



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

METODY VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z ODPADNÍHO TEPLA

WASTE HEAT TO POWER TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kůra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Konečná

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Tomáš Kůra
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Eva Konečná
Akademický rok:	2020/21

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:

Metody výroby elektrické energie z odpadního tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití tepelné energie z odpadních proudů je jednou z velmi slibných oblastí energetických úspor. Jedná se o vysoce aktuální téma, při úspěšné aplikaci technologie mohou být uspořeny primární paliva a může docházet ke snížení emisí skleníkových plynů. V současné době existuje celá řada technologií pro využití odpadního tepla k výrobě elektrické energie, např. parní turbína, Rankinův cyklus (parní, organický), Kalinův cyklus, termoelektrické generátory, palivové články a další. Jsou však mezi nimi značné rozdíly, které určují jejich vhodnost pro různé typy použití. Ucelený přehled technologií poskytne dobrý přehled pro jejich využití v průmyslu a naznačí podle, kterých kritéria je vybírat.

Bakalářská práce, která popíše dostupné technologie a naznačí jejich využitelnost v průmyslové praxi, bude velkým přínosem pro další návrhovou činnost v oblasti efektivity energetických systémů.

Cíle bakalářské práce:

Představení jednotlivých technologií pro přeměnu tepla na elektrickou energii

Přehled faktorů ovlivňující využitelnost jednotlivých technologií

Sestavení přehledu případových studií o využití technologií

Zhodnocení možnosti této technologie pro aplikace v průmyslu

Seznam doporučené literatury:

JOUHARA, H., N. KHORDEHGAH, S. ALMAHMOUD, B. DELPECH, A. CHAUHAN a S. A. TASSOU. Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress [online]. 2018, 2018(6), 268-289. ISSN 2451-9049. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.

SINGH, D. V. a E. PEDERSEN. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. Energy Conversion and Management [online]. 2016, 2016(111), 315-328. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.073.

ARAIZ, M., Á. CASI, L. CATALÁN, Á. MARTÍNEZ a D. ASTRAIN. Prospects of waste-heat recovery from a real industry using thermoelectric generators: Economic and power output analysis. Energy Conversion and Management [online]. 2020, 2020 (205), 112376. ISSN 01968904, DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112376.

MAHMOUDI, A., M. FAZLI a M.R. MORAD. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. Applied Thermal Engineering [online]. 2018, 2018(143), 660-675. ISSN 13594311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje metodám přeměny tepelné energie v odpadním teple na elektrickou energii. Jsou v ní představeny a popsány dosud známé přímé a nepřímé metody. Práce dále obsahuje přehled případových studií studovaných technologií. Na konec jsou veškeré poznatky shrnuty a především jsou představeny faktory ovlivňující využitelnost jednotlivých technologií a jsou zhodnoceny možnosti uplatnění technologií v průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

odpadní teplo, cyklus, výroba, pracovní médium, elektrická energie

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the methods of waste heat conversion to electrical energy. There are presented and described so far known methods that generate power via mechanical work and methods converting power directly from heat. The thesis also contains an overview of case studies for studied technologies. Finally, all the findings are summarised, the factors influencing the applicability of each technology are presented, and the possibilities of the technology application in the industry are evaluated.

KEYWORDS

waste heat, cycle, power generation, working medium, electricity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŮRA, Tomáš. *Metody výroby elektrické energie z odpadního tepla* [online]. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132663>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Eva Konečná.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Evy Konečné a že jsem použil pouze odbornou literaturu a prameny uvedené v seznamu zdrojů.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Tomáš Kůra

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Evě Konečné za její trpělivost, ochotu, připomínky a rady, které mi během psaní mé práce poskytla.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Výroba elektřiny a vznik odpadního tepla	10
3	Nepřímá výroba elektrické energie	12
3.1	Klasický Rankin-Clausiusův cyklus	13
3.2	Organický Rankin-Clausiusův cyklus.....	14
3.3	Kalinův cyklus.....	16
3.4	Trilaterální Flash Cyklus	17
4	Přímá výroba elektrické energie.....	19
4.1	Termoelektrické generátory.....	19
4.2	Piezoelektrická výroba energie.....	20
4.3	Termoemisní generátory	21
4.4	Termofotovoltaické systémy	21
4.5	Usměrňovací antény	22
5	Aplikace technologií	24
5.1	Klasický Rankin-Clausiusův cyklus	24
5.2	Organický Rankin-Clausiusův cyklus.....	24
5.3	Kalinův cyklus.....	26
5.4	Trilaterální Flash cyklus	26
5.5	Termoelektrické generátory.....	27
5.6	Piezoelektrická výroba energie.....	27
5.7	Termoemisní generátory	27
5.8	Termofotovoltaické systémy	28
5.9	Usměrňovací antény	28
6	Shrnutí dostupných technologií.....	29
7	Závěr	31
	Bibliografie.....	32
	Seznam použitých zkratk a symbolů	39

1 Úvod

V posledních letech je stále více vyvíjen tlak na závody a produkty s požadavkem na nízkou produkci skleníkových plynů. Jedna z možností, jak toho docílit, je použití ekologičtějšího procesu, který při svém běhu nevytváří nechtěné sloučeniny. Druhou možností je zvýšení účinnosti a tím snížení množství potřebné energie při udržení stejného výkonu zařízení.

Účinnost je jeden z nejdůležitějších parametrů strojních zřízení. Je to schopnost daného celku přeměnit dodanou energii na energii užitečnou. Nevyužitou energii, kterou nepřeměníme v užitečnou práci, nazýváme ztráty. Odhaduje se, že v průmyslu Spojených států amerických je 20 až 50 % energie ztracené v podobě odpadního tepla, které už není dále využito. [1] Podle odhadu se v České republice produkuje 40 PJ odpadního tepla ročně, které je možno současnými technologiemi využít. [2]

Snížením produkce odpadního tepla, a tedy zvýšením účinnosti, by se dosáhlo nižší energetické náročnosti zařízení a procesů. To ovšem v některých případech nemusí být tak jednoduché, například teplo z vysokých pecí musí být odváděno chladicím systémem, aby si pec zachovala svou pevnost. Nebo to je z technologických důvodů nemožné. Například je nežádoucí, aby výfukové plyny zkondenzovaly ve výfukovém potrubí. Je tedy potřeba, aby měly určitou minimální teplotu, s kterou je spojené i množství tepla, které je takto ztraceno.

Pokud nemůžeme produkci odpadního tepla omezit, nabízí se možnost další využití energie akumulované v odpadním médiu. Odpadní teplo se v průmyslu často využívá na předehřev pracovního média nebo paliva těsně před spálením. Lze jej též využít na vytápění prostor podniků, kde se odpadní teplo produkuje. I přesto se však můžeme setkat se situací, kdy nejsme schopni odpadní teplo využít, například v létě. V takovém případě je potřeba najít jiné řešení, jak dále zužitkovat přebytečné teplo.

Velmi výhodnou možností je přeměna tepelné energie na energii elektrickou. Na elektřinu funguje velké množství domácích i průmyslových spotřebičů, a tak je jisté, že takto transformovaná energie bude využita. V případě velkých přebytků se nabízí možnost energii prodávat do sítě, [3] čímž se investice do zařízení na přeměnu tepla na elektřinu stává ekonomicky zajímavější.

V této bakalářské práci je krátce shrnuta problematika výroby elektrické energie v České republice. Jsou vysvětleny fyzikální principy spojené s návrhem zařízení a problémy, které by mohly při provozu nastat. Dále práce uvádí dosud známé metody výroby elektrické energie z odpadního tepla a rozděluje je na přímé a nepřímé. Následují případové studie, ve kterých jsou představeny vědecké výstupy a průmyslové aplikace jednotlivých metod. Nakonec jsou nejdůležitější poznatky shrnuty a je vytvořena přehledová tabulka s jednotlivými metodami a jejich pracovními teplotami, účinnostmi a příklady použití.

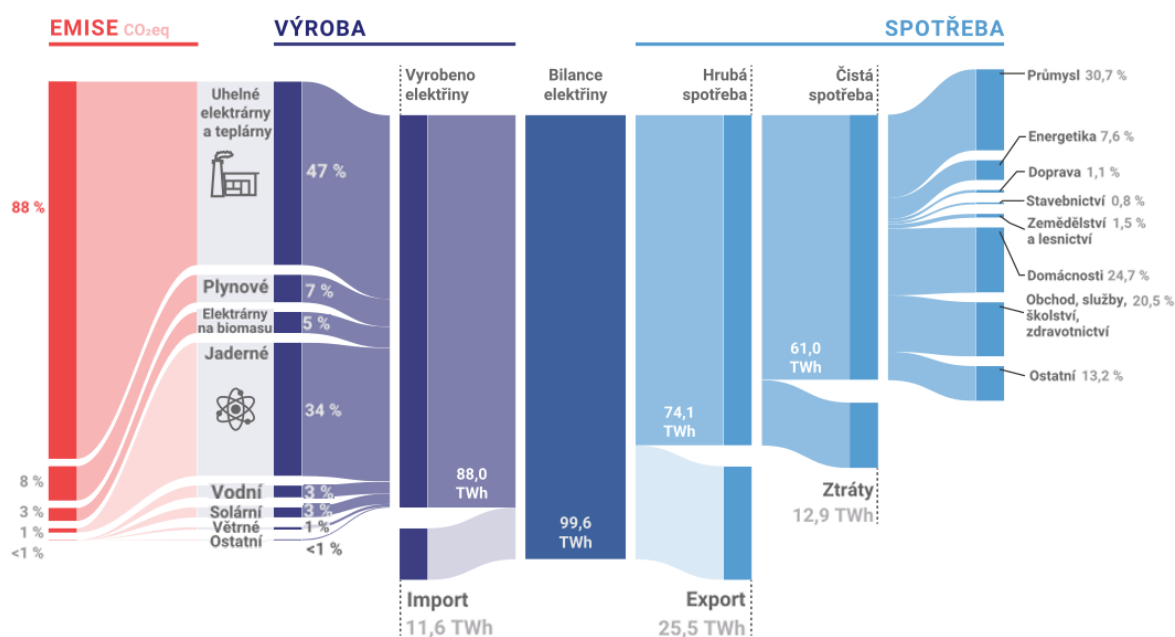
2 Výroba elektřiny a vznik odpadního tepla

V České republice se většina elektrické energie vyrábí spotřebováváním paliva a výrobou tepla, které je termodynamickým cyklem přeměněno na mechanickou práci, která je následně generátorem přeměněna na elektrickou energii. Parní a jaderné elektrárny vyrobily v České republice v roce 2019 92,9 % z celkově vyrobené elektrické energie. [4] Přičemž česká energetika je zdrojem 39,5 % všech emisí v ČR. [5]

Na obrázku 2.1 jsou graficky znázorněny emise oxidu uhličitého a výroba a spotřeba elektrické energie v ČR za rok 2018. Lze vidět, že uhelné elektrárny mají největší instalovaný výkon a také nejzásadnější podíl na produkci CO₂ u nás. Zvýšení účinnosti těchto elektráren by se mohlo dosáhnout pomocí technologií na přeměnu odpadního tepla na elektrickou energii. V chladicích věžích se maří spousta energie, která je vypouštěna do atmosféry a není dále použita. [6]

ELEKTRINA V ČR: VÝROBA, SPOTŘEBA A EMISE

V roce 2018 produkovaly uhelné zdroje naprostou většinu emisí v rámci české elektroenergetiky.



VERZE 2020-10-23 LICENCE CC BY 4.0
více info na faktaoklimatu.cz/elektrina-cr

zdroj dat: ERÚ Roční zpráva o provozu ES ČR

Obr. 2.1 Výroba, spotřeba a emise české energetiky [7]

Zařízení vyrábějící elektrickou energii z odpadního tepla nemůžou mít tak vysokou účinnost jako tepelné elektrárny, které dosahují až 55 %. [8] Je to dáno nízkou teplotou odpadního tepla a s tím spojenou nízkou účinností Carnotova cyklu. Ten nám říká, jaké maximální účinnosti můžeme dosáhnout při dané teplotě ohříváče a chladiče. Účinnost Carnotova cyklu lze spočítat podle vzorce

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1)$$

kde T_C je teplota chladiče a T_H je teplota ohřívače. [9] Ze vzorce je patrné, že zařízení nemůže dosáhnout 100% účinnosti a také, že s rostoucí teplotou ohřívače nám roste i účinnost celého cyklu.

Teplota chladiče je závislá na množství tepla, které je přivedeno, a na chladícím výkonu. Výkon pasivního chladiče je přímo úměrný teplotě chladiče, a tak se zvyšující se teplotou roste i chladící výkon. Teplota chladiče se ustálí na teplotě, kdy dodávaný výkon odpadním teplem se rovná chladicímu výkonu chladiče.

Při návrhu chladiče je v některých případech nutné dbát na teplotu látky při výstupu z ohřívače. Například při rekuperaci energie z výfukových plynů nechceme, aby výfukové plyny začaly kondenzovat, a tak je potřeba navrhnout chladič tak, aby teplota výfukových plynů neklesla pod teplotu rosného bodu. Pokud k tomu však nejsme nuceni vlastnostmi média, je vhodnější plyn zkapalnit a získat tak výparné teplo.

Odpadní teplo má obvykle nízkou teplotu (pod 300 °C). [10], [11] Takto uchované teplo nemá příliš velký potenciál, protože ho lze jen obtížně získat. Teplota média může být ovšem mnohem nižší než 300 °C a přenos tepla pak kvůli malému teplotnímu gradientu neprobíhá dostatečně rychle. Teplotní gradient je hnací silou při výměně tepla a je tedy vhodné, aby byl co největší. Teplota odpadního tepla je ovšem dána procesem, který toto teplo produkuje, a není možnost jej nějak navyšovat. Tento nedostatek se tedy řeší konstrukcí výměníků, které dokáží zefektivnit výměnu tepla mezi médii.

S využitím odpadního tepla je spojeno množství problémů, například nesoulad nabídky a poptávky, nestálost dodávek odpadního tepla, neznalost možností využití, nedostatečná návratnost investice a riziko zásahu do fungující technologie. [12] V případě menších lokálních podniků je problémem nedostatek dat o odpadním teple. Na území České republiky se nachází poměrně dost podniků produkujících odpadní teplo o vysoké teplotě. Na webu Waste heat [13] lze nalézt mapu, na které jsou vyznačena místa s větší produkcí odpadního tepla i s označením typu média.

Nejen elektrárny, ale i podniky z nejrůznějších odvětví průmyslu produkují odpadní teplo. Odpadní teplo lze rozdělit na čtyři typy podle média, kterým je teplo přenášeno. Jsou to proudy kapalin, spaliny, vodní pára a ostatní procesní plyny. [14] Teplo lze též rozdělit podle teploty na nízko, středně a vysoko teplotní, jak je uvedeno v tabulce 2.1. Toto rozdělení se ovšem v různých vědeckých pracích liší, například Johnson at al. [1] dělí odpadní teplo v rozsazích nízké (<230 °C), střední (230–650 °C) a vysoké (>650 °C).

Tab. 2.1 Rozdělení odpadního tepla podle teploty [11]

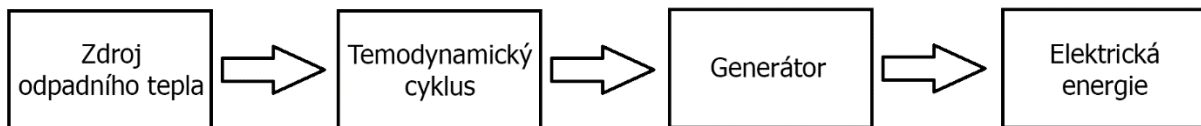
Teplota	Teploty	Podíl na celosvětově produkovaném odpadním teple
Nízká	<100 °C	63 %
Střední	100–299 °C	16 %
Vysoká	>300 °C	21 %

3 Nepřímá výroba elektrické energie

Tato skupina metod využívá vybraný termodynamický cyklus, aby z tepla vyrobila mechanickou práci, kterou následně přes generátor přemění na elektrickou energii. Na obrázku 3.1 je vidět obecné schéma nepřímé výroby elektrické energie. Odpadní teplo z mnoha procesů nedosahuje dostatečně vysokých teplot, aby bylo možné využít stejného způsobu výroby, jakou se vyrábí elektrina v elektrárnách. Výjimku tvoří ocelárny a cementárny, u kterých odpadní teplo dosahuje 1 370-1 650 °C. [15] V tomto případě je možné použít například klasický Rankin-Clausiiův cyklus, na kterém fungují běžné paroplynové elektrárny.

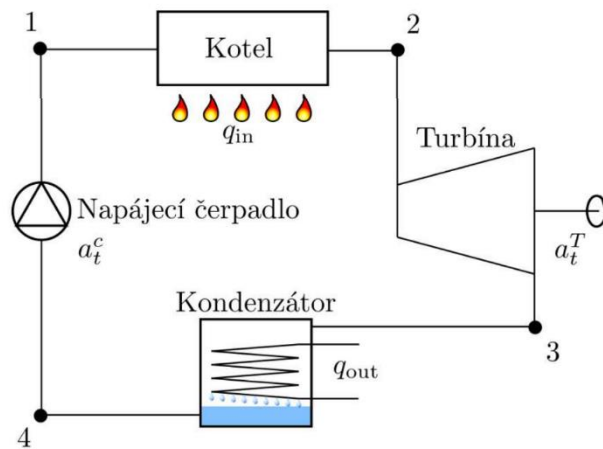
Aby bylo možné využít i odpadní teplo s nižšími teplotami, je potřeba nahradit klasický Rankin-Clausiiův cyklus jiným cyklem, který dokáže pracovat při výrazně nižších teplotách. Toho lze dosáhnout různými modifikacemi Rankinova cyklu. Například Organický Rankin-Clausiiův cyklus využívá médium o nižší teplotě varu a menším měrném výparném teple než voda, a tak dokáže pracovat při nižších teplotách. Dále Kalinův cyklus využívá proměnou teplotu varu a kondenzace pracovní látky a zvyšuje tak účinnost celého cyklu. V trilaterálním flash cyklu se pracovní médium ohřívá pouze do stavu syté kapaliny a následně expanduje. Nejlépe se tak teplotou přizpůsobuje teplotě zdroje tepla ve výměníku a má proto nejmenší ztráty.

Následující podkapitoly se budou věnovat výše zmíněným cyklům, popíší jejich základní principy fungování a uvedou podmínky, při kterých je vhodné dané cykly provozovat. Také uvedou, na co si dát při návrhu okruhu pozor.



Obr. 3.1 Schéma nepřímé výroby elektrické energie

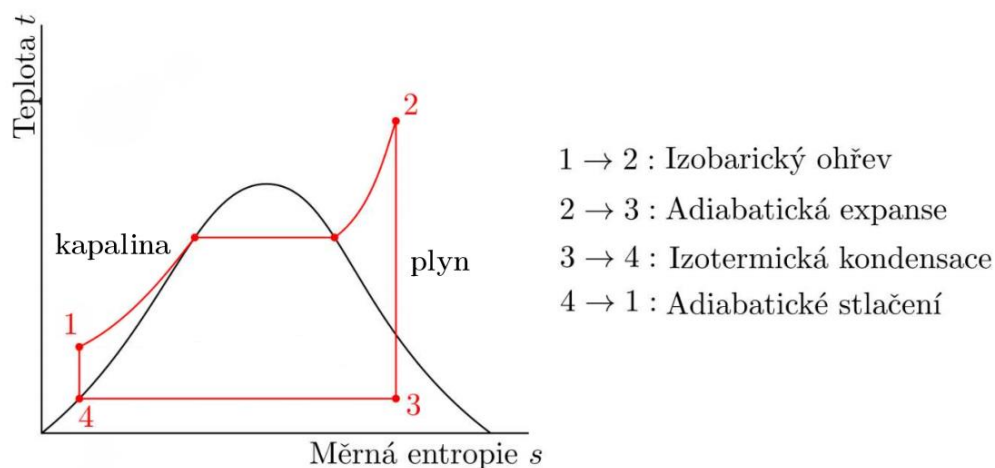
3.1 Klasický Rankin-Clausiovův cyklus



Obr. 3.2 Schéma klasického Rankin-Clausiova cyklu [16]

Jedná se o termodynamický cyklus, který reprezentuje ideální děj v tepelném zařízení. Během cyklu dochází ke změně skupenství pracovního média. Slouží k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Zařízení Rankin-Clausiova cyklu je skládá ze čtyř základních částí, napájecího čerpadla, kotle, turbíny a kondenzátoru, které jsou za sebou řazeny tak, jak je znázorněno na obrázku 3.2.

Na obrázku 3.3 je znázorněn T-s diagram, na kterém lze popsat princip fungování celého cyklu. Nejprve se pracovnímu médiu (stav 1) dodá teplo v kotli, nastává izobarický ohřev do stavu syté nebo přehřáté páry (stav 2). Následuje adiabatická expanze v parní turbíně, kde se tlaková potenciální energie pracovního média (páry) mění na mechanickou energii, turbína spojená hřídelí s generátorem se začne točit a generátor začne vyrábět elektrickou energii. S expanzí páry dochází zároveň k jejímu ochlazování do stavu mokré páry (stav 3). Pak je pára izotermicky zkapalněna v kondenzátoru, kde se pracovnímu médiu odebírá teplo. Nakonec je médium ve stavu syté kapaliny (stav 4) adiabaticky stlačeno čerpadlem, které žene kapalinu do výměníku, kde se pracovní médium znovu ohřívá. [17]



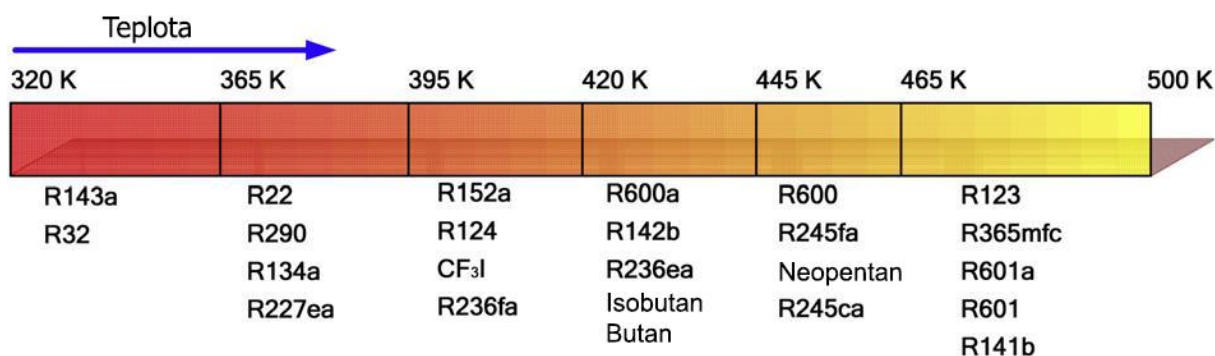
Obr. 3.3 T-s diagram ideálního Rankin-Clausiova cyklu s přehřevem páry (upraveno) [16]

Cyklus je vhodný pro odpadní médium o teplotě alespoň 340-370 °C. [1] Při nižších teplotách hrozí kondenzace vodní páry a koroze lopatek parní turbíny. Účinnost cyklu dosahuje až 38,4 %. [18]

3.2 Organický Rankin-Clausiov cyklus

Organický Rankinův cyklus (ORC), pracuje na stejném principu jako klasický Rankin-Clausiov cyklus. Odlišují se od sebe použitým pracovním médiem. Voda se vypařuje při příliš vysokých teplotách, než aby ji bylo možné využít jako pracovní látku pro cyklus pracující s odpadním teplem o nízkých teplotách. ORC proto pracuje s organickými látkami kterým mají nižší bod varu než voda. [19]

Jedna z nejdůležitějších komponent ORC je pracovní médium. Má nejzásadnější vliv na vlastnosti celého oběhu a je tedy třeba jej při návrhu oběhu optimálně zvolit především s ohledem na teploty odpadního tepla. Na obrázku 3.4 jsou přiřazeny některé pracovní látky k teplotám odpadního tepla, se kterými dokáží optimálně pracovat.



Obr. 3.4 Pracovní látky přiřazené k optimálním pracovním teplotám [20]

Používají se různé směsi organických sloučenin nebo směsi vody a organické sloučeniny. V tabulce 3.1 jsou uvedeny některé látky používané v ORC s jejich kritickými teplotami a teplotami varu při atmosférickém tlaku. Médium určuje, při jakých teplotách bude schopen oběh pracovat a z části také jakou bude mít celkovou účinnost. S rostoucí teplotou odpadního tepla je potřeba volit médium s vyšší kritickou teplotou. [21] Kritická teplota látky je limitní teplota, kdy při jejím překročení již není možné zvýšením tlaku dosáhnout kapalného skupenství látky. Tedy pokud pracovní médium má vyšší teplotou, než je kritická teplota, nelze ho zkapalnit. Médium je nutno vybírat i s ohledem na životní prostředí a zdravotní závadnost. [22] Mnoho organických látek má negativní vliv na úbytek ozonové vrstvy a přispívá ke skleníkovému efektu. Zároveň mohou být toxické a hořlavé. Environmentální závadnost se hodnotí pomocí vlivu na úbytek ozonové vrstvy ODP (ozone depletion potential) a vlivu na globální oteplování GWP (global warming potential). [23] Velmi často používané a v různých pracích zmiňované je médium R245fa, které je nehořlavé, má malou toxicitu, nízkou ekologickou závadnost [22] a dobrou účinnost pro nízké teploty odpadního tepla. [24]

Tab. 3.1 Přehled pracovních látek ORC [23]

Pracovní médium	Kritická teplota [°C]	Teplota varu při 101,325 kPa [°C]
Dekan	344	174
Oktan	296	125
Toluen	318	110
Cyklohexan	280	80,6
Benzen	289	79,9
Aceton	235	55,9
R245ca	174	25,0
R245fa	154	15,0
R114	155	3,5
R236fa	125	-1,6
R152a	113	-8,2
Isobutan (R600a)	135	-11,8
R134a	101	-26,1
R22	96,0	-40,9
Propan (R290)	96,6	-42,1
R125	65,9	-42,2
Oxid uhličitý	30,8	- ¹

Existují i oběhy které dokáží pracovat s nadkritickými teplotami média, tyto cykly se nazývají superkritické. Podle studie, kterou prováděl Dai et al. [25] jsou pro superkritické cykly z hlediska tepelné stability vhodnou látkou fluorovodíky. Z ekologického hlediska je vhodné médium oxid uhličitý.

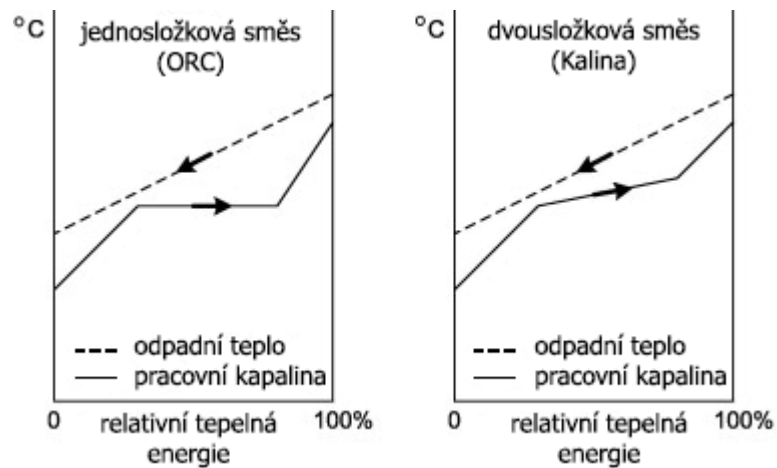
Účinnost ORC je silně ovlivněna nejen použitým médiem, ale i konstrukcí celého zařízení. V závislosti na počtu okruhů, použití regenerátorů a přehřívacích zařízení nebo rekuperátorů se teoretická účinnost zařízení pohybuje v rozmezí 7-35 %. [14] Reálné účinnosti v experimentálních studiích dosahují pouze 12 % účinnosti. [22]

V závislosti na pracovní látce je cyklus schopný efektivně pracovat se zdroji tepla o teplotách nižších než 100 °C. [1] Ovšem při takto nízkých teplotách má malou účinnost. S rostoucí teplotou odpadního tepla roste i účinnost cyklu. [21] Při teplotách vyšších než 310 °C již organické látky neposkytují vyšší účinnost než voda, a tak aplikace ORC ztrácí smysl a je lepší použít klasický Rankin-Clausiusův cyklus. [26] Komerčně používané systémy pracují s teplotami 80–400 °C. [22]

¹ Při atmosférickém tlaku se CO₂ v kapalném skupenství nevyskytuje.

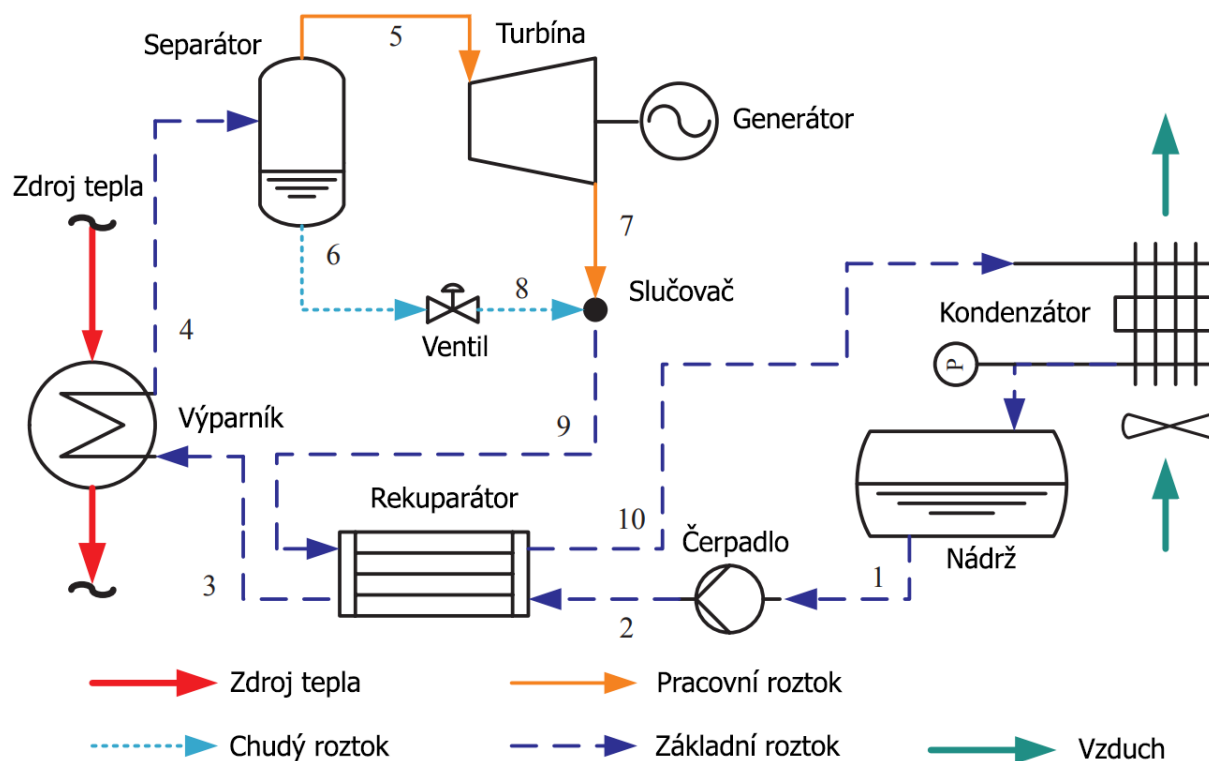
3.3 Kalinův cyklus

Jedná se o další modifikaci Rankinova cyklu, který je schopný pracovat s teplem o nižší kvalitě. Používá směs vody a amoniaku nebo vody a bromidu lithného jako teplo vodivého média. Díky tomu pracovní látka při vypařování a kondenzaci mění svou teplotu, jak je vidět na obrázku 3.5. Lépe se tak přizpůsobuje teplotě výměníku a lépe využívá tepelný potenciál odpadního média. Tato schopnost média zvyšuje termickou účinnost celého cyklu. [1], [19]



Obr. 3.5 Teplota směsí při vypařování (upraveno) [27]

Kalinův cyklus (KC) pracuje na principu absorpce a musí kvůli tomu obsahovat absorbér a armatury, které konstrukci zařízení značně prodražují. Na obrázku 3.6 je schematicky zobrazen Kalinův cyklus. Na začátku je základní roztok (stav 1) čerpán do rekuperátoru, kde se ohřívá do stavu 3 a vstupuje do výparníku. Ve výparníku se roztok ohřívá a část se vypaří (stav 4). V separátoru se od sebe oddělí pára amoniaku (stav 5) a roztok chudý na amoniak (stav 6). Pára s vysokým tlakem expanduje na turbíně, která je připojena ke generátoru a ten vyrobí elektrickou energii. Roztok chudý na amoniak se přes škrťací ventil dostává do stavu 8 a ve slučovači se míchá s expandovanou párou amoniaku (stav 7). Následně směs prochází přes rekuperátor, kde odevzdá část svého tepla, a nakonec v kondenzátoru zkapalní na stav 1. [28]



Obr. 3.6 Schéma Kalinova cyklu [28]

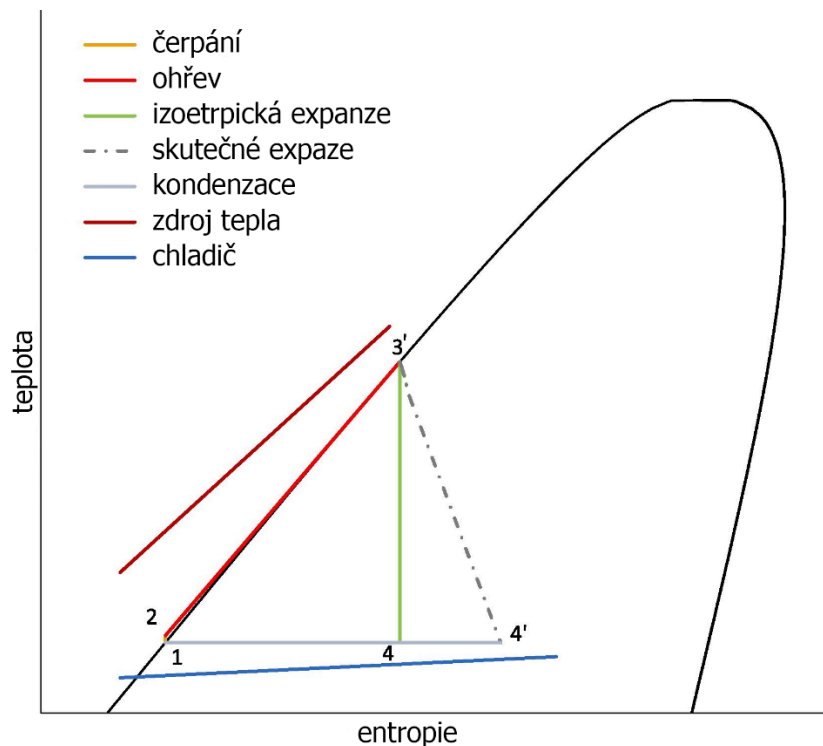
Výhodou KC oproti ORC je možnost regulace poměru vody a amoniaku v pracovní směsi a schopnost cyklu se tak přizpůsobit různým teplotám odpadního tepla. [29] Oběh tak může efektivněji pracovat s proměnou teplotou odpadního tepla.

Cyklus dosahuje účinnosti až 23,2 % [30] a je schopen pracovat s teplotami odpadního tepla v rozsahu 90–515 °C. Při použití LiBr–H₂O jako pracovní látky je oběh schopen pracovat i při teplotách 80–140 °C. [31]

3.4 Trilaterální Flash Cyklus

Kalinův cyklus se již lépe přizpůsobuje teplotě výměníku v průběhu ohřevu média, avšak konstrukce cyklu je kvůli separátoru a dalším tepelným výměníkům složitější. Tento problém řeší Trilaterální Flash cyklus (TFC), který žádný separátor nepoužívá. Má velmi podobnou konstrukci jako ORC nebo klasický Rankin-Clausiiův cyklus. [32] Na rozdíl od výše zmíněných technologií, nepracuje podle Carnotova cyklu a dosahuje tak při nízkých teplotách vyšších účinností. [33]

Jak lze na obrázku 3.7 vidět, cyklus se skládá ze stejných částí jako předešlé cykly s tím rozdílem, že se pracovní médium ohřívá pouze do stavu syté kapaliny. Principiálně je oběh již podrobně popsán v kapitole 3.1. Zásadní rozdíl je v tom, že pracovní látka neprochází přeměnou skupenství, díky čemuž se může lépe přizpůsobit teplotě výměníku a lépe se využije energie v odpadním médiu. Po tom, co médium dosáhne stavu syté kapaliny bleskově expanduje na turbíně, kde se část média přemění na plyn. Následně je v kondenzátoru tento plyn znovu zkapalněn a spolu s kapalinou proudí přes čerpadlo zpátky do výměníku tepla.



Obr. 3.7 T-s diagram TFC [32]

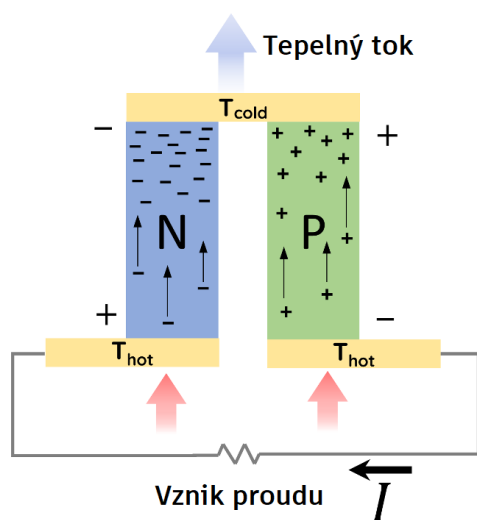
Cyklus může pracovat s relativně nízkými teplotami odpadního tepla z průmyslu, s geotermální energií, s procesními chladícími kapalinami a také se může uplatnit jako poslední cyklus v systémech na výrobu elektrické energie. [34] Je schopný efektivně využít odpadní médium o teplotách 70–200 °C [35] a dosahuje účinnosti až 70 %. [36]

4 Přímá výroba elektrické energie

Při výrobě elektrické energie prostřednictvím mechanické práce je zapotřebí složité zařízení, na které je potřeba velký prostor. Zároveň tato zařízení obsahují pohyblivé části, které jsou náchylné k poruchám. Tyto nedostatky řeší metody přímé výroby elektrické energie, které neobsahují mezistupeň, neprobíhá v nich žádný termodynamický cyklus a zařízení jsou obvykle lehčí než u přímých metod. Metody přímé výroby elektrické energie jsou zpravidla vhodné pro odpadní teplo o nízké teplotě. Avšak jejich nízká účinnost jim zabraňuje v průmyslovém použití. [19]

Jejich malé rozměry a nízká hmotnost jim umožňují implementace do malých zařízení. V budoucnu by tak mohli například nahradit baterie v nositelné elektronice a energii získávat z tělesného tepla. [37] Obecně mají potenciál nahradit elektrické zdroje s malými výkony, protože žádná z metod není invazivní, není tak potřeba zásah do konstrukce stávajícího zařízení produkující odpadní teplo.

4.1 Termoelektrické generátory



Obr. 4.1 Schéma termoelektrického generátoru [38]

Termoelektrické generátory (TEG) využívají termoelektrického jevu k výrobě elektrické energie. Termoelektrický jev, též nazývaný Peltier-Seebeckův jev, je fyzikální úkaz, který označuje chování polovodiče kdy při Seebeckově jevu se teplo mění na elektrickou energii, a naopak u Peltierova jevu se elektrická energie mění na teplo. [1]

Termoelektrický článek má tím větší výkon, čím větší je tepelný tok skrz článek. Většího tepelného toku můžeme dosáhnout větším rozdílem teplot na teplé a studené straně zařízení nebo lepším odvodem a přívodem tepla. Toho lze docílit pomocí větší plochy výměníku a chladiče nebo použitím lépe tepelně vodivých materiálů. [39]

Na obrázku 4.1 je schéma termoelektrického generátoru. TEG nebo také často nazývaný Peltierův článek, se skládá z polovodičových materiálů, které při vystavení rozdílu teplot vytvoří elektrické napětí. Pokud na článek přivedeme napětí může být zařízení využito pro chlazení. [1], [19]

Výkon termoelektrického materiálu je udáván bezrozměrným číslem ZT (dimensionless figure of merit), které je závislé na Seebeckově koeficientu, elektrické vodivosti, teplotě, tepelné vodivosti elektroniky a tepelné vodivosti krystalické mřížky. [40]

Nejúčinnější články jsou schopny pracovat s 14% účinností při teplotách 550 °C. S klesajícím teplotním rozdílem však klesá účinnost i výkon. [41] Moduly navržené pro malé teplotní rozdíly mohou pracovat i při teplotách pod 0 °C. [42] Studená strana článku ale musí být stále chladnější než teplá a bylo by tedy potřeba studenou stranu chladit, což by bylo ekonomicky nevýhodné. Reálně lze články provozovat při teplotách vyšších, než je okolní teplota. Vyrábějí se i články schopné pracovat s teplotami 800 °C. [43] Ve formě radioizotopového termoelektrického generátoru se využívá v kosmickém průmyslu. Tyto zařízení pracují s účinností okolo 7 % avšak rozpadající se plutonium dosahuje 1 000 °C. [44] Nicméně tato aplikace nevyužívá odpadní teplo.



Obr. 4.2 Peltierův článek [45]

4.2 Piezoelektrická výroba energie

Piezoelektrická výroba energie je založena na piezoelektrickém jevu, který označuje chování, kdy při deformaci materiálu v něm vznikne elektrické napětí. Molekuly teplého odpadního média mají kinetickou energii, kterou je možné pomocí piezoelektrické membrány konvertovat na elektrickou energii. [19]

Tato metoda je vhodná pro provoz při teplotách 100-150 °C. Trpí ovšem velmi nízkou účinností, je drahá a také je schopná pracovat pouze na nízkých frekvencích 100 Hz. [1] Pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla je tady nepoužitelná.

Komerčnímu použití technologie brání složitost výroby piezoelektrické membrány, schopnost membrány pracovat pouze s nízkými frekvencemi a příliš vysoký vnitřní elektrický odpor. [1] [19]

4.3 Termoemisní generátory

Pracují na základě termoemise. Kovová katoda (emitor) se nahřívá a vyzářuje proud elektronů, ty prolétají vakuem a dopadají na anodu (kolektor). Tak vznikne mezi elektrodami elektrické napětí. [19]

Tato technologie pracuje při teplotách vyšších než 1 000 °C, a i tak má malou účinnost, z těchto dvou důvodů nenachází na zemi uplatnění, neboť odpadní teplo obvykle nedosahuje takto vysokých teplot. [1], [19]

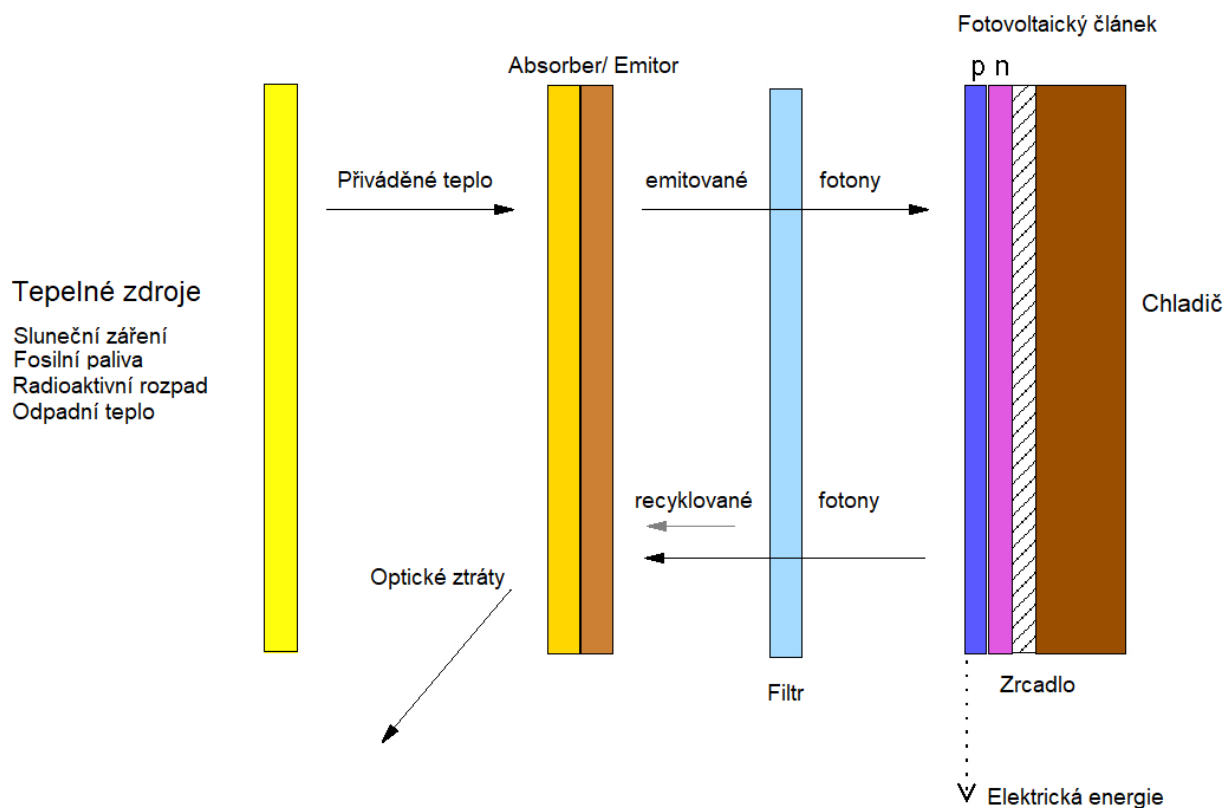
Při použití NETEC (Near-field thermionic emission conversion) generátorů s primárním zdrojem energie, se předpokládá, že by bylo možné dosáhnout až 40% účinnosti. Se stoupající teplotou účinnost zařízení roste. [46]

4.4 Termofotovoltaické systémy

Tato metoda funguje na principu přeměny tepla na záření a následně přeměně záření na elektrickou energii. Jsou to tedy systémy fungující z části na stejném principu jako solární panely, avšak pro svou činnost využívají širší oblast spektra a jsou tak účinnější. [47] Zařízení se skládá z emitoru, filtru a fotovoltaiického (PV) článku.

Na obrázku 4.3 je vyobrazeno schéma termofotovoltaického článku. Princip zařízení spočívá v ohřevu emitoru odpadním teplem, který vyzářuje elektromagnetické záření. To prochází přes filtr, který propouští pouze fotony o požadované vlnové délce, ostatní fotony jsou odraženy zpět a dochází tak k úspoře energie. Propuštěné záření dopadá na PV článek, čímž se generuje napětí. [19], [48] Za PV článkem se ještě nachází zrcadlo, které odráží záření zpět k emitoru, čímž se eliminují ztráty a zvýší se účinnost.

Emitor je součástí, která má za úkol pohltit co nejvíce elektromagnetického záření odraženého od zrcadla a od filtru. Zároveň musí být schopný vyzářovat fotony na PV článek. [49]

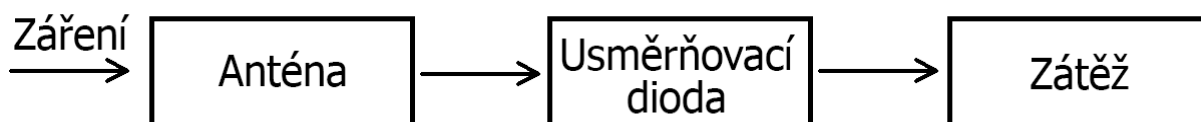


Obr. 4.3 Schéma termofotovoltaického článku [50]

Systém je schopný pracovat s teplotami 27–2 230 °C. [51], [52] Jeho účinnost dosahuje až 29 %. [53]

4.5 Usměrňovací antény

Další zařízení, které využívá elektromagnetické záření pro výrobu elektrické energie jsou usměrňovací antény. Každý povrch o teplotě vyšší 0 K emituje elektromagnetické záření, které je možné pomocí těchto antén využít. Při nízkých teplotách se vytváří záření v mikrovlnném (gigahertzovém) pásmu. Se zvyšující se teplotou pak záření přechází do infračerveného (převážně terahertzového) pásmu. Na obrázku 4.4 je schéma celého systému. Elektromagnetické vlnění je pomocí antény zachyceno a přeměněno na střídavý elektrický proud. Protože většina elektrických zařízení funguje na stejnosměrný proud je anténa doplněna usměrňovací diodou a tlumivkou. Usměrňovací dioda usměrní střídavý proud na stejnosměrný a tlumivka zachytí prudké výkyvy v napětí. Aby dioda umožňovala usměrnit záření s vysokými frekvencemi, musí být schopna se rychle přepínat. [54]



Obr. 4.4 Schéma usměrňovací antény

Tato technologie je zatím v počátcích výzkumu a bude ještě trvat, než se stane komerčně výhodnou. Lákavou vlastností jsou velmi malé rozměry pohybující se v nanometrech. Takové zařízení by se mohlo vyrábět podobným procesem jako se dnes vyrábí mikroprocesory. Jelikož je anténa velmi malá, nabízí se možnost spojení více antén a dosáhnout tak vyššího výkonu. Velice vhodným materiálem pro antény se jeví grafen, díky jeho výborné elektrické vodivosti, a tedy malým ztrátám v zařízení. [55]

U antény se neuvádí teplota, při které dokáže pracovat, ale frekvence záření. Podle Ullah et al. [55] dokáží pracovat s 0,5 – 600 THz. Existují i pokusy o využití tepla z lidského těla. [54] Teoreticky jsou tedy antény schopny pracovat od teplot pod 0 °C až po tisíce stupňů Celsia. Obvykle ale tato zařízení pracují při teplotách 730–1 730 °C. [56] Při použití vrstvy grafenu na povrch polovodičové GaAs antény by celková účinnost mohla dosáhnout až 58 % v terahertzovém pásmu. [55] Antény pro mikrovlnné záření mohou mít účinnost vyšší než 85 %. [56]

5 Aplikace technologií

Systémy na využití odpadního tepla jsou často aplikovány v průmyslu, kde jsou využívány pro zvýšení účinnosti vybraného procesu. Každý provoz totiž využívá pro svůj běh elektrickou energii, byť jen třeba na svícení v halách. A pokud si podnik vyrobí vlastní elektrickou energii z odpadního tepla, ušetří následně na dodávkách za elektřinu.

Tato kapitola uvádí případové studie a aplikace jednotlivých technologií v praxi. Dává do souvislosti využitelnost, ekonomické a ekologické hledisko. Snahou je poskytnout reálné naměřené hodnoty a upozornit na možné problémy spojené s konkrétním řešením.

Lze nalézt spoustu článků zabývajících se dříve zmíněnými technologiemi. Při vyhledávání případových studií bylo hlavním kritériem použití technologie právě pro přeměnu tepla na elektrickou energii. Nebo aby pojednávala o zdokonalení technologie a zlepšení vlastností potřebných pro použitelnost zařízení pro výrobu elektřiny z odpadního tepla. Vědecké články byly vyhledány především v systému Primo.

5.1 Klasický Rankin-Clausiovův cyklus

Kizilkan [18] ve své případové studii pojednává o parním Rankin-Clausiově cyklu, který je používán v cementárně pro využití odpadního tepla. Zařízení má výkon 8 MW, teploty vstupních kouřových plynů se pohybují v rozsahu 376–451 °C a výstupní teploty v rozsahu 136–195 °C. Termodynamická účinnost cyklu je 24,2 % a exergetická účinnost 51,4 %. Největší exergetické ztráty byly v jednom z boilerů, který ohříval vodu odpadním teplem z chladiče slínku.

Marlok et al. [57] navrhli a simulovali systém pro hybridní automobily, který by z tepla výfukových plynů vyráběl elektřinu. Tato energie by se pak mohla použít na pohon pump pro chlazení, klimatizaci a ventilátoru pro chlazení motoru. Systém dosáhl 3,2% účinnosti. Podle autorů se podařilo vyvážit účinnost a náklady na výrobu a navržené řešení by mohlo mít návratnost dva roky. Kvůli instalaci zařízení by se musela zmenšit nádrž auta, ale výhody plynoucí ze systému by tuto nevýhodu převyšovaly.

Zhou et al. [58] navrhli implementaci Rankinova cyklu do kamionů pro využití odpadního tepla z výfukových plynů diesellových motorů. Porovnali možnosti využití výfukových plynů a chladícího média motoru a na základě exergetického potenciálu vybrali spaliny jako vhodnější zdroj tepla. To bylo zapříčiněno vyšší teplotou spalin. Jako pracovní látka byla nejprve uvažována voda, kvůli své vysoké entalpii při vypařování a tím i vyššího výkonu a účinnosti. Avšak kvůli potřebě přehřívání páry nemusí být podle autorů nejvhodnější látkou. Organická látka by byla vhodnější při práci s nižšími teplotami a je tak nutné zvolit pracovní médium s ohledem na konkrétní vozidlo.

5.2 Organický Rankin-Clausiovův cyklus

Pro využití odpadního tepla s velkými výkony se v praxi nejčastěji využívá ORC. Protože je koncept cyklu dlouhou dobu známý, bylo již na něm provedeno velké množství simulací, testování a bylo o něm napásáno spousta vědeckých prací. Protože je tak dobře známý, nachází časté uplatnění v průmyslu. Nejčastěji je aplikován do hutního, keramického a cementárenského průmyslu, kde se pracuje poměrně s vysokými teplotami. V České republice jsou systémy s ORC nejčastěji nabízenou možností pro výrobu elektřiny z odpadního tepla.

Experimentální soustava v případové studii, kterou provedl Lin et al. [59] používala jako pracovní látku R245fa. Odpadní teplo o teplotě 120 °C a výkonu 34–77 kW bylo simulováno elektricky ohřevaným olejem. Hmotnostní tok se pohyboval v rozmezí 0,12–0,3 kg/s. Jako turbína byl použit scroll expandér. Experimentální soustava měla elektrický výkon 6,2 kW a termodynamickou účinnost 8,9 %. Experiment ukázal, že se zvyšujícím se poměrem tlaků před a za expandérem roste i elektrická účinnost zařízení. Pinch point (pinch temperature) neboli minimální teplotní rozdíl mezi pracovní látkou a odpadním médiem, by neměl být nižší než 10 °C. Jinak začne hmotnostní tok a tlak média kolísat, což se může negativně projevit na komponentech a systému jako celku.

Mirzaei et al. [60] představili model, pomocí kterého analyzovali ORC z hlediska energie, exergie a zahrnují i ekonomické hledisko. Jako zdroj odpadního tepla byly uvažovány plyny z tavné pece na kovy o teplotě 550 °C a hmotnostním toku 7 kg/s. Zařízení se skládalo ze dvou okruhů. První okruh tvořila voda a druhý organická látka, která se ohřívala do stavu přehřáté páry. V prvním okruhu byl použit ekonomizér, výparník a přehřívák. V druhém okruhu byl za turbínou umístěn regenerátor. Výpočty byly provedeny pro několik látek a nejlepší vlastnosti vykazovali m-xylen, P-xylen a ethylbenzen, které měly nejvyšší termodynamickou účinnost (kolem 37,5 %) a čistý elektrický výkon (1 130 kW). Navíc tyto látky vyžadovali nejmenší plochu výměníků (280 m²) a byli také jedny z nejlevnějších (630 000 USD v přepočtu 14 mil. Kč). O trochu nižší náklady na pořízení měl pouze n-dekan, který ovšem vykazoval horší účinnosti i nižší výkon.

Studie, kterou provedl P et al. [22] se zabývá reálným použitím ORC v keramickém průmyslu. Zdrojem odpadního tepla pro ORC byl olej z výměníku tepla ohřátý na 165 °C. Výměník byl ohříván plyny z vypalovací pece na keramiku o teplotě 287 °C a objemovém průtoku 1,15 Nm³/s. Jako pracovní médium bylo použito R245fa. Byla naměřena čistá elektrická účinnost 10,94 % a čistý elektrický výkon 18,51 kW. Při použití této technologie by se ročně ušetřilo 31 t CO₂ a návratnost investice do ORC systému byla na základě výpočtu odhadnuta na 4,63 let.

V simulaci, kterou prováděli Milensky, J. a J. Krasucki [29] dosáhl ORC nejvyšší elektrické účinnosti 18 % při teplotách 205 °C s látkou butylbenzen. Avšak v kondenzátoru by muselo být dosaženo takřka vakua. V nižších teplotách by bylo vhodnější použít n-hexan, který při teplotách 170 °C dosahoval přibližně 13,7 % účinnosti. Protože cyklus získával odpadní teplo z obloukové pece, bylo potřeba okruh pro stabilnější dodávku tepla opatřit zásobníkem páry.

Společnost LBG Moravia je česká společnost, zabývající se úsporami elektrické energie, zpracováním odpadního tepla pro výrobu elektrické energie, tříděním a energetickém využití odpadů a solární energií. Vyrábí ORC systémy pro venkovní i vnitřní použití. Jejich zařízení jsou konstruované pro teploty 80–150 °C s možností zpracovat až 7 MW odpadního tepla. Účinnost se pohybuje v rozmezí 6 až 13 % v závislosti na pracovních podmínkách. Firma naprojektovala ve Francii zařízení s instalovaným výkonem 740 kWe a 3 000 kWth. Zařízení zužitkovává teplou vodu o teplotě 150 °C s 11,5% účinností. V Rumunsku postavila zařízení využívající teplou vodu o 85 °C s 7% účinností a instalovaným výkonem 200 kWe a 3 000 kWth. [61]

Firma B:POWER vyrábí spalínové a horkovodní ORC. Spalínové systémy získávají teplo přímo ze spalin nebo horkého vzduchu a mají díky tomu účinnost 18–22 %. Odpadní médium však musí mít minimálně 350 °C. Tato jednotka má instalovaný výkon až 250 kWe a zároveň dodává teplou vodu o teplotě až 90 °C, která pochází z chladiče ORC. Horkovodní ORC jsou již schopny zpracovat odpadní kapalinu o teplotě 77 °C. Jako pracovní médium používají pentafluoropropan a dosahují účinnosti 7 %. Maximální instalovaný výkon je 110 kWe. [62]

5.3 Kalinův cyklus

V případových studiích je ORC často porovnáván s KC. Ačkoliv by KC měl mít lepší účinnost než ORC, ve vědeckých pracích se výsledky různí a to zda je účinnější KC či ORC závisí nejen na teplotě odpadního tepla, ale i na tom jak bylo zařízení optimalizováno pro dané podmínky.

V již zmíněné simulaci Milewsky, J. a J. Krasucki [29] byl pro porovnání s ORC zvolen KC. KC dosáhl maximální účinnosti 14,5 % při teplotě odpadního tepla 205 °C. Zároveň však dosáhl i vysokého tlaku přes 10 MPa na vstupu do turbíny. Autoři konstatovali, že KC při teplotách nad 200 °C umožňuje vyšší výkon než ORC. Avšak při teplotách pod 180 °C je ORC značně výkonnější.

Prananto et al. [63] se ve své studii zabývali využitím odpadní vody (solanky) z geotermální elektrárny. V elektrárně totiž termální voda prochází separátorem, který ji dělí na čistou vodní páru a odpaní solanku neboli vodu s rozpuštěnými soli. Tato voda je velmi korozivní a také zanáší potrubí, takže byl brán do úvahy i index sytosti SiO_2 (SSI – silica saturation index), pomocí kterého určili minimální teplotu solanky 113 °C, při které se ještě sůl nezačne z vody vylučovat. Odpadní solanka měla teplotu 180,7 °C, tlak 1,02 MPa, hmotnostní tok 48 kg/s a koncentraci SiO_2 853 mg/l. Sestavili model, pomocí kterého vypočítali závislost generované energie na tlaku vstupní solanky a poměru amoniaku v pracovním médiu. Podle modelu by elektrárna generovala nejvíce energie při 86 % podílu amoniaku v médiu, tlaku solanky 3,2 MPa a pinch teploty 5 °C. Následně počítali s celým systémem geotermální elektrárny a zjistili, že KC by byl schopný dodávat 1 734 kW s 13,20 % termickou účinností. Čistý výkon cyklu, po odečtení příkonu pumpy a ventilátoru na kondenzátoru, by byl 1 660 kW.

5.4 Trilaterální Flash cyklus

Poměrně nový cyklus je TFC. Jeho oblast použití je při teplotách odpadního tepla s teplotami nižší než 100 °C, kde ORC a Kalinův cyklus již nemají vysokou účinnost. Zmínky o této technologii se objevují pouze ve vědeckých člancích. V průmyslu zatím není cyklus aplikován.

Pro projekt I-ThERM byl navrhnout trilaterální flash cyklus pracující s teplotami 70-100 °C a výkonem 100 kWe. Pro tyto podmínky TFC generuje více elektrické energie než ORC. [34]

Iqbal et al. [32] provedli studii, ve které z důvodu nízké ceny a jednoduchosti konstrukce použili impulzní Peltonovu turbínu. Zaměřili se na teploty pod 100 °C. Ve své studii několikrát uvedli, že výkon celého zařízení je určen především izoentropickou účinností trysky, která se nachází před Peltonovou turbínou. Jako pracovní médium použili isopentan z důvodu dobře známých termofyzikálních vlastností, nízké ceně a teplotě varu mírně nad pokojovou teplotou. Jejich experimentální sestava dosáhla 0,9-1 % termické účinnosti a produkovala 45 kW elektrické energie, při 70% účinnosti turbíny a 70% účinnosti generátoru. Pokud by zařízení bylo konstruováno pro větší výkony a celková konstrukce by byla lépe optimalizována, mohla by sestava dosáhnout 2-3% účinnosti. Studovali také geotermální elektrárnu, která využívala ORC a nedokázala využít veškerý potenciál termální vody. Teplota vody, která opouštěla elektrárnu dosahovala 80 °C. Tyto vody by mohly být využity pro ohřev TFC. Provedli simulaci pomocí, které zjistili, že při pouhé 40% účinnosti trysky by byla návratnost investice 7 let.² V závěru svojí práce uvádí, že delší tryska je vhodnější pro vyšší teplotu pracovního média. Zároveň se ukázalo, že Peltonova turbína není vhodná pro použití se stacionární tryskou.

Garcia et al. [33] porovnávali účinnost TFC s Carnotovou účinností. Autoři použili model cyklu využívající odpadní páry z nízkotlaké parní turbíny tepelné elektrárny. Jako pracovní látka bylo

² při úrokové sazbě 6 %

testováno hélium a vodík, kvůli jejich vysoké měrné tepelné kapacitě. Sestava byla modelována v rozsahu teplot 27–39 °C pro odpadní látku s teplotou chladicí vody 15 °C. Se zvyšující se teplotou mírně rostla ideální termodynamická účinnost. Pro vodík se pohybovala okolo 58,5 % a pro helium okolo 80,5 %. Celková účinnost cyklu se pak pohybovala kolem 18,5 % pro vodík a 25,3 % pro hélium. Nejdůležitějším poznatkem studie však je, že termodynamická účinnost cyklu byla vyšší než účinnost Carnotova cyklu. To proto, že byla využita speciální konstrukce, kdy do komory byly instalovány ohřívače a chladiče, které měnili teplotu plynu v komoře. Komora byla rozdělena pístem, který byl napojen na nádobu s kapalinou a sloužil jako pístové čerpadlo. Čerpaná kapalina proudila přes generátor a vyráběla tak elektrickou energii. Obě strany pístu, tak konali práci společně. Těž izobarický děj probíhající při kompresi a expanzi a výběr pracovních plynů pomohl zvýšit celkovou účinnost zařízení.

5.5 Termoelektrické generátory

Jung et al. [40] zkoumali halogenid $\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{I}_5$ pro použití jako termoelektrický polovodičový materiál. Zjistili, že tato sloučenina umožňuje efektivní přenos elektronů. Zároveň má mřížka materiálu velmi malou tepelnou vodivost, díky které má materiál vysoké číslo ZT 2,57 při 327 °C. Při teplotě studené strany článku 27 °C by bylo možno dosáhnout 15% termodynamické účinnosti.

Liu et al. [37] vyvinuli flexibilní TEG pro výrobu elektrické energie pro nositelnou elektroniku z tělesného tepla. Článek dosáhl hustoty energetického toku $20,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ při použití na lidské ruce a okolní teplotě 16 °C. Maximální hustota energetického toku byla dosažena při teplotním rozdílu 50 °C a činila $13,8 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Pro matici vytvořili porézní polyuretan, který je pružný, dobře stlačitelný, lehký a velmi špatně vede teplo, což je z důvodu vytvoření teplotního rozdílu žádoucí. Tato studie ukazuje, že již existují technologie schopné pracovat s malým teplotním rozdílem a zároveň, že tato zařízení mohou být velmi malá a lehká v porovnání s ostatními průmyslovými stroji. Lze je tak umístit například na potrubí s odpadním teplem a získávat elektrickou energii pro měřicí přístroje.

5.6 Piezoelektrická výroba energie

Piezoelektrické generátory, které by se používaly pro přeměnu tepla na elektrickou energii se v literatuře neobjevují. To především z důvodu neschopnosti technologie pracovat s vyššími frekvencemi než 100 Hz. Dohledatelné byli pouze takové zařízení, které by byli schopné pracovat například s deformací nosníků [64] nebo deformací vozovky při průjezdu vozidla. [65]

5.7 Termoemisní generátory

Duzik a Choi [44] testovali různé materiály jako emitery pro radioizotopový termoemisní generátor, který by mohl nahradit baterie v mobilních zařízeních s nízkou spotřebou nebo i klasické radioizotopové generátory. Z měření vzešlo, že nejvhodnějším materiálem je měď s produkcí $9 \cdot 10^{-6} \text{ A}/\text{mm}$ a mezerou mezi emitorem a kolektorem 1 mm. Na základě svého měření odhadli, že měděný emitor o rozměrech 4 cm^2 a mezerou mezi jednotlivými vrcholy emitoru $1 \mu\text{m}$ by mohl produkovat 16 W elektrické energie. A při tloušťce vrstvy vakua 1 mm, které působí jako tepelná izolace, by k tomuto účelu stačilo pouze 1,5 g radioaktivního plutonia. Uvnitř článku by se tak udržela teplota nad 700 °C a radiace z rozpadu, se kterými je spojená nebezpečnost této aplikace. Pu^{238} však při svém rozpadu nevyzařuje mnoho gama záření a tak 2,5 mm vrstva olova poskytuje dostatečnou ochranu. Pokud by namísto vakua byly použity

páry cesia, zařízení by bylo schopno pracovat s vyšší účinností, avšak vysoká reaktivita a cena cesia brání v jeho aplikaci.

5.8 Termofotovoltaické systémy

Li et al. [51] vyrobili termofotovoltaický článek s děrovou vodivostí. Jako polovodič typu N použili Bi_2Te_3 a jako polovodič typu P použili Sb_2Te_3 . Autoři zvolili tyto materiály, protože byli dobře obeznámeni s jejich vlastnostmi a chováním. Je tedy pravděpodobné, že pro tuto aplikaci existují vhodnější dosud známé materiály, které autorům nebyly známy a další výzkum by se mohl zaměřit na jejich nalezení. $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ články umí zachytit širší spektrum elektromagnetického záření než klasické fotovoltaické GaSb a GaInAsSb články a jsou tak účinnější pro výrobu elektrické energie z nízké teploty odpadního tepla. Zařízení bylo testováno při pokojových teplotách, přičemž teplota odpadního tepla se pohybovala v rozmezí 27-197 °C. Článek dosáhl velmi malé účinnosti v řádu miliontin procent z důvodu slabého záření zdroje, nízké pohltivosti článku, sktruktury heteropřechodu³ a rekombinací⁴ ve vrstvách polovodiče. A je tak pro praktickou aplikaci nepoužitelný. Experiment však ukázal, že polovodiče s úzkou mezerou mohou být použity pro výrobu elektrické energie ze zdroje tepla o nízké teplotě.

Omair et al. [53] vytvořili velmi účinné termofotovoltaické zařízení. Jako zdroj tepla posloužila uhlíková páska, které byla žhavana elektrickým proudem. Systém byl schopen pracovat s 29% účinností při teplotě zdroje 1207 °C. Přičemž se snižující se teplotou klesala i účinnost. Pro experiment byl použit $\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$ článek s velikostí zakázaného pásma 0,75 eV. Autoři uvádí, že se zvyšující se teplotou zdroje by účinnost mohla dále růst. Velké účinnosti článku bylo dosaženo díky vysoké odrazivosti zrcadla (94,6 %) a lepší shodě velikosti zakázaného pásma materiálu s Plakovým spektrem.

5.9 Usměrňovací antény

Pan et al. [54] testoval sestavu, ve které použili širokopásmovou spirální anténu schopnou přijímat infračervené záření středního pásma a terahertzového pásma. Jako anténa posloužila tenká vrstva z germania a zlata, která byla umístěna před štěrbinou se zorným úhlem 37 °. V zařízení byla též použita nano samospínací dioda. Zařízení bylo testováno v rozmezí teplot 300-700 °C. Přičemž při maximální teplotě 700 °C dosáhlo napětí na výstupu 40 mV a proud 6,6 nA. Zároveň se i při této teplotě dosáhlo maximální účinnosti 0,02 %. Nízká účinnost byla způsobena především rozdílnými impedancemi antény a diody. Produkce zařízení o velké ploše, kde by bylo propojeno několik usměrňovacích antén, by mohlo napomoci praktické aplikaci.

³ Přechod materiálů s různými šířkami zakázaného pásu

⁴ Zaplnění díry elektronem a uvolnění energie

6 Shrnutí dostupných technologií

Z případových studií vyplývá, že daleko používanější jsou metody nepřímé výroby elektrické energie. Je to především z důvodu vyšších účinností než u přímých metod. Nepřímé metody se skládají z termodynamických okruhů, které tvoří jádro zařízení, a generátorů, které přeměňují mechanickou práci na elektrickou energii. To umožňuje konstrukci zařízení s vysokými výkony.

ORC se nepoužívá jen pro rekuperaci tepla z odpadního média, ale slouží i jako zařízení využívající primární zdroj v geotermálních elektrárnách nebo elektrárnách na biomasu. Cyklus je oblíbenou volbou díky jeho vhodnému rozsahu pracovních teplot a dobré účinnosti. Velkou variabilitu mu poskytuje nejen množství pracovních látek, se kterými může fungovat, ale i různé konstrukční prvky jako rekuperátory, regenerátory a více oběhové konstrukce. Velký potenciál poskytuje moderní TFC, který je schopný pracovat s menšími teplotními rozdíly mezi odpadním a chladícím médiem a může být využit ve více aplikacích než ORC. Zároveň má systém velmi podobnou konstrukci jako ORC a má tak srovnatelné náklady na pořízení. Kalinův cyklus ideálně pracuje při teplotách, které již pokrývají ORC a TFC, kvůli jeho složité konstrukci, a tedy vysoké ceně si nemyslím, že bude Kalinův cyklus v budoucnosti velmi používán. Klasický Rankin-Clausinův cyklus pracuje pouze s velmi vysokými teplotami a mnoho procesů neprodukuje odpadní teplo o dostatečně vysoké teplotě, aby mohlo být v tomto cyklu využito. Cyklus je tak použitelný pouze ve velmi malém množství případů především pro využití tepla ze spalín motorových vozidel. Všechny výše uvedené cykly je vhodné používat v kogeneračních zařízeních, kdy kromě výroby elektřiny využíváme i zbytkové teplo pro vytápění. Výrazně se tak zvyšuje jejich účinnost a snižuje spotřeba primárních paliv, což má i pozitivní vliv na životní prostředí a ekonomiku jejich provozu.

Přímé metody výroby elektrické energie se obvykle používají tam, kde není možné použít nepřímé metody. Jejich největší výhodou jsou malé rozměry, díky absenci termodynamického cyklu. Lze je tak použít v systémech kde není mnoho místa. S malými rozměry je spojená i malá hmotnost. Další výhodou je bezúdržbový provoz zařízení vyrábějící elektřinu přímo z odpadního tepla, jelikož neobsahují pracovní médium ani pohyblivé části. Jedinou přímou metodou používající odpadní teplo pro výrobu elektrické energie jsou termoelektrické generátory. Ostatní zařízení pro svou nízkou účinnost nenachází praktické uplatnění jako rekuperační zařízení, ale používají se jako zařízení pro výrobu elektřiny z primárních zdrojů nebo sluneční energie. Některé technologie by mohly v budoucnu nahradit dnešní solární panely, baterie v elektronice nebo radioizotopové generátory používané v kosmickém průmyslu.

Na českém trhu se prodávají pouze dvě zřízení na výrobu elektrické energie z odpadního tepla. Jsou to ORC systémy, které jsou často navrhované jako kogenerační jednotky, a termoelektrické generátory, které lze na českém trhu také nalézt pod názvem Peltierův článek.

Nejdůležitějším faktorem při volbě metody je teplota odpadního tepla. Z výše zmíněného ale vyplývá následující. Kvůli nízkým účinnostem nejsou prozatím nepřímé metody z ekonomického hlediska vhodné pro velké výkony a z přímých metod je na českém trhu dostupný pouze ORC. V zahraničí se nabízí kromě ORC i Kalinův cyklus. [66] Pro malé výkony je vhodný termoelektrický generátor, který je mnohem menší a levnější než ORC při stejném výkonu. Při volbě je také dobré vzít v potaz požadavek na údržbu.

ORC je možné díky svému rozsahu pracovních teplot použít v nejrůznějších odvětvích průmyslu, například v chemickém, sklářském a keramickém. Dále je možno jej využít v cementárnách, bioplynových stanicích nebo i pro teplo ze spalín z kamionů a osobních automobilů. Termoelektrické generátory lze použít pro využití tepla ze spalín krbu [67] i v podstavách pro krby a krbové vložky, protože není žádané, aby teplo odcházelo do základů domu. Díky tomu můžeme lépe využít energii ze spáleného dřeva. Tyto generátory mají

v porovnání s ostatními TEG vysokou účinnost díky velkým teplotním rozdílům, se kterými mohou pracovat. Toho by se dalo využít v průmyslu, kde není dost prostoru pro instalaci klasického Rankin-Clausiova cyklu. Termofotovoltaické články se při svém provozu zahřívají a odvádí se z nich teplo do okolí, které už není dále využito. Pokud by se na zadní stranu článků nainstalovali termoelektrické generátory s pasivními chladiči, mohli by odpadní teplo přeměnit na elektřinu a zároveň by chladily termofotovoltaické články.

Tabulka 6.1 tvoří přehled využitelnosti jednotlivých technologií, uvádí účinnosti technologie, rozsah teplot odpadního tepla, se kterým je daný systém schopný efektivně pracovat a pro lepší představu také příklad praktického použití.

Tab. 6.1 Přehled jednotlivých technologií

Technologie	Účinnost	Teplota zdroje tepla	Příklady použití
Klasický Rankin-Clausioův cyklus	až 18 %	minimálně 340–370 °C	Spaliny z cementáren, oceláren, spalovacích motorů
Organický Rankinův cyklus	7–37 %	80–400 °C	Plyny z pecí, chladicí oleje, geotermální elektrárny
Kalinův cyklus	až 23,2 %	80–515 °C	Teplo z chemického průmyslu, geotermální elektrárny
Trilaterální flash cyklus	až 70 %	70–200 °C	– ⁵
Termoelektrické generátory	až 14 %	až 800 °C	Napájení odlehlých zařízení s malým výkonem, nositelná elektronika
Piezoelektrická výroba energie	– ⁶	100–150 °C	– ⁶
Termoemisní generátory	– ⁶	přes 1 000 °C	– ⁶
Termofotovoltaické systémy	až 29 %	27–2 230 °C	– ⁷
Usměrnovací antény	>85 % ⁸	730 – 1 730 °C ⁹	– ⁷

⁵ Zatím nebyl aplikován.

⁶ Se současnými technologiemi, není možné technologii využít pro odpadní teplo.

⁷ Zatím se nepoužívá. V budoucnu možná nahradí solární panely.

⁸ Platí pouze v mikrovlnném pásmu.

⁹ Typický rozsah teplot. Antény zvládnou pracovat v širším rozsahu teplot viz. kapitola 4.5.

7 Závěr

Z ekologických a ekonomických důvodů je vyvíjen neustálý tlak nejen na zefektivňování veškerých procesů v průmyslu, ale i na lepší využívání energií v podnicích a domácnostech. Jeden ze způsobů, jak tohoto docílit je využít odpadní teplo a přeměnit jej na elektrickou energii. Lépe se tak využije potenciál primárních zdrojů a zvýší se tím účinnost zařízení.

Existují dvě hlavní skupiny metod, přímé a nepřímé metody. Nepřímé metody pracují s vyššími výkony a účinnostmi než přímé metody. Jejich nevýhodou jsou velké rozměry a požadavek na údržbu. Zařízení pro přímou výrobu elektrické energie jsou malé a lehké a jsou tak vhodné pro aplikace, kde není mnoho místa a není potřeba velkých výkonů. Jejich výhodou je možnost zapojení více zařízení do jednoho obvodu a vytvoření tak vyššího napětí.

Na českém trhu se nejvíce nabízí organické Rankinovy cykly a termoelektrické generátory. ORC může nalézt uplatnění ve všech odvětvích průmyslu, ve kterých se produkuje odpadní teplo o teplotě vyšší než 80 °C. Je to například v chemickém, sklářském, cementárenském a keramickém průmyslu. Využívá teplo spalin, chladících kapalin a dokáže využít i teplo z chladiče klasického Rankin-Clausiova cyklu. Díky možnosti volby pracovní látky je ORC schopnější pracovat v širším rozsahu teplot než klasický Rankin-Clausiovův cyklus, který používá pouze vodu. TEG je možné využít pro napájení odlehklých nebo těžko přístupných zařízení, které nemají velký příkon.

V budoucnu by mohly výše zmíněné metody doplnit trilaterální flash cyklus a termofotovoltaické systémy. Tyto metody nejsou zatím dostatečně výkonné a účinné, ale stále na nich probíhající studie by mohly v blízké době přinést zlepšení jejich vlastností.

Vhodnou metodu pro přeměnu tepla na elektřinu je potřeba volit hlavně na základě teploty odpadního média. Rozsahy pracovních teplot jednotlivých zařízení se však překrývají a je tak nutné brát ohled i na účinnost při konkrétních podmínkách. Dalšími faktory jsou pak dostupnost, zástavbový prostor a cena zařízení.

Většímu rozšíření technologií na výrobu elektrické energie z odpadního tepla brání vysoká cena zařízení a jejich nízká účinnost. S tím je spojená nízká návratnost investice, což odrazuje potenciální zájemce o tyto technologie. V budoucnu lze však očekávat zvýšení poptávky po takovýchto zařízeních, což přivede více peněz do výzkumu těchto technologií a budou se tak vyvíjet zařízení s lepší účinností, které již budou ekonomicky atraktivnější.

Bibliografie

- [1] JOHNSON, I. a W. CHOATE. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry* [online]. 2008, , 112 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf.
- [2] *Portál odpadního tepla* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <http://www.portalodpadnihotepla.cz>.
- [3] Výkup elektřiny z decentralních zdrojů. *Skupina ČEZ* [online]. 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/firmy/cs/vykup-elektřiny-z-decentralnich-zdroju.html>.
- [4] Bilance elektrické energie. *Český statistický úřad* [online]. Praha: Český statistický úřad [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt&katalog=30835&z=T&f=TABULKA&pvo=ENE04&c=v3~8__RP2019.
- [5] Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů detailně. *Fakta o klimatu* [online]. 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr-detail>.
- [6] Parametry chladicí věže nového zdroje 660 MW Lednice. *Svět energie* [online]. 2020 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/chladici-vez/parametry>.
- [7] Elektřina v ČR: výroba, spotřeba a emise. *Fakta o klimatu* [online]. 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/elektřina-cr>.
- [8] Paroplynová elektrárna. *Svět energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. 2020 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/plynove-a-paroplynove-elektrarny/paroplynova-elektrarna>.
- [9] ŠTĚTINA, Josef. Tepelné cykly. In: *Termomechanika online* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/1IMZSIEJwCiMgnM8zSVagJq6wctGzjwyHysk_vVduCW0/edit#slide=id.p8.
- [10] BIANCHI, G., G. PANAYIOTOU, L. ARESTI, S. KALOGIROU, G. FLORIDES, K. TSAMOS, S. TASSOU a P. CHRISTODOULIDES. Estimating the waste heat recovery in the European Union Industry. *Energy, Ecology and Environment* [online]. College Park, MD: Joint Center on Global Change and Earth System Science of the University of Maryland and Beijing Normal University, 2019, 4(5), 211-221 [cit. 2021-03-25]. ISSN 2363-7692. Dostupné z: doi:10.1007/s40974-019-00132-7.
- [11] FORMAN, C., I. MURITALA, R. PARDEMANN a B. MEYER. Estimating the global waste heat potential. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier Ltd, 2016, 57, 1568-1579 [cit. 2021-03-25]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.12.192.
- [12] VOJÁČEK, O. a J. BRABEC. Odpadní teplo – potenciál a bariéry většího využívání. In: *Keep warm: Renewing district heating* [online]. Třebíč, 2019 [cit. 2021-05-16]. Dostupné

- z:
https://keepwarmeurope.eu/fileadmin/user_upload/Learning_Centre/Czech_Republic/T2.3-11_Waste_heat_-_potential_and_barriers_to_greater_use.pdf.
- [13] *Waste Heat* [online]. 2019 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.waste-heat.eu>.
- [14] MAHMOUDI, A., M. FAZLI a M.R. MORAD. A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Applied thermal engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **143**, 660-675 [cit. 2020-11-30]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136).
- [15] BRUCKNER, S., S. LIU, L. MIRO, M. RADSPIELER, L. CABEZA a E. LAVEMANN. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy* [online]. Elsevier B.V, 2015, **151**, 157 [cit. 2021-03-12]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147).
- [16] DUDA, Daniel. Rankin-clausiův cyklus. In: *D. Duda - osobní stránka* [online]. Plzeň: Katedra energetických strojů a zařízení [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dudad/T10-RC.pdf>.
- [17] ÇENGEL, Y. a M. BOLES. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8th ed. in SI units. New York: McGraw-Hill Education, 2015, xxvi, 954 s. : il. ISBN 978-981-4595-29-2.
- [18] KIZILKAN, Onder. Performance assessment of steam Rankine cycle and sCO₂ Brayton cycle for waste heat recovery in a cement plant: A comparative study for supercritical fluids. *International Journal of Energy Research* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Inc, 2020, **44**(15), 12329-12343 [cit. 2021-05-16]. ISSN 0363-907X. Dostupné z: [doi:10.1002/er.5138](https://doi.org/10.1002/er.5138).
- [19] JOUHARA, H., N. KHORDEHGAH, S. ALMAHMOUD, B. DELPECH, A. CHAUHAN a S. TASSOU. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **6**, 268-289 [cit. 2020-11-30]. ISSN 2451-9049. Dostupné z: [doi:10.1016/j.tsep.2018.04.017](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017).
- [20] WANG, D., X. LING, H. PENG, L. LIU, L. TAO a D. WANG. Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation. *Energy* [online]. 2013, **50**, 343-352 [cit. 2021-05-17]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1323226812>.
- [21] LONI, R., G. NAJAFI, E. BELLOS, F. RAJAEI, Z. SAID a M. MAZLAN. A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2021, **287** [cit. 2021-02-13]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2020.125070](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125070).
- [22] PERIS, B., J. NAVARRO-ESBRI, F. MOLES a A. MOTA-BABILONI. Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. *Energy* [online]. Elsevier B.V, 2015, **85**, 534 [cit. 2021-03-21]. ISSN 0360-5442.
- [23] NOUMAN, Jamal. *Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles - ORC* [online]. Stockholm, 2012 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z:

- <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:555314/FULLTEXT01.pdf>. Master of Science Thesis. KTH School of Industrial Engineering and Management.
- [24] PERIS, B., J. NAVARRO-ESBRÍ a F. MOLÉS. Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery. *Applied thermal engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **61**(2), 364-371 [cit. 2021-03-26]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.08.016.
- [25] DAI, X., L. SHI, Q. AN a W. QIAN. Thermal stability of some hydrofluorocarbons as supercritical ORCs working fluids. *Applied thermal engineering* [online]. Oxford: Elsevier Ltd, 2018, **128**, 1095-1101 [cit. 2021-03-20]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.046.
- [26] 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 (Oxford)* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **58**, 147-156 [cit. 2021-03-21]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2013.03.097.
- [27] CAYER, E., N. GALANIS, M. DESILETS, H. NESREDDINE a P. ROY. Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source. *Applied energy* [online]. Elsevier Ltd, 2009, **86**(7-8), 1055-1063 [cit. 2021-05-13]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2008.09.018.
- [28] WANG, E., Z. YU a F. ZHANG. Investigation on efficiency improvement of a Kalina cycle by sliding condensation pressure method. *Energy conversion and management* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **151**, 123-135 [cit. 2021-02-27]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2017.08.078.
- [29] MILEWSKI, J. a J. KRASUCKI. Comparison of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery in the steel industry. *Journal of Power Technologies* [online]. Varšava: Institute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, 2017, **97**(4), 302-307 [cit. 2021-02-18]. ISSN 2083-4187. Dostupné z: <http://www.papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/download/1191/783>.
- [30] LARSEN, U., T. NGUYEN, T. KNUDSEN a F. HAGLIND. System analysis and optimisation of a Kalina split-cycle for waste heat recovery on large marine diesel engines. *Energy* [online]. Elsevier B.V, 2014, **64**(), 484 [cit. 2021-05-16]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2013.10.069.
- [31] ROGDAKIS, E. a P. LOLOS. Kalina Cycles for Power Generation. YAN, J, ed., J YAN. *Handbook of Clean Energy Systems* [online]. John Wiley & Sons, Ltd., 2015, s. 1-25 [cit. 2021-03-15]. ISBN 9781118991978. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118991978.hces014>.
- [32] IQBAL, M., S. RANA, M. AHMADI, A. DATE a A. AKBARZADEH. Experimental study on the prospect of low-temperature heat to power generation using Trilateral Flash Cycle (TFC). *Applied thermal engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **172** [cit. 2021-02-24]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115139.
- [33] GARCIA, R., B. SANZ a C. SANZ. Power Plant Driven by Residual Heat Rejected by the Bottoming Low Pressure Steam Turbines. *British Journal of Applied Science &*

- Technology* [online]. 2014, **6**(3), 216-228 [cit. 2021-05-06]. ISSN 2231-0843. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.9734/BJAST/2015/12111>.
- [34] Trilateral Flash Cycle (TFC) System: LOW TEMPERATURE HEAT TO POWER CONVERSION. In: *CENTRE FOR SUSTAINABLE ENERGY USE IN FOOD CHAINS (CSEF)* [online]. I-ThERM [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <http://www.foodenergy.org.uk/userfiles/downloads/Leaflet%20sCO2%20-%20SAT.pdf>.
- [35] AGATHOKLEOUS, R., G. BIANCHI, G. PANAYIOTOU et al. Waste Heat Recovery in the EU industry and proposed new technologies. *Energy procedia* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **161**, 489-496 [cit. 2021-03-25]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.02.064.
- [36] IQBAL, M., S. RANA, M. AHMADI, A. DATE a A. AKBARZADEH. Trilateral Flash Cycle (TFC): a promising thermodynamic cycle for low grade heat to power generation. *Energy procedia* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **160**, 208-214 [cit. 2021-02-28]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2019.02.138.
- [37] LIU, Y., L. YIN, W. ZHANG et al. A wearable real-time power supply with a Mg₃Bi₂-based thermoelectric module. *Cell Reports Physical Science* [online]. 2021, , 100412 [cit. 2021-05-02]. ISSN 2666-3864. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100412>.
- [38] PIGGOTT, Alfred. Thermoelectric Generator Charge Carriers. In: *How Thermoelectric Generators Work* [online]. Applied Thermoelectric Solutions LLC [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://thermoelectricsolutions.com/wp-content/uploads/thermoelectric-generator-charge-carriers.png>.
- [39] How Thermoelectric TEG Generators Work. *Thermoelectric Gencell Technology* [online]. 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://thermoelectric-generator.com/how-thermoelectric-teg-generators-work>.
- [40] JUNG, Y., I. HAN, Y. KIM a A. WALSH. Prediction of high thermoelectric performance in the low-dimensional metal halide Cs₃Cu₂I₅. *Npj Computational Materials* [online]. 2021, **7**(51), 1-6 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: doi:[doi:10.1038/s41524-021-00521-9](https://doi.org/10.1038/s41524-021-00521-9).
- [41] MPG Series A4-200:2018-009A Beta Prototype: Thermoelectric Power Generator. In: *Thermoelectric Cencell Technology* [online]. 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://tecteg.com/wp-content/uploads/2021/05/MPG-A4-200-2018-009A-Rev-2104-TECTEG.pdf>.
- [42] Low (DT) Thermoelectric Harvesting TEG Power Module. *Thermoelectric Gencell Technology* [online]. 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://tecteg.com/low-dt-thermoelectric-harvesting-teg-power-module>.
- [43] CMO-32-62S. In: *Thermoelectric Gencell Technology* [online]. 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2014/04/CMO-32-62S-OXIDE-ONLY-new.pdf>.
- [44] DUZIK, A. a S. CHOI. Investigation of Miniaturized Radioisotope Thermionic Power Generation for General Use. In: *NASA Center for AeroSpace Information (CASI)*.

- Conference Proceedings* [online]. Hampton: NASA/Langley Research Center, 2016 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2128126662>.
- [45] Flächen-Peltierelemente. In: *TelemetrElectronic* [online]. Donauwörth: Telemeter Electronic GmbH, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://telemeter.info/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/f/l/flaechen-kuehlgeraet.jpg>.
- [46] PRIMES, Alois. *Termoemisní zdroje elektrické energie* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113145>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marian Brázdil.
- [47] KOLENČÍKOVÁ, J. *Termofotovoltaická výroba elektrické energie*. Brno, 2018, 45 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Marian Brázdil.
- [48] Thermophotovoltaics. In: *Internet Archive: Wayback Machine* [online]. Massachusetts: LEES, 2003 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20100611182043/http://lees.mit.edu/lees/projects/thermophotovoltaics_project.htm.
- [49] ŠIMONOVÁ, Lucie. Termofotovoltaické systémy. *Česká energetika* [online]. Heřmanův Městec: Česká energetická asociace, 2011 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.ceskaenergetika.cz/konference_a_vystavy/termofotovoltaicke_systemy.html.
- [50] LAL, N. a A. BLAKERS. Schematic diagram of a thermophotovoltaic (TPV) system. In: *SPIE* [online]. Bellingham, 2009 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2009/1593/1593_fig1.jpg.
- [51] LI, X., C. LOU, X. LI, Y. ZHANG, Z. LIU a B. YIN. Bi 2 Te 3 /Sb 2 Te 3 thermophotovoltaic cells for low temperature infrared radiation. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 2020, **53**(3), 035102 [cit. 2021-02-10]. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6463/ab4edb.
- [52] FAN, D., T. BURGER, S. MCSHERRY, B. LEE, A. LENERT, S. FORREST a D. FAN. Near-perfect photon utilization in an air-bridge thermophotovoltaic cell. *Nature* [online]. 2020, **586**(7828), 237-241 [cit. 2021-02-10]. ISSN 00280836. Dostupné z: doi:10.1038/s41586-020-2717-7.
- [53] OMAR, Z., G. SCRANTON, L. PAZON-OUTON et al. Ultraefficient Thermophotovoltaic Power Conversion by Band-Edge Spectral Filtering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [online]. United States, 2019, **116**(31) [cit. 2021-02-16]. ISSN 00278424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1903001116.
- [54] PAN, Y., M. ROSAMOND, A. MCDONALD, T. PARTRIDGE, D. CARTWRIGHT, E. LINFIELD, D. WOOD a C. BALOCCO. Design and Performance of Micro-Rectenna Arrays for Thermal Energy Harvesting. In: *Proceedings of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. [online]. Hong Kong: IEEE,

- 2015 [cit. 2021-04-18]. ISBN 9781479982738. Dostupné z: doi:doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327724.
- [55] ULLAH, Z., I. NAWI, T. NELSON, M. KHATTAK a M. JUNAID. A Review on the Development of Tunable Graphene Nanoantennas for Terahertz Optoelectronic and Plasmonic Applications. *Sensors* [online]. Basel: MDPI AG, 2020, **20**(5), 1401 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: doi:10.3390/s20051401.
- [56] DAVIDS, P., J. KIRSCH, A. STARBUCK, R. JARECKI, J. SHANK a D. PETERS. Electrical power generation from moderate-temperature radiative thermal sources. *Science* [online]. American Association for the Advancement of Science, 2020, **367**(6484), 1341-1345 [cit. 2021-05-18]. ISSN 1095-9203. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1126/science.aba2089.
- [57] MARLOK, H., A. PFEIFER, M. HÖTGER a M. BUCHER. Modular Waste Heat Recovery System with Electric Power Output. *MTZ worldwide* [online]. 2019, **80**(11), 78-83 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: doi:10.1007/s38313-019-0129-6.
- [58] ZHOU, F., S. JOSHI, R. RHOTE-VANEY a E. DEDE. A review and future application of Rankine Cycle to passenger vehicles for waste heat recovery. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **75**, 1008-1021 [cit. 2021-05-19]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.11.080.
- [59] LIN, Chi., P. HSU, Y. HE, Y. SHUAI, T. HUNG, Y. FENG a Y. CHANG. Investigations on experimental performance and system behavior of 10 kW organic Rankine cycle using scroll-type expander for low-grade heat source. *Energy (Oxford)* [online]. Elsevier Ltd, 2019, **177**, 94-105 [cit. 2021-03-21]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.04.015.
- [60] MIRZAEI, M., M. AHMADI, M. MOBIN, M. NAZARI a R. ALAYI. Energy, exergy and economics analysis of an ORC working with several fluids and utilizes smelting furnace gases as heat source. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. Elsevier Ltd, 2018, **5**, 230-237 [cit. 2021-03-20]. ISSN 2451-9049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2017.11.011.
- [61] Přeměna odpadního tepla na elektrickou energii. In: *LBG Moravia s.r.o.* [online]. Brno [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.lbgmoravia.cz/upload/filemanager/technologie/orc/LBG%20Moravia%20prezentace%20ORC.pdf>.
- [62] Využití odpadního tepla v průmyslu. *B:POWER, a.s.* [online]. Havlíčkův Brod [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.bpower.cz/vyuziti-odpadniho-tepla-v-prumyslu>.
- [63] PRANANTO, L., T. SOELAIMAN a M. AZIZ. Adoption of Kalina cycle as a bottoming cycle in Wayang Windu geothermal power plant. *Energy procedia* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **142**, 1147-1152 [cit. 2021-02-27]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.12.370.
- [64] LE SCORNEC, J., B. GUIFFARD, R. SEVENO a V. LE CAM. Frequency tunable, flexible and low cost piezoelectric micro-generator for energy harvesting. *Sensors and actuators. A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2020, **312** [cit. 2021-02-16]. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2020.112148.

- [65] WANG, S., Ch. WANG, Z. GAO a H. CAO. Design and performance of a cantilever piezoelectric power generation device for real-time road safety warnings. *Applied energy* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **276** [cit. 2021-02-05]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.115512.
- [66] Power Solutions. *Kalina: Electricity from heat* [online]. 2015 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://www.kalinapower.com/technology>.
- [67] PATENT PENDING RABBIT EARS THERMOELECTRIC GENERATOR. In: *Thermoelectric Gencell Technology* [online]. 2019 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2021/03/2021_February-22-Rabbit-Ears-Thermoelectric-Generator-Spec-sheet.pdf.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
ČR	Česká republika
ORC	Organický Rankinův cyklus
KC	Kalinův cyklus
TFC	Trilaterální Flash Cyklus
ZT	Bezrozměrné číslo výkonu (dimensionless figure of merit)
TEG	Termo elektrický generátor
NETEC	termoemisní přeměna na krátkou vzdálenost (Near-field thermionic emission conversion)

Symbol	Význam	Jednotka
η	Účinnost	-
T_H	Teplota ohříváče	K
T_C	Teplota chladiče	K