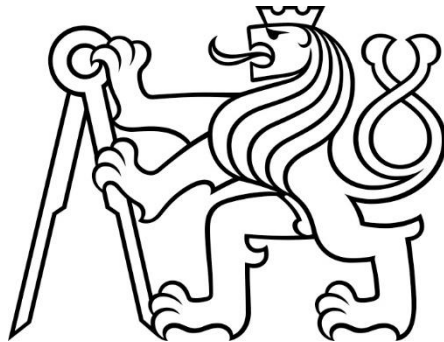


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**VOJTĚCH
LÁNSKÝ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lánský** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **494803**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Náhrada kogenerační výroby elektřiny z plynu obnovitelnými zdroji

Název bakalářské práce anglicky:

Replacement of cogeneration electricity production from gas with renewable sources

Pokyny pro vypracování:

Pro plynovou výtopnu vybavenou kogenerační jednotkou navrhnete alternativní řešení výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.

Dílčí cíle:

- 1) Zpracujte rešerši možných alternativ výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů ve výkonové kategorii do 1 MW.
- 2) Pro konkrétní plynovou výtopnu vybavenou plynovými kotli a kogenerační jednotkou se spalovacím motorem zpracujte roční provozní bilanci.
- 3) Ve dvou variantách navrhnete a výkonově nadimenzujete alternativní způsob výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, kterým by byla nahrazena výroba kogenerační jednotky.
- 4) Projedte provozní, ekonomické a ekologické vyhodnocení návrhů a porovnání se stávajícím řešením.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Náhrada kogenerační výroby elektřiny z plynu obnovitelnými zdroji*“ vypracoval pouze s použitím odborné literatury a článků uvedených v seznamu informačních zdrojů této práce.

V Praze dne

Vojtěch Lánský

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch Lánský
Název BP:	Náhrada kogenerační výroby elektřiny z plynu obnovitelnými zdroji
Anglický název:	Replacement of cogeneration electricity production from gas with renewable sources
Akademický rok:	2022/2023
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 60 Počet obrázků: 25 Počet tabulek: 16 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Kogenerační jednotka, organický Rankinův cyklus, ORC, fotovoltaická elektrárna, obnovitelné zdroje
Keywords:	cogeneration unit, Organic Rankine Cycle, photovoltaic power plant, renewable resources
Anotace:	Práce se zabývá projektem, jehož cílem je najít ekonomicky, technicky a provozně smysluplné řešení náhrady kogenerační jednotky v plynové kotelně ŘOK4 pomocí obnovitelných zdrojů energie. Navrhovanými variantami jsou využití fotovoltaické elektrárny nebo ORC.
Abstract:	This work deals with project, whose goal is to find economically, technically, and operationally meaningful solution for the replacement of the cogeneration unit in the gas-fired boiler room ŘOK4 using renewable energy resources. The proposed options are photovoltaic power plant or ORC.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této bakalářské práce prof. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za čas věnovaný konzultacím a kontrole práce a také za velmi cenné rady, poznatky a podporu při jejím zpracování. Poděkování patří taktéž mé rodině a nejbližším za podporu, motivaci a vytvoření komfortního prostředí při tvorbě práce.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	Technické řešení zařízení na výrobu tepla.....	12
2.1.1	Kotle na zemní plyn	12
2.1.2	Kogenerační jednotky se spalovacími motory	13
2.2	Časový průběh zatížení a diagramy	14
2.3	Kogenerace	15
2.3.1	Výhody	16
2.3.2	Kogenerační jednotky se spalovacími motory	17
2.3.3	Kogenerační jednotka TEDOM Cento 150 – schéma a princip fungování.....	18
2.4	Kogenerace s ORC cyklem.....	19
2.4.1	Příklady kogenerace s ORC	21
2.5	Příklady použití kogeneračních jednotek.....	22
2.5.1	Obytné objekty	22
2.5.2	Kogenerační jednotka v centrálním zdroji tepla	23
2.5.3	Kogenerační jednotka v průmyslovém podniku.....	23
2.6	Ekonomický aspekt kogenerační jednotky	23
2.6.1	Roční výrobní náklady	24
2.6.2	Výnosy	25
2.7	Kotelna ŘOK4	26
2.7.1	Návštěva kotelny	26
2.7.2	Technické řešení a zapojení kotelny.....	27
2.7.3	Technické parametry kotle	27
2.7.4	Technické parametry kogenerační jednotky.....	28
2.7.5	Diagram trvání tepelného výkonu	28
2.8	Možnosti výroby elektřiny na bázi obnovitelných zdrojů energie	30

2.8.1	Fotovoltaické elektrárny.....	30
2.8.2	Ovlivnění účinnosti panelů.....	31
3	Výpočtová část.....	33
3.1	Konkrétní parametry kogenerační jednotky a ověření spotřeby zemního plynu.....	33
3.2	Návrh fotovoltaické elektrárny.....	35
3.2.1	Základní návrh ve výpočetním programu.....	35
3.2.2	Výpočet a řešení potřebné plochy.....	37
3.2.3	Ekonomické zhodnocení FVE.....	38
3.3	ORC.....	42
3.3.1	Vysoký výkon – ORC 1.....	42
3.3.2	Varianta se středním výkonem – ORC 2.....	43
3.3.3	Nejmenší výkon – ORC 3.....	44
3.3.4	Výpočet produkovaného tepla a elektřiny.....	45
3.3.5	Souhrn variant.....	46
3.4	Ekologická bilance.....	46
3.4.1	Výpočet účinnosti plynových kotlů.....	47
3.4.2	Současné provedení – 4 plynové kotle a kogenerační jednotka.....	48
3.4.3	ORC.....	48
3.5	Ekonomické hodnocení ORC.....	49
3.5.1	Roční vyhodnocení.....	52
3.6	Nároky na ORC.....	53
3.6.1	Spotřeba paliva.....	53
3.6.2	Skladovací prostory.....	53
3.7	Zhodnocení ORC.....	54
4	Závěr a interpretace výsledků.....	56
5	Citovaná literatura.....	58

Přehled použitých zkratk

ORC – organický Rankinův cyklus

KJ – kogenerační jednotka

FVE – fotovoltaická elektrárna

η_{KJe} - elektrická účinnost KJ [%]

η_{KJt} – tepelná účinnost KJ [%]

H – výhřevnost zemního plynu [MJ/m³]

s – spotřeba paliva [m³/h]

E – energie [MJ, GJ, MWh, kWh]

E_{t1h} - uvolněná tepelná energie za 1 hodinu [MJ, GJ, MWh, kWh]

P – výkon [kW, MW]

P_{tKJ} – tepelný výkon KJ [kW, MW]

P_{eKJ} – elektrický výkon KJ [kW, MW]

t – čas [h, s]

E_{KJe} - elektrická energie z KJ [kWh, MWh]

P_{FVEi} – instalovaný výkon FVE [kWp]

P_p – výkon jednoho panelu FVE [Wp]

l_p - délka fotovoltaického panelu [m]

\check{s}_p – šířka fotovoltaického panelu [m]

S_p – plocha připadající na jeden panel FVE [m²]

S – plocha [m²]

N – počet panelů FVE

C_{er} – roční vážená finanční hodnota vyrobené elektřiny vztažená na množství výroby a aktuální cenu v daném období [Kč]

C_p – cena jednoho fotovoltaického panelu [Kč]

C_{mp} – cena montáže fotovoltaických panelů [Kč/m²]

N_{FVEi} – náklady na instalaci FVE [Kč]

N_{FVEpm} – roční provozní náklady FVE na 1 MW instalovaného výkonu $\left[\frac{EUR}{MW \cdot rok} \right]$

N_{FVEp} – roční provozní náklady FVE [Kč/rok]

d – roční degradace panelu FVE [%]

E_{FVEe} – elektrická energie vyrobená ve FVE [kWh, MWh]

Z – zisk [Kč]

Z_n – zisk v roce n [Kč]

B_n – aktuální bilance projektu pro daný rok [Kč]

η_{ORCe} – elektrická účinnost ORC [%]

η_{ORCt} – tepelná účinnost ORC [%]

E_{ORCe} – roční výroba elektřiny pomocí ORC [MWh, kWh]

E_{ORCt} – roční výroba tepla pomocí ORC [MWh, kWh]

P_{ORCe} – elektrický výkon ORC [MW]

P_{ORCt} – tepelný výkon ORC [MW]

P_{ORCeh} – okamžitý hodinový elektrický výkon ORC [MW]

P_{ORCth} – okamžitý hodinový tepelný výkon ORC [MW]

U – produkce oxidu uhličitého ze spalování zemního plynu [t/MWh]

E_{KJt} – tepelná energie z KJ

E_{KJ0} – příkon energie do KJ

V_{KJ} – objem plynu pro KJ

V_{celk} – celkový roční objem spotřebovaného plynu [m^3]

V_k – objem plynu pro kotle [m^3]

η_k – účinnost plynového kotle [%]

E_{k0} – energie nutná pro příkon do kotlů [MWh, kWh]

m – hmotnost [kg, t]

E_k – energie přeměněná v kotli [kWh, MWh]

E_{k0} – energie v palivu kotle [kWh, MWh]

$C_{dš}$ – cena dřevěné štěpky [Kč/MWh]

E_t – tepelná energie z řešené kotelny [MWh, kWh]

C_{pp} – průměrná cena plynu [Kč/MWh]

N_p – náklady na pokrytí spotřeby plynu [Kč]

C_{ep} – průměrná cena elektřiny [Kč/MWh]

$N_{dš}$ – náklady na pokrytí ceny dřevní štěpky [Kč]

E_{ORC0} – energie potřebná pro příkon do ORC [MWh]

E_k – tepelná energie z kotlů [MWh, kWh]

N_c – celkové náklady [Kč]

C_{ORC} – cena za instalaci 1 kWe ORC [Kč/kWh]

C_i – cena za instalaci [Kč]

C_l – cena za lidskou práci [Kč]

$N_{úp}$ – náklady na údržbu a provoz [Kč]

$C_{úp}$ – úspora za neplacení emisních povolenek [Kč]

$H_{dš}$ – výhřevnost dřevěné štěpky [MJ/kg; kWh/kg]

ρ – hustota dřevní štěpky [kg/m^3]

V – objem [m^3]

1 Úvod

S poptávkou po dodávce tepla a elektřiny se lidstvo setkává již mnoho let. V minulosti bylo hlavním zdrojem energie především dřevo nebo uhlí. Později se pak přidaly vodní a jaderné elektrárny a až na úplném konci pomyslné časové osy se začala využívat i energie ze slunce a větru.

Žijeme v době, která se nesmírně rychlým způsobem mění ve všech ohledech. Jednou z těchto mnoha změn je například globální oteplování, které se týká úplně každého obyvatele naší planety. Stále častěji se sekáváme s novými teplotními rekordy a jinými extrémními počasí. V médiích, jež je pochopitelné nutno brát s rezervou a nad informacemi se vždy kriticky zamyslet, už se dokonce objevují zprávy, že některé části Země, např. jihovýchodní Asie, se s tímto tempem brzy stanou neobyvatelnými. Je tedy zřejmě nutné, abychom se jako lidstvo zamysleli nad svým chováním a přistupovali k planetě o něco zodpovědněji. Třeba tak, že omezíme produkci oxidu uhličitého a jiných skleníkových plynů.

Další věcí, která je v současném světě problémem, je obrovská vzájemná závislost. Jakožto Evropané jsme ve velké míře závislí na dodávkách energetických surovin z mimoevropských zemí. Často ze zemí, jejichž tamější režim je z evropského pohledu přinejmenším podivný, někdy i dokonce barbarský či zločinný. Tyto země nejsou našimi spojenci a v momentě, kdy pro ně pomine vidina zisku, se s námi pravděpodobně přestanou přátelit a my zůstaneme bez zdrojů.

Je zřejmé, že tlak na orientaci k obnovitelným zdrojům energie je ze všech stran značný. Proto je cílem teoretické části seznámení se se základní problematikou kombinované výroby elektřiny a tepla, plynových kotlů a kotelen. Dále se zde věnuji rešerši možností nahrazení výroby elektřiny kogenerační jednotkou v plynové kotelně pomocí obnovitelných zdrojů energie. V praktické části se pak budu zabývat konkrétními návrhy řešení problematiky nahrazení kogenerační jednotky a jejich ekonomickým, provozním a ekologickým zhodnocením.

2 Teoretická část

V teoretické části bakalářské práce se seznámím s kotelnou ŘOK4, základním fungováním plynových kotlů, kombinovanou výrobou elektřiny a tepla pro menší výkony a možnostmi nahrazení výše zmíněných pomocí obnovitelných zdrojů energie.

V minulosti se v městské části Praha-Řepy nacházela výtopna, tedy místo, kde docházelo pouze ke spalování plynu a výrobě tepla. Později byla do výtopny instalována kogenerační jednotka, která kromě tepla vyrábí také elektřinu, a z výtopny se stala malá teplárna. Jak jde doba kupředu, tak se firmy, mimo jiné z již zmíněných důvodů, stále častěji zajímají o možnost nahrazení stávajících zařízení na zařízení bezemisní.

2.1 Technické řešení zařízení na výrobu tepla

2.1.1 Kotle na zemní plyn

Plynná paliva se mohou pyšnit tím, že mají nejjednodušší palivové hospodářství. Před jejich použitím je nutno zredukovat tlak, očistit plyn od nečistot a v případě nízkovýhřevných plynů i od vlhkosti.

Ve většině případů probíhá odběr plynu z plynárenské soustavy vyšší tlakové úrovně, ale v některých případech lze využít i plynojem. Než plyn doputuje k hořáku, projde plynovým potrubím, kde se postupně setká s filtrem nečistot, tlakoměrem, teploměrem, průtokoměrem, výměníkem pro ohřev plynu a uzavírací regulační a pojišťovací armaturou. Cestou k hořákům je tlak plynu snížen pomocí redukčních ventilů.

Právě plynové hořáky slouží k tomu, aby se plyn v kotli spálil. Jejich navrzení je uzpůsobeno tomu, aby kinetické energie proudu vzduchu a plynu byly hodně podobné. Hořáky lze rozdělit na dva základní typy – směšovací a proudové. Zatímco v případě směšovacích hořáků je směs plynu se vzduchem vytvořena ještě uvnitř hořáku, u proudových k tomuto ději dochází až v ohništi. [1]

U ejektorového hořáku je přes trysku nasán vzduch z atmosféry a palivo se zde tedy smíchá se vzduchem. Problémem tohoto typu hořáků je jejich citlivost na změnu tlaku plynu i tahu v ohništi. Z tohoto důvodu disponují mřížkou u ústí, aby bylo zamezeno zpětnému prošlehnutí plamene. Tyto hořáky jsou velmi oblíbené a rozšířené díky snadné obsluze a nízké ceně. Svoje využití mají především u menších kotlů.

U větších kotlů se používají hořáky tlakové. Plyn je zde hnán pomocí tlaku vzduchu, který dosahuje až 4000 Pa. Plyn vstupuje pod přetlakem 800 Pa a je díky rozdílu tlaků přisán ke vzduchu. Je nutné zajistit konstantnost tlaku plynu. Děje se tak pomocí zvláštního regulátoru. Stejně jako u výše zmíněných hořáku, je i zde potřeba použít mřížku, která brání zpětnému prošlehnutí.

Pro kotle s malým výkonem hořáků se používají tzv. monoblokové hořáky. U větších kotlů je pak hořáků více a společnou mají pouze vzduchovou skříň. [1]

2.1.2 Kogenerační jednotky se spalovacími motory

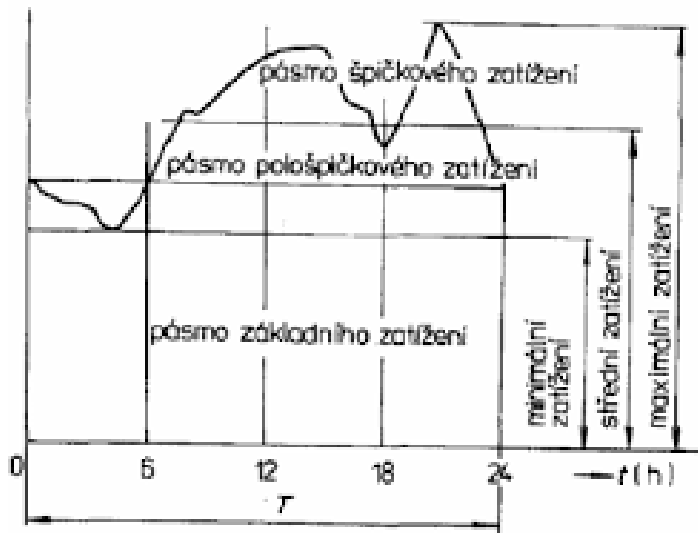
KJ funguje na principu ohřevu vody z odpadního tepla, které získáváme chlazením motoru a také chlazením oleje. V případě přeplňovaných motorů lze použít ještě teplo z chladiče a z plnicí směsi vzduchu a plynu. Této technologii získání tepla je možno dosáhnout díky tomu, že spalovací motor funguje jenom s malým přebytkem vzduchu, čehož je dosaženo díky tvorbě oxidů dusíku a také tvorbou malého množství oxidu uhelnatého, který je následně spalován v katalyzačním zařízení výfukového potrubí. Dále se teplo získává z válců spalovacího motoru. Touto metodou je možné dosáhnout účinnosti 85–88 %.

Když voda, která slouží jako teplotnosné médium, opouští motor, dosahuje teploty 80-90 °C. Při vstupu do motoru pak zpravidla dosahuje teploty menší než 70 °C. [1]

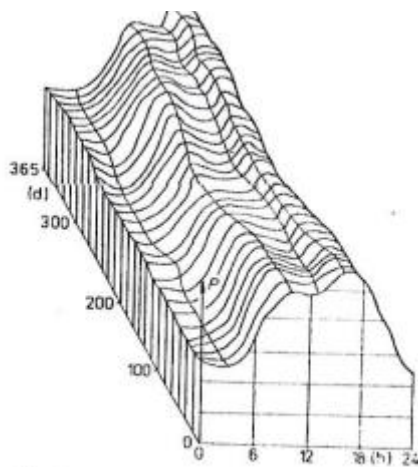
Malé teplárny, které se zabývají kombinovanou výrobou elektřiny a tepla, se od těch větších liší tím, že produkují ve větším množství oxidy uhlíku a dusíku, což jsou škodlivé látky. Tento problém je nejpatrnější v místech, kde jsou běžně se škodlivinami z energetických centrál produkovány i škodlivé látky z dopravy nebo některého z průmyslových podniků.

Výroba energií v teplárnách se spalovacími motory je ovlivněna závislostí mezi tepelným a elektrickým výkonem, čímž vzniká problém, protože se zatížení během roku mění. Zařízení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla je poměrně drahé a bylo by neekonomické jej během roku nevyužívat. Proto se KJ nedimenzuje na maximální tepelné výkony a špičková spotřeba je pokryta z jiných tepelných zdrojů. Zároveň lze z těchto jiných tepelných zdrojů pokrýt výkon v mimotopném období. [1]

2.2 Časový průběh zatížení a diagramy



Obrázek 1 - diagram trvání výkonu [6]



Obr. 1-5 Roční průběh zatížení

Obrázek 2 - roční průběh zatížení [1]

vývoj výkonu během celého roku a lze z něj dobře vyčíst i například, jak se výkon liší v danou denní dobu během roku. Vrstevnicový diagram zobrazuje prakticky to samé, rozdíl je ale v tom, že změna výkonu je v grafu zobrazena podobně jako bývají na mapách zobrazeny nerovnosti v terénu (např. hory) [1]

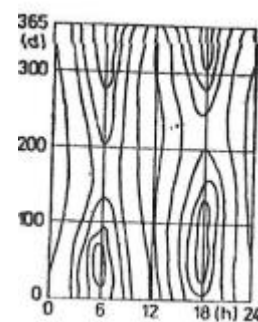
Další možností, jak popsat roční dodávky tepla, je roční diagram trvání dodávek tepla (Obrázek 4). V takovémto diagramu je zaznamenáno, na jaký minimální výkon kolik hodin během roku

Při navrhování technické soustavy je poměrně důležité vzít v úvahu, že navrhované veličiny se v čase mění, převážně pak výkony v elektrizačních a topných soustavách. Nejčastěji se zatížení sleduje a zaznamenává do grafu v časovém horizontu jednoho dne. Takovýto graf se nazývá diagram trvání. Už při prvním pohledu na graf (Obrázek 1) je patrné, že se zatížení v průběhu dne mění. Ráno a večer dosahuje špiček, zatímco přes noc je spotřeba nižší. Tento jev je způsoben mnoha faktory jako je třeba spotřeba v domácnostech,

směnnost závodů nebo elektrická doprava. Celková dodaná energie pak lze spočítat jako obsah plochy pod křivkou: [1]

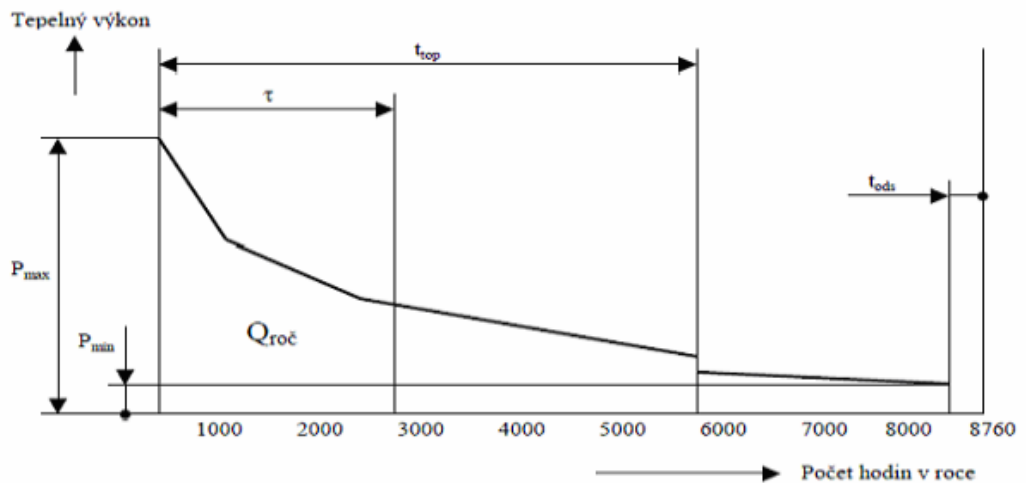
$$E = \int_0^{\tau_0} P d\tau$$

Pro grafické znázornění ročního průběhu jsou v ročním grafu denní průběhy zatížení poskládány za sebe. Alternativou k tomuto grafu je tzv. vrstevnicové uspořádání (Obrázek 3) ročního diagramu. Roční diagram zaznamenává



Obrázek 3 - vrstevnicové uspořádání [1]

bylo dané zařízení v provozu. Na vodorovné ose je znázorněn čas v hodinách a na svislé ose výkon. Z grafu je například vidět, že nejvyšší výkony byly využity pouze několik hodin v roce.



Obrázek 4- Roční diagram trvání dodávek tepla [2]

2.3 Kogenerace

Kogenerací (Obrázek 5) nazýváme proces, při kterém dochází ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Jeho hlavní výhodou je především ekologická šetrnost, ale také spolehlivost. Při výrobě elektrické energie jinými způsoby, při kterých je využíváno přeměny energie ve formě tepla na mechanickou energii, jako jsou uhelné nebo jaderné elektrárny, dochází k největším ztrátám kvůli vypouštění odpadního tepla do ovzduší. Účinnost energie uložené v takto využívaném palivu se pohybuje mezi 30 a 40 %. Oproti tomu, v případě moderních technologií kogenerace je možno přesáhnout hranici 90 % účinnosti. [3]

Kogenerační jednotky je možné vyrobit v širokém rozmezí výkonů. Lze s nimi dosáhnout hodnot od jednotek kWe až do stovky MWe. Díky tomu se pro ně najde využití při zásobování domů ale i pro dodávání elektřiny a tepla do celých měst.

K výrobě elektřiny a tepla pomocí kogenerační jednotky může být využito mnoho druhů paliv:

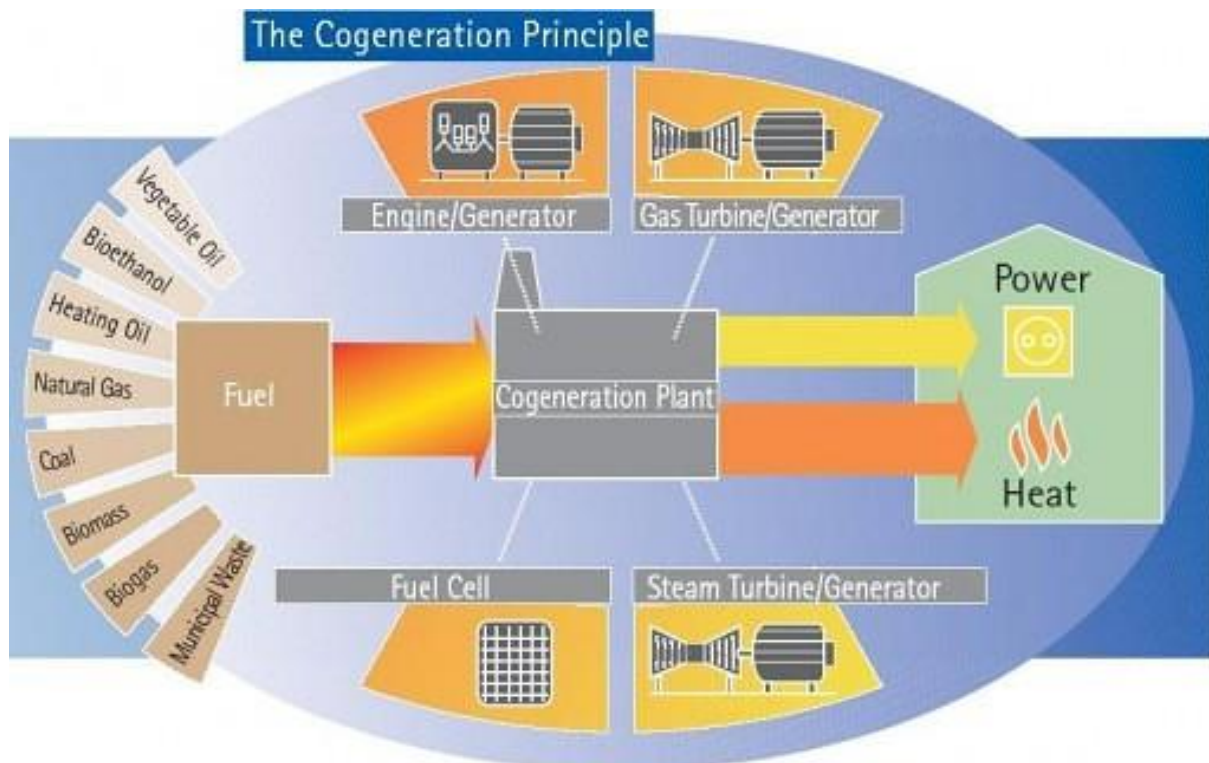
- Bioplyn
- Topné oleje
- Zemní plyn
- Černé a hnědé uhlí

- Biomasa
- A další

V závislosti na požadavku na dodávaný výkon mohou být pro kogeneraci využity různé technologie:

- Motor/generátor
- Plynová turbína/generátor
- Parní turbína/generátor
- Palivový článek
- ORC

Vzhledem k tomu, že řešený projekt se týká kombinované výroby elektřiny a tepla pouze zařízeními o menším výkonu, budu se dále blíže věnovat pouze některým z možných variant.



Obrázek 5-základní princip kogenerace [3]

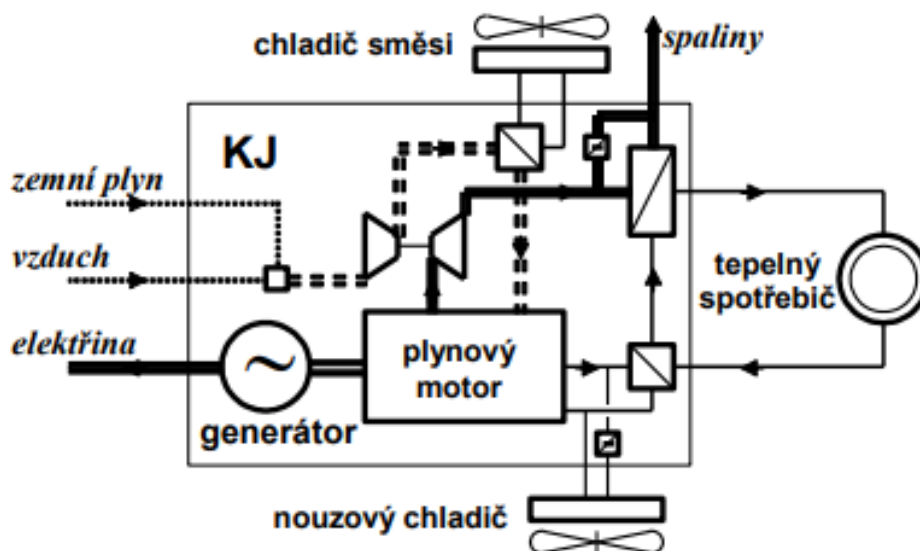
2.3.1 Výhody

Jak již bylo zmíněno, hlavní výhodou kogeneračních jednotek je zvýšení účinnosti využití energie získané z paliva. Díky tomu dochází ke snížení palivové náročnosti a snížení množství emisí vypouštěných do atmosféry. Snížením palivové náročnosti zároveň dochází ke snížení

nákladů na výrobu energie. V případě Black-outu je možno kogeneraci využít jako záložní zdroj pro dodávku elektřiny. Vzhledem k tomu, že kogenerační jednotky lze dimenzovat i pro malé výkony, vzniká zde možnost projektování na míru dle požadavků spotřebitele a zároveň vzniká prostor pro decentralizaci. Výhodou decentralizace výroby elektřiny a tepla je snížení nákladů a ztrát při přenosu a distribuci. Na druhou stranu ale vznikají náklady spojené s transportem paliva. Decentralizace též umožňuje zvýšení zabezpečení dodávek energie pro konkrétní lokalitu a zároveň vytváří příležitost pro nové výrobce energii, díky kterým by došlo k nárůstu konkurence a tím pádem zlepšení služeb pro spotřebitele. Je tedy patrné, že ať se jedná o ekologičnost, spolehlivost nebo konkurenci, dotýkají se všechny zmíněné výhody témat, která jsou v oblasti energetiky v poslední době aktuální a často diskutovaná. [3], [4], [5]

2.3.2 Kogenerační jednotky se spalovacími motory

Tento druh kogenerační jednotky (Obrázek 6) využívá spojení motoru pomocí hřídele a spojky s elektrickým generátorem. Jako palivo do těchto motorů se nejčastěji používají plynná paliva. Teplo je získáváno z chladicího okruhu motoru, z chladiče oleje a z výfukových plynů.

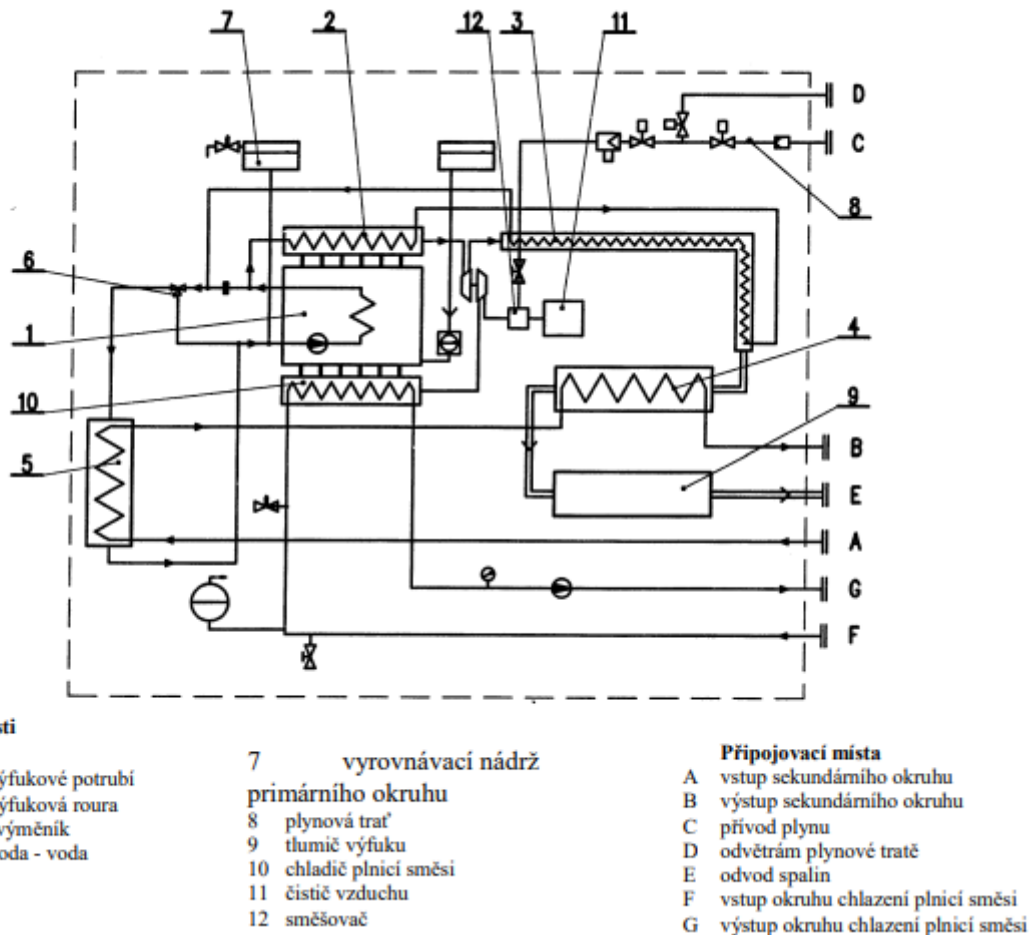


Obrázek 6- KJ se spalovacím motorem [6]

Získané teplo je nadále uchováváno a dále přepravováno ve formě horké vody, jejíž teplota je většinou do 100 °C. Nejčastějším důvodem instalace tohoto typu kogeneračních jednotek bývá výroba elektřiny pro vlastní spotřebu, což má za výsledek finanční úspory za elektřinu, nebo výroba elektřiny, jež je následně prodávána do sítě, díky čemuž dochází ke snížení ceny vyrobeného tepla. [6]

2.3.3 Kogenerační jednotka TEDOM Cento 150 – schéma a princip fungování

Jedná se o kogenerační jednotku (Obrázek 7) s plynovým motorem. Zápalná směs, která se skládá ze zemního plynu a vzduchu, je stlačena v turbodmychadle, jež je poháněno spaliny, které vychází z motoru. Směs je nejprve nutné ochladit v externím chladiči, neboť při následné kompresi dochází ke zvýšení její teploty.



Obrázek 7 - schéma kogenerační jednotky [6]

K zisku tepla následně dochází pomocí sériově zapojených chladičů primárního okruhu bloku motoru, odcházejících spalin a oleje. Na celkovém tepelném výkonu této kogenerační jednotky má hlavní podíl zisk tepla z chlazení motoru – přibližně 60 %. Zbýlých zhruba 40 % pak pochází z chlazení spalin. V krajním případě je možné používat kogenerační jednotku bez odbírání tepla. Pro tyto situace slouží externí nouzový chladič a obtok spalínového výměníku.

Obecně lze říci, že konstrukční uspořádání kogeneračních jednotek je u jednotlivých výrobců poměrně podobné a jednotlivé jednotky se o sebe liší převážně účinností, úrovní emisí nebo komfortem obsluhy. [6]

Typ	elektrický výkon	tepelný výkon	spotřeba paliva	účinnost		využití paliva
	(kW)	(kW)	(m ³ /h)	elektrická (%)	tepelná (%)	(%)
Plus 10 A	9	21,0	3,8	25,0	58,3	83,3
Plus 22 A	22	45,5	8,2	28,4	58,8	87,2
Plus twin 44 AP	44	91	16,4	28,4	58,8	87,2
Plus twin 88 AP	88	182	32,8	28,4	58,8	87,2
Cento 42 AP	42	64,5	13,2	33,8	52,0	85,8
Cento 65 AP	65	97,0	20,0	34,4	51,3	85,7
Cento 75 AP	75	125,0	25,8	30,7	51,2	81,9
Cento 100 SP	100	161,0	32,3	32,8	52,8	85,6
Cento 140 SP	150	226,0	45,5	34,8	52,6	87,4
CAT 190 SP	190	303	61,0	33,0	52,6	85,6
CAT 260 SP	255	419	82,0	32,9	54,1	87,0
CAT 400 SP	395	561	117,0	35,7	50,8	86,5
CAT 500 SP	519	653	144,0	38,1	47,9	86,0
CAT 770 SP	770	1032	219,0	37,2	49,9	87,1
CAT 1000 SP	1030	1395	292,0	37,4	50,6	88,0
CAT 2000 SP	2086	2808	579,7	38,1	51,3	89,4
CAT 2900 SP	2904	3324	760,4	40,4	46,2	86,6
CAT 3800 SP	3884	4312	1000,9	41,0	45,6	86,6

Obrázek 8 - přehled kogeneračních jednotek TEDOM Třebíč a.s. včetně základních technických parametrů [6]

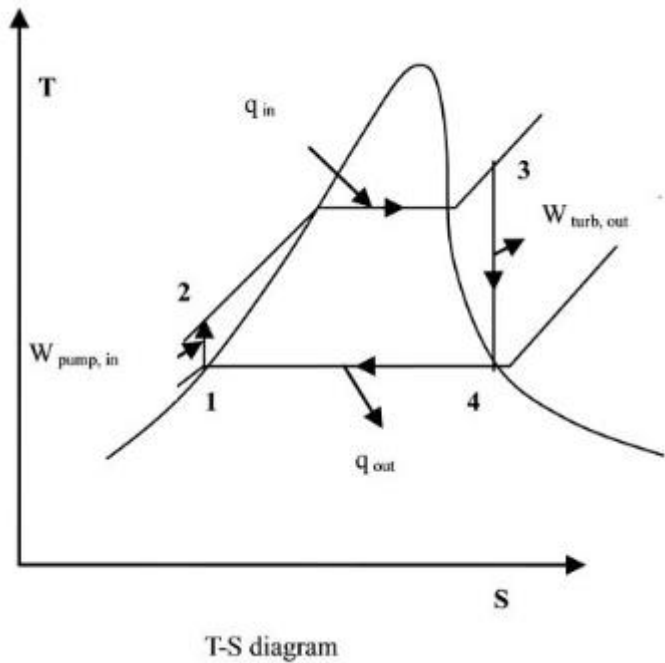
2.4 Kogenerace s ORC cyklem

Organický Rankinův cyklus je vhodné použít pro výrobu nízkých tepelných výkonů a situacích, kdy zdroj tepla nedisponuje příliš velkým výkonem. Při tomto způsobu kogenerace je spalována biomasa. Průběh organického Rankinova cyklu (Obrázek 10) je téměř totožný s běžným Rankinovým cyklem (Obrázek 9), již popsaným průběhem u parní turbíny. Cykly se ale liší v tom, že v případě organického Rankinova cyklu je jako pracovní médium využita látka s menší teplotou varu jako jsou třeba některé druhy silikonových olejů. Oproti vodě je výhodou silikonového oleje (nebo jiné pracovní látky), že za určité teploty zůstává v kapalném skupenství při mnohem menším tlaku, než je tomu u vody. Díky tomu, že v cyklu není použita

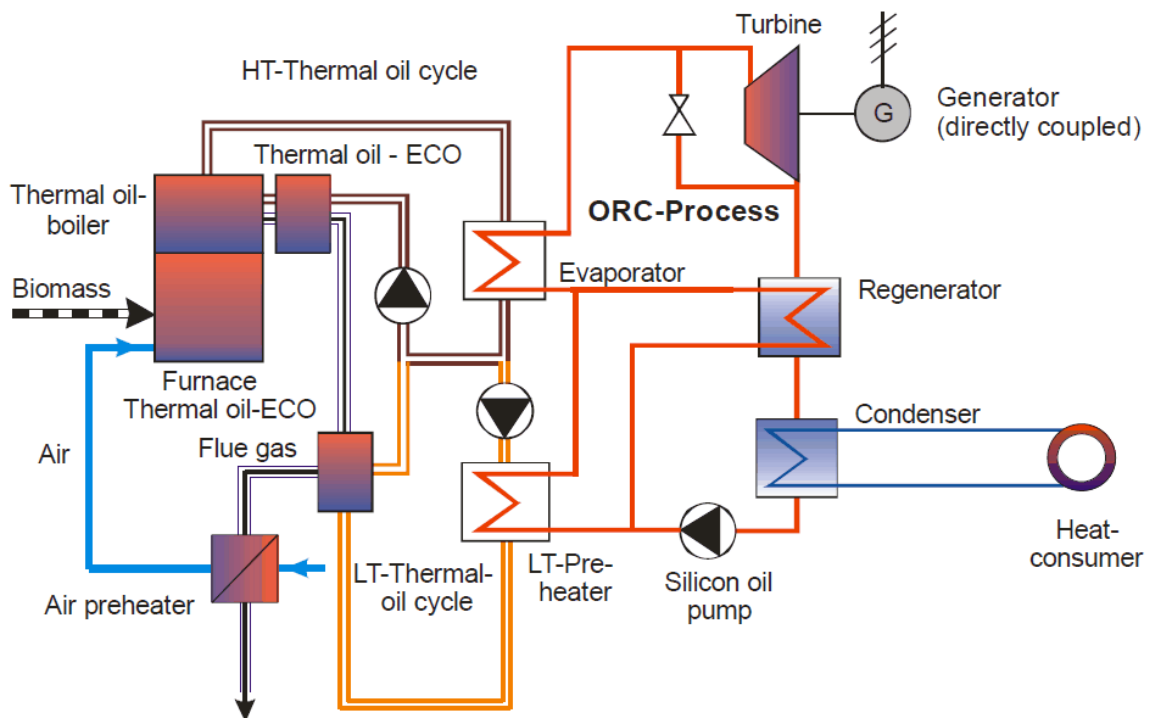
voda, nedochází ke korozi turbíny ani dalších částí systému a prodlužuje se tak jejich životnost, což je značná výhoda.

Celý cyklus začíná tak, že v kotli je spálena biomasa, čímž dochází k ohřátí termooleje, který pak putuje do parního generátoru. Zde ohřívá pracovní látku a po ochlazení se díky cirkulačnímu čerpadlu vrací zpět do kotle. Páry silikonového oleje (nebo jiné pracovní látky) následně expandují v turbíně, která se díky tomu roztáčí a v generátoru tak vzniká elektřina. V regeneračním oběhu páry pracovní

látky ohřívají zkapalněný silikonový olej, který následně vstupuje do parního generátoru. Nakonec je silikonový olej odveden do kondenzátoru, kde dojde k jeho kondenzaci. Teplo z kondenzátoru je pak předáno do soustavy zásobování teplem a putuje ke spotřebitelům.



Obrázek 9 - Rankinův cyklus [3]



Obrázek 10-ORC [3]

Kogenerační jednotky s organickým Rankinovým cyklem dosahují výkonu od 200 do 1500 kWe. Vzhledem k jejich poměru elektrického a tepelného výkonu, který se pohybuje mezi 0,05 a 0,2, vyrábí podstatně více tepla než elektřiny. Elektrická účinnost celého procesu se nachází někde mezi 15 a 20 %. Celková účinnost využití biomasy je však vysoká a pohybuje se kolem 80 %. Díky tomu, že v cyklu není použita voda, nedochází ke korozi turbíny ani dalších částí systému a prodlužuje se tak jejich životnost. [3]

2.4.1 Příklady kogenerace s ORC

Třebíč

Jeden z příkladů využití ORC v České republice je město Třebíč. V roce 2005 byl do stávající kotelny k několika kotlům na zemní plyn a dvěma kogeneračním jednotkám nainstalován ještě termoolejový kotel na spalování biomasy. Tento kotel je určen k ohřevu pracovního média organického Rankinova cyklu. Díky tomuto systému je vytápěno přes 3000 domácností a další důležité objekty. Díky technickému provedení je ale možné dočasně upustit od výroby elektřiny a vyrábět pouze teplo. [7]

Trhové Sviny

Systém ORC byl, stejně jako v Třebíči, uveden do provozu v roce 2005. Dříve zde byl jeden kotel určený ke spalování biomasy o výkonu 2,5 MW a 3 kotle na zemní plyn o výkonu 3 MW každý kotel. Primárním zdrojem tepla zde byl biomasový kotel a ty zbylé sloužily spíše jako záloha nebo podpora při vysoké poptávce. V teplárně se nyní nachází dva okruhy – s topnou vodou a s termoolejem. Topná voda je ohřívána ORC jednotkou a případně přehřívána dalšími zdroji. Termoolejový okruh je uzavřený a používá se k dodávkám tepelné energie do jednotky ORC. Kromě již zmíněných se zde nachází ještě glykolový okruh, jehož smyslem je chlazení ORC. Pokud by se totiž jednotka přehřála, poklesl by její výkon a v krajní situaci by musela

Tabulka 1-ORC Třebíč [7]

Výkonové parametry systému ORC		
při parametrech paliva: vlhkost max. 40 %, výhřevnost min. 10,024 MJ/kg		
Termoolejový Kotel	výkon spalovací komory (ohniště)	8,0 MW _t
	výkon v oleji	6,6 MW _t
	výkon vodního ekonomiséro	1,3 MW _t
Jednotka ORC	výkon elektrický	1 MW _e
	výkon ve vodě	5,38 MW _t
Celkem	výkon v palivu	9,41 MW _t
	výkon spalovací komory (ohniště)	8,0 MW _t
	výkon ve vodě	6,7 MW _t
	výkon elektrický	1 MW _e

být odstavena. Pokud provozovatel soustavy není schopen zaručit odběr tepla, je nutné na tento chladicí okruh myslet. [8]

Tabulka 2 - ORC Trhové Sviny [7]

			Stadtwärme Lienz	Teplárna Trhové Sviny
Palivo			Dřevní štěpka	Dřevní štěpka
Tepelný výkon kotle		MWt	5,8	3,5
Výkon jednotky ORC	tepelný	MWt	4,65	2,8
	elektrický	MWe	1	0,6
Účinnost zařízení při jm. výkonu	tepelná	%	80,2	80
	elektrická	%	17,2	17,1
Roční využití jednotky ORC		hod/rok	7200	8746
Dodávka tepla z biomasy *		MWh/rok	60000	12500
Dodávka el. energie z biomasy		MWh/rok	7200	5248
Průměrná cena paliva		Kč/t	1250	400
Celková investice **		mil. Kč	231	103,6
Uvedení do provozu		rok	2003	2005
Celkový tepelný výkon teplárny ***		MWt	24,5	15
Délka rozvodů SCZT		m	37500	9000

Tabulka porovnání technických parametrů jednotlivých realizací

* u teplárny Lienz a Trhové Sviny se jedná o teplo vyrobené z obou kotlů na biomasu

** obtížně porovnatelné, obsahují různé technologické části a stavební objekty

*** jedná se o celkový instalovaný tepelný výkon všech spalovacích zařízení

2.5 Příklady použití kogeneračních jednotek

2.5.1 Obytné objekty

V obytných objektech dochází k poměrně nízké spotřebě tepla a elektřiny. Spotřeba je navíc velmi úzce spojena s roční dobou. Kogenerační jednotky v obytných objektech se využívají jako alternativa plynového kotle, jejich primárním využitím je tedy výroba tepla. Vyrobené teplo je spotřebováno přímo v objektu, zatímco veškerá vyrobená elektřina je prodávána do sítě. Pro maximální možné ekonomické využití, je kogenerační jednotka v provozu pouze v době energetické špičky, kdy ceny elektřiny dosahují svého denního maxima. Provoz kogeneračních jednotek v obytných objektech je tedy časově poměrně omezen. V době, když není kogenerační

jednotka v provozu, se používá vodní akumulární nádrž, která se v době provozu kogenerační jednotky ohřívá. Tepelný výkon takto instalované kogenerační jednotky není tedy vhodné zbytečně předimenzovat, protože jeho výkon by byl nevyužitý. [6]

2.5.2 Kogenerační jednotka v centrálním zdroji tepla

Do centrálních zdrojů tepla bývá kogenerační jednotka většinou přidávána až dodatečně při rekonstrukci. Elektřina, která je při kogeneraci vyrobena, se většinou prodává pouze do sítě. Pro vlastní spotřebu je využívána jen málokdy.

Je-li elektřina z kogenerační jednotky využita pro vlastní spotřebu, musí být její výkon přizpůsoben pro základnímu zatížení zdroje. V době špičky bývá výroba tepla pokryta ostatními kotli, se kterými musí kogenerační jednotka spolupracovat. Výroba elektřina má však v této době prioritu. [6]

2.5.3 Kogenerační jednotka v průmyslovém podniku

Na rozdíl od výše zmíněných se v průmyslovém sektoru princip kogenerace využívá k pokrytí vlastní spotřeby elektřiny a tím pádem i snížení nákladů, které se se spotřebou elektřiny pojí. Tento proces je ekonomicky výhodný při maximálním využití obou forem vyráběné energie (teplo i elektřina). Jsou tak kladeny vyšší požadavky na přesnost návrhu výkonu, především vůči tomu, jaké množství elektřiny a tepla je v podniku odebíráno. Omezením pro kogeneraci bývá nízká teplota vody, která se při technologických postupech zpravidla využívá při teplotách vyšších, než je běžných 90 °C. V krajních případech je možné využít kogenerační jednotku jako záložní zdroj elektrické energie. Je však nutné použít nouzový chladič, který se stará o přebytečné teplo. K tomuto postupu je však přistoupeno pouze při hrozbě překročení smlouveného čtvrt hodinového odběru elektřiny. [6]

2.6 Ekonomický aspekt kogenerační jednotky

Při snaze o uspokojení požadavků potenciálního odběratele elektrické a tepelné energie, je možné využít několik technických řešení. Při ekonomickém vyhodnocování je vhodné zahrnout především tyto parametry: [6], [9]

- Využití investovaného kapitálu u jednotlivých variant
- Nejistoty a s nimi se pojící rizika
- Očekávané výdaje a výnosy

2.6.1 Roční výrobní náklady

Položka nákladů se v praxi dělí na investiční část a na roční provozní náklady. Do investiční části se zahrnují především výdaje za údržbu a obnovu případného zastaralého vybavení. Závisí na investičních nákladech a také na životnosti zařízení a jeho jednotlivých součástí. Mezi roční provozní náklady pak spadají ostatní výdaje spojené s provozem.

- **Investiční náklady:**
 - ◆ Cena kogenerační jednotky
 - ◆ Palivové hospodářství a ovládací zařízení
 - ◆ Připojení k elektrické síti (včetně případné rekonstrukce)
 - ◆ Mechanická propojení a elektrický servis
 - ◆ Nové budovy a případné úpravy
 - ◆ Školení operátorů
 - ◆ Náhradní díly
 - ◆ Uvedení do provozu
 - ◆ Enviromentální výbava
- **Roční provozní náklady:**
 - ◆ Palivo pro pohonné jednotky
 - ◆ Mzdy
 - ◆ Běžná údržba
 - ◆ Plánované prohlídky a opravy
 - ◆ Montážní a údržbový materiál
 - ◆ Režijní náklady

Z kategorie investičních nákladů stojí za zmínku především případné připojování do sítě a její budování. U jednotek s vyššími výkony je tento výdaj nezbytný, ovšem v případě instalace zařízení menších výkonů někdy stačí pouze ověřit, jestli je stávající infrastruktura dostatečná. Obecně pak lze počítat s tím, že pořizovací náklady na kogenerační jednotky jsou poměrně vysoké. Důležitý je též faktor životnosti, která může poměrně úzce souviset s tím, kolik peněz je věnováno na náhradní pravidelnou obnovu zařízení a jejich údržbu. [6], [9]

Na straně ročních provozních nákladů pak největší výdaj tvoří cena paliva. Pro správnost ekonomického zhodnocení je žádoucí stanovit ceny paliv co nejpřesněji. Bavíme-li se však o motorech na zemní plyn, je v současné době, vzhledem k agresi vojsk Ruské federace na Ukrajině, předvídat cenu plynu na burze téměř nadsilný úkol. Krátkodobě by se nejspíše dalo

počítat s horní hranicí ceny zemního plynu, kterou stanovila vláda, nicméně tato cena zde nezůstane napořád a to, jaké ceny budou třeba za 3 roky, lze dnes odhadovat jen velmi těžko.

2.6.2 Výnosy

V případě kogeneračních jednotek se výnosy odvíjí od toho, kolik tepla a elektřiny je vyrobeno. Výnosy jsou realizovány buď formou úspor nebo prodejem těchto komodit do sítě.

Při výpočtu výnosu za elektřinu je nutno zahrnout především to, že cena elektřiny se v průběhu dne mění (špičkový, vysoký a nízký tarif). Ráno a odpoledne/ večer je poptávka po elektřině nejvyšší, protože lidé vstávají, používají domácí spotřebiče, svítí si atd. Zároveň je potřeba počítat i s tím, že se spotřeba liší podle ročních období. Například v zimě je vyšší, protože se musí více topit a svítit. Cílem provozu kogenerační jednotky je primárně generace zisku, takže je třeba uvažovat jednotlivé cenové tarify během dne a přizpůsobit jim dobu, po kterou je kogenerační jednotka v provozu.

Zisk z prodeje tepla je třeba uvažovat jako kombinaci ceny tepla a jeho prodaného objemu. [6], [9]

2.7 Kotelna ŘOK4

2.7.1 Návštěva kotelny



Obrázek 11 – kotelna 1



Obrázek 12 - kotelna 2

V rámci zpracovávání bakalářské práce a oborového projektu jsme v úterý 25. října 2022 navštívili kotelnu v pražských Řepích. Kotelna se skládá ze čtyř paralelně zapojených kotlů a jedné kogenerační jednotky. Elektrický výkon KJ činí zhruba 1 MW. [10]



Obrázek 13 - kotelna 3

2.7.2 Technické řešení a zapojení kotelny

Jak již bylo zmíněno, kotelna v Řepích se skládá ze čtyř paralelně zapojených kotlů (Obrázek 12) a jedné kogenerační jednotky.

2.7.3 Technické parametry kotle

Tabulka 3- Technické parametry kotle [10]

Rok instalace	2018
Dovolený pracovní tlak	6 bar
Jmenovitý tepelný výkon	4,6 MW
Dovolená výstupní teplota	110 °C
Objem vody	9,3 m ³
Testovací tlak	10,8 bar

2.7.4 Technické parametry kogenerační jednotky

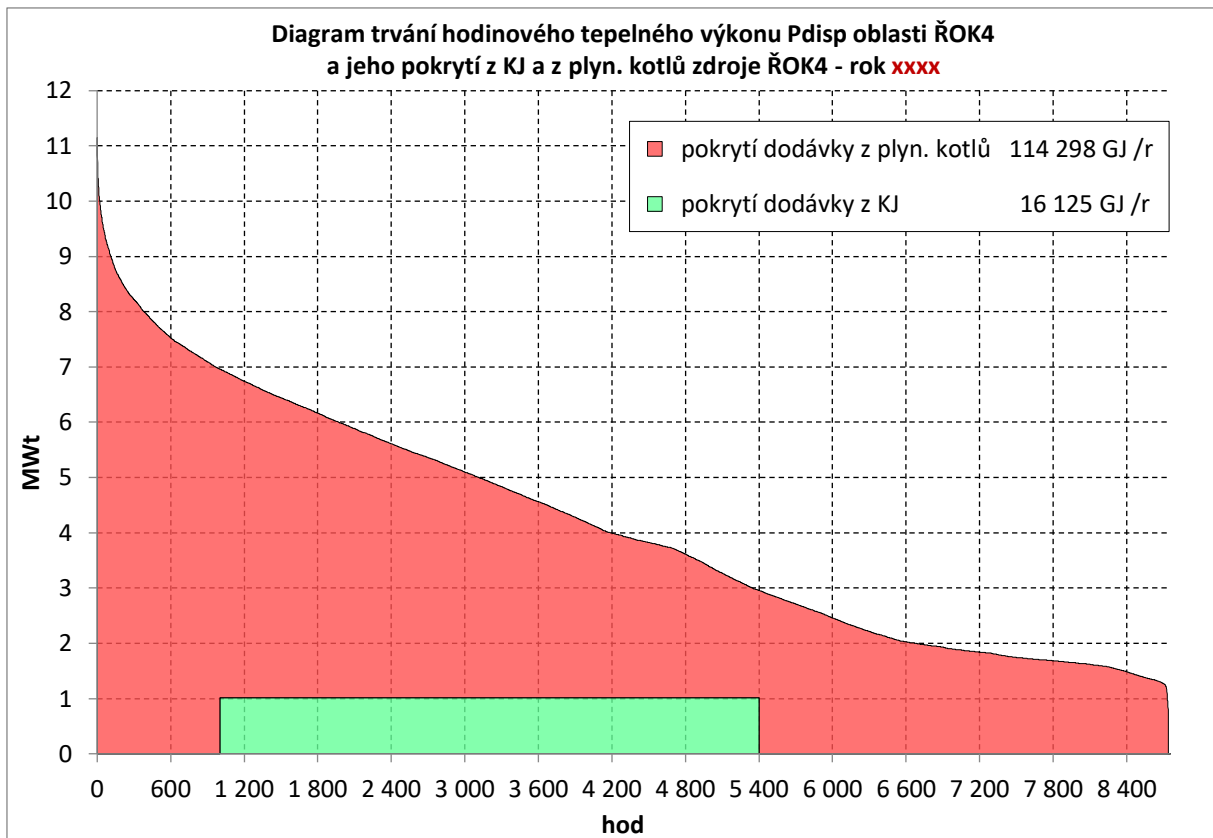
Tabulka 4 - technické parametry KJ [10]

Jmenovitý elektrický výkon	999 kW
jmenovitý tepelný výkon	1018 kW
příkon v palivu	2275 kW
spotřeba paliva	240,9 m ³ /h
elektrická účinnost	43,90 %
celková účinnost	91,60 %
tepelný výkon ze spalin (120 °C)	482 kW
tepelný výkon ze spalin (80 °C)	60 kW
teplený výkon celkem	1018 kW

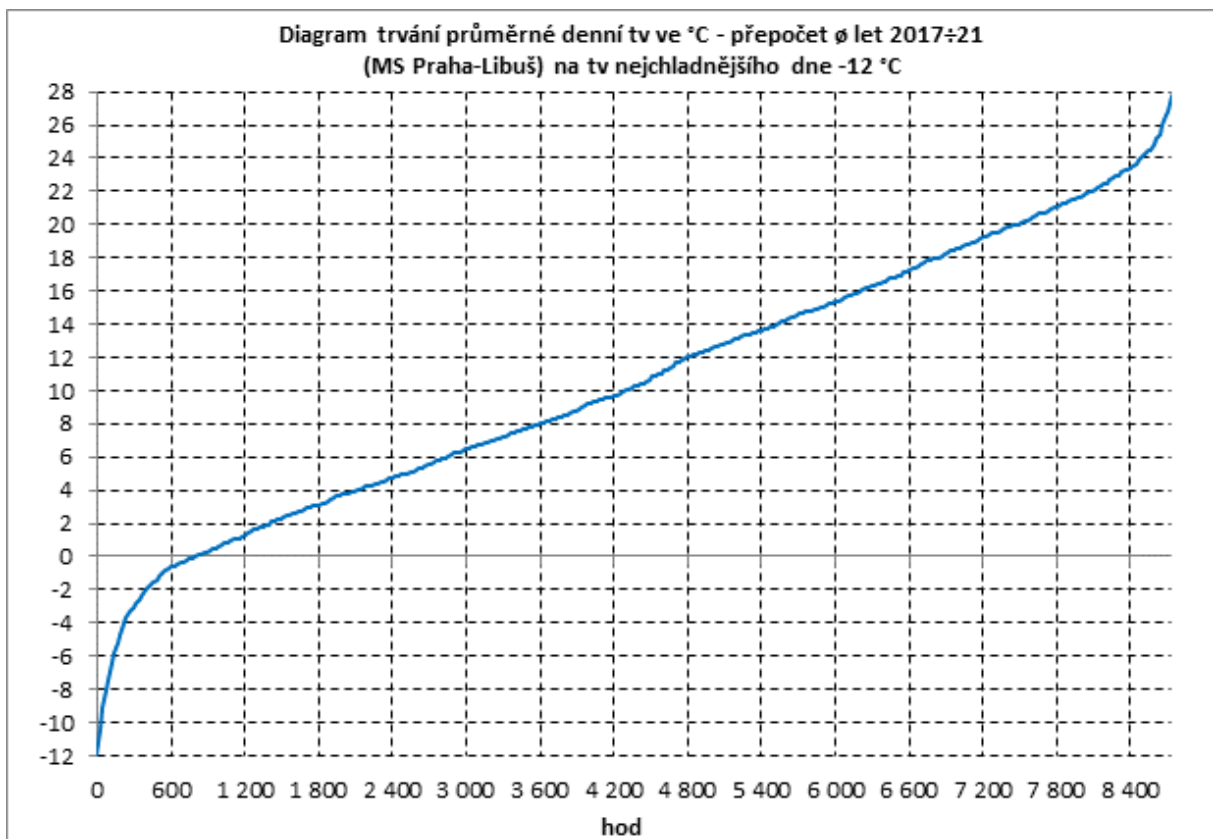
Vzhledem k regulacím ze strany odboru životního prostředí je limit pro užívání kogenerační jednotky 4400 mth, což v praxi znamená, že jednotka smí být v provozu pouze přibližně polovinu roku. Při provozu je nejprve umožněna vlastní spotřeba kogenerační jednotky a kotelny. Zbylá elektřina odchází do sítě. V zimním období do sítě odchází více než 900 kWe. Historická data o výrobě elektřiny však bohužel nemám k dispozici. [10]

2.7.5 Diagram trvání tepelného výkonu

V níže uvedeném grafu (Obrázek 14) je zaznamenán vývoj tepelného výkonu v závislosti na době jeho užívání. Níže je pak zaznamenán vývoj venkovních teplot v letech 2017-2021 (Obrázek 15). Při srovnání obou grafů je patrné, že vývoj teploty a výkonu jsou si velmi podobné. Čím nižší je teplota, tím více tepla je potřeba dodat. Dále je z grafu hezky vidět, že kogenerační jednotka poskytuje pouze malý zlomek celkového dodaného tepla.



Obrázek 14 - diagram trvání výkonu [10]



Obrázek 15 - diagram trvání roční teploty [10]

2.8 Možnosti výroby elektřiny na bázi obnovitelných zdrojů energie

2.8.1 Fotovoltaické elektrárny

Tento způsob výroby nebo spíše přeměny energie řadíme mezi obnovitelné zdroje energie, což v praxi znamená, že tento zdroj energie je lidstvo buď schopno obnovit nebo že ho je tolik, že nikdy nedojde. Toto platí i o fotovoltaických elektrárnách, které pro výrobu elektřiny používají energii ze Slunce, fotony, které dopadají na panely.

Princip fungování

Výhodou těchto elektráren je, že neprodukují žádné emise a díky tomu jsou v souladu se zelenou politikou Evropské unie. Nevýhoda je taková, že pořizovací cena panelů je poměrně vysoká a panely podléhají degradaci, která způsobuje, že každý rok se jejich výkon i o menší jednotky procent sníží. Tento problém se vlády snaží kompenzovat formou investičních bonusů nebo garancí výkupní ceny. Tyto kroky vedly k tomu, že v první polovině minulého desetiletí došlo k velkému nárůstu instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren. S fotovoltaikou se ve světě lze setkat buď v malém měřítku, například na střechách budov, nebo i v měřítku větším, kdy je obrovská plocha zastavěna panely a elektřina je posílána do soustavy.

Zisk energie ze slunce lze rozdělit na termální (koncentrační) a fotovoltaické. Termální elektrárny získávají energii díky solárním kolektorům, které přijímanou energii předávají do teplotněstabilního média. Koncentrační elektrárny pak díky zrcadlu nebo častěji soustavě zrcadel, které mají parabolický tvar, koncentrují energii ze slunce do kolektoru – ohniskového absorberu. Oproti termálním elektrárnám je možné díky koncentrací dojít k vyšším teplotám. Tuto energii lze proto využít k výrobě elektřiny.

Fotovoltaické elektrárny fungují na principu fotoelektrického jevu. Fotovoltaický panel se sestaven z velkého množství fotovoltaických článků, které obsahují polovodičový P-N přechod. Část N se tak nazývá, protože v sobě má přebytek elektronů a má proto záporný (negativní) náboj. Oproti tomu část P má elektronů nedostatek a tím pádem má přebytek děr po chybějících elektronech. Protože jí elektrony chybí, má kladný náboj (pozitivní). Když sluneční záření, tedy fotony, dopadá na krystalovou mřížku, dochází právě k fotoelektrickému jevu a uvolňují se elektrony. Tyto elektrony se zachycují v N vrstvě a mezi N a P vrstvou vzniká napětí, která dosahují hodnot 0,5-0,6 V. Toto napětí je možno zvýšit díky sériovému zapojení jednotlivých

článků. Paralelní zapojení pak pomáhá generovat větší proud. V praxi se hodí výhody sériového i paralelního zapojení, a tak se využívá sério-paralelního zapojení.

Fotovoltaické články se nejčastěji vyrábí z křemíku. Ten se ve volné přírodě dosahuje 97-99 % čistoty, ale pro elektrotechnické využití nestačí, a proto se musí vyrobít. Na výrobu článků se používá monokrystalický nebo polykrystalický křemík. Výhodou monokrystalického křemíku je lepší účinnost při vyšších intenzitách záření, která může dosáhnout až 20 %. Polykrystalický křemík je levnější, než monokrystalický, účinnost panelů z něj vyrobených leží zhruba mezi 15-17 %.

Kromě křemíku se často používá ještě arsenid galia. Oproti křemíkovým článkům dosahuje vyšší účinnosti, která může dosáhnout i 29 %. Tyto články jsou dražší než křemíkové, mají větší hustotu a jsou křehčí. Využití mají především na vesmírných družicích, protože kromě již zmíněného mají i větší odolnost proti slunečnímu záření. [11]

Výhody a nevýhody

Hlavní výhoda fotovoltaických elektráren je, že fotony jsou teoreticky nevyčerpatelný zdroj energie. Zároveň neprodukují žádné emise a zajisté mají v budoucím energetickém mixu své místo. Oproti větrným elektrárnám ani neprodukují hluk a nevyžadují aktivní obsluhu. Hlavní nevýhoda je zajisté proměnlivost výroby. Ta je menší v zimě a ve dnech, kdy je zataženo. Pořizovací náklady na tyto elektrárny jsou poměrně vysoké a panely dosahují životnosti, která se pohybuje kolem 25 let. Kvůli jejich nízké spolehlivosti způsobené závislostí na počasí je nutné mít tento zdroj pokrytý jiným záložním zdrojem energie. V České republice je navíc, v porovnání s jinými zeměmi, relativně krátká doba svitu a nízká intenzita slunečního záření. [11]

2.8.2 Ovlivnění účinnosti panelů

Bavíme-li se o nepohyblivých panelech, je ideální orientace směrem na jih, odkud svítí přes den nejvíce slunce. Ideální sklon je pak okolo 30-35°. Pokud však tyto hodnoty nejsou důsledně dodrženy, nemusí to nutně znamenat, že jsou panely v takovém stavu nepoužitelné a tím pádem ztrátové. Obecně lze říci, že orientace od jihovýchodu po jihozápad je přijatelná a rozdíl v účinnosti činí kolem 5 %. Stejně tak nedodržení sklonu 35° nutně neznamená, že panely budou nevyužity. Změní se akorát rozložení výroby během roku a o něco poklesne dodané

množství elektřiny. Například změnou sklonu lze dosáhnout zvýšené účinnosti v zimních měsících. Nutno však podotknout, že během zimy jsou v zeměpisných šířkách, v nich se nachází Česká republika, kratší dny a paprsky Slunce dopadají na povrch pod menším úhlem, a tak je přes zimu vytvořen jenom zlomek celkového ročního výkonu. Kromě nepohyblivých panelů existují i pohyblivé panely, které dávají možnost směr a orientaci do jisté míry regulovat podle roční a denní doby. Dalším parametrem, který může značně ovlivnit účinnost je znečištění panelů, který mohou být zaneseny například prachem z oprav ve městech nebo v jarních měsících pylem ze stromů. [12], [13]

3 Výpočtová část

V této části bakalářské práce je cílem zpracovat možnosti nahrazení kogenerační jednotky a pokrýt její výrobu elektřiny a tepla pomocí obnovitelných zdrojů energie. Navržené možnosti budou dále vyhodnoceny po ekonomické, ekologické a provozní stránce. Nejprve provedu kontrolu bilance spotřeby plynu kogenerační jednotkou.

Dále bude pomocí programu PVGIS navržena fotovoltaická elektrárna a to tak, aby svou roční výrobou odpovídala výrobě elektřiny z nahrazované kogenerační jednotky. Pro takovou elektrárnu bude zapotřebí stanovit a následně i najít potřebnou plochu a zjistit její ekonomickou návratnost.

Ve druhé části se budu zabývat možnostmi instalace ORC, které bude vždy navrženo tak, aby pokrylo výrobu elektřiny alespoň stejně jako kogenerační jednotka. Celkem budou vyhodnoceny tři varianty, přičemž nejprve bude zachován elektrický výkon kogenerační jednotky, avšak s rozdílem, že ORC není regulováno z hlediska maximálního počtu hodin v provozu ročně. U další varianty bude cílem využít ORC na jeho maximální výkon a jako poslední bude taková střední cesta mezi těmito dvěma. Pro každou z variant zpracuji množství vyprodukovaného oxidu uhličitého a úspory na emisních povolenkách a dále se podívám na celkovou roční kalkulaci provozu pro jednotlivé varianty.

3.1 Konkrétní parametry kogenerační jednotky a ověření spotřeby zemního plynu

Na obrázcích (Obrázek 16 a Obrázek 17) níže jsou zobrazeny technické parametry kogenerační jednotky. Tyto parametry poslouží jako výchozí pro další výpočty.

Jmenovitý elektrický výkon	kW	999
Jmenovitý tepelný výkon	kW	1018
Příkon v palivu	kW	2275
Spotřeba paliva	m ³ /h	240,9
Elektrická účinnost	%	43,9
Tepelná účinnost s LT	%	47,7
Tepelná účinnost bez LT	%	44,7
Celková účinnost s LT	%	91,6

Obrázek 16 - technický list KJ [10]

Energetická bilance					Výkonové parametry dodávané KJ
Zatížení motoru	%	100	75	50	100
ISO výkon motoru	kW	1026	772	520	1026
Jmenovitý elektrický výkon	kW	999	749	501	999
Tepelný výkon chladicího okruhu motoru	kW	476	346	243	476
Tepelný výkon ze spalin (120 °C)	kW	482	400	308	482
Tepelný výkon ze spalin (80 °C)	kW	60	-	-	60
Tepelný výkon odebraný z chlazení plnicí směsi HT	kW	-	-	-	-
Tepelný výkon odebraný z chlazení plnicí směsi LT	kW	67	45	30	67
Tepelný výkon celkem	kW	1018	746	551	1018
Radiační tepelný tok z motoru	kW	61	-	-	61
Příkon v palivu	kW	2275	1738	1228	2275
Spotřeba paliva 1)	m ³ /h	240,9	184,0	250,2	240,9
Spotřeba spalovacího vzduchu	kg/h	4920	3684	2533	4920
Množství výfukových plynů	kg/h	5088	3811	2623	5088
Teplota výfukových plynů za turbodmychadlem	°C	429	461	499	429
Elektrická účinnost 1)	%	43,9	43,1	40,8	43,9
Tepelná účinnost	%	44,7	42,9	44,9	44,7
Celková účinnost bez LT	%	88,6	86,0	85,7	88,6

1) Hodnoty jsou uvedeny dle ISO 3046

Obrázek 17 - technický list KJ [10]

H – výhřevnost zemního plynu [10]; s – spotřeba paliva

$$H = 34,51 \text{ MJ/m}^3$$

$$s = 240,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$1\text{kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$34,1\text{MJ} = 9,47 \text{ kWh}$$

$$H = 9,47 \text{ kWh/m}^3$$

Tepelná energie uvolněná spalováním plynu za 1 hodinu:

$$E_{t1h} = s \cdot H = 240,9 \cdot 9,47 = 2\,281 \text{ kWh}$$

Přepočítání na množství tepla odeslaného do soustavy:

η_{KJt} – tepelná účinnost KJ; E_{t1h} – tepelná energie za jednu hodinu; E – energie; P_{tKJ} – tepelný výkon KJ

$$\eta_{KJt} = 44,7 \%$$

$$E = E_{t1h} \cdot \eta_{KJt} = 2\,281 \cdot 0,447 = 1,02 \text{ MWh}$$

$$P_{tKJ} = 1020 \text{ kW}$$

Ověrovací výpočet sdělené hodnoty výhřevnosti plynu a účinnosti kogenerační jednotky se ukázal jako správný a odpovídá sděleným parametrům kogenerační jednotky.

Další z poskytnutých údajů uvádí, že elektrický výkon kogenerační jednotky P_{eKJ} činí 999 kW a kogenerační jednotka smí být v provozu pouze 4400 hodin ročně při plném výkonu. Toto omezení je nařízeno z ekologických důvodů. V praxi pak provoz vypadá tak, že část roku je kogenerační jednotka v provozu nepřetržitě na plný výkon a zbytek roku je odstavena.

E_{KJe} – ročně dodaná elektřina z KJ

$$E_{KJe} = P_{KJe} \cdot t = 999 \cdot 4400 = 4\,395\,600 \text{ kWh}$$

Za oněch 4400 hodin se pomocí kogenerační jednotky vyrobí 4 395 600 kWh elektřiny. Na tuto minimální hodnotu je tedy nutno dimenzovat fotovoltaickou elektrárnu.

3.2 Návrh fotovoltaické elektrárny

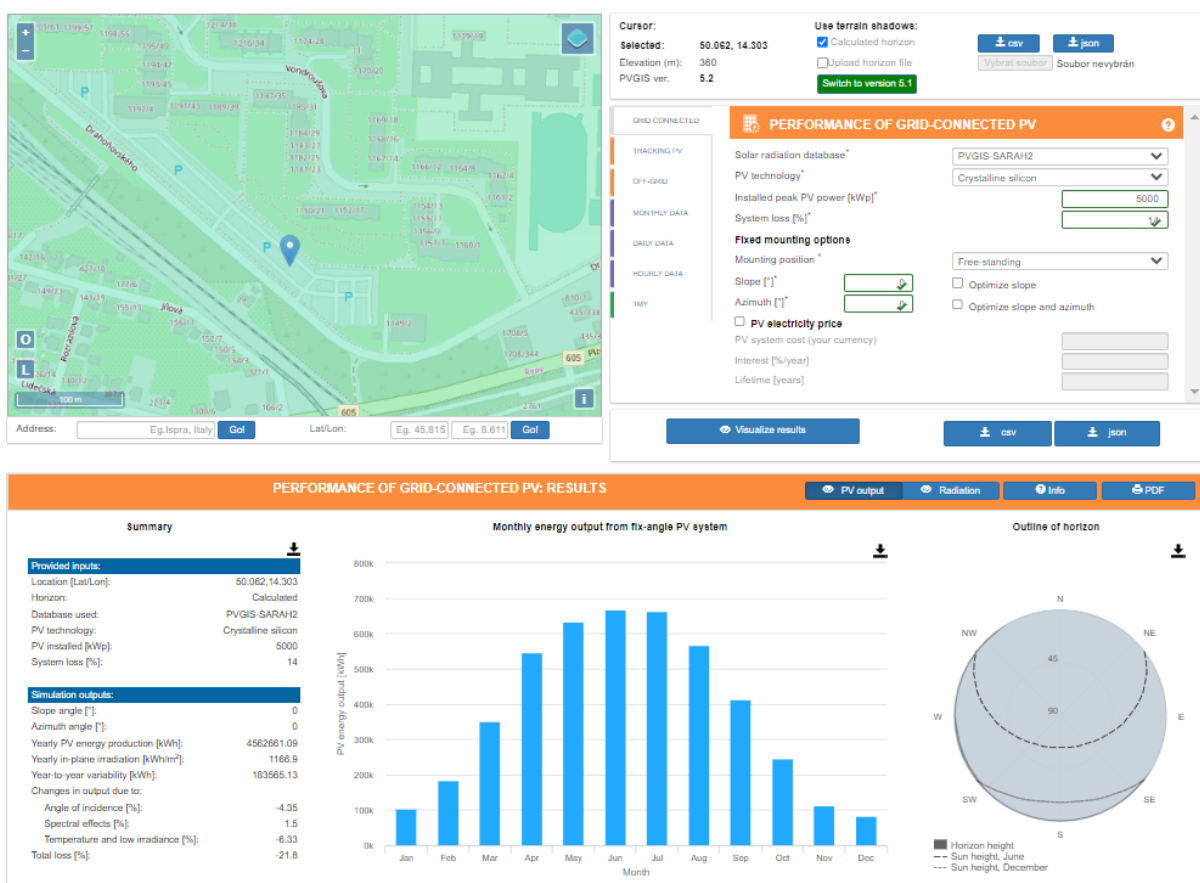
3.2.1 Základní návrh ve výpočetním programu

Základní návrh fotovoltaické elektrárny provedu pomocí volně dostupného výpočetního programu PVGIS, do které jsem zadal polohu navrhované elektrárny, která se bude rozprostírat poblíž stávající teplárny, a program sám umí optimalizovat úhel naklonění fotovoltaických panelů a spočítat roční výrobu elektřiny pro zadaný instalovaný výkon. Panely FVE budou navrhovat tak, že budou umístěny na střechách parkovišť (Obrázek 18).



Obrázek 18- FVE na střeše parkoviště [23]

Jejich plocha nebude pokrývat 100 % později navržené plochy. Proto budu při dalších výpočtech uvažovat pro každý panel plochu o 20 % větší, než by skutečně byla, a dále k ploše ještě přidám nějakou plochu do rezervy. V praxi panely na střechách parkovišť bývají mírně nakloněny zrcadlově k sobě, já ve svém návrhu budu pro jednoduchost uvažovat vodorovnou polohu. Vliv mírného naklonění by byl totiž pouze malý. Výhodou takové instalace je především úspora místa oproti běžnému umístění panelů, u nichž bych musel jinak řešit, že by si vzájemně stínily, a zároveň by takto bylo obyvatelům sídliště parkovat ve stínu. Nevýhodou jsou ovšem menší dodávky elektřiny přes zimu, než by tomu bylo v klasicky instalovaných panelů.



Obrázek 19 - Návrh FVE v programu PVGIS [14]

Fotovoltaiku jsem se rozhodl dimenzovat na výkon $P_{FVEi} = 5\,000\text{ kWp}$. Při tomto instalovaném výkonu se ročně vyrobí 4 562 661 kWh elektrické energie, což odpovídá roční výrobě z kogenerační jednotky. V červnu se vyrobí nejvíce energie a sice 667 MWh. Naopak nejmenší měsíční výroba bude a prosinci, kdy je nejméně hodin světla v roce, a vyrobí se pouze 82 MWh.

3.2.2 Výpočet a řešení potřebné plochy

Pro výpočet výroby elektřiny z fotovoltaiky volím panely *JAM72S20 460W_p, mono* z monokrystalického křemíku. Pro tento panel uvádí výrobce výkon $P_p = 460W_p$. [15]

N – počet FV panelů

$$N = P_{FVEi} : P_p = 5\,000\,000 : 460 = 10\,870$$

Pro výkon 5 000 kWp bude tedy potřeba 10 870 takovýchto panelů.

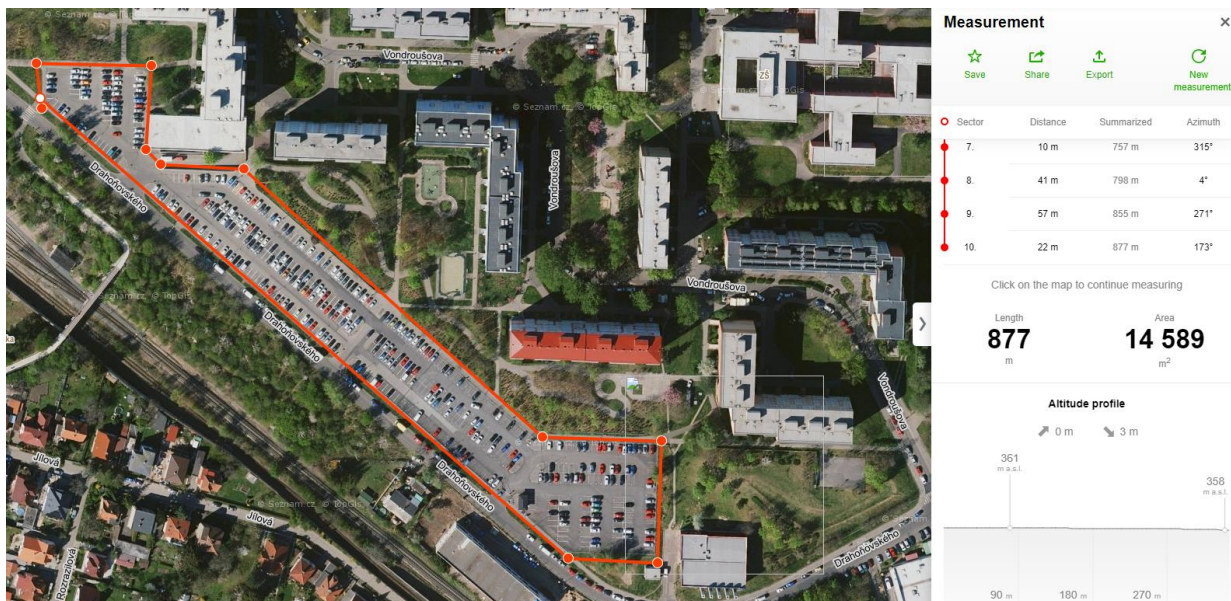
l_p – délka fotovoltaického panelu; $š_p$ – šířka fotovoltaického panelu

$$S_p = l_p \cdot š_p = 2,112 \cdot 1,052 = 2,22m^2$$

Panely musí být nějakým způsobem uchyceny např. v nějakém rámu. Dále také plocha parkovišť nebude moci být na panely využita úplně celá. Pro tyto potřeby budu uvažovat plochu panelu o 20 % větší, tedy $S_p = 2,7 m^2$

Celková potřebná plocha pro FVE:

$$S = N \cdot S_p = 10\,870 \cdot 2,7 = 29\,349 m^2$$



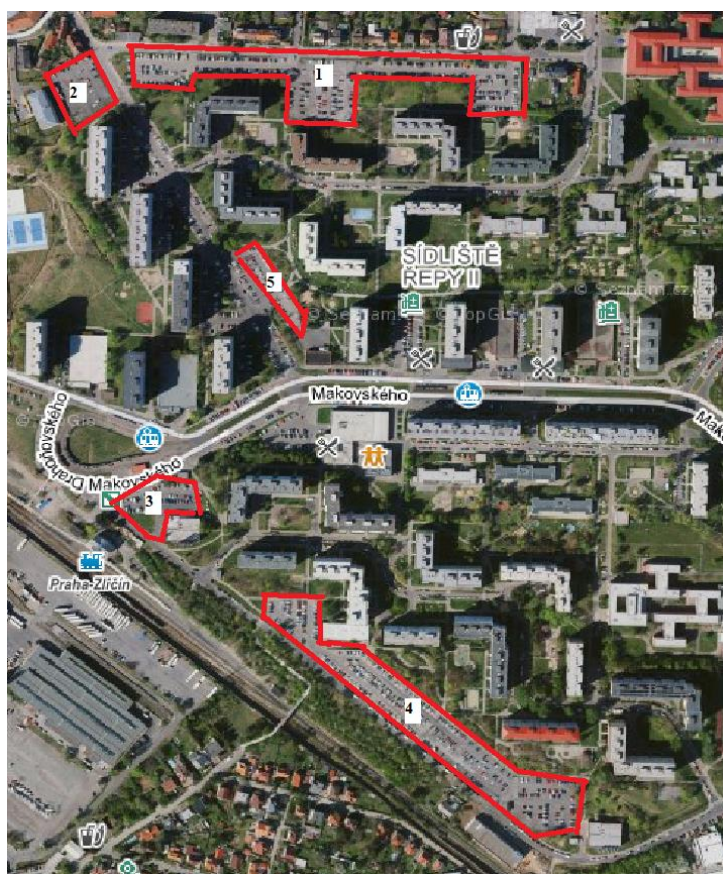
Obrázek 20 - ukázka měření plochy [16]

Tato potřebná plocha (Obrázek 21 a Tabulka 5) by mohla být sestavena z 5 parkovišť, která by byla zastřešena. Na obrázku (Obrázek 20) výše je naznačen postup určování rozlohy. Jedná se o výstřižek z aplikace mapy.cz. Každá z dílčích ploch se nachází ve vzdálenosti do jednoho

kilometru od řešené kotelny, tedy v poměrně blízkém okruhu Celková plocha činí přibližně 35 400 m². Tato plocha je o něco větší než plocha nutná, což je ovšem záměr, protože navržená plocha by nemohla být využita na 100 % V tabulce (Tabulka 5) níže jsou zaznamenány všechny naměřené plochy. [16]

Tabulka 5- Dílčí plochy FVE

místo	plocha [m2]
1	14 589
2	2 600
3	2 167
4	13 636
5	2 400

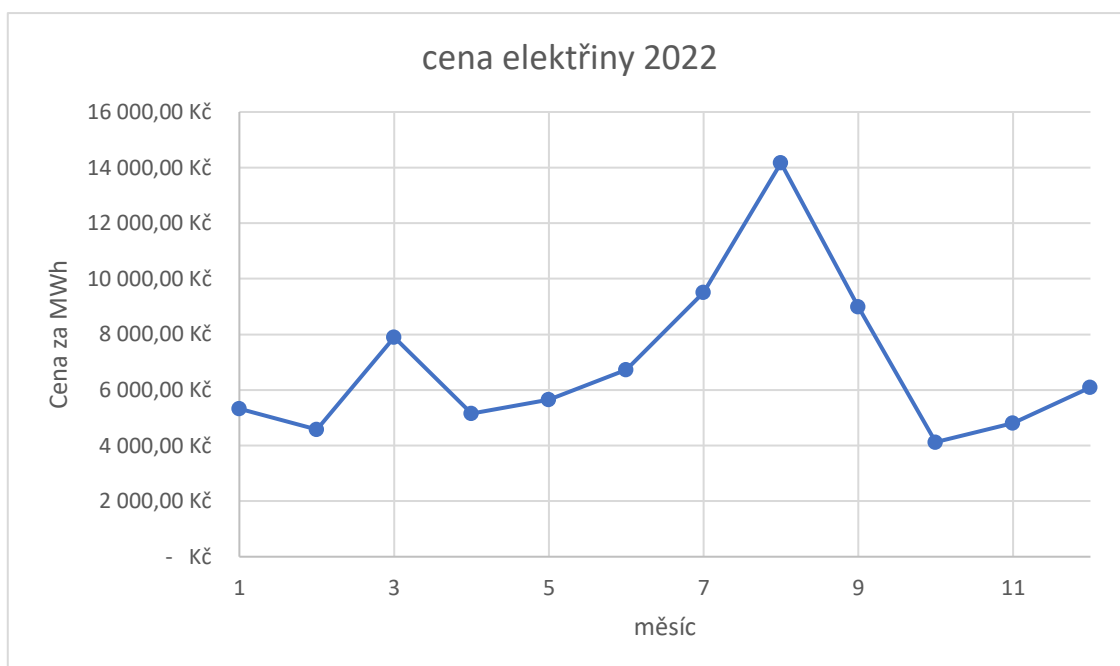


Obrázek 21 - Mapa využití plochy pro FVE [16]

3.2.3 Ekonomické zhodnocení FVE

Zisk: Otázka zisku z prodeje elektřiny je v tomto případě velmi obtížná. V roce 2022 se ceny elektřiny vyvíjely naprosto odlišně od běžných let. Obvykle je cena v létě nižší kvůli zvýšené nabídce na trhu z fotovoltaických elektráren. Zároveň kvůli současné ekonomické situaci je na

trhu menší poptávka, protože lidé a firmy mají tendenci šetřit. Je však otázka, jestli je ceny elektřiny vrátí na ceny před válkou na Ukrajině. Vzhledem k neobvyklosti roku 2022 (Obrázek 22) využijí pro výpočet ceny z roku 2021 od května do prosince a začátku roku 2023 od ledna do dubna v každém jednotlivém měsíci (Tabulka 6). [17]



Obrázek 22 - vývoj cen elektřiny v roce 2022 [17]

Tabulka 6 - uvažovaný vývoj cen elektřiny [17]

měsíc	cena za MWh
leden	3 225,00 Kč
únor	3 300,00 Kč
březen	2 623,00 Kč
duben	2 477,00 Kč
květen	1 834,00 Kč
červen	2 313,00 Kč
červenec	2 640,00 Kč
srpen	2 617,00 Kč
září	3 984,00 Kč
říjen	4 338,00 Kč
listopad	5 541,00 Kč
prosinec	6 995,00 Kč
průměr	3 490,58 Kč

Průměrná měsíční cena elektřiny:

$$C_{ep} = 3\,491 \text{ Kč}/MWh$$

Investiční náklady:

Na straně investičních nákladů bude vystupovat cena za pořízení panelů a cena za jejich instalaci. Cena panelu je uvedena prodejcem [15] a cena instalace panelu je 5000 Kč/m² [18]

C_p – cena FV panelu; C_{mp} – cena instalaci za 1m² panelu

$$C_p = 4450 \text{ Kč}; N = 10\,870; C_{mp} = 5000 \text{ Kč/m}^2$$

Fotovoltaické panely:

N_{FVi} – cena za instalaci FVE

$$\begin{aligned} N_{FVEi} &= C_p \cdot N + N \cdot C_{mp} \cdot l_p \cdot \check{s}_p = 4\,450 \cdot 10\,870 + 10\,870 \cdot 5000 \cdot 1,052 \cdot 2,112 \\ &= 40\,628\,500 + 101\,426\,266 = 196\,127\,634 \text{ Kč} \end{aligned}$$

Roční provozní náklady

Do položky ročních provozních nákladů jsou zahrnuty výdaje spojené s: revizní kontrolou a zprávou, údržbou fotovoltaických modulů, kontrolou elektroinstalace, servisem střídačů a elektrických komponent, souhrnnou zprávou o stavu a vzdáleným monitoringem [6], [19]

N_{FVEpm} – roční náklady provoz na 1MW instalovaného výkonu FVE

N_{FVEp} – roční provozní náklady FVE

$$N_{FVEpm} = 10\,000 \frac{\text{EUR}}{\text{MW} \cdot \text{rok}} = 10\,000 \cdot 23,50 \frac{\text{Kč}}{\text{MW} \cdot \text{rok}} = 235\,000 \frac{\text{Kč}}{\text{MW} \cdot \text{rok}}$$

$$N_{FVEp} = N_{FVEpm} \cdot P_{FVEi} = 235\,000 \cdot 5 = 1\,175\,000 \text{ Kč}$$

Návratnost investice

Na stránkách prodejce panelu je uvedeno, že roční degradace panelu d je 0,5 %

Rok 1:

E_{FVEe} – elektrická energie z FVE vyrobená za rok; Z_1 – zisk v roce 1; B – bilance

$$E_{FVEe} = 4\,561\,661 \text{ kWh}$$

Roční zisk za elektřinu Z spočítám tak, že v každém měsíci spolu vynásobím aktuální cenu elektřiny a vyrobené množství. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny níže (Tabulka 7)

Tabulka 7 - výpočet ročního zisku z elektřiny

měsíc	průměrná cena za MWh	výroba [MWh]	zisk
leden	3 225 Kč	103	332 175 Kč
únor	3 300 Kč	183	603 900 Kč
březen	2 623 Kč	352	923 296 Kč
duben	2 477 Kč	545	1 349 965 Kč
květen	1 834 Kč	633	1 160 922 Kč
červen	2 313 Kč	667	1 542 771 Kč
červenec	2 640 Kč	663	1 750 320 Kč
srpen	2 617 Kč	566	1 481 222 Kč
září	3 984 Kč	412	1 641 408 Kč
říjen	4 338 Kč	244	1 058 472 Kč
listopad	5 541 Kč	113	626 133 Kč
prosinec	6 995 Kč	82	573 590 Kč
			13 044 174 Kč

$$Z = 13\,044\,174 \text{ Kč}$$

$$B_0 = -N_{FVEi} = -196\,127\,634 \text{ Kč}$$

$$B_1 = B_0 + Z_z - N_{FVEp} = -196\,127\,634 + 13\,044\,174 - 1\,175\,000 = -184\,258\,460 \text{ Kč}$$

Pro výpočty v dalších letech je využit analogický postup, kde pro roční výrobu a zisk jsou hodnoty zmenšeny o degradaci, tedy 0,5 %. [15]

Rok n:

$$E_{FVEe-n} = E_{FVEe} \cdot (1 - d)^{n-1}$$

$$Z_n = Z \cdot (1 - d)^{n-1}$$

$$B_n = B_{n-1} + Z_n - N_{FVEp}$$

Následující tabulka (Tabulka 8) vyobrazuje ekonomickou bilanci řešeného projektu po dobu 20 let. Tento výpočet je zjednodušený a neobsahuje v sobě vývoj cen, inflaci a časovou hodnotu peněz.

Tabulka 8 - 20 leté ekonomické vyhodnocení FVE

Rok	Výkon	Výroba [kWh]	Zisk	Provozní náklady	Bilance
1	100,00%	4 405 333	13 044 174 Kč	1 175 000 Kč	- 184 258 460 Kč
2	99,50%	4 383 306	12 978 953 Kč	1 175 000 Kč	- 172 454 507 Kč
3	99,00%	4 361 390	12 914 058 Kč	1 175 000 Kč	- 160 650 554 Kč
4	98,51%	4 339 583	12 849 488 Kč	1 175 000 Kč	- 148 911 495 Kč
5	98,01%	4 317 885	12 785 241 Kč	1 175 000 Kč	- 137 237 007 Kč
6	97,52%	4 296 296	12 721 314 Kč	1 175 000 Kč	- 125 626 767 Kč
7	97,04%	4 274 814	12 657 708 Kč	1 175 000 Kč	- 114 080 452 Kč
8	96,55%	4 253 440	12 594 419 Kč	1 175 000 Kč	- 102 597 744 Kč
9	96,07%	4 232 173	12 531 447 Kč	1 175 000 Kč	- 91 178 325 Kč
10	95,59%	4 211 012	12 468 790 Kč	1 175 000 Kč	- 79 821 878 Kč
11	95,11%	4 189 957	12 406 446 Kč	1 175 000 Kč	- 68 528 088 Kč
12	94,64%	4 169 007	12 344 414 Kč	1 175 000 Kč	- 57 296 642 Kč
13	94,16%	4 148 162	12 282 692 Kč	1 175 000 Kč	- 46 127 228 Kč
14	93,69%	4 127 421	12 221 278 Kč	1 175 000 Kč	- 35 019 536 Kč
15	93,22%	4 106 784	12 160 172 Kč	1 175 000 Kč	- 23 973 258 Kč
16	92,76%	4 086 250	12 099 371 Kč	1 175 000 Kč	- 12 988 086 Kč
17	92,29%	4 065 819	12 038 874 Kč	1 175 000 Kč	- 2 063 715 Kč
18	91,83%	4 045 490	11 978 680 Kč	1 175 000 Kč	8 800 159 Kč
19	91,37%	4 025 262	11 918 786 Kč	1 175 000 Kč	19 603 839 Kč
20	90,92%	4 005 136	11 859 192 Kč	1 175 000 Kč	30 347 625 Kč

Z tabulky je patrné, že tato investice by se vrátila za 18 let. Tento výsledek je stanoven na základě výše uvedených měsíčních cen elektřiny. Tyto ceny ovšem nejsou ničím garantovány a v praxi mohou být podstatně vyšší ale i nižší. Do budoucnosti ale nikdo nevidí, a tak si musíme vystačit s tímto předpokladem. Dalším faktorem je pak nezahrnutí nákladů na stavbu střech nad vybraná parkoviště a s tím i případný odkup parkovišť nebo jejich pronájem. Tento faktor by v případě skutečné realizace projektu do návratnosti nemalým způsobem promítl. Z tohoto důvodu není zcela jisté, jestli by se projekt po ekonomické stránce vyplatil. Dále je nutné počítat s komplikovanou realizací projektu. Potřebná plocha je totiž poměrně velká a na obydlém sídlišti by se v praxi hledala dosti obtížně, nemluvě o komplikacích spojených s legislativou.

3.3 ORC

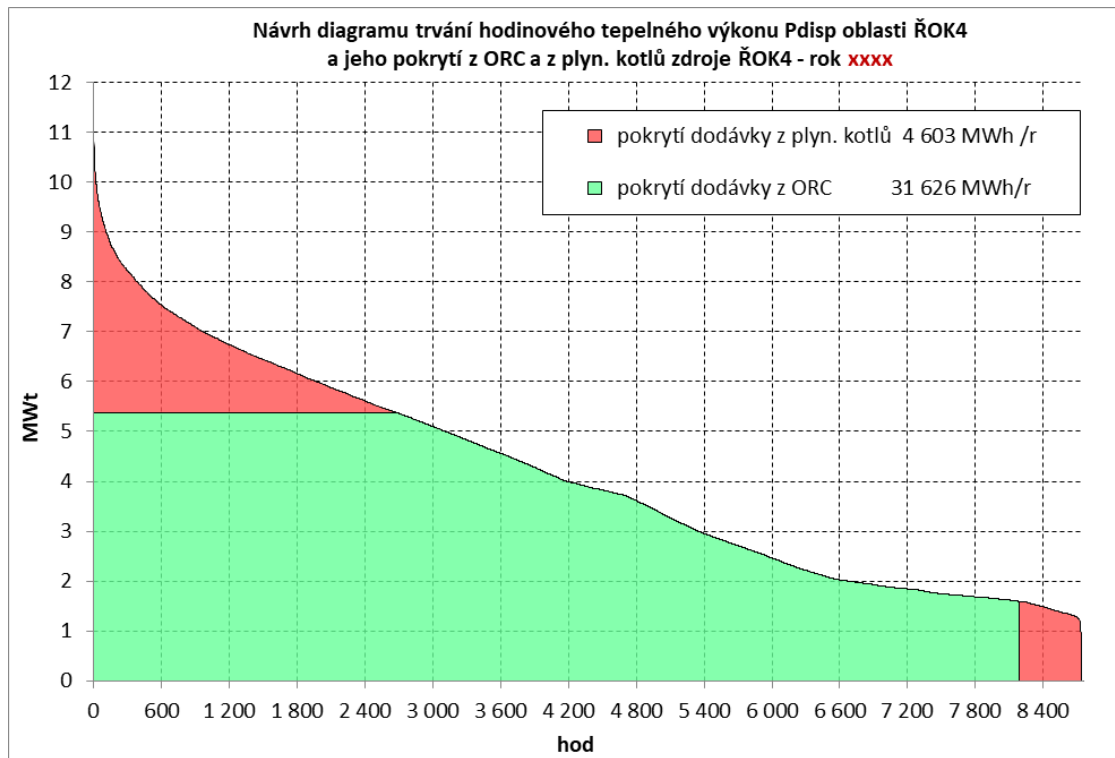
3.3.1 Vysoký výkon – ORC 1

Pro tuto variantu se inspiroji na teplárně s ORC v Třebíči. Zde jsou výkony 5,38 MWt a 1MWe [7]

$$\eta_{ORCt} = 81,5 \% ; \eta_{ORCe} = 15,5 \%$$

Myšlenka za touto variantou je taková, že elektrický výkon je stejný jako elektrický výkon nahrazované kogenerační jednotky. Oproti kogenerační jednotce nepodléhá systém ORC

žádnému omezení z hlediska dovoleného času provozu, a tak vyprodukuje elektřiny podstatně více, což by mohlo pokrýt náklady na počáteční investici.



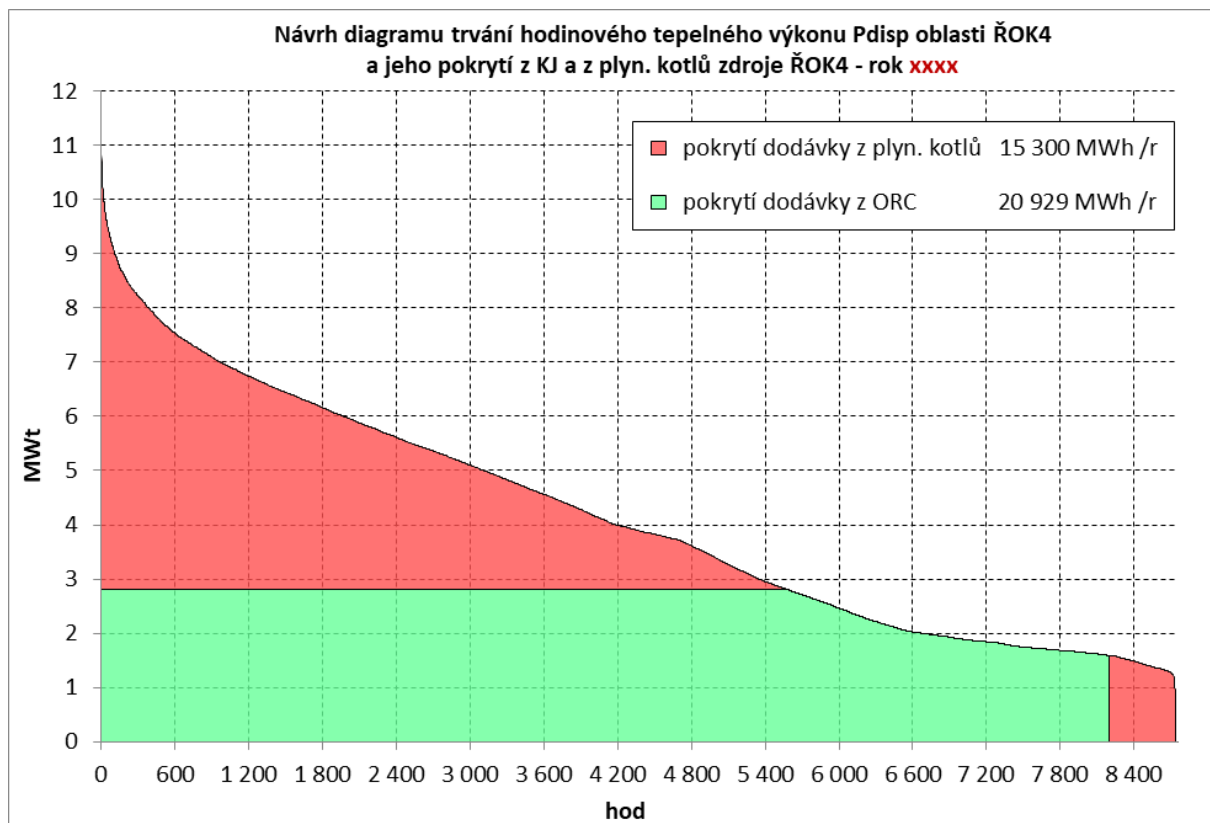
Obrázek 23 - návrh ORC 1

3.3.2 Varianta se středním výkonem – ORC 2

Pro další z variant použijí inspiraci v teplárně s ORC Trhové Sviny, která má tepelný výkon 2,8 MWt a elektrický výkon 0,6 MWe [8]

$$\eta_{ORCt} = 80\%; \eta_{ORCe} = 17 \%$$

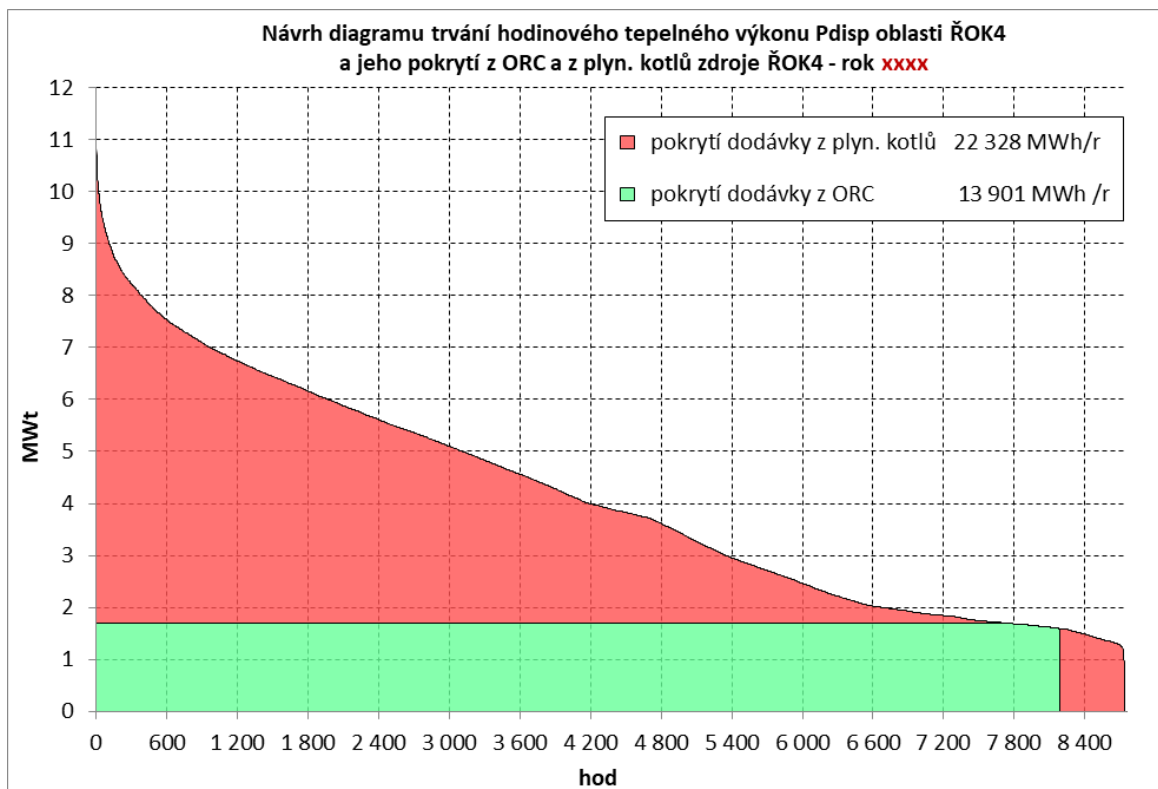
Tato varianta je střední cestou, kdy výkon ORC bude moci být využit na velkou část své kapacity (Obrázek 24).



Obrázek 24- návrh ORC 2

3.3.3 Nejmenší výkon – ORC 3

Jako poslední variantu volím tepelný výkon 1,7 MWt a elektrický výkon 0,36 MWe. Tyto parametry zajistí, že ORC jednotka bude využita téměř na maximum svých možností (Obrázek 25) a mohla by tedy být ekonomicky nejvýhodnější. Tepelná a elektrická účinnost tohoto modelového případu je inspirována účinností reálného ORC v Trhových Svinech.



Obrázek 25- návrh ORC 3

Tato varianta má tu výhodu, že při provozu bude využit celý její výkon, a proto vyrobí v poměru k instalovanému výkonu nejvíce elektřiny i tepla.

3.3.4 Výpočet produkovaného tepla a elektřiny

Množství vyrobeného tepla pro každou z variant bylo odečteno z diagramu trvání výkonu. Celkové vyrobené teplo je vždy plocha pod křivkou. V případě kombinace ORC s plynovými kotli je v diagramu teplo z ORC vyznačeno zeleně a teplo z kotlů červeně. Množství vyrobeného tepla pro ORC i kotle bylo provedeno v programu MS excel. Díky znalosti účinností je následně možné dopočítat množství vyrobené elektřiny za rok. Výpočet budu demonstrovat na variantě ORC 2.

Celkové množství vyrobené elektřiny zjistím s použitím excelu a tabulky sloužící pro vznik diagramu trvání tepla. V této tabulce (Tabulka 9) je pro každou z hodin v roce vypočteno, na jakou část svého maximálního výkonu je ORC při výrobě tepla využito a následně díky znalosti maximálního elektrického výkonu spočteno, jaký elektrický výkon byl v dané hodině použit.

[10]

Tabulka 9 - výřez z diagramu trvání tepla [9]

	celkový hodinový výkon oblasti ŘOK4	hodinový výkon P _{disp} oblasti ŘOK4 pokrytý z ORC	hodinový výkon oblasti ŘOK4 pokrytý z kotlů zdroje ŘOK4	elektrický výkon ORC
(hod)	(MWt)	(MWt)	(MWt)	(Mwe)
6052	2,42	2,42	0	0,51798

P_{ORCe} – elektrický výkon ORC; P_{ORCt} – tepelný výkon ORC; P_{ORCeh} - okamžitý hodinový elektrický výkon ORC; P_{ORCth} - okamžitý hodinový tepelný výkon ORC

$$\frac{P_{ORCeh}}{P_{ORCe}} = \frac{P_{ORCth}}{P_{ORCt}}$$

$$P_{ORCeh} = P_{ORCe} \cdot \frac{P_{ORCth}}{P_{ORCt}} = 0,6 \cdot \frac{2,42}{2,8} = 0,518 \text{ MW}$$

Po sečtení všech těchto hodinových hodnot byla zjištěna výroba $E_{ORCe} = 4485 \text{ MWh}$

3.3.5 Souhrn variant

Tabulka 10 - Souhrn návrhů ORC

Varianta	Tepelný výkon [MWt]	Elektrický výkon [MWe]	Roční výroba tepla [MWh]	Roční výroba elektřiny [MWh]
1	5,38	1	31 626	5 878
2	2,8	0,6	20 929	4 485
3	1,7	0,36	13 901	2 944

3.4 Ekologická bilance

V řešení ekologické bilance budu postupovat tak, že si nejprve určím množství tepla vyrobeného z plynu. Za tímto účelem bude nutné si úlohu rozdělit do 3 různých větví. Nejprve budu uvažovat současné provedení, kdy z plynu dochází k výrobě tepla i elektřiny v KJ a tepla v kotlích. Bude tedy třeba si úlohu rozdělit na výpočet spotřeby KJ a spotřeby kotlů. Pro variantu s FVE bude veškeré teplo vyráběno plynovými kotli. A při řešení variant s ORC je potřeba rozlišit původ tepla. Ta část tepla, která je vyrobena z ORC se nepočítá do ekologické bilance, protože biomasa je brána jako bezemisní palivo, a tak bude do tohoto výpočtu zahrnuta pouze ta část tepla, která se vyrobí v kotlích z plynu. Pro tuto bilanci budu vycházet

z informace na oficiálních stránkách Ministerstva průmyslu a obchodu, kde je uvedeno, že na 1MWh výhřevnosti zemního plynu je vyprodukováno 0,2t oxidu uhličitého. [20]

U – produkce oxidu uhličitého ze spalování zemního plynu

$$U = 0,2t/MWh$$

3.4.1 Výpočet účinnosti plynových kotlů

Účinnost plynových kotlů bude stanovena ze znalosti celkového množství vyrobeného tepla v plynových kotlích a příkonu kogenerační jednotky.

$$E_{KJt} = 4\,479\, MWh$$

$$E_{KJ0} = \frac{E_{KJt}}{\eta_{KJt}} = \frac{4\,479}{0,447} = 10\,020\, MWh$$

Množství plynu pro kogenerační jednotku:

H – výhřevnost plynu; V_{KJ} – objem plynu pro KJ; η_k – účinnost kotle

E_k – energie přeměněná v kotli; E_{k0} – energie v palivu kotle;

V_{celk} – roční objem spotřebovaného plynu; V_k – objem plynu pro kotle;

$$H = 9,47\, kWh/m^3$$

$$V_{KJ} = E_{KJ0} : H = 10\,020\,000 : 9,47 = 1\,058\,078\, m^3$$

$$V_{celk} = 4\,595\,180\, m^3$$

$$V_k = V_{celk} - V_{KJ} = 4\,595\,180 - 1\,058\,078 = 3\,537\,102\, m^3$$

$$E_{k0} = V_k \cdot H = 3\,537\,102 \cdot 9,47 = 33\,496\,356\, kWh = 33\,496\, MWh$$

$$E_k = 31\,749\, MWh$$

$$\eta_k = \frac{E_k}{E_{k0}} = \frac{31\,749}{33\,496} = 94,7\, \%$$

3.4.2 Současné provedení – 4 plynové kotle a kogenerační jednotka

Kogenerační jednotka dosahuje tepelné účinnosti $\eta_{KJt} = 44,7 \%$ a elektrické účinnosti $\eta_{KJe} = 43,9\%$. Vzhledem k účinnostem, které nejsou a ani nemohou být 100 %, je nutno nejprve zjistit, kolik tepla je nutno vyprodukovat spalováním plynu.

m – hmotnost; E_{KJt} – teplo z KJ; E_{KJ0} – teplo potřebné z paliva KJ

$$E_k = 31\,749 \text{ MWh}$$

$$E_{k0} = \frac{E_t}{\eta_k} = \frac{31\,749}{0,95} = 33\,420 \text{ MWh}$$

$$m_1 = U \cdot E_{k0} = 0,2 \cdot 33\,420 = 6684 \text{ t}$$

$$E_{KJt} = 4\,479 \text{ MWh}$$

$$E_{KJ0} = \frac{E_{KJt}}{\eta_{KJt}} = \frac{4\,479}{0,447} = 10\,020 \text{ MWh}$$

$$m_2 = U \cdot E_{KJ0} = 0,2 \cdot 10\,020 = 2004 \text{ t}$$

$$m = m_1 + m_2 = 6\,684 + 2\,004 = 8\,688 \text{ t}$$

Při současném provedení se tedy za rok do atmosféry uvolní celkem 8688 t oxidu uhličitého, přičemž v tomto čísle nejsou zahrnuty úniky dalších skleníkových plynů, ke kterým dojde při těžbě a transportu zemního plynu. Celkový negativní vliv na planetu by tedy byl ještě o něco větší a tím pádem závažnější. V tabulce níže (Tabulka 11) jsou zaneseny výsledky pro všechny ostatní řešené varianty. Oproti předvedenému výsledku budou však jednodušší, protože nebudou obsahovat část výpočtu s kogenerační jednotkou.

3.4.3 ORC

Výroba elektřiny a tepla pomocí technologie organického Rankinova cyklu bude probíhat spalováním biomasy a následným doplněním případných rozdílů plynovými kotli. Biomasa je považovaná ze bezemisní zdroj energie, kdy oxid uhličitý, který je jejím spalováním vyprodukován, byl při její produkci spotřebován. V této části tedy budu počítat pouze plyn

spotřebovaný pro doplňkovou výrobu tepla. Dle energetického regulačního úřadu je cena emisní povolenky 90 EUR za vyprodukovanou tunu CO₂. Stejně jako tomu bylo u výpočtu dříve, počítám s kurzem 1 EUR = 23,50 Kč. Celkovou cenu emisních povolenek jsem tedy získal jednoduchým vynásobením. [6]

Tabulka 11- výpočet ekologie ORC

varianta	Teplo z kotlů [MWh]	Teplo z plynu [MWh]	CO ₂ [t]	Cena emisních povolenek
původní	viz. rozepsaný výpočet výše		8688	18 375 120 Kč
fotovoltaika	36 229	38136	7627	16 131 439 Kč
ORC 1	4 603	4845	969	2 049 546 Kč
ORC 2	15 300	16105	3221	6 812 526 Kč
ORC 3	22 328	23503	4701	9 941 836 Kč

3.5 Ekonomické hodnocení ORC

Jako palivo k jednotce ORC jsem se rozhodl využít dřevěnou štěpku.

$C_{dš}$ – cena dřevní štěpky

$$C_{dš} = 200 \frac{Kč}{GJ} = \frac{0,72Kč}{kWh} = 720 \text{ Kč}/MWh$$

Pro ekonomickou analýzu bude uvažován dřívější stav kotelny z doby, kdy ještě nebyla instalována kogenerační jednotka. Budu tedy uvažovat, že veškeré vyprodukované teplo pochází z plynových kotlů. Tento údaj vychází opět ze sečtení poskytnutých hodnot v diagramu trvání výkonu.

E_t – celkové teplo ročně vyrobené v ŘOK4, E_{t0} – energie potřebná v palivu

$$E_t = 36\,229 \text{ MWh}$$

$$E_{t0} = \frac{E_t}{\eta_k} = \frac{36\,229}{0,95} = 38\,136 \text{ MWh}$$

Roční cena plynu je uvedena v následující tabulce níže. Při stanovování ceny plynu (Tabulka 12) jsem postupoval stejným způsobem jako u ceny elektřiny. [17]

Tabulka 12- uvažovaný vývoj cen plynu

měsíc	cena za MWh
leden	1 556,00 Kč
únor	1 309,00 Kč
březen	1 090,00 Kč
duben	1 052,00 Kč
květen	795,00 Kč
červen	914,00 Kč
červenec	1 133,00 Kč
srpen	1 377,00 Kč
září	1 946,00 Kč
říjen	2 747,00 Kč
listopad	2 538,00 Kč
prosinec	3 446,00 Kč
průměr	1 658,58 Kč

Protože v případě dodávek tepla není známo rozložení množství výroby během roku, použijí pouze aritmetický průměr z těchto cen.

C_{pp} – průměrná cena plynu; N_p – náklady na plyn

$$C_{pp} = 1\,659 \text{ Kč/MWh}$$

$$N_p = E_{t0} \cdot C_{pp} = 38\,136 \cdot 1\,659 = 63\,267\,624 \text{ Kč}$$

Náklady na ORC budou vypočítány analogicky, avšak s rozdílem, že ORC má tepelnou účinnost kolem 80 %. Tato vysoká účinnost je ale uvažována až pro přeměnu tepla získaného ze spalování dřevní štěpky. Toto spalování probíhá s účinností 87 % [6]. Pro každou z variant ORC je třeba neopomenout, že se jedná o kombinaci technologie ORC a plynových kotlů. Výsledné náklady na palivo se tím pádem budou skládat ze dvou částí. Dále je u ORC podstatný ten fakt, že kromě příjmů za teplo, které budou ve všech variantách stejné, bude následně na příjmové straně vystupovat cena elektřiny. Uvažovaná cena elektřiny bude opět 3 491 Kč/MWh

$$C_{ep} = 3\,491 \text{ Kč/MWh}$$

Výpočet opět předvedu na variantě ORC2, zbylé řádky tabulky níže jsou spočítány analogicky.

N_c – celkové náklady na palivo; $N_{dš}$ – náklady na dřevní štěpku;

$$\begin{aligned} N_c = N_p + N_{dš} &= \frac{E_k}{\eta_k} \cdot C_{pp} + \frac{E_{ORCt}}{\eta_{ORCt} \cdot \eta_{dš}} \cdot C_{dš} = \frac{15\,300}{0,95} \cdot 1\,659 + \frac{20\,929}{0,80 \cdot 0,87} \cdot 720 \\ &= 48\,369\,321 \text{ Kč} \end{aligned}$$

Tabulka 13- výpočet nákladů na palivo

varianta	tepla z kotlů [MWh]	tepla z plynu [MWh]	cena za plyn	tepla z ORC [MWh]	tepla ze štěpky [MWh]	cena za štěpku	náklady celkem
kotle	36 229	38 136	63 267 275 Kč	0	0	- Kč	63 267 275 Kč
ORC1	4603	4 845	8 038 292 Kč	31 626	45440	32 716 552 Kč	40 754 843 Kč
ORC2	15 300	16 105	26 718 632 Kč	20 929	30070	21 650 690 Kč	48 369 321 Kč
ORC3	22 328	23 503	38 991 739 Kč	13 901	19973	14 380 345 Kč	53 372 084 Kč

Z tabulky (Tabulka 13) je patrné, že při instalaci ORC budu roční náklady na palivo v případě ORC1 přibližně o třetinu menší oproti původnímu stavu s plynovými kotli.

Pro další výpočty ekonomického zhodnocení 3 variant ORC budu vycházet z údaje poskytnutého Ing. Jakubem Maščuchem, Ph.D., že cena na instalaci ORC činí 200 000 – 350 000 Kč/kWe instalovaného výkonu. Pro výpočet zvolím cenu $C_{ORC} = 300\,000\text{ Kč}/kWe$. Roční provozní náklady budou činit 2 % pořizovací ceny [6]. Dále je do nákladů nutno zahrnout náklady na lidskou práci. Počítejme, že bude potřeba 6 zaměstnanců s hrubou měsíční mzdou 40 000 Kč, ke které je nutno přičíst ještě 35 % na pojištění. Výpočet budu demonstrovat opět na variantě ORC2. Předpokládaná životnost ORC zařízení je 20 let. [21]

$$P_{ORCe} = 600kWe; C_{ORC} = 300\,000 \frac{Kč}{kWe}; N_c = 48\,369\,321\text{ Kč}$$

Cena za instalaci:

$$C_i = P_{ORC} \cdot C_{ORC} = 600 \cdot 300\,000 = 180\,000\,000\text{ Kč}$$

Roční provozní náklady:

Roční cena lidské práce:

$$C_l = 6 \cdot 12 \cdot (40\,000 + 0,35 \cdot 40\,000) = 3\,888\,000\text{ Kč}$$

Roční náklady na údržbu a provoz:

$$N_{úp} = 0,02 \cdot C_i = 0,02 \cdot 180\,000\,000 = 3\,600\,000\text{ Kč}$$

Roční zisky za elektřinu:

$$C_{ep} = 3\,491 \frac{Kč}{MWh}; E_{ORCe} = 4\,485\text{ MWh}$$

$$Z = C_{ep} \cdot E_{ORCe} = 3\,491 \cdot 4\,485 = 15\,612\,285\text{ Kč}$$

Zisky za dodávky tepla nebudou ani v jednom z modelů uvažovány, protože budou ve všech případech v součtu stejné. A to nejen při srovnání ORC ale i při srovnání se současným provedením.

3.5.1 Roční vyhodnocení

V tomto výpočtu investiční náklady do celkové bilance zjednodušeně zahrnovat prostým odpisem pro uvažovanou dobu životnosti 20 let.

$C_{\dot{u}p}$ – úspora za emisní povolenky

$$\begin{aligned}
 B &= -\frac{C_i}{20} - C_l - N_{\dot{u}p} - N_c + Z + C_{\dot{u}p} = \\
 &= \frac{180\,000\,000}{20} - 3\,888\,000 - 3\,600\,000 - 48\,369\,221 + 15\,657\,135 \\
 &+ 11\,562\,594 = -37\,637\,592 \text{ Kč}
 \end{aligned}$$

Pro výpočet varianty s kotlí počítám s tím, že na obsluhu budou potřeba pouze 2 lidé a že náklady na údržbu by oproti ORC byly poloviční [6]. Na straně investic a ročních odpisů počítám s nulou, protože kotle jsou již vybudovány a zaplacený. Cena za MWh tepla je stanovena jako stav po roce vydělený roční výrobou tepla $E_t = 36\,229 \text{ MWh}$.

Tabulka 14- Roční ekonomická bilance

varianta	invstice	roční odpis	údržba	osobní náklady
kotle	- Kč	- Kč	1 500 000 Kč	1 296 000 Kč
ORC 1	300 000 000 Kč	15 000 000 Kč	6 000 000 Kč	3 888 000 Kč
ORC 2	180 000 000 Kč	9 000 000 Kč	3 600 000 Kč	3 888 000 Kč
ORC 3	108 000 000 Kč	5 400 000 Kč	2 160 000 Kč	3 888 000 Kč
varianta	zisky z elektřiny	palivo	úspora za emise	Stav po roce
kotle	- Kč	63 267 275 Kč	- Kč	66 063 275 Kč
ORC 1	20 520 098 Kč	40 754 843 Kč	16 325 574 Kč	28 797 171 Kč
ORC 2	15 657 135 Kč	48 369 321 Kč	11 562 594 Kč	37 637 592 Kč
ORC 3	10 277 504 Kč	53 372 084 Kč	8 433 284 Kč	46 109 296 Kč
varianta	cena za MWh tepla se započtením elektřiny	cena za MWh tepla bez započtení elektřiny		
kotle		1 823 Kč		1 823 Kč
ORC 1		795 Kč		1 361 Kč
ORC 2		1 039 Kč		1 471 Kč
ORC 3		1 273 Kč		1 556 Kč

Z tabulky (Tabulka 14) s ekonomickým vyhodnocením je patrné, že i přes vyšší počáteční náklady na investici, bude na provoz během roku nejméně nákladná varianta ORC1.

3.6 Nároky na ORC

3.6.1 Spotřeba paliva

Při výrobě tepla a elektřiny se spotřebovává palivo. Výše (Tabulka 13) byly náklady spočteny na základě cen vztažených na jednotku množství tepla. Dále dopočítám ještě spotřebu paliva pro jednotlivé varianty. Výpočet budu demonstrovat opět na variantě ORC 2. Počítat budu s výhřevností dřevní štěpky $H_{dš} = 10 \text{ MJ/kg}$ [22] a s výhřevností zemního plynu $H = 9,47 \text{ kWh/m}^3$.

Plyn:

$$E_{t0} = 16\,105 \text{ MWh} = 16\,105\,000 \text{ kWh}$$

$$V = \frac{E_{t0}}{H} = \frac{16\,105\,000}{9,47} = 1\,700\,634 \text{ m}^3$$

Dřevní štěpka:

$$E_{t0} = 30\,070 \text{ MWh} = 30\,070\,000 \text{ kWh}; H_{dš} = 10 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 2,77 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$m = \frac{E_{t0}}{H_{dš}} = \frac{30\,070\,000}{2,78} = 10\,816\,547 \text{ kg} = 10\,817 \text{ t}$$

Tabulka 15- spotřeba paliva

varianta	tepla z plynu [MWh]	spotřeba plynu [m ³]	tepla ze štěpky [MWh]	spotřeba štěpky [t]
kotle (+FVE)	38 136	4 027 011	0	0
ORC1	4 845	511 643	45 440	16 345
ORC2	16 105	1 700 661	30 070	10 817
ORC3	23 503	2 481 854	19 973	7 184

3.6.2 Skladovací prostory

Při provozu ORC je potřeba mít v jeho blízkosti skladovací prostory, kde bude zásoba paliva (dřevní štěpky) na alespoň týden provozu. Ty prostory by musely být poměrně velké a na sídlišti tedy obtížně dostupné a taky těžko přístupné pro nákladní automobily.

ORC 1:

výkon ORC – $P_{tORC} = 5,38 \text{ MW}$; čas – $t = 7 \text{ dní} = 168 \text{ h}$;

sypaná hustota dřevní štěpky $\rho = \frac{300 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ [6]; V – objem dřevní štěpky

$$E_{t0} = \frac{P_{tORC} \cdot t}{\eta} = \frac{5,38 \cdot 168}{0,87 \cdot 0,815} = 1\,274\,720 \text{ kWh}$$

$$m = \frac{E_{t0}}{H_{dš}} = \frac{1\,274\,720}{2,78} = 458\,532 \text{ kg}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{458\,532}{300} = 1\,528 \text{ m}^3$$

Potřebnou plochu skladitě S uvažuji pro výšku skladovacích prostor $h = 4 \text{ m}$

$$S = \frac{V}{h} = \frac{1528}{4} = 382 \text{ m}^2$$

Zhruba dvojnásobnou plochu by bylo třeba vyhradit pro příjem a manipulaci se štěpkou na skládce.

Tabulka 16- prostorové nároky ORC

varianta	výkon [MWt]	teplo ze štěpky [kWh]	m[kg]	V[m ³]	S[m ²]
ORC1	5,38	1 274 720	458532	1528	382
ORC2	2,7	651724	234433	781	195
ORC3	1,7	410345	147606	492	123

3.7 Zhodnocení ORC

Z ekonomické bilance (Tabulka 14) vyšlo najevo, že nejmenší roční náklady a náklady na výrobu 1 MWh tepla by byly u varianty ORC 1. Ze stejné tabulky je též patrné, že i v případě instalace varianty ORC s nejmenším výkonem, jsou náklady na 1 MWh tepla menší než v případě původní sestavy ještě bez kogenerační jednotky. Další výhodou využití ORC je snížení množství spotřebovaného plynu (Tabulka 15). Hlavní předností instalace ORC je také úspora za palivo, která ve všech řešených případech činila více než téměř 10 mil Kč ročně. Při srovnání varianty výroby tepla pouze z kotlů s variantou s KJ, je patrné, že kogenerační jednotka vyrábí ve srovnání s kotli pouze malou část tepla. Rozdíl v nákladech na palivo by tedy nebyl velký.

Na stránce úspor oproti současnému řešení by se taktéž promítla cena za emisní povolenky. Ve výpočtu byla uvažována cena 90 EUR, ale z médií se lze dozvědět, že ceny těchto povolenek v budoucnu dost možná porostou, a tak je možné že jejich vliv by byl ve výsledku ještě výraznější. I při současné ceně tvoří emisní povolenky významnou část nákladů a čím více výroby z plynu je nahrazeno, tím větší je úspora.

Mezi nevýhody instalace ORC pak patří prostorová náročnost skladovacích prostor. Při instalaci nejvýkonnější jednotky by bylo nutno vybudovat poměrně velkou skládku. Ani při jiných variantách ORC ale není potřebný prostor zanedbatelnou proměnnou v procesu finálního návrhu (Tabulka 16).

4 Závěr a interpretace výsledků

Cílem práce bylo seznámení se s provedením a současným stavem fungování kotelny ŘOK4 a následné navržení a prověření možností nahrazení instalované kogenerační jednotky pomocí obnovitelných zdrojů energie, po čemž je v současnosti poměrně vysoká poptávka, především s ohledem na nejistou budoucnost. Existuje samozřejmě i více možností přeměny energie z obnovitelných zdrojů, které jsem ve své práci neuvažoval. Například instalace větrné nebo vodní elektrárny nejsou na řešeném místě realizovatelné. Z tohoto důvodu jsem uvažoval pouze využití fotovoltaických panelů a spalování dřevní štěpky, tedy biomasy.

Pro výpočty bylo největší překážkou stanovení budoucí ceny elektřiny a plynu. Loňský rok 2022 byl v ohledu vývoje cen těchto komodit spíše anomálií než něčím reprezentativním, proto jsem odhad cen stanovil na základě druhé poloviny roku 2021 a začátku roku 2023. Tento odhad ale může být více či méně odlišný od budoucí reality, což by se v návrhových výpočtech samozřejmě projevilo.

První řešení byla instalace fotovoltaiky. Po návrhu v programu PVGIS tak, aby roční výroba odpovídala produkci elektřiny z kogenerační jednotky, byla stanovena potřebná plocha, která činí přibližně $30\,000\text{ m}^2$. Na mapě byly předběžně nalezeny potřebné pozemky pro instalaci panelů na střechy parkovišť, která by bylo nejprve potřeba zastřešit. Po následném stanovení nákladů na instalaci fotovoltaiky bylo zjištěno, že návratnost takové investice by činila 18 let, což je doba nepřevyšující životnost fotovoltaické elektrárny. Oproti ORC má instalace fotovoltaické elektrárny tu nevýhodu, že zisky z prodeje elektřiny poslouží převážně na pokrytí vstupních investičních nákladů a z toho důvodu s nimi ani nebylo dále počítáno. Přestože by si na sebe fotovoltaika podle uvedených výpočtů vydělala, je třeba neopomenout, že do stanovení návratnosti nebyly zahrnuty náklady na zastřešení a pronájem plochy parkovišť, což je položka, která by mohla úplně změnit výsledek. Možným řešením této problematiky by mohla být například dotace od Evropské unie. Problémem řešení náhrady kogenerační jednotky pomocí fotovoltaiky jsou tedy především velké nároky na plochu a realizace takového projektu by byla velmi komplikovaná.

Druhým řešením, které se nabízelo, byla instalace ORC. Tato možnost byla rozpracována do tří variant, kdy u první z nich bylo cílem ponechat stejný elektrický výkon, jako je nyní na kogenerační jednotce. Třetí varianta měla zase za cíl využít ORC na maximum možného výkonu, čímž by si na sebe mohla sama vydělat. Prostřední varianta byla jakousi střední cestou mezi dvěma zmíněnými. Po dosazení každé z variant do současného diagramu trvání výkonu

byla stanovena roční výroba tepla a elektřiny. Dále bylo zjištěno, kolik by se tímto řešením dalo ušetřit na nákupu paliva (dřevní štěpky místo zemního plynu) a také o kolik méně oxidu uhličitého by bylo vyprodukováno a kolik peněz by se dalo ušetřit na emisních povolenkách. Na ekonomicky nejoptimističtější variantě by to byla ročně úspora zhruba 16 mil Kč za emisní povolenky a 22 mil Kč za palivo. Jako ekonomicky nejvýhodnější se ukázala varianta ORC s instalovaným výkonem 5,38 MWt a 1 MWe, kdy při započtení zisků z prodeje elektřiny vyšly náklady na výrobu 1 MWh tepla 795 Kč. Z tabulky s ekonomickým zhodnocením (Tabulka 14) je ale patrné, že každá z variant ORC dává z ekonomického hlediska smysl.

Problémem ORC oproti plynovým kotlům je nutnost zajištění skladovacích prostor, které by se uprostřed sídliště budovaly velmi obtížně. Dalším problémem je celková poměrně výrazná prostorová náročnost na jeho vybudování. Na co by tento projekt mohl také narazit je problematika spalování biomasy uprostřed hustě osídlené oblasti. Všechny tyto problémy by se daly vyřešit instalací ORC někde za městem, kde by pro prostorové potřeby byl dostatek místa a nebyl by problém se spalováním poblíž lidských obydlí. V takovémto případě by ale vznikla nutnost vybudování teplovodu, s čímž by mohla vzniknout řada komplikací.

Obě navržené možnosti se tedy zdají být proveditelné. Pro řešení projektu bych se přiklonil spíše k variantě s ORC, a to s ohledem na lepší proveditelnost a také na stále rostoucí tlak na bezemisní výrobu elektřiny a tepla. Je potřeba zmínit, že výpočty byly v některých případech zjednodušeny a pro uvedení řešeného návrhu do praxe by bylo nutno vypracovat podrobnější analýzu jednotlivých návrhů. Tato bakalářská práce ovšem ukázala, že o obou možných řešeních se vyplatí přinejmenším uvažovat a věnovat jim pozornost.

5 Citovaná literatura

- [1] L. O. Jaroslav Kadrnožka, Teplárenství, Sv. %1 z %2ISBN 80-7204-222-X, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001.
- [2] J. Pikola, VUT Brno, 2010. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/30307087.pdf>. [Přístup získán 25 květen 2023].
- [3] J. Budín, „O energetice,“ oenergetice, 21. duben 2015. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/elektrina/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody>. [Přístup získán 19 říjen 2022].
- [4] J. Šanta, ZČU Plzeň, 2019. [Online]. Available: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/38332/1/DP_MICHAL_SANTA_POSOUZENI_VARIANT_NOVEHO_ZDROJE_TEPLA_A_ELEKTRINY.pdf. [Přístup získán 22 říjen 2022].
- [5] ČEZ ENERGO, [Online]. Available: <https://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/vyhody-a-principy-kogenerace>. [Přístup získán 19 říjen 2022].
- [6] prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc, materiály a údaje poskytnuty vedoucím práce.
- [7] J. Kunc, „tzbinfo,“ 30 květen 2005. [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/2537-orc-technologie-v-realizaci-i-lienz-trebic>. [Přístup získán 21 únor 2023].
- [8] M. Bílý, „tzbinfo,“ 26 prosinec 2005. [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/2960-orc-technologie-v-trhovych-svinech>. [Přístup získán 16 duben 2023].
- [9] B. P. Jaroslav Krbek, „Kogenerační jednotky-zřizování a provoz,“ GAS, s.r.o., 2007. [Online]. Available: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf. [Přístup získán 8 listopad 2022].
- [10] P. teplárenská, „údaje poskytnuty pro potřeby práce společností Pražská teplárenská,“ [Online].

- [11] D. Vobořil, „Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR,“ Oenergetice, 16 prosinec 2016. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>. [Přístup získán 2 prosinec 2022].
- [12] Solárenvi, [Online]. Available: <https://www.solarenavi.cz/a-43-idealni-orientace-fotovoltaickych-panelu.html>. [Přístup získán 2 prosinec 2022].
- [13] T. Herold, „Analýza faktorů ovlivňující účinnost přeměny sluneční energie,“ ZČU, 2013. [Online]. Available: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/7245/1/BP_Tomas_Herold.pdf. [Přístup získán 2 prosinec 2022].
- [14] „PVGIS,“ [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. [Přístup získán 27 duben 2023].
- [15] Battery import, 2023. [Online]. Available: <https://www.battery-import.cz/solarni-panely/ja-solar-solarni-panel-jam72s20-460wp--mono/>. [Přístup získán 29 březen 2023].
- [16] Seznam, „mapy.cz,“ [Online]. Available: [mapy.cz](https://www.mapy.cz).
- [17] „Aktuální vývoj cen energií na burze,“ Armex energy, [Online]. Available: <https://www.armexenergy.cz/aktualni-vyvoj-cen/>. [Přístup získán 12 květen 2023].
- [18] 5nej, 9 duben 2023. [Online]. Available: <https://www.5nej.cz/kolik-stoji-solarni-panely/>. [Přístup získán 9 květen 2023].
- [19] Ing. J. Krempaský
- [20] J. Doležal, „výpočet emisí oxidu uhličitého,“ MPO, 16 leden 2006. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/dokument6794.html>. [Přístup získán 13 květen 2023].
- [21] „PRŮMĚRNÁ TRŽNÍ CENA POVOLENKY NA EMISE SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ ZA ROK 2021,“ ERU, 7 duben 2022. [Online]. Available: <https://www.eru.cz/prumerna-trzni-cena-povolenky-na-emise-sklenikovych-plynu-za-rok-2021>. [Přístup získán 17 květen 2023].

- [22] T. H. Vladimír Stupavský, „Biom,“ 19 květen 2010. [Online]. Available: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>. [Přístup získán 31 květen 2023].
- [23] ČEZ, „Pro elektrotechniky,“ 28 červen 2021. [Online]. Available: <https://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/142.php>. [Přístup získán 26 květen 2023]