



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Combined heat and power generation

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Specializace: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.

Autor práce: Bc. Jiří Vobr

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vobr** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **465827**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Název diplomové práce anglicky:

Combined heat and power generation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis principu kombinované výroby elektřiny a tepla.
- 2) Výhody kombinované výroby elektřiny a tepla a její možné využití.
- 3) Návrh kogenerační výroby.
- 4) Technicko-ekonomické zhodnocení návrhu kogenerační výroby.

Seznam doporučené literatury:

- 1) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- 2) IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetika. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1.
- 3) IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetika – 2. díl. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.
- 4) KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice. Brno: PC-DIR Real, 1999. ISBN 80-85895-23-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.01.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové projektu. Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Českých Budějovicích dne 20. 5. 2021

Bc. Jiří Vobr

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vítu Kleinovi, PhD. Za odborné vedení, cenné rady a připomínky a za tu trpělivost, co se mnou musel mít.

Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům společnosti Teplárna Písek a.s., jenž mi poskytli veškeré materiály nutné pro vypracování mé práce, zejména bych rád poděkoval panu Michalu Káplovi, který mi pomáhal získat většinu potřebných informací a byl mi ochoten pomoci i během svého volna.

A nakonec bych rád poděkoval své rodině, která mi byla oporou jak během mého studia na vysoké škole, tak při psaní této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem instalace kogenerační jednotky, která má posloužit jako náhrada starého kotle v konkrétním teplárenském objektu a následným technicko-ekonomickým zhodnocením tohoto návrhu. V první, teoretické části práce, je představen princip kogenerace, hlavní výhody kogenerační výroby, kogenerační systémy, paliva pro kogenerační jednotky, možnosti hodnocení kogenerační výroby a konkrétní kogenerační technologie. Ve druhé, praktické části práce, je popsán současný stav teplárenského objektu, vybraná kogenerační jednotka, návrh instalace kogenerační výroby, ekonomické porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů teplárny a kogenerační výroby, návrh modelu provozu s již provozovanou kogenerační výrobnou a technicko-ekonomické zhodnocení tohoto modelu, jenž se skládá z ekonomických ukazatelů a citlivostních analýz.

Klíčová slova

Elektrická energie, tepelná energie, kogenerace, kogenerační jednotka, kogenerační systém, kogenerační technologie, kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET).

Abstract

The diploma thesis deals with the design of the installation of a cogeneration unit, which is to serve as a replacement for an old boiler in a specific heating plant and the subsequent technical and economic evaluation of this design. In the first, theoretical part of the work, the principle of cogeneration, the main advantages of cogeneration production, cogeneration systems, fuels for cogeneration units, possibilities of evaluation of cogeneration production and specific cogeneration technologies are introduced. The second, practical part of the work describes the current state of the heating plant, selected cogeneration unit, design of installation of cogeneration unit (s), economic comparison of individual sources of heating plant and cogeneration production, design of operating model with already operated cogeneration unit (s) and technical and economic evaluation of this model, which consists of economic indicators and sensitivity analyzes.

Keywords

Electricity, heat energy, cogeneration, cogeneration unit, cogeneration system, cogeneration technology, combined heat and power (CHP).

Obsah

1. ÚVOD	1
2. Kombinovaná výroba energie	2
2.1. Definice a princip kombinované výroby energií	2
2.2. Oblasti uplatnění kogenerace.....	3
2.3. Výhody kogenerační výroby.....	4
2.4. Kogenerační systémy	6
3. Kogenerační technologie.....	8
3.1. Zařízení kogenerační jednotky	8
3.2. Nepřímý způsob transformace paliva v kogeneračních jednotkách	10
3.3. Přímý způsob transformace paliva v kogeneračních jednotkách.....	12
3.4. Rozdělení kogeneračních technologií.....	13
3.5. Konstrukční provedení kogeneračních jednotek	14
4. Paliva pro kogenerační výrobu	16
4.1. Rozdělení paliv	16
4.2. Parametry paliv	18
4.2.1. Chemické vlastnosti.....	18
4.2.2. Energetické vlastnosti	18
4.2.3. Fyzikální vlastnosti.....	19
4.2.4. Ekonomické parametry	20
4.2.5. Environmentální parametry	20
5. Hodnocení kogenerační výroby	21
5.1. Parametry kogenerace.....	21
5.1.1. Energetické parametry	21
5.1.2. Účinnost při transformaci primárního paliva	23
5.1.3. Rozměrové parametry.....	23
5.1.4. Environmentální parametry	24
5.1.5. Ekonomické parametry	25

6.	Druhy kogeneračních technologií.....	26
6.1.	Kogenerace s parní turbínou	26
6.1.1.	Protitlaková parní turbína	26
6.1.2.	Kondenzační parní turbína	27
6.2.	Kogenerace se spalovací turbínou.....	29
6.2.1.	Mikroturbíny	29
6.3.	Kogenerace se spalovacími motory.....	30
6.4.	Paroplynová kogenerace	33
6.5.	Speciální kogenerační technologie.....	34
6.5.1.	Kogenerace se Stirlingovým motorem	34
6.5.2.	Kogenerace s palivovými články.....	35
7.	Návrh kogenerace pro Teplárnu Písek a.s.	37
7.1.	Popis Teplárny Písek.....	37
7.1.1.	Současný stav	37
7.1.2.	Výroba elektřiny a tepla	39
7.2.	Návrh kogeneračního systému	40
7.2.1.	Místo instalace	40
7.2.2.	Přípojka zemního plynu.....	40
7.2.3.	Parametry kogenerační jednotky	41
7.3.	Ekonomické hodnocení jednotlivých zdrojů.....	41
7.4.	Modely výroby Teplárny Písek s kogenerační jednotkou.....	43
7.4.1.	Výroba elektrické a tepelné energie	44
7.4.2.	Investiční a provozní náklady	47
7.4.3.	Ekonomické zhodnocení	48
7.4.4.	Citlivostní analýzy.....	50
8.	ZÁVĚR.....	58
8.1.	Závěrečné zhodnocení výsledků práce.....	59
9.	SEZNAM LITERATURY	60
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	62

Obrázky

Obrázek 1 – Kombinovaná výroba užitečných energetických forem

Obrázek 2 – Porovnání kombinované a oddělené výroby elektrické a tepelné energie

Obrázek 3 – Nepřímý způsob transformace energie paliva

Obrázek 4 – Přímý způsob transformace energie paliva

Obrázek 5 – Základní schéma zapojení protitlakové parní turbíny

Obrázek 6 – Základní schéma zapojení kondenzační parní turbíny s odběrem páry

Obrázek 7 – Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny

Obrázek 8 – Toky energií u KJ se spalovacím motorem v základním zapojení

Obrázek 9 – Znázornění jednotlivých fází Stirlingova cyklu

Obrázek 10 – Základní princip funkce palivového článku

Obrázek 11 – Plánované umístění kogenerační jednotky

Tabulky

Tabulka 1 – Základní parametry jednotlivých zdrojů společnosti Teplárna Písek a.s.

Tabulka 1 – Celková roční výroba elektřiny a tepla za rok 2020

Tabulka 3 – Základní technická data kogenerační jednotky Tedom Quanto D 4000

Tabulka 4 – Porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů na základě hodnoty CF

Tabulka 5 – Porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů na základě ekonomických ukazatelů z modelů na dvacetiletý provoz

Tabulka 6 – Roční výroba tepelné energie modelu s provozovaným kotlem K 11

Tabulka 7 – Roční výroba elektrické energie modelu s provozovaným kotlem K 11

Tabulka 8 – Roční výroba tepelné energie modelu s odstaveným kotlem K 11

Tabulka 9 – Roční výroba elektrické energie modelu s odstaveným kotlem K 11

Tabulka 10 – Investiční výdaje na nákup, instalaci a zprovoznění KJ

Tabulka 11 – Roční provozní náklady modelu s kotlem K 11

Tabulka 12 – Roční provozní náklady modelu s odstaveným kotlem K 11

Tabulka 13 – Tabulka vstupních hodnot pro model na výpočet provozu s kotlem K 11 na 20 let

Tabulka 14 – Tabulka vstupních hodnot pro model na výpočet provozu bez kotle K 11 na 20 let

Tabulka 15 – Tabulka porovnání výstupních hodnot obou modelů

Tabulka 16 – Tabulka citlivostní analýzy ceny emisních povolenek

Tabulka 17 – Tabulka citlivostní analýzy ceny uhlí

Tabulka 18 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny tepla s K 11

Tabulka 19 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny elektřiny s K 11

Tabulka 20 – Shrnutí výsledků citlivostních analýz s K 11

Tabulka 21 – Tabulka citlivostní analýzy ceny kogenerační jednotky

Tabulka 22 – Tabulka citlivostní analýzy ceny zemního

Tabulka 23 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny tepla bez K 11

Tabulka 24 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny elektřiny bez K 11

Tabulka 25 – Shrnutí výsledků citlivostních analýz bez K 11

Grafy

Graf 2 – Srovnání energetické hustoty vybraných paliv

Graf 2 – Výroba tepelné a elektrické energie v jednotlivých měsících roku 2020

Graf 3 – Roční výroba tepelné energie modelu s provozovaným kotlem K 11

Graf 4 – Roční výroba tepelné energie modelu s odstaveným kotlem K 11

Graf 5 – Citlivostní analýza ceny emisních povolenek

Graf 6 – Citlivostní analýza ceny uhlí

Graf 7 – Citlivostní analýza prodejní ceny tepla s K 11

Graf 8 – Citlivostní analýza prodejní ceny elektřiny s K 11

Graf 9 – Citlivostní analýza ceny kogenerační jednotky

Graf 10 – Citlivostní analýza ceny zemního plynu

Graf 11 – Citlivostní analýza prodejní ceny tepla bez K 11

Graf 12 – Citlivostní analýza prodejní ceny elektřiny bez K 11

Seznam zkratk

KJ – kogenerační jednotka/jednotky

KS – kogenerační systém/systemy

KT – kogenerační technologie

KVET – kombinovaná výroba elektřiny a tepla

PEZ – primární energetický zdroj/energetické zdroje

PJ – primární jednotka/jednotky

VTL – vysokotlaký

ŽP – životní prostředí

CF – Cash Flow

NPV – čistá současná hodnota

IRR – vnitřní výnosové procento

T_{ds} – diskontovaná doba splacení/návratnosti

1. ÚVOD

Během posledních několika let jsme svědky rozšiřujícího se trendu propagace a podpory obnovitelných zdrojů energie, jak v sociální, tak legislativní rovině, na úkor zdrojů využívajících fosilních paliv. Hlavní argumenty tohoto trendu jsou, že drtivá většina obnovitelných zdrojů neprodukuje během svého provozu žádné látky, jenž zhoršují kvalitu ovzduší a že energetické zdroje na fosilní paliva efektivně nevyužívají veškerou energii, kterou je možné z fosilních paliv získat. Existují však odvětví energetiky, kde si využívání většiny obnovitelných zdrojů lze jen těžko představit.

Teplárenství má v České republice již poměrně dlouhou tradici. Ve 20. letech minulého století, kdy v mnoha městech docházelo k průmyslovému rozvoji, se u nás začalo centrálně produkovat teplo, určené hlavně pro potřeby průmyslových aplikací. Po druhé světové válce docházelo k největšímu rozvoji teplárenských soustav, spojenému zejména s mohutným rozvojem těžkého průmyslu, který je velmi energeticky náročný. Od 70. let byl poté rozvoj teplárenských sítí spojen s hromadnou výstavbou panelových sídlišť a počátky využívání ušlechtilých paliv. Od přelomu století až dodnes se teplárenství setkává s novými technologiemi a palivem, snižováním ztrát tepelné energie v přenosových soustavách a s četnými legislativními opatřeními, jenž se snaží o ekologizaci a efektivnější využívání zdrojů. Teplárenství se nyní nachází ve chvíli, kdy je třeba rozhodnout jakým směrem se musí vydat. Od roku 2038 se totiž počítá s úplným koncem těžby a spalováním hnědého uhlí, jenž je využíváno ve velkém množství tepláren. K rozhodování musí být započtena také skutečnost, že stále více lidí volí místo využívání centrálního zásobování teplem instalace vlastních zdrojů tepelné energie. Otázkou tedy zůstává, zda je možné podstoupit opatření, která by v budoucnu zajistila možnost ekonomicky výhodného provozu některých tepláren.¹

Cílem této práce je podrobněji popsat principy kombinované výroby elektrické a tepelné energie, možnosti jejího využívání a technicko-ekonomicky zhodnotit, zda je možné efektivně použít kogeneraci v případě provozu většího teplárenského bloku.

¹ *Historie a budoucnost dálkového vytápění* [online]. Teplárenské sdružení České republiky [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/?id=2020>

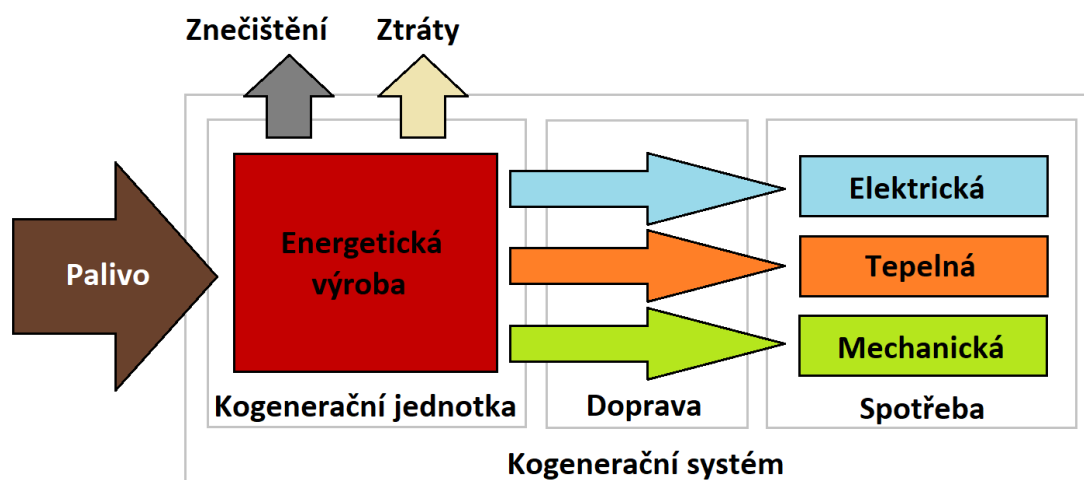
2. Kombinovaná výroba energie

2.1. Definice a princip kombinované výroby energií

V této kapitole (2.1) byly parafrázovány informace převážně z díla ².

Kombinovaná výroba energií je buď společná (integrovaná), postupná, nebo současná produkce požadovaných forem energií, jež jsou následně ihned připraveny k využití u spotřebitele. Takto vyráběné formy energie tvoří nejčastěji kombinaci energie elektrické a tepelné. Tato sdružená výroba se nazývá *kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*, dále se můžeme setkat s kratšími názvy **KVET** nebo **kogenerace**.

Veškerá technologická zařízení potřebná pro výrobu a přenos elektrické a tepelné energie se dohromady nazývá *kogenerační systém*, zkráceně **KS**. Pokud se část přivezené tepelné energie využívá k odebrání tepla jiného média (k chlazení), pak se takovýto systém nazývá *trigenerační systém* – **trigenerace**. Tento název byl zaveden z obchodního a bilančního hlediska, aby se dala dodávaná energie rozdělit na 3 druhy komodit a docílilo se tak větší přehlednosti.



Obrázek 1 - Kombinovaná výroba užitných energetických forem ³

Energie generovaná KS se používá pro 2 základní účely:

- využití konkrétní formy energie v technologických procesech
- využití konkrétní formy energie pro úpravu životních podmínek,

² (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 15-17

³ Totožné jako ¹, str. 16

v případě prvním se jedná o využívání energie při výrobních (podnikatelských) činnostech, v případě druhém jde o osobní spotřebu. Využití užitečných energetických forem značně závisí na jejich vlastnostech. Zatímco elektrická energie je vysoce jakostní forma energie, jenž lze za použití konkrétních transformačních systémů snadno přeměnit na jiné formy energie, s energií tepelnou je to o poznání horší. Její využitelnost se totiž odvíjí od jejích parametrů (teplota a tlak) a její možná přeměna na jiné druhy energie je značně omezena druhým termodynamickým zákonem.

Společná transformace primární energie z paliv na energii elektrickou a tepelnou se provádí v energetických výrobnách. Ty se nejčastěji označují jako *teplárenské jednotky* nebo *kogenerační jednotky*, zkráceně **KJ**. Výroba elektrické a tepelné energie může v těchto jednotkách probíhat v jednom, či více transformačních řetězcích. Příkladem možného využití více transformačních řetězců je paroplynová kogenerační jednotka. Jedná se o zařízení, ve kterém se nejprve při spalování plynu vyrábí elektrická energie a tepelná energie pro tvorbu páry (1. transformační řetězec). Pomocí páry se následně generuje, jak tepelná, tak elektrická energie připravená k odběru (2. transformační řetězec).

2.2. Oblasti uplatnění kogenerace

V této kapitole (2.2) byly parafrázovány informace převážně z díla ⁴, ⁵.

Uplatnění kogenerace je celkem široké, zejména díky velké rozmanitosti kogeneračních technologií a možnosti konstrukcí KJ malých, středních i velkých výkonů. Oblasti uplatnění kogenerace můžeme z hlediska velikosti výkonů rozdělit následovně:

- **Kogenerační zařízení malých a středních výkonů** – tyto KJ jsou nejčastěji využívány pro vytápění jednotlivých budov či menších skupin budov (např. nemocnice, ubytovny, obchodní domy, administrativní budovy apod.). Dále lze tato zařízení použít v průmyslových objektech pro generaci tepla o konkrétních parametrech, jenž je využíváno v různých technologických procesech. V případě středních výkonů mohou být tato zařízení napojena na soustavy centrálního zásobování teplem. Pro malé a střední výkony se používají spalovací motory, mikroturbíny, palivové články a Stirlingovy motory.

⁴ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 18-20 a 34-35

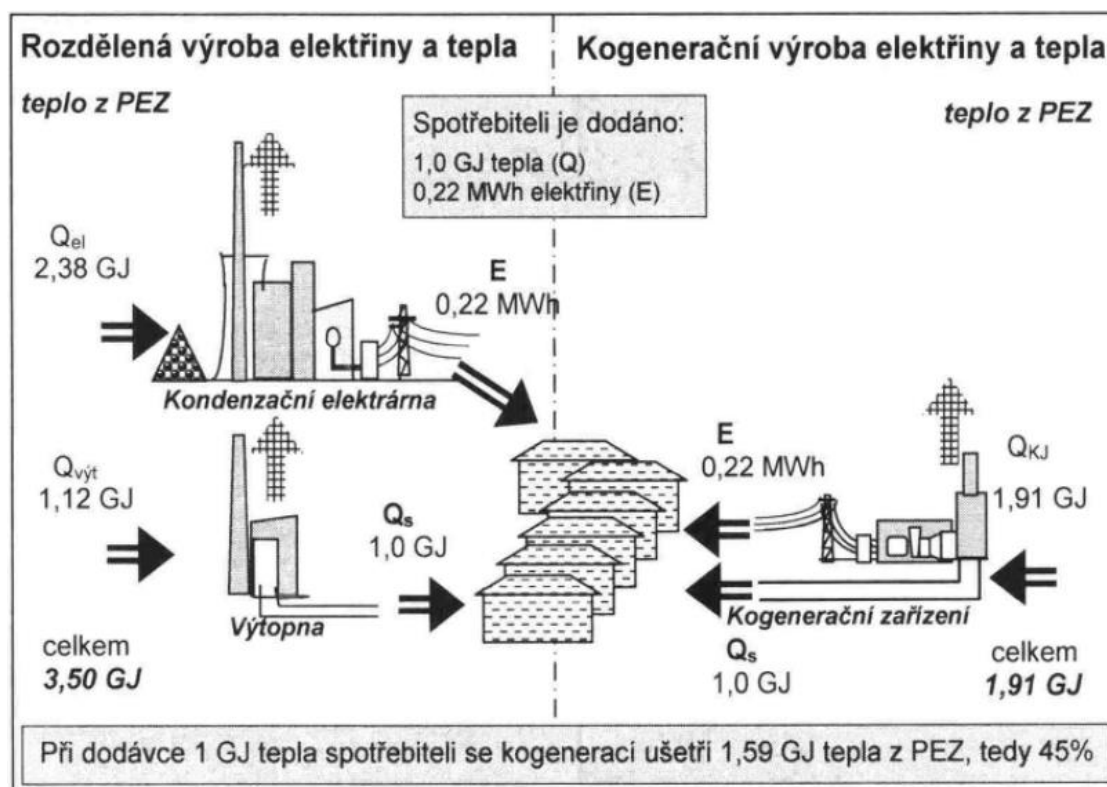
⁵ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice*. Brno: PC-DIR Real, 1999. ISBN 80-85895-23-4, str. 34-35

- **Kogenerační zařízení velkých výkonů** – Velká kogenerační zařízení jsou využívána zejména pro generaci páry s vyššími parametry, která je použita pro různé průmyslové aplikace a ve velkých komplexech budov. Dále mohou být KJ velkých výkonů využívány v teplárenských komplexech, kde zajišťují dodávky tepla do soustav centrálního zásobování teplem. Pro velké výkony se používají parní turbíny, spalovací turbíny, paroplynové cykly nebo spalovací motory.

2.3. Výhody kogenerační výroby

V této kapitole (2.3) byly parafrázovány informace převážně z díla ⁶.

Výhody kombinované výroby energií můžeme popsat a odvodit za pomoci následujícího obrázku a rovnic:



Obrázek 2 - Porovnání kombinované a oddělené výroby elektrické a tepelné energie ⁷

Úsporu energie obsaženou v primárním energetickém zdroji, zkráceně **PEZ**, jenž je znázorněna na obrázku 2, lze vypočítat za pomoci následujících matematických

⁶ (Parafrázováno) KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 80-732-8151-1, str. 8-9, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e4e41fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizeni_provoz_2220047233.pdf

⁷ Tamtéž, str. 6

vztahů. Veličiny v rovnicích jsou označeny stejně jako v obrázku. Pro potřebné množství elektrické energie E při známé elektrické účinnosti elektrárny η_{el} vypočítáme potřebné množství energie obsažené v PEZ Q_{el} .

$$Q_{el} = \frac{E}{\eta_{el}} \quad [G]; G], -] \quad (2.1)$$

Pro potřebné množství tepelné energie Q_s při známé tepelné účinnosti výtopny $\eta_{výt}$ vypočítáme potřebné množství energie obsažené v PEZ $Q_{výt}$.

$$Q_{výt} = \frac{Q_s}{\eta_{výt}} \quad [G]; G], -] \quad (2.2)$$

V případě kogenerační výroby je pak potřebné množství součtu energií elektřiny E a tepla Q_s při známé účinnosti kogenerace η_{KJ} vypočteno potřebné množství energie obsažené v PEZ Q_{KJ} .

$$Q_{KJ} = \frac{E + Q_s}{\eta_{KJ}} \quad [G]; G], G], -] \quad (2.3)$$

Za pomoci rovnic (2.1), (2.2) a (2.3) pak můžeme sestavit rovnici pro výpočet energetické úspory PEZ Q_u

$$Q_u = \frac{E}{\eta_{el}} + \frac{Q_s}{\eta_{výt}} - \frac{E + Q_s}{\eta_{KJ}} \quad [G]; G], -, G], -, G], G], -] \quad (2.4)$$

Za předpokladu, že účinnost výtopny $\eta_{výt}$ a účinnost kogenerace η_{KJ} jsou si rovny, můžeme rovnici (2.4) upravit.

$$\frac{Q_u}{Q_s} = \frac{E}{Q_s} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{KJ}} \right) \quad [G], G]; G], G], -, -] \quad (2.5)$$

Podíl elektřiny a tepla $\frac{E}{Q_s}$ se označuje jako **teplárenský modul** (anglicky *power/heat ratio*) a značí se e . Tento parametr je jeden ze zásadních ukazatelů kogenerace a jeho velikost závisí zejména na typu a provedení kogeneračního zdroje. V rovnici (2.5) můžeme vidět, že úspora energie je přímo úměrná teplárenskému modulu. V obecných případech se nám však účinnosti výtopny a kogenerace rovnat nebudou. V tomto případě bude mít předchozí rovnice tvar (2.6).⁸

$$\frac{Q_u}{Q_s} = \left(\frac{1}{\eta_{výt}} - \frac{1}{\eta_{KJ}} \right) + e \cdot \left(\frac{1}{\eta_{el}} - \frac{1}{\eta_{KJ}} \right) \quad [-; -, -, -, -, -] \quad (2.6)$$

⁸ Z grafických důvodů jsou u vzorce uvedeny jednotky jednotlivých členů rovnice, jednotky veličin jsou k nalezení výše v textu u předchozích rovnic.

Pro výpočet relativní energetické úspory PEZ nahrazením oddělené výroby kogenerací použijeme vzorec (2.7).⁹

$$\frac{Q_u}{Q_{el} + Q_{výt}} = 1 - \frac{\eta_{el} \cdot \eta_{výt}}{\eta_{KJ}} + \frac{e + 1}{e \cdot \eta_{výt} + \eta_{el}} \quad [-; -, -, -] \quad (2.7)$$

Zde vidíme, že úspora závisí hlavně na velikosti teplotního modulu e a na velikosti účinnosti kogenerace η_{KJ} . Jednou z hlavních výhod kogenerační výroby je tedy to, že pro zajištění potřebné dodávky elektřiny a tepla je třeba menší množství PEZ.

Další výhodou je skutečnost, že při sloučení výroby do jednoho komplexu se výrazně zmenší plocha potřebná pro výrobu energií. Pokud je navíc kogenerační systém dobře umístěn, mohou se také významně zmenšit ztráty způsobené distribucí energie. Dodáme-li fakt, že se k dobrému umístění přidá i vhodně zvolená konfigurace a režim provozu, mohou být celkové náklady na provoz KS výrazně menší než při provozu oddělených výroben.

V posledních letech se navíc v EU klade velký důraz na snižování spotřeby fosilních paliv a s tím spojené produkce škodlivých látek při výrobě elektrické a tepelné energie. Při menším spotřebovaném množství paliva se logicky uvolní menší množství škodlivin do atmosféry, což je také poměrně zásadní výhoda oproti oddělené výrobě. Lze tedy říct, že KS budou mít v budoucnu mnohem lepší předpoklady pro obhájení své pozice v energetickém mixu jednotlivých států.

2.4. Kogenerační systémy

V této kapitole (2.4) byly parafrázovány informace z díla ¹⁰.

Kogenerační systémy lze rozdělit dle různých hledisek. Tím nejzákladnějším je rozdělení dle pořadí využití vyráběných energií. Skupiny takto rozdělených KS se nazývají:

- **horní kogenerační systémy,**
- **dolní kogenerační systémy.**

Horní KS nejprve využívají palivo pro výrobu tepelné energie. Takto získané teplo má vysoké parametry, které se využívají v různých, na tepelnou energii náročných, technologických procesech. Zbytková tepelná energie poté putuje do dalšího zařízení (tepelné motory), kde se přeměňuje na energii mechanickou a následně v generátorech

⁹ Z grafických důvodů jsou u vzorce uvedeny jednotky jednotlivých členů rovnice, jednotky veličin jsou k nalezení výše v textu u předchozích rovnic.

¹⁰ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 19-20

na energii elektrickou. KS tohoto typu se nepoužívají tak často, neboť pro efektivní výrobu elektrické energie je třeba, aby do tepelných motorů vstupovalo teplonosné médium o poměrně vysokých teplotách a takových teplot po výstupu z technologických procesů médium nedosahuje.

V **dolním KS** vyrábíme tepelnou energii určenou k transformaci na energii elektrickou. Užitečná tepelná energie se následně získává odvodem zbytkového tepla po výrobě elektrické energie.

Další možné rozdělení je podle způsobu využití tepla a elektřiny z produkce KVET. KS můžeme provozovat za účelem čistě **komerčním**. Produkovaná tepelná a elektrická energie je tedy distribuována jednomu, či více uživatelům, kteří ji dále využívají a distributorovi to přináší zisk. KS jsou rovněž provozovány zejména k **nekomerčním** účelům, kdy je většina tepelné a elektrické energie využívána pro vlastní potřebu provozovatele KS. Přebytečné teplo a elektřina mohou být v rámci zlepšení efektivity provozu dále distribuovány dalším spotřebitelům.

3. Kogenerační technologie

V kogeneračních jednotkách s dolním KS dochází k plynulému přeměňování energie obsažené v palivu na energii elektrickou. Zbylá tepelná energie, kterou již dále není možno transformovat na energii elektrickou, je využívána pro dodávku tepla domácnostem, průmyslovým podnikům apod.

Způsobů, jak energii obsaženou v palivu přeměnit na energii elektrickou a využít i zbylou energii tepelnou, je mnoho. Všechny tyto způsoby jsou obecně nazývány jako kogenerační technologie, zkráceně **KT**. Ty lze, na základě počtu transformací, rozdělovat do dvou základních skupin. Při nich dochází k přeměnám energie:

- **nepřímým způsobem,**
- **přímým způsobem.**

Při **nepřímém způsobu** se využívá více energetických transformací pro přeměnu energie obsažené v palivu. Nejčastější způsob se skládá ze 3 transformačních procesů. Při prvním procesu dochází k uvolňování energie obsažené v palivu. Ta je ve druhém procesu využívána pro generaci mechanické práce, která se používá pro pohon různých spotřebičů a také v posledním procesu, kdy je přeměňována na energii elektrickou o určitých parametrech, které mohou být případně ještě dále upravovány.

U **přímého způsobu** se energie obsažená v palivu transformuje přímo na energii elektrickou a následně na energii tepelnou. V rámci tohoto způsobu může být dále produkovaná elektrická energie upravována, aby dosahovala požadovaných parametrů pro její konkrétní využití.

3.1. Zařízení kogenerační jednotky

V této kapitole (3.1) byly parafrázovány informace z díla ¹¹.

U obou způsobů přeměny elektrické a tepelné energie se KJ principiálně skládají z několika zařízení, která zajišťují dílčí procesy potřebné pro konečnou výrobu požadovaných energií. Jedná se o:

- 1) **zařízení pro úpravu PEZ/paliva,**
- 2) **primární jednotky/motoru,**
- 3) **zařízení pro výrobu elektrické energie,**
- 4) **zařízení pro rekuperaci tepelné energie.**

¹¹ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 21-24

1) Úprava parametrů paliva na hodnoty potřebné pro jeho použití v primární jednotce je zajišťována v **zařízení pro úpravu PEZ**. Požadované úpravy paliva mohou být následující:

a) Zušlechťení paliva

- Velmi často nutné pro správné a efektivní využití paliva v KJ.
- Účelem je zvýšení energie obsažené ve hmotnostní/objemové jednotce paliva nebo jeho homogenizace.
- Úprava paliva může také spočívat ve změně jeho skupenství.
- Zušlechťování s sebou nese značné náklady spojené s pořízením a provozováním zařízení k tomu určenému, se nimiž musí provozovatel KJ počítat. Existují však firmy specializované na zušlechťování primárních zdrojů, jež umožňují nakupovat palivo s již upravenými vlastnostmi a tím provozovateli KJ odpadá potřeba pořídit zařízení potřebných pro zušlechťování paliva.

b) Úprava prvkového složení paliva

- Dochází ke změnám množství jednotlivých složek obsažených v palivu.
- Nejčastěji se odstraňují nežádoucí příměsi (voda, síra, oxid uhličitý) a zvyšuje se koncentrace prvků, jež při transformaci paliva v primární jednotce reagují (reformování vodíkového paliva).

c) Úprava podmínek pro použití

- Zajištění vhodných podmínek při dopravě do KJ (regenerace tepla z paliva).
- Zlepšování podmínek pro uvolňování energie obsažené v palivu (tlak, teplota).

2) Hlavní část KJ, od které se odvíjí možnost jejího použití, je **primární jednotka**, zkráceně **PJ**. Zde dochází k transformaci energie obsažené v palivu na elektrickou či mechanickou energii a k přenosu zbytkové tepelné energie dále, pro její efektivní využití. Parametry generovaných energií (kvalita, množství a čas dodání) jsou definovány použitou technologií PJ. Jako PJ může být použit:

a) tepelný motor,

b) palivový článěk.

3) Již z označení **Zařízení pro výrobu a úpravu elektrické energie** plyne, že se zařízení skládá z:

a) elektrického generátoru,

b) elektrického měniče.

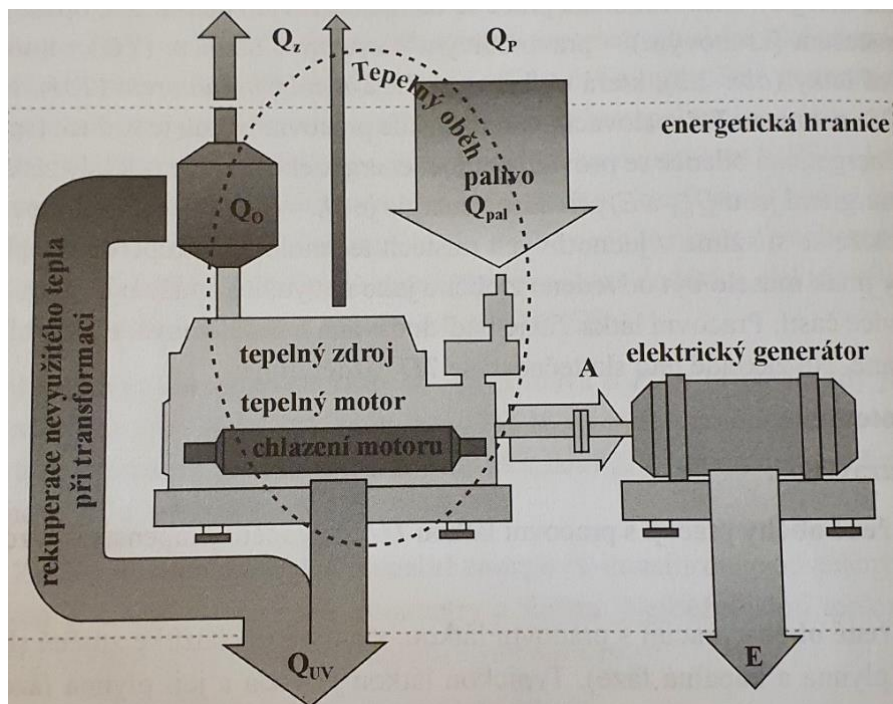
- a) **Elektrický generátor** je zařízení, jenž přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Možnosti úpravy parametrů elektrické energie závisí na tom, k čemu je určena a také, zda je generátor stejnoseměrný nebo střídavý.
- Stejnoseměrné generátory se používají zejména v případech, kdy se veškerá vyrobená elektrická energie využívá pro vlastní spotřebu provozovatele.
 - Střídavé generátory se používají jak pro zajišťování vlastní spotřeby, tak pro dodávání energie do distribuční/přenosové soustavy a mohou být buď synchronní, nebo asynchronní.
- b) **Elektrický měnič** je zařízení sloužící k úpravě parametrů elektrické energie. U PJ se používá v případech, kdy je třeba upravit parametry elektrického proudu např. změnu jeho frekvence, či transformaci stejnosměrného proudu na střídavý nebo naopak.
- 4) Posledním zařízením v rámci KJ je **zařízení pro rekuperaci tepelné energie**. To slouží k odvádění tepelného výkonu z KJ, jeho úpravám na požadované parametry a předání teplotněmu médiu (vzduch, vodní pára, nízkoteplotní/vysokoteplotní voda), které jej odvádí pryč z rekuperačních výměníků. Někdy nemusí být rekuperace nutná, v takovýchto případech se přímo využívá k přenosu tepelné energie látka z tepelného cyklu PJ.

3.2. Nepřímý způsob transformace paliva v kogeneračních jednotkách

V této kapitole (3.2) byly parafrázovány informace z díla ¹².

Při nepřímém způsobu transformace paliva KJ dochází uvolnění/regeneraci tepelné energie v tepelném zdroji. Uvolnění tepelné energie může být realizováno buď spalováním, jadernou reakcí nebo obnovitelnými zdroji (sluneční/geotermální ohřev). Následuje část, kdy během cyklického procesu tzv. tepelného oběhu, přenáší pracovní látka tepelnou energii mezi tepelným zdrojem a tepelným motorem, v němž se generuje mechanické energie.

¹² (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 25-26



Obrázek 3 - Nepřímý způsob transformace energie paliva ¹³

Pracovní látka v tepelném oběhu může být neustále vyměňována za novou, nebo se užívá stále stejné. Z tohoto hlediska rozdělujeme tepelné oběhy na:

- **Otevřené** – Pracovní látka tepelného oběhu je v plynném skupenství.
- **Uzavřené** – Při tepelném oběhu látka mění své skupenství mezi kapalnou a plynnou fází (nejčastěji se jedná o vodu).

V případě **otevřeného tepelného oběhu**, může být tepelný zdroj řešený dvěma způsoby. Buďto se může spalovací komora nacházet přímo v tepelném motoru a tepelný zdroj je tak součástí jeho konstrukce, nebo se může nacházet mimo a generované teplo se pak předává pracovní látce tepelného oběhu ve výměníku. Dle umístění tepelného zdroje pak můžeme motory rozdělit na spalování **vnitřní** a **vnější**. Motory s vnitřním spalováním je zvykem označovat jako *motory spalovací*.

Další možná rozdělení jsou:

- 1) Dělení tepelných motorů dle druhu pracovní látky:
 - a) parní,
 - b) plynové,
 - c) jiné.

¹³ DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 26

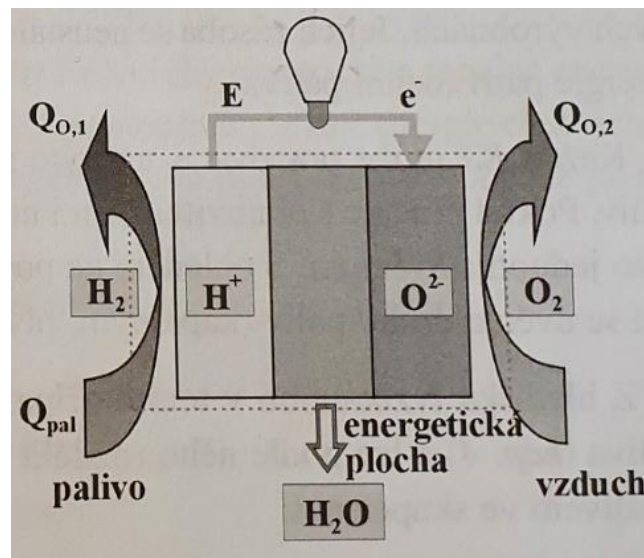
2) Dělení tepelných motorů dle způsobu přenosu energie na pracovní prvek:

- a) objemové (pístové),
- b) dynamické lopatkové,
- c) dynamické proudové.

3.3. Přímý způsob transformace paliva v kogeneračních jednotkách

V této kapitole (3.3) byly parafrázovány informace z děl ¹⁴, ¹⁵.

Tento způsob přeměny se využívá v technologii palivových článků. Dochází zde k obrácené elektrolýze vody – tj. dochází k reakci mezi vodíkem a kyslíkem a vzniká voda.



Obrázek 4 - Přímý způsob transformace energie paliva ¹⁶

Při tomto procesu nedochází k žádnému hoření, ale k elektrochemické reakci, která může probíhat za normální pokojové teploty. Aktivní látka, molekuly vodíku (H_2), se přivádí na membránu tvořenou např. palladiem. Na povrchu palladiové membrány dojde k rozdělení molekuly vodíku na atomy vodíku (H^+). Palladium je pro vodík transparentní, tj. může jím procházet. Aby jím však mohly atomy vodíku projít, je potřeba zajistit gradient. Toho lze docílit tím, že na jednu stranu membrány (anodu) přivádíme molekuly vodíku, a na druhou (katodu) vzduch, přesněji molekuly kyslíku (O_2). Atomy

¹⁴ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 27

¹⁵ (Volně parafrázováno) *Fuel Cells and Hydrogen Economy* [YouTube]. University of Illinois: Professor David Ruzic, 2019 [cit. 2021-01-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=peoO8-o6NM>

¹⁶ Stejně jako ¹⁴

vodíku tedy prochází skrze membránu a spolu s atomy kyslíku vytvářejí molekuly vody (H_2O). Membránou však neprojdou elektrony, které zůstávají na jedné straně membrány a vytvářejí potenciálový rozdíl mezi stranami membrány. Při připojení elektrického obvodu na tento potenciál vznikne elektrický proud.

3.4. Rozdělení kogeneračních technologií

V této kapitole (3.4) byly parafrázovány informace z díla ¹⁷.

Jak bylo již uvedeno výše, kogenerační technologie lze v základu rozdělit na přímé a nepřímé. Tyto dvě základní skupiny lze dále dělit a to podle:

- 1) **použitého paliva,**
- 2) **maximálního dosažitelného výkonu,**
- 3) **účelu využití,**
- 4) **efektivního použití KJ pro konkrétní technologie.** ¹⁸

1) Palivo používané pro provoz KJ může pocházet buď z *obnovitelných* nebo *neobnovitelných* zdrojů. Kogenerační jednotky mohou používat jak jedno konkrétní, tak i více různých druhů paliv. V případě využívání *obnovitelných* i *neobnovitelných* zdrojů jsou tyto KJ označovány jako hybridní.

- Za *obnovitelné* zdroje považujeme *sluneční záření, energii větru a vody, geotermální energii a biomasu.*
- Zdroje *neobnovitelné* tvoří *fosilní paliva* a jejich různé deriváty.

Paliva lze kromě původu také dělit podle skupenství, při němž je využíváno v KJ pro generování tepelné energie. Paliva lze tedy dále rozdělit na *plynná, kapalná* a *pevná*. Schémata a zařízení KJ se mohou principiálně lišit v závislosti na tom, v jakém skupenství s palivem pracují.

2) Rozdělení KJ dle **maximálního dosažitelného výkonu** nám udává kategorie odvozené od hodnot jejich mezního *elektrického a tepelného výkonu*. Jedná se o:

- *mikro-kogenerace* (do 50 kW),
- *mini-kogenerace* (do 500 kW),
- *kogenerace malého výkonu* (do 1 MW),
- *kogenerace středního výkonu* (do 50 MW),
- *kogenerace velkého výkonu* (nad 50 MW). ¹⁹

¹⁷ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 28-30

¹⁸ Tamtéž, str. 28

¹⁹ Tamtéž, str. 29

3) Rozdělení KT dle **účelu využití** je možno provést na základě jejich zapojení do systémů pro zásobování elektrinou a teplem. KT lze tedy rozdělit dle použití ve zdrojích:

- základních,
- špičkových,
- záložních,
- rezervních,
- specifických.²⁰

Dále je možné rozdělit kogenerační výrobu dle druhu spotřeby elektrické a tepelné energie na:

- centralizované zásobování teplem,
- průmyslovou kogeneraci,
- kogeneraci pro komerční sféru,
- kogeneraci pro komunální sféru,
- kogeneraci pro bytovou sféru.²¹

4) Způsob vyhodnocování na základě **efektivnosti použití KJ** spočívá v porovnávání konkrétních KT s oddělenou výrobou v případě nějakých konkrétních aplikací. V potaz se v tomto případě bere, zda je v konkrétní situaci výhodnější použití kogenerace oproti jiným variantám. Jedním z hlavních důvodů volby kogenerace je jejich vysoká efektivita zužitkování používaného paliva. Při takovémto zajištění dodávek tepelné a elektrické dochází ke značným úsporám paliva.

3.5. Konstrukční provedení kogeneračních jednotek

V této kapitole (3.5) byly parafrázovány informace z díla ²².

Každá kogenerační jednotka určitého typu musí být složena z konkrétních zařízení. Není tedy divu, že KJ nabízené od různých výrobců, se od sebe z hlediska konstrukčního uspořádání zas tak moc neliší. Vzhledem k pestrým možnostem uplatnění KJ se dají dle konstrukčního provedení rozdělit na 2 typy.

1) KJ modulového uspořádání

²⁰ DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 29

²¹ Tamtéž

²² (Parafrázováno) Tamtéž, str. 30-36

- Použití hlavně pro KJ menších výkonů.
- V rámci úspory místa jsou zařízení KJ umístěna co nejvíce u sebe v jednom modulu.
- Možnost současného provozu více propojených modulů.
- Šetří investiční náklady a čas nutný k instalaci.
- Mají přesně předepsané instrukce pro jejich instalaci a následný provoz, který je vysoce automatizovaný.
- Splňují všechny normy spojené s provozem KJ.
- Jsou určeny jak pro venkovní, tak pro vnitřní instalace.

2) KJ stavebnicového uspořádání

- Použití pro KJ vyšších výkonů.
- KJ je dodána od výrobce v rozloženém stavu (je také možnost zakoupit jednotlivá zařízení KJ od různých výrobců s ohledem na jejich vzájemnou kompatibilitu).
- Nízké pořizovací náklady, ale poměrně vysoké náklady spojené s instalací (vypracování projektu uspořádání KJ, nutné stavební úpravy apod.).

U kogeneračních jednotek je neustálá snaha o zlepšování jejich výkonových vlastností pro zvýšení jejich možností konkurovat jak KJ od jiných dodavatelů, tak jiným možnostem výroby požadovaných energií. U KJ modulového uspořádání je pak snaha o zmenšování rozměrů modulů pro snadnou manipulaci a menší prostorové nároky v místě provozu. Mimo snahu o technické zlepšování KJ se také klade velký důraz na vizuální stránku, neboť použití konkrétních tvarů a barev hraje rovněž nemalou roli v rozhodování potenciálního zákazníka.

4. Paliva pro kogenerační výrobu

Asi tím nejdůležitějším parametrem pro kogeneraci je palivo. To nám přímo určuje kogenerační technologie, pro které se dá použít. Při návrhu KJ tedy jedno určuje druhé a naopak. Pokud je při návrhu hlavním určujícím prvkem konkrétní technologie, musíme detailně prozkoumat možnosti zásobování palivem - jeho dostupnost, cenu, náklady na dopravu a skladování, potřebu jeho úpravy a náklady spojené se zpracováním zbytků po jeho průchodu KJ. Pokud máme při navrhování již vyřešenou otázku palivových dodávek, je třeba podle toho zvolit kogenerační technologie, které je možné pro dané místo použít. Při návrhu KJ je třeba klást velký důraz na maximalizaci shody parametrů paliva a kogenerační technologie. Právě to je klíčový prvek, který v budoucnu zajišťuje efektivní a bezproblémový provoz KJ.

4.1. Rozdělení paliv

V této kapitole (4.1) byly parafrázovány informace z díla ²³.

Paliva lze rozdělovat do různých kategorií mnoha způsoby. Mezi nejzákladnější způsoby patří hlavně rozdělení paliv na základě jejich původu vzniku, fyzikálních vlastností, energetické hustoty a vlivů na životní prostředí, zkráceně **ŽP**. Pro KJ se paliva rozdělují dle:

- 1) **typu paliva,**
 - 2) **druhu paliva,**
 - 3) **dostupnosti paliva.**²⁴
- 1) **Typem paliva** je myšlen původ vzniku a v tomto ohledu se pak paliva dále rozdělují na:
- a) **Fosilní paliva**
 - Nerostné suroviny s vysokou energetickou hustotou vzniklé z organické hmoty v období prvohor/druhohor. Jedná se konkrétně o ropu, zemní plyn, černé a hnědé uhlí.

²³ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 77-80

²⁴ Tamtéž, str. 77

b) Biopaliva

- Paliva získaná z biomasy, tj. hmota rostlinného a živočišného původu. Substituenty pro výrobu těchto paliv mohou být materiály cíleně vyráběné/pěstované pro energetické využití, anebo se může jednat o druhotné produkty v potravinářství a zemědělství. Energetická hustota biopaliv je značně ovlivňována obsahem vody.

c) Alternativní paliva

- Paliva vznikající během energeticky velmi náročných procesů. Jedná se například o vodík. Většina těchto paliv se nachází v oblasti vývoje a ověřování jejich využitelnosti. Hlavním cílem je vytvořit palivo s velkou energetickou hustotou, jehož využití minimalizuje negativní vliv na ŽP.

2) **Druhem paliva** se rozumí jeho skupenství a s ním související základní fyzikální vlastnosti. Dle skupenství lze tedy tyto paliva rozčlenit na:

a) Tuhá (pevná)

- Tento druh paliva se vyznačuje nízkou energetickou hustotou, proto je ho pro získání určité energie potřeba velké množství. Tuhá paliva také obsahují velké množství nežádoucích příměsí, jenž mají neblahý vliv na ŽP. Je tedy třeba tyto látky během spalování zachytávat a vyřešit, jak s nimi dále naložit. Typickými příklady jsou černé/hnědé uhlí a jejich deriváty, rašelina, dřevo a biomasa.

b) Kapalná

- Kapalná paliva mají vysokou energetickou hustotu. Při jejich spalování nevzniká tolik nežádoucích emisí jako při spalování tuhých paliv. Jejich nevýhodou jsou však zvýšené požadavky z hlediska bezpečnosti při jejich přepravě a skladování. Nechtěným únikem těchto látek může dojít k jejich vznícení nebo fatálnímu znečištění ŽP. Jedná se o kapalné deriváty zemního plynu, různé druhy olejů, kapalné uhlovodíky (methanol, ethanol) a kapalné deriváty uhlí, ropy a olejů.

c) Plynná

- Díky své konzistenci umožňují plynná paliva před spalovacími procesy dokonalé promísení se vzduchem. Tato paliva obsahují pouze velmi malé množství nežádoucích emisních látek. Jejich obsah a tvorbu při spalování lze omezit speciálními úpravami paliva a plynulou regulací při spalovacích procesech. Parametry těchto paliv jsou značně závislé na stavových podmínkách (teplota a tlak). Mezi plynná paliva řadíme zemní plyn, plynné

uhlovodíky a jejich směsi (např. propan, butan...), bioplyny a různé plynné deriváty zemního plynu, ropy, uhlí a olejů.

- 3) **Dostupností paliva** rozumíme možnost jeho pořízení na trhu. Takto lze paliva rozdělit na *komerční* a *nekomerční*.

4.2. Parametry paliv

V této kapitole (4.2) byly parafrázovány informace z díla ²⁵.

Parametry paliva jsou jakostní hodnoty, jenž charakterizují jeho **chemické, energetické, fyzikální, ekonomické a environmentální** vlastnosti.

4.2.1. Chemické vlastnosti

Jedná se o vlastnosti, jenž nám udávají schopnost reakce paliva s kyslíkem. Zatímco některá paliva mají tuto schopnost poměrně vysokou (hlavně plynná), u některých je třeba např. rozemletím nebo zajištěním potřebné teploty umožnit vznik reakce a při dostatečném přísunu vzduchu pak uvolňovat potřebné množství tepla. Neupravené surové palivo se skládá ze 3 složek:

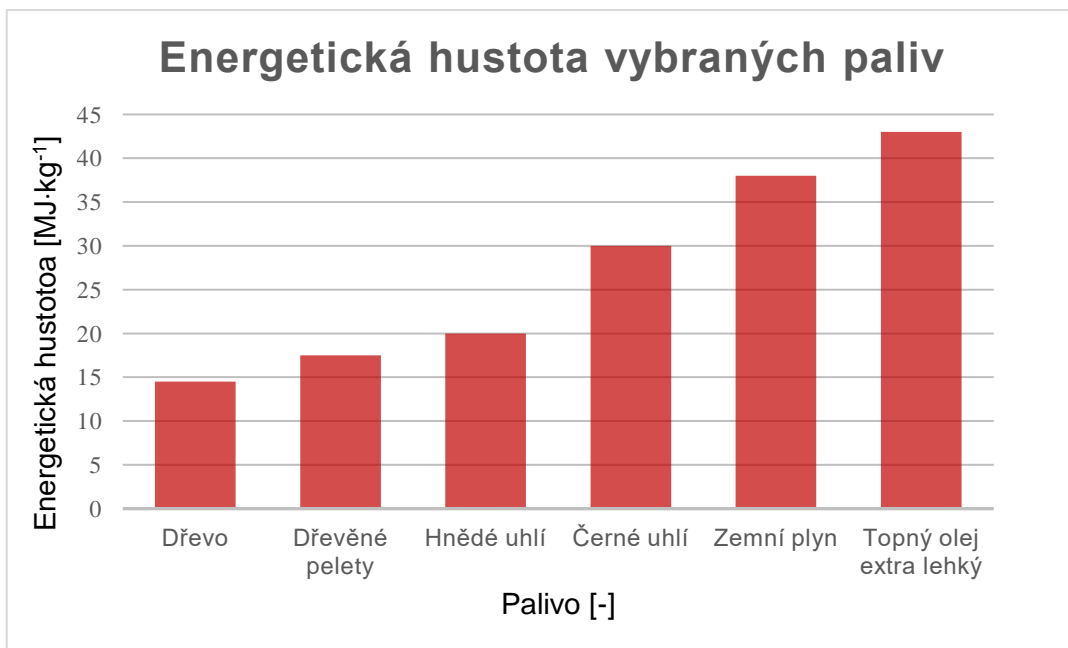
- **Hořlaviny** – prvky, jenž při spalování reagují s kyslíkem a tím vznikají nové substance. Konkrétně se jedná hlavně o uhlík, vodík a síru, které jsou zdrojem chemicky vázaného tepla.
- **Nespalitelné prvky** – prvky, jenž při spalování nereagují s kyslíkem a jsou pouze ohřívány. Ideální jsou paliva obsahující co nejmenší množství této složky.
- **Voda** – Vzhledem k velké tepelné kapacitě vody je tato složka nežádoucí. S narůstajícím obsahem vody v palivu jeho výhřevnost dosti klesá.

4.2.2. Energetické vlastnosti

Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro porovnávání jednotlivých paliv a pro jejich bilancování. Základním parametrem je obsah energie v jednotce paliva, kterou z něj lze získat a předat dále. Pro hodnocení energetických vlastností paliv se užívají tyto parametry:

²⁵ (Parafrázováno) DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 80-96

- **Spalné teplo** [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] – měrná hodnota tepla vzniklá dokonalým spálením měrné jednotky paliva, kdy jsou spaliny ochlazeny na výchozí teplotu a voda ze spalin, obsahující různé odpadní látky, je v kapalném stavu.
- **Výhřevnost** [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] – množství tepla získané dokonalým spálením měrné jednotky paliva, přičemž všechna voda ze spalin je odvedena ve formě vodní páry. Výhřevnost má vždy menší hodnotu než spalné teplo. Liší se o tepelnou energii potřebnou pro přeměnu vody na vodní páru.
- **Energetická hustota** [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] – vyjadřuje množství energie obsažené v objemové/hmotnostní jednotce paliva. (Graf 1)



Graf 3 - Srovnání energetické hustoty vybraných paliv ²⁶

4.2.3. Fyzikální vlastnosti

Závisí na typu a druhu paliva. U některých druhů paliv je možné změřit pouze vybrané parametry např. viskozitu. Pro použití paliv v KJ je důležité znát následující parametry.

- **Měrná hmotnost (hustota) ρ** [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – parametr důležitý pro zjištění nároků z hlediska skladování, vztaženému k množství tepla, které chceme v KJ produkovat.

²⁶ (Volně parafrázováno) PONCAROVÁ, Jana. *Energetická hustota paliv: Topný olej na špičce* [online]. nazeleno.cz, 2012 [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/vytapeni/energeticka-hustota-paliv-topny-olej-na-spicce.aspx>

- **Viskozita (dynamická viskozita) η [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]** – silně závisí na teplotě paliva. Je důležitá hlavně při transportu kapalných paliv. Palivo je třeba přehřívát, jinak by se jeho pohyb transportním systémem zpomalil.
- **Zápalná teplota ϑ_z [$^{\circ}\text{C}$]** – minimální teplota na kterou je třeba ohřát směs paliva a vzduchu, aby došlo k jejich reakci. Závisí na druhu paliva a podmínkách jeho zapálení.
- **Teplota vzplanutí ϑ_{vz} [$^{\circ}\text{C}$]** – uvádí se u kapalných paliv, a je to nejnižší možná teplota látky, při které vzniknou páry o dostatečném tlaku, aby mohlo dojít k jejich zapálení.
- **Mez vznětlivosti (výbušnosti) UEL, LEL (UFL, LFL) [%]** – mezní koncentrace hořlavin ve směsi paliva a vzduchu, při kterých může docházet k reakci hoření.
- **Spalná teplota ϑ_s [$^{\circ}\text{C}$]** – teplota, které lze dosáhnout při spalování příslušného paliva. Hodnota této teploty závisí na druhu a složení paliva a na podmínkách při procesu spalování.
- **Teploty fázových změn ϑ [$^{\circ}\text{C}$]** – např. tuhnutí kapalin, tání pro pevné zbytky paliva, teplota zkapalnění plynných paliv atd.

4.2.4. Ekonomické parametry

Ekonomické parametry nám představují veškeré náklady spojené s nákupem, transportem, skladováním a úpravou paliva. Tyto jednotlivé náklady jsou závislé na předchozích třech skupinách vlastností paliva.

4.2.5. Environmentální parametry

Environmentální parametry vyjadřují množství škodlivých látek, vzniklých při procesu spalování různých typů paliva. Tyto parametry závisí na chemických vlastnostech daného paliva.

5. Hodnocení kogenerační výroby

Vzhledem k určitým odlišnostem různých technologií KVET nelze tyto technologie hodnotit a porovnávat z širšího hlediska. Pro tyto účely se používají ukazatele, jenž charakterizují základní vlastnosti těchto energetických řetězců. Mezi hlavní ukazatele patří **účinnost transformace primárních zdrojů, náklady na výrobu konečných forem energie a vliv na životní prostředí**. Tyto tři ukazatele jsou důležité pro každý energetický zdroj. Při použití KVET je pak vhodné analyzovat pro konkrétní technologie vhodnost pro instalaci a provoz, v porovnání s jinými možnostmi zajištění dodávek požadovaných forem energie (hlavně pro oddělenou výrobu elektřiny a tepla). Z těchto analýz by nám mělo vyplynout, o kolik se: **zvýší využití primárních zdrojů, sníží znečišťující vlivy a sníží ztráty spojené s dopravou energií na místo spotřeby**. Pro výpočet těchto ukazatelů je potřeba znát parametry a provozní vlastnosti KT.

5.1. Parametry kogenerace

V této kapitole (5.1) byly parafrázovány informace z děl ²⁷, ²⁸.

Jedná se o veličiny popisující fyzikální, konstrukční, provozní, ekonomické a environmentální vlastnosti KJ a závislosti mezi nimi. Tyto parametry určují možnosti použití KJ. Jejich hodnoty se mohou měnit v závislosti na provozu/zatížení (dynamické parametry) nebo se v čase nemění vůbec (statické parametry). Důležitost těchto parametrů je značně závislá na účelu použití KJ. Např. u KJ určené ke špičkovému zatížení nás budou zajímat jiné parametry, než u KJ pro běžné zatížení (běžný provoz).

5.1.1. Energetické parametry

Udávají energetické možnosti transformačního řetězce KJ. Jedná se konkrétně o **elektrický výkon, tepelný výkon, poměr elektrického a tepelného výkonu a kvalitu tepelné a elektrické energie**.

²⁷ DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7, str. 37-66

²⁸ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 11-13, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

Elektrický výkon $P_E(t)$ je okamžitá hodnota, jakou KJ dodává. Tato hodnota se může pohybovat v tzv. *regulačním rozsahu*, který je ohraničen mezními hodnotami minimálního a maximálního výkonu, jaký je KJ schopna produkovat. V tomto rozsahu se nachází *jmenovitá hodnota výkonu $P_{E,n}$* , tj. hodnota, při níž je účinnost výroby maximální a KJ se provozuje co nejhospodárněji. Pro KJ malých a středních výkonů se jmenovitá hodnota výkonu nachází na okraji regulačního rozsahu a je shodná s maximálním možným výkonem.

Tepelný výkon $P_T(t)$ je okamžitá hodnota, kterou lze z KJ odvést a využít pro dodávku tepla. Jeho hodnota je úzce spjata s výkonem elektrickým. Pokud je jednotka provozována pro dodávku určité hodnoty elektrické energie, vzniká přitom odpovídající množství tepla. Pokud toto množství produkovaného tepla převyšuje odběr, je třeba toto přebytečné teplo odvádět z prostoru KJ pryč do okolního prostředí.

Poměr elektrického a tepelného výkonu σ je poměr elektrické práce a množství tepla, využitelného pro užitečné dodávky. V teplotě se tomuto poměru říká modul teplotěnské výroby elektrické energie. Pomocí tohoto parametru se volí velikost instalovaného elektrického a tepelného výkonu. Při porovnávání KVET s oddělenou výrobou má pak tento parametr zásadní vliv na vyhodnocení účinnosti KJ, protože účinnost výroby elektřiny se může podstatně lišit od účinnosti výroby tepla. Poměr σ lze vypočítat dle následujících vztahů:

$$\sigma = \frac{E}{Q_{UV}} = \frac{E_{\%}}{Q_{UV,\%}} = \frac{P_E}{P_T} = \frac{P_{E,\%}}{P_{T,\%}} \quad [-] \quad (5.1)$$

$P_E, P_{E,\%}$ - elektrický výkon a jeho procentní zastoupení na celkovém výkonu KJ [W, %]

$P_T, P_{T,\%}$ - tepelný výkon a jeho procentní zastoupení na celkovém výkonu KJ [W, %]

$E, E_{\%}$ - vyrobená el. energie a její procentní zastoupení na celkové výrobě KJ [J, %]

$Q_{UV}, Q_{UV,\%}$ - využitá tep. en. a její procentní zastoupení na celkové výrobě KJ [J, %]

Kvalita tepelné energie závisí na její formě. Možné formy uložené energie byly již zmíněny v kapitole 3.1 v rámci *zařízení pro rekuperaci tepelné energie*. Zásadní roli v možnostech využití tepelné energie hraje teplota. Z tohoto hlediska lze teplo rozdělit na:

- **Vysokopotenciální** – lze jej využívat pro různé průmyslové aplikace (vysoušení, výroba páry...)
- **Nízkopotenciální** – se akumuluje hlavně ve vodě a využívá se pro teplotěnské účely.

V závislosti na použité kogenerační technologii může být dosahováno různých teplot. U KJ s nepřímou transformací energií dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou. Účinnost toho procesu značně závisí na teplotě.

5.1.2. Účinnost při transformaci primárního paliva

Dle zákona o zachování energie je účinnost vždy dána poměrem energie výstupní (využitě) a vstupní (dodané) v rámci energetického systému. Vzhledem k tomu, že KJ produkují více forem energie, najdeme zde více účinností, vztažených k jednotlivým transformacím.

- 1) **Elektrická účinnost η_E** nám reprezentuje efektivitu transformace energie obsažené v palivu na elektrickou energii. Hodnota jmenovité elektrické účinnosti se odvíjí od typu kogenerační technologie a od hodnot elektrického výkonu KJ. η_E lze vypočítat následujícím způsobem:

$$\eta_E^{KVET} = \frac{E}{Q_{pal}} = \frac{E}{m_{pal} \cdot Q_i} = \frac{P_E}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad [-] \quad (5.2)$$

m_{pal} – hmotnost nebo objem paliva [$\text{kg} \cdot \text{m}^3$]

M_{pal} – hmotnostní nebo objemový průtok paliva [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_i – energie v hmotnostní nebo objemové jednotce paliva [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]

- 2) **Tepelná účinnost η_T** je účinnost transformace energie obsažené v palivu na užitečně využitelnou tepelnou energii. η_T lze vypočítat následujícím způsobem:

$$\eta_T^{KVET} = \frac{Q_{UV}}{Q_{pal}} = \frac{Q_{UV}}{m_{pal} \cdot Q_i} = \frac{P_T}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad [-] \quad (5.3)$$

- 3) **Celková účinnost η_C** je dána součtem dílčích účinností a představuje účinnost přeměny energie obsažené v palivu na všechny formy užitečné energie (elektrickou, tepelnou, mechanickou...)

$$\eta_C^{KVET} = \eta_E^{KVET} + \eta_T^{KVET} = \frac{E + Q_{UV}}{Q_{pal}} = \frac{E + Q_{UV}}{m_{pal} \cdot Q_i} = \frac{P_E + P_T}{M_{pal} \cdot Q_i} \quad [-] \quad (5.4)$$

5.1.3. Rozměrové parametry

Tyto parametry jsou určeny prostorovými, instalačními a stavebními nároky KJ, využívající konkrétní kogenerační technologii pro dosažení požadovaných hodnot tepelné a elektrické energie. Pro porovnávání KJ se nejčastěji využívá parametr *el. výkonu vztaženého na jednotku plochy* [$\text{W}_E \cdot \text{m}^{-2}$], *objemu* [$\text{W}_E \cdot \text{m}^{-3}$] a *hmotnosti* [$\text{W}_E \cdot \text{kg}^{-1}$].

5.1.4. Environmentální parametry

Provoz každé KJ má určitý dopad na okolní prostředí. Výrobci KJ musí proto splňovat směrnice a vyhlášky, vydávané příslušnými úřady, vycházející ze zákonů, jenž stanovují limity pro všechny známé negativní vlivy. Tyto účinky můžeme rozdělit na:

1) Účinky jedovatých látek ve spalínách

- Jedná se o chemické látky, škodlivě působící na ŽP. Tyto látky mohou negativně pozměnit anebo poškodit genetické informace pro reprodukci rostlinných a živočišných buněk. Tyto škodliviny vznikají během transformace primárního paliva působením látek v něm obsažených. Tvorbu škodlivin nemůžeme zcela zastavit, ale můžeme ji omezit např. vhodnou úpravou primárního paliva před transformací, nebo zachytáváním/odvodem těchto látek vystupujících z KJ.

2) Účinky jedovatých látek v tuhých odpadních látkách

- S těmito látkami se potýkáme zejména u KJ spalujících pevná paliva. Při spalování dochází, mimo tvorbu spalin, také ke vzniku pevných částic (popela, škváry) a při čištění spalin také mohou vznikat pevné odpadní látky. Zákon o odpadech stanovuje klasifikaci skupin odpadů a nakládání s nimi.

3) Účinky mechanické energie

- Účinky mechanické energie mohou způsobovat hluk a vibrace. **Hluk** je jakýkoliv zvuk, nepříjemný nebo škodlivý pro lidské ucho. V technické praxi se velikost hluku vyjadřuje v tzv. akustických hladinách L_p [dB]. Existují zákony, klasifikující různá prostředí a zařízení v nich, pro která stanovují emisní limity hluku. **Vibrace** jsou kmity a chvění pevných těles. V technické praxi se vibrační účinky vyjadřují v hladinách vibrací $L_{a,f}$ [dB] o určitých *frekvencích* [Hz]. Tento parametr není výrobci běžně udáván, ale je třeba jej řešit zejména v případech, kdy se KJ nachází v blízkosti obytných nebo pracovních prostor.

4) Účinky tepelné energie

- Účinky tepelné energie jsou způsobovány odpadním teplem a emisemi skleníkových plynů. **Odpadní teplo** je část tepelné energie, vzniklé při transformaci paliva, kterou není možné využít pro tepelnou spotřebu a je jí třeba odvádět do okolí. Při realizaci těchto odvodů musí být zajištěno, aby toto odpadní teplo příliš negativně neovlivňovalo ŽP. **Emise skleníkových plynů** způsobují oteplování zemské atmosféry. Jejich regulace je

prováděna zejména na základě emisních povolenek, v závislosti na druhu technologie a velikosti instalovaného výkonu.

5) Účinky elektrické energie

- Průchodem elektrického proudu obvodem vzniká elektromagnetické pole. To může mít neblahý vliv na objekty nacházející se v poli jeho působení. Při špatném provedení elektroinstalace KJ může např. docházet k rušení a tím špatnému chodu přístrojů, k akumulaci elektrického náboje, který může způsobit zranění pracovníka, nebo destrukci zařízení apod. Některá zařízení např. transformátory mohou při svém chodu vydávat nízkofrekvenční hukot, který nepříjemně dráždí sluch. Tyto nechtěné účinky elektrické energie lze omezit správným provedením elektroinstalace, uzemněním (izolací) míst, kde by se mohl hromadit elektrický náboj a použitím správných materiálů.

5.1.5. Ekonomické parametry

Z hlediska konkurenceschopnosti KJ vůči jiným způsobům zajištění požadovaných dodávek elektřiny a tepla jsou důležité ekonomické parametry. Ty jsou dány veškerými náklady před uvedením do provozu a během provozu. **Před uvedením do provozu** je třeba zajistit zejména vypracování návrhu kogeneračního systému, nákup KJ a její instalaci do KS. **Během provozu** je pak třeba řešit hlavně veškeré náklady spojené s palivem, údržbou a opravami KJ.

6. Druhy kogeneračních technologií

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, nejdůležitější částí kogenerační jednotky je primární jednotka. Její podoba je závislá na použitém typu kogenerační technologie a má největší vliv na parametry celé KJ. Následující kapitoly se zabývají bližším popisem vybraných KJ.

6.1. Kogenerace s parní turbínou

V této kapitole (6.1) byly parafrázovány informace z děl^{29, 30}.

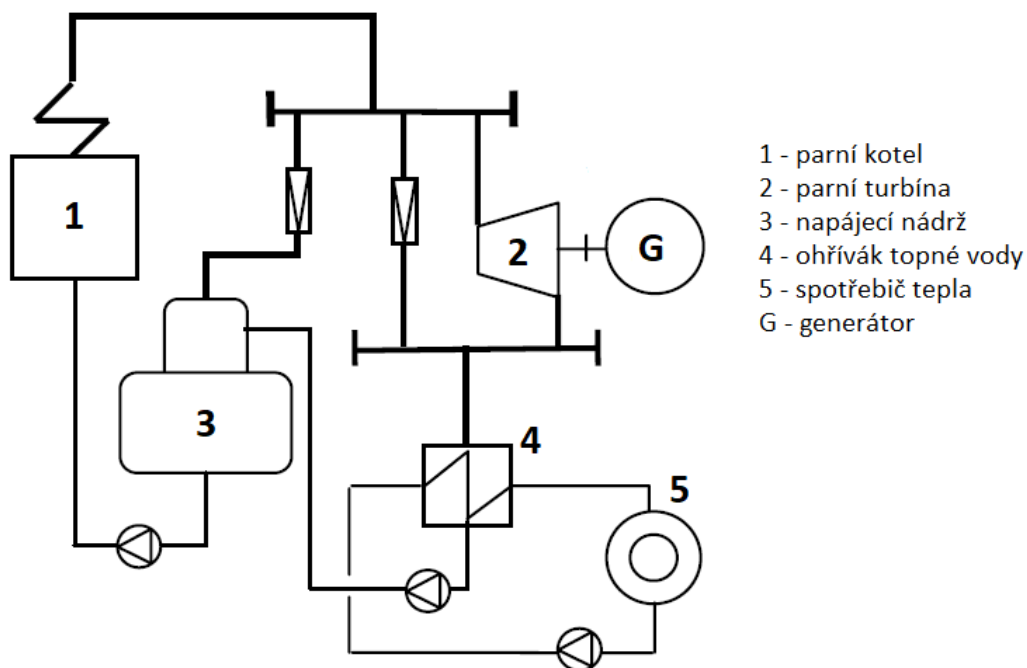
Parní turbíny se pro průmyslové kogenerační systémy používají již poměrně dlouhou dobu. Jejich fungování je založeno na základě Rankin-Clausiova (parního) cyklu, kdy se v kotli vyrábí pára, která v turbíně expanduje, roztočí ji a generuje tím mechanickou energii. Po výstupu z turbíny směřuje pára buď do kondenzátoru, nebo do tepelného výměníku. Do KS lze parní turbínu zapojit dvěma způsoby, které určují použití kogenerace. Parní turbína může být zapojena jako **protitlaková** nebo **kondenzační**.

6.1.1. Protitlaková parní turbína

Při tomto zapojení je veškerá pára, jenž projde turbínou, určena pro teplotní účely. Parní výstup z turbíny je veden do tepelného výměníku, kde dochází k ohřevu topné vody. Kvůli poměrně nízkému tlaku výstupní páry nedosahuje tepelná energie vysokých parametrů. Někdy je potřeba tyto parametry upravit, např. odběrem části páry ještě před výstupem z turbíny nebo přímo z kotle. V takovýchto případech mluvíme o vícestupňovém ohřevu. To však zásadně snižuje elektrickou účinnost. Další možností je zvýšení výkonu KJ, které s sebou nese odpovídající vzrůst investičních a provozních nákladů. Využití parních turbín je nejčastěji realizováno pro centralizovanou výrobu tepelné energie, nebo pro průmyslové objekty s velkou spotřebou tepla.

²⁹ (Parafrázováno KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 20-24, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizeni_provoz_2220047233.pdf

³⁰ (Parafrázováno) KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTRINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 15-27, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

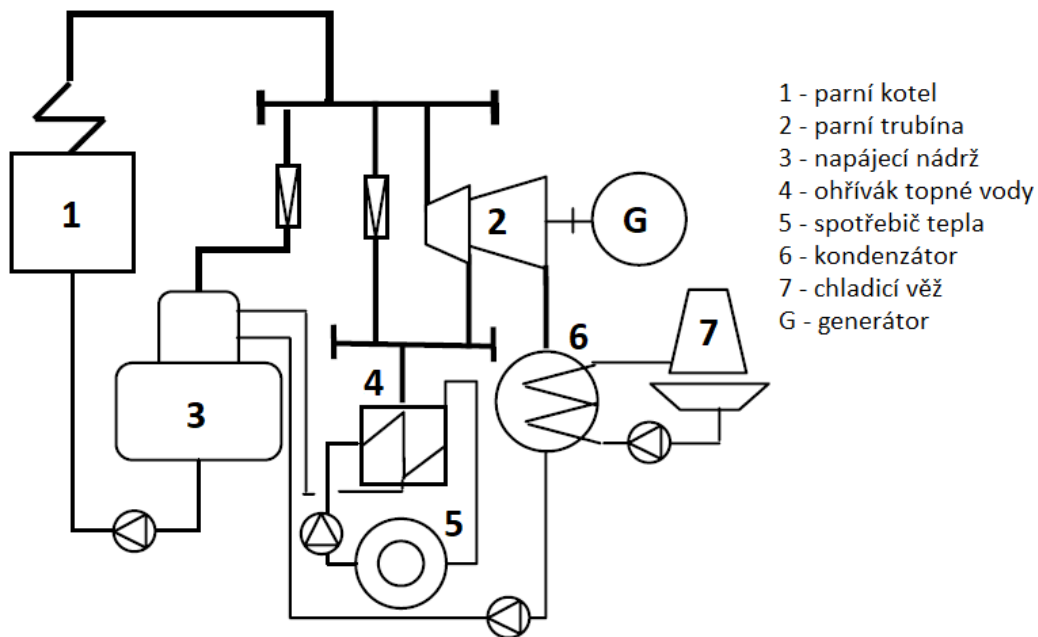


Obrázek 5 - Základní schéma zapojení protitlakové parní turbíny ³¹

6.1.2. Kondenzační parní turbína

Jak již z názvu vyplývá, pára je z výstupu turbíny svedena do kondenzátoru, kde dochází k přenosu zbytkového tepla do chladicího okruhu, který poté odvádí teplo pryč do okolního prostředí. Pro tento typ zapojení je primární výroba elektrické energie. Čistě kondenzační turbíny slouží pouze k výrobě elektrické energie. Na *Obrázku 6* lze vidět zapojení, které umožňuje i výrobu tepelné energie. Tu je však nutno realizovat mezi-
 stupňovým odběrem páry z turbíny, neboť parametry páry na výstupu turbíny dosahují velmi nízkých hodnot a tuto páru tak nelze využít pro topné účely.

³¹ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 20, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf



Obrázek 6 - Základní schéma zapojení kondenzační parní turbíny s odběrem páry ³²

Výhody a nevýhody kogenerací s parními turbínami

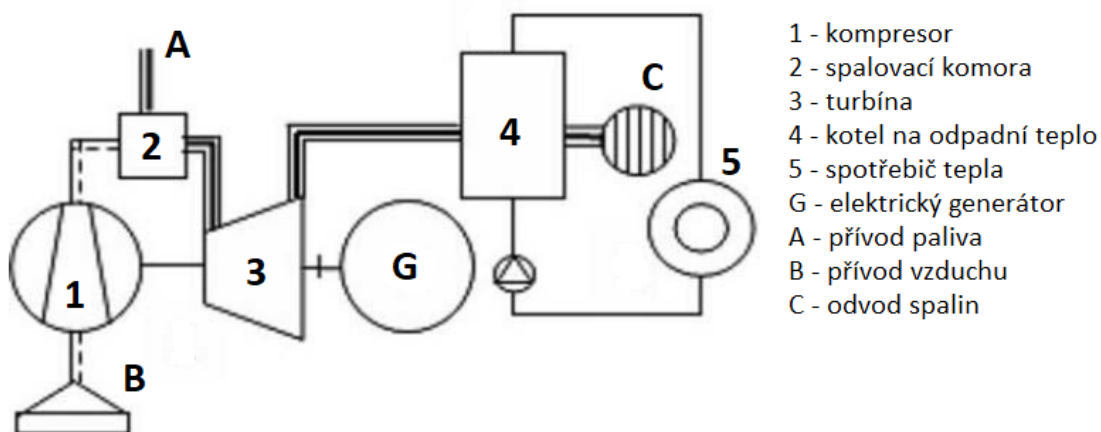
- + Použití libovolného paliva.
- + Teplo lze dodávat jak ve vodě, tak v páře.
- + Velký rozsah jednotkových výkonů.
- + Vysoká celková účinnost kogenerace a dlouhá životnost.
- Velké investiční náklady.
- Pomalé najíždění a změna výkonu.
- Velká hmotnost a rozměry kogeneračního zařízení.
- Poměrně složitě zařízení s řadou pomocných provozů.
- Malý poměr elektrického a tepelného výkonu.

³² KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 20, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

6.2. Kogenerace se spalovací turbínou

V této kapitole (6.2) byly parafrázovány informace z děl^{33, 34}.

Jednoduché zapojení spalovací turbíny je znázorněno na *Obrázku 7*. Kompresor z atmosféry nasává a stlačuje vzduch na potřebný tlak. Stlačený vzduch je veden do spalovací komory, kde dochází ke spalování paliva za stálého tlaku. Vzniklé spaliny o vysokém tlaku a teplotě jsou přivedeny do spalovací turbíny, kde dochází k jejich expanzi. Na konci turbíny jsou spaliny vedeny do kotle na odpadní teplo, kde dochází k přenosu zbytkové tepelné energie. Po výstupu z kotle jsou spaliny odvedeny do atmosféry. Mechanická energie generovaná turbínou pohání elektrický generátor a kompresor. Zbytková tepelná energie spalin na výstupu z turbíny může být využita pro různé technologické procesy, pro ohřev teplé vody pro vytápění / užitkové teplé vody nebo pro generování páry pro parní turbínu (paroplynový cyklus je podrobněji popsán dále).



Obrázek 7 - Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny³⁵

6.2.1. Mikroturbíny

Jedná se o turbíny o výkonu menším než 1 MW_E. Dříve byl koncept spalovacích turbín malých výkonů neekonomický. S postupem času však docházelo ke značným pokrokům v oblasti konstrukcí spalovacích turbín. Díky tomu bylo již možné konstruovat konkurenceschopné spalovací turbíny s výkony od 25 kW_E. Mikroturbíny pracují

³³ (Parafrázováno) KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 25-32, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

³⁴ (Parafrázováno) KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 28-34 a 49-51, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

³⁵ Stejně jako³³, str. 28

na stejném principu jako běžné spalovací turbíny, ale při mnohem větších otáčkách a jsou do určité míry konstrukčně odlišné. KJ s mikroturbínami jsou konstruovány nejčastěji v modulovém provedení, kdy jsou veškeré části umístěny uvnitř skříní (modulu), a je třeba vyřešit pouze připojení jednotlivých komponent na přívody vzduchu, paliva apod. Mikroturbíny mohou být použity jako decentralizované zdroje elektřiny, pokrývající spotřebu tepla a elektřiny průmyslových komplexů, obchodních center, nemocnic a dalších objektů.

Výhody a nevýhody kogenerací se spalovacími turbínami

- + Vysoká spolehlivost a dlouhý provoz bez nutnosti odstávek.
- + Vysokopotenciální teplo ve formě vody i páry.
- + Malá hmotnost a rozměry.
- + Rychlé najíždění a změna výkonu.
- + Nízké měrné investiční náklady.
- + Malá spotřeba vody.
- + Krátká doba výstavby.

- Pro malé výkony nižší účinnost a vyšší měrné investiční náklady.
- Vysoká hluková hladina zvuku o vysokých kmitočtech.
- Potřeba kvalitních paliv a případných úprav jejich parametrů.
- Zhoršení účinnosti při nižším zatížení a vyšších teplotách okolí.

6.3. Kogenerace se spalovacími motory

V této kapitole (6.3) byly parafrázovány informace z děl ^{36, 37}.

Pro tuto technologii jsou použity pístové motory s vnitřním spalováním, které jsou odvozeny od klasických spalovacích motorů používaných v autech, lodích a trakčních vozidlech. Tyto motory lze dle způsobu zapálení směsi vzduchu a paliva rozdělit na:

- **Motory vznětové** – k zapálení dochází při vstřiku paliva do válce plného stlačeného horkého vzduchu.

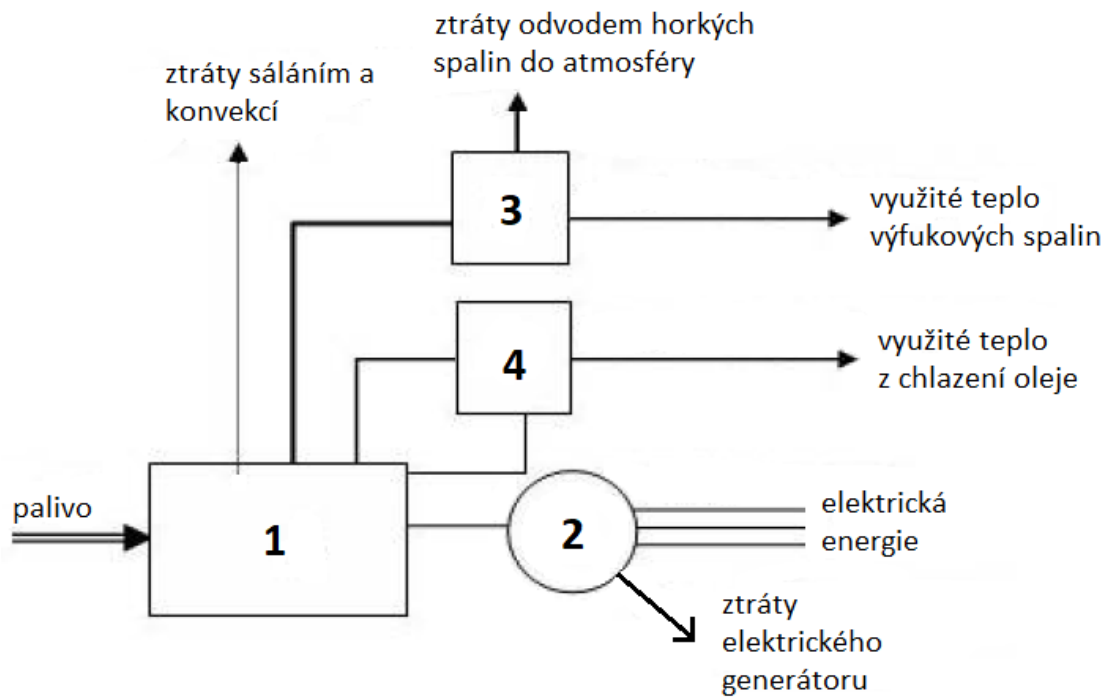
³⁶ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 32-36, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e441fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

³⁷ KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 42-48, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

- **Motory zážehové** – Směs paliva je zapálena pomocí elektrické jiskry. Tento typ motoru má menší účinnost než motor vznětový.

Oba typy těchto motorů mají velké množství částí, jež při chodu provádí posuvné pohyby při vysokých teplotách. Tím dochází k rychlejšímu opotřebování těchto částí. Na rozdíl od KT využívajících rotující zařízení mají spalovací motory mnohem větší požadavky na údržbu a je třeba je častěji odstavovat. Posuvnými pohyby také vznikají velké nevyvážené síly, které mohou způsobovat vibrace a hluk celého soustrojí. Motory je proto třeba vybavit speciálním uložením, které absorbuje vzniklé vibrace a opatřit kvalitní hlukovou izolací.

KJ používající spalovací motor získává elektrickou energii, stejně jako jiné technologie, pomocí elektrického generátoru připojeného na hřídel společnou s motorem. Tepelná energie je získávána dvěma způsoby. První způsob využívá tepelnou energii obsaženou ve spalinách vznikající ve válcích motoru. Spaliny předávají část tepelné energie ve výměníku a z něj vystupují do atmosféry. Teplo odevzdané ve výměníku může být použito pro ohřev topné vody nebo generování páry. Druhý způsob spočívá v chlazení motoru. Jak již bylo řečeno, některé části motoru provádí posuvný pohyb při vysokých teplotách. Tyto části je třeba chladit a chránit před mechanickým opotřebením. To zajišťuje promazávání těchto částí olejem. Ten absorbuje teplo od těchto teplotně namáhaných částí motoru a proudí skrze uzavřený okruh do výměníku, kde předává absorbované teplo, jež slouží pro ohřev topné vody.



Obrázek 8 - Toky energií u KJ se spalovacím motorem v základním zapojení ³⁸

Výhody a nevýhody kogenerací se spalovacími motory

- + Rychlé najíždění a odstávky.
- + Vysoké účinnosti i pro KJ malých výkonů.
- + Jednoduchá instalace.
- + Malé prostorové nároky.
- Potřeba kvalitních (ušlechtilých) paliv a případných úprav jejich parametrů.
- Velká hlučnost a vibrace.
- Účinnost závislá na skupenství média přebírajícího teplo.

³⁸ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 33, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

6.4. Paroplynová kogenerace

V této kapitole (6.4) byly parafrázovány informace z děl^{39, 40}.

Jedná se o kogenerační technologii složenou ze 2 cyklů. První částí je okruh spalovací turbíny nebo spalovacího motoru a druhou část tvoří okruh parní turbíny. Zbytková tepelná energie spalin ze spalovacího okruhu se v kotli využívá pro generování páry pro druhý parní cyklus. Díky tomu lze dosáhnout lepšího využití primárního zdroje a zvýšit tím účinnost přeměny energie obsažené v palivu na tepelnou a elektrickou energii. Tato technologie se ve světě často využívá při stavbě či rekonstrukci plynových tepláren.

Výhody a nevýhody kogenerací se spalovacími motory

- + Vysoký podíl vyráběné elektrické energie.
- + Vysoká účinnost kogeneračního zařízení.
- + Teplo lze dodávat jak pomocí vody, tak páry.
- Potřeba kvalitních (ušlechtilých) paliv a případné úpravy jejich parametrů.
- Vyžaduje kontinuální provoz bez častých odstávek.
- Technologicky velmi komplexní technologie.
- Vysoké nároky na kvalitu údržby a obsluhy.

³⁹ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 37-39, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

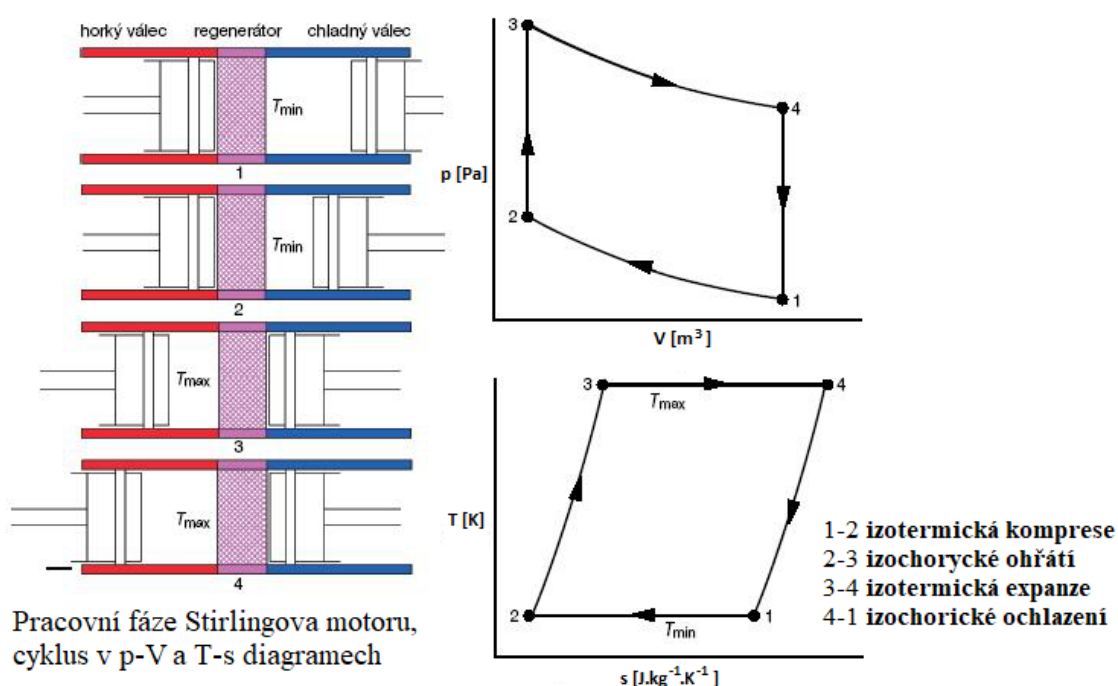
⁴⁰ KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTRINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 35-40, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

6.5. Speciální kogenerační technologie

V této kapitole (6.5) byly parafrázovány informace převážně z děl ⁴¹, ⁴², ⁴³.

6.5.1. Kogenerace se Stirlingovým motorem

Stirlingův (teplovzdušný) motor je speciální typ pístového motoru s vnějším spalováním. Tento motor má 2 prostory které jsou na sebe navzájem napojeny. Při změně objemu jednoho prostoru na to opačným způsobem reaguje druhý. V této konstrukci lze generovat mechanickou energii při cyklickém ohřívání a ochlazování inertního plynu v těchto prostorech. Na *obrázku 9* je možné vidět znázornění jednotlivých fází cyklu spolu s jeho p-v a T-s diagramy.



Obrázek 9 - Znázornění jednotlivých fází Stirlingova cyklu ⁴⁴

⁴¹ KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřízení a provoz* [online]. 1. vy. Praha: GAS, 2007 [cit. 2020-11-10]. ISBN 978-80-7328-151-9, str. 41-47, Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e4ee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf

⁴² KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 51-54, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

⁴³ Fuel Cells and Hydrogen Economy [YouTube]. University of Illinois: Professor David Ruzic, 2019 [cit. 2021-01-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=peoO8-o6NM>

⁴⁴ Jako ⁴² str. 51

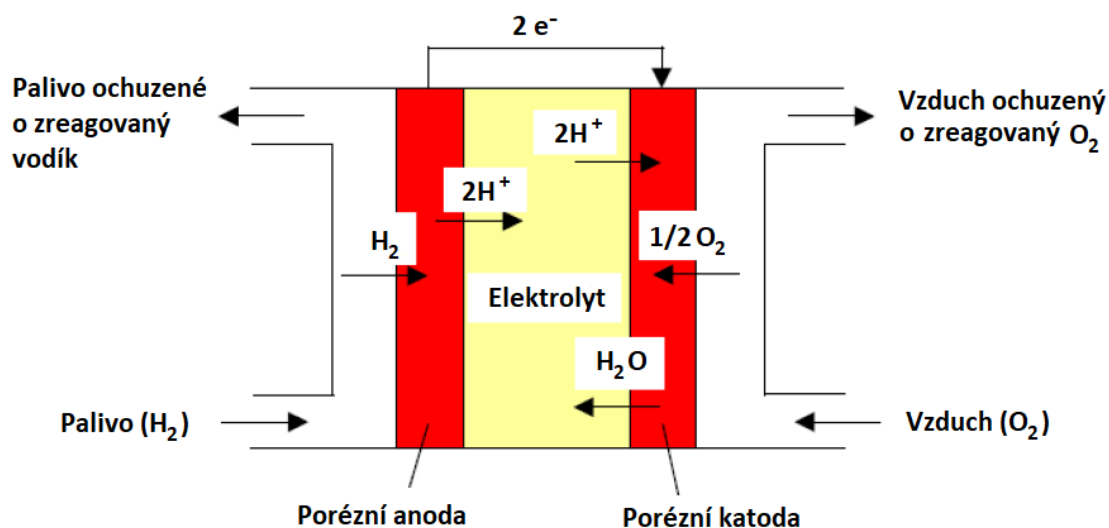
Výhody a nevýhody kogenerací se Stirlingovým motorem

- + Použití libovolného druhu paliva.
- + Vyšší tepelná účinnost než u motorů s vnitřním spalováním.
- + Nižší servisní náklady a dlouhá životnost.
- + Nízká hlučnost.

- Potřeba speciálních materiálů na výrobu některých komponent motoru.
- Kvůli náročnosti některých technologií nelze sériově vyrábět.
- Vyšší cena (pořizovací, instalace).

6.5.2. Kogenerace s palivovými články

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii paliva přímo na energii elektrickou. Svým provozem naprosto minimálně negativně působí na životní prostředí. Jedná se o velmi účinnou a vysoce spolehlivou technologii. Vzhledem k absenci jakýchkoliv točivých částí je chod palivového článku velmi tichý. Jejich hlavní nevýhodou však je, že výroba čistého vodíku, který je k reakci potřeba je značně nákladná a životnost elektrolytu (palladiových membrán) je krátká. To se promítne i v pořizovací ceně a ceně vyráběné elektřiny. Princip činnosti článku lze vidět na *obrázku 10* a jeho podrobné vysvětlení se nachází v kapitole **3.3** na str. 12. Existuje však metoda, při níž lze používat zemní plyn, přesněji metan (CH_4) v něm obsažený, místo čistého vodíku. Této metody využívá palivový článek s tuhým oxidem (**solid oxide fuel cell**), který při vysokých teplotách kolem $800\text{ }^\circ\text{C}$ dokáže rozdělit metan na jednotlivé atomy vodíku a uhlíku, jenž následně reagují s přiváděným kyslíkem. Reakce je stejná jako při spalování metanu, ovšem bez přítomnosti hoření. Při této metodě dosahuje účinnost výroby elektrické energie až 50 %, což je více než u plynových elektráren (kolem 33 %) a paroplynových elektráren (kolem 40 %).



Obrázek 10 - Základní princip funkce palivového článku ⁴⁵

Výhody a nevýhody kogenerací s palivovými články

- + Absence pohyblivých částí – velmi nízká hlučnost.
- + Vysoká účinnost výroby elektrické energie.
- + Životnost palivových článků s tuhým oxidem může být až 10 let.
- Vysoká pořizovací cena.
- Vysoká cena vyrobené elektrické energie – použití dává smysl pouze v regionech, kde je elektrická energie drahá.

⁴⁵ KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. str. 53, Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>

7. Návrh kogenerace pro Teplárnu Písek a.s.

Následující kapitoly jsou věnovány návrhu instalace kogenerační výroby pro konkrétní průmyslový objekt. Nejprve je tento objekt představen a popsán jeho současný stav. Dále je zde prezentována vybraná kogenerační jednotka, její základní parametry a výpočty její výroby elektřiny a tepla. Následuje výběr potenciálního místa instalace v průmyslovém areálu a zajištění zásobování palivem. Poslední kapitoly jsou věnovány ekonomickému zhodnocení jednotlivých zdrojů (již instalovaných a KJ), ekonomickému zhodnocení provozu průmyslového areálu s již provozovanou kogenerací a citlivostním analýzám vybraných vstupů.

7.1. Popis Teplárny Písek

Průmyslový komplex teplárny se nachází na jižním okraji města Písek. Tento objekt je vlastněn společností Teplárna Písek a.s. Jejím hlavním předmětem podnikání je provozování městské soustavy dálkového vytápění, výroba a prodej elektřiny a výroba, prodej a rozvod tepla. Další oblasti jejich podnikání tvoří: údržba, opravy, rekonstrukce a modernizace teplárenských zařízení; výstavba teplárenských děl a zařízení nutných pro její provoz; silniční motorová nákladní doprava; montáž, opravy, revize a zkoušky tlakových zařízení a nádob na plyn a další činnosti.

7.1.1. Současný stav

V této kapitole (7.1.1) byly parafrázovány informace převážně z díla ⁴⁶.

Výrobu tepla v prostorách teplárny původně poskytovaly dva stejné parní kotle K 11 a K 12 na směs hnědého uhlí a biomasy. V minulém roce došlo k odstavení kotle K 12 a přetypování kotle K 11 na tepelný příkon pod 20 MWt. Zároveň byla v areálu teplárny dokončena instalace nového horkovodního kotle na biomasu K 13 s maximálním tepelným výkonem 10 MWt. Mimo teplárenský komplex se dále v městské části Písek – Samoty od roku 2018 nachází nový plynový kotel K 24 s tepelným příkonem 19 MWt a v městské části Písek – Pražské předměstí se nachází plynový kotel HVS Dukla s tepelným příkonem 5 MWt. Všechny tyto zdroje (K 11, K 13, K 24) se podílí na celkové produkci tepla, mimo poslední plynový kotel HVS Dukla, který slouží jako

⁴⁶ Teplárna Písek a.s. Výroční zpráva 2020 [online]. Teplárna Písek a.s. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: https://www.tpi.cz/vz/vz_2020.pdf, str. 7-9

záložní. Jak se v reálném čase jednotlivé zdroje podílejí na celkové produkci se odvíjí od aktuálních cen paliv a množství naskladněného paliva. Nejstarším zdrojem je Uhelný kotel K 11, který funguje od roku 1985. Během topné sezóny tento kotel jede téměř neustále na plný výkon, protože jeho provoz je ze všech zdrojů stále nejvíce ekonomicky výhodný.

V *Tabulce 1* jsou uvedeny základní údaje třech hlavních zdrojů, jenž se podílejí na každoroční výrobě tepelné energie.

	Uhelný kotel (K11)	Biomasový kotel (K13)	Plynový kotel (K24)	Plynový kotel (HVS Dukla)
Tepelný výkon [MW]	17,438	10	18,354	4,75
Příkon [MW]	19,83	11,494	19,184	5
Účinnost [-]	0,879	0,87	0,957	0,95

Tabulka 1 – Základní parametry jednotlivých zdrojů společnosti Teplárna Písek a.s.

Výroba elektřiny je zajišťována pomocí dvou protitlakých turbín, které jsou poháněny párou generovanou uhelným kotlem K 11. První turbína TG 1 má instalovaný výkon 6 MWe a od odstavení kotle K 12 a přetypování kotle K 11 není využívána. Druhá turbína TG 2 má instalovaný výkon 1,8 MWe ⁴⁷, je stále provozována a její produkce elektrické energie je využívána pro pokrytí vlastní spotřeby areálu teplárny a zbytek je vyveden do distribuční soustavy. Přestože od doby svého spuštění prošel uhelný kotel K 11 několika úpravami a funguje stále dobře, nevyhnutelně se blíží doba, kdy jej bude třeba odstavit, stejně jako byl nedávno odstaven uhelný kotel K 12, a nahradit jej zdrojem novým. V budoucnu se uvažuje o instalaci jedné, či více kogeneračních jednotek a spalovně odpadu.

Pro přenos tepelné energie provozuje společnost Teplárna Písek a.s. čtyři horkovodní stanice o výkonech 16, 23, 24 a 20 MW, parovodní síť o celkové délce 7,406 km, horkovodní síť o celkové délce 23,642 km a teplovodní síť o celkové délce 13,024 km. Na tepelné síti je v současné době připojeno celkem 556 odběratelů, mezi něž patří průmyslové podniky, kanceláře, obchodní domy, nemocnice a 8193 bytů/domácností.

Při přenosu dodávek tepla ke koncovým spotřebitelům dochází ke značným ztrátám. K těm největším dochází v parovodech. Parovodní síť ve městě Písek vznikla kvůli

⁴⁷ Vzhledem ke stáří turbíny dnes již reálný maximální výkon turbíny činí 1,5 MW – s touto hodnotou jsou tedy prováděny ekonomické výpočty.

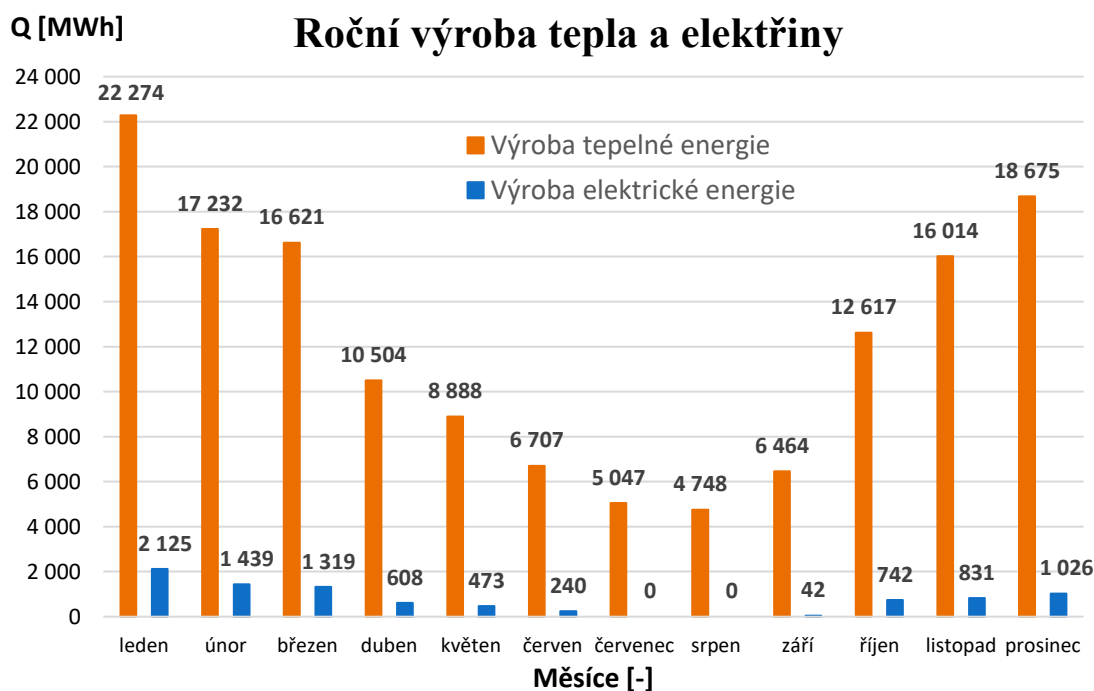
potřebám parních dodávek pro průmyslové objekty. Téměř všechny z těchto průmyslových areálů již ukončily svoji činnost a dodávky páry pro posledních pár zákazníků se již jeví jako ekonomicky nevýhodné. Proto se celá parovodní síť postupně ruší a je přebudována na horkovodní.

7.1.2. Výroba elektřiny a tepla

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, na celkové produkci tepla se podílejí všechny zdroje v takové kombinaci, která vychází ekonomicky nejlépe. Zdrojem, který je provozován během topné sezony neustále, je Uhelný kotel K11. Jím vyráběná pára pohání protitlakou parní turbínu s elektrickým generátorem. Zhruba třetina vyráběné elektrické energie pokrývá vlastní spotřebu teplárny a zbylé dvě třetiny jsou vyvedeny do distribuční sítě. Výkon potřebný pro dodávku tepla je doplňován Biomasovým kotlem K 13 v areálu teplárny a Plynovým kotlem K 24 v městské části Písek – Samoty. V *Tabulce 2* je uvedena celková roční výroba tepelné a elektrické energie a v *Grafu 2* je zobrazen průběh výroby během roku za jednotlivé měsíce.

Celková roční výroba	
Tepelná energie [MWh]	145 791
Elektrická energie [MWh]	8 846

Tabulka 4 – Celková roční výroba elektřiny a tepla za rok 2020



Graf 2 – Výroba tepelné a elektrické energie v jednotlivých měsících roku 2020

7.2. Návrh kogeneračního systému

V dalších kapitolách se zabývám návrhem a posouzením instalace kogenerační výroby. Tato výroba by byla schopna částečně nahradit výrobu tepla dosluhujícího uhelného kotle a poskytnout novou výrobu elektrické energie jejíž zlomek by postačil pro pokrytí vlastní spotřeby areálu teplárny a zbytek by byl vyveden do distribuční sítě.

7.2.1. Místo instalace

Pro místo instalace byl vybrán prostor nacházející se přímo vedle hlavního výrobního bloku, ve kterém se nachází Uhlý kotel K 11 a odstavený Uhlý kotel K 12. Ze dvou možných lokací vhodných pro instalaci kogenerační výroby byla vybrána tato, viz. *Obrázek 11*, protože se nachází přímo vedle hlavního výrobního bloku teplárny, tím se sníží možné náklady potřebné pro připojení na horkovod, odvod spalin a vývod elektrické energie. Tato lokace poskytuje dostatek místa pro instalaci KJ.



Obrázek 11 – Plánované umístění kogenerační jednotky

7.2.2. Přípojka zemního plynu

Do areálu teplárny není zavedeno připojení na plynovod. Při realizaci návrhu by tedy bylo nutné zhotovit tuto přípojku. Severozápadně od areálu teplárny prochází stávající vedení VTL plynovodu viz *Příloha č. 1*. Tento plynovod by měl mít dostatečnou kapacitu pro napájení kogenerační jednotky/jednotek o celkovém maximálním tepelném příkonu 20 MWt.

7.2.3. Parametry kogenerační jednotky

Vybraná kogenerační jednotka, TEDOM Quanto D 4000, je vyrobena firmou TEDOM a.s. a je schopna při plném zatížení poskytovat maximální tepelný výkon $P_{Tmax} = 4,418$ MW a maximální elektrický výkon $P_{Emax} = 4,5$ MW. Tato KJ je dodávána v modulovém provedení bez odhlučnění kapoty pro vnitřní zástavbu a jako palivo využívá zemní plyn. Základní technická data jsou uvedena v *Tabulce 3*. Další informace jsou k dispozici v *Příloze č. 2*, kde jsou uvedeny rozměry a popis jednotlivých částí jednotky, v *Příloze č. 3*, kde jsou uvedena veškerá technická data a v *Příloze č. 4*, kde je vystavena nabídka na KJ.

Základní technická data			
Zatížení [%]	100	75	50
Tepelný výkon [MW]	4,418	3,558	2,661
Elektrický výkon [MW]	4,500	3,375	2,250
Příkon paliva [MW]	10,157	7,854	5,543
Tepelná účinnost [%]	43,5	45,3	48,0
Elektrická účinnost [%]	44,3	43,0	40,6
Celková účinnost [%]	87,8	88,3	88,6

Tabulka 3 – Základní technická data kogenerační jednotky Tedom Quanto D 4000

7.3. Ekonomické hodnocení jednotlivých zdrojů

Před samotným návrhem výrobního modelu Teplárny Písek, který by v sobě již zahrnoval provoz uvažované kogenerační výroby jsem se rozhodl na základě ekonomických údajů z provozu jednotlivých zdrojů vytvořit jejich vzájemné porovnání, které mi pomůže při návrhu samotného výrobního modelu.

Nejprve jsem vytvořil scénář, kdy všechny zdroje vyrobí stejné množství tepelné energie. Tuto hodnotu jsem stanovil jako rovnou maximální možné roční výrobě tepelné energie jedné naší uvažované kogenerační jednotky, a tato hodnota činí $Q_t = 38\,178$ MWh. K této hodnotě vyrobeného tepla jsem následně vztáhl veškeré výpočty nákladů a tržeb. Z těch jsem poté vypočetl hodnotu *Cash Flow (CF)*, vztaženou na zadané množství vyrobeného tepla. Na základě této hodnoty jsem následně jednotlivé zdroje seřadil do *Tabulky 4*. Veškeré vstupní hodnoty, výpočty a výstupní hodnoty jsou k dispozici v *Příloze č. 5*.

Zdroj	CF [Kč na stejné vyrobené množství tepla]	Řazení zdrojů dle CF
Uhelný kotel K 11	24 676 289	1.
Biomasový kotel K 13	21 267 168	3.
Plynový kotel K 24	16 991 516	4.
Kogenerační jednotka	24 329 037	2.

Tabulka 4 – Porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů na základě hodnoty CF

Z tabulky zřetelně vyplývá, že Uhelný kotel K 11 je stále nejhospodárnějším zdrojem. Kogenerační jednotka však dosahuje velmi podobných čísel, a proto obsadila druhé místo v tomto srovnání. O něco hůře dopadl na třetí pozici Biomasoný kotel K 13 a nejméně hospodárným zdrojem je v tomto srovnání plynový kotel K 24.

Hodnoty z předchozího scénáře jsem poté použil pro další ekonomické hodnocení. Vytvořil jsem modely provozu jednotlivých zdrojů na 20 let a zahrnul do nich i investice nutné k instalaci každého jednotlivého zdroje ⁴⁸. Z těchto modelů jsem vypočítal ekonomické ukazatele, a to konkrétně: *Čistou současnou hodnotu (NPV)*, *Vnitřní výnosové procento (IRR)* a *Diskontovanou dobu splacení/návratnosti (T_{sd})*. Tyto ekonomické ukazatele pro jednotlivé zdroje jsou uvedeny v *Tabulce 5*. Celé výpočty modelů hospodárnosti jsou k dispozici v *Příloze č. 6*.

Zdroje	NPV [tis. Kč]	IRR [%]	T _{sd} [let]	Řazení
Uhelný kotel K 11	228 587	*	0	1.
Plynový kotel K 24	130 718	69,66	2	4.
Biomasoný kotel K 13	91 038	20,10	7	5.
Biomasoný kotel K 13 s dotací	150 038	48,21	3	3.
Kogenerační jednotka	165 291	42,80	3	2.

Tabulka 5 – Porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů na základě ekonomických ukazatelů z modelů na dvacetiletý provoz ⁴⁹

Stejně jako v předchozím srovnání i zde vítězí Uhelný kotel K 11, který nechal ostatní zdroje daleko za sebou z hlediska všech vypočtených ukazatelů. Na druhé místo se z hlediska NPV dostala Kogenerační jednotka, přestože měla ze všech zdrojů největší investiční náklady. Z údajů Biomasoného kotle K 13 můžeme jasně vidět, jak dokáže dotace na počáteční investici krásně zamíchat kartami. Díky dotaci čítající skoro

⁴⁸ Pro zdroje již provozované jsem vzal jejich zbytkovou cenu původní investice, která byla při jejich instalaci vynaložena.

⁴⁹ U kotle K 11 není uvedena hodnota IRR, protože výnosy převýší cenu investice již v nultém roce a funkce pro výpočet IRR vypsala chybnou hodnotu (Hodnota by jinak byla extrémně vysoká).

60 mil. Kč se nám z posledního místa dostal kotel K 13 hned na třetí pozici. Na posledním místě našeho srovnání z hlediska NPV opět končí Plynový kotel K 24, avšak nyní již není svými čísly tak vzdálený od ostatních zdrojů jako v předchozím srovnání.

7.4. Modely výroby Teplárny Písek s kogenerační jednotkou

Při uvažování instalace kogenerační jednotky v areálu Teplárny Písek přicházejí v úvahu dva možné scénáře, pro které jsou počítány dva následující modely.

V prvním scénáři je KJ instalována a podle hospodárnosti zdrojů se po Uhelném kotli K 11 zapojí do výroby jako druhý hlavní zdroj. Výroba bude realizována během topné sezóny, kdy je potřeba větší dodávka tepla, a bude doplněna o výrobu z Biomasového kotle K 13. Při tomto scénáři však dochází k překročení limitu maximálního instalovaného výkonu fosilních zdrojů v této lokalitě (tj. 20 MW), od kterého se místo ročních poplatků za znečištění ovzduší začínají nakupovat emisní povolenky.

Ve druhém scénáři se počítá s odstavením Uhelného kotle K 11 a KJ nastupuje jako jeho částečná náhrada. Při srovnání výkonů v *Tabulkách 1 a 2* je jasné, že na doplnění výkonu ztraceného odstavením Uhelného kotle K 11 se budou spolu s KJ podílet jak Biomasový kotel K 13, tak i Plynový kotel K 24 v lokaci Výtopna Samoty. Díky odstavení kotle K 11 nedochází k překročení maximálního možného instalovaného výkonu fosilních zdrojů a za znečišťování se proto místo emisních povolenek budou platit pouze roční poplatky.

Oba modely byly počítány tak, aby byla zachována efektivní dodávka tepelné energie do tepelných sítí. Tabulka s těmito hodnotami je k dispozici v *Příloze č. 7* na listu „*Vstupní hodnoty pro modely*“. Dále je třeba podotknout, že Kogenerační jednotka může produkovat pouze elektřinu i v době, kdy není produkce její tepelné energie potřeba. S tímto však v modelech není počítáno, neboť se tato možnost odvíjí zejména od faktu, zda je takovýto provoz KJ v danou chvíli hospodárný. Hospodárnost by byla ovlivněna např. cenou zemního plynu nebo prodejní cenou elektrické energie, a tyto hodnoty nelze s nějakou rozumnou přesností predikovat na několik let dopředu.

V následujících kapitolách jsou uvedeny pouze některá data z konkrétních výpočtových částí modelů. Veškerá vstupní a výstupní data a výpočty jsou k dispozici v *Příloze č. 7*.

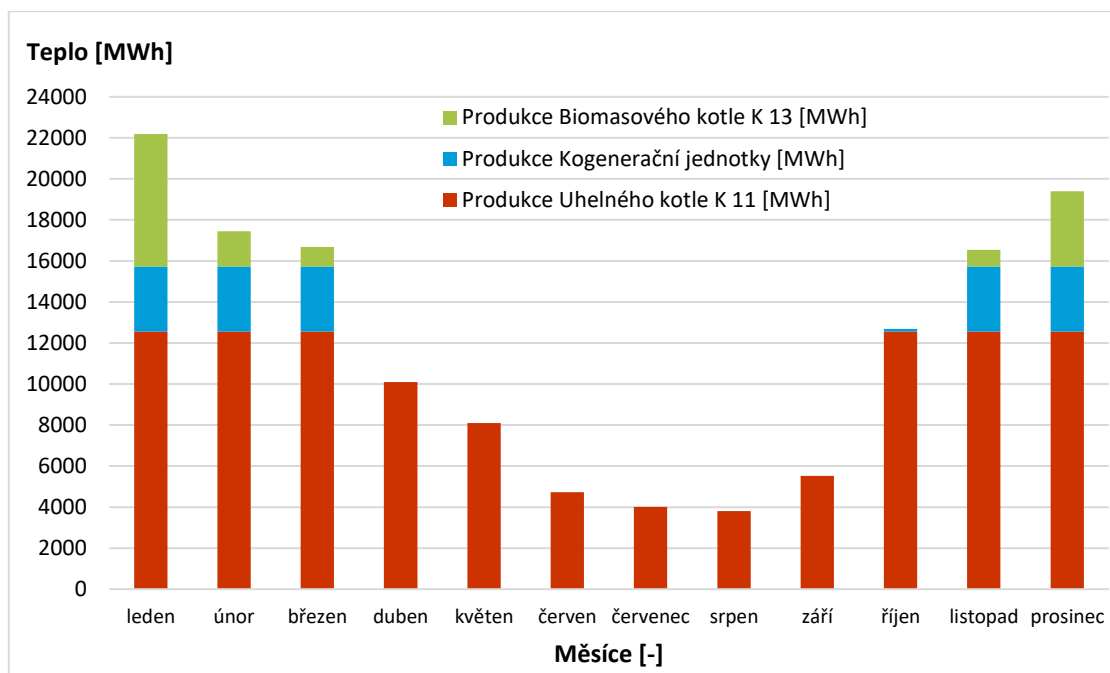
7.4.1. Výroba elektrické a tepelné energie

1) Výroba elektřiny a tepla modelu s kotlem K 11

V *Tabulce 6*, a stejně tak na *Grafu 3* je dobře viditelné, že jak Kogenerační jednotka, tak i Biomasový kotel K 13 se zapojují do výroby tepla pouze během části topné sezóny (tj. listopad až březen). Po zbytek roku vystačí kotel K 11 se svým výkonem na pokrytí potřebných dodávek tepelné energie. Z *Tabulky 7* je patrná výroba elektrické energie složená z produkce protitlaké turbíny TG 2, jenž je poháněna párou produkovanou Uhelným kotlem K 11 a z produkce Kogenerační jednotky. Obě tyto produkce vycházejí z výroby tepelné energie příslušného zdroje.

Roční výroba tepelné energie				
Měsíc	Celková produkce tepla [MWh]	Produkce Uhelného kotle K 11 [MWh]	Produkce Kogenerační jednotky [MWh]	Produkce Biomasového kotle K 13 [MWh]
leden	22 195	12555	3181	6459
únor	17 443	12555	3181	1707
březen	16 677	12555	3181	941
duben	10 099	10099	0	0
květen	8 097	8097	0	0
červen	4 728	4728	0	0
červenec	4 010	4010	0	0
srpen	3 812	3812	0	0
září	5 517	5517	0	0
říjen	12 688	12555	133	0
listopad	16 548	12555	3181	812
prosinec	19 391	12555	3181	3655
Celkem [MWh]	141 203	111 593	16 038	13 573

Tabulka 6 – Roční výroba tepelné energie modelu s provozovaným kotlem K 11



Graf 3 – Roční výroba tepelné energie modelu s provozovaným kotlem K 11

Roční výroba elektrické energie			
Měsíc	Celková produkce elektřiny [MWh]	Produkcce Turbíny TG 2 poháněné parou z Uhelného kotle K 11 [MWh]	Produkcce Kogenerační jednotky [MWh]
leden	4320	1080	3240
únor	4320	1080	3240
březen	4320	1080	3240
duben	869	869	0
květen	697	697	0
červen	407	407	0
červenec	345	345	0
srpen	328	328	0
září	475	475	0
říjen	1215	1080	135
listopad	4320	1080	3240
prosinec	4320	1080	3240
Celkem [MWh]	25 934	9 599	16 335

Tabulka 7 – Roční výroba elektrické energie modelu s provozovaným kotlem K 11

2) Výroba elektřiny a tepla modelu s odstaveným kotlem K 11

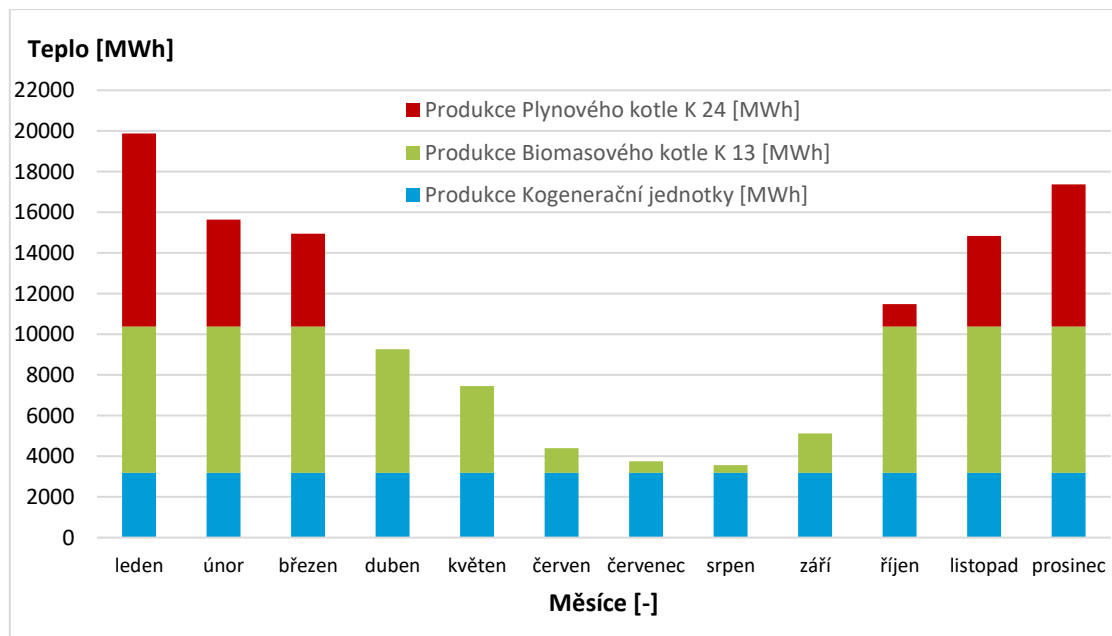
Na *Grafu 3*, sestaveném pomocí hodnot z tabulky *Tabulce 8*, lze vidět, že Kogenerační jednotka je provozována po celý rok na plný výkon, a přitom poskytuje svou maximální produkci tepelné energie. Ta však v žádném měsíci nepokrývá požadované dávky tepla, a tak je třeba ji doplňovat produkcí dalších zdrojů. Od dubna do září stačí na doplnění požadované dávky produkce Biomasonvého kotle K 13, která během této doby nedosáhne svého maxima. Během části topné sezóny (tj. říjen až březen) jsou však již potřebné dávky tepla příliš vysoké i na společnou maximální produkci předchozích

dvou zdrojů, a proto je nutné zapojit do výroby také Plynový kotel K 24 v lokalitě Výtopna Samoty. Z tohoto modelu vyplývá, že zajištění efektivní dodávky tepelné energie do sítě si při instalaci KJ Teplárna Písek poradí i v případě odstavení kotle K 11. Na *Tabulce 9* pak je vidět, že jediným zdrojem produkujícím elektrickou energii je Kogenerační jednotka.

Roční výroba tepelné energie				
Měsíc	Celková produkce tepla [MWh]	Produkce Kogenerační jednotky [MWh]	Produkce Biomarového kotle K 13 [MWh]	Produkce Plynového kotle K 24 [MWh]
leden	19 869	3181	7200	9487
únor	15 634	3181	7200	5252
březen	14 951	3181	7200	4569
duben	9 270	3181	6089	0
květen	7 455	3181	4274	0
červen	4 399	3181	1218	0
červenec	3 748	3181	567	0
srpen	3 568	3181	386	1
září	5 114	3181	1933	0
říjen	11 491	3181	7200	1109
listopad	14 836	3181	7200	4454
prosinec	17 369	3181	7200	6988
Celkem [MWh]	127 704	38 178	57 666	31 860

Tabulka 8 – Roční výroba tepelné energie modelu s odstaveným kotlem K 11

Něco.



Graf 4 – Roční výroba tepelné energie modelu s odstaveným kotlem K 11

Roční výroba elektrické energie		
Měsíc	Celková produkce elektřiny [MWh]	Produkce Kogenerační jednotky [MWh]
leden	3240	3240
únor	3240	3240
březen	3240	3240
duben	3240	3240
květen	3240	3240
červen	3240	3240
červenec	3240	3240
srpen	3240	3240
září	3240	3240
říjen	3240	3240
listopad	3240	3240
prosinec	3240	3240
Celkem [MWh]	38 880	38 880

Tabulka 9 – Roční výroba elektrické energie modelu s odstaveným kotlem K 11

7.4.2. Investiční a provozní náklady

Investiční část

Počáteční investice obou modelů se skládají z pořizovací ceny, instalace a zprovoznění Kogenerační jednotky. Pro oba modely je tedy tato počáteční investice stejná a je rozepsaná na jednotlivé části v *Tabulce 10*. Až na cenu KJ, která byla poskytnuta v nabídce od firmy TEDOM a.s., která je k dispozici v *Příloze č. 4*, byly všechny ostatní investiční výdaje stanoveny odborným odhadem.

Investiční výdaje	
Položka	Cena bez DPH [tis. Kč]
1 x KJ Tedom Quanto D 4000	47 500
Přípojka plynu + RS	1 585
Elektroinstalace + vyvedení el. výkonu	700
Napojení na topný systém	400
Budova a stavební úpravy	14 722
Celkem	64 907

Tabulka 10 – Investiční výdaje na nákup, instalaci a zprovoznění KJ

Pro model s odstaveným kotlem K 11, kdy je přes celý rok Kogenerační jednotka provozována při plném výkonu, pak ještě nastává v 9. a 19. roce provozního modelu chvíle,

kdy je třeba provést generální opravu KJ, a tím nám vznikají nové investiční výdaje viz. Příloha č. 7, list „*Ekonomika provozu bez K 11*“.

1) Roční provozní náklady modelu s kotlem K 11

V *Tabulce 11* jsou k nahlédnutí roční provozní náklady pro jednotlivé zdroje prvního modelu. Měsíční rozpis nákladů je k dispozici v *Příloze č. 6*, na listu „*S Uhelným kotlem K 11*“. Při pohledu na výši poplatků za znečištění je patrné, jak nám v tomto modelu povinnost nakupovat emisní povolenky tyto náklady oproti druhému modelu, viz. *Tabulka 12*, zvýšila.

Zdroj	Uhelný kotel K 11	Kogenerační jednotka	Biomasový kotel K 13
Náklady na opravy [Kč]	6 495 091	1 523 777	591 973
Náklady na revize a kontroly [Kč]	90 321		84 570
Náklady na palivo [Kč]	39 495 713	9 407 349	5 333 827
Poplatky za znečištění [Kč]	4 462 379	357 975	0
Celkem [Kč]	50 543 504	11 289 101	6 010 370

Tabulka 11 – Roční provozní náklady modelu s kotlem K 11

2) Roční provozní náklady modelu s odstaveným kotlem K 11

V *Tabulce 12* jsou k nahlédnutí roční provozní náklady pro jednotlivé zdroje druhého modelu. Měsíční rozpis nákladů je k dispozici v *Příloze č. 6*, na listu „*Bez Uhelného kotle K 11*“.

Zdroj	Kogenerační jednotka	Biomasový kotel K 13	Plynový kotel K 24
Náklady na opravy [Kč]	3 626 898	2 515 899	302 737
Náklady na revize a kontroly [Kč]		84 570	70 194
Náklady na palivo [Kč]	22 391 393	22 668 345	17 149 820
Poplatky za znečištění [Kč]	100 000	0	50 000
Celkem [Kč]	26 118 291	25 268 814	17 572 751

Tabulka 12 – Roční provozní náklady modelu s odstaveným kotlem K 11

Náklady (energetické potřeby) spojené s vlastní spotřebou jednotlivých zdrojů, areálu Teplárny Písek a lokality Výtopna Samoty, kde je instalován Plynový kotel K 24, zde nejsou uvedeny, ale jsou zahrnuty ve výpočtech výroby tepla a elektřiny obou modelů.

7.4.3. Ekonomické zhodnocení

V *Tabulkách 13* a *14* jsou uvedeny veškeré vstupní hodnoty, jež byly použity pro výpočty provozů obou modelů. V prvním modelu nebyla provozem Kogenerační jednotky překročena hranice 80 000 motohodin, a tím pádem nebylo třeba vynakládat investiční výdaje spojené s generální opravou. Vzhledem k tomu, že ve druhém modelu

je Kogenerační jednotka provozována v maximální možné míře, dojde v tomto modelu v 9. roce provozu k první generální opravě a v 19. roce provozu ke druhé. Investiční výdaje pro tyto dvě generální opravy jsou k dispozici na druhém a třetím řádku *Tabulky 14*. Tyto ceny investic byly revalorizovány třemi procenty vztaženými k příslušnému roku investice.

Provoz s Uhelným kotlem K 11	
Počáteční investiční výdaje [Kč]	64 907 000
Produkce tepla [MWh]	141 203
Efektivní dodávka tepla [MWh]	112 026
Produkce elektřiny [MWh]	25 934
Efektivní dodávka elektřiny [MWh]	22 550
Tržby za teplo [Kč]	111 577 896
Tržby za elektřinu [Kč]	20 430 472
Náklady na opravy [Kč]	8 610 841
Náklady na revize a kontroly [Kč]	174 891
Náklady na palivo [Kč]	54 236 889
Poplatky za znečištění [Kč]	5 080 238

Tabulka 13 – Tabulka vstupních hodnot pro model na výpočet provozu s kotlem K 11 na 20 let

Provoz bez Uhelného kotle K 11	
Počáteční investiční výdaje [Kč]	64 907 000
Investiční výdaje v 9. roce [Kč]	37 186 036
Investiční výdaje v 19. roce [Kč]	49 974 923
Produkce tepla [MWh]	127 704
Efektivní dodávka tepla [MWh]	112 026
Produkce elektřiny [MWh]	38 880
Efektivní dodávka elektřiny [MWh]	36 851
Tržby za teplo [Kč]	111 577 482
Tržby za elektřinu [Kč]	33 386 821
Náklady na opravy [Kč]	6 445 533
Náklady na revize a kontroly [Kč]	154 764
Náklady na palivo [Kč]	62 210 111
Poplatky za znečištění [Kč]	150 000

Tabulka 14 – Tabulka vstupních hodnot pro model na výpočet provozu bez kotle K 11 na 20 let

V *Tabulce 15* jsou k vidění výsledné hodnoty obou modelů. Stejně jako ve druhé části kapitoly 7.3 byly vypočteny ekonomické ukazatele, z nichž výpovědní hodnotu má hlavně čistá současná hodnota NPV a vnitřní výnosové procento IRR. I když bylo během provozu druhého modelu třeba dvakrát investovat do generální opravy KJ, stejně z tohoto srovnání vychází jako hospodárnější varianta provozu s instalovanou KJ s čistou současnou hodnotou větší o 87 623 tis. Kč, než v případě první varianty provozu.

Před závěrem je však třeba se ještě podívat na to, jak se hodnota NPV bude chovat při změnách některých vybraných vstupů.

Hodnotící kritéria					
Modely		S kotlem K 11	Bez kotle K 11	Rozdíl	-
Čistá současná hodnota	NPV	539 759	627 382	87 623	[tis. Kč]
Vnitřní výnosové procento	IRR	147	192	46	[%]
Diskontovaná doba splacení	Tsd	1	1	0	[let]

Tabulka 15 – Tabulka porovnání výstupních hodnot obou modelů

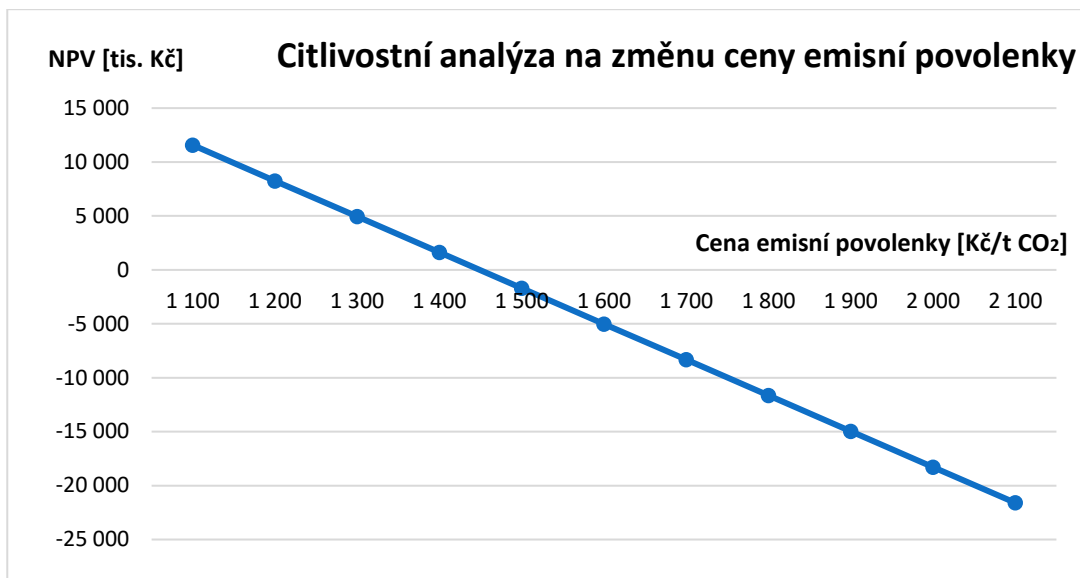
7.4.4. Citlivostní analýzy

1) Model s kotlem K 11

Pomocí následujících čtyřech tabulek a čtyřech grafů jsou znázorněny citlivostní analýzy čtyř vybraných vstupů. Zhodnocení těchto analýz je provedeno na konci této části za pomoci *Tabulky 20*.

Cena emisní povolenky [Kč/t CO ₂]	NPV [tis. Kč]
1 100	11 577
1 200	8 259
1 300	4 942
1 400	1 624
1 500	-1 693
1 600	-5 011
1 700	-8 328
1 800	-11 646
1 900	-14 963
2 000	-18 281
2 100	-21 598

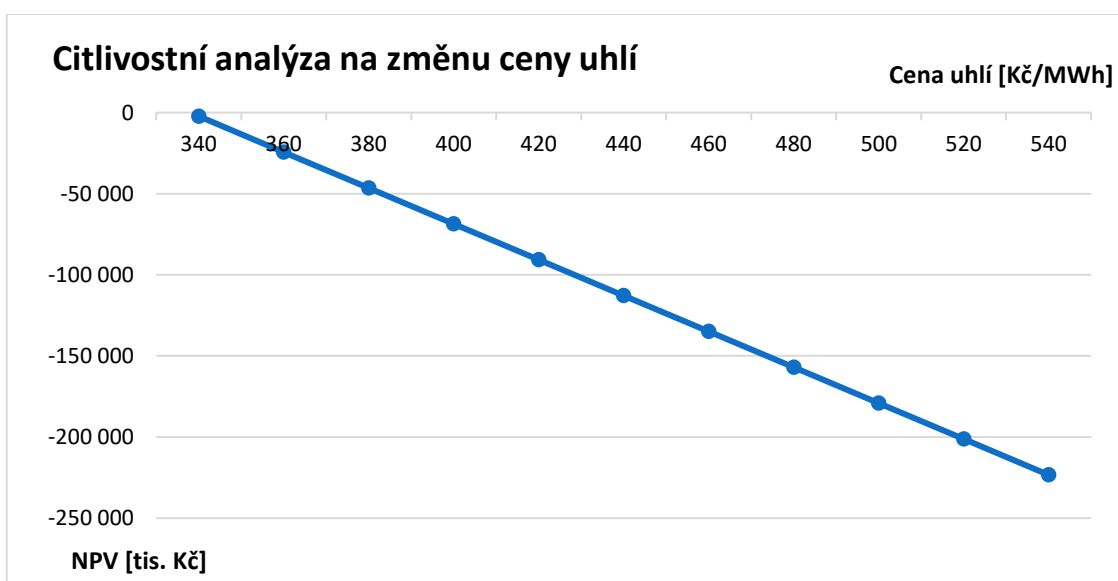
Tabulka 16 – Tabulka citlivostní analýzy ceny emisních povolenek



Graf 5 – Citlivostní analýza ceny emisních povolenek

Cena uhlí [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
340	-2 211
360	-24 324
380	-46 437
400	-68 549
420	-90 662
440	-112 774
460	-134 887
480	-157 000
500	-179 112
520	-201 225
540	-223 338

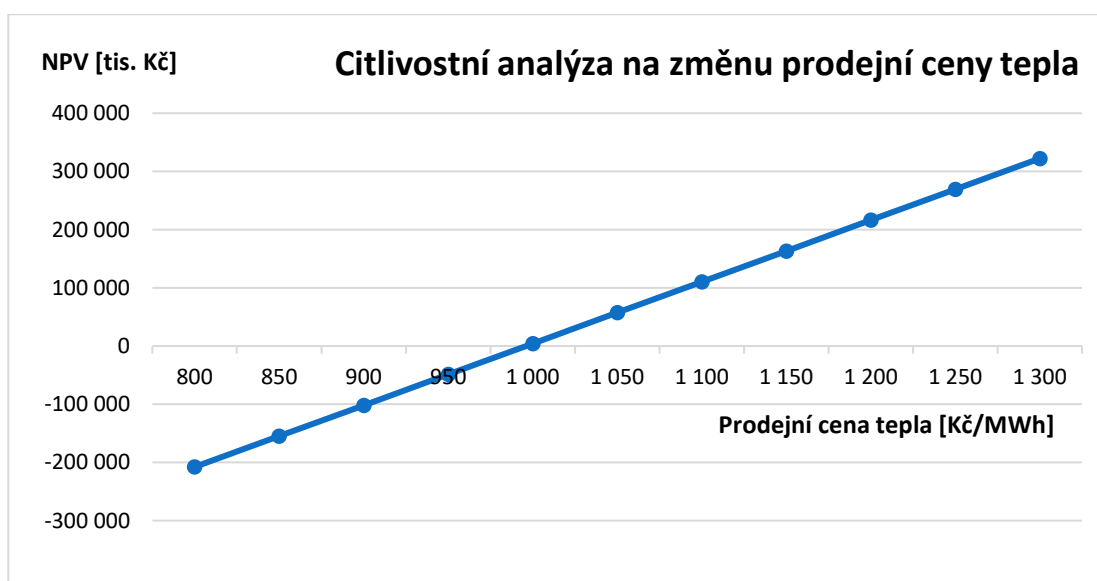
Tabulka 17 – Tabulka citlivostní analýzy ceny uhlí



Graf 6 – Citlivostní analýza ceny uhlí

Prodejní cena tepla [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
800	-207 755
850	-154 757
900	-101 758
950	-48 759
1 000	4 240
1 050	57 239
1 100	110 238
1 150	163 236
1 200	216 235
1 250	269 234
1 300	322 233

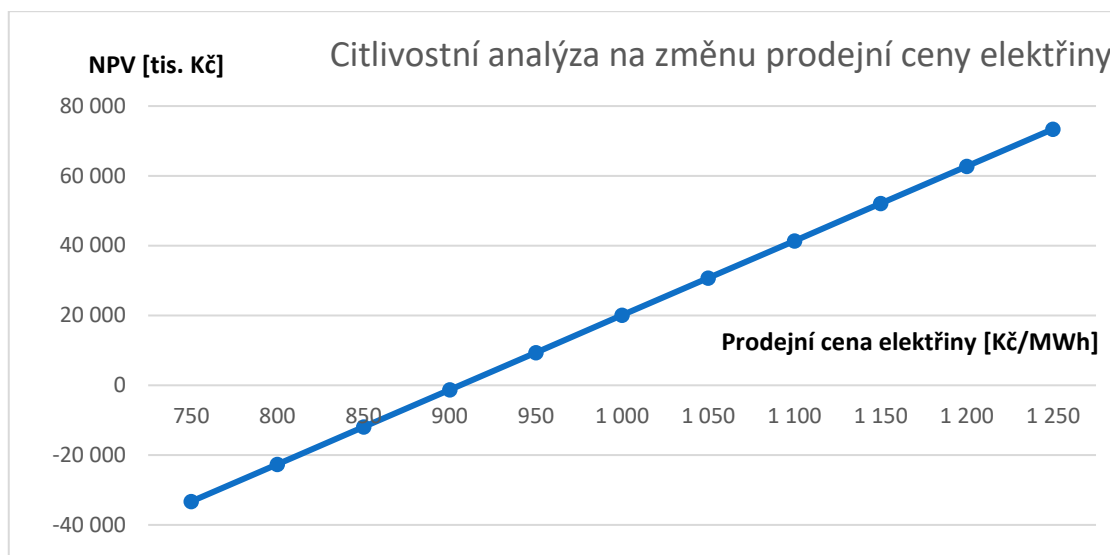
Tabulka 18 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny tepla s K 11



Graf 7 – Citlivostní analýza prodejní ceny tepla s K 11

Prodejní cena elektřiny [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
750	-33 285
800	-22 617
850	-11 949
900	-1 280
950	9 388
1 000	20 057
1 050	30 725
1 100	41 393
1 150	52 062
1 200	62 730
1 250	73 398

Tabulka 19 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny elektřiny s K 11



Graf 8 – Citlivostní analýza prodejní ceny elektřiny s K 11

		Změna NPV
Změna ceny emisních povolenek	6,90%	0,61%
Změna ceny uhlí	5,92%	3,91%
Změna prodejní ceny tepla	5,02%	9,36%
Změna prodejní ceny elektřiny	5,52%	1,88%

Tabulka 20 – Shrnutí výsledků citlivostních analýz s K 11

První citlivostní analýza je zaměřena na změnu ceny emisních povolenek. Při pohledu do *Tabulky 20* je patrné, že zhruba sedmiprocentní změna ceny emisní povolenky má za následek změnu NPV přibližně o půl procenta. To je pravděpodobně způsobeno tím, že instalovaný výkon fosilních zdrojů není tak velký, aby se to nějak výrazně po-depsalo na zhoršení hospodárnosti.

Druhá citlivostní analýza zkoumá změnu NPV v závislosti na změně ceny paliva pro Uhelný kotel K 11. Na zhruba šestiprocentní změnu ceny hnědého uhlí připadá čtyř-procentní změna NPV, a to už je o poznání větší změna než u předchozího případu. Takovéto změně se není třeba divit, neboť palivové náklady tvoří podstatnou část pro-vozních nákladů každého zdroje.

Třetí citlivostní analýza se zabývá závislostí změny NPV na změně prodejní ceny tepla. Při pětiprocentní změně prodejní ceny tepla se nám čistá současná hodnota mění skoro o deset procent. To je celkem pochopitelné, neboť prodávaná tepelná energie v tomto scénáři představuje skoro všechny příjmy.

Poslední analýza zkoumá dopady změn prodejní ceny elektřiny. Vzhledem k tomu, že produkce elektrické energie zajišťuje v tomto modelu jen velmi malou část příjmů, není se třeba divit, že skoro šestiprocentní změna prodejní ceny elektřiny má za následek jen dvouprocentní změnu čisté současné hodnoty.

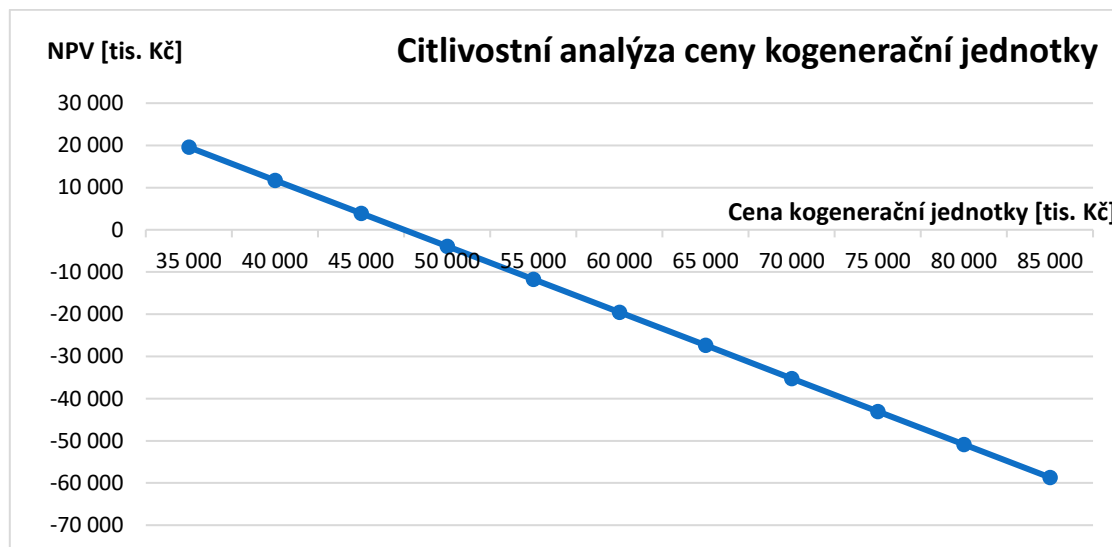
Citlivostní analýzy nám ukázaly, že ziskovost tohoto modelu je nejvíce závislá na ceně paliva, v tomto případě uhlí, a na prodejní ceně tepelné energie.

2) Model s odstaveným kotlem K 11

Stejně jako v předchozí části, i zde jsou čtyři dvojice tabulek a grafů popisující citlivostní analýzy čtyř vybraných vstupů. A stejně tak je i na konci této části zhodnocení těchto analýz za pomoci *Tabulky 25*.

Cena kogenerační jednotky [tis. Kč]	NPV [tis. Kč]
35 000	19563
40 000	11738
45 000	3913
50 000	-3713
55 000	-11738
60 000	-19563
65 000	-27389
70 000	-35214
75 000	-43040
80 000	-50865
85 000	-58690

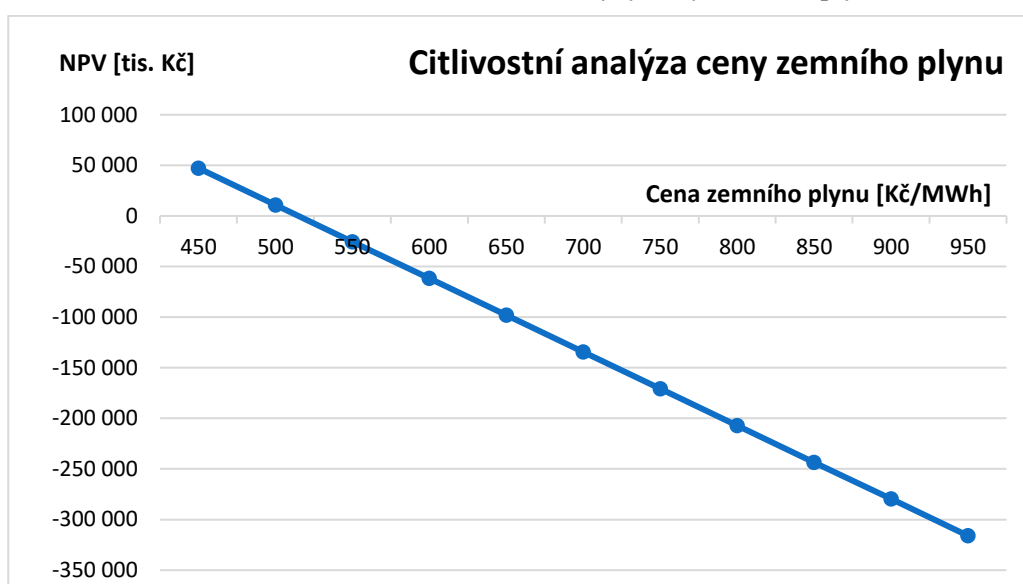
Tabulka 21 – Tabulka citlivostní analýzy ceny kogenerační jednotky



Graf 9 – Citlivostní analýza ceny kogenerační jednotky

Cena zemního plynu [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
450	47 221
500	10 897
550	-25 427
600	-61 750
650	-98 074
700	-134 398
750	-170 721
800	-207 045
850	-243 369
900	-279 693
950	-316 016

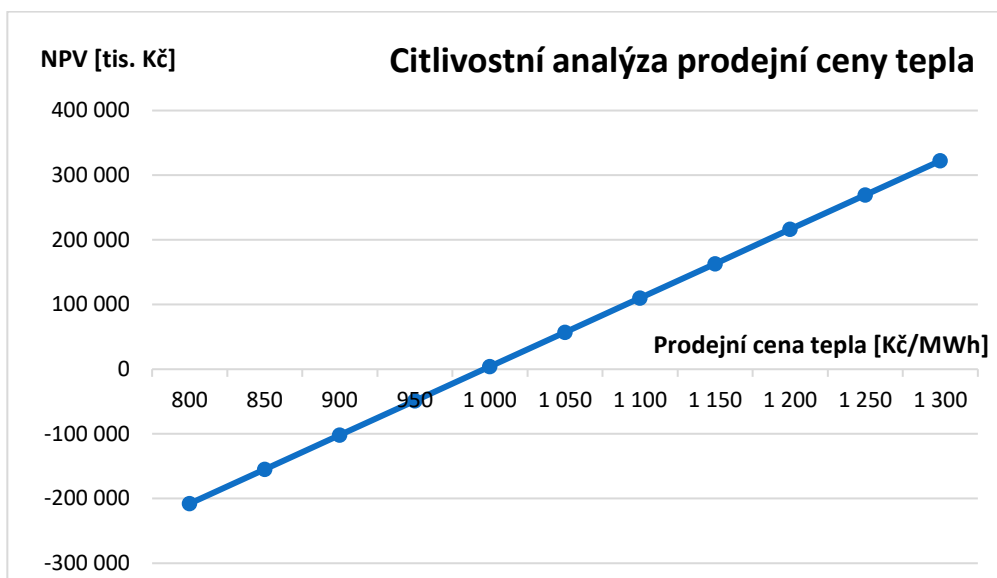
Tabulka 22 – Tabulka citlivostní analýzy ceny zemního plynu



Graf 10 – Citlivostní analýza ceny zemního plynu

Prodejní cena tepla [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
800	-207 755
850	-154 756
900	-101 757
950	-48 759
1 000	4 240
1 050	57 239
1 100	110 237
1 150	163 236
1 200	216 234
1 250	269 233
1 300	322 232

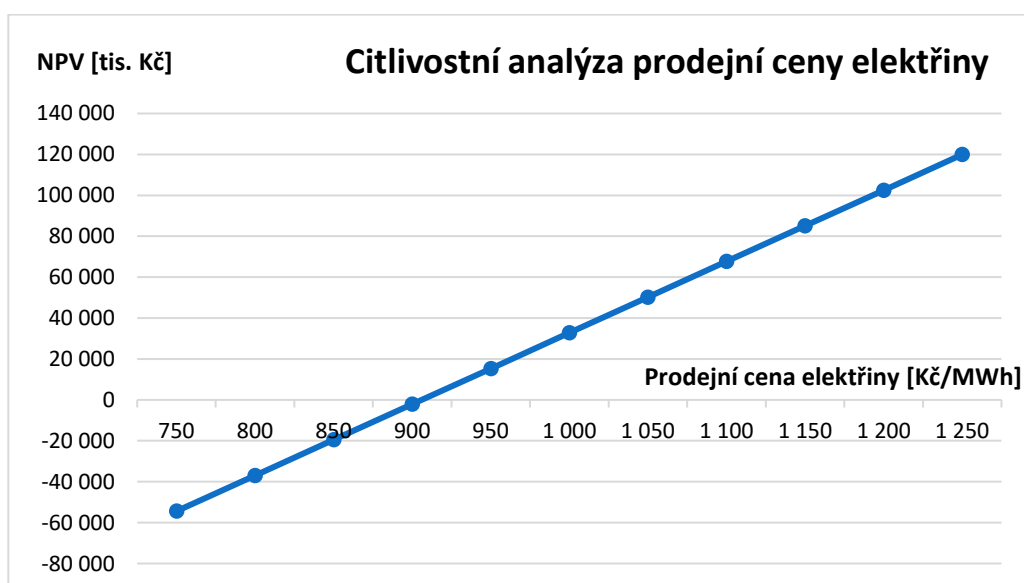
Tabulka 23 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny tepla bez K 11



Graf 11 – Citlivostní analýza prodejní ceny tepla bez K 11

Prodejní cena elektřiny [Kč/MWh]	NPV [tis. Kč]
750	-54 394
800	-36 960
850	-19 526
900	-2 092
950	15 342
1 000	32 776
1 050	50 210
1 100	67 643
1 150	85 077
1 200	102 511
1 250	119 945

Tabulka 24 – Tabulka citlivostní analýzy prodejní ceny elektřiny bez K 11



Graf 12 – Citlivostní analýza prodejní ceny elektřiny bez K 11

		Změna NPV
Změna ceny kogenerační jednotky	10,53%	1,25%
Změna ceny zemního plynu	9,71%	5,79%
Změna prodejní ceny tepla	5,02%	8,45%
Změna prodejní ceny elektřiny	5,52%	2,78%

Tabulka 25 – Shrnutí výsledků citlivostních analýz bez K 11

První citlivostní analýza tohoto modelu zkoumá změnu pořizovací ceny kogenerační jednotky. V *Tabulce 25* vidíme, že zhruba jedenáctiprocentní změna pořizovací ceny kogenerační jednotky nám změní hodnotu NPV přibližně o jedno procento. Lze tedy říct, že změna ceny kogenerační jednotky se na změně čisté současné hodnoty příliš nepodepíše.

Druhá citlivostní analýza se zabývá dopadem změn v ceně zemního plynu, který je používán jako palivo Kogenerační jednotky a Plynového kotle K 24, na hodnotu NPV. Na přibližně desetiprocentní změnu ceny zemního plynu připadá skoro šestiprocentní změna NPV. Stejně jako u předchozího modelu s citlivostní analýzou na uhlí se není čemu divit, protože nám cena plynu ovlivňuje palivové náklady, které tvoří značnou část nákladů celkových.

Další dvě analýzy jsou stejné jako u předchozího modelu. Jedná se o citlivostní analýzy na prodejní cenu tepla a elektřiny. Procentuální změny jsou i v tomto případě podobné jako předtím, ovšem s drobnými změnami. Ty jsou způsobeny zmenšením potřebné produkce tepelné energie pro zajištění efektivních dodávek a zvýšením výroby elektrické energie. Nyní tedy při pětiprocentní změně prodejní ceny tepla dochází ke změně hodnoty NPV o osm a půl procenta a při pěti a půl procentní změně prodejní ceny elektřiny se změní čistá současná hodnota o necelá tři procenta. Změny prodejní cena tepla nám tedy stále značně ovlivňují hospodárnost našeho modelu.

Citlivostní analýzy nám ukázaly, že ziskovost tohoto modelu je stejně jako ziskovost modelu předchozího nejvíce závislá na ceně paliva, v tomto případě zemního plynu, a na prodejní ceně tepelné energie, ale tato závislost se nepatrně liší, protože došlo ke zvýšení výroby elektrické energie a snížení výroby tepla, potřebného pro zajištění požadovaných dodávek do tepelné sítě.

8.ZÁVĚR

Kogenerační technologie představují ideální řešení pro místa s potřebou dodávek tepelné i elektrické energie. V dnešní době je již možné pořídit kogenerační jednotky malých výkonů, takže nacházejí uplatnění i na místech s nižšími energetickými potřebami. Vzhledem k současnému dění v evropské energetice, kdy dochází ke stále většímu tlaku na odstavování zdrojů elektrické a tepelné energie spalujících uhlí, sáhnou spousta lokací po energetické soběstačnosti, kterou můžou velmi dobře zajistit právě kogenerační jednotky.

V první části práce jsem čtenáře seznámil s definicí kogenerační výroby. Následně jsem vysvětlil, v čem tkví její výhoda oproti oddělené výrobě, a popsal jsem oblasti možného uplatnění kogenerace. Dále jsem rozebral kogenerační technologie, paliva používaná v kogeneračních jednotkách a možnosti hodnocení KVET. Nakonec jsem se zabýval popisem všech možných druhů kogeneračních technologií, nevýhodami a přednostmi jejich jednotlivých druhů. V druhé části práce jsem se zabýval návrhem kogenerační výroby v areálu Teplárny Písek. Tento návrh jsem následně podrobil srovnání hospodárnosti s již instalovanými zdroji, a navrhl jsem dva možné modely provozu zdrojů Teplárny Písek spolu s kogenerační výrobou. Nakonec jsem tyto modely podrobil technicko-ekonomickému hodnocení. Nyní tedy mohu prohlásit, že jsem splnil všechny pokyny pro vypracování této diplomové práce, které jsou uvedeny v zadání.

Mým největším přínosem této diplomové práce jsou mnou vytvořené soubory excel, které jsou k dispozici v přílohách a výsledky, které jsem za pomoci těchto souborů získal. Tyto soubory slouží pro srovnání hospodárnosti jednotlivých energetických zdrojů, jejichž výsledky pak lze využít v dalších souborech pro výpočty možných provozních modelů kombinací těchto porovnávaných zdrojů.

Při tvorbě mé diplomové práce jsem osobně navštívil provoz Teplárny Písek, kde jsem si prohlédl spoustu zajímavých kusů technologie. Také jsem se dozvěděl mnoho zajímavostí a faktů z oblasti teplárenství od vedoucího provozu teplárny. Dále jsem se při vypracování této práce naučil, že tvorba podobných případových studií a vytváření provozních modelů dá opravdu hodně práce a zabere velmi mnoho času. Přitom jsem se dozvěděl, kde v podobných případech hledat potřebné informace a údaje.

8.1. Závěrečné zhodnocení výsledků práce

V kapitole 7.4. jsem se zabýval výpočtem dvou modelů provozu, které je nyní třeba mezi sebou porovnat a zhodnotit. Druhý model, který počítá s odstavením Uhelného kotle K 11 a provozováním Kogenerační jednotky a Biomasového kotle K 13, jako dvou hlavních zdrojů, potřebuje menší množství vyrobené tepelné energie pro zajištění potřebných dodávek tepla do tepelné sítě. Tím pádem dochází k palivovým úsporám a také šetření životního prostředí (méně vypuštěných škodlivin). Zároveň je také při tomto provozu vyrobeno větší množství elektrické energie. Při hodnocení hospodárnosti na dobu dvaceti let dopadl druhý model také o poznání lépe s čistou současnou hodnotou větší o zhruba osmdesát sedm a půl milionu korun. Při závěrečných citlivostních analýzách jsem poukázal na to, že největší dopad na hospodárnost obou modelů má prodejní cena tepla a dále ceny paliva. Druhý model z těchto citlivostních analýz vykazuje nižší závislost hospodárnosti na změnách cen paliv, a stejně tak na změnách prodejní ceny tepla, a to hlavně kvůli snížené produkci tepla k zajištění potřebných dodávek do tepelné sítě a zvýšené produkci elektrické energie. Můžu tedy s jistotou prohlásit, že provoz Kogenerační jednotky spolu s Uhelným kotlem K 11 je jednoznačně horší, a tento model provozu bych tedy nedoporučoval.

Nyní je však třeba upozornit na omezující podmínky výpočtů. Veškerá data z Teplárny Písek, která byla v práci použita, vykazují kvůli ochraně hospodářské soutěže omezenou přesnost, a to hlavně z důvodů faktu, že tato práce bude volně dostupná na stránkách fakulty. Navíc je zde další skutečnost, a to, že v modelech nebylo počítáno s dalšími náklady jako jsou například mzdové náklady, nebo náklady na provoz a údržbu teplotárenských sítí a dalších objektů ve vlastnictví společnosti Teplárna Písek a.s. Proto je tedy třeba říct následující: Výsledek této práce může posloužit společnosti Teplárna Písek a.s. k určení směru, kterým by se v případě instalace dalších zdrojů měla ubírat, ale rozhodně z těchto výsledků není možné očekávat stejné tržby, jaké jsou zde vypočteny.

V této práci by bylo možno dále pokračovat, nebo ji rozšířit tím, že bychom spolu s Teplárnou Písek a.s. na interní rovině použili pro výpočty v modelech přesnější údaje, a zároveň zde zahrnuli i náklady, se kterými nebylo počítáno. Tím by se dalo dosáhnout výsledků, které by již mohly s velkou pravděpodobností odpovídat realitě.

9. SEZNAM LITERATURY

- [1] BOUČEK, Stanislav. *Přednášky z předmětu Energetické projektování (B1B15EPR)*. FEL ČVUT v Praze, 2019
- [2] ČEZ Energo, s. r. o. *O kogeneraci*. Topenářství instalace: TOPIN [online]. Topin Media, 2018 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/o-kogeneraci-detail-4039>
- [3] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [4] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [5] HÄBERLE, Gregor. *Technika životního prostředí pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2003. ISBN 80-86706-05-2.
- [6] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [7] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. *Teplárenství*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-222-x.
- [8] KARAFIÁT, Josef. *SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTRINY A TEPLA*, [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [9] KOTRBATÝ, Miroslav, Ondřej HOJER a Zuzana KOVÁŘOVÁ. *Hospodaření teplem: "nejlevnější energie je energie ušetřená"*. Praha: ČSTZ, 2009. ISBN 978-80-86028-41-5.
- [10] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Kogenerační jednotky - zřizování a provoz* [online]. Praha: GAS, 2007. [cit. 2020-11-10] GAS. ISBN 978-80-7328-151-9. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [11] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice*. Brno: PC-DIR Real, 1999. ISBN 80-85895-23-4.

- [12] PONCAROVÁ, Jana. *Energetická hustota paliv: Topný olej na špičce* [online]. nazeleno.cz, 2012 [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/vyta-peni/energeticka-hustota-paliv-topny-olej-na-spicce.aspx>
- [13] RUZIC, David. *Fuel Cells and Hydrogen Economy* [YouTube]. University of Illinois: Professor David Ruzic, 2019 [cit. 2021-01-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=peoO8-o6NM>
- [14] SEVEn Energy, s.r.o. a Loyd Group, s.r.o. *Územní energetická koncepce Jihočeského kraje* [online]. České Budějovice, 2018. Dostupné z: https://www.kraj-jihocesky.cz/sites/default/files/inline-files/2020/ZK200625_229_A_%C3%9AEK%20J%C4%8DK.pdf
- [15] ŠKORPÍK, Jiří. *Tepelné turbíny a turbokompresory: vlastnosti, návrh, provoz a vybrané statě z proudění plynů a par*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020. ISBN 978-80-214-5847-5.
- [16] ŠPETLÍK, Jan. *Přednášky z předmětu Elektrárny (B1M15ENY)*. FEL ČVUT v Praze, 2020
- [17] Teplárna Písek a.s. *Výroční zpráva 2020* [online]. Teplárna Písek a.s. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: https://www.tpi.cz/vz/vz_2020.pdf
- [18] Teplárenské sdružení České republiky. *Historie a budoucnost dálkového vytápění* [online]. Teplárenské sdružení České republiky [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/?id=2020>
- [19] Teplárenské sdružení České republiky. *Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva* [online]. Teplárenské sdružení České republiky [cit. 2021-1-15]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/>
- [20] VALENTA, Vladimír. *Topenářská příručka*. Praha: Agentura ČSTZ, 2007. ISBN 978-80-86028-13-2.
- [21] VAŠÍČEK, Jiří a Tomáš KRÁLÍK. *Přednášky a cvičení z předmětu Ekonomika elektroenergetiky (B1M16EKE1)*. FEL ČVUT v Praze, 2020
- [22] VOŠTA, Jan, Jan MACÁK a Zdeněk MATĚJKA. *Energetika*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. ISBN 978-80-7080-358-5.

10. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Zaměření plynovodů v okolí areálu Teplárny Písek

Příloha č. 2 - Rozměrové údaje a popis kogenerační jednotky TEDOM

Příloha č. 3 - Katalogový list kogenerační jednotky TEDOM

Příloha č. 4 - Nabídka kogenerační jednotky TEDOM

Příloha č. 5 - Tabulky vstupních hodnot a porovnání hospodárnosti jednotlivých zdrojů

Příloha č. 6 - Ekonomické hodnocení provozu jednotlivých zdrojů

Příloha č. 7 - Výpočet modelů provozu a jejich hospodárnosti