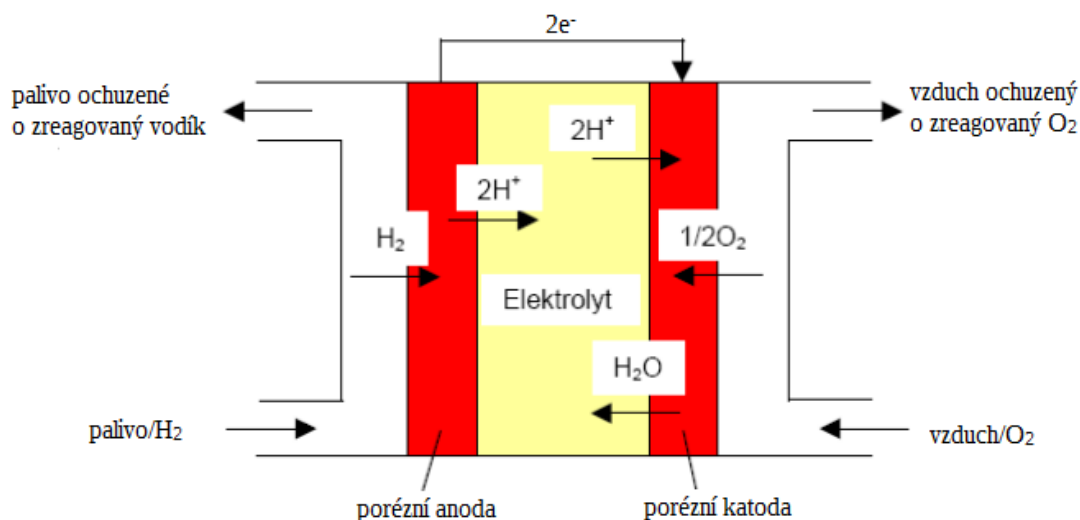


Obr. 17: Schéma systému Talbott

4.7.2 Palivový článek

Palivový článek je zařízení, které přímo přeměňuje chemickou energii paliva na energii elektrickou a teplo. Na porézní anodě za přítomnosti katalyzátoru dochází k rozložení molekuly vodíku na elektrony a protony (3). Protony pak putují skrz elektrolyt k porézní katodě a tím vzniká mezi elektrodami napětí. Pokud spojíme anodu a katodu uzavřenou smyčkou, bude jí procházet elektrický proud. Na porézní katodě opět za přítomnosti katalyzátoru probíhá syntéza protonů, elektronů a přiváděného kyslíku na vodní páru (4).





Obr. 18: Princip funkce palivového článku [4]

Palivové články můžeme rozdělovat podle dvou kategorií, a to podle pracovní teploty nebo použitého elektrolytu. Jejich stručný přehled je uveden v tab. 9.

Tab. 9: Přehled palivových článků [4]

| Článek | | | Elektrolyt | Pracovní teplota [°C] |
|-----------------|----------------------|-------|---------------------------------|-----------------------|
| Nízkoteplotní | Alkalický | AFC | roztok KOH/NAOH | 70–100 |
| | Membránový | PEMFC | iontoměničová membrána | 20–100 |
| Středněteplotní | Kyselý | PAFC | kyselina fosforečná | 170–200 |
| Vysokoteplotní | Z tavených karbonátů | MCFC | tavenina alkalických uhličitánů | 600–700 |
| | Z vodivých oxidů | SOFC | keramické oxidy zirkonia | 700–1 000 |

Výhodami palivových článků jsou především tichý chod (nepřítomnost pohyblivých částí), spolehlivost, ekologičnost (žádné nebo téměř žádné emise) a nízká náchylnost na krátkodobé přetížení. Mezi hlavní nevýhody můžeme zařadit vysoké investiční náklady, náchylnost katalyzátorů na nečistoty v palivu nebo okysličovadle a složitější palivové hospodářství. Vodík se na naší planetě v přírodě nevyskytuje samostatně a jeho získání je technologicky i finančně nákladné. Jakmile budeme schopni získat jednoduše a levně vodík, bude technologie palivových článků v mikrokogeneraci dominovat. Blízko k vyřešení otázky levného vodíku jsou vědci z univerzity ve Virginii (Virginia Tech), kteří zkoumají rozklad rostlinného cukru xylózy pomocí různých enzymů za vzniku velkého množství vodíku [36].

5 Technicko-ekonomická analýza zvolené MKJ u vybrané budovy

Účelem této technicko-ekonomické analýzy je vybrat vhodnou MKJ pro zvolený objekt a určit finanční návratnost investice spojené s pořízením takové jednotky. Pro správnou volbu MKJ je nutné určit návrhový tepelný výkon vybrané budovy a potřebu tepla pro vytápění a ohřev TUV. K samotné ekonomické analýze se využijí hodnoty spotřebované energie odečtené z faktur.

Zvoleným objektem je dvougenerační rodinný dům v obci Dolní Lutyně v Moravskoslezském kraji. Obec se nachází přibližně ve stejné nadmořské výšce jako 10 km vzdálené město Karviná, pro které jsou určeny klimatické údaje potřebné k výpočtu návrhového tepelného výkonu. Jedná se o objekt z roku 1974, který má dvě obytná patra a suterén. Budova je postavena tradiční zdící technologií používanou v době výstavby (betonové podlahy, škvárobetonové a cihlové obvodové a vnitřní zdivo). V roce 2000 došlo k zateplení dvou obvodových stěn a v roce 2005 byla původní okna vyměněna za plastová. Pro výrobu tepla na vytápění a ohřev TUV se používá plynový kotel a starší kotel na tuhá paliva. Mimo topnou sezónu se TUV připravuje přímo v akumulční nádrži, kde se ohřívá elektricky. Tento objekt byl zvolen, přestože je vytápěn zemním plynem. Důvodem bylo snadné získání dat o spotřebě energií a technických údajů o stavbě potřebných k ekonomické analýze. Pro tuto stavbu se vyhotoví modelový ekonomický rozbor při stávajícím vytápění. Tento rozbor bude porovnán s výsledky výpočtů prosté doby návratnosti pro případy, kdy by dům byl vytápěn jinými druhy paliv.



Obr. 19: Zvolený objekt z jihovýchodního a severozápadního pohledu

5.1 Tepelné ztráty objektu

Tepelné ztráty daného objektu byly spočteny zjednodušenou výpočtovou metodou dle normy ČSN EN 12831 [37]. Nejprve byly určeny součinitele prostupu tepla jednotlivých stavebních konstrukcí. Pro rovinnou konstrukci se součinitel prostupu tepla stanoví pomocí rovnice (5). V tab. 10 je ukázán postup výpočtu součinitele prostupu tepla pro zateplenou obvodovou stěnu v patře. Hodnoty součinitelů jednotlivých stavebních částí jsou uvedeny v tab. 11.

$$U_k = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}} \quad (5)$$

legenda: U_k [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – součinitel prostupu tepla
 R_{si} [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] – odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce

$R_{se} [m^2.K.W^{-1}]$ – odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce
 $d [m]$ – tloušťka vrstvy konstrukce
 $\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$ – součinitel tepelné vodivosti

Tab. 10: Výpočet součinitele prostupu tepla pro zvolenou konstrukci

| Zateplená obvodová stěna v patře | d | λ | R | U_k |
|---|-------------|-------------------|----------------|-------------------|
| | m | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | $m^2.K.W^{-1}$ | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| Odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce (vodorovný tepelný tok) | | | 0,25 | |
| Omítka vápenná | 0,02 | 0,88 | 0,023 | |
| Škvárobetonové tvárnice | 0,30 | 0,74 | 0,405 | |
| Malta cementová | 0,03 | 1,16 | 0,026 | |
| Cihla plná | 0,07 | 0,86 | 0,081 | |
| Materiály z minerální plsti | 0,05 | 0,079 | 0,633 | |
| Omítka vápenocementová | 0,03 | 0,99 | 0,03 | |
| Odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce (vodorovný tepelný tok) | | | 0,04 | |
| Celkem | 0,50 | | 1,488 | 0,672 |

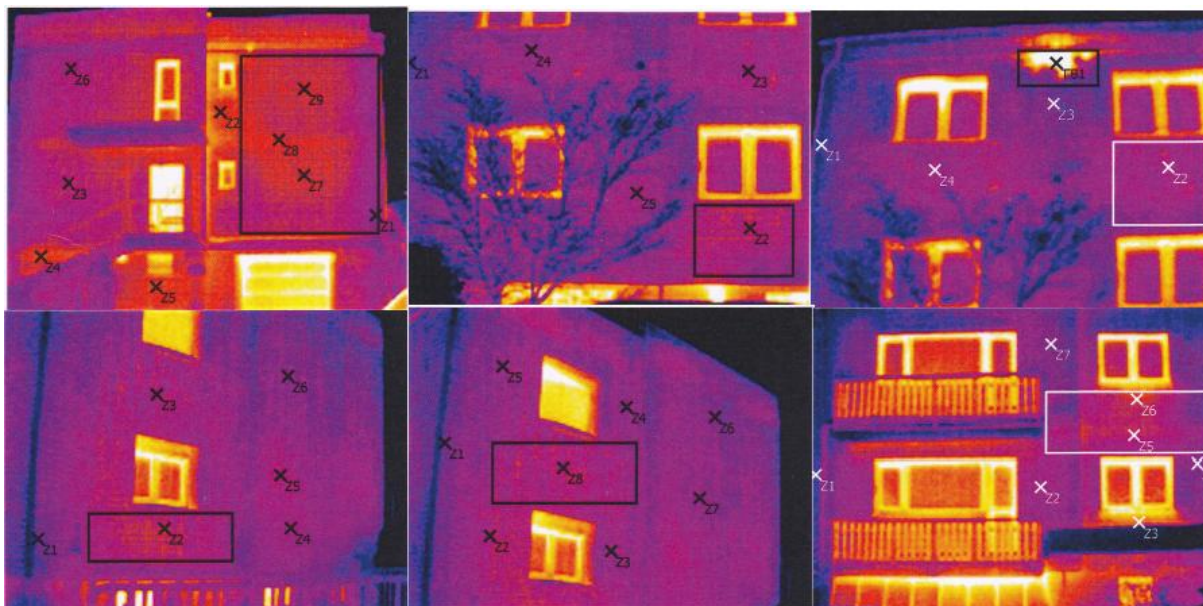
Tab. 11: Součinitele prostupu tepla jednotlivých stavebních částí

| Stavební část | $U_k [W.m^{-2}.K^{-1}]$ |
|--|-------------------------|
| Zateplená obvodová stěna v patře | 0,67 |
| Zateplená obvodová stěna v patře, zúžená | 0,78 |
| Nezateplená obvodová stěna v patře | 1,17 |
| Nezateplená obvodová stěna v patře, zúžená | 1,53 |
| Okna plastová | 1,20 |
| Dveře 1. patro | 2,13 |
| Střecha | 0,24 |
| Podlaha 1. patro | 1,51 |
| Obvodová stěna suterén | 1,24 |
| Obvodová stěna suterén do zeminy | 1,11 |
| Podlaha suterén | 2,55 |
| Dveře suterén | 2,30 |
| Dveře garáž | 2,29 |
| Luxfery | 2,33 |
| Okna skleněná | 5,66 |
| Stěna vnitřní | 1,51 |
| Dveře vnitřní | 2,80 |

Základem výpočtu zjednodušené metody je užití vnějších rozměrů pro návrhové tepelné ztráty prostupem a vnitřních rozměrů pro návrhové tepelné ztráty větráním a pro zátopový tepelný výkon. Vnější svislé rozměry jsou dány vzdáleností od povrchu podlahy. Vodorovné rozměry se stanovují od vnějšího povrchu u obvodových stěn a od středu stěny u vnitřních stěn.

Tepelné ztráty vytápěné místnosti prostupem tepla se vypočítají jako rozdíl venkovní a vnitřní výpočtové teploty násobené součinitelem tepelné ztráty prostupem (6). V rovnici se

vyskytuje teplotní korekční činitel pro stavební část f_k , který zohledňuje výskyt tepelných mostů v dané stavební části. Jeho hodnoty jsou uvedeny v příloze k normě [37]. Zda se jedná o stavební část s neizolovaným tepelným mostem, se ukázalo na termografických snímcích na obr. 20.



Obr. 20: Termografické snímky zvoleného objektu pro určení tepelných mostů

$$\Phi_{T,i} = (\theta_{int,i} - \theta_e) \sum_{k=1}^n f_k \cdot A_k \cdot U_k \quad (6)$$

legenda: $\Phi_{T,i}$ [W] – návrhová tepelná ztráta prostupem pro vytápěný prostor
 $\theta_{int,i}$ [°C] – vnitřní výpočtová teplota
 θ_e [°C] – venkovní výpočtová teplota
 A_k [m²] – plocha stavební části

Návrhová tepelná ztráta větráním se určí podle rovnice (7). Tento vztah platí pro objekty s přirozeným větráním. V soustavách s nuceným větráním rozhoduje o množství přiváděného vzduchu návrh a dimenzování větrací soustavy.

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \cdot V_i \cdot n_{min} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad (7)$$

legenda: $\Phi_{V,i}$ [W] – návrhová tepelná ztráta větráním pro vytápěný prostor
 V_i [m³] – objem vytápěného prostoru vypočítaný z vnitřních rozměrů
 n_{min} [h⁻¹] – nejmenší intenzita výměny venkovního vzduchu (hodnoty viz příloha k normě [37])

Zátopový tepelný výkon se vypočítá (8) jako součin podlahové plochy vytápěného prostoru A_i [m²] a zátopového součinitele f_{RH} [W.m⁻²], který závisí na druhu budovy, stavební konstrukci, době zátopu a předpokládaném poklesu vnitřní teploty během útlumu vytápění. Hodnoty zátopového součinitele jsou uvedeny v příloze k normě [37].

$$\Phi_{RH,i} = A_i \cdot f_{RH} \quad (8)$$

legenda: Φ_{RH} [W] – zátopový tepelný výkon

Celkový návrhový tepelný výkon vytápěného prostoru je součet zátopového tepelného výkonu a celkové návrhové tepelné ztráty vytápěného prostoru (9). Přičemž celková návrhová tepelná ztráta vytápěného prostoru je součet návrhové tepelné ztráty větráním a návrhové tepelné ztráty prostupem násobené teplotním korekčním činitelem, který zohledňuje dodatečné tepelné ztráty místnosti v důsledku vytápění na vyšší teplotu, než jsou sousední vytápěné místnosti.

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{RH} + (\Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}) \cdot f_{\Delta\theta,i} \quad (9)$$

legenda: $\Phi_{HL,i}$ [W] – celkový návrhový tepelný výkon vytápěného prostoru
 $f_{\Delta\theta,i}$ [-] – teplotní korekční činitel (hodnoty viz příloha k normě [37])

V tab. 12 je ukázán výpočet návrhového tepelného výkonu pro jednu místnost v prvním obytném patře (obývací pokoj_1). Návrhové tepelné výkony jednotlivých místností a celková tepelná ztráta objektu jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 12: Výpočet návrhového tepelného výkonu vytápěné místnosti obývací pokoj_1

| Teplotní údaje | | | | |
|---|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Vnější výpočtová teplota | θ_e | °C | | -15 |
| Vnitřní výpočtová teplota | $\theta_{int,i}$ | °C | | 20 |
| Výpočtový teplotní rozdíl | $\theta_{int,i} - \theta_e$ | °C | | 35 |
| Tepelné ztráty prostupem | | | | |
| Stavební část | f_k | A_k | U_k | $H_{T,k}$ |
| | - | m ² | W.m ⁻² .K ⁻¹ | W.K ⁻¹ |
| nezateplená obvodová stěna v patře | 1,4 | 9,14 | 1,17 | 14,95 |
| nezateplená obvodová stěna v patře, zúžená | 1,4 | 1,95 | 1,53 | 4,18 |
| zateplená obvodová stěna v patře | 1 | 16,03 | 0,67 | 10,77 |
| okna plastová | 1 | 4,45 | 1,2 | 5,34 |
| podlaha 1. patro | 0,8 | 31,77 | 1,51 | 38,30 |
| Celkový součinitel tepelné ztráty prostupem | | $H_{T,i} = \Sigma H_{T,k}$ | W.K ⁻¹ | 73,54 |
| Celková tepelná ztráta prostupem | | $\Phi_{T,i}$ | W | 2 574,03 |
| Tepelné ztráty větráním | | | | |
| Vnitřní objem | V_i | m ³ | | 67,09 |
| Nejmenší intenzita výměny vzduchu | n_{min} | h ⁻¹ | | 0,5 |
| Celkový součinitel tepelné ztráty větráním | | $H_{V,i}$ | W.K ⁻¹ | 11,41 |
| Celková tepelná ztráta větráním | | $\Phi_{V,i}$ | W | 399,19 |
| Zátopový tepelný výkon | | | | |
| Podlahová plocha | A_i | m ² | | 25,76 |
| Zátopový součinitel | f_{RH} | W.m ⁻² | | 11 |
| Celkový zátopový tepelný výkon | | Φ_{RH} | W | 283,36 |
| Korekční činitel na vyšší teplotu | $f_{\Delta\theta,i}$ | - | | 1 |
| Návrhový tepelný výkon | | $\Phi_{HL,i}$ | W | 3 256,58 |

Tab. 13: Návrhový tepelný výkon jednotlivých vytápěných místností

| Místnost | Návrhový tepelný výkon $\Phi_{HL,i}$ [W] |
|-----------------|--|
| Pokoj_2.1 | 673,41 |
| Obývací pokoj_2 | 2 082,44 |
| Ložnice_2 | 1 169,14 |
| Kuchyně_2 | 1 161,02 |
| Pokoj_2.2 | 1 213,20 |
| Koupelna_2 | 1 001,66 |
| Předsíň_2 | 578,88 |
| Schody_12 | 1 141,22 |
| Hala_1 | 1 008,51 |
| Obývací pokoj_1 | 3 256,58 |
| Ložnice_1 | 1 002,53 |
| Kuchyně_1 | 1 023,33 |
| Pokoj_1 | 1 236,41 |
| WC_1 | 266,11 |
| Předsíň_1 | 401,72 |
| Schody_S1 | 923,44 |
| Hala_S | 2 385,00 |
| Prádelna_S | 3 056,35 |
| Garáž_S | 2 247,29 |
| Koupelna_S | 2 301,02 |
| Celkem | 28 129,27 |

Celkový návrhový tepelný výkon daného objektu je 28,129 kW.

5.2 Potřeba tepla

Potřeba tepla pro vytápění byla vypočítána pomocí denostupňové metody. Hodnoty potřebné pro tento výpočet byly vzaty z přílohy k normě ČSN EN 12831 [37], webu www.tzb-info.cz [38] a předchozího výpočtu návrhového tepelného výkonu objektu.

Nejprve se stanovil počet denostupňů. Do rovnice (10) se dosadí délka topného období d_t , průměrná venkovní teplota během topné sezóny θ_{es} a průměrná vnitřní výpočtová teplota θ_{is} .

$$D = d_t \cdot (\theta_{is} - \theta_{es}) = 234 \cdot (18,9 - 4) = 3486,6 \text{ K.dny} \quad (10)$$

V rovnici (11) pro výpočet potřeby tepla pro vytápění se vyskytují denostupně D , návrhový tepelný výkon objektu Φ_{HL} , průměrná vnitřní výpočtová teplota θ_{is} , vnější výpočtová teplota θ_e , opravný součinitel ε a účinnosti obsluhy η_o a rozvodu η_r vytápění. Opravný součinitel byl zvolen 0,75, účinnost obsluhy vytápění 0,95 a účinnost rozvodu vytápění 0,95.

$$Q_{vyt} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot \Phi_{HL} \cdot D}{\theta_{is} - \theta_e} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = \frac{0,75}{0,95^2} \cdot \frac{24 \cdot 28129,27 \cdot 3486,6}{18,9 - (-15)} = 207,72 \text{ GJ/rok} \quad (11)$$

Roční potřeba tepla pro vytápění je 207,72 GJ, což odpovídá 57,7 MWh.

Potřeba tepla pro ohřev TUV se vypočítá pomocí rovnice (12), ve které se vyskytují vlastnosti vody, objem ohřívání vody V_{2p} v m^3/den , počet dní d_m , teploty vstupní t_1 a výstupní t_2 vody a koeficient energetických ztrát systému z . Hodnota tohoto koeficientu byla zvolena 0,5. Pro zjednodušení bylo uvažováno s konstantním objemem ohřívání vody a s konstantní teplotou vstupní vody během celého období.

$$Q_{TUV} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \cdot d = 1,5 \cdot \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 0,4 \cdot (55 - 10)}{3600} \cdot 365 = 11,46 \text{ MWh/rok} \quad (12)$$

Roční potřeba tepla pro ohřev TUV je 11,46 MWh. Potřeba tepla pro ohřev TUV během topného období je 7,35 MWh. Celková potřeba tepla pro zvolený objekt je 69,16 MWh/rok. Potřeba tepla během topného období činí 65,05 MWh.

5.3 Volba MKJ

Z výše uvedených MKJ byla vybrána jednotka Power Pallets [30] od firmy ALL Power Labs s elektrickým výkonem 10 kW. Důvody výběru byly odpovídající tepelný výkon zařízení návrhovému tepelnému výkonu zvoleného objektu a prověřená technologie spalovacích motorů. Návrhovému tepelnému výkonu objektu by také odpovídaly jednotky GreenGen 2,5 [17] a přibližně SOLO Stirling 161 [14]. Obě MKJ jsou teprve ve fázi vývoje a nejsou volně prodejné na trhu. Z tohoto důvodu je jejich ekonomická analýza prozatím neproveditelná.

Power Pallets pracuje na základě zplyňování biomasy. Díky vícestupňovému zplyňování s rekuperací odpadního tepla vzniká malé množství dehtových složek v energoplynu a dochází k dosušování paliva, čímž se zvyšuje účinnost celého zařízení. Výsledný plyn je po vyčištění ve filtrovém systému spalován v tříválcovém zážehovém motoru Kubota o zdvihovém objemu 962 cm^3 . Motor je propojen s elektrickým generátorem. Elektrický výkon může být vyveden 1 nebo 3 fázemi o napětí 120, 208, 240 nebo 400 V s frekvencí 50 či 60 Hz. Celé zařízení je ovládáno elektronickým kontrolním systémem, který monitoruje základní prvky jednotky a probíhající procesy, a automaticky reguluje poměr spalovacího vzduchu s energoplynem.

Tab. 14: Parametry jednotky Power Pallets [30]

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Elektrický výkon [kW] | 3–10 |
| Tepelný výkon [kW] | 9–30 |
| Elektrická účinnost [%] | 20 |
| Celková účinnost [%] | 80–90 |
| Palivo | dřevní štěrpa |
| Spotřeba paliva na kWh_e [kg] | 1,2 |
| Maximální vlhkost paliva [%] | 30 |
| Optimální rozměry paliva [mm] | 10–50 |
| Objem zásobníku [m^3] | 0,24 |
| Rozměry jednotky [m] | $1,2 \times 1,2 \times 1,8$ |
| Hmotnost jednotky [kg] | 499 |



Obr. 21: Jednotka Power Pallets [30]

5.4 Spotřeba energií

Skutečná spotřeba energií se oproti vypočítané potřebě tepla značně liší. To je dáno především průměrnou venkovní teplotou, která je výrazně vyšší než vnější výpočtová teplota. Předpokládaný provoz vybrané MKJ je omezen pouze na topné období, proto v ekonomické analýze bude uvažováno se spotřebou energií během tohoto období a výsledný cash-flow bude zobecněn na celý rok. V tab. 15 jsou uvedeny spotřeby energií za referenční topné období 2012–2013, které byly odečteny z příslušných faktur (sloupec Nákup). Při výrobě tepla ze zemního plynu bylo uvažováno s účinností 88 %, při výrobě tepla z koksu bylo uvažováno s účinností 70 % (užitečné teplo je součin nakoupeného paliva a účinnosti kotle).

Tab. 15: Spotřeba a cena energií za topné období 2012–2013

| Tepelná energie | | | |
|---------------------------|-------------|----------------------|------------------|
| Palivo | Nákup [MWh] | Užitečné teplo [MWh] | Cena [Kč] |
| koks | 15,27 | 10,69 | 16 790 |
| zemní plyn | 19,55 | 17,20 | 25 984 |
| celkem | 34,82 | 27,89 | 42 774 |
| Elektrická energie | | | |
| Tarif | Nákup [MWh] | Cena MWh [Kč] | Cena celkem [Kč] |
| vysoký | 2,6831 | 5 402,53 | 14 495,53 |
| nízký | 3,2397 | 2 076,19 | 6 726,23 |
| celkem | 5,9228 | | 21 221,76 |

5.5 Ekonomická analýza

V tomto ekonomickém zhodnocení je uvažován provoz vybrané jednotky během topného období, kdy MKJ pokryje veškeré tepelné ztráty budovy a ohřev TUV. Pro zjednodušení se dále uvažuje, že se vyrobí množství elektrické energie odpovídající 1/3 vyprodukovanému množství užitečné tepelné energie. Tento přibližný poměr je uveden výrobcem [30]. Elektrická energie je následně přednostně spotřebována přímo provozovatelem jednotky, zbytek je prodán do rozvodné sítě.

V ekonomické rozvaze v tab. 16 se na straně výdajů objevují náklady na palivo a servisní výdaje na provoz MKJ. Cena paliva je dána nabídkou vybrané pily [39] a činí 350 Kč/prms, což je při uvažované vlhkosti 30 % a poměru 210 kg/prms 1 667 Kč/t. Pro zvolenou referenční topnou sezónu je spotřeba štěpky 11,2 t. Servisní výdaje 0,8 Kč/kWh_e byly určeny podle [2]. Cena reflektuje tehdejší kurz, časovou hodnotu peněz a fakt, že se jedná o složitější zařízení než samotná kogenerační jednotka se spalovacím motorem.

Na příjmové straně se vyskytují úspory za tepelnou a elektrickou energii (viz kapitola 5.4) a zelené bonusy stanovené Cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 [40]. Výše tohoto bonusu je kombinací tří samostatných bonusů, ty jsou za výrobu elektřiny spalováním čisté biomasy v nových výrobních elektřiny nebo zdrojích, za kombinovanou výrobu elektřiny a tepla využívající obnovitelné zdroje energie nebo degazační a důlní plyn a za výrobu elektřiny spalující (samostatně) plyn ze zplyňování pevné biomasy. Vzhledem ke zvolené nevratné investiční podpoře ve výši 30 % je celkový zelený bonus snížen o 4,5 %. Hodnota výsledného příspěvku tak činí 2225 Kč/MWh_e. Pro zjednodušení je tato cena považována i za prodejní cenu do rozvodné sítě. Aby mohl provozovatel kogenerační jednotky zažádat o zelené bonusy, musí splňovat povinnosti uvedené v zákoně o podporovaných zdrojích energie [41] a vyhláše o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla [42].

Tab. 16: Ekonomická rozvaha využití vybrané MKJ za referenční topné období

| Položka | Kč |
|--------------------------|---------|
| Výdajová strana | |
| Výdaje za palivo | -18 670 |
| Servisní výdaje | -7 437 |
| Výdaje celkem | -26 107 |
| Příjmová strana | |
| Úspora za teplo | 42 774 |
| Úspora za elektřinu | 21 222 |
| Výnos za zelený bonus | 20 685 |
| Příjmy celkem | 84 681 |
| Celkový tok peněz | |
| Cash-flow | 58 574 |

Požizovací cena jednotky Power Pallets je rozepsána v tab. 17. Jelikož se jedná o jednotku amerického výrobce, jsou ceny přepočteny s aktuálním kurzem 20,195 Kč na USD. Náklady na dopravu a stavební úpravy jsou voleny podle údajů výrobce. Prostá doba návratnosti je spočtena (13) za předpokladu konstantní spotřeby a konstantních cen jako v případě referenční topné sezóny 2012–2013.

Tab. 17: Cena MKJ Power Pallets

| Položka | Kč |
|---|----------------|
| Cena MKJ (bez DPH) | 383 604 |
| Doprava | 40 390 |
| Cena MKJ s dopravou (včetně 2,7% cla) | 435 442 |
| Cena MKJ s dopravou (včetně 20% DPH) | 522 530 |
| Cena po odečtení nevratné investiční podpory (bez nákladů na dopravu) | 337 498 |
| Stavební úpravy | 5 000 |
| Cena celkem | 382 888 |

$$T_0 = \frac{C}{CF} = \frac{382888}{58574} = 6,54 \text{ let} \quad (13)$$

legenda: T_0 [rok] – prostá doba návratnosti
 C [Kč] – konečná cena pro zákazníka
 CF [Kč] – roční cash-flow

Pro výpočet doby návratnosti v případě financování hypotečním úvěrem byla použita rovnice (14). Vypůjčená částka byla stanovena na 380 000 Kč a výše RPSN na 5 %. Pro zjednodušení je uvažováno s jednou polhůtní anuitní platbou za úrokové období.

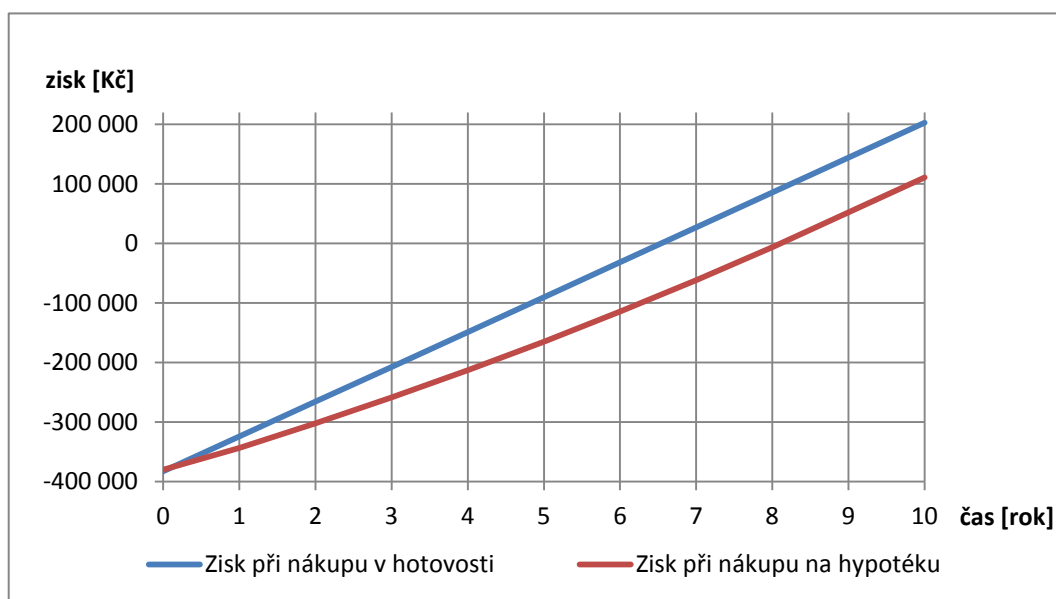
$$T_d = -\frac{\ln\left(1 - \frac{PVA \cdot i}{(1+i) \cdot CF}\right)}{\ln(1+i)} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{380000 \cdot 0,05}{58574}\right)}{\ln(1+0,05)} = 8,04 \text{ let} \quad (14)$$

legenda: T_d [rok] – doba návratnosti (doba splácení úvěru)
 PVA [Kč] – současná hodnota polhůtní anuity (výše úvěru)
 i [%] – RPSN

Při nákupu MKJ Power Pallets za hotové je prostá doba návratnosti 6,54 let. Pokud se pro nákup jednotky využije hypoteční úvěr s danými parametry, je doba návratnosti 8,04 let. Tab. 18 a graf 1 zobrazují ekonomické zhodnocení v průběhu desetiletého časového období.

Tab. 18: Ekonomický zisk z nákupu a provozu jednotky Power pallets v závislosti na čase

| rok | CF Kč | Nákup v hotovosti | Nákup na hypoteční úvěr | | |
|-----|----------|-------------------|-------------------------|------------|------------|
| | | Zisk Kč | Úrok Kč | Úmor Kč | Zisk Kč |
| 0 | - | -382 888 | - | - | -382 888 |
| 1 | 58 574 | -324 314 | 19 000 | 36 686 | -343 314 |
| 2 | 58 574 | -265 740 | 17 166 | 41 408 | -301 906 |
| 3 | 58 574 | -207 166 | 15 095 | 43 479 | -258 427 |
| 4 | 58 574 | -148 592 | 12 921 | 45 653 | -212 774 |
| 5 | 58 574 | -90 018 | 10 639 | 47 935 | -164 839 |
| 6 | 58 574 | -31 444 | 8 242 | 50 332 | -114 507 |
| 7 | 58 574 | 27 130 | 5 725 | 52 849 | -61 658 |
| 8 | 58 574 | 85 704 | 3 083 | 55 491 | -6 167 |
| 9 | 58 574 | 144 278 | 308 | 6 167 | 52 098 |
| 10 | 58 574 | 202 852 | - | - | 110 672 |



Graf 1: Ekonomický zisk z nákupu a provozu jednotky Power pallets v závislosti na čase

Pro porovnání jsou v tab. 19 uvedeny prosté doby návratnosti a roční cash-flow pro případy, kdy by byl zvolený objekt v současnosti na místo zemním plynem a koksem vytápěn hnědým uhlím, dřevní štěpkou nebo elektřinou. Je uvažováno s novějšími kotli, na hnědé uhlí a biomasu, s účinností 80 %. Účinnost vytápění elektrickou energií je zjednodušeně považována za 100%. Cena hnědého uhlí je pro velikost ořech 2 orientačně stanovena na 2 590 Kč/t [43], cena dřevní štěpky je 1 667 Kč/t (viz výše) a cena elektřiny v NT sazbe 2 748,41 Kč/MWh (tarif s dvacetihodinovou dobou platnosti nízkého tarifu) [44]. Výdajová strana opět reflektuje provozní náklady jednotky Power Pallets. Podobně úspora za elektřinu a výnos ze zeleného bonusu jsou při konstantní výrobě elektrické energie shodné. Úspora za teplo se liší oproti výpočtu v tab. 16. Důvodem je použití jiných druhů paliv. Tato úspora, tj. náklady na dané palivo, je spočtena pomocí rovnice (15). Úspora při topení elektřinou je součin spotřebovaného tepla v MWh a ceny elektřiny v Kč/MWh.

$$u_t = \frac{Q_{t,sp} \cdot 3,6 \cdot C_{pal}}{Q_i^r \cdot \eta_{kot}} \quad (15)$$

legenda: u_t [Kč] – úspora za teplo (cena paliva)
 $Q_{t,sp}$ [MWh] – spotřebované teplo
 C_{pal} [Kč/t] – cena paliva
 Q_i^r [MJ/kg] – výhřevnost paliva
 η_{kot} [-] – účinnost kotle

Tab. 19: Ekonomická rozvaha využití Power Pallets namísto uvedených paliv

| Uvažované vytápění: | hnědé uhlí | dřevní štěpka | elektřina |
|--------------------------------------|------------|---------------|-----------|
| Položka | Kč | Kč | Kč |
| Výdajová strana | | | |
| Výdaje za palivo | -18 670 | -18 670 | -18 670 |
| Servisní výdaje | -7 437 | -7 437 | -7 437 |
| Výdaje celkem | -26 107 | -26 107 | -26 107 |
| Příjmová strana | | | |
| Úspora za teplo | 18 469 | 17 435 | 76 653 |
| Úspora za elektřinu | 21 222 | 21 222 | 21 222 |
| Výnos za zelený bonus | 20 685 | 20 685 | 20 685 |
| Příjmy celkem | 60 376 | 59 342 | 118 560 |
| Celkový tok peněz | | | |
| Cash-flow | 34 269 | 33 235 | 92 453 |
| Prostá doba návratnosti [rok] | 11,17 | 11,52 | 4,14 |

Prostá doba návratnosti u paliv levnějších, než je kombinace zemního plynu a koksu výrazně roste. Při stávajícím topení hnědým uhlím by se počáteční investice navrátila za 11,17 let, při topení dřevní štěpkou pak za 11,52 let. Naopak je tomu v případě topení elektrickými přímotopy, kdy je prostá doba návratnosti investice do jednotky Power Pallets spočtena na 4,14 let. Tab. 20 a graf 2 opět znázorňují ekonomické zhodnocení v průběhu desetiletého časového období.

Tab. 20: Ekonomický zisk z investice do MKJ Power Pallets v případě stávajícího vytápění uvedenými druhy paliv

| rok | hnědé uhlí | | dřevní štěpka | | elektřina | |
|-----|------------|------------|---------------|------------|-----------|------------|
| | CF Kč | zisk Kč | CF Kč | zisk Kč | CF Kč | zisk Kč |
| 0 | | -382 888 | | -382 888 | | -382 888 |
| 1 | 34 269 | -348 619 | 33 235 | -349 653 | 92 453 | -290 435 |
| 2 | 34 269 | -314 350 | 33 235 | -316 418 | 92 453 | -197 982 |
| 3 | 34 269 | -280 081 | 33 235 | -283 183 | 92 453 | -105 529 |
| 4 | 34 269 | -245 812 | 33 235 | -249 948 | 92 453 | -13 076 |
| 5 | 34 269 | -211 543 | 33 235 | -216 713 | 92 453 | 79 377 |
| 6 | 34 269 | -177 274 | 33 235 | -183 478 | 92 453 | 171 830 |
| 7 | 34 269 | -143 005 | 33 235 | -150 243 | 92 453 | 264 283 |
| 8 | 34 269 | -108 736 | 33 235 | -117 008 | 92 453 | 356 736 |
| 9 | 34 269 | -74 467 | 33 235 | -83 773 | 92 453 | 449 189 |
| 10 | 34 269 | -40 198 | 33 235 | -50 538 | 92 453 | 541 642 |



Graf 2: Ekonomický zisk z investice do MKJ Power Pallets v případě stávajícího vytápění uvedenými druhy paliv

6 Závěr

Mikrokogenerace je označení pro současnou výrobu elektřiny a tepla do 50 kW elektrického výkonu. Mikrokogenerační zařízení tak kombinují výhody centralizované kogenerace, jako jsou úspory primárních energetických zdrojů a snížení vypouštěného množství emisí do ovzduší, s provozem v místě spotřeby energií, kdy tedy odpadají ztráty v distribučních soustavách. Z pohledu přenosové soustavy má větší počet výkonově menších výrobců elektrické energie kladný efekt na stabilitu celé soustavy.

Pro mikrokogenerační výrobu v místech, kde nejsou primárně dostupná plynná a kapalná paliva, existuje celá řada technologií. Jedná se o zařízení s vnějším spalováním jako parní motor, Stirlingův motor, parní turbína a ORC systém. Pro spalovací motory a mikroturbíny, což jsou zástupci technologií s vnitřním spalováním, je nezbytné přetransformování paliva do plynné nebo kapalné podoby. K tomu se využívají procesy zplyňování, fermentace, pyrolýzy, aj. Dále se můžeme setkat s technologií vzduchové turbíny (systém Talbott) a s palivovými články. Všechny zmíněné technologie mají své klady a zápory, proto probíhá intenzivní vývoj napříč celým spektrem uvedených systémů MKJ. Na rozdíl od jednotek na zemní plyn není trh s MKJ na pevná paliva příliš rozvinut. V současné době se většina firem zabývajících touto technologií pro domácí využití nachází ve fázi testování. Konkurence na trhu a výroba ve velkém jsou dva faktory, které chybí pro snížení ceny těchto MKJ, aby došlo k nárůstu jejich používání.

K technicko-ekonomickému posouzení byla vzhledem k tepelné ztrátě zvoleného objektu vybrána jednotka Power Pallets se zplyňovacím generátorem a spalovacím motorem. Při dnešních cenách energií, paliva a zelených bonusů, a při konstantní spotřebě jako v případě referenčního období, je prostá návratnost počáteční investice 6,54 let. Cena této jednotky je ovšem natolik vysoká, že se nedá počítat s jejím pořízením za hotovost. Pro financování nákupu zvoleným hypotéčním úvěrem byla spočtena návratnost 8,04 let. V obou případech by desetiletá životnost jednotky přinesla výrazný zisk. Kdyby se ve zvoleném objektu místo zemním plynem a koksem topilo v součastnosti hnědým uhlím nebo dřevní štěpkou, prostá návratnost by přesáhla 11 let. Naopak při topení elektrickými přímotopy by se počáteční investice do jednotky Power Pallets vrátila za 4,14 let. V takovém případě by bylo vhodné jednotku pořídit. V ekonomické analýze bylo však počítáno pouze s obvyklými servisními náklady na výměnu oleje, filtrů a podobně. U zvolené technologie je vysoká pravděpodobnost výskytu dehtu v energoplynu. To by mohlo vézt k zanášení motoru a jeho poruše. V takovém případě by servisní náklady neúměrně vzrostly a návratnost investice by se protáhla, v nejhorším případě by k návratnosti vůbec nedošlo. S investicí do MKJ na pevná paliva se vyplatí počkat do doby, až se na trhu objeví zařízení se zaručenou větší životností, které budou například díky menšímu elektrickému výkonu levnější.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky malého výkonu v komunálních a průmyslových tepelných zdrojích. 1. vyd. Brno: PC DIR, 1997, 100 s. ISBN 80-214-0889-8.
- [2] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 281 s. ISBN 80-7300-118-7.
- [3] KRBEK, Jaroslav, Ladislav OCHRANA a Bohumil POLESNÝ. *Zásobování teplem a kogenerace*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR Real, 1999, 143 s. ISBN 80-214-1347-6.
- [4] KARAFIÁT, Josef a kolektiv. Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla [online]. Praha: ORTEP, s.r.o., 2006 [cit. 2013-02-15]. 66 s. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [5] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky – Zřizování a provoz*. 1. vyd. Praha: GAS, 2007 [cit. 2013-02-15]. ISBN 978-807-3281-519. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [6] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Catalog of CHP technologies* [online]. 2008 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chptech_intro.pdf
- [7] CNE Czech Nature Energy, a.s. *Úvod do mikrokogenerace* [online]. Poslední aktualizace 18. 2. 2013 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/mikrokogenerace/uvod-do-mikrokogenerace/>
- [8] FIEDLER, Jan. *Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek* [online]. Publikováno 26. 9. 2011 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/t.py#hodnoceni>
- [9] POTMĚŠIL, T. *Pístový parní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, s. 39. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Novotný.
- [10] *Button Energy Energiesysteme GesmbH* [online]. 2013 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: http://www.buttonenergy.at/_lccms/_00053/Home.htm?VER=110720131720&LANG=eng&MID=55
- [11] POLYCOMP, a.s. *Parní motor* [online]. 2010 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.polycomp.cz/download/cz/pmvs.pdf>
- [12] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor, *Transformační technologie*, 2009-06, [date of last update 2012-01]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>
- [13] Das Kraftwerk im eigenen Haus. *Sunmachine* [online]. [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://www.sunmachine.at/pdf/home.pdf>
- [14] CRAENEN, Stefan. COGEN EUROPE. *ProEcoPolyNet Fact Sheet "SOLO Stirling 161"*. 2007. Dostupné z: <http://www.buildup.eu/cases/19164>
- [15] 1-engine wood chip plant. *Stirling DK* [online]. 2011 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: http://www.stirling.dk/page_content.php?menu_id=31&type=submenu
- [16] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2012. ISBN 978-80-247-4455-1. Dostupné z: http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=HsFTiFiUkhIC&oi=fnd&pg=PA8&dq=stejnosc%20Brn%20BD+parn%20AD+motor&ots=vXH5pMFLdo&sig=xzUN6kDhLVVHOE6YNym15jPIRes&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true
- [17] *GreenGen* [online]. 2012 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.greengen.be/>
- [18] *Green Turbine* [online]. [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.greenturbine.eu/en/home.php>

- [19] *ElectraTherm* [online]. 2012 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://electratherm.com/>
- [20] INFINITY TURBINE LLC. *Model IT10 ORC Waste Heat Turbine Generator ORC System* [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://www.infinityturbine.com/ORC/IT10_ORC_System.html
- [21] *MikroORC Systémy s.r.o.: Chytrá řešení ve vytápění tuhými palivy* [online]. 2011 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.mikroorc.cz/index.php>
- [22] PRAVDA, Lukáš. Energoplyn – produkt zplyňování. In: *Energie z biomasy III*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004, 133–137. ISBN 80-214-2805-8. Dostupné z: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iii/papers/21-PravdaII.pdf
- [23] ŠKORPÍK, Jiří. Biomasa jako zdroj energie, *Transformační technologie*, 2006-10, [date of last update 2011-08]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/biomasa-jako-zdroj-energie.html>.
- [24] STAF, Marek: Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva. *Biom.cz* [online]. 2005-01-12 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-na-plynna-a-kapalna-paliva>>. ISSN: 1801-2655.
- [25] MOTLÍK, Jan, VÁŇA, Jaroslav: Biomasa pro energii (2) Technologie. *Biom.cz* [online]. 2002-02-06 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-2-technologie>>. ISSN: 1801-2655.
- [26] JEREMIÁŠ, Michal, Michael POHOŘELÝ, Michal ŠYC, Karel SVOBODA a Miroslav PUNČOCHÁŘ. *Technologie KVET na pevná, kapalná a plynná paliva z biomasy*. 2012 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://www.chp-goes-green.info/sites/default/files/3-Jeremias_Technologie-KVET-z-bipmasy.pdf
- [27] MOTOR GAS. *Typový list kogenerační jednotky s plynovým motorem MAN: Indoor MGM 40*[online]. 2012 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://www.motorgas.cz/gallery/2/748-typlist_mgm40_indoor_bio_500mgnox_cz.pdf
- [28] TEDOM. *Kogenerační jednotky – bioplyn* [online]. 2010 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com/tedom-kogeneracni-jednotky-bioplyn.html>
- [29] VICTORY GASWORKS. *Personal Energy Grid* [online]. 2012 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://gasifier.wpengine.com/personal-energy-grid>
- [30] ALL POWER LABS. *10-20 kW Power Pallets* [online]. 2013 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.gekgasifier.com/products/10-20kw-power-pallets>
- [31] VOLTER. Technical details, Volter 30 [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://www.volter.fi/en/page/9>
- [32] Mikroturbína. ASOCIACE MIKROTURBÍN, o.s. Mikroturbína: moderní technologie v energetice [online]. 2012 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.mikroturbina.cz/mikroturbina.htm>
- [33] Products. Capstone Turbine Corporation [online]. 2013 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.capstoneturbine.com/prodsol/products/>
- [34] EnerTwin Heat & Power. MTT MICRO TURBINE TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.enertwin.com/cms/files/EnerTwin-folder-EN-LR.pdf>
- [35] CEDAR RIDGE CE S.R.O. *Biomass Generator: Information pack BG25 / BG50* [online]. 2012 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.cedarridgece.eu/dox/TESS%20BG25-BG50%20info-pack%2018-10-2012%20EN%20V5.4.pdf>

- [36] Breakthrough in hydrogen fuel production could revolutionize alternative energy market. VIRGINIA TECH. *Virginia Tech News*[online]. 2013 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z: <http://www.vtnews.vt.edu/articles/2013/04/040413-cals-hydrogen.html>
- [37] ČSN EN 12831. *Tepelné soustavy v budovách – Výpočet tepelného výkonu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [38] TOPINFO S.R.O. *tzbinfo* [online]. 2013 [cit. 2013-05-19]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/>
- [39] *Pila Ručka* [online]. 2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.pilarucka.eu/wp/>
- [40] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. In: č. 4/2012. 2012. Dostupné z: http://www.eru.cz/dias-browse_articles.php?parentId=36&deep=off&type=
- [41] Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: č. 165/2012 Sb. 2012. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=165&r=2012>
- [42] Vyhláška o elektřině z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla a elektřině z druhotných zdrojů. In: č. 453/2012 Sb. 2012. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?r=2012&cz=453>
- [43] Hnědé uhlí – Ledvice. HAJNA – SDRUŽENÍ PODNIKATELŮ. *Prodej uhlí* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.prodejuhli.cz/kategorie.php?kategorie=1>
- [44] D Přímotop. ČEZ, a. s. *Skupina ČEZ* [online]. 2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-zakazniky/elektrina/ceny/2013/domacnost/etarif/d-primotop.html>

8 Seznam použitých zkratek a symbolů

| Označení | Rozměr | Význam |
|----------------------|--------------------|---|
| AFC | - | alkaline fuel cell (alkalický palivový článek) |
| A_i | m^2 | podlahová plocha vytápěné místnosti (vnitřní rozměr) |
| A_k | m^2 | plocha stavební části |
| c | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | měrná tepelná kapacita |
| C | Kč | konečná cena pro zákazníka |
| CF | Kč | cash-flow |
| C_{pal} | Kč/t | cena paliva |
| d | m | tloušťka vrstvy konstrukce |
| D | K.den | denostupně |
| d_m | den | počet dní |
| d_t | den | délka topného období |
| E_{tep} | W | vyprodukovaná elektrická energie |
| f_k | - | teplotní korekční činitel |
| f_{RH} | $W.m^{-2}$ | zátopový součinitel |
| $f_{\Delta\theta,i}$ | - | teplotní korekční činitel |
| H_T | $W.K^{-1}$ | součinitel tepelné ztráty prostupem |
| H_V | $W.K^{-1}$ | součinitel tepelné ztráty větráním |
| i | % | úroková sazba |
| KVET | - | kombinovaná výroba elektrické energie a tepla |
| MCFC | - | molten carbonate fuel cell (palivový článek z tavných karbonátů) |
| MKJ | - | mikrokogenerační jednotka |
| n_{min} | h^{-1} | nejmenší intenzita výměny venkovního vzduchu |
| ORC | - | Organický Rankinův-Clausiusův cyklus |
| PAFC | - | phosphoric acid fuel cell (palivový článek s kyselinou fosforečnou) |
| PEMFC | - | polymer electrolyte membrane fuel cell (membránový palivový článek) |
| PEZ | - | primární energetické zdroje |
| PM | - | parní motor |
| PVA | Kč | současná hodnota polhůtní anuity |
| Q_d | W | teplo dodané spotřebiteli |
| Q_i^r | MJ/kg | výhřevnost paliva |
| $Q_{t,sp}$ | MWh | spotřebované teplo |
| Q_u | W | úspora tepla z PEZ |
| R | - | regenerátor |
| RC | - | Rankinův-Clausiusův cyklus |
| RPSN | % | roční procentní sazba nákladů |
| R_{se} | $m^2.K.W^{-1}$ | odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce |
| R_{si} | $m^2.K.W^{-1}$ | odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce |
| S | - | studený prostor Stirlingova motoru |

| | | |
|--------------------|------------------------------------|---|
| SOFC | - | solid oxide fuel cell (palivový článek s pevným elektrolytem) |
| T | - | teplý prostor Stirlingova motoru |
| T ₀ | rok | prostá doba návratnosti |
| t ₁ | °C | teplota vstupní TUV do MKJ |
| t ₂ | °C | teplota výstupní TUV z MKJ |
| T _d | rok | doba návratosti |
| TUV | - | teplá užitková voda |
| U _k | W.m ⁻² .K ⁻¹ | součinitel prostupu tepla |
| u _t | Kč | úspora za teplo (cena paliva) |
| V _{2p} | m ³ /den | objem ohřívání vody |
| V _i | m ³ | objem vytápěného prostoru |
| z | - | koeficient energetických ztrát systému |
| α, β, γ | - | modifikace Stirlingova motoru |
| ε | - | opravný součinitel |
| η _{el} | - | tepelná účinnost elektrárny |
| η _{kot} | - | účinnost kotle |
| η _o | - | účinnost obsluhy vytápění |
| η _r | - | účinnost rozvodu vytápění |
| η _{re} | - | účinnost rozvodu elektrické energie |
| η _{tep} | - | tepelná účinnost teplárny |
| η _{výt} | - | tepelná účinnost výtopy |
| θ _e | °C | venkovní výpočtová teplota |
| θ _{es} | °C | průměrná venkovní teplota během topného období |
| θ _{int,i} | °C | vnitřní výpočtová teplota |
| θ _{is} | °C | průměrná vnitřní výpočtová teplota |
| λ | W.m ⁻¹ .K ⁻¹ | součinitel tepelné vodivosti |
| ρ | kg/m ³ | hustota |
| σ | - | teplárenský modul |
| Φ _{HL,i} | W | celkový návrhový tepelný výkon |
| Φ _{RH} | W | zátopový tepelný výkon |
| Φ _{T,i} | W | návrhová tepelná ztráta prostupem |
| Φ _{V,i} | W | návrhová tepelná ztráta větráním |

9 Seznam obrázků

- Obr. 1: Schéma centralizované teplotní soustavy
- Obr. 2: Znárodnění efektu K_{VET} [4]
- Obr. 3: Schéma mikrokogenerační jednotky v domě [7]
- Obr. 4: Schémata PM, zleva: lineární [10], nelineární
- Obr. 5: Jednotky s parním motorem, zleva: Bison-powerblock [10], PM-VS [11]
- Obr. 6: Schéma Stirlingova motoru [5]
- Obr. 7: Základní modifikace Stirlingova motoru [12]
- Obr. 8: Jednotky se Stirlingovým motorem, zleva: Stirling DK-SD4 [15], Sunmachine Pellet [13], Tedom 180V1 [16], SOLO Stirling 161 [14]
- Obr. 9: Schéma oběhu s parní turbínou a RC cyklus v T-S diagramu
- Obr. 10: Jednotka GreenGen 1.2 [17] a parní turbína Green Turbine 1.2 [18]
- Obr. 11: Schéma ORC zařízení a cyklus v T-S diagramu
- Obr. 12: ORC jednotky, zleva: Green Machine [19], IT10 [20], MikroORC Unit [21]
- Obr. 13: Schéma jednotky se spalovacím motorem a zplyňovacím generátorem.
- Obr. 14: Jednotky se spalovacími motory, postupně: MGM 40 [28], Volter 30 [31], Power Pallets [30], Mikro T30 [27], Victory grid [29]
- Obr. 15: Schéma radiální mikroturbíny [32]
- Obr. 16: Zleva: jednotka a mikroturbína Capstone [33], jednotka Ener twin [34]
- Obr. 17: Schéma systému Talbott
- Obr. 18: Princip funkce palivového článku [4]
- Obr. 19: Zvolený objekt z jihovýchodního a severozápadního pohledu
- Obr. 20: Termografické snímky zvoleného objektu pro určení tepelných mostů
- Obr. 21: Jednotka Power Pallets [30]

10 Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení kogenerací podle jmenovitého výkonu [2]

Tab. 2: Kogenerační zařízení podle použité pohonné jednotky a jejich typické základní parametry [2], [5], [6]

Tab. 3: Technické údaje jednotek PM [10], [11]

Tab. 4: Technické údaje vybraných jednotek se Stirlingovým motorem [13], [14], [15]

Tab. 5: Technické údaje jednotek GreenGen [17], [18]

Tab. 6: Požadavky na kvalitu plynu pro pístové spalovací motory [22], [26]

Tab. 7: Vybrané jednotky se spalovacími motory [27], [28], [29], [30], [31]

Tab. 8: Parametry kogeneračních jednotek s mikroturbínami [33], [34]

Tab. 9: Přehled palivových článků [4]

Tab. 10: Výpočet součinitele prostupu tepla pro zvolenou konstrukci

Tab. 11: Součinitele prostupu tepla jednotlivých stavebních částí

Tab. 12: Výpočet návrhového tepelného výkonu vytápěné místnosti obývací pokoj_1

Tab. 13: Návrhový tepelný výkon jednotlivých vytápěných místností

Tab. 14: Parametry jednotky Power Pallets [30]

Tab. 15: Spotřeba a cena energií za topné období 2012–2013

Tab. 16: Ekonomická rozvaha využití vybrané MKJ za referenční topné období

Tab. 17: Cena MKJ Power Pallets

Tab. 18: Ekonomický zisk z nákupu a provozu jednotky Power pallets v závislosti na čase

Tab. 19: Ekonomická rozvaha využití Power Pallets namísto uvedených paliv

Tab. 20: Ekonomický zisk z investice do MKJ Power Pallets v případě stávajícího vytápění uvedenými druhy paliv

11 Seznam grafů

Graf 1: Ekonomický zisk z nákupu a provozu jednotky Power pallets v závislosti na čase

Graf 2: Ekonomický zisk z investice do MKJ Power Pallets v případě stávajícího vytápění uvedenými druhy paliv

12 Příloha

Výpočet tepelných ztrát objektu (CD)