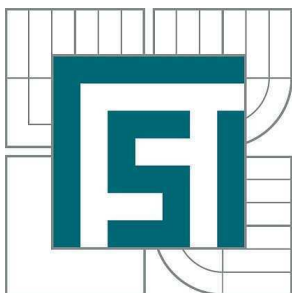


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VÝROBA ELEKTŘINY Z ODPADNÍHO TEPLA

LOW-POTENTIAL HEAT UTILIZATION FOR ELECTRICITY GENERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PAVEL ŠVÁBENSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN PAVLAS, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Švábenský

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Výroba elektřiny z odpadního tepla

v anglickém jazyce:

Low-potential heat utilization for electricity generation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vzrůstající ceny energií nutí výrobní sféru (průmyslové podniky) k hledání opatření vedoucích k výraznému snížení energetické náročnosti (snížení spotřeby tepla a elektřiny). Vzhledem k tomu, že spotřeba elektřiny je významnou nákladovou položkou, je její vlastní výroba zajímavou cestou k naplnění principu trvalé udržitelnosti. Systémy pro výrobu elektřiny pomocí alternativních oběhů než jsou klasické oběhy s parní turbínou (např. ORC - Organický Rankinův cyklus) prošli v poslední době prudkým vývojem a lze předpokládat jejich výrazné budoucí uplatnění v reálných aplikacích.

Cíle bakalářské práce:

Seznámení se s problematikou -Teoretický úvod k oběhům ORC

Zpracování přehledu výrobců systémů ORC a jejich produktové řady (reference).

Zhodnocení základních technických parametrů - účinnost výroby elektřiny

Popsat typickou technologii spalovny komunálních odpadů.

Ekonomická výhodnost uplatnění ORC v podmínkách ČR.

Seznam odborné literatury:

Petchers N., Combined heating, cooling & power handbook: The Fairmont Press, Inc., Lilburn, 2003

www.turboden.it

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na výrobu elektřiny z odpadního tepla. Práce se především zabývá Organickým Rankinovým cyklem (dále ORC), je zde shrnuta základní teorie ORC a pro srovnání je uveden i Rankin-Clausiusův cyklus. Další část práce je věnována ORC jednotce jako systému, je zde uveden přehled výrobců ORC jednotek a jejich produktových řad a provedeno krátké srovnání ORC jednotek. Dále je v práci řešena problematika spalovny a možnosti uplatnění ORC jednotky. Závěr práce je věnován ekonomickému zhodnocení uplatnění ORC v České republice s uvedením reálné studie proveditelnosti.

Klíčová slova

Organický Rankinův cyklus, Rankin – Clausiusův cyklus, ORC jednotka, odpadní teplo, spalovna

Abstract

This work is concentrating on production of electricity from waste heat. The work mainly deals with Organic Rankine cycle (further referred to as ORC), basic theory of ORC is summarised here and for comparison is given Rankin-Clausius cycle as well. Further part of the work is dedicated to ORC unit as a system, an overview of manufacturers of ORC units and their range of products is given here as well, short comparison of ORC units was carried out. Further the work is dealing with problems of the incinerator and the possibility of using the ORC unit. The conclusion of the work is dedicated to the economic evaluation of the application of ORC in the Czech Republic considering the implementation study.

Keywords

Organic Rankine cycle, Rankine-Clausius cycle, ORC unit, waste heat, incinerator

Bibliografická citace

ŠVÁBENSKÝ, P. *Výroba elektřiny z odpadního tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci a uvedl jsem veškeré zdroje informací a literatury, ze kterých jsem čerpal.

23. 5. 2012

Pavel Švábenský

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinovi Pavlasovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad a připomínek k vypracování této práce.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. RANKINE-CLAUSIŮV CYKLUS	10
3. ORGANICKÝ RANKINŮV CYKLUS	11
3.1. Hlavní části ORC	12
3.2. Funkce a T-s diagram ORC	14
3.3. Termická účinnost ORC, p-i diagram.....	14
4. Srovnání ORC a R-C.....	16
5. ORC JEDNOTKA JAKO SYSTÉM.....	17
5.1. Výrobci ORC jednotek a jejich produktové řady	17
5.2. Srovnání ORC jednotek	22
6. SPALOVNA KOMUNÁLNÍHO ODPADU A POTENCIÁL UPLATNĚNÍ ORC.....	23
6.1. Hlavní části a popis funkce spalovny komunálního odpadu	24
6.2. Možnost využití ORC ve spalovně komunálního odpadu.....	24
7. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ V PODMÍNKÁCH ČR	24
7.1. Ekonomické ukazatele	24
7.2. Možnost získání dotace.....	25
7.3. Příklad cenové nabídky.....	26
8. ZÁVĚR.....	27
9. POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ.....	28
10. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	30

1. ÚVOD

Rostoucí ceny energií, legislativa, Evropská unie nás začínají nutit k šetření s nimi. Je tedy nezbytně nutné rychlé zavádění energií šetřících opatření, mezi které patří izolace budov, úsporné zdroje světla, stroje s nižší spotřebou, apod. To ale v poslední době přestává stačit a vzhledem k tomu, že při řadě technologických procesů vzniká spousta odpadního tepla, tak se nabízí možnost jeho efektivního využití. V posledních letech se značně rozvíjí alternativní výroba el. energie, například pomocí Organického Rankinova cyklu (dále ORC), Kalinova cyklu, více na [2]. Tyto termodynamické oběhy značně rozšiřují možnost výroby el. energie i pro nižší teplotní spády. Se značným množstvím odpadního tepla se setkáváme v mnoha průmyslových procesech a odvětvích.

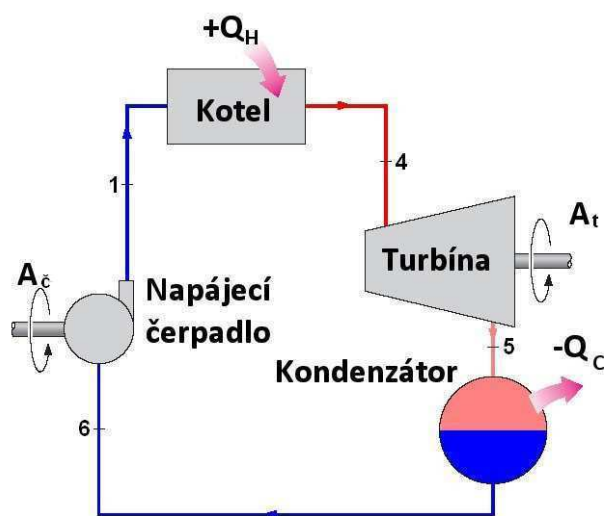
Možné zdroje odpadního tepla jsou následující:

- Hutnický průmysl
- Chemický průmysl
- Sklářny
- Cementárny
- Spalovací motory
- Plynové turbíny
- Tepelné elektrárny

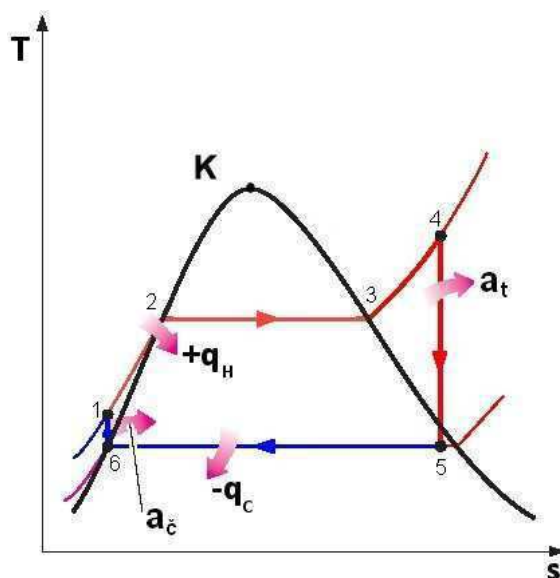
Před uvedením ORC je třeba představit Rankine – Clausiův parastrojný oběh, ze kterého ORC vychází.

2. RANKINE – CLAUSIŮV CYKLUS

Rankine-Clausiův cyklus (dále R-C) je parní oběh, který slouží k přeměně tepelné energie v energii mechanickou a následně energii elektrickou. Vyvinul jej William Johnov Macquorn Rankine a Rudolf Clausius v polovině 19. století. Používá se především ve velkých tepelných a jaderných elektrárnách. Na obr. 1 je zobrazeno schéma oběhu. [19]



Obr. 1 Schema R-C cyklu [3]



Obr. 2 T-s diagram R-C cyklu [3]

Funkce R-C je popsána podle obr. 2. V parním kotli se ohřívá voda (kondenzát) při konstantním tlaku na bod varu (1-2) a následně se odpařuje se při $T = \text{konst}$ na mez sytosti (2-3). Sytá pára proudí z kotle do přehříváku páry (3-4), kde se přehřeje a získá se admisní pára. Přehřátá pára je přiváděna do parní turbíny, kde adiabaticky expanduje a koná práci (4-5). Ze stroje proudí zpravidla již mokrá pára do kondenzátoru, kde zkapalní (5-6). Kondenzát je pak dopraven napájecím čerpadlem do parního kotle(6-1). [1,3]

Dále jsou na obr. 2 uvedeny následující veličiny:

a_t je měrná práce vyrobená turbínou

a_Σ je měrná práce spotřebovaná čerpadlem

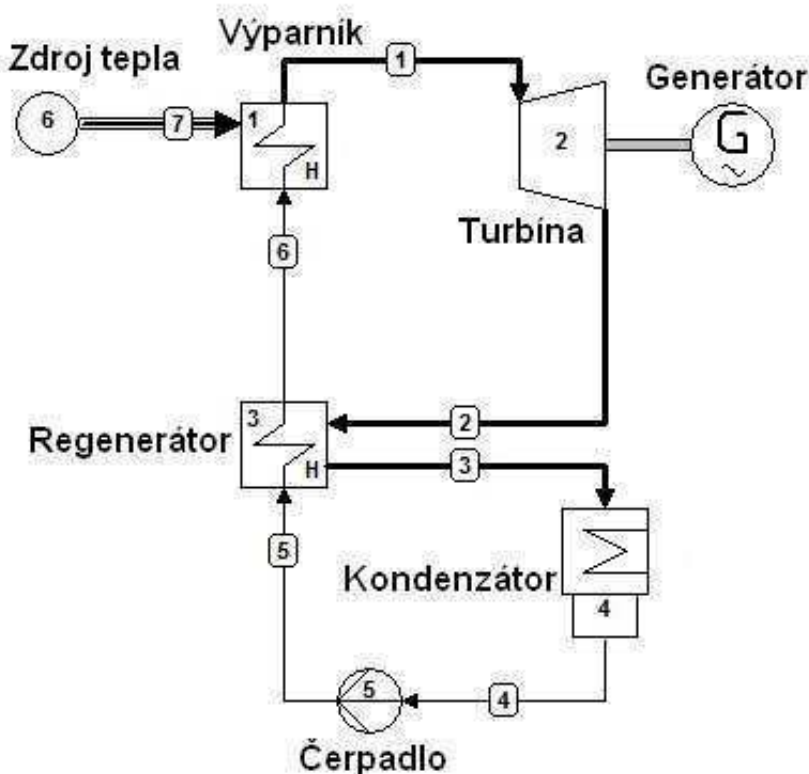
$+q_H$ je měrné teplo dodané v parním kotli

$-q_C$ je měrné teplo odvedené do kondenzátoru

K je kritický bod, je určen kritickou teplotou a tlakem. V tomto bodě se měrné výparné teplo rovná nule.

3. ORGANICKÝ RANKINŮV CYKLUS

Vznik ORC se datuje do poloviny 20. století, převážně v Izraeli, USA a Rusku. [21] Jedná se v principu o upravený Rankine-Clausiiův cyklus vodní páry, se kterým už byly v tu dobu bohaté zkušenosti. Hlavní rozdíl spočívá v pracovní látce, která díky svým termodynamickým vlastnostem umožňuje mnohem širší využití tepla hlavně o oblasti nízkopotencionálních zdrojů a tím značně rozšiřuje možnosti výroby elektrické energie. Typické schéma ORC je zobrazeno na obr. 3.



Obr. 3 Schéma ORC [4]

3.1. Hlavní části ORC

Parní Generátor (výparník)

Je to vlastně výměník, kde dochází k předání tepla od teplotnosného média pracovní kapaliny. Dochází zde k vypařování pracovní kapaliny a vzniku páry. Jako teplotnosné médium může sloužit termoolej, upravená voda, apod.

Termoolej je termicky stabilní vysokorafinovaný olej s nízkým indexem viskozity, který je schopen odolávat až 330 °C. Používají se například MOL Termol 32, Termol 46, nebo Paramo Term22, Term32. [22, 20]

Modul expanze páry

Je parní točivý stroj, v němž pára adiabaticky expanduje a mění tepelnou energii na mechanickou práci. Nejčastěji to bývá turbína, která může být axiální, radiální. Používá se většinou jednostupňová. Někteří výrobci malých jednotek používají šroubový expandér, který je zobrazen na obr. 4. Šroubový expandér má oproti turbíně značnou výhodu, může pracovat i v mokré páře, aniž by došlo k poškození či výraznému zhoršení provozních vlastností, nevýhodou je mírně nižší účinnost.



Obr. 4. Šroubový expandér [6]

Kondenzátor

Výměník, kde se z páry odebírá výparné teplo, a ta v něm kondenzuje na kapalinu. Na druhé straně je připojen k chladicí věži nebo adiabatickému chladiči, jako nosné chladicí médium bývá nejčastěji použita upravená voda.

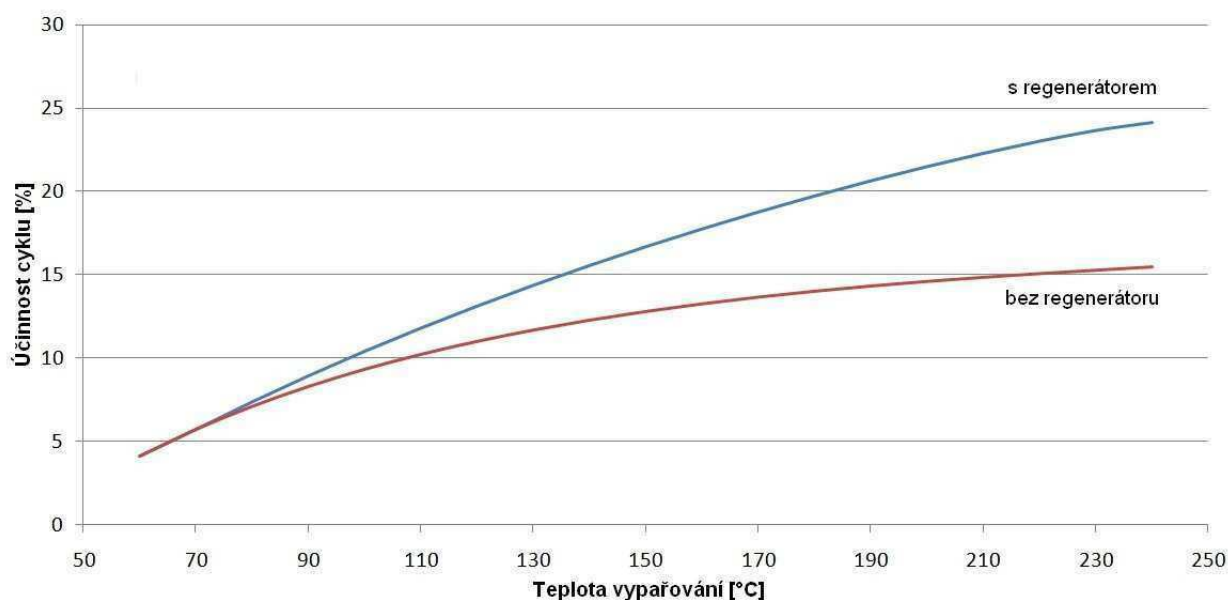
Čerpadlo

Slouží k dopravě zkondenzované pracovní látky do parního generátoru (výparníku).

Regenerátor

Slouží k regeneraci nevyužitě energie a zvyšuje účinnost cyklu. Potřebnost regenerátoru hlavně vychází ze specifických vlastností pracovní kapaliny, po expanzi přehřáté páry

v turbíně má pára ještě určité množství využitelné energie, které je škoda znehodnotit v kondenzátoru. Regenerátor tuto energii dokáže efektivně využít pro zpětné ohřátí kondenzátu. U menších jednodušších ORC jednotek nemusí být použití regenerátoru vhodné, protože za cenu výrazně složitějšího zařízení získáme nepatrné zvýšení účinnosti. Vliv regenerátoru na účinnost cyklu pro silikonový olej MM je zobrazen na obr. 5. Jedná se o teoretickou simulaci. Kondenzační teplota je 40 °C. [4]



Obr. 5 Vliv regenerátoru na účinnost cyklu. [4]

Pracovní látka

Je nejcharakterističtější složkou ORC, jedná se o organické sloučeniny, nejčastěji silikonové oleje s vhodnými termodynamickými vlastnostmi. Pracovní kapalina určuje základní parametr teplotního použití ORC. Některé používané organické kapaliny ve srovnání z vodou jsou uvedeny v tab.1 Červeně označené jsou silikonové oleje.

Obchodní název	Vzorec/ Označení	M [g/mol]	t_{crit} [°C]	p_{crit} [kPa]	t_v [°C]	l_{23} [kJ/kg]
Toluene	C ₇ H ₈	92	318,65	4106	110,7	365
R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	134	154,05	3640	14,8	195,6
n-pentane	C ₅ H ₁₂	72	196,55	3368	36,2	361,8
cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70	238,55	4510	49,4	391,7
Solkatherm	solkatherm	185	177,55	2849	35,5	138,1
OMTS	MDM	237	290,98	1415	152,7	153
HMDS	MM	162	245,51	1951	100,4	195,8
Voda	H ₂ O	18	373,95	22064	100	2257,5

M – Molární hmotnost [g/mol]

t_v – teplota vypařování [°C]

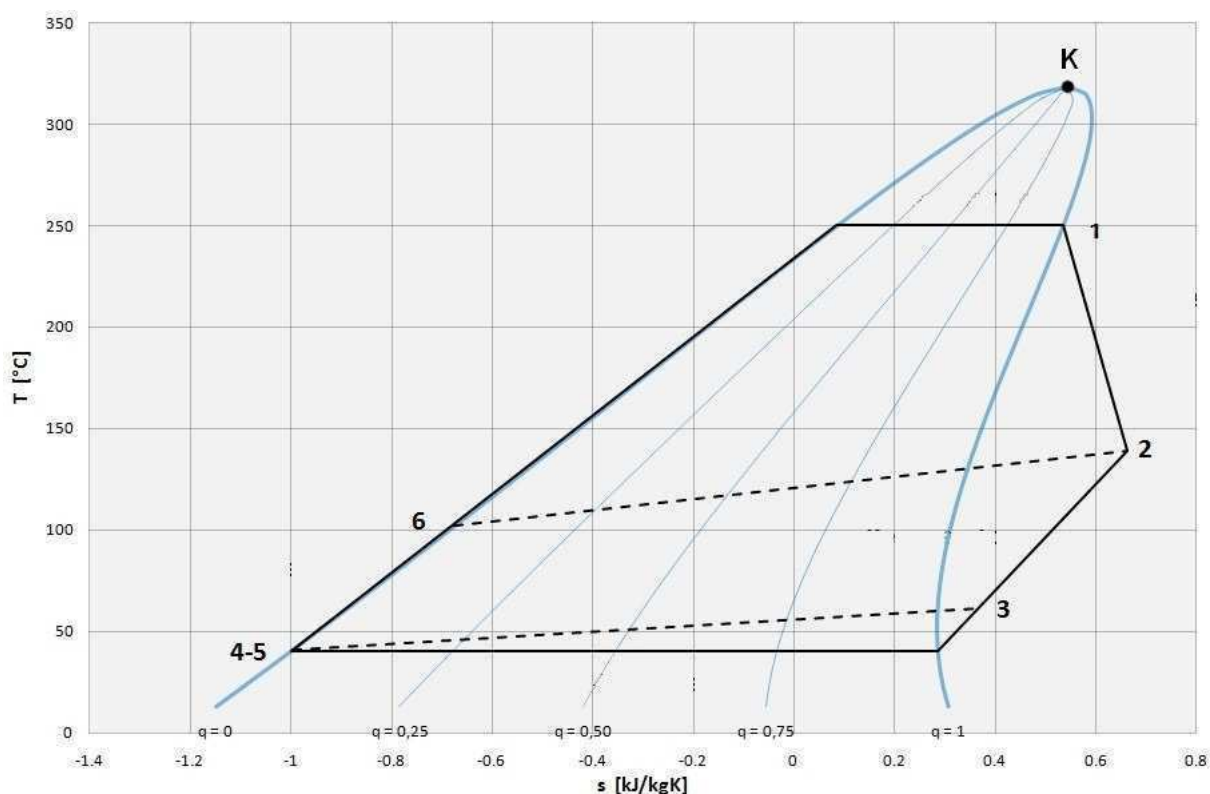
t_{crit} – kritická teplota [°C]

l_{23} – měrné výparné teplo [kJ/kg]

p_{crit} – kritický tlak [kPa]

Tab.1 Organické kapaliny [4, 1]

3.2. Funkce ORC a T-S diagram

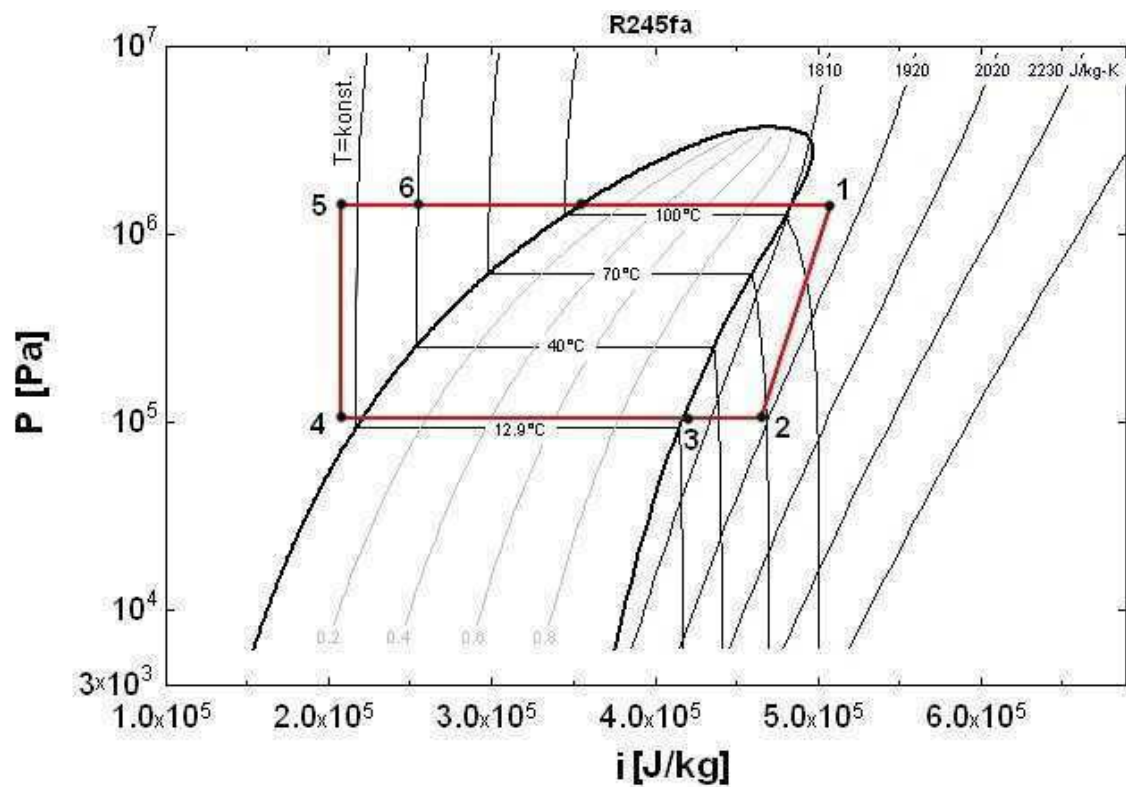


Obr.6 T-s diagram toluenu [4]

Funkce je popsána podle diagramu na obr.6. a schématu na obr.3. Čerpadlo načerpá pracovní látku přes regenerátor (5, 6), kde dochází k přehřátí pracovní látky, do vypařovače. Zde se z přehřáté pracovní kapaliny tvoří pára (6-1). Ohřev a vypařování probíhá izobaricky. Dále pára proudí do parní turbíny (1-2), kde adiabaticky expanduje. Párou roztočená turbína koná mechanickou práci, která je v elektrickém generátoru transformována na elektrickou energii. Po opuštění turbíny prochází pára regenerátorem (2-3), kde se využívá její zbytková tepelná energie k přehřátí pracovní kapaliny. Z regenerátoru pokračuje pára do kondenzátoru (3-4), kde zkondenzuje opět na kapalinu. Odtud je kapalina opět vedena přes čerpadlo (4-5) a oběh je tím dokončen. [8]

3.3. Termická účinnost P – i Diagram

Výpočty jsou teoretické a jsou uvažovány beze ztrát a se 100% účinností turbíny, regenerátoru a parního generátoru. Též není zahrnuta účinnost termoolejového výměníku. Hodnoty entalpií v bodech, určených teplotou a tlakem můžeme odečíst z p-i nebo T-s diagramu, p-i diagram je zobrazen na obr. 7, T-s diagram na obr. 6. Výpočty jsou vytvořeny podle [2].



Obr. 7 p-i diagram [5]

Termická účinnost se vypočítá:

$$\eta_t = \frac{a_t}{q_H} = \frac{q_H - |q_c|}{q_H} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} \quad (1)$$

Měrné přivedené teplo do parního generátoru:

$$q_H = i_1 - i_6 \quad [\text{J/kg}] \quad (2)$$

Měrná práce parní turbíny:

$$a_t = i_1 - i_2 \quad [\text{J/kg}] \quad (3)$$

Měrné teplo odvedené regenerátorem:

$$q_{RP} = i_2 - i_3 \quad [\text{J/kg}] \quad (4)$$

Měrné přivedené teplo dodané pracovní kapalině regenerátorem:

$$q_{RO} = i_6 - i_5 \quad [\text{J/kg}] \quad (5)$$

Měrná práce čerpadla:

$$a_c = i_5 - i_4 \quad [\text{J/kg}] \quad (6)$$

Měrné teplo odvedené kondenzátorem:

$$q_c = i_3 - i_4 \quad [\text{J/kg}] \quad (7)$$

4. SROVNÁNÍ ORC a R-C

Jak už bylo zmíněno, tak hlavní rozdíl mezi R-C a ORC je v pracovní látce, ze které plyne většina výhod oproti vodě. Samozřejmě jsou zde i nevýhodné aspekty, v podobě nižší účinnosti, vyšší ekologické zátěže apod.

Ze srovnání T-s diagramů na obr.2. a obr.6. vyplývá, že ORC nepotřebuje přehřívák, ale zato je vhodné použití regenerátoru.

Výhody ORC jsou především:

- Díky termodynamickým vlastnostem pracovní kapaliny možnost využití tepla o nízké teplotě.
- Dobrá účinnost při nízkých teplotách.
- Pracovní kapalina nezpůsobuje korozi, není agresivní.
- Jednoduchá konstrukce turbíny, většinou 1stupňová, s velkým poloměrem.
- Nízké otáčky turbíny, z toho důvodu není potřeba převodovka.
- Menší tlaky, nižší teploty, menší namáhání, z toho plyne vyšší životnost.
- Jednodušší údržba.
- Není třeba přehřívák páry.

Jako nevýhody lze zmínit:

- Pracovní kapaliny bývají, jedovaté, hořlavé, z toho důvodu jsou kladeny vysoké nároky na těsnost.
- Časem dochází k degradaci organické látky.
- Rozměry.
- Vyšší spotřeba čerpadla, dána větším hmotnostním průtokem.

Výhody R-C jsou především:

- Vyšší účinnost pro větší teploty.
- Menší rozměry.
- Voda, je ekologická, levná.
- Léty prověřená technologie.

Jako nevýhody lze zmínit:

- Nemožnost využít nízkopotenciální teplo.
- Složitá turbína.
- Eroze lopatek.
- Vyšší otáčky turbíny, je potřeba převodovka.
- Vysoké teploty a tlaky způsobují vyšší namáhání.

5. ORC JEDNOTKA JAKO SYSTÉM

V dnešní době firmy kladou požadavek na rychlost zavádění nových technologií do praxe. To vedlo výrobce k zavedení modulárního systému, pro nějž se ukázala ORC technologie obzvlášť vhodná.

Výhody modulárního systému jsou zejména:

- Rychlé zavedení do provozu.
- Jednodušší servis, opravy.
- Snížení pořizovacích nákladů.
- Možnost jednoduché výměny, změny za jiný.
- Variabilita.

V následující kapitole je uveden přehled vybraných výrobců ORC jednotek.

5.1. Výrobci ORC jednotek a jejich produktové řady

Turboden (Pratt and Whitney) [8]

Jedna z největších mezinárodních společností, která se zabývá ORC systémy již od roku 1980. Jejich produktová řada sahá od malých speciálních jednotek až po velké elektrárenské jednotky.

www.turboden.eu

Produktová řada:

CHP Units - Combined Heat & Power Units

Jednotka určená pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla z biomasy. Je kladen důraz na celkovou účinnost.

Výstupní parametry:

- Elektrický výkon 600 – 2700 kW
- Čistá elektrická účinnost 17 – 20%
- Horká voda vstup/výstup 60/80 nebo 60/90 °C
- Topný výkon (horká voda) 2600 – 11700 kW
- Celková účinnost až 98%

Vstupní parametry:

- Teplota termooleje vstup/výstup cca 310/250 °C
- Celkový tepelný příkon 3000 – 14500 kW
- Spotřeba biomasy (2,6kWh/kg) 1400 – 6300 kg/h
- Účinnost termoolejového kotle 0,9

HR Units - Heat Recovery Units

Jednotky využívající odpadního tepla z převážně průmyslových procesů, např. ve sklárnách, cementárnách, ocelárnách. Jako zdroj odpadního tepla je nejčastěji využíván horký vzduch.

Výstupní parametry:

- Elektrický výkon 500 – 10000 kW
- Čistá elektrická účinnost 16 – 21%
- Chladicí voda vstup/výstup cca 25/40 °C
- Odvedený výkon do chladiče 2 – 40 MW

Vstupní parametry:

- Teplota termoleje vstup 240 - 315 °C
- Teplota termoleje výstup 110 - 170 °C
- Celkový tepelný příkon 2,5 – 50 MW

HRS Units - High Electrical Efficiency Units

Jednotky optimalizované pro co nejefektivnější produkci elektřiny, především z biomasy.

Výstupní parametry:

- Elektrický výkon 1000 – 3200 kW
- Čistá elektrická účinnost 23 – 24%
- Chladicí voda vstup/výstup cca 25/35 °C
- Odvedený výkon do chladiče 3.1 – 9.9 MW

Vstupní parametry:

- Teplota termoleje vstup/výstup cca 310/210 °C
- Celkový tepelný příkon 4,1 – 13 MW
- Spotřeba biomasy (2,6kWh/kg) 1800 – 6300 kg/h
- Účinnost termolejového kotle 0,9

Speciál Units

Jednotky vyráběné na požadavek zákazníka. Jedná se většinou o upravené CHP a HRS jednotky.

Pratt & Whitney (Turboden) [7]

Malé jednotky na výrobu elektrické energie, které jsou speciálně konstruovány pro použití tepla s velice nízkým potenciálem. Jako zdroj tepla lze použít vodu o teplotě od 90°C Proto jsou velice vhodné na využití odpadního tepla, tepla z geotermálních pramenů apod.

www.pw.utc.com

PureCycle® 280

Vhodné zdroje tepla:

- Plynové turbíny
- Spalovací motory
- Geotermální
- Průmyslové zařízení

Technické parametry:

- Elektrický výkon 80 - 272 kW
- Příkon v teplé vodě 1,8 - 4 MW
- Horká voda vstup 91 - 149 °C
- Horká voda výstup 77 - 90 °C
- Chladicí výkon 1,6 - 3,8 MW
- Vstup chladicí voda 16 - 27 °C
- Hrubá elektrická účinnost 4,5 - 9 %
- Pracovní kapalina R245fa
- Rozměry (d x š x v) 5790 x 2290 x 3430 mm
- Hmotnost 15104 kg
- Cena cca 340 000 €

Electra Therm [6]

Jedná se o americkou firmu, která se specializuje na malé ORC jednotky, zaměřené na nízkoteplotní odpadní teplo. Do České republiky dodává GB Consulting, s.r.o.

www.gbconsulting.cz

www.electratherm.com

Green Machine 4000

Green Machine používá oproti klasické koncepci dvojité šroubový rotační expandér, který je zobrazen na obr.4.

Vhodné zdroje tepla:

- Průmyslová výroba
- Spalovací motory
- Geotermální

- Solární kolektory
- Kotle centrálního vytápění

Technické parametry:

- Elektrický výkon 30-50 kW
- Hrubá elektrická účinnost až 8%
- Zdroj tepla, horká voda vstup 88 – 116 °C
- Příkon 400-860 kW
- Chladicí výkon 370 – 795 kW
- Chladicí voda vstup 4 -38 °C
- Pracovní kapalina R245fa
- Dvojitý šroubový rotační expandér
- Rozměry 1980 x 2440 x 2260 mm
- Váha 2495-2950 kg
- Cena cca 180 000 €

Reference:

Společnost GB Consulting dodala jednu ORC jednotku do BPS Moravská Třebová. Na obr. 8 je zobrazena instalace Green Machine ve vlastním přístřešku, dále je zde vidět adiabatický chladič. Jednotka Green Machine 4000 zde využívá odpadní teplo z chlazení generátoru spalujícího bioplyn. Elektrický výkon generátoru je cca 980 kW, jednotka Green Machine zde přidá dalších cca 40 kW a ještě uspoří el. energii za vlastní chlazení bioplynového generátoru. [6]



Obr. 8 BPS Moravská Třebová [6]

Tri -O-Gen [9]

Holandská firma vyrábějící malé jednotky, zaměřené na odpadní teplo vyšší teploty. V České republice tuto firmu zastupuje společnost B:POWER INVESTIMENT, a.s.
www.triogen.nl , www.bpower.cz

Tri-o-Gen ORC

Vhodné zdroje tepla:

- Motory na zemní plyn
- Plynové turbíny
- Bioplynové motory
- Spalování biomasy

Technické parametry:

- Elektrický výkon 60 - 165 kW
- Hrubá elektrická účinnost až 18 %
- Zdroj tepla vstup od 350 °C
- Zdroj tepla výstup cca 180 °C
- Příkon 450-900 kW
- Chladicí výkon 350 – 700 kW
- Chladicí voda vstup/výstup 35/55 °C
- Pracovní kapalina Toluene
- Turbína jednostupňová 18 000 – 28 000 ot/min
- Rozměry 3,2 x 2,4 x 4 m
- Váha 12000 kg
- Cena cca 450 000 €

BEP (E-rational) [10]

Nabízí jednotky v rozsahu 50-500kW www.bepenergy.com

E-rational ORC 55kW Unit

Technické parametry:

- Elektrický výkon 50 kW
- Hrubá elektrická účinnost 6 - 12 %
- Zdroj tepla vstup 80 - 140 °C
- Příkon cca 700 kW
- Chladicí výkon cca 640 kW
- Chladicí voda vstup 20 °C
- Pracovní kapalina nezjištěna
- Jednoduchý šroubový expander
- Rozměry 1,2 x 2,4 x 2,3 m

- Cena cca 100 000 €

Calnetix [11]

Americká firma, vyrábí malé jednotky, převážně zaměřené na odpadní teplo. V České republice ji zastupuje firma Epimex s.r.o., ta nabízí i řešení pro biomasu.

www.calnetix.com

Clean Cycle 125kW

Zajímavostí je integrovaný modul IPM, tj. vysokorychlostní generátor a turbína jsou uloženy na magnetických ložiskách a v jednom obalu.

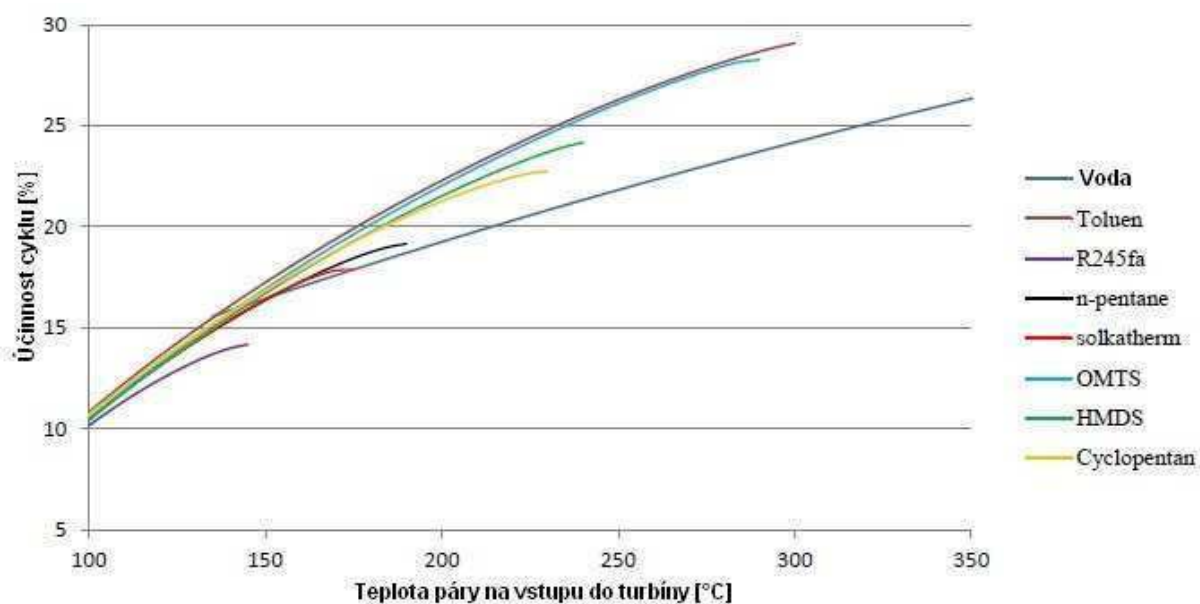
- Elektrický výkon 125 kW
- Hrubá elektrická účinnost až 14 %
- Zdroj tepla vstup cca 125 °C
- Příkon tepla cca 980 kW
- Chladicí výkon cca 820 kW
- Chladicí voda vstup 21 °C
- Pracovní kapalina R245fa
- Turbína 26 500 ot/min
- Rozměry (d x š x v) 284 x 117 x 202
- Cena cca 500 000 €

5.2. Srovnání ORC jednotek

Přímé srovnání ORC jednotek z ohledu účinnosti může být poměrně zkreslující, jak ukazuje tab. 2. Každý výrobce udává referenční hodnoty za jiných podmínek. Ale obecně platí, že hlavní ovlivňující faktor účinnosti je teplota teplotnosného média a teplota chladiče. Potom následuje efektivita použitých komponent, zejména regenerátoru a turbíny. Volba pracovní kapaliny hlavně ovlivňuje rozsah teplotního určení, na účinnost nemá velký vliv, jak je vidět z obr. 9, jedná se o teoretickou simulaci v software.

ORC Jednotka	Elektrický výkon [kW]	Max. el. účinnost [%]	Vstupní teplota [°C]	Teplota kondenzátoru [°C]	Příkon tepla [kW]	Chladicí výkon [kW]	Pracovní kapalina	Poznámky
PureCycle® 280	272	9	140	27	4000	3800	R245fa	
Green Machine 4000	50	8	116	38	860	795	R245fa	
Tri-o-Gen ORC	165	18	350	55	900	700	Toluene	Vypočítaná účinnost
E-rational ORC 55kW Unit	50	12	140	20	700	640		
Clean Cycle 125kW	125	14	125	21	980	821	R245fa	

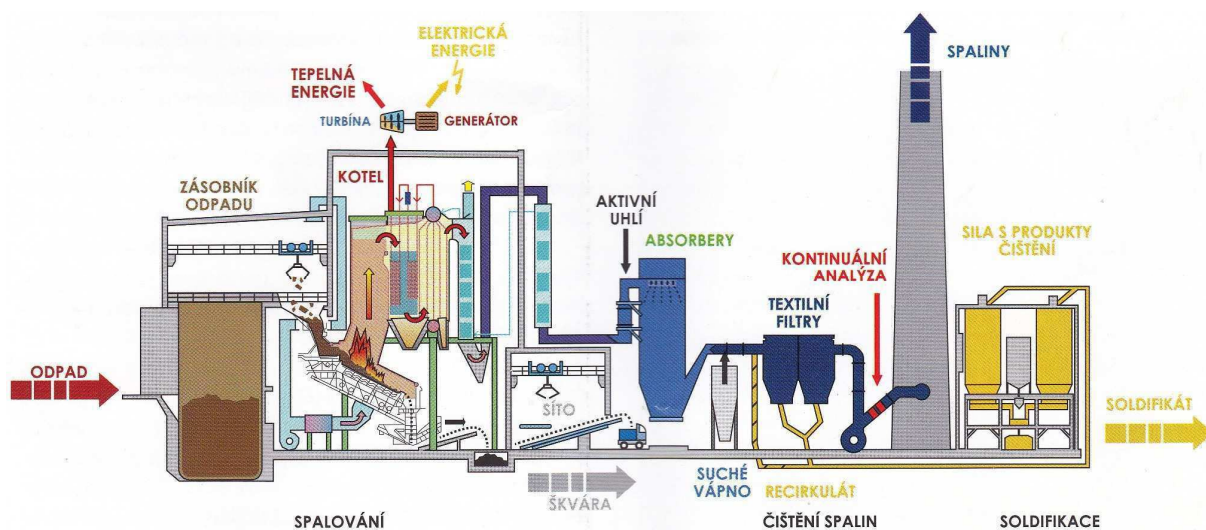
Tab. 2 Srovnání ORC jednotek



Obr. 9 Porovnání účinností pracovních kapalin [4]

6. SPALOVNA KOMUNÁLNÍHO ODPADU A POTENCIÁL UPLATNĚNÍ ORC

Naše moderní společnost produkuje velké množství odpadů. Proto byl vytvořen Plán odpadového hospodářství České republiky, který zahrnuje snižování skládkování odpadu a naopak podporuje jeho energetické využití ve spalovnách. Spalováním se zredukuje hmotnost odpadu na 25 % původních hodnot a objem až na 10 % původních hodnot. To umožní až desetinásobné prodloužení životnosti skládky. V České republice jsou v současné době vybudovány tři moderní spalovny pro kompletní energetické využití odpadů. Typické schéma spalovny je zobrazeno na obr. 10. [13]



Obr. 10 Schéma spalovny komunálního odpadu [14]

6.1. Hlavní části a funkce spalovny

Po kontrole a odvážení je odpad vysypán do **zásobníku**, který slouží k vyrovnání nerovnoměrné dodávky odpadu a probíhá zde ještě homogenizace odpadu. Odtud je odpad dopraven do **kotle**, kde je spalován. Nejčastěji se používají roštové kotle. Zde komunální odpad postupně prohořívá a uvolněné teplo vytváří v **parním generátoru páru**. Odtud je pára vedena do **turbíny** nebo do centrálního zásobování teplem (CZT). Částečně ochlazené spaliny jsou dále vedeny přes několik **stupňů čištění**. Po závěrečném odfiltrování mechanických nečistot jsou spaliny kontrolovány a vypouštěny komínem do ovzduší. [14]

6.2. Možnost využití ORC ve spalovnách

V současných spalovnách se převážně používají turbíny využívající vodní páru vznikající při spalování odpadu, který má obvykle velmi kolísavou výhřevnost. Tyto nestabilní parametry vodní páry mohou zapříčinit snížení účinnosti a životnosti turbíny. ORC turbíny díky specifickým vlastnostem pracovní látky jsou schopny fungovat bez ztráty účinnosti a životnosti v širším provozním rozsahu. Tudíž se jejich použití, místo turbíny na vodní páru, jeví jako vhodné. Dále by šlo ORC jednotky instalovat do menších starších spaloven, u kterých bylo doposud využíváno jen teplo, a to z důvodu jednoduchosti zavedení systému. Aplikace ORC na využití zbylého tepla spalin není většinou vhodná z důvodu potřeby zůstatkového tepla pro procesy čištění.

7. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ V PODMÍNKÁCH ČR

V České republice není zatím technologie ORC na využití odpadního tepla moc rozšířena, ale dá se očekávat rozvoj v této oblasti v příštích letech. Proto je třeba se zmínit o ekonomických aspektech na realizaci. Tato kapitola je věnována především nákladům na pořízení, provoz ORC v ČR, dále možností získání dotace. Na závěr je stručně shrnuta reálná studie proveditelnosti.

7.1. Ekonomické ukazatele

Pořizovací náklady

ORC jednotka je nejvyšší nákladovou položkou, ale je potřeba počítat i s ostatními náklady, např. na montáž, zavedení do provozu, na chladicí okruh, projektovou dokumentaci, na elektroinstalaci sítě.

- ORC jednotka

Jak už bylo zmíněno, je to nejvyšší nákladová položka, cena záleží hodně na konkrétní specifikaci. Z cenového průzkumu vychází, že u malých jednotek se pohybuje přibližně 1800 - 3000 Eur/ kWe, u větších modulů cena klesá až pod 1000 Eur/ kWe.

- Montáž, zavedení do provozu

Tato položka závisí hlavně na velikosti a provedení ORC jednotky. Malé jednotky prakticky nevyžadují složité stavební úpravy, bohatě postačuje běžná místnost s vhodným přístupem

odpadního tepla. Pro větší jednotku je z důvodu rozměrů většinou potřebné vyčlenit či vybudovat oddělenou halu, která se na celkových investicích může značně projevit.

Provozní náklady

Provozní náklady na vlastní jednotku jsou poměrně nízké, protože jsou schopny téměř bezobslužného nepřetržitého provozu a vyžadují pouze minimální údržbu, která se provádí v období odstávky daného zdroje tepla. Dále je potřeba zahrnout spotřebu energie jednotky, který svým způsobem snižuje čistý generovaný výkon. Nejvýznamnější provozní náklad může tvořit údržba chladicího zařízení v podobě úpravy vody apod. [12]

Výnosy

Výnosy jsou tvořeny prodejem elektrické energie. Množství elektrické energie je ovlivněno provozní dobou ORC jednotky a cenou prodávané el. energie, která je tvořena samostatnou aktuální cenou a příspěvkem za generování el. energie a řídí se Cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu. [16]

Návratnost

Návratnost je závislá na konkrétních pořizovacích, provozních nákladech a výnosech a běžně se pohybuje od čtyř do osmi let.

7.2. Možnost získání dotace

Jednou z možností jak získat finance z prostředků Evropské unie je využít Operačního programu Podnikání a inovace; prioritní osa č. 3 „Efektivní energie“. Zde jsou podporovány aktivity jako například využití odpadní energie v průmyslových procesech nebo modernizace stávajících zařízení na výrobu elektrické energie vedoucí ke zvýšení jejich účinnosti. Příjemci podpory jsou podnikatelské subjekty: malé, střední a velké podniky. Specifickým požadavkem je, že projekt musí být realizován mimo území hlavního města Praha. Maximální výše podpory je 100mil. Kč, minimální 0,5mil.Kč. [17]

V současné době také existuje možnost využití peněz z Evropské unie formou dotace z Operačního programu Životní prostředí, Prioritní osa č. 3 – Udržitelné využívání zdrojů energie. Vhodným specifickým cílem této osy je zvýšení využití odpadního tepla a úspor energie. U oblasti č. 3.2 Realizace úspor energie a využití odpadního tepla u nepodnikatelské sféry EU uvolní 525, 464 mil. Eur. Jak už napovídá název této oblasti, příjemci podpory jsou nepodnikatelské subjekty. Pokud by tedy podnikatelé chtěli tuto aktivitu realizovat, je nutné partnerství s některou z organizací vyjmenovaných v dokumentu týkající se této podpory. Při splnění všech náležitostí je možné čerpat až 85% veřejných způsobilých výdajů. Největším problémem však bývá uspět se žádostí u výběrové komise, resp. podat žádost, která bude jak formálně, tak obsahově v pořádku. [18]

7.3. Příklad cenové nabídky

Hodnoty byly čerpány ze studie proveditelnosti [15], kterou vypracovala společnost GB Consulting, s.r.o. v roce 2012. Nabídka byla provedena na kogenerační jednotku Jenbacher (dále KGJ) o výkonu 703 kWe a je součástí bioplynové stanice. Jako zdroj odpadního tepla bude sloužit chladicí okruh a teplo spalin do něj přivedené. Tepelný výkon bude cca 700 kW. Po odečtení ztrát a tepelného výkonu nutného pro provoz bioplynové stanice, zbývá cca 550 kW pro ORC jednotku Green Machine. Projektové parametry jsou tedy následující:

- Tepelný výkon pro Green Machine cca 550 kW
- Teplonosné médium – Horká voda o teplotě 99 °C
- Průměrná vstupní teplota chladicí vody 11 °C
- Předpokládaný provoz 8 300 h/rok

Pořizovací náklady

- ORC Green Machine – 4 496 500 Kč
- Chladič adiabatický – 874 200 Kč
- Dodávka, montáž a projektová dokumentace – 879 300 Kč

Celkem – 6 250 000 Kč bez DPH

Výnosy

Jedná se o čisté výnosy, které už zahrnují náklady spojené s vlastní spotřebou na provoz. Další výhodou instalace Green Machine je snížení vlastní spotřeby KGJ, a to optimalizací chlazení, která je zde taky započítána.

- Čistá elektřina vyrobená za hodinu cca 37 kW
- Čistá elektřina vyrobená za rok cca 305 208 kW
- Úspora na chlazení KGJ cca 56 700 kW
- Celková energie za rok k prodeji cca 361 908 kW
- Výkupní cena elektřiny garantovaná státem 4,12 Kč/kWh

Celkový výnos za rok cca 1 491 062 Kč

Návratnost investice je cca 4,19 let.

8. ZÁVĚR

Využívání odpadního tepla je v dnešní době jedním z důležitých cílů trvalé udržitelnosti. V této práci byly shrnuty srozumitelným způsobem nejdůležitější teoretické poznatky o Organickém Rankinově cyklu, který je jednou z moderních možností výroby elektrické energie z odpadního tepla. Z důvodu srovnání je zde uvedena i základní teorie R-C, ze kterého ORC vychází. V další části je uveden seznam vybraných výrobců ORC jednotek a jejich produktových řad. V plánu bylo uvést rozsáhlé srovnání, které se ukázalo jako problematické, protože nebylo možné často získat srovnatelné technické parametry a to zřejmě z důvodu obchodní a výrobní strategie. Dále je zde věnována kapitola spalovně komunálního odpadu, kde by také v budoucnu mohla ORC technologie najít uplatnění.

V dnešní době je už ORC technologie na velice dobré úrovni, ale lze předpokládat i další budoucí vývoj. Ten by se měl hlavně odehrávat v oblasti pracovních kapalin, kde jsou zatím rezervy v bezpečnosti, ekologii a je zde i prostor pro zvýšení účinnosti. Přičteme-li podporovanou výkupní cenu el.energie a značný potenciál uplatnění ORC nejen na poli využití odpadního tepla, tak tu máme konkurenceschopnou technologii, která by se v budoucnu mohla obejít i bez umělé podpory.

9. POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ

- [1] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [2] *Kalina cycle* [online]. 2010 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://kalinacycle.net/>
- [3] ŠTĚTINA, Josef. *Seminář aplikované termomechaniky* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/sew/category/odbortermomechaniky/seminar_aplikovane_termomechaniky/. Přednáška. VUT FSI.
- [4] VANKEIRSBILCK, I., B. VANSLAMBROUCK, S. GUSEV a M. DE PAEPE. Organic Rankine cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation. In: [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.orcycle.eu/publicaties_bestanden/HEFAT%202011%20-%20ORC%20vs%20steam_final.pdf
- [5] QUOILIN, Sylvain. *An introduction to thermodynamics applied to* [online]. University of Liège, 2008 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.labohtap.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/ORC_thermodynamics_SQ081126.pdf
- [6] *GB Consulting* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.gbconsulting.cz/index.html>
- [7] *Pratt & Whitney* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.pw.utc.com/>
- [8] *Turboden* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.turboden.eu/en/home/index.php>
- [9] *TRI-O-GEN* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.triogen.nl/nl/>
- [10] *E-Rational* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.bepenergy.com/>
- [11] *Calnetix* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.calnetix.com/>
- [12] EPIMEX. *Kogenerační zařízení s 2 ORC jednotkami Clean Cycle 125*. 2012.
- [13] *Spalovna a komunální odpady Brno* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/informace/>
- [14] SAKO BRNO, a.s. *Spalovna a komunální odpady Brno*. 2012, 11 s.
- [15] GB CONSULTING, s.r.o. *Studie proveditelnosti a cenová nabídka*. Brno, 2012.
- [16] Česká republika. Cenové rozhodnutí regulačního úřadu č. 7/2011. In: *Energetický regulační věstník*. Jihlava: Energetický regulační úřad, 25. 11. 2011, roč. 11, 8/2011. Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV_7_2011.pdf

- [17] Operační program Podnikání a inovace 2007 - 2013. In: Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 13.1. 2012. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument94351.html>
- [18] Operační program Životní prostředí. In: Ministerstvo životního prostředí, 20. 2. 2012. Dostupné z: http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/42/12802-pd_opzp_unor_2012.pdf
- [19] Rankine cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle
- [20] PARAMO. *Technologické a procesní oleje* [online]. 2011 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.paramo.cz/cs/nabidka-produktu/mazaci-oleje/>
- [21] Organic Rankine cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_Cycle
- [22] MOL. *Industrial lubricants: Heat-transfer oils* [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://www.mol.hu/en/business_centre/products/lubricants_autochemicals_archive/industrial_oils/other_oils/mol_termol_32/

10. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka Název

ORC	Organický Rankinův cyklus
R-C	Rankin-Clausiiův cyklus
BPS	bioplynová stanice
CZT	centrální zásobování teplem
KGJ	kogenerační jednotka
K	kritický bod

Symbol	Název	Jednotka
T	teplota	[K]
p	tlak	[Pa]
s	entropie	[J/kgK]
i	entalpie	[J/kg]
a	měrná práce	[J/kg]
A	práce	[J]
q	měrné teplo	[J/kg]
Q	teplo	[J]
M	molární hmotnost	[g/mol]
t_{crit}	kritická teplota	[°C]
p_{crit}	kritický tlak	[kPa]
t_v	teplota vypařování	[°C]
l_{23}	měrné výparné teplo	[kJ/kg]
η	účinnost	[%]

Index Název

t	turbína
č	čerpadlo
1,2,3,4,5,6	stav v diagramu
H	kotel, parní generátor
C	kondenzátor