

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301      Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

ORC systémy pro využívání tepla s nižším energetickým potenciálem

Autor:                      **Jan Brčák**

Vedoucí práce:        **Ing. Lukáš Richter**

Akademický rok 2019/2020

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Brčák	<b>Jméno</b> Jan		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba energetických strojů a zařízení			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Richter	<b>Jméno</b> Lukáš		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	ORC systémy pro využívání tepla s nižším energetickým potenciálem			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	43	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	43	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Bakalářská práce obsahuje popis jednotlivých zdrojů s nízkým energetickým potenciálem a jejich využití v oblasti ORC, popis ORC technologie, včetně návrhu, stavby a výběru vhodné pracovní látky. Praktická část se zabývá analýzou experimentálních dat mikro-kogenerační ORC jednotky.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	ORC, nízkopotenciální teplo

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Brčák	Name Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of Power Machines and Equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Richter	Name Lukáš	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLÓMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	ORC systems for low potential heat utilization		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	43	<b>TEXT PART</b>	43	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	The bachelor thesis contains a description of low potential heat sources and their utilization in the ORC field, description of ORC technology including structure, design, and choice of a suitable working fluid. The practical part deals with the analysis of experimental data of the micro-cogeneration ORC unit.
<b>KEY WORDS</b>	ORC, low potential heat

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Lukáši Richterovi za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat UCEEB ČVUT za poskytnutí experimentálních dat a také panu Doc. Ing. Petru Eretovi, Ph.D. za pomoc při jejich analýze. Nakonec bych rád poděkoval svojí rodině a přátelům, za podporu po celou dobu studia.





## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Tepelné zdroje s nízkým energetickým potenciálem .....</b>	<b>11</b>
2.1	Geotermální energie.....	11
2.2	Solární energie.....	13
2.3	Odpadní teplo z průmyslových procesů.....	17
2.4	Odpadní teplo výfukových plynů spalovacích motorů .....	18
2.4.1	Uplatnění ORC zařízení pro využití odpadního tepla na lodích.....	18
2.4.2	ORC pro využití odpadního tepla z decentralizovaných zdrojů.....	19
2.4.3	ORC pro využití odpadního tepla z kompresních stanic.....	19
2.5	Biomasa.....	19
<b>3</b>	<b>Rankin-Clausiiův cyklus.....</b>	<b>21</b>
3.1	Parní Rankin-Clausiiův cyklus (RC) .....	21
3.2	Organický Rankin-Clausiiův cyklus (ORC) .....	21
3.3	Výběr pracovní tekutiny.....	22
3.3.1	Zdroje tepla.....	23
3.3.2	Kritéria pro výběr pracovní tekutiny.....	24
3.4	Komponenty ORC cyklu.....	26
3.4.1	Výměníky tepla.....	26
3.4.2	Expanzní zařízení.....	28
3.4.3	Čerpadlo .....	28
3.4.4	Generátor .....	29
3.5	Layout elektrárny.....	29
3.5.1	Jednostupňové cykly .....	30
3.5.2	Vícestupňové cykly.....	31
<b>4</b>	<b>Analýza experimentálních dat.....</b>	<b>32</b>
4.1	Experimentální zařízení .....	32
4.2	Technické parametry systému .....	32
4.3	Vyhodnocení naměřených dat .....	34
4.3.1	Vyhodnocení základních trendů .....	34
4.3.2	Výpočet izoentropické účinnosti.....	37
	<b>Závěr.....</b>	<b>40</b>
	<b>Reference .....</b>	<b>41</b>



## Použité symboly a zkratky

$h$	entalpie	[J/kg]
$h_{in}$	entalpie na vstupu expandéru	[J/kg]
$h_{out}$	entalpie na výstupu expandéru	[J/kg]
$M$	molární hmotnost	[kg/mol]
$p$	tlak	[Pa]
$p_{ad}$	admisní tlak	[Pa]
$p_{CR}$	kritický tlak	[Pa]
$p_{em}$	emisní tlak	[Pa]
$p_{kon}$	kondenzační tlak	[Pa]
$\Delta p_v$	tlaková ztráta ve výparníku	[Pa]
$P_{el}, P_{mech}$	výkon elektrický, mechanický	[W]
$Q_{out}$	užitečné teplo	[W]
$s$	entropie	[J/K]
$s_{in}$	entropie na vstupu expandéru	[J/K]
$T$	teplota	[°C]
$T_{CR}$	kritická teplota	[°C]
$T_{ev}$	teplota vypařování	[°C]
$T_{kon}$	kondenzační teplota	[°C]
$T_{em}$	emisní teplota	[°C]
$T_{ad}$	admisní teplota	[°C]
$V_r$	objemový poměr	[-]
$\dot{V}$	objemový průtok	[l/min]
$\eta$	účinnost	[-]
$\eta_{exp}$	izoentropická účinnost expandéru	[-]
$\sigma$	teplárenský modul	[-]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]

## 1 Úvod

Cílem této práce je zhodnotit současný stav v oblasti ORC systémů, které využívají teplo s nižším energetickým potenciálem a popsat ORC technologii, včetně volby pracovní látky, návrhu a stavby. Dalším úkolem bylo provést a vyhodnotit experiment s ORC systémem v partnerské laboratoři v Německu. Vzhledem k opatřením v souvislosti s koronavirem nebylo možné tento bod zadání splnit. Experiment byl proto nahrazen analýzou naměřených dat, která poskytlo UCEEB ČVUT.

V první části práce jsou jednotlivě popsány tepelné zdroje s nízkým energetickým potenciálem a jejich uplatnění v oblasti ORC systémů. Druhá část práce je zaměřena na popis ORC technologie, výběr pracovní tekutiny, nejdůležitější komponenty ORC a běžně používané layouty elektráren. Třetí část práce se zabývá analýzou experimentálních dat mikro-kogenerační ORC jednotky.

## 2 Tepelné zdroje s nízkým energetickým potenciálem

Neobnovitelné zdroje energie se pomalu vyčerpávají a ceny fosilních paliv stoupají, proto je nutné začít hledat další technologie výroby energie a efektivnější využití paliva. Dalším důvodem je dopad průmyslových a energetických procesů na životní prostředí. Kvůli změnám klimatu jsou nutná opatření ke snížení emisí skleníkových plynů. Využití tepla s nízkým energetickým potenciálem je jednou z cest k řešení těchto skutečností.

Energetický potenciál tepelného zdroje v podstatě určuje jeho teplota. Klasifikace tepelných zdrojů podle teploty je následující:

- Vysoko-potenciální teplo: teploty vyšší než 650 °C
- Středně-potenciální teplo: teploty mezi 260-650 °C
- Nízko-potenciální teplo: teploty do 260 °C [19]

Pokud jde o množství celosvětové dostupné energie, nejvýznamnější skupinu zdrojů nízko-potenciálního tepla představují přírodní zdroje tepla. V drtivé většině případů jde o zdroje obnovitelné, a tedy ekologické. Další skupinu zdrojů nízko-potenciálního tepla tvoří tepelné zdroje a proudy vznikající antropogenní činností. Takové zdroje bývají často odpadní a nedostatečně využité. [1]

Pokud se jedná o výrobu elektrické energie, u mnoha zdrojů s nízkým tepelným potenciálem není využití plynové, nebo parní turbíny technicky nebo ekonomicky výhodné. Jako dobrá volba k přeměně nízko-potenciálního tepla na elektrickou energii se jeví organický Rankinův cyklus (ORC). [1]

ORC systémy fungují na stejném principu jako Rankin-Clausiiův cyklus, ale místo vody používají jako pracovní látku organickou tekutinu. Organické tekutiny mají výrazně nižší výparné teploty, proto je efektivní je použít v aplikacích nízko-potenciálního a středně-potenciálního tepla. [1][12]

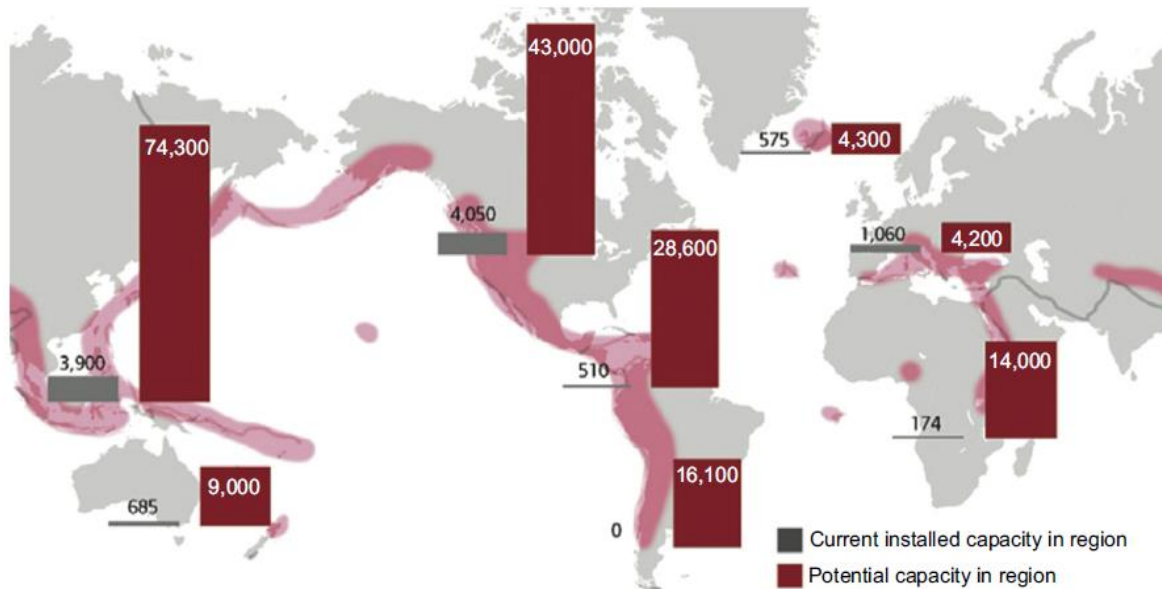
Historie vývoje ORC sahá od počátku 19. století. V současné době můžeme aplikace ORC technologií najít v oblastech geotermální a solární energie, a také u elektráren spalujících biomasu. Ovšem nejvýznamnějším polem působnosti ORC je rekuperace odpadního tepla z technologických procesů. [13][12]

### 2.1 Geotermální energie

Geotermální energií se rozumí přirozené teplo Země, zdrojem tohoto tepla je především rozpad radioaktivních prvků v jejím nitru. Geotermální energii lze využít přímo jako energii tepelnou, nebo ji v geotermální elektrárně přeměnit na elektrickou energii. Přestože je geotermální energie obecně považována za obnovitelnou energii, některé geotermální reservoáry mohou být vyčerpány v horizontu desítek let. Výhodou geotermální energie je její stálost a nezávislost na klimatických podmínkách. Geotermální elektrárny využívají jako zdroj podzemní nádrže, vyznačují se vysokým ročním kapacitním faktorem, spolehlivostí a dostupností. Nevýhodou jsou však poměrně velké pořizovací náklady a snižující se konkurenceschopnost s ohledem na klesající investiční náklady ostatních obnovitelných zdrojů. [1] [2] [14]

Tepelný tok vychází z teplotního gradientu mezi zemským povrchem a jádrem, které má teplotu cca 5000 °C. Teplo je k povrchu přenášeno dvěma způsoby – konvekcí a kondukcí. Konvekce neboli proudění roztavených tuhých látek, je účinný způsob přenosu

tepla, ale v blízkosti povrchu (do 100 km) je materiál už příliš studený a viskózní, na to, aby se pohyboval. V blízkosti povrchu se proto teplo přenáší zejména kondukcí. Na vrchu zemské kůry se nacházejí litosférické desky, které se pohybují o několik centimetrů ročně kvůli konvekčním proudům pod nimi. V místech mezi litosférickými deskami se vyskytují vysoké tlaky a vývěry magmatu, což způsobuje vysoké tepelné toky (až  $300 \text{ W/m}^2$ ). Hlavně tyto oblasti jsou z pohledu využívání geotermální energie technicky a ekonomicky zajímavé. Na Obrázku 1 jsou zobrazeny hlavní geotermální oblasti. [2]



Obrázek 1: Oblasti s potenciálem využití geotermální energie [1]

Geotermální zdroj lze identifikovat v místě, kde je teplotní gradient v kombinaci s přítomností podzemní vody v uzavřeném prostoru s vhodnými geologickými vlastnostmi. Následující vlastnosti se považují za nezbytné, aby byl geotermální zdroj použitelný: velký tepelný zdroj, proniknutelná nádrž, přívod vody, překrývající vrstva nepropustné horniny. [1]

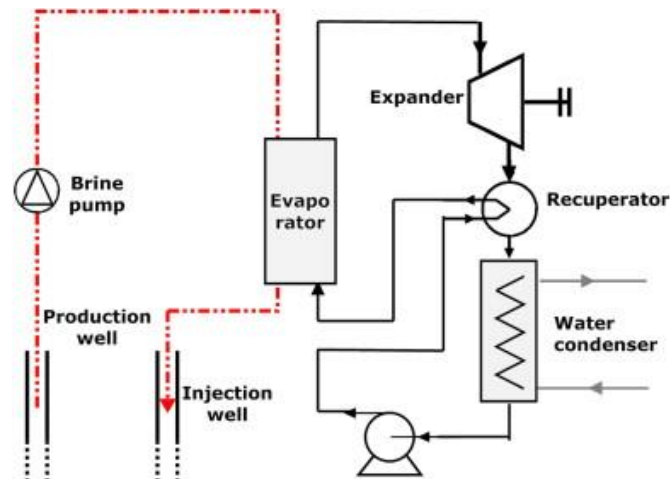
Pro návrh geotermální elektrárny hrají klíčovou roli i vlastnosti tekutiny v nádrži. Zdroje mohou být s dominancí par, nebo s dominancí kapaliny. Pokud se tekutina vyskytuje ve stavu páry, teploty mohou dosahovat až  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . V oblastech, kde je dominantní tekutina ve stavu kapaliny, jsou široké rozsahy teplot, vždy spojené s vysokým tlakem, který je nezbytný pro udržení kapalné fáze. Zdroje s teplotou vyšší než  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  umožňují kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. [1][4]

Geotermální tekutinu lze využít dvěma způsoby:

- tekutina ve formě páry přímo expanduje v turbíně (princip suché páry, princip mokré páry).
- teplo je předáno sekundární tekutině, která se vypaří a následně expanduje v turbíně (binární cyklus).

Princip suché páry přímo využívá geotermální nasycenou, nebo přehřátou páru. Pára nejdříve projde separátorem, který odstraní pevné částice a následně proudí do turbíny a generuje elektřinu. V případě, že se geotermální tekutina vyskytuje převážně v kapalné fázi, využívá se princip mokré páry. Používá se voda o teplotě  $180\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$ , která proudí do separátoru, kde se část přemění v páru. Pára dále expanduje v turbíně. Jedná se o nejrozšířenější typ geotermální elektrárny. [1][3]

Binární elektrárny využívají geotermální vodu (primární médium) k ohřevu sekundárního média, což je většinou organická látka s nízkým bodem varu. Sekundární médium je ohříváno ve výměníku a jeho páry pohánějí turbínu. Je možné využít ORC cyklus, nebo Kalinův cyklus, který pracuje se směsí 2 tekutin s rozdílným bodem varu (např. amoniak a voda). Binární elektrárny se využívají pro nízko a středně teplotní geotermální zdroje a jejich výkon se nejčastěji pohybuje od několika stovek kWe po jednotky MWe. [1] [14]



Obrázek 2: Schéma binární elektrárny [4]

Nízkoteplotní geotermální ORC elektrárny se vyznačují vysokou vlastní spotřebou. Čerpadla spotřebují až přes 50 % hrubého výstupního výkonu, největší spotřebu má čerpadlo v primárním okruhu, které musí cirkulovat geotermální tekutinu na velké vzdálenosti. [4]

Příkladem geotermální ORC elektrárny, která využívá nízko-potenciální teplo na základě binárního principu, je elektrárna Tosunlar v Turecku, jenž se nachází zhruba 20 km od termálních jezer Pamukkale, poblíž města Denizli. Geotermální teploty v této oblasti jsou kolem 105 °C, elektrárna čerpá chladicí vodu z nedaleké řeky. Výkon systému je 3,5 MW a účinnost 10 %. [5]



Obrázek 3: Elektrárna Tosunlar v Turecku [5]

## 2.2 Solární energie

Slunce je komplexní termonukleární reaktor, jehož hmota drží Zemi a další objekty sluneční soustavy ve svém gravitačním poli. Působením fúze vodíku a helia uvolní Slunce  $3,86 \cdot 10^{26}$  Joulů za sekundu. Na svém povrchu má Slunce teplotu přibližně 5700 K. Vzhledem

k velikosti Země a její vzdálenosti od Slunce ( $150 \cdot 10^6$  km) je množství sluneční energie zachycené Zemí  $1,74 \cdot 10^{17}$  Joulů za sekundu. Tvar slunečního spektra je srovnatelný s černým tělesem při 5778 K, ale paprsky jsou částečně tlumeny absorpčními pásy v zemské atmosféře, úměrně k hloubce atmosféry, kterou procházejí. Sluneční energie se mění na elektrickou pomocí fotovoltaických článků, nebo na tepelnou pomocí solárních tepelných systémů. Pokud jde o ORC systémy, nejvíce jsou využívány koncentrační solární systémy (CSP), které používají zrcadla, nebo čočky pro koncentraci slunečního záření na malou plochu. [1]

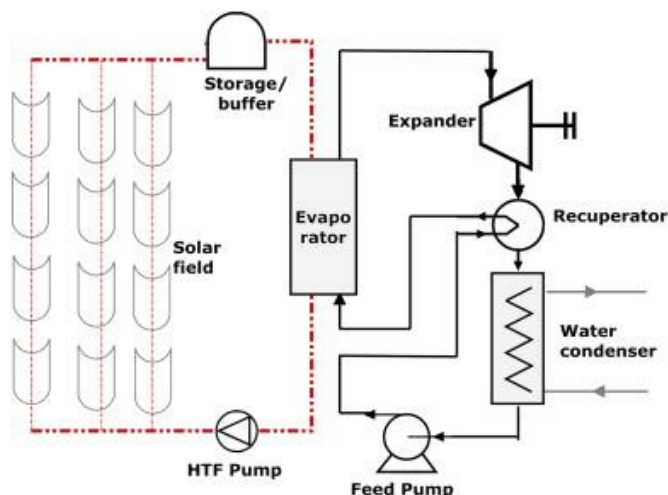
Od úsvitu do soumraku se Slunce konstantně pohybuje vzhledem k pevné pozici rotující Země. Solární kolektory dosahují nejvyšších výkonů za předpokladu, že jsou přímo natočené ke Slunci, proto se často pohybují a sledují jeho dráhu.[1]

Systémy, které jsou poháněny geotermální energií, nebo odpadním teplem mohou být navrženy na téměř konstantní rychlost vstupu tepla, nebo na rychlosti, které se mění předvídatelným a kontrolovatelným způsobem. Systémy poháněné výlučně, nebo částečně prostřednictvím solárního vstupu, musí čelit tepelným vstupům, které se mohou měnit s neznámou frekvencí a velikostí. Sluneční paprsky dopadají na sluneční koncentrátory s různou intenzitou. Intenzita paprsků se může měnit v časovém horizontu vteřin, nebo minut, při průchodu mrakem, během dne v důsledku denního cyklu a během sezóny vlivem změn řízených zeměpisnou šířkou – mění se délka cesty paprsků procházejících atmosférou. [1]

Důležitým údajem pro využití solární energie je solární konstanta, což je hodnota intenzity solárního záření dopadajícího kolmo na jednotku plochy, která se nachází na hraně zemské atmosféry. Střední hodnota solární konstanty je  $1369 \text{ W/m}^2$ . Hodnota solární konstanty kolísá zhruba o  $\pm 3 \%$ , a to především vlivem eliptické oběžné dráhy Země a v závislosti na okamžitém výkonu Slunce. Na samotný povrch Země pak dopadá méně slunečního záření, neboť je jeho značná část pohlcena, rozptýlena či absorbovaná zemskou atmosférou, oblačností a částicemi znečištění vzduchu. Z pohledu energetického využití je však podstatnější tzv. insolace, neboli intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na horizontální plochu zemského povrchu. Díky sklonu zemské osy a proměnné zenitové vzdálenosti Slunce se hodnota insolace na rozdíl od solární konstanty výrazně mění, a to od rovníkových oblastí, kde je nejvyšší (téměř kolmý dopad paprsků a jejich krátká dráha), k zemským pólům, kde klesá až o 60 %.[15][16]

Jak již bylo zmíněno, teplo je získáváno pomocí solárních kolektorů, které zachycují dopadající solární záření. Kolektor přemění solární záření na teplo a přenesení ho na teplotně tekutinu. Ve většině případech teplotně tekutina působí jako intermediární tekutina, která přenáší teplo do výparníku ORC, existuje však i možnost, aby pracovní tekutina cirkulovala přes kolektor (přímá výroba páry). Tato konfigurace šetří náklady na tepelném výměníku a nevyskytují se zde ztráty spojené s čerpadlem, které cirkuluje druhou tekutinu. Systémy přímé výroby páry jsou jen zřídka využívány ve středním a velkém měřítku, jelikož vyžadují nákladnější konstrukci kolektorů a kvůli velkému a obecně nákladnému objemu organické tekutiny. [1]

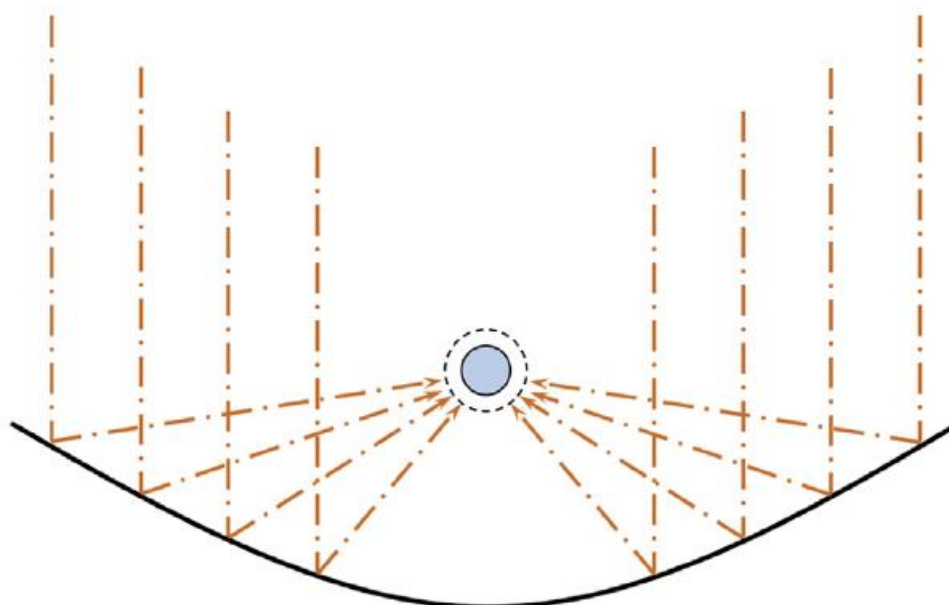
Tepelná účinnost solárních kolektorů závisí na provozních podmínkách a kvalitě jejich izolace, přičemž se hodnoty tepelné účinnosti pohybují mezi 30 % až 70 %. Čím vyšší je teplotní rozdíl mezi okolním vzduchem a kolektorem, tím vyšší jsou tepelné ztráty. V posledních desetiletích bylo vyvinuto mnoho typů solárních kolektorů. V případě ORC systémů založených na solární energii se používají např. solární jezírka, parabolické žlaby, nebo kolektory na principu Fresnelovy čočky. [1]



Obrázek 4: Schéma solární ORC elektrárny [4]

### Parabolické žlaby

Parabolický žlab je dlouhé parabolické zrcadlo, v jehož ohnisku je umístěna vakuová trubice s teplotněstabilní látkou. Sluneční záření je koncentrováno na trubici (viz obrázek 5), kde je sluneční energie absorbována teplotněstabilním médiem. Kolem trubice je často skleněná obálka, která snižuje ztráty konvekcí. Osa žlabu bývá orientovaná ve směru sever-jih, přičemž se po celý den kolektor otáčí ve své podélné ose od východu k západu, čímž sleduje aktuální polohu Slunce na obloze. Méně účinným, avšak levnějším systémem, je orientace osy žlabu ve směru východ-západ. Tato konfigurace zpravidla nevyžaduje denní polohování, ale pouze malé sezónní přenastavení, což snižuje pořizovací a provozní náklady. [1]



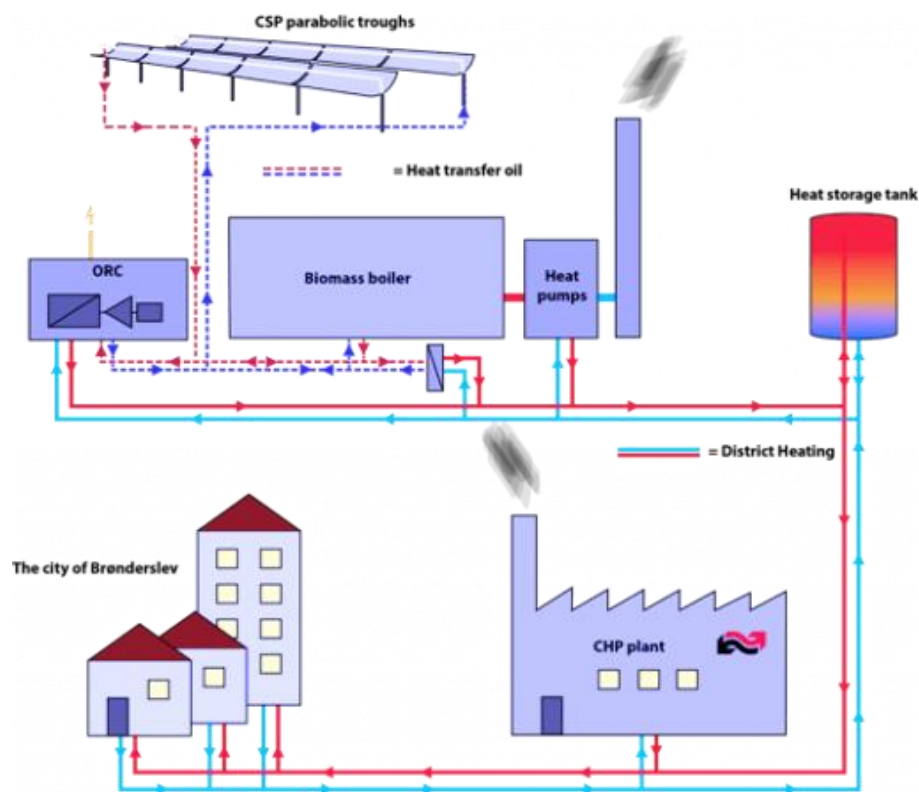
Obrázek 5: Parabolický žlab [1]

Příkladem CSP elektrárny, využívající parabolická zrcadla a ORC jednotku je elektrárna Aalborg, která se nachází v Dánském městě Brønderslev. Jedná se o kogenerační zařízení, které tvoří dva kotle na biomasu, tři tepelná čerpadla, solární ohřev a olejové jednotky. Rozloha elektrárny je 27 000 m<sup>2</sup>, tvoří ji 40 řad zrcadel. Olej napájí ORC systém, který generuje elektrickou energii. Celkový tepelný výkon je 10 MWt, elektrický výkon je 3,8

MWe. Tento systém názorně ukazuje, jak lze optimalizovat účinnost ORC v oblastech s menším slunečním zářením. [6][7]



Obrázek 6: CSP Aalborg v Dánsku [7]



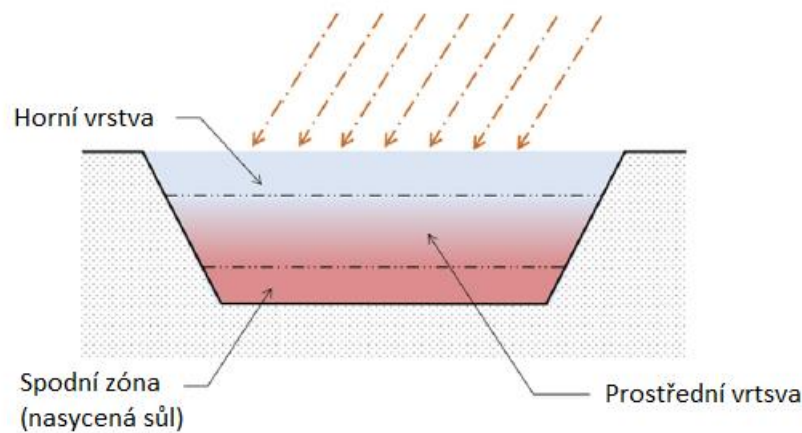
Obrázek 7: Schéma elektrárny Aalborg [6]

### Solární jezírka

Solární jezírko je nádrž slané vody, která se využívá ke sběru sluneční energie. Koncentrace soli v nádrži vytváří třívrstvou stratifikaci, rozdělující nádrž na konvektivní zónu na povrchu, nekonvektivní zónu uprostřed a dolní konvektivní zónu. Zatímco horní a spodní zóna mají rovnoměrnou hustotu, nekonvektivní zóna má hustotní profil, který se neustále zvětšuje od horní k dolní hranici. Tím je vytvořena stabilní izolační vrstva a je vyloučena jakákoliv přirozená konvekce ve střední zóně. Sluneční paprsky projdou prvními vrstvami a jsou absorbovány spodní zónou, teplota spodní zóny se zvyšuje (až na 95 °C), zatímco teplota horní části zůstává podobná teplotě okolí. Hloubky solárních jezírek se pohybují v rozmezí od 0,5 m do 5 m. Pro napájení rozsáhlých systémů jsou vyžadovány velké plochy povrchu (200



m<sup>2</sup>). Termální energie je přenesena do ORC čerpáním horké části solanky do výparníku a horní studená voda může být použita jako chladič pro kondenzátor. Klíčovou výhodou solárních jezírek je jejich schopnost shromažďovat a ukládat tepelnou energii. [1]



Obrázek 8: Solární jezírko [1]

Existuje několik elektráren, které využívají solární jezírka např. elektrárna Beith Ha'avara v Izraeli. Její výkon je 5MW a rozloha 250 000 m<sup>2</sup>. Další elektrárnou v Izraeli je Ein Boqek jejíž výkon je 150 kW a rozloha 6250 m<sup>2</sup>. Vhodné pracovní látky pro využití ORC v kombinaci se solárními jezírky jsou např. R143a a R290 (propan). [17]

### 2.3 Odpadní teplo z průmyslových procesů

Převážná část energetických a průmyslových procesů generuje jako vedlejší produkt energii ve formě odpadního tepla. V mnoha případech je toto teplo bez využití uvolněno do atmosféry, avšak pomocí jeho rekuperace je možné zvýšit účinnost a ekonomičnost primárního procesu, přispět k energetickým úsporám a v konečném důsledku přispět k ochraně životního prostředí. Průmyslové odpadní teplo uvolňované z mnoha výrobních procesů má relativně vysokou teplotu, dost k tomu, aby pohánělo energetický cyklus a vyrábělo elektřinu pro další využití. Výroba cementu, oceli a rafinace ropy jsou hlavní průmyslové závody, které spotřebovávají velké množství energie a také produkují obrovské množství odpadního tepla. [1]

Dle statistického úřadu Evropské unie Eurostat se během roku 2014 v České republice spotřebovalo 87 TWh energie, přičemž z průmyslových a energetických procesů odchází 20 – 50 % nevyužitá energie ve formě odpadního tepla. Národní laboratoř v Oak Ridge spadající pod Ministerstvo energetiky USA uvádí, že z tamějších průmyslových a energetických procesů odchází až 55 % nevyužitá energie. Studie Spojeného království uvádí, že využívání nízko-potenciálního odpadního tepla z veškerého průmyslu na Britských ostrovech by znamenalo snížení provozních nákladů o 100 milionů liber ročně a benefit pro životní prostředí v podobě snížení CO<sub>2</sub> a 100 tisíc tun ekvivalentu CO<sub>2</sub> za rok. [26]

Pomocí systémů na využití odpadního tepla může být v některých případech, energetická účinnost zvýšena až o 10 %, a proto se tyto systémy jeví jako stále důležitější. Obzvláště systémy ORC si v posledních letech získávají větší pozornost. Termodynamická účinnost ORC systému je s ohledem na rozsah teplot, ve kterém ORC pracuje, často limitována ve srovnání s konvenčními technologiemi elektráren, které využívají primární energetické zdroje. ORC systém má nicméně potenciál při nízkých a středních teplotách, zejména pokud jde o využívání sekundárních energetických zdrojů. ORC systémy jsou

považovány za jeden z nejslibnějších způsobů přeměny nízkoteplotního odpadního tepla na elektrickou energii. [1]

Při porovnání dvou různých typů systémů na zpracování odpadního tepla (ORC a parní Rankinův cyklus) S. Karellas a spol. uvádí, že v případě modernější cementárny může být ORC výhodnější než konvenční rekuperace tepla vodní párou za předpokladu, že se jedná o odpadní proud s teplotou do 310 °C. [18]

Ocelářský průmysl je také energeticky náročný. V Číně činí jeho spotřeba asi 15 % z celkové spotřeby a přibližně 68 % vydané energie je odpadní teplo spalin a par vypuštěných z vysokých pecí, konvertorů, nebo ohřívacích pecí při výrobě oceli. Teplota těchto odpadních proudů se pohybuje v rozmezí 200–450 °C. Rovněž teplota chladicí vody opouštějící pec je obecně 90–150 °C. [1]

## 2.4 Odpadní teplo výfukových plynů spalovacích motorů

Spalovací motor generuje odpadní teplo prostřednictvím chladiče, respektive chladicí tekutiny (teploty kolem 80-100 °C) a výfukových plynů (400–900 °C). Tyto odpadní proudy mohou být využité prostřednictvím ORC systémů. Výstup expanzního zařízení ORC může být mechanický nebo elektrický. U mechanického systému je hřídel expanzního zařízení přímo spojena s hnacím řemenem motoru, aby se zabránilo ztrátám energie, pokud by byl výstupní výkon ORC příliš nízký. Hlavní nevýhodou této konfigurace jsou otáčky expanzního zařízení, které nemusí být optimální k maximalizaci účinnosti cyklu. Pokud ORC generuje elektrickou energii, pak je expanzní zařízení připojeno k alternátoru. Alternátory vozidel vykazují poměrně nízkou účinnost (50-60 %), což snižuje výkon systému. Čerpadlo organické pracovní tekutiny může být připojeno k hnacímu řemenu, k hřídeli expanzního zařízení, nebo k elektrickému motoru. Obecně je nutné regulovat jak rychlost čerpadla, tak i rychlost expanzního zařízení, aby bylo dosaženo požadované teploty a tlaku na vstupu expanzního zařízení. Problémem je také schopnost odvádění tepla. Velikost výměníku je omezena dostupným prostorem a závisí na přítomnosti chladiče. Systém by měl fungovat v rozmezí chladicí kapacity bez provozu chladících ventilátorů, jinak může spotřeba ventilátoru výrazně snížit čistý výkon systému. [4]

### 2.4.1 Uplatnění ORC zařízení pro využití odpadního tepla na lodích

Většina hnacích strojů a pomocných zařízení námořních lodí jsou diesellové motory. Vzhledem k nedostatku energie a problémům se znečištěním životního prostředí se účinné a čisté energetické systémy staly zajímavým tématem moderní společnosti. U většiny lodních diesellových motorů se méně než 50% energie paliva přemění na užitečný výkon, zatímco zbývající energie se ztratí prostřednictvím výfukových plynů, chladičů a jinými prostředky. Výfukové plyny a vzduchové chladiče mají velký potenciál k regeneraci tepla. Značné množství energie ve výfukových plynech lze obnovit. Možným způsobem zlepšení celkové energetické účinnosti a snížení emisí znečišťujících látek, je zachytit a znovu využít odpadní teplo, čímž se na lodi generuje elektrická energie. Motor velké lodi obvykle běží po dlouhou dobu konstantní rychlostí. Ve srovnání s automobilem je snadnější využívat stabilní odpadní teplo na lodích. Systém na využití odpadního tepla na lodích může využívat mořskou vodu jako chlazení. Aplikace ORC technologie závisí hlavně na technologii zpracování a instalaci zařízení, jelikož velkým problémem je prosakování. Při realizaci ORC technologie na lodích je tedy kladen velký důraz na těsnost systému, aby se zamezilo úniku organické pracovní látky, která by znečistila okolí. [1]

#### 2.4.2 ORC pro využití odpadního tepla z decentralizovaných zdrojů

Decentralizovaný energetický systém (DES) je obvykle řada malých zařízení připojených k síti, která mají kapacity pouze 10 MW, nebo méně. Ve srovnání s klasickými elektrárnami, jako jsou uhelné, plynové, jaderné, nebo vodní, které často vyžadují přenos elektřiny na velké vzdálenosti, jsou DES flexibilnější a jsou umístěny blízko zátěže, kterou obsluhují, takže přenos energie na velké vzdálenosti není nutný. Tento druh systému může nejen ušetřit spoustu energie, ale také zajistit bezpečnost, stálost a cenovou stabilitu dodávek elektřiny či tepla, proto se stále více využívá v oblasti dodávek energie pro konečného spotřebitele. [1]

DES obvykle využívá kogenerační jednotky a plynové turbíny relativně široké škály výkonů. Odpadní teplo z těchto zařízení může být použito k vytápění nebo k výrobě chladu (trigenerace). Na některých místech však není teplo, nebo chlazení nutné po celý rok, zatímco elektřina je. Zde jsou ORC systémy dobrým způsobem, jak využít odpadní teplo k výrobě elektřiny. Technologie ORC systémů není v současnosti dostatečně vyspělá, aby mohla být použita u automobilů se spalovacími motory, hlavně vzhledem k problému miniaturizace. Naopak u velkých stacionárních motorů, které se používají u DES, lze ORC systém pro využití odpadního tepla snadněji použít. [1]

#### 2.4.3 ORC pro využití odpadního tepla z kompresních stanic

Obecně se základní kompresorové systémy ve stanicích pro kompresi zemního plynu skládají ze dvou komponent: pohon kompresoru a samotný kompresor. Pro kompresorovou stanicí se používají především dva typy pohonů, plynové turbíny a spalovací motory. Motory a turbíny poháněné zemním plynem vytvářejí teplo jako vedlejší produkt. Pouze asi jedna třetina palivové energie spotřebované motorem, nebo turbínou je přeměněna na užitečnou mechanickou energii, zbývající dvě třetiny skončí jako horký výfukový plyn (260-540 °C). Stabilně se toto teplo používá pro zajištění horké vody, nebo páry pro danou lokalitu, čímž se zvýší celková účinnost systému. V kompresorových stanicích potrubí však kogenerace nemá smysl, protože v těchto stanicích jsou malé požadavky na tepelnou energii, a navíc bývají umístěny na izolovaných místech, což vylučuje dodávku páry nebo horké vody do sousedních průmyslových nebo obydlených zón. Alternativou pro rekuperaci tepla za účelem generace mechanické energie, nebo elektřiny je ORC. [1]

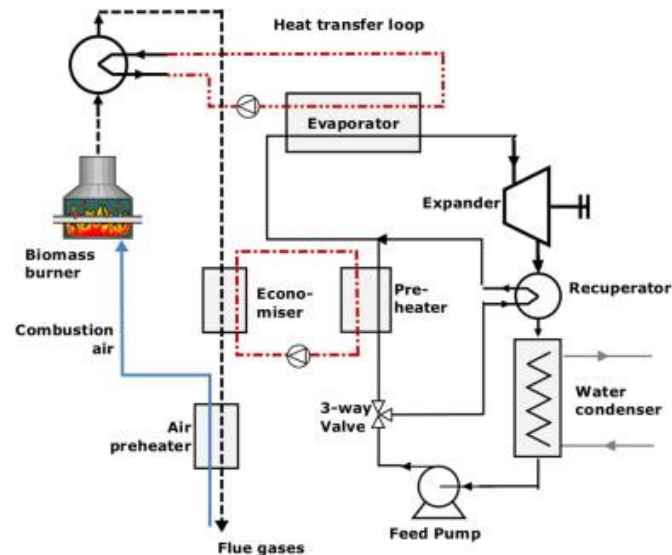
Vzhledem k tomu, že se kompresní stanice velmi liší velikostí a uspořádáním, tak se systém ORC nehodí pro všechny, pokud jde o ekonomický faktor a kvalitu odpadního tepla. Spalovací motory pracují v blízkosti stechiometrických podmínek spalování, to má za následek nižší průtoky výfukových plynů při nižších objemech vstupního vzduchu. Plynové turbíny odvádějí téměř veškeré své teplo v horkých výfukových plynech a pracují s 200-300 % přebytkem vzduchu, což vede k vyšším teplotám a průtokům výfukových plynů. [1]

### 2.5 Biomasa

Biomasa je biologicky rozložitelná část výrobků, zbytků ze zemědělství, lesnictví a dalších souvisejících průmyslových odvětví. Dále jsou to zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a také biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu. Nejčastěji používané druhy biomasy jsou dřevo, dřevní odpad, sláma, energetické rostliny. [2]

Biomasa může sloužit k akumulaci energie, kterou lze přechovat a využít podle potřeby k výrobě tepla nebo elektřiny, nebo zpracovat na hodnotnější biopaliva. Nejvýhodnější využití biomasy se jeví tam, kde je potřeba elektrická energie a teplo.

Spalovací zařízení pro termické zpracování biomasy jsou většinou omezeny na tepelný výkon 6-10 MW, což odpovídá 1-2 MW elektrické energie. V tomto výkonovém rozsahu nejsou tradiční parní cykly nákladově efektivní, proto je zde výhodné využít ORC technologii. Hlavní oblasti využití ORC systémů na spalování biomasy jsou dálkové vytápění a proces sušení v dřevařském průmyslu. Obecně se nevyskytuje mnoho ORC aplikací, které využívají nízko-potenciální teplo v rámci spalování biomasy. Důležité podmínky k využití kogeneračního zařízení na spalování biomasy jsou: dostupnost biomasy, možnost využití vyrobené elektrické energie, a adekvátní poptávka po tepelné energii. [4] [8]



Obrázek 9: Schéma kogenerační ORC jednotky [4]

Na Obrázku 9 je zjednodušené schéma kogeneračního systému. Teplo ze spalování je přeneseno do teplosměnné tekutiny, pomocí které je dále odpařena pracovní organická tekutina. Pracovní tekutina expanduje v turbíně, prochází rekuperátorem k předehřátí pracovní látky a nakonec kondenzuje.

Příkladem kombinace ORC a biomasy je Teplárna v okrese Lębork, v Polsku. Je to bývalá kotelna na prachové uhlí, která byla předělána na kogenerační jednotku, spalující biomasu. Maximální výkon jednotky je 7 MW, 5 MW tvoří teplo ve formě teplé vody a 1,2 MW je ve formě elektrické energie. Chladicí voda kondenzátoru se ohřeje na 90 °C. Celková účinnost teplárny je 86 %, kdy elektrická účinnost při maximálním výkonu 1,2 MW je 18 %. [9]

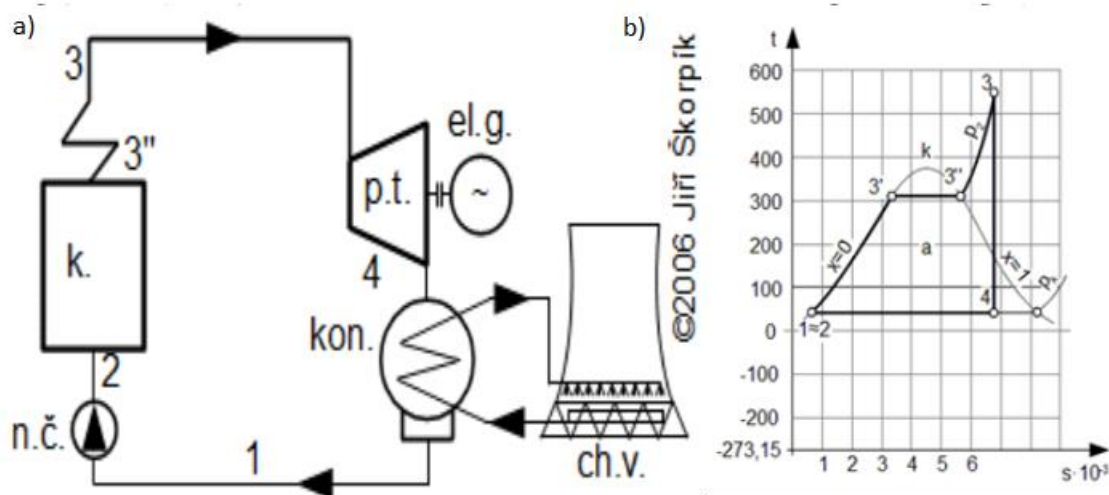


Obrázek 10: Kogenerační jednotka MPEC v Polsku [9]

### 3 Rankin-Clausiusův cyklus

#### 3.1 Parní Rankin-Clausiusův cyklus (RC)

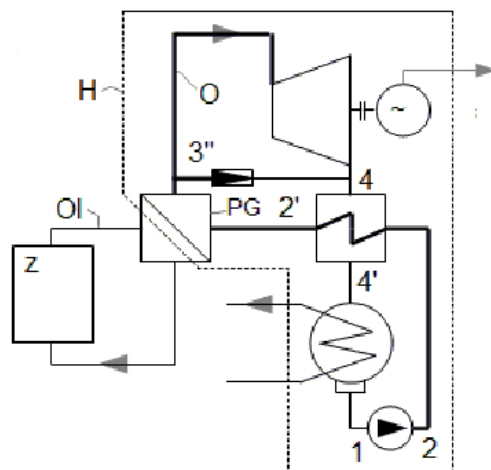
V klasických tepelných elektrárnách je tepelná energie transformována na mechanickou pomocí Rankin-Clausiova cyklu (viz Obrázek 11). Rankin-Clausiusův cyklus se skládá ze základních termodynamických změn a jako pracovní látku využívá vodu/vodní páru. Voda je nejdříve přivedena hlavním oběhovým čerpadlem do kotle, kde se ohřívá a následně odpařuje. V parním přehříváku pára dosáhne parametrů admisní páry, a ta je následně přivedena do parní turbíny. V parní turbíně pára expanduje a poté v kondenzátoru mění své skupenství. Z kondenzátoru je voda kondenzátním čerpadlem přepravena do zásobní nádrže, případně hlavním oběhovým čerpadlem zpět do kotle. Termická účinnost se u nejmodernějších elektráren pohybuje kolem 38 %. Termická účinnost se zvyšuje ohřevem napájecí vody v regeneračních ohřívácích mimo vlastní kotel, nebo přehříváním páry. [10]



Obrázek 11: a) Schéma RC cyklu (k.–parní kotel, p.t.–parní turbína, el.g.–elektrický točivý generátor, kon.–kondenzátor, ch.v.–chladicí věž, n.č.–napájecí čerpadlo), b) T-s diagram RC cyklu (1-2: adiabatická komprese napájecí vody v hlavním oběhovém čerpadle, 2-3: izobarický ohřev vody v ekonomizéru, 3'-3'': izobarický a zároveň izotermický var vody ve výparníku, 3''-3: izobarické přehřátí páry v přehříváku, 3-4: adiabatická (izoentropická) expanze páry v turbíně, 4-1: izobarická a zároveň izotermická kondenzace páry v kondenzátoru) [10]

#### 3.2 Organický Rankin-Clausiusův cyklus (ORC)

Organický Rankin-Clausiusův cyklus pracuje na stejném principu jako parní cyklus, ale místo vody/vodní páry používá jako pracovní látku organické tekutiny, které mohou být díky svým termodynamickým vlastnostem vhodně použity v tepelném oběhu. Výhodou organických látek je především možnost využití nízkoteplotních zdrojů tepelné energie, protože jejich bod varu je na nižší teplotní úrovni než voda. Na druhou stranu se obvykle jedná o látky, které jsou hořlavé, nebo představují zátěž pro životní prostředí. Při vysokých teplotách organické tekutiny podléhají chemickému rozkladu, díky němuž dochází k tvorbě nebezpečných látek a rovněž se negativně mění vlastnosti média, tudíž je mu nutné zabránit. Pro snížení rizika havárie a ochrany pracovní látky před vysokými teplotami, může systém ORC obsahovat primární a sekundární okruh. V primárním okruhu je olej a v sekundárním pracovní látkou. Pokud není pracovní látkou citlivá na vysokou teplotu a není ani hořlavá, tak může být vložený okruh vyřazen. [8][11]



Obrázek 12: Schéma ORC cyklu (OI-primární okruh, O-sekundární okruh, PG-parogenerátor) [11]

Výhodou oleje je, že se při dané teplotě udrží v kapalném stavu při značně nižším tlaku než voda. Olej ve výparníku předává teplo sekundárnímu okruhu, kde se vypařuje pracovní organická látka a organická pára je vedena do parní turbíny. Za turbínou je pára vedena do kondenzátoru, kde zkapalní.

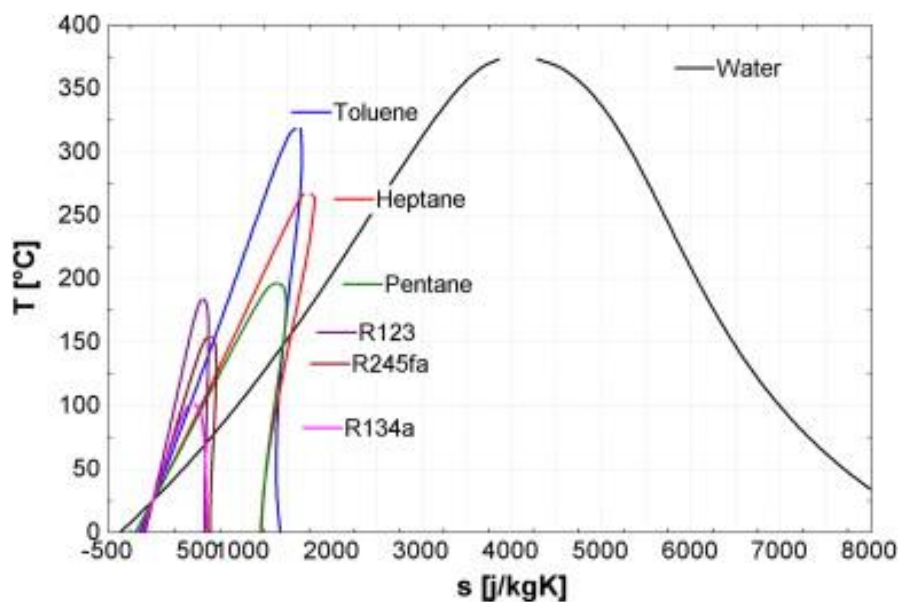
### 3.3 Výběr pracovní tekutiny

Základní dělení pracovních látek pro ORC je určeno podle sklonu jejich pravé mezní křivky (viz Obrázek 14). Sklon pravé mezní křivky v T-s diagramu ovlivňuje počet atomů v molekule. Čím je molekula složitější, tím více pozitivní sklon má pravá mezní křivka. Pokud má křivka pozitivní, nebo vertikální sklon, nedochází v pozdější fázi expanze ke vzniku kapiček a není nutné přehřátí páry před vstupem do turbíny, což vede k nižšímu tepelnému namáhání v kotli a na lopatkách turbíny, a tedy k nižším nákladům. Absence tvorby kapiček během expanze také snižuje riziko opotřebení lopatek turbíny a prodlužuje její životnost. S rostoucím počtem atomů roste i potřeba rekuperátoru, který sníží ztráty na účinnosti. [23] [22]

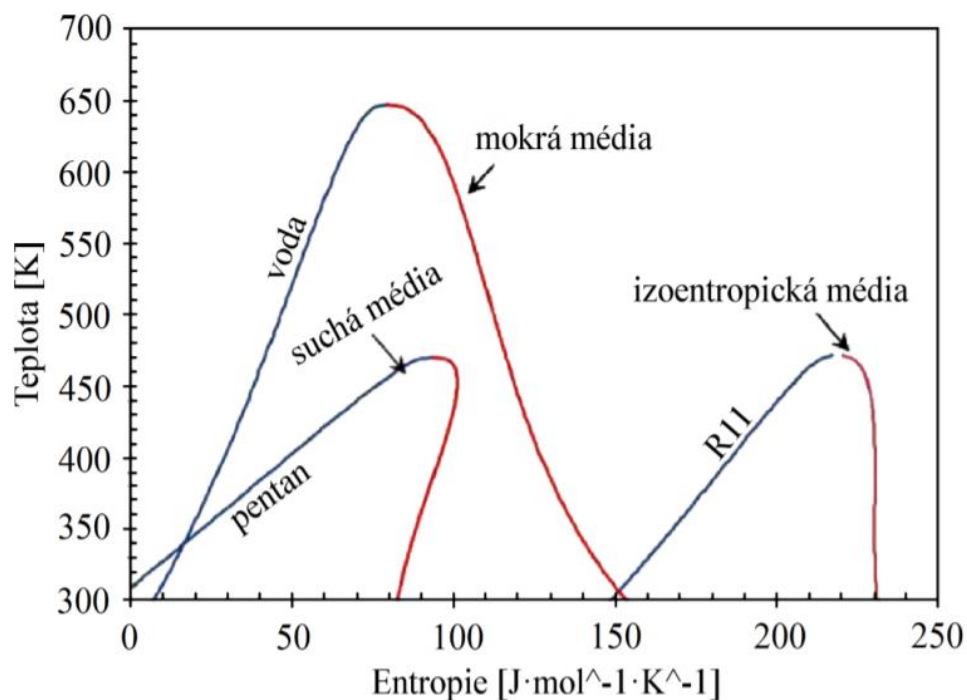
- Mokrá média – negativní sklon
- Suchá média – pozitivní sklon
- Izoentropická média – vertikální sklon

Mimo počet molekul hraje roli i molekulární hmotnost, která má dopad na expanzní zařízení. Voda patří do skupiny molekulárně lehčích látek, u nichž dochází k typické expanzi ve vícestupňové turbíně. Systém ORC je vhodnější pro látky s vyšší molekulární hmotností. Látky s vyšší molekulární hmotností vyžadují nižší počet stupňů u expanzního zařízení, takže jeho konstrukce je jednodušší. [22]

Obrázek 13 znázorňuje T-s diagramy vody a několika typických organických tekutin používaných v ORC aplikacích. Rozdíl entropie mezi nasycenou kapalinou a nasycenou parou je u organických tekutin mnohem menší než u vody. Výparná entalpie je také nižší. Aby výparník mohl využít stejnou tepelnou energii, musí být hmotnostní průtok organického média mnohem vyšší než u vody, což vede k vyšší spotřebě čerpadla. [4][11]



Obrázek 13: T-s diagram vody a vybraných organických tekutin [4]



Obrázek 14: Rozdělení pracovních látek v T-s diagramu [23]

### 3.3.1 Zdroje tepla

Nejjednodušší klasifikací zdrojů tepla se týká jejich tepelné kapacity, která ovlivňuje jejich teplotní změny během uvolňování tepla. Dělí se na zdroje, které teplo uvolňují při konstantní teplotě, a na zdroje, které teplo uvolňují při proměnlivé teplotě. [1]

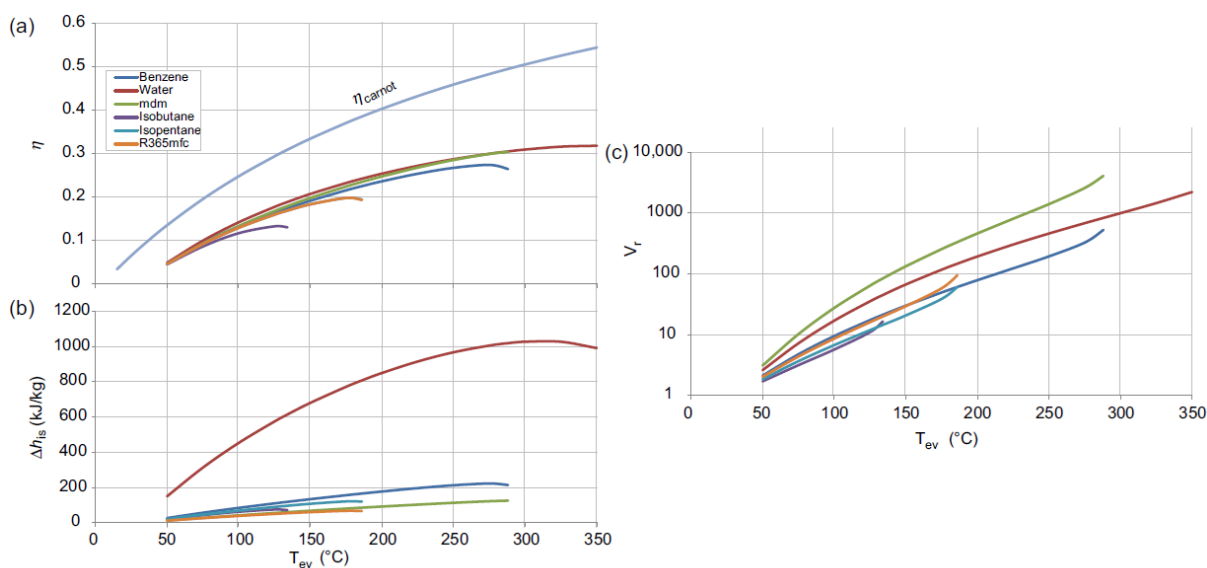
U zdrojů tepla s konstantní teplotou záleží na těchto vlastnostech pracovní tekutiny: počet atomů v molekule, kritická teplota a molekulární hmotnost. Vliv vlastností uvedených pracovních tekutin na výkon cyklu je popsán na Obrázku 15. [1]

Tekutina	M [kg/mol]	Počet atomů	$T_{CR}$ [°C]	$p_{CR}$ [bar]
Isopentane	72,15	17	187	33,8
R365mfc	148,07	14	187	32,7
Benzene	78,11	12	289	49,1
Isobutane	58,12	14	135	36,3
MDM	236,53	37	291	14,2

Tabulka 1: Vlastnosti vybraných organických látek

Obrázek 15(a) představující účinnost cyklu tekutin v závislosti na teplotě odpařování, ukazuje, že výkony jsou podobné pro všechny tekutiny, bez ohledu na molekulovou hmotnost a složitost molekuly, pokud teplota odpařování dosahuje hodnot blízkých kritické teplotě. Obrázek 15(b), představující závislost poklesu entalpie na teplotě, ukazuje hlavní výhodu těžkých molekul oproti páře. Pokles entalpie u organických tekutin je řádově nižší než u vody, což se projevuje u konstrukce turbíny (nižší obvodové rychlosti a nižší počet stupňů). Obrázek 15(c) poukazuje na to, že objemový poměr se výrazně zvyšuje s odpařovací teplotou všech tekutin a dosahuje hodnot vyšších než 100 pro odpařovací teploty nad 200 °C. [1]

Zatímco pro zdroje tepla s konstantní teplotou je nejlepším řešením saturovaný cyklus, u zdrojů tepla s proměnlivou teplotou by se mělo uvažovat o různých konfiguracích, jako jsou např. přehřáté cykly, nebo superkritické cykly. Stejně jako u zdrojů tepla s konstantní teplotou je termodynamický výkon pracovní tekutiny ovlivňován primárně kritickou teplotou a molekulární složitostí, ale musí zde být zohledněn i vstupní tlak turbíny. [1]



Obrázek 15: a) účinnost cyklu, b) pokles entalpie, c) objemový poměru v závislosti na teplotě vypařování [1]

### 3.3.2 Kritéria pro výběr pracovní tekutiny

Volba pracovní tekutiny ovlivňuje termodynamický cyklus, výkon a náklady na komponenty, uspořádání zařízení, bezpečnostní požadavky atd. Výběr pracovních tekutin je poměrně velký. Základní požadavky na pracovní tekutiny jsou:



- Komerčně dostupné za rozumné náklady. To je důležité hlavně pro velké elektrárny, kde je vyžadováno mnoho tekutiny a náklady na ni představují významný podíl na celkových nákladech.
- Nehořlavost. Hořlavé pracovní tekutiny se používají, ale přinášejí další komplikace a dodatečné náklady.
- Netoxické. Toxické látky jsou přijatelné, ale mají zjevné nevýhody.
- Kompatibilní s používanými materiály (kovy, elastomery, mazací oleje). Pracovní látka by neměla reagovat s materiály, se kterými přijde do kontaktu.
- Šetrné k životnímu prostředí. Aby byla tekutina přijatelná, jsou důležitá 2 hlavní kritéria: potenciál k vyčerpání ozonu (ODP), což je poměr globální ztráty ozonu v důsledku uvolnění daných látek ku globální ztrátě ozonu při uvolnění stejné hmotnosti látky CFC-11, a potenciál ke globálnímu oteplování (GWP), který porovnává množství tepla zachyceného určitou hmotností dané látky s množstvím tepla zachyceného stejnou hmotností oxidu uhličitého. [1] [25]

Ve skutečnosti je prakticky nemožné splnit všechny tyto požadavky. Klimatizační a chladicí průmysl mají stejné požadavky na pracovní tekutinu a po mnoho desetiletí využívali látky CFC, známé jako freony, které byly ideální pro mnoho aspektů (nehořlavé, netoxické, nízké náklady, dobré termodynamické vlastnosti), ale kvůli jejich potenciálu k vyčerpání ozonu byly postupně zakázány. Poté byl vyvinut nový druh látky, a to fluorované uhlovodíky (HFC). HFC látky jsou nehořlavé, recyklovatelné a s nízkou toxicitou, ale v dnešní době právní předpisy požadují mnohem nižší potenciál ke globálnímu oteplování, než mají látky HFC. Vhodnou náhradou za HFC látky jsou hydrofluoro-Olefiny (HFO). Látky HFO se vyznačují velmi nízkým GWP [1]

Pro ORC jsou důležité hlavně termodynamické vlastnosti. Pro daný tepelný zdroj by měla být účinnost co nejvyšší. Pracovní tekutina by měla mít vhodné kritické parametry (teplota a tlak). Například v případě saturovaných cyklů by kritická teplota měla být dostatečně vysoká, aby umožnila odpařování při správné teplotě, ale dostatečně nízká, aby bylo dosaženo kondenzačních tlaků vyšších než atmosférický. [4]

V komerčních ORC elektrárnách se běžně používá jen několik druhů médií, v následující tabulce je jejich shrnutí. Mnoho studií doporučuje výběr pracovní tekutiny s nejvyšší kritickou teplotou, ale vysoká kritická teplota vede k nižším hustotám par a tím pádem i k vyšším systémovým nákladům.[4]

HFC-134a	Geotermální elektrárny, systémy na využití odpadního tepla pro velmi nízké teploty
HFC-245fa	systémy na využití odpadního tepla
n-pentan	Solární elektrárny, systémy na využití odpadního tepla , geotermální elektrárny pro střední teploty
Solkatherm	systémy na využití odpadního tepla
OMTS	kogenerační systémy na biomasu
Toulen	systémy na využití odpadního tepla

Označení	M [kg/kmol]	Bod varu (1atm)	T <sub>CR</sub> [°C]	p <sub>CR</sub> [MPa]		ODP	GWP
Isopentane	72,15	27,83	187,2	3,38	Hořlavý	0	0
R113	187,38	47,59	214,06	3,39	Nehořlavý	0,8	6130
R114	170,92	3,59	145,68	3,26	Nehořlavý	1	1000
R123	152,93	27,82	183,68	3,66	Nehořlavý	0,02	77
R236ea	152,04	6,19	139,29	3,5	Nehořlavý	0	1370
R245fa	134,05	15,14	154,01	3,65	Nehořlavý	0	1030
R365mfc	148,07	40,15	186,46	3,27	Hořlavý	0	794
R1234yf	114	-30	94,55	3,38	Hořlavý	0	4,4
Trans-butene	56,106	0,88	155,46	4,02	Hořlavý	0	20
MM	162,38	100,25	245,6	1,94	Hořlavý	0	0

Tabulka 2: Některé pracovní látky v rozsahu T<sub>CR</sub> 50-250 °C [24]

### 3.4 Komponenty ORC cyklu

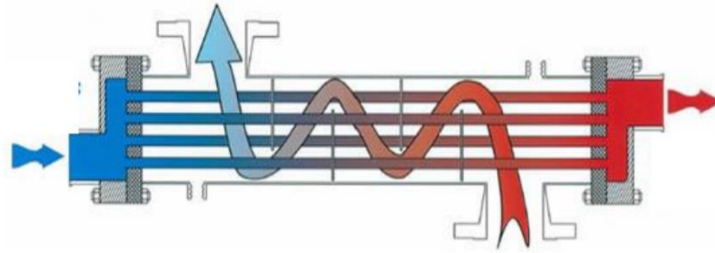
ORC cyklus je tvořen čtyřmi hlavními komponenty: výměníky tepla, expanzní zařízení, čerpadlo a generátor. Pokud se jedná o ORC v rámci spalování biomasy, přibývá další důležitá komponenta a to kotel. Parní oběhy dosahují mnohem vyšších tlaků v kotli než oběhy s organickou látkou. V ORC systémech tlak nepřesahuje 3 MPa. Pro takto nízký tlak může být použita jednodušší a levnější konstrukce kotle. Také díky relativně malým rozdílům hustoty mezi parou a kapalinou u organických tekutin s vysokou molekulovou hmotností, umožňují ORC cykly použití průtočných kotlů, které nemají parní bubnu. [4]

#### 3.4.1 Výměníky tepla

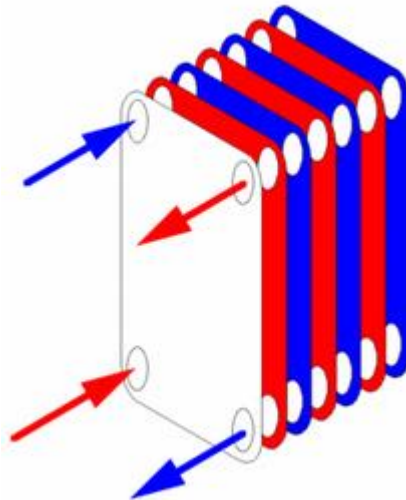
Výměníky jsou využívány pro přenos tepelné energie pracovní látky, pro uvolňování tepla v kondenzátoru a rekuperaci tepla v emisní páře organické látky vystupující z turbíny. Představují hlavní podíl na celkových nákladech systému. Primární výměník se u podkritických cyklů skládá z ekonomizéru, výparníku a případně přehřívače. U superkritických cyklů je uspořádán jako průchozí výměník tepla. [1]

V poli ORC systémů se nejběžněji používá trubkový výměník (viz Obrázek 16), ten je tvořen svazkem trubek, kterými proudí kapalina, jejíž teplota je potřeba změnit. Trubky jsou z vnější strany topeny nebo ochlazovány teplosměnným médiem, které proudí v plášti. Trubkové výměníky se používají hlavně ve větších systémech, v malých systémech se kvůli své kompaktnosti používají deskové výměníky. Výměník instalovaný na zdroji tepla musí odolávat vysokým teplotám a být odolný vůči korozi a znečištění. [4] [1] [20]

Důležitými parametry pro tepelný výměník jsou pokles tlaku, teplosměnná plocha a PPDT (z anglického „pinch point temperature difference“). PPDT je oblast výměníku, kde je teplotní rozdíl mezi horkou a studenou tekutinou nejmenší. Z termodynamického hlediska zvětšování teplosměnné plochy výměníku pozitivně ovlivňuje jeho výkon, ale také se zvýší rozměry zařízení, a tedy i cena. Pokud má výměník teplosměnnou plochu větší než 2000 m<sup>2</sup>, je výhodnější použít trubkový výměník. U teplosměnných ploch menších než 2000 m<sup>2</sup> je vhodné použít výměník deskový. [22]

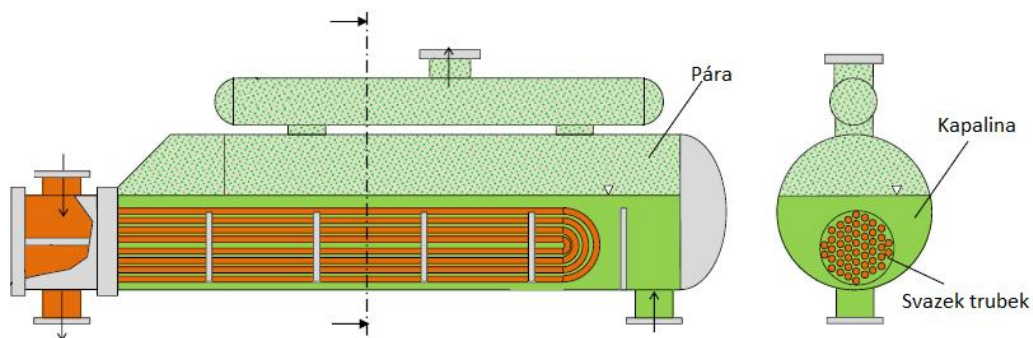


Obrázek 16: Trubkový výměník [20]



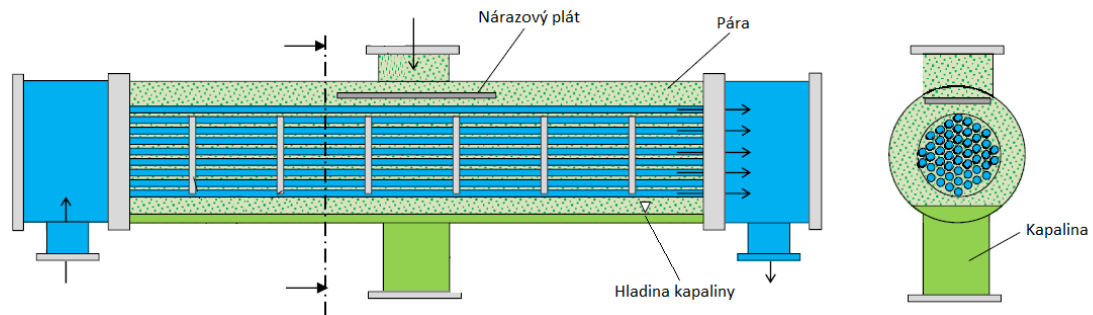
Obrázek 17: Deskový výměník [28]

Jako výparník se běžně využívá reboiler typu Kettle (viz Obrázek 18), což je výměník se svazkem U-trubek, s částečně zatopeným mezitrubkovým prostorem, kde nastává velkoobjemový var. [21]



Obrázek 18: Reboiler typu Kettle [1]

Podobná konfigurace se používá pro vodou chlazené kondenzátory (viz Obrázek 19). Studená voda proudí v trubkách a pára v plášti. Pára vstupuje ze shora, naráží na desku (nárazový plát) a je roznášena na celý svazek trubek. Pára přichází do styku se studenými trubicemi a kondenzuje. Hladina zkondenzované kapaliny musí být v dobře definovaném rozmezí. Hladina nemůže být příliš nízká, aby nedocházelo ke kavitaci u čerpadla. Zároveň musí být maximální hladina na takové úrovni, aby nebyly ponořeny žádné trubky. Aby se zamezilo vniknutí vzduchu do oběhu, měl by být tlak při kondenzaci média vyšší než atmosférický. Voda má obecně kondenzační tlak nižší, ale některé organické tekutiny tento požadavek splňují. [1] [4]



Obrázek 19: Kondenzátor [1]

### 3.4.2 Expanzní zařízení

Expanzní zařízení je klíčovou součástí v ORC systému. Parní cykly běžně používají několikastupňové turbíny, kvůli vysokému tlakovému poměru a poklesu entalpie. U ORC systémů je pokles entalpie mnohem nižší a obvykle se používají jednostupňové, nebo dvoustupňové turbíny, což znamená nižší náklady. Typ expanzního zařízení se může měnit v závislosti na velikosti systému a vlastnostech pracovní tekutiny. Expanzní zařízení se dělí do dvou hlavních kategorií turbo-expandéry a objemové expandéry. [1] [4]

Turbo-expandéry jsou tvořeny sledem stupňů, každý stupeň tvoří stator a rotor. Jsou vhodné pro střední/velké elektrárny, jejich typické rozpětí výkonu je 100 kW až 15 MW. Pro výkony vyšší než 0,5 MW je u ORC systémů obvyklou volbou axiální turbína. Je-li výkon menší než 0,5 MW, je konstrukce účinného turbo-mechanického stroje velmi náročná a může být výhodnější použít objemový expandér. [1]

Mezi hlavní typy objemových expandérů patří pístové, šroubové, spirálové, lamelové. Využití objemových expandérů může být výhodné zejména v aplikacích, kde je systém nucen pracovat v širším rozsahu provozních podmínek (tlak, teplota, průtok) s ohledem na proměnné parametry tepelného zdroje, což je často typické pro odpadní teplo. V porovnání s turbínou jsou objemové expandéry schopné pracovat s uspokojivější izoentropickou účinností v širším rozsahu provozních parametrů. Objemové expandéry pracují přerušovaně, na principu plnění a uzavírání jednotlivých pracovních komor. Přerušovaný provoz je poměrně pomalý, a proto jsou taková zařízení vhodná zejména pro nižší rychlost, výkon a pro menší hmotnostní tok. Pístové expandéry pracují s neměním se objemem od sací komory, přes expanzní až po výfukovou komoru. Přejít mezi jednotlivými prostory tvoří ventily. Ze sací komory se po jedné otáčce hřídele stane expanzní komora, která se následně vyvine ve výfukovou. [3] [22]

Rotační expandéry nevyužívají ventily. Sání a výfuk u těchto typů expandérů nejsou umístěny vedle sebe, což má pozitivní vliv na objemovou účinnost, jelikož dojde k omezení přenosu tepla mezi těmito kanály. Pístové expandéry na druhou stranu představují menší vnitřní tepelné ztráty, než expandéry šroubové nebo spirálové. Některé druhy objemových expandérů dokáží pracovat i s mokrou parou, např. šroubový expandér dokáže pracovat až s 30 % kapalné fáze. [3]

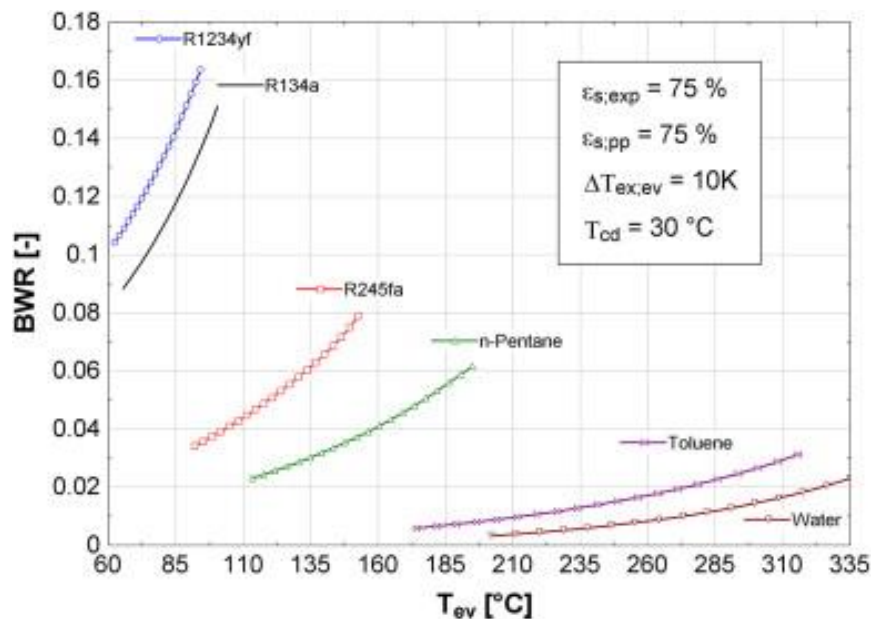
### 3.4.3 Čerpadlo

Ve většině ORC systémů se čerpadlo používá k regulaci hmotnostního průtoku pracovní tekutiny. ORC čerpadla jsou obvykle vícestupňová odstředivá. Spotřeba čerpadla je úměrná objemovému průtoku a tlakovému rozdílu mezi vstupem a výstupem. Podíl příkonu čerpadla a výkonu turbíny (back work ratio-BWR) popisuje, kolik procent z výkonu turbíny je využito na napájení čerpadla. U parních cyklů bývá průtok vody poměrně malý a hodnota BWR je většinou 0,4 %. U vysokoteplotních ORC je BWR typicky 2-3 %. U nízkoteplotních

ORC jsou hodnoty BWR vyšší než 10 %. Čím nižší je kritická teplota pracovní tekutiny, tím vyšší je BWR. BWR také roste s teplotou vypařování (viz Obrázek 20). [4]

Organické tekutiny jsou drahé, mohou být hořlavé, toxické, nebo s vysokými hodnotami GWP a ODP. Je proto důležité zajistit úplnou těsnost cyklu. Proto jsou obvykle preferována membránová čerpadla, namísto pístových. U odstředivých čerpadel je těsnost zajištěna hřídelovým těsněním. [3]

Dalším důležitým parametrem čerpadla je minimální požadovaný vstupní tlak, který umožňuje čerpadlu čerpat v souladu s výkonovou křivkou a za účelem zabránění odpařování čerpané kapaliny tak, aby se zabránilo kavitaci uvnitř čerpadla. Pokud je z nějakého důvodu obtížné zajistit, aby byl provozní tlak pro všechny průtoky vyšší než minimální požadovaný tlak, jenž je stanoven výrobcem čerpadla, pak se pracovní látka před sáním čerpadla záměrně podchlazuje. [3]



Obrázek 20: BWR v závislosti na teplotě vypařování různých tekutin [4]

#### 3.4.4 Generátor

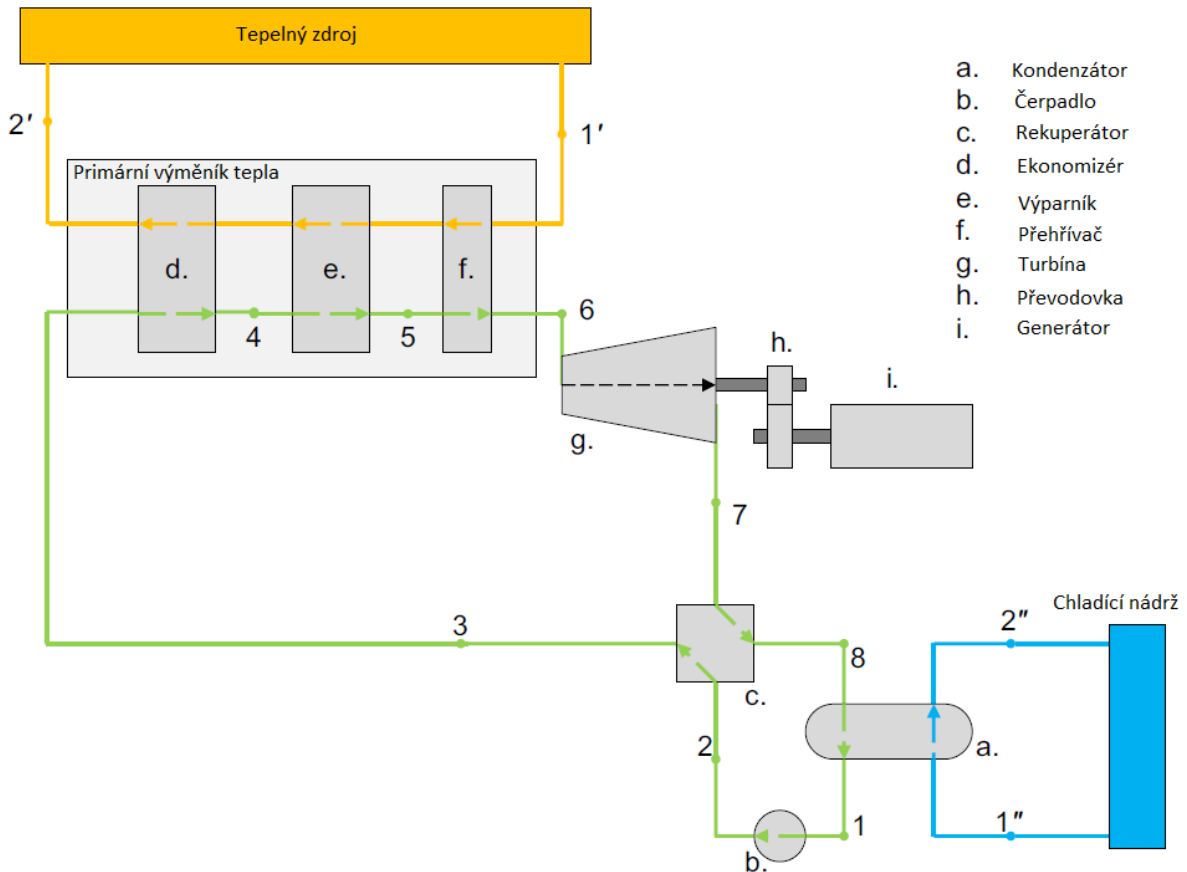
Generátor převádí mechanickou energii na elektrickou, obvykle se točí při frekvenci sítě a je přímo spojen s expandérem. V oblasti ORC však variabilita pracovních tekutin a aplikací vede k tomu, že expandéry mají velmi odlišné optimální otáčky. Velké elektrárny obvykle vyžadují pomalé stroje, zatímco malé ORC systémy vyžadují rychlé radiální turbíny. V prvním případě je možné použít generátor rotující při 3000, 1500, 1000 nebo 750 otáčkách za minutu. Alternativou může být převodovka mezi hřídelem turbíny a hřídelem generátoru. Převodovka může být použita i pro aplikace, které vyžadují rychlou turbínu, ale nad určitým převodovým poměrem není použití převodovky vhodné kvůli vysokým mechanickým ztrátám. [1]

### 3.5 Layout elektrárny

Běžně se používá v oblasti ORC pouze několik layoutů elektráren. ORC cykly lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na jednostupňové a vícestupňové. Jednostupňové cykly lze dále rozdělit na podkritické a superkritické cykly, zatímco vícestupňové cykly jsou jen podkritické. [1]

### 3.5.1 Jednostupňové cykly

Jednostupňový cyklus je nejjednodušší druh uspořádání elektrárny. Vyžaduje malý počet součástí: čerpadlo, primární výměník tepla, turbínu a kondenzátor. Rekuperátor se používá, pokud není možné z technických důvodů chladit zdroj tepla na okolní teplotu. Na obrázku je uvedeno základní rozvržení zařízení pro rekuperativní jednostupňový cyklus. [1]



Obrázek 21: Layout jednostupňového cyklu [1]

Pracovní tekutina je extrahována z kondenzátoru (1) a její tlak je čerpadlem (b) zvýšen na maximální tlak v cyklu. Pokud je přítomen rekuperátor (c), je tekutina zahřívána parou, kterou vypouští turbína (7). Pracovní tekutina vstupuje do primárního výměníku (3), kde absorbuje teplo z tepelného zdroje. Tekutina s admissními parametry (6) expanduje v turbíně (g), nebo v objemovém expandéru. Mechanická práce je přeměněna na elektrickou energii generátorem (i), který je připojen k hřídeli turbíny. Pokud se rychlost otáčení turbíny liší od frekvence sítě, lze použít generátor s více než jedním párem pólů, nebo převodovku (h). Expandovaná tekutina dále protéká rekuperátorem a nakonec kondenzuje. Díky své jednoduchosti a účinnosti je tento druh cyklu první volbou pro mnoho různých aplikací (geotermální a sluneční energie, odpadní teplo, spalování biomasy). [1]

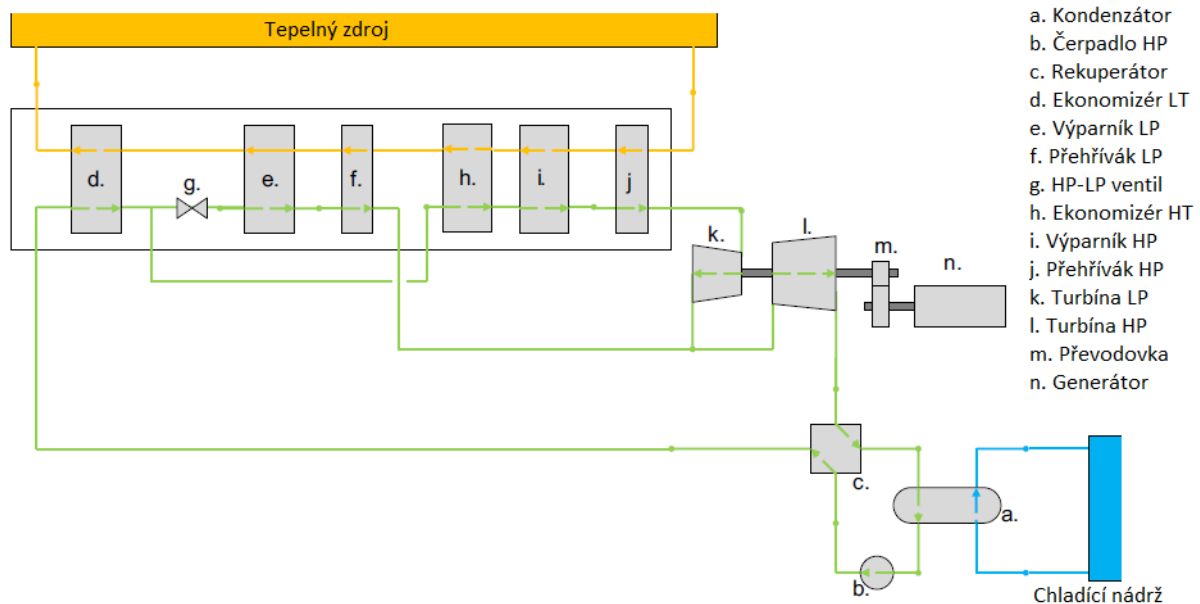
Podkritický cyklus má maximální tlak nižší, než je tlak kritický. Podkritické cykly jsou nejčastější konfigurací pro velké geotermální elektrárny, pro spalování biomasy a v aplikacích využití odpadního tepla. Pokud má pracovní tekutina kritickou teplotu vyšší než maximální teplota tepelného zdroje, je použití přehříváku škodlivé, kvůli snížení hmotnostního průtoku pracovní tekutiny a snížení výroby energie. Pokud se naopak používá tekutina o nízké kritické teplotě, je přehřátí doporučeno, jelikož to umožňuje zvýšení průměrné teploty v procesu tepelného zavedení, aniž by se omezilo využití zdroje tepla.

Obecně je výhodnější používat pracovní látky s vysokou kritickou teplotou, zatímco pracovní látky s nízkou kritickou teplotou se používají, pokud je nutné udržovat kondenzační tlak vyšší než okolní, nebo pokud jsou přítomna omezení objemového průtoku, nebo expanzního objemu. [1]

Superkritické cykly mají maximální tlak vyšší než kritický tlak. Pracovní tekutina se zahřívá z podchlazené kapaliny na přehřátou páru s hladkým přechodem nad kritický bod. Fázová změna je postupná a všechny fyzikální a termodynamické vlastnosti se mění bez přerušení. Superkritické cykly mohou dosáhnout vyšší účinnosti ve srovnání s podkritickými pokud je k dispozici konečný zdroj tepelné kapacity. Navzdory vyšší dosažitelné účinnosti mají superkritické cykly obecně vyšší tlaky než cykly podkritické a jsou vyžadována dražší zařízení. [1]

### 3.5.2 Vícetupňové cykly

Tento druh cyklu je dosud využíván jen zřídka, i když může dosáhnout vyšší účinnosti ve srovnání s podkritickými jednostupňovými cykly. Cyklus vyžaduje složitější uspořádání zařízení a dražší vybavení (dvě turbíny, větší plochy pro přenos tepla atd.). Z tohoto důvodu jsou navrženy pouze ve zvláštních aplikacích, kde je účinnost přeměny energie hodně důležitá, nebo pokud fixní náklady na zdroj tepla výrazně převyšují náklady na energetický blok. Příkladem, kde by mohl být vícetupňový cyklus ziskový, jsou hluboké geotermální nádrže s vysokými náklady na průzkum a vrtání. [1]



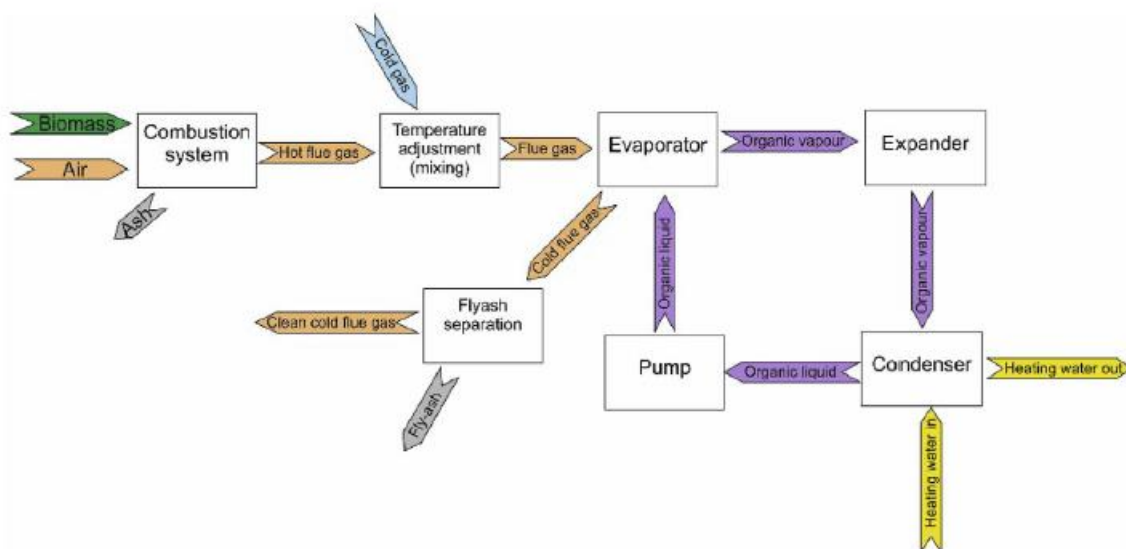
Obrázek 22: Layout vícetupňového cyklu [1]

## 4 Analýza experimentálních dat

### 4.1 Experimentální zařízení

Experimentální zařízení je mikro-kogenerační ORC jednotka s kotlem na biomasu. Tepelný výkon je 50 kW, elektrický 2 kW a celková účinnost systému je 78,4 % (tepelná + elektrická účinnost). Obrázek 23 představuje schéma systému. Palivo (biomasa) je se vzduchem dodáváno do spalovací komory, která je oddělena od výparníku ORC. Pracovní látkou je hexamethyldisiloxan (MM). Pracovní látka je ohřívána přímo, není potřeba využít další okruh. Pracovní látka se vypařuje, prochází expandérem a vytváří užitečnou práci. Následně tekutina kondenzuje a napájecí zubové čerpadlo přivádí kapalnou tekutinu zpět do výparníku, takže je cyklus uzavřen. [29]

Kondenzátor je chlazen vodou, která je využívána pro vytápění. Rekuperace emisní organické páry není v systému zavedena kvůli složitosti, poklesu tlaku ve výměníku, nebo kvůli zvýšení komínové ztráty. Potenciální zvýšení účinnosti přidáním rekuperátoru je malé a kvůli vysokým nákladům se nevyplatí. [29]

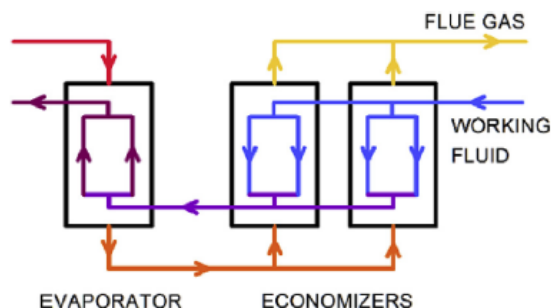


Obrázek 23: Schéma experimentální mikro CHP ORC jednotky [29]

### 4.2 Technické parametry systému

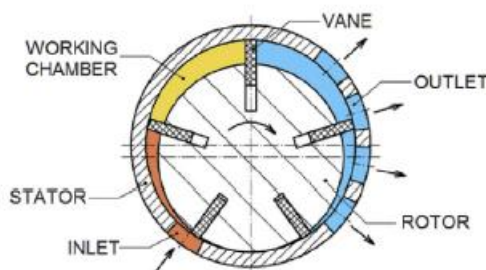
Palivo pro kotel je dřevní štěpka. Jak již bylo zmíněno spaliny přímo ohřívají pracovní látku a není tedy vložen další okruh. Hlavním důvodem je značná spotřeba čerpadla v přidaném okruhu, přísné požadavky na jeho tepelný odpor, a vysoké náklady. Primární spalinový výměník je trubkový spirálový. Spaliny nejprve proudí do výparníku a poté do dvou paralelních ekonomizérů (viz Obrázek 24). [29]



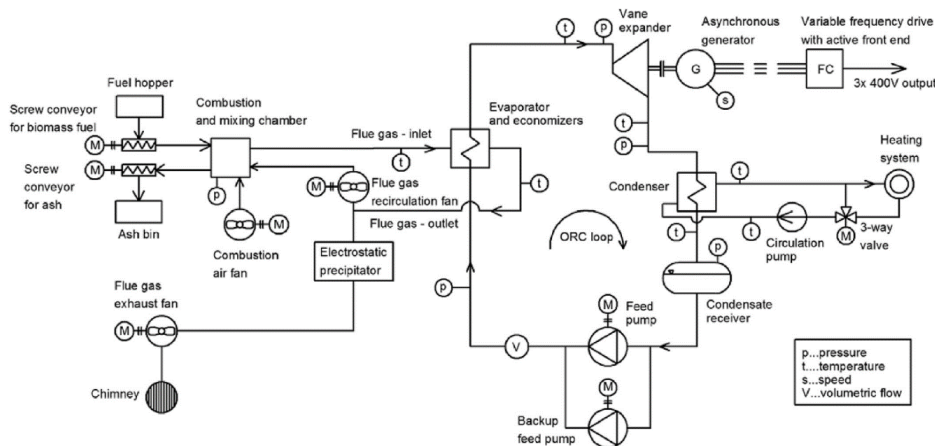


Obrázek 24: Konfigurace primárního spalínového výměníku [29]

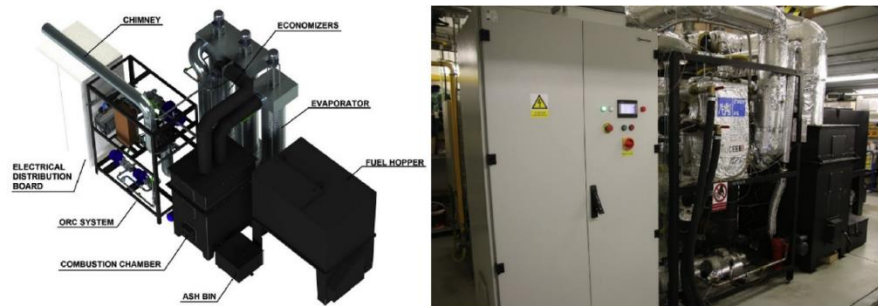
Systém využívá lamelový expandér. Princip fungování lamelového expandéru je na Obrázku 25. Lopatky jsou uloženy v drážkách v excentricky uloženém rotoru a odstředivá síla je tlačí směrem ke stěně statoru, čímž se vytvářejí komory. Jak se zvětšují komory, expanduje i pracovní tekutina a vytváří točivý moment. Díky svým nízkým nákladům, dimenzím, spolehlivosti a dostupnosti byl jako kondenzátor vybrán deskový výměník. [29]



Obrázek 25: Schématické zobrazení lamelového expandéru [29]



Obrázek 26: Technologické schéma mikro-kogenační ORC jednotky [29]



Obrázek 27: 3D model a fotografie mikro-kogenační ORC jednotky [29]

### 4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Prvním úkolem bylo zobrazit a analyzovat ustálené stavy z naměřených dat pro různé velikosti užitečného tepla vytvořením základních trendů. Druhým úkolem bylo stanovit izoentropickou účinnost expandéru.

#### 4.3.1 Vyhodnocení základních trendů

K vytvoření základních trendů je potřeba spočítat tzv. teplotenský modul  $\sigma$ , což je základní provozní ukazatel pro kogenerační jednotky. Je to podíl vytvořené elektrické energie a tepla (1). Průměrný teplotenský modul vychází 4,32 %, což znamená že vstupní energie je využita hlavně pro výstupní teplo.

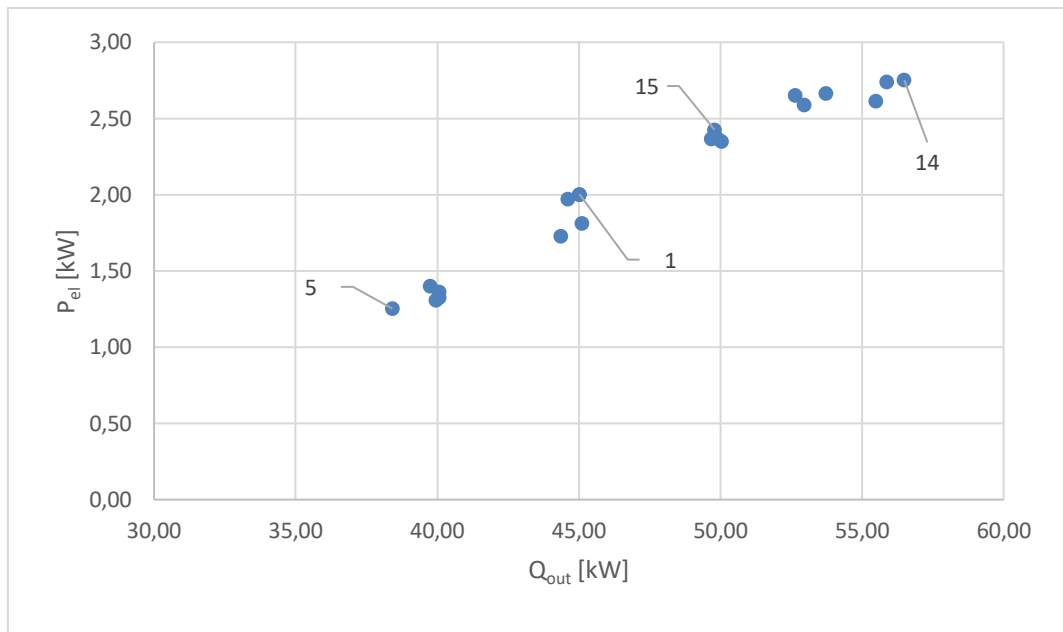
$$\sigma = \frac{P_{el}}{Q_{out}} \cdot 100 \quad (1)$$

Příklad výpočtu teplotenského modulu ustáleného stavu 2:

$$\sigma = \frac{1,73}{44,35} \cdot 100 = 3,90 \%$$

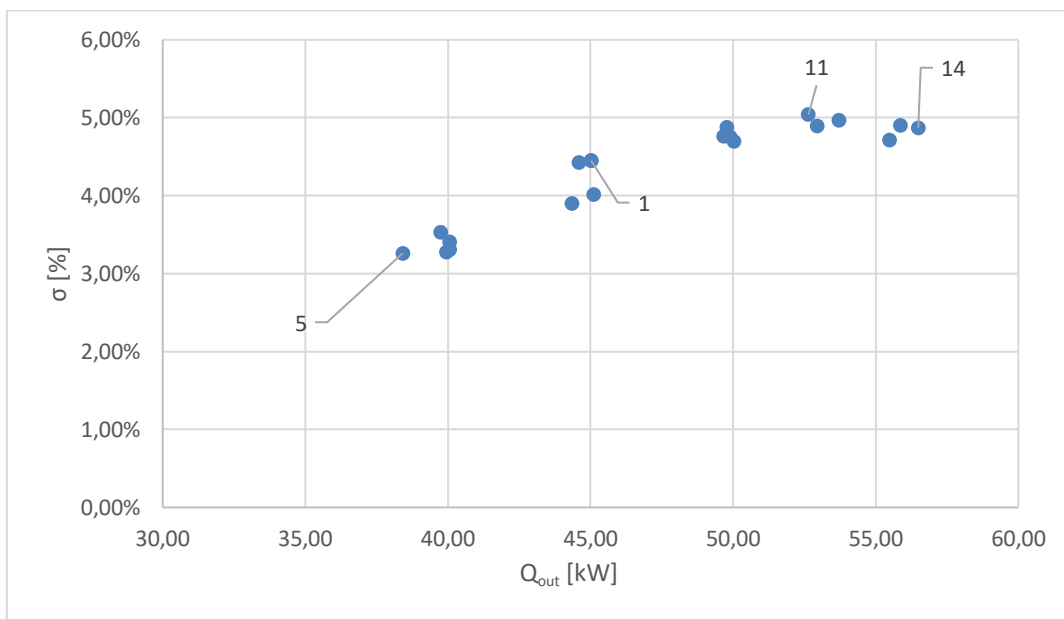
Ustálený stav č.	$P_{el}$ [kW]	$Q_{out}$ [kW]	$\sigma$ [%]	$\dot{V}$ [l/min]	$P_{mech}$ [kW]	$P_{mech}/P_{el}$ [-]	$T_{ad}$ [°C]	$p_{kon}$ [kPa]	$T_{kon}$ [°C]	$\Delta p_v$ [kPa]
1	2,00	45,02	4,45	9,84	3,14	1,566	180,25	62,49	71,53	129,68
2	1,73	44,35	3,90	9,75	3,05	1,766	179,21	59,60	71,72	127,70
3	1,81	45,12	4,01	9,64	3,12	1,725	178,95	52,28	67,34	124,45
4	1,31	39,94	3,28	9,02	2,60	1,988	175,21	63,05	73,21	122,56
5	1,25	38,42	3,26	8,53	2,50	1,996	172,62	55,77	69,07	115,35
6	1,36	40,06	3,40	8,89	2,63	1,926	174,39	58,13	70,31	120,93
7	1,33	40,07	3,31	8,93	2,63	1,979	174,75	59,73	70,95	125,36
8	1,40	39,75	3,53	8,76	2,71	1,931	175,15	57,73	69,62	129,30
9	2,74	55,88	4,90	11,46	4,04	1,472	186,45	45,03	65,59	156,21
10	2,67	53,72	4,96	10,93	3,90	1,463	184,60	40,82	63,12	150,05
11	2,65	52,64	5,04	10,97	3,92	1,477	185,82	47,81	67,69	156,81
12	2,62	55,49	4,71	10,90	3,88	1,485	182,68	36,34	56,48	145,50
13	2,59	52,96	4,89	10,64	3,86	1,491	183,28	41,24	60,48	149,21
14	2,75	56,49	4,87	11,23	4,05	1,471	185,86	40,90	60,18	150,53
15	2,43	49,79	4,87	10,24	3,60	1,482	181,80	47,33	63,17	137,67
16	2,37	49,89	4,76	10,62	3,57	1,505	183,41	57,39	69,46	141,31
17	2,37	49,67	4,76	10,38	3,55	1,502	182,32	52,20	66,01	138,55
18	1,97	44,60	4,42	9,81	3,09	1,565	179,42	62,48	71,94	128,37
19	2,35	50,04	4,70	10,71	3,56	1,514	184,82	62,24	71,19	142,53
20	2,00	45,02	4,45	9,84	3,14	1,566	180,25	62,49	71,53	129,68

Tabulka 3: Naměřené a dopčítané hodnoty



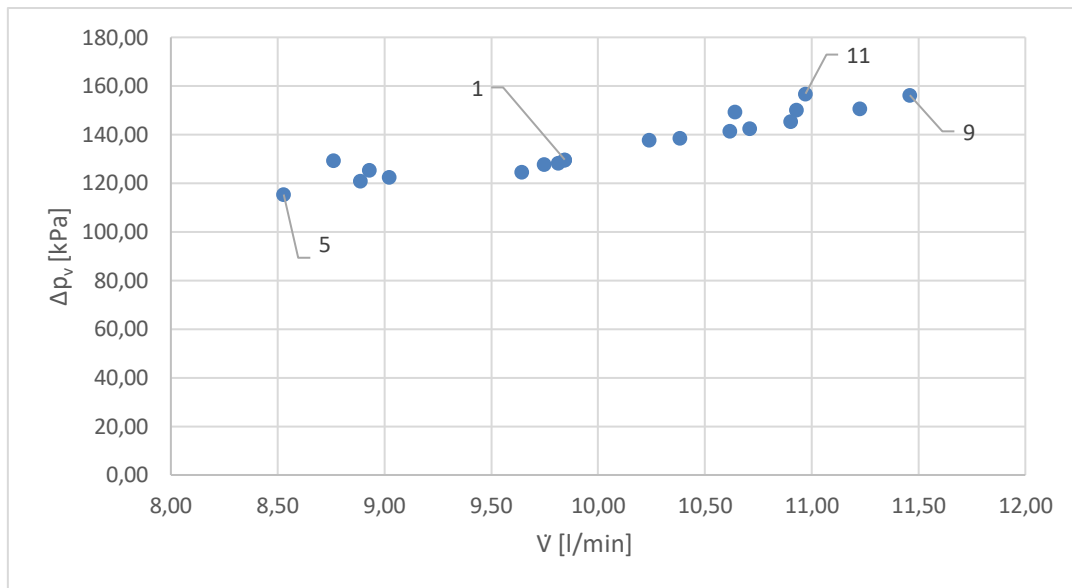
Graf 1: Elektrický výkon jako funkce užitečného tepla

Elektrický výkon roste s rostoucím užitečným teplem. Nejvyšší hodnoty dosáhl ustálený stav č. 14, který se vyznačuje i nejvyšším rozdílem admissní a emisní teploty. Stav č. 14 dosáhl i nejvyšší hodnoty mechanického výkonu.



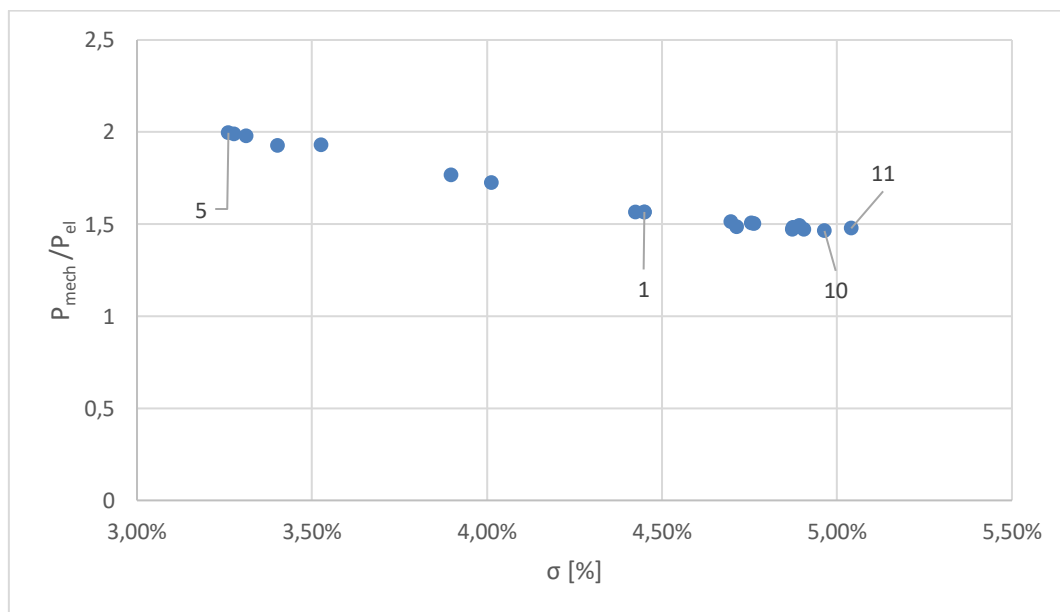
Graf 2: Teplárenský modul jako funkce užitečného tepla

Nejvyšší hodnoty teplárenského modulu 5,04 % dosáhl stav č. 11, což se vyznačuje i největším rozdílem admissního a emisního tlaku.



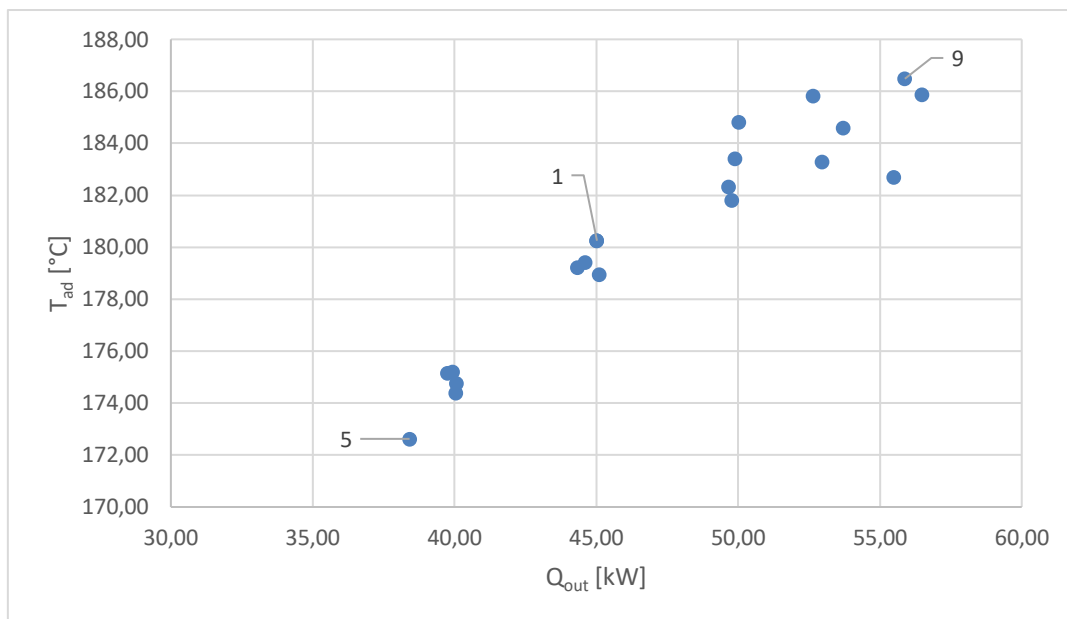
Graf 3: Tlaková ztráta ve výparníku jako funkce průtoku

Tlaková ztráta roste s rostoucím průtokem, nejvyšší hodnotu tlakové ztráty dosáhl stav č. 11.



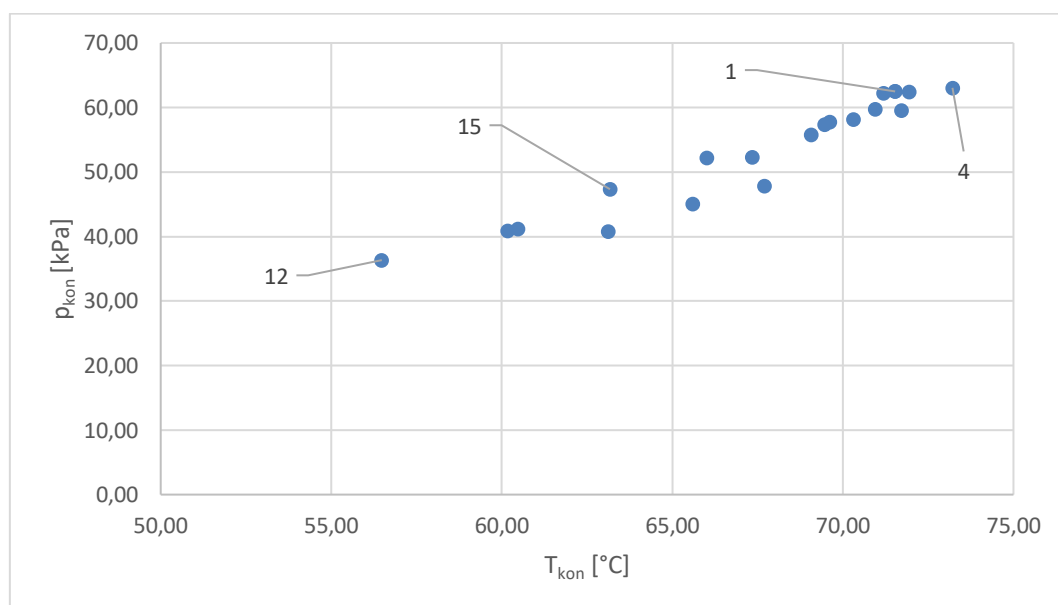
Graf 4: Podíl mechanického a elektrického výkonu jako funkce teplotního modulu

Podíl mechanického a elektrického výkonu klesá s rostoucím teplotním modulem, protože se zvyšuje elektrický výkon. Nejnižší hodnotu podílu mechanického a elektrického dosáhl stav č. 10.



Graf 5: Admisní teplota jako funkce užitečného tepla

Admisní teplota roste s rostoucím užitečným teplem. Nejvyšší admisní teploty dosáhl stav č. 9, který dosáhl i nejvyššího admisního tlaku.



Graf 6: Kondenzační tlak jako funkce kondenzační teploty

Kondenzační tlak roste s kondenzační teplotou. Nejvyšší kondenzační teploty a tlaku dosáhl stav č. 4, což se vyznačuje i nejnižším entalpickým rozdílem. Ustálený stav č. 12 se vyznačuje nejvyšším entalpickým rozdílem a nejnižšími hodnotami kondenzačního tlaku a teploty.

### 4.3.2 Výpočet izoentropické účinnosti

Izoentropickou účinnost expandéru lze vypočítat dle následujícího vztahu (2):

$$\eta_{exp} = \frac{P_{mech}}{\dot{m} \cdot \Delta h} \cdot 100 \quad (2)$$

Hmotnostní průtok lze vypočítat ze vztahu (3), hustota pracovní látky MM je 710 kg/m<sup>3</sup>. Dále je nutné vypočítat rozdíl entalpií na vstupu a výstupu expandéru  $\Delta h$ . Entalpie je možné zjistit

pomocí programu CoolProp (plugin do aplikace MS office), což je databáze vlastností tekutin. Z hodnot admisní teploty a admisního tlaku lze zjistit entalpii na vstupu do expandéru. Protože se jedná o ideální (izoentropický) průběh expanze, entalpii na výstupu je nutné stanovit dle entropie na vstupu a tlaku na výstupu expandéru. Entropie na vstupu se stanoví dle admisní teploty a admisního tlaku.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (3)$$

Příklad výpočtu izoentropické účinnosti pro ustálený stav 2:

$T_{ad} = 179,21 \text{ °C} = 452,36 \text{ K}$ ;  $p_{ad} = 529,786 \text{ kPa}$ ;  $T_{em} = 154,04 \text{ °C} = 427,19$ ;  $p_{em} = 62,030 \text{ kPa}$ ;  
 $\rho_{MM} = 710 \text{ kg/m}^3$ ;  $\dot{V} = 9,75 \text{ l/min} = 0,0001625 \text{ m}^3/\text{s}$

Výpočet hmotnostního průtoku podle vzorce (3):

$$\dot{m} = 0,0001625 \cdot 710 = 0,115 \text{ kg/s}$$

Výpočet entalpie na vstupu do expandéru pomocí CoolProp dosazením admisní teploty v Kelvinech a admisního tlaku v Pa:

Property Calculator	
Fluid Type	PureFluids
Fluid	MM
Output Name	H
Input Name 1	T
Input Value 1	452,36
Input Name 2	P
Input Value 1	529786
Result	323 117,00

Obrázek 28: Výpočet entalpie na vstupu do expandéru

Entalpie na vstupu  $h_{in} = 323\ 117 \text{ J/kg}$

Výpočet entalpie na výstupu expandéru pomocí CoolProp:

Jedná se o izoentropický průběh expanze, entalpii na výstupu je tedy nutné stanovit dle entropie na vstupu a tlaku na výstupu.

Property Calculator		Property Calculator	
Fluid Type	PureFluids	Fluid Type	PureFluids
Fluid	MM	Fluid	MM
Output Name	S	Output Name	H
Input Name 1	T	Input Name 1	S
Input Value 1	452,36	Input Value 1	757,18
Input Name 2	P	Input Name 2	P
Input Value 1	529786	Input Value 1	62030
Result	757,18	Result	279 026,44

Obrázek 29: Výpočet entropie na vstupu a entalpie na výstupu expandéru

Entropie na vstupu do expandéru  $s_{in} = 757,18 \text{ J/K}$

Entalpie na výstupu expandéru  $h_{out} = 279\,026 \text{ J/kg}$

Výpočet izoentropické účinnosti podle vzorce (1):

$$\eta_{exp} = \frac{3050}{0,115 \cdot 44091} \cdot 100 = 60,2\%$$

Průměrná hodnota izoentropické účinnosti vyšla 59,2 %. Izoentropickou účinnost ovlivňují například interní úniky pracovního média, počet lopatek, nebo tlak ve výparníku.

Ustálený stav č.	$h_{in}$ [J/kg]	$s_{in}$ [J/K]	$h_{out}$ [J/kg]	$\Delta h$ [J/kg]	$p_{em}$ [kPa]	$T_{em}$ [°C]	$p_{ad}$ [kPa]	$T_{ad}$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\eta_{exp}$ [%]
1	324841	760,18	281265	43576	64,96	154,80	540,209	180,25	0,116	62,1
2	323117	757,18	279026	44091	62,03	154,04	529,786	179,21	0,115	60,2
3	322689	756,44	276165	46524	54,95	153,41	527,100	178,95	0,114	58,9
4	316492	745,68	275290	41202	65,36	151,61	490,715	175,21	0,107	59,1
5	312189	738,16	269643	42546	57,96	148,81	466,831	172,62	0,101	58,2
6	315079	743,07	272557	42522	60,43	150,46	484,409	174,39	0,105	58,8
7	315724	744,33	273612	42112	61,96	150,87	486,490	174,75	0,106	58,8
8	316388	745,49	273407	42981	59,96	150,95	490,258	175,15	0,104	60,5
9	335088	777,78	283151	51937	49,97	159,09	607,744	186,48	0,136	57,1
10	332017	772,55	278723	53294	45,01	157,00	586,281	184,60	0,129	56,8
11	333995	775,88	283178	50817	51,96	158,60	600,566	185,82	0,130	59,3
12	328816	766,95	273894	54922	40,02	155,50	566,566	182,68	0,129	54,8
13	329805	768,65	277057	52748	44,95	156,36	572,994	183,28	0,126	58,1
14	334087	776,10	280196	53891	44,96	158,16	600,305	185,86	0,133	56,5
15	327389	764,55	277600	49789	50,04	154,86	556,605	181,80	0,121	59,7
16	330045	769,13	283373	46672	60,00	156,95	573,686	183,41	0,126	60,7
17	328256	766,06	280219	48037	54,97	155,67	561,852	182,32	0,123	60,1
18	323463	757,78	280252	43211	64,96	154,21	531,921	179,42	0,116	61,6
19	332371	773,14	286760	45611	64,96	158,51	588,914	184,82	0,127	61,4
20	324841	760,18	281265	43576	64,96	154,80	540,209	180,25	0,116	62,1

Tabulka 4: Naměřené a dopočítané hodnoty

## Závěr

Hlavními zdroji nízko-potenciálního tepla jsou geotermální a solární energie, dále biomasa a odpadní teplo ze spalovacích motorů a průmyslových procesů. K zužitkování tepla s nízkým energetickým potenciálem je vhodný ORC systém. Obecně se nevyskytuje mnoho ORC aplikací, které využívají nízko-potenciální teplo v rámci spalování biomasy. Naopak v oblasti využívání odpadního tepla jsou ORC systémy poměrně časté. Výkony aplikací ORC systémů využívajících nízko-potenciální teplo se pohybují od jednotek kW až po desítky MW.

Využití ORC systémů je výhodné především díky nižšímu bodu varu organických tekutin, a tedy možnosti využití zdrojů tepla s nízkým nebo středním energetickým potenciálem. Vhodně zvolená pracovní látka závisí na zdroji tepla a na jejích termodynamických vlastnostech. Další vlastnosti, které je třeba brát v potaz jsou hořlavost, toxicita, vliv na globální oteplování, nebo případné poškození ozonové vrstvy.

ORC systém tvoří 4 hlavní komponenty: tepelné výměníky, expanzní zařízení, čerpadlo, generátor. Výměník představuje hlavní podíl na celkových nákladech systému, velké systémy obvykle využívají trubkové výměníky, malé systémy hlavně deskové. Pro výkony nad 0,5 MW se obvykle využívá turbína, pro nižší výkony může být vhodná alternativa objemový expandér.

V poslední části práce byly vyhodnoceny experimentální data mikro-kogenerační ORC jednotky. Pomocí grafů jsou zobrazeny základní trendy například závislost veličin v kondenzátoru, nebo závislost tlakové ztráty ve výparníku na teplotě modulu. Dále byla vypočtena izoentropická účinnost expandéru, maximální hodnota byla 62 %, průměrná hodnota vyšla kolem 59 %.



## Reference

- [1] MACCHI Ennio and ASTOLFI Marco. *Organic Rankine cycle (ORC) power systems: technologies and applications*. Kidlington: Woodhead Publishing is an Imprint of Elsevier, [2017]. Woodhead Publishing in energy, no. 107. ISBN 978-0-08-100511-8.
- [2] MOTLÍK, Jan. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. 2. dopl.vyd. Praha: ČEZ, 2007 [cit. 2019-12-15]. ISBN 978-80-239-8823-9. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne\\_zdoje\\_energie\\_a\\_moznosti\\_jejich\\_vyuziti\\_pro\\_cr.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf)
- [3] VOBOŘIL, David. *Geotermální energie* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/geotermalni-energie>
- [4] QUOILIN, Sylvain, Martijn Van Den BROEK, Sébastien DECLAYE, Pierre DEWALLEF a Vincent LEMORT. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **22**, 168-186 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.028. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113000592>
- [5] OVERTON, Thomas. *TOP PLANT: Tosunlar 1 Akca Plant, Saraykoy, Denizli, Turkey* [online]. 2016 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/tosunlar-1-akca-plant-saraykoy-denizli-turkey-2/>
- [6] MORAVEC, Jan. *Video: Koncentrační solární elektrárna jako základ pro nové kogenerační zařízení* [online]. 2018 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/video-koncentracni-solarni-elektrarna-jako-zaklad-nove-kogeneracni-zarizeni>
- [7] *16.6MWTH CSP FOR COMBINED HEAT AND POWER GENERATION, DENMARK* [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.aalborgcsp.com/projects/166mwth-csp-for-combined-heat-and-power-generation-denmark/>
- [8] SHERRARD, Alan, JEŘÁBKOVÁ, Julie: Polsko: teplo z biomasy v systému ORC. *Biom.cz* [online]. 2017-06-01 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/polsko-teplo-z-biomasy-v-systemu-orc>. ISSN: 1801-2655.
- [9] KUNC, Jan a Libor NOVÁK. *Biomasa - efektivní palivo pro ORC technologii* [online]. 11.4.2005 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/2455-biomasa-efektivni-palivo-pro-orc-technologie>
- [10] ŠKORPÍK, Jiří. *Tepelné oběhy a jejich realizace: Transformační technologie* [online]. Brno, 2006 [cit. 2020-03-10]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/06.html#rankine-clausiuv-obeh-R-C-obeh-parni-obeh>
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. *Parní turbína v technologickém celku: Transformační technologie* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-03-10]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/25.html#alternativni-pracovn%C3%AD-latky-v-parnich-obezich>
- [12] Organický Rankinův cyklus (ORC) | UCEEB. UCEEB | *Univerzitní centrum energeticky efektivních budov* [online]. Copyright © 2014 [cit. 14.03.2020]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/projekty/organicky-rankinuv-cyklus-orc>

- [13] Organic Rankine cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle)
- [14] Jaké jsou možnosti využití geotermální energie v České republice?. *oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 2020-03-16] Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/jake-jsou-moznosti-vyuziti-geotermalni-energie-cesku>
- [15] *Energy education: Insolation* [online]. 2018 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Insolation#:~:text=Insolation%20is%20the%20incident%20solar,a%20set%20period%20of%20time.>
- [16] Solární konstanta (sluneční konstanta). *conVERTER - převody jednotek* [online]. Copyright © 2000 Jiří Bureš [cit. 16.04.2020]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/solarni-konstanta.htm>
- [17] TCHANCHE, Bertrand F., Gr. LAMBRINOS, A. FRANGOUDAKIS, G. PAPADAKIS a Vincent LEMORT. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, **15**(8), 3963-3979 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.024. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111002644>
- [18] KARELLAS, S., A.-D. LEONTARITIS, G. PANOUSIS, E. BELLOS a E. KAKARAS. Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry. *Energy* [online]. 2013, **58**(8), 147-156 [cit. 2020-05-28]. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.097. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544213003174>
- [19] HADDAD, Cynthia, Christelle PÉRILHON, Amélie DANLOS, Maurice-Xavier FRANÇOIS a Georges DESCOMBES. Some Efficient Solutions to Recover Low and Medium Waste Heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Energy Procedia* [online]. 2014, **50**(8), 1056-1069 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.125. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610214008613>
- [20] *Výměníky tepla* [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt3/10%20VymenikyTepla.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/10%20VymenikyTepla.pdf)
- [21] Modification of heat exchanger for steam generation - CORE Reader. *CORE – Aggregating the world's open access research papers* [online]. [cit. 2020-06-12] Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/30307442>
- [22] RICHTER, Lukáš. *ORC test rig with a screw expander; design and expectations* [online]. 2018, , 020019- [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1063/1.5081652. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5081652>
- [24] VÍTEK, Stanislav. *ORC OBĚH PRO VYUŽITÍ TEPLA KJ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=67160](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67160). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] STANĚK, Štěpán. *Porovnání stupně axiální parní turbíny pro různá proudící média* [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=148241](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148241). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [25] CHEN, Huijuan, D. Yogi GOSWAMI, Elias K. STEFANAKOS, Maurice-Xavier FRANÇOIS a Georges DESCOMBES. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat: Competitiveness of the Thermoacoustic Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(9), 3059-3067 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.006. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110001863>
- [26] HAVLÁSEK Martin, MÁŠA Vítězslav. The Use of Low-Potential Waste Heat in Industry. *Energetika: elektrárénství, teplárénství a užití energie*. Praha: Asociace energetických manažerů (AEM), 2016, 2(114-119). ISSN 0375-8842.
- [27] *Tzbinfo: Chladiva-úvod, definice, historie* [online]. 2015 [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/13626-chladiva-uvod-definice-historie>
- [28] Tepelný výměník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%BD\\_v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADk](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%BD_v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADk)
- [29] MASCUCH, Jakub, Vaclav NOVOTNY, Vaclav VODICKA, Jan SPALE a Zbynek ZELENY. Experimental development of a kilowatt-scale biomass fired micro – CHP unit based on ORC with rotary vane expander. *Renewable Energy* [online]. 2020, **147**, 2882-2895 [cit. 2020-07-15]. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.113. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148118310632>

