



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ÚČINNOST ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ BIOMASY

EFFICIENCY OF THE ENERGY USE OF BIOMASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zsolt Szelecky

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Zsolt Szelecky**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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:

Účinnost energetického využití biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem a výrobu elektrické energie. Na jednu stranu je biomasa obnovitelný zdroj energie, či zdroj, který si umíme vyrobit (vypěstovat), na druhou stranu její využívání má zpravidla nižší účinnost než zdroje jiné, její spalovací vlastnosti nejsou optimální a mluví se i o některých negativních jevech s využíváním biomasy souvisejících.

Cíle bakalářské práce:

Biomasa, její druhy, vlastnosti a přehled využití

Přehled technologií využívající biomasu

Posouzení účinnosti jednotlivých technologií

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, J. et al. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Táto záverečná práca sa zaoberá energetickým využitím biomasy a jej účinnosťou. V prvej časti je vysvetlený pojem biomasy, jej rozdelenie a energetické využitie. V hlavnej časti bakalárskej práce sú popísané technológie premeny surovej biomasy na produkty energeticky výhodnejšie. Posledná časť úzko súvisí s predošlou, kde je dôraz kladený na energetickú účinnosť týchto technologických premien.

Abstract

This final thesis deals with the theme of energetic usage of biomass and its energy efficiency. In the first part the term „biomass“ is explained and classified into categories. The main part of this work deals with technology converts of raw biomass into valuable energy products. The final section is closely connected with the previous part, where the emphasis is placed on energetic efficiency of abovementioned technology converts.

Kľúčové slová

Biomasa, energetická účinnosť, spaľovanie, kotol, splyňovanie, pyrolýza, esterifikácia, bioplyn

Key words

Biomass, energy efficiency, combustion, boiler, gasification, pyrolysis, esterification, biogas

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SZELECKY, Z. *Účinnost energetického využití biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že moju bakalársku prácu na tému „Účinnosť energetického využitia biomasy“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných prameňov, ktoré sú uvedené v zozname použitých zdrojov.

V Brne, dňa 26.5.2017

Zsolt Szelecky

Pod'akovanie

Ďakujem svojmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Marekovi Balášovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedenie a stráveného času pri konzultáciách. Ďalej by som chcel poďakovať rodine a priateľom, ktorý ma podporovali počas štúdia a vypracovania tejto práce.

Obsah

1 Úvod	11
2 Definícia biomasy	12
2.1 Rastlinná biomasa – fotosyntéza.....	12
2.2 Rozdelenie biomasy.....	13
2.3 Vlastnosti biomasy.....	14
2.3.1 Chemické zloženie biomasy.....	14
2.3.2 Vlhkosť, výhrevnosť a spalné teplo.....	14
2.3.3 Obsah popola.....	17
3 Možnosti využitia biomasy	19
4 Technológie premeny biomasy	20
5 Spaľovanie	22
5.1 Podstata spaľovania.....	22
5.2 Spaľovacie zariadenia – kotle.....	22
5.2.1 Rozdelenie kotlov.....	23
5.2.2 Tepelná účinnosť kotlov.....	24
5.2.3 Spaľovanie na rošte.....	25
5.2.3 Spaľovanie so spodným prívodom paliva.....	26
5.2.4 Spaľovanie vo fluidnom lôžku.....	26
6 Splyňovanie	27
6.1 Splyňovacie zariadenie.....	28
6.1.2 Protiprúdový splyňovač.....	30
6.1.3 Súprudný splyňovač.....	30
6.1.4 Súprudný splyňovač s otvoreným jadrom.....	30
6.2 Fluidné splyňovanie.....	31
7 Pyrolýza	32
8 Esterifikácia bioolejov	33
9 Bioplyn	34
9.1 Zloženie a výhrevnosť bioplynu.....	34
9.2 Anaeróbna fermentácia.....	35

10 Účinnosť výroby energie jednotlivých technológií.....	36
10.1 Účinnosť výroby energie pomocou spaľovania.....	36
10.1.1 Výroba elektrickej energie z biopaliva pomocou spaľovania.....	36
10.2 Účinnosť výroby energie z bioplynu	41
10.2.1 Výroba tepelnej energie a kogenerácia z bioplynu	41
11 Záver	42
12 Zoznam použitej literatúry	43
Zoznam skratiek.....	45
Zoznam symbolov.....	45

1 Úvod

Následkom nepretržite rastúcej populácií a dynamicky sa rozvíjajúceho priemyslu energetické zásobovanie planéty sa stala jedna z najdôležitejších otázok dnešnej doby. Vzniknutý energetický hlad a zároveň snaha o znižovanie podielu využitia fosílnych palív kvôli environmentálnym cieľom a klesajúcej zásobe fosílnych palív, nevyhnutne viedlo k využívaniu obnoviteľných zdrojov energie (OZE), medzi ktorými patrí aj biomasa. Ohľadom na ekológiu využívanie OZE a technológia ich využitia sa zjaví ako jedna z najlepších volieb, vďaka minimálnemu negatívnemu dopadu na životné prostredie.

K efektívnemu využívaniu biomasy z energetického hľadiska však nestačí iba skutočnosť, že splňuje environmentálne ciele, okrem toho je nepostrádateľný, aby technológie na premenu biomasy boli na vysokej úrovni a dosahovali čím väčšiu účinnosť. Ďalším hlavným argumentom pri využívaní biomasy je všestranné spracovávanie rôznych druhov biomasy, ktoré sa výrazne líšia chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Na druhej strane však v mnohých prípadoch (napr. spracovávanie niektorých druhov odpadov) technologické premeny sú ešte neekonomické, avšak sú často jedinou možnosťou spracovania a práve preto sú finančne podporované štátom.

2 Definícia biomasy

Pojem biomasa znamená hmotu rastlinného alebo živočíšneho pôvodu, ktorá vznikla prostredníctvom fotosyntézy alebo je substanciou živočíšneho pôvodu. Zahrňuje biologicky rozložiteľné frakcie výrobkov, odpadu a zvyškov z poľnohospodárstva, lesníctva a príbuzných odvetví. Biomasa sa získava aj zámerným pestovaním (rýchlorastúce dreviny, energetické rastliny, plodiny). [1]

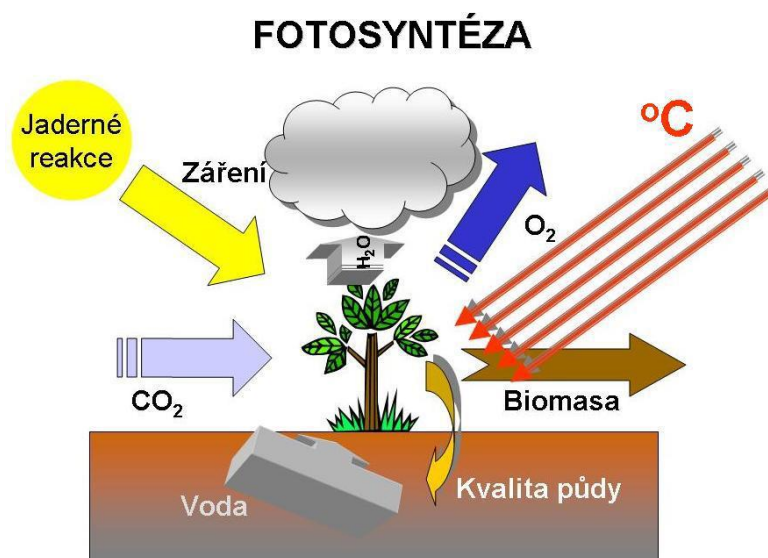
Podľa energetických účelov biomasa patrí k obnoviteľným zdrojom energie, pretože na regeneráciu zásob, na ktoré je využitá, je potrebná pomerne krátka doba. [1]

2.1 Rastlinná biomasa – fotosyntéza

Najdôležitejšou reakciou pri vzniku rastlinnej biomasy je fotosyntéza. Rastliny pomocou fotosyntézy vytvárajú biomasu vo forme uhľovodíkov. Je to vlastne súbor reakcií, pri ktorých dochádza k pohltiu energie slnečného žiarenia, ktorá je využitá pri premene jednoduchých anorganických látok (oxid uhličitý a voda) na látky organického pôvodu. Miestom fotosyntézy sú plastidy obsahujúce farebné pigmenty typu chlorofyl. Z chemického hľadiska sa jedná o premenu slnečnej energie na energiu chemickú. [2], [3]

Sumárna rovnice fotosyntézy

Voda + oxid uhličitý + svetelná energia → glukóza + voda + kyslík



Obr. 1 Priebeh fotosyntézy [4]

2.2 Rozdelenie biomasy

Z hľadiska energetického využitia sa biomasa rozdeľuje na:

a) Zámerne pestovaná biomasa [5], [6]

- Rýchlo rastúce dreviny (topole, agáty, vrbky a osiky) – na tento účel sú najvýhodnejšie, lebo majú krátku dobu obrastenia a priemerným hmotnostným prírastkom významne prevyšujú priemerný hmotnostný prírastok ostatných drevín.
- Rýchlo rastúce byliny (láskavec, konopa siata – jednoroké, ranostaj pestrý – trvalé) – sú rastliny nedrevnou stonkou, ktoré sa vyznačujú krátkou vegetačnou dobou.
- Energetické traviny (jednoroké: ozdobnica čínska, cirok zrnový, sudánska tráva, trvalé: pohánkovce) – z ekonomického hľadiska jednou z najvýznamnejších plodín v Európe je ozdobnica čínska (*Miscanthus sinensis*), ktorá má vysokú výhrevnosť (15 MJ/kg) pri vlhkosti 8%. [5] Je to rastlina, ktorá prináša najvyšší výnos, ak porovnáme množstvo vynaloženej energie na pestovanie a získanej energie. Viaceré rastliny okrem energetického využitia sú využívané v chemickom, textilnom a aj potravinárskom priemysle.
- Olejnaté plodiny – k energetickým účelom sa dá využiť skoro celá rastlina, práve preto sú veľmi cennými energetickými zdrojmi.

b) Odpadová biomasa [5]

- Lesné a drevospracujúce odpady – pri spracovávaní dreva vzniká drevný odpad, od začiatku ťažby dreva (kôra, haluzovina, konáre, šišky) až do ukončenia drevospracujúceho procesu (hoblina, pilina, odrezky).
- Živočíšny odpad – sú to odpady zo živočíšnej výroby, ako sú exkrementy z chovu hospodárskych zvierat, zbytky krmív a odpady z mliečnic.
- Rastlinné odpady z poľnohospodárskej prvovýroby (kukurica a obilná slama, repková slama a ostatky po likvidácii krov) – sú využité ako energetické zdroje. Lisovanú slamu v tvare veľkého balíka spaľujú v prispôbených spaľovacích zariadeniach.
- Komunálne organické odpady – do tejto kategórie patrí biologicky rozložiteľný komunálny odpad (BRKO). BRKO je schopný aeróbnego alebo anaeróbnego rozkladu mikroorganizmov. Najväčší podiel komunálneho organického odpadu tvoria kaly z odpadových vôd a organický podiel z tuhých komunálnych odpadov.

2.3 Vlastnosti biomasy

Vhodnosť a spôsob využitia biomasy na energetické účely určujú jeho chemické a fyzikálne vlastnosti.

2.3.1 Chemické zloženie biomasy

Na rastlinnú biomasu z pohľadu chemického zloženia majú najväčší podiel chemické prvky: uhlík (C), vodík (H₂) a kyslík (O₂). K uvoľňovaniu tepelnej energie dochádza pri oxidácii uhlíka a vodíka. Pri chemických reakciách kyslík neuvoľňuje teplo. Biomasa takmer neobsahuje síru, čo je najväčšou výhodou pri spaľovaní, lebo neuvoľňuje vo veľkom množstve plynný exhalát SO₂. [1]

Avšak biomasa obsahuje aj škodlivé chemické prvky (S, Cl, N₂), ktoré majú veľký vplyv na vznik škodlivých látok. Prítomnosť menovaných prvkov vo zvýšenom množstve v biomase zapríčiňuje zvýšený obsah škodlivých látok v spalinách.

Okrem týchto nežiaducich látok v biomase sa nachádzajú aj tzv. stopkové anorganické prvky (Pb, K, Na, Ca, S). Tieto prvky ovplyvňujú spaľovací proces nepriamo, ich škodlivé účinky sa prejavujú vo vzniku škodlivých látok a tvorbe nánosov a pod. [1]

Tab. 1 Chemické zloženie biomasy [1]

Zložka v %	Drevo		Slama		Ozdobnica čínska	Pasienková tráva
	Bukové drevo s kôrou	Smrekové drevo s kôrou	Pšeničná	Repková		
Uhlík	47,9	49,8	45,6	47,1	47,5	46,1
Vodík	6,2	6,3	5,8	5,9	6,2	5,6
Kyslík	45,2	43,2	42,4	40,0	41,7	38,1
Síra	0,015	0,015	0,08	0,27	0,15	0,14
Dusík	0,22	0,13	0,48	0,84	0,73	1,34

2.3.2 Vlhkosť, výhrevnosť a spalné teplo

Energetické vlastnosti biomasy záležia do veľkej miery od obsahu vody, ktorý je u biomasy relatívne vysoký a meniaci. Najväčšiu vlhkosť (okolo 55 %) majú čerstvo pokácané dreviny. Z ekonomického a energetického hľadiska prijateľná horná hranica vlhkosti u biomasy je v praxi okolo 50 %. Závislosť obsahu vody a výhrevnosti je uvedené v tab. 3. Pri spaľovaní biomasy vysoký obsah vody zapríčiňuje väčšie nároky, ktoré pribúdajú pri odparovaní vody. [2]

Tab. 2 Porovnanie výhrevnosti, spalného tepla, obsahu popola a teploty tavenia v suchom stave [1]

Palivo	Zložky paliva v suchej hmote [%]			
	Výhrevnosť (Q_i)	Spalné teplo (Q_s)	Obsah popola (A)	Teplota tav. Popola
	[MJ.kg ⁻¹]	[MJ.kg ⁻¹]	[%]	[%]
Smrekové drevo s kôrou	18,8	20,2	0,6	1426
Bukové drevo s kôrou	18,4	19,7	0,5	–
Topoľové drevo – krátke výhonky	18,5	19,8	1,8	1335
Žitná slama	17,4	18,5	4,8	1002
Pšeničná slama	17,2	18,5	5,7	998
Tritikale slama	17,1	18,3	5,9	911
Repková slama	17,1	18,1	6,2	1273
Pšeničné zrno so slamou	17,1	18,7	4,1	977
Tritikale zrno so slamou	17,0	18,4	4,4	833
Zrno pšenice	17,0	18,4	2,7	687
Zrno tritikale	16,9	18,2	2,1	730
Repkové semeno	26,5	–	–	–
Ozdobnica čínska	17,6	19,1	3,9	973
Poľnohospodárske seno	17,4	18,9	5,7	1061
Pasienková tráva	16,5	18,0	8,8	–
Čierne uhlie	29,7	–	8,3	1250
Hnedé uhlie	20,6	–	5,1	1050

Na popísanie vlhkosti existujú 2 rozličné základné vzorce, ktoré sú [5]:

- absolútna vlhkosť,
- relatívna vlhkosť.

Absolútna vlhkosť [1]

- využíva sa v drevospracujúcom priemysle,
- vlhkosť je vzťahnuté k absolútnej sušine – vlhkosť môže presiahnuť 100 %.

$$w_{dr} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

Relatívna vlhkosť [1]

- využíva sa v energetickom priemysle,
- hmotnosť je vzťahnuté k hmotnosti vzorky surovej drevnej hmoty.

$$w = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100 [\%], \quad (2)$$

kde je w – relatívna vlhkosť [%], w_{dr} – absolútna vlhkosť [%], m_1 – hmotnosť vzorky pred vysušením [kg], m_2 – hmotnosť vzorky po vysušení [kg].

Absolútna a relatívna vlhkosť sa dajú navzájom prepočítať. Prepočet z absolútnej vlhkosti na relatívnu vlhkosť je daný vzťahom [1]:

$$w = \frac{w_{dr} \cdot 100}{100 + w_{dr}} [\%] . \quad (3)$$

Výhrevnosť

Výhrevnosť tuhých palív je teplo uvoľnené dokonalým spaľovaním 1 kg paliva, pri ochladení spaliny na 20 °C, pričom voda vo spalinách zostane v plynnej fáze. Výhrevnosť výrazne závisí od obsahu vody (obr.2). [8]

Je nutné podotknúť, že v praxi neexistuje biomasa, ktorá neobsahuje vodu (má vlhkosť nulovú) a práve na odparovanie tejto vody sa opotrebováva tepelná energia, a tým pádom sa znižuje základná výhrevnosť sušiny biomasy. V tab. 3 je uvedená závislosť obsahu vody na skutočnej výhrevnosti dreva.

Tab. 3 Skutočná výhrevnosť dreva v závislosti na obsahu vody [5]

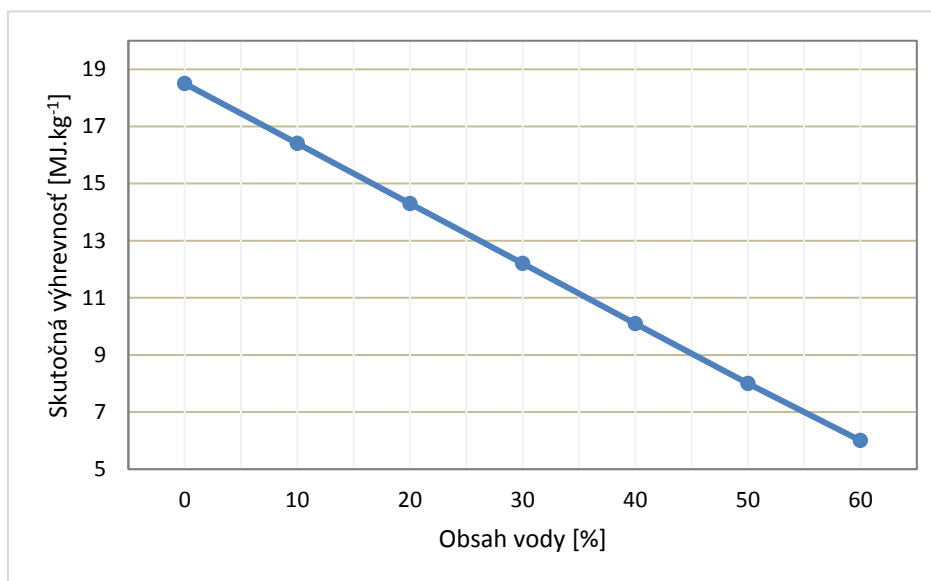
Obsah vody	Skutočná výhrevnosť dreva (H_u)	
	[MJ.kg ⁻¹]	[kWh.kg ⁻¹]
0	18,5	5,1
10	16,4	4,6
20	14,3	4,0
30	12,2	3,4
40	10,1	2,8
50	8,0	2,2
60	6,0	1,7

Skutočná výhrevnosť je daný vzťahom [5]:

$$H_u = \frac{H_{u,wf} \cdot (100-w) \cdot (r-w)}{100} \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}, \quad (4)$$

kde je H_u – skutočná výhrevnosť paliva [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$], $H_{u,wf}$ – výhrevnosť sušiny [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$],

w – obsah vody v palive [%], r – teplo potrebné k odparovaniu 1 kg vody (2,44 MJ).



Obr. 2 Graf závislosti skutočnej výhrevnosti na obsahu vody [5]

Spalné teplo

Spalné teplo je teplo uvoľnené dokonalým spaľovaním 1 kg paliva, pri ochladení spaliny na 20 °C, pritom voda v spalinách je v kvapalnej fáze (kondenzuje). V praxi však počíta výhrevnosťou a nie spalným teplom z dôvodu korózie spaliny. Vo väčšine kotlov teplota je nad rosným bodom a voda je v plynnej fáze. [8]

2.3.3 Obsah popola

Popol je podiel paliva, ktoré získame jeho dokonalým spaľovaním. Vzniká z popolovín, čo sú vlastne minerálne zložky obsiahnuté v palive. Popol je nežiadanou zložkou z hľadiska výhrevnosti ako aj z hľadiska chovania paliva.

Teplota tavenia popola je ďalším dôležitým údajom. Keď teplota tavenia popola je nižšia, ako teplota plameňa pri horení, tak dochádza k zalepeniu roštu ohniska, čo výrazným spôsobom znižuje funkčnosť kotla. Palivo nehorí dokonale, a tým pádom znižuje účinnosť kotla a rastie obsah škodlivých látok v spalinách. Tomuto problému by sa malo predísť takým spôsobom, že teplota tavenia spaľovanej biomasy by mala byť vyššia ako teplota na rošte.

U biomasy obsah popola sa pohybuje od 0,5 do 8 %, u drevnej biomasy od 0,5 až do 2,0 %. Túto hodnotu presiahne len kôra dreva, v čom je okolo 3 %. Na porovnanie obsah popola v čiernom uhli sa pohybuje v intervale 20 – 30 %, a u hnedého uhlia môže byť toto číslo ešte vyššie. [1]

Teplota deformácie, mäknutia, tavenia a tečenia

Počas termických procesov sa dochádza k fyzikálnej zmene popola, ktorá sa začína s deformáciou a skončí sa až úplným roztavením častíc popola. Zmäčkovacie pomery sú charakterizované pomocou štyroch teplôt, ktoré sú: teplota deformácie, teplota mäknutia popola (gulovitého tvaru), teplota tavenia popola (pologulátého tvaru) a teplota tečenia. Riziko vzniku usadenín v ohnisku, na rošte a na stenách je najväčšia u palív, ktoré majú nízku teplotu mäknutia popola (obilniny, stebelnaté rastliny). Tieto usadeniny musia byť odstránené mechanicky, lebo môžu viesť k poruchám a k zmene v prívode spaľovacieho vzduchu a prerušovania prevozu. [7]

Tab.4 Teploty deformácie popola, teploty mäknutia, tavenia a tečenia [7]

Druh paliva	Deformácia	Mäknutie	Tavenia	Tečenia
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Jačmenná slama	659	783	923	1118
Pšeničná slama	612	767	1044	1257
Repková slama	633	665	1452	1460
Kukuričná slama	796	886	1036	1059
Pšeničné zrno	612	727	772	792
Smrekové drevo	1041	1180	1265	1310
Hnedé uhlie	1260	1280	1360	1500

3 Možnosti využitia biomasy

V súčasnej dobe je biomasa využitá na nasledujúce účely [2]:

Biomasa ako zdroj tepla

Využitie biomasy ako zdroj tepla je najvýznamnejším využitím biomasy. Spotrebujeme ju k výrobe tepla, na ohrev vody alebo na vykurovanie budov. Teplo z biomasy získame najjednoduchšie a najčastejšie spaľovaním.

Biomasa ako zdroj energie pre výrobu elektriny

Pri výrobe elektrickej energie môžeme biomasu spaľovať v kotloch samostatne alebo spoločne s uhlím. Z ekologického hľadiska je priaznivejším riešením spaľovanie čistej biomasy, lebo výraznou mierou klesá únik oxidu uhličitého do atmosféry. Na druhej strane má však elektrárň vysokú spotrebu a môže dôjsť k nedostatku biomasy.

Využitie biomasy pre pohon dopravných prostriedkov

Spotreba mechanickej energie vo forme paliva v posledných rokoch stále rastie, čo je úzko spojené s rastúcim počtom dopravných prostriedkov. Možnosti využitia biomasy pre potreby dopravy sú veľmi široké. Kvôli vysokým nárokom spaľovacích motorov na plynné a kvapalné palivá je najvýhodnejšie využiť biomasu, ktorá sa dá premeniť na etanol, metanol a na rastlinné oleje.

Biomasa ako potrava

Je to najdôležitejšia a najstaršia forma využitia biomasy pre ľudstvo. Niektoré metódy, ktoré sú používané pri pestovaní a spracovaní plodín a pri výrobe potravy, sú uplatňované aj pri pestovaní biomasy pre energetické účely.

Biomasa ako surovina pre priemysel

Využitie biomasy môže byť osožné najmä v stavebníctve a v priemyselnej výrobe, kde využitá biomasa môže nahradiť veľké množstvo plynu, elektriny a ropy. Efektívnymi príkladmi sú napr.: využívanie papierových obalov namiesto polyetylénu, tepelné izolácie z rastlinných vlákien.

4 Technológie premeny biomasy

Energia z biomasy sa získava rôznymi technologickými procesmi. Tieto procesy delíme podľa chemických a fyzikálnych (najväčší význam má vlhkosť) vlastností na [5]:

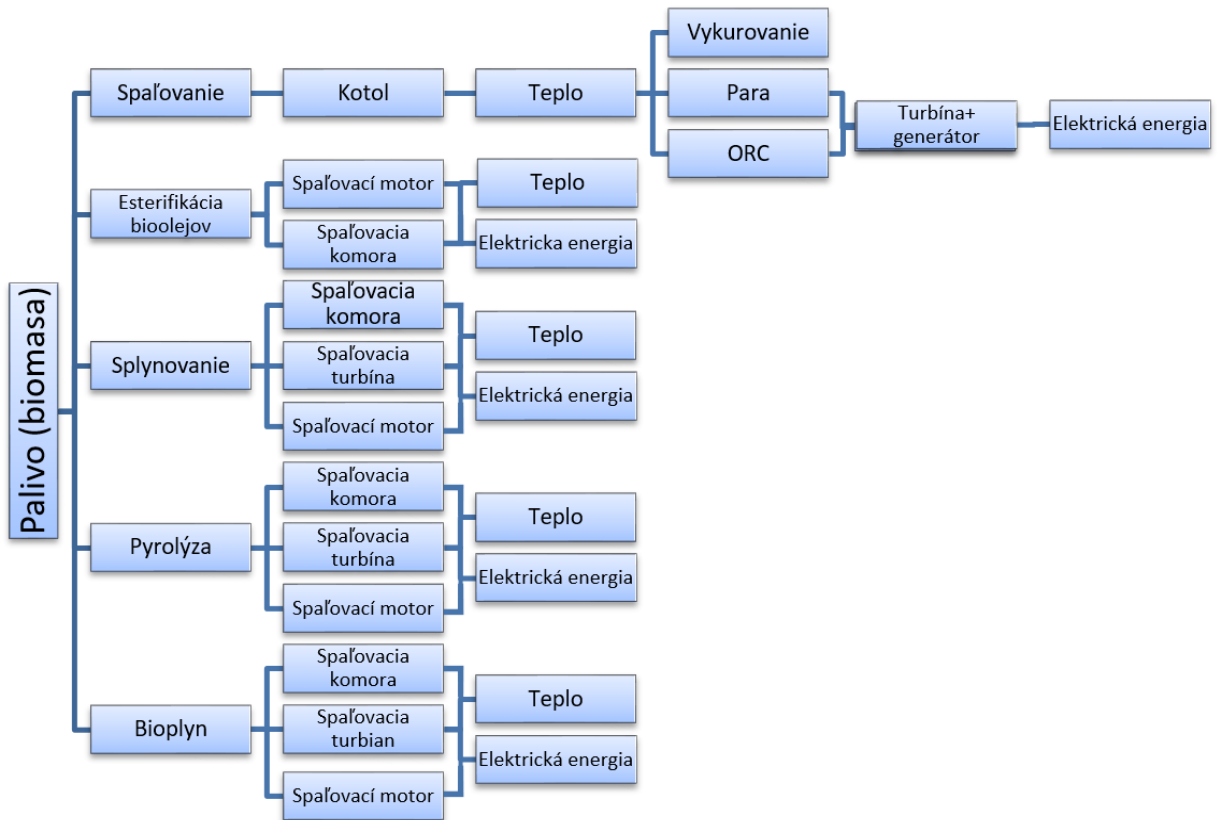
- suché (termochemické) procesy – biomasa obsahuje viac ako 50 % sušín,
- mokré (biochemické) procesy – biomasa obsahuje menej ako 50 % sušín,
- fyzikálne a chemické.

Tieto procesy, spôsoby využitia biomasy, energetické výstupy a druhotné suroviny sú zahrnuté v tab. 5.

Tab. 5 Energetické využitie biomasy [5]

Typ konverzie biomasy	Spôsob konverzie biomasy	Energetický výstup	Druhotná surovina alebo odpadový materiál
Suché procesy (termochemická konverzia)	Spaľovanie	Teplo viazané na nosič	Popoloviny
	Splynovanie	Generátorový plyn	Dechtový olej, uhlíkaté palivo
	Pyrolýza	Generátorový plyn	Dechtový olej, pevné horľavé zbytky
Mokré procesy (biochemická konverzia)	Anaeróbna fermentácia	Bioplyn	Fermentovaný substrát
	Aeróbna fermentácia	Teplo viazané na nosič	Fermentovaný substrát
	Alkoholová fermentácia	Etanol, metanol	Vykvasený substrát
Fyzikálno–chemická konverzia	Esterifikácia bioolejov	Metylester biooleja	Glycerín

Kvôli grafickému znázorneniu bol vytvorený obr. 3, na ktorom je zobrazená schéma energetických procesov.



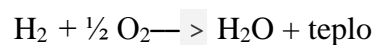
Obr. 3 Prehľad energetických procesov

5 Spaľovanie

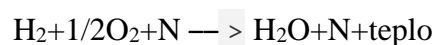
Spaľovacie reakcie, ktoré prebiehajú pri termochemickej premeny sú reakcie exotermické, pri ktorých sa zlučujú horľavé prvky, ktoré sú obsadené horľavine paliva spolu s kyslíkom.

5.1 Podstata spaľovania

Spaľovanie biomasy je jedna z najbežnejších a najstarších metód termochemickej premeny biomasy. Tepelná energia, ktorá je získaná počas spaľovania sa používa na vykurovanie alebo pre výrobu elektrickej energie a tepla. Dokonalé spaľovanie prebieha podľa nasledujúcich chemických vzťahov:

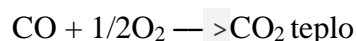


V skutočnosti spaľovanie neprebíha v ohnisku s čistým kyslíkom, ale v prítomnosti vzduchu, ktorý obsahuje výrazné percento dusíka. Spaľovanie v prítomnosti vzduchu najlepšie opíšu rovnice, ktoré sú už upravenom tvare:



Oxidácia kyslíka je nepriaznivá reakcia, pri ktorej sa teplo opotrebováva a výsledné oxidy dusíka sú škodlivé a jedovaté. Tieto oxidy všeobecne označujeme ako NO_x .

Keď pri spaľovaní nie je prítomné dostatočné množstvo kyslíka na spaľovanie všetkých horľavých látok, odohráva sa nedokonalé spaľovanie. Pri nedokonalom spaľovaní je výsledný produkt v dvoch fázach. V prvej fáze (splynovanie) vzniká plyn, ktorý je v druhej fáze dokonale spálený. Nedokonalé spaľovanie popíšu chemické rovnice:



Nedokonalé spaľovanie nie je optimálne z energetického hľadiska, lebo pri oxidácii uhlíka na oxid uhoľnatý sa uvoľňuje iba jedna tretina tej energie, ktorá by bola získaná pri dokonalom spaľovaní. [2], [5], [9]

5.2 Spaľovacie zariadenia – kotle

Kotol je zariadenie, ktorý slúži na ohrievanie vody (teplovodné a horúcovodné kotle), k výrobe pary z vody (parný kotol) a k ohrievanie iného média.

Parný kotol je zariadenie, v ktorom sa z pracovného média získava para požadovaného tlaku a teploty pomocou tepla, ktorá sa získava spaľovaním paliva. [8]

V parnom kotly sa odohrávajú 2 hlavné procesy [8]:

- transformácia chemickej energie paliva na tepelnú energiu spaliny,
- prenos tepla spaliny do pracovného média (voda, pára).

Teplovodné a horúcovodné kotle sa využívajú na vykurovacie účely. Teplovodné a aj horúcovodné kotle sú modifikované parné kotle bez výparníkov a predhrievačov, ktoré sú redukované na ohrievanie vody. Voda v teplovodnom kotli je ohrievaná maximálne na 110 °C, v horúcovodnom kotli je ohrievaná nad 110 °C. [8]

5.2.1 Rozdelenie kotlov

Kotle sa dajú rozdeliť do podskupín podľa viacerých hľadísk. Uvedené sú 4 rozdelenia, ktoré sú najdôležitejšie k vypracovaniu tejto bakalárskej práce.

Podľa použitia rozoznávame kotle [8]:

- elektrárenské kotle – slúžia k výrobe pary pre turbínu,
- teplárenské kotle – slúžia k výrobe pary pre turbínu a pre vykurovanie,
- vykurovacie kotle – slúžia výhradne pre ohrievanie vody,
- spalovanské kotle – využívajú sa v odpadových spalovňách,
- utilizačné (na odpadové teplo),
- kotle pre dopravné účely (lokomotívne, lodné).

Podľa výkonu kotle sa dajú rozdeliť na [8]:

- kotle malých výkonov (do 0,3 MW),
- kotle stredných výkonov (od 0,3 MW do 5 MW),
- kotle veľkých výkonov (od 5 MW).

V tejto bakalárskej práci pozornosť bude venovaná stredne– a vysoko výkonným kotlám.

Podľa použitého paliva kotle sú [8]:

- na tuhé palivá (fosílna palivá, biomasa, tuhé odpady),
- na kvapalné palivá (vykurovacie oleje, kvapalné odpady),
- na plynné palivá (zemný plyn, plynný odpady, umelo vyrobené plyny),
- na zmes paliva.

Kotle na tuhé palivá rozdeľujeme na [8]:

- roštové,
- fluidné,
- práškové (granulačné).

5.2.2 Tepelná účinnosť kotlov

Výpočet tepelnej účinnosti jednotlivých kotlov je možné dvoma odlišnými spôsobmi [8]:

- priama metóda,
- nepriama metóda.

Priama metóda

Tepelná účinnosť kotla je bezrozmerné číslo, ktoré je dané pomerom medzi energiou vyrobenou (para, horúca voda alebo iný médium) k energii, ktoré je privedené palivom.

$$\eta_k = \frac{\text{výkon kotla}}{\text{príkonný kotla}} = \frac{M_{pp} \cdot (i_p - i_{nv})}{Q_i^r \cdot M_{pv}} \quad (-), \quad (5)$$

kde je η_k – účinnosť kotla (–), i_p – entalpia vyrobenej pary ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), i_{nv} – entalpia napájacej vody ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), M_{pp} – hmotnostný tok vyrobenej pary ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$), Q_i^r – výhrevnosť spaľovaného paliva ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), M_{pv} – hmotnostný tok dodávaného spaľovaného paliva ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tepelnú účinnosť z tohto vzťahu označujeme ako účinnosť získanú priamou metódou. Jej použitie u tuhých palív je obťažnejšie kvôli malej presnosti merania príkonu kotla.

Nepriama metóda

Účinnosť kotla, ktorá je vypočítaná nepriamou metódou, sa určuje zo sumy straty kotla nasledovne:

$$\eta_k = 1 - \sum \xi_i = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv} \quad (-) \quad (6)$$

, kde je η_k – účinnosť kotla (–) a ξ_i – tepelné straty kotla vo stacionárnom stave (–).

5.2.3 Spaľovanie na rošte

Na spaľovanie kusových palív (medzi ktoré patrí aj biomasa) v pevnej vrstve sa využívajú roštové kotle. Táto technológia má dlhú históriu. V minulosti stavali roštové kotle na fosílna palivá, ktoré sú ešte stále vo veľkom množstve v prevádzke. V súčasnosti sa novostavané roštové kotle uplatňujú pri spaľovaní biomasy (drevo, slama) a pri spaľovaní komunálnych a priemyselných odpadov. U roštových kotlov na spaľovanie biomasy je maximálna teplota v ohnisku cca 1000 – 1300 °C a maximálny tepelný výkon (q_r) sa pohybuje v intervale 700 – 1400 kW.m⁻² podľa druhu roštu. [8]

Charakteristické fázy paliva na rošte [8]:

- sušenie – vyparuje sa z paliva povrchová a hygroskopická voda,
- odplyňovanie – uvoľňovanie prchavej horľaviny,
- horenie prchavej horľaviny a zapálenie tuhej vrstvy,
- dohrievanie a chladnutie tuhých zvyškov.

Delenie roštov [8]:

Podľa spôsobu premiestňovania paliva v roštovom ohnisku rozdeľujeme roštov:

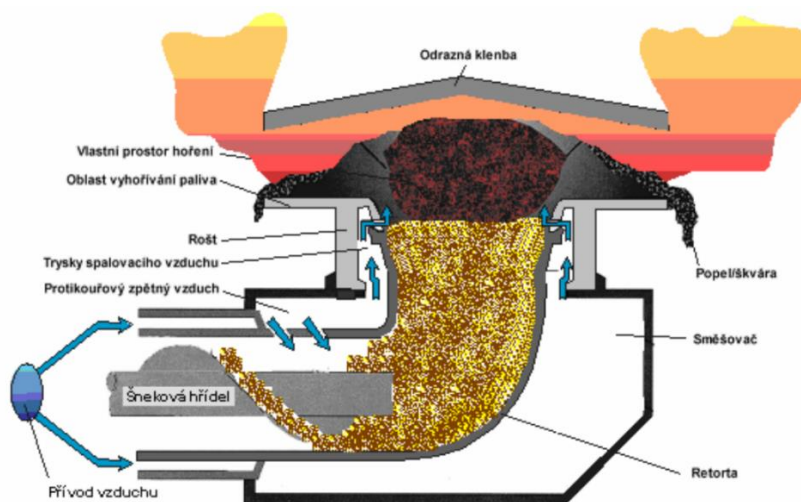
- pevné rošty – vrstva paliva je nehybná,
- stupňové a posuvné rošty – palivo je občas premiestňované,
- pásové a reťazové rošty – palivo je nepretržite premiestňované.

Pevné rošty sú využívané pri kotloch s malým výkonom a pri lokálnych ohniskách.

Mechanické rošty, kde patria pásové, posuvné, vratisuvné a valcové rošty sa využívajú pri kotloch s väčším výkonom. U týchto typov je spaľovací vzduch privedený v niekoľkých fázach. Výkon celého zariadenia je ovplyvnený šírkou a dĺžkou roštu. [8]

5.2.3 Spaľovanie so spodným prívodom paliva

U kotlov vyšších výkonov sa vzhľadom k automatizácii vyžaduje úprava paliva. Spaľovanie so spodným prívodom paliva je vhodné pre palivá s vysokým obsahom vody a prchavých horľavín (drevná štiepka). Do spodnej časti spaľovacej komory je dopravované palivo pomocou šnekového dopravníka. Vertikálny smer posuvu paliva v koncovej časti spaľovacej komory je zabezpečený liatinovým kolenom. Proces spaľovania už začína v privádzacom žľabe, kde palivo postupne prehorieva bez prístupu vzduchu a uvoľňujú sa z nej prchavé horľaviny. Keď sa častice paliva dostávajú na povrch sú už vo forme dreveného uhlia. Medzi rozžeravenými časticami dreveného uhlia horia aj prchavé horľaviny, ktoré sú zmiešané so vzduchom. Vyhorený drevený materiál sa odstraňuje mechanickým odklopením postranných bočníc. [9], [10]



Obr. 4 Spaľovanie so spodným prívodom paliva [10]

5.2.4 Spaľovanie vo fluidnom lôžku

Fluidné lôžko je časť spaľovacej komory fluidného kotla, ktoré sa nachádza nad fluidným roštom, v ktorom je palivo udržiavané pomocou prúdu vzduchu vo vznose a vytvára fluidnú vrstvu. Výška fluidnej vrstvy závisí na rýchlosti prúdenia – u fluidných kotlov rýchlosť fluidizácie sa pohybuje od $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až do $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Aby dochádzalo k dokonalému spaľovaniu okrem primárneho vzduchu, ktoré udržiava palivo vo vznose, je privedený aj sekundárny vzduch.

Kotle, v ktorých prebieha fluidné spaľovanie sú stavané pre väčšie výkony (od $0,8 \text{ MW}_t$ až do stoviek MW_t). Sú schopné absorbovať zmeny fyzických vlastností palív, ktoré sú zapríčinené vo väčšine prípadov meniacim sa obsahom vlhkosti v palive. Veľká absorpčná schopnosť je spôsobená vysokou tepelnou kapacitou fluidnej vrstvy. Fluidné kotle sú určené pre spaľovanie veľkej škály biopalív, avšak maximálna veľkosť drveného paliva je 15 mm . Veľké súčiniteľa prechodu tepla ($\alpha=200 - 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) úzko súvisia s časticami, ktoré kmitajú rovnovážnej polohe. [10], [22]

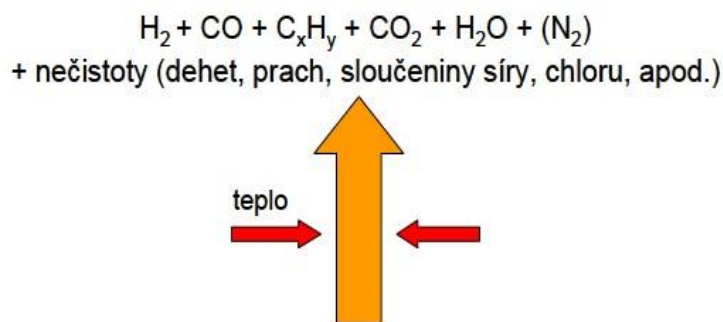
6 Splyňovanie

Princíp funkcie splyňovania je založený na tepelno–chemickom procese, pri ktorom dochádza k zmene uhlíkatého materiálu v pevnom alebo kvapalnom skupenstve na spáliteľný energetický plyn. Tento proces sa odohráva za pomoci splyňovacieho média (vzduch, para, oxid uhličitý alebo kyslík) a tepla.

Procesný plyn, ktorý je výsledným produktom splyňovania obsahuje [11]:

- hlavné (spáliteľné) zložky – H_2 , CH_4 , CO ,
- sprievodné (nespáliteľné) zložky – CO_2 , NO_2 , N_2 ,
- znečisťujúce zložky.

Získaný procesný (generátorový) plyn sa využíva na vykurovacie účely a v kogeneračných jednotkách pre kombinovanú výrobu tepla a elektrickej energie. [11]



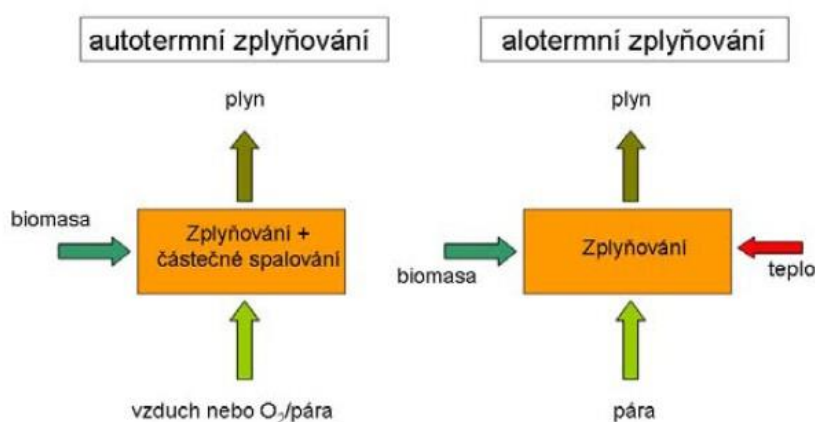
Obr. 5 Princíp splyňovania [11]

Splyňovanie je komplexný proces, pri ktorom sa odohráva veľké množstvo reakcií, avšak všeobecne je rozdelené na štyri základné pochody, ktorými sú:

- sušenie,
- pyrolýza,
- redukcia,
- oxidácia.

Vyššie uvedené pochody môžu prebiehať postupne (zosuvný generátor) alebo súbežne (fluidný generátor). Prvé tri pochody (sušenie, pyrolýza, redukcia) sú endotermické procesy. Teplo potrebné pre tieto procesy môže byť získané [11]:

- oxidáciou časti paliva v reaktore (autotermné splyňovanie) – teplo potrebné pre splyňovanie sa získava exotermickými reakciami, ktoré sa odohrávajú v prítomnosti kyslíka – kyslík je privedený do reaktoru. V prípade, že sa používa vzdušný kyslík (najčastejšie používané) výhrevnosť sa pohybuje v intervale $2,5 - 8 \text{ MJ.m}^{-3}$.
- privedením z okolitého prostredia (alotermné splyňovanie) – výsledný procesný plyn má vyššiu výhrevnosť (až 14 MJ.m^{-3}), avšak na privedenie tepla z okolia sú potrebné rádovo vyššie investície.



Obr. 6 Schémy autotermnej a alotermnej splyňovania [11]

Tab. 6 Zloženie plynu po splyňovanie dreva s vlhkosťou 20 % [11]

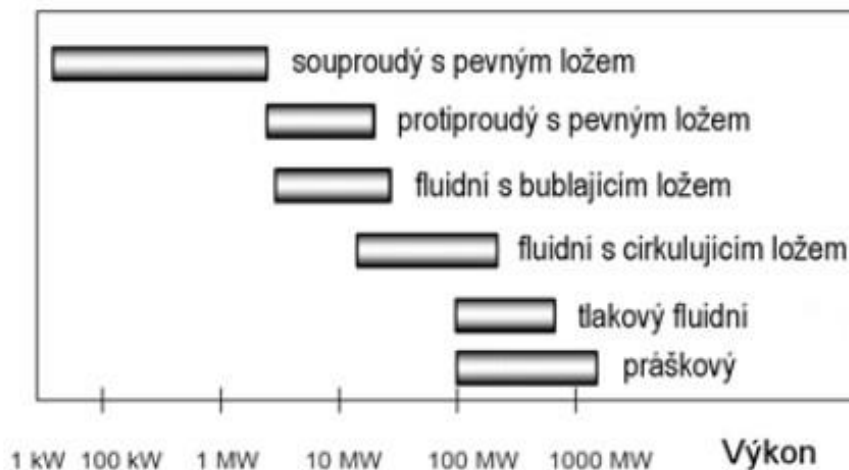
	Autotermné splyňovanie – vzduchom	Autotermné splyňovanie – čistý kyslík	Alotermné splyňovanie – parou
Výhrevnosť [MJ.m^{-3}]	4–6	12–15	12–14
H ₂ [%]	11–16	25–30	35–40
CO [%]	13–18	30–35	25–30
CO ₂ [%]	12–16	23–28	20
CH ₄ [%]	3–6	8–10	9–11
N ₂ [%]	45–60	<1	<1

6.1 Splyňovacie zariadenie

Vynález splyňovacích zariadení siaha späť do dejín viac ako 100 rokov. Za ten čas boli v praxi uplatnené viaceré typy zariadení, ale najviac sa osvedčili splyňovače s pevným alebo fluidným lôžkom. Rôzne typy generátorov produkujú plyn s rozdielnym zložením, obsahom znečisťujúcich látok a teplotou v dôsledku iných podmienok, ktoré v ňom panujú. [11]

6.1.1 Rozdelenie splyňovacích generátorov

Každý typ generátoru je určený pre iné výkonové meradlo. Orientačné výkony jednotlivých typov generátorov sú zobrazené na nasledujúcom obrázku:



Obr. 7 Orientačné výkony jednotlivých typov splyňovacích generátorov [11]

Splyňovače môžu byť rozdelené podľa viacerých hľadísk [11]:

Podľa technologického princípu sa splyňovacie zariadenie dajú rozdeliť na:

- generátory s pohyblivou vrstvou,
- generátory s fluidnou vrstvou,
- generátory so suspenzným tokom.

Podľa tlakových pomerov sú splyňovače:

- atmosférické,
- tlakové.

Podľa formy odvádzaného popola:

- v tuhej forme,
- vo forme trosky.

Podľa typu konštrukcie reaktoru rozoznávame splyňovače:

- protipúdový splyňovač,
- súprudný splyňovač,
- splyňovač s krížovým tokom – pro splyňovanie dreveného uhlia,
- súprudný splyňovač s otvoreným jadrom.

6.1.2 Protiprúdový splyňovač

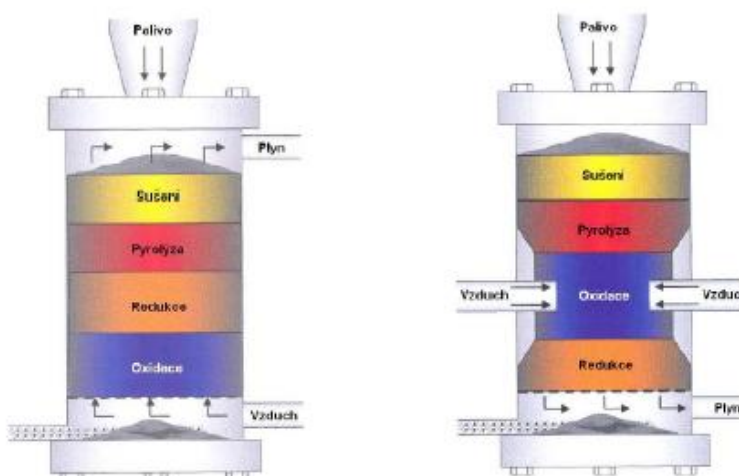
U týchto typov splyňovačov je palivo pravidelne dodávané zhora a plyn je odvádzaný vo vrchnej časti reaktoru (updraft). Smer pohybu biomasy a vzduchu je opačný, plyn prúdi cez surové palivo, ktoré sa vysušuje pomocou vysokej počiatkovej teploty plynu. Práve tá vnútorná výmena tepla umožňuje splyňovanie biomasy s vysokým obsahom vody (vlhkosť biomasy môže prekročiť hranicu 50 %) a zároveň znižuje výstupnú teplotu plynu na 200 – 400 °C. Výstupný plyn je nutné externe čistiť kvôli veľkému množstvu dechtov pred využitím pre výrobu elektrickej energie a biopalív. Bez čistenia je vyprodukovaný plyn vhodný na priame spaľovanie, kde dochádza k spaľovaniu dechtov a pyrolýzných produktov. [10]

6.1.3 Súprudný splyňovač

Konštrukcia súprudného splyňovača umožňuje, aby bol smer paliva, plynu a vzduchu rovnaký. Palivo je dodávané zhora a plyn je odvádzaný dolu (downdraft). Pomocou vzduchu, ktorý je privádzaný zo strany v oxidačnej časti, je dosiahnuté veľmi účinné spaľovanie plynných produktov pyrolýzy a uhlíkatého zvyšku, čo vedie k nízkemu obsahu dechtov vo výstupnom plyne. Tento výstupný plyn však má výstupnú teplotu vysokú, čo má negatívny vplyv na energetickú účinnosť celého zariadenia. Medzi nevýhody patrí obťažná stabilizácia procesu a väčšie množstvo častíc v plynu, čo je spôsobené prechádzaním plynu oxidačnou zónou. Požiadavky na vstupnú biomasu sú oveľa prísnejšie ako u protiprúdového splyňovača (vlhkosť maximálne 25 %, obsah popola maximálne 6 % a zrnitosť od 4 cm do 10 cm). [10]

6.1.4 Súprudný splyňovač s otvoreným jadrom

Tento typ súprudného splyňovača je špeciálne vyvinutý pre splyňovanie jemnej biomasy s malou sypanou hmotnosťou (piliny, šupky). Palivo sa zmieša a popol je odvádzaný z vrstvy pomocou rotačných roštov. Popol je odvádzaný cez nádrž s vodou, ktorá je uložená na dne splyňovača. [10]



Obr.8 Protiprúdový a súprudný splyňovač [10]

6.1.5 Porovnanie splyňovačov

V tab. 5 sú uvádzané hlavné charakteristiky splyňovača s pevným lôžkom. Údaje, ktoré sú uvedené v tab. 5 sú indikatívne z dôvodu veľkého množstva konštrukcií splyňovaču, ale aj tieto udávajú základné rozdiely medzi jednotlivými typmi. [10]

Tab. 7 Hlavné charakteristiky splyňovačov s pevným lôžkom [10]

		Súprudný	Protiprúdový	S otvoreným jádrom
Palivo		drevo	drevo	drevo
–vlhkosť	%	12 (max. 25)	43 (max. 60)	7 – 15 (max. 15)
–obsah popola v sušine	%	0,5 (max. 6)	1,4 (max. 25)	1 – 2 (max. 20)
–veľkosť	Mm	20 – 100	5 – 100	1 – 5
Teplota výstupného plynu	°C	700	200 – 400	250 – 500
Dechty	g.m ⁻³	0,015 – 0,5	30 – 150	2 – 10
Účinnosť (teplý plyn)	%	85 – 90	90 – 95	70 – 80
Účinnosť (studený plyn)	%	65 – 75	40 – 60	35 – 50
Výhrevnosť	MJ.m ⁻³	4,5 – 5,0	5,0 – 6,0	5,5 – 6,0

6.2 Fluidné splyňovanie

Na fluidné splyňovanie sa využívajú vertikálne reaktory, ktoré majú porézne dno naplnené materiálom s výbornými fluidizačnými vlastnosťami (najčastejšie piesok). Palivo je privedené do dolnej časti reaktoru. Splyňovacie médium je privádzané pod rošt, kde sa dostane do fluidizácie potom, ako prekonal gravitačnú silu vrstvy. Vo vrstve zhorí okolo 25 % paliva, zvyšok paliva sa splyňuje pomocou vzniknutej energie. Vo fluidnej vrstve dochádza k sušeniu, pyrolýze, oxidácií a redukcií v dôsledku veľkého prenosu tepla. Teplota vrstvy je skoro konštantná a pohybuje sa v rozmedzí 700 a 900 °C. Pyrolýza prebieha veľmi rýchlo (fast pyrolysis) u fluidného splyňovania. U dechtu nedochádza k veľkej konverzií, čo je spôsobené nízkymi teplotami. Hlavnými nevýhodami procesu sú vysoký obsah dechtov a unášaných častíc v plynu a vysoký úlet tuhých častíc. [10], [12]

7 Pyrolýza

Pyrolýza je redukčný proces, pri ktorom materiál je ohrievaný nad teplotu termickej stability organických zlúčeniny. Vplyvom tepla sa štiepia väzby v organických molekulách, a vznikajú molekuly menšie. Celý proces sa odohráva v inertnej atmosfére (bez kyslíka). Pyrolýza je silne endotermický dej (vyžaduje externý zdroj tepla), a súčasne poskytuje aj veľké množstvo produktov (procesný plyn, dechty a pyrolýzny koks). [13]

Podľa dosahovanej teploty pri pyrolýznych procesoch, môžeme pyrolýzu rozdeliť na [13]:

- nízkoteplotná – maximálna teplota je 500 °C,
- stredoteplotná – teploty od 500°C do 800 °C,
- vysokoteplotná – teploty nad 800 °C.

Deje, ktoré sa odohrávajú pri procese pyrolýzy sa dajú rozdeliť do 3 teplotných intervalov [18]:

- silne endotermické procesy (do 200 °C) – dochádza k sušeniu a tvorbe vodnej pary,
- suchá destilácia (od 200 °C do 500 °C) – premena makromolekulárnych štruktúr na plynné a kvapalné organické produkty a na pevný uhlík,
- fáza tvorba plynu (od 500 °C do 1200 °C) – produkty, ktoré vznikli pomocou suchej destilácií, sú ďalej štiepené a transformované, a vznikajú z nich stabilné plyny (H₂, CO, CO₂ a CH₄).

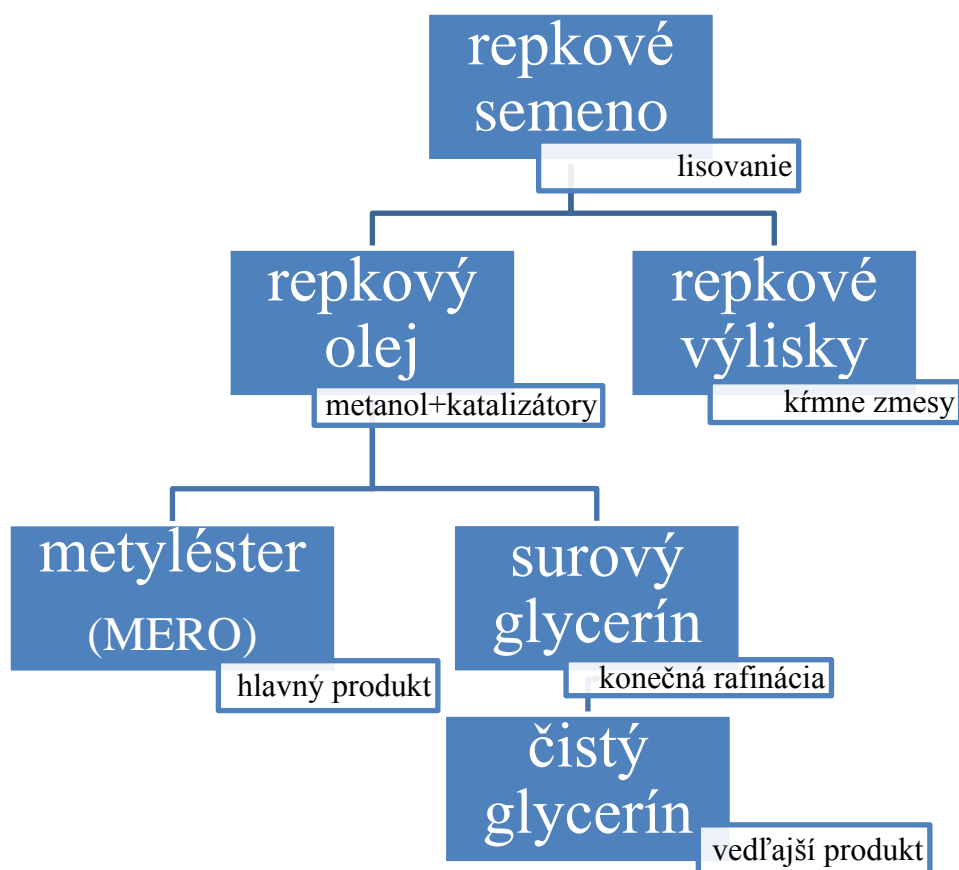
Podiel jednotlivých produktov teplotnej pyrolýzy závisí od viacerých faktorov, ktorými sú: zloženie a pôvod biomasy, jej vlhkosť, veľkosť častíc biomasy, použitý inertný plyn v reaktore, rýchlosť ochladenia odchádzajúcich plynov z reaktoru, a v neposlednom rade teplota v horúcej zóne pyrolýzneho reaktora a zdržná doba pyrolýznych plynov v reaktore. Podľa posledných dvoch podmienok rozlišujeme 3 typy pyrolýzy, ktoré sa líšia podmienkami procesu, vo všeobecnosti nižšia teplota (400 – 500 °C) a dlhšia zdržná doba pary zapríčiňujú vyšší podiel koksu (karbonizácia). Vysoká teplota (800 – 1000 °C) a dlhá zdržná doba vedú k vysokej produkcii pyrolýznych plynov (splyňovanie). Posledný typ sa vyznačuje vysokým podielom kvapalných produktov, čo je spôsobené strednými teplotami (500 – 600 °C) a krátkou zdržnou dobou (rýchla pyrolýza – fast pyrolysis). [13]

Tab. 8 Typy pyrolýzy [13]

Typ pyrolýzy	Podmienky procesu	Podiel (%)		
		Plyn	Dechty	Koks
Karbonizácia	Nízke teploty a dlhý zdržný čas	35	30	35
Splyňovanie	Vysoká teplota a dlhšia zdržná doba	85	5	10
Rýchla pyrolýza	Stredné teploty a veľmi krátka zdržná doba	13	75	12

8 Esterifikácia bioolejov

Esterifikácia bioolejov je fyzikálny–chemický proces, pri ktorom sa získava kvapalné palivo (bionafta) z olejnatých plodín, ktoré obsahujú minimálne 20 % oleja. Semená sa lisujú po ohrevu na 80 – 90 °C šnekovými lisami. Pomocou lisovania sa získava polovina oleja, zostávajúca časť oleja sa dostane drvením a dopravovaním semien do extraktoru, kde sa pomocou rozpúšťadla extrahuje zostávajúci olej. Nasledujúcim krokom je odstraňovanie rozpúšťadla, ktoré je vykonané destiláciou. Po destilácii nasleduje rafinácia, pri ktorej sú odstránené pigmenty, fosfolipidy, zápachy voskov a stopy kovov. Samotná esterifikácia spočíva v miešaní oleja, najčastejšie s metanolom, za prítomnosti alkalických katalyzátorov (NaOH, KOH). Pri esterifikácii sa postupne uvoľňujú acylové zvyšky z triglyceridu (repkový olej), ktoré sa viažu na metanol. Okrem metylesteru z kyseliny sa uvoľňuje glycerol, ktorý sa uvoľňuje z reakčnej zmesi ako ťažšia fáza. Hlavným produktom je metylester známy ako MERO (Slovenská Republika), MEŘO (Česká Republika) alebo FAME (Európa). Všetky tri pojmy označujú biodiesel, avšak pojem MERO (MEŘO) sa využíva na biodiesel, ktorý je vyrobený výlučne z oleja repky olejnej. Vedľajším produktom pri výrobe MERO je glycerín, ktorý sa využíva ďalej v priemysle na výrobu zubných pást. [10], [14]



Obr. 9 Schéma postupu výroby biodieselu

9 Bioplyn

Pod pojmom bioplyn rozumieme všetky druhy plynných zmesí, ktoré vznikli činnosťou mikroorganizmov. V technickej praxi sa výraz bioplyn využíva hlavne pre plynnú zmes, ktorá vznikne anaeróbnou fermentáciou vlhkých organických materiálov v umelých technických zariadeniach. [5]

Ďalšie typy bioplynov môžeme rozdeliť (okrem vyrobených anaeróbnou fermentáciou) podľa pôvodu alebo miesta vzniku na [5]:

- Zemný plyn – je energeticky najhodnotnejší, lebo obsahuje 98 % metánu. Vznikol anaeróbnym rozkladom biomasy v dávnych dobách.
- Banský plyn – z energetického hľadiska je nevyužiteľný, pri zmiešaní s vzduchom tvorí výbušnú zmes.
- Kalový plyn – vznikne anaeróbnym rozkladom organických usadenín vo vodných nádržiach (umelé, prírodné), ktoré sa nečistia.
- Skládkový plyn – je plyn vznikajúci samovoľne v skládkach anaeróbnym rozkladom, ktoré obsahujú veľké množstvo organických odpadov.

9.1 Zloženie a výhrevnosť bioplynu

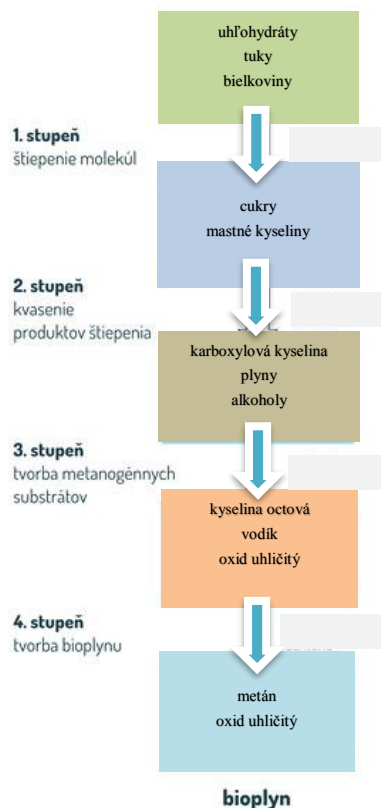
Najdominantnejšie látky v bioplynu sú jednoznačne metán a oxid uhličitý. Obsah metánu sa pohybuje od 50 až do 75 %, obsah oxidu uhličitého v ideálnom prípade 25 až 50 %. V reálnom zložení však obsahuje malé objemové percento minoritných plynov. Tieto prímеси môžu signalizovať problémy v priebehu anaeróbnej fermentácie, alebo prítomnosť niektorých chemických prvkov, ktoré obsahujú vstupné materiály. [5]

Dôvody prítomnosti prímеси [5]:

- Vysoký obsah oxidu CO_2 – anaeróbná fermentácia neprebíha za optimálnych podmienok,
- Prítomnosť kyslíka – zavzdušnenie pracovného priestoru, môže byť nebezpečný (tvorba výbušnej zmesi),
- Stopy vodíka – nerovnováha medzi acidogennou a metanogennou fázou, má negatívny vplyv na energetickú kvalitu plynu,
- Stopy oxidu uhoľnatého – vznik ložísk požiaru pri suchej anaerobnej fermentácii,
- Obsah sírovodíka – spôsobí ťažkosti pri konečnom využití bioplynu.

9.2 Anaeróbna fermentácia

Anaeróbna fermentácia je súbor na seba naviazaných organických procesov, pri ktorých dochádza k rozkladu biologicky rozložiteľnej hmoty bez prístupu vzduchu. Priebeh anaeróbnej fermentácie sa skladá zo štyroch procesov, ktoré sú znázornené na obr. 8. Výpadok jedného procesu zo skupiny by narušil celý systém. Výsledným produktom je bioplyn, ktorý je zložený z plyných látok (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S), vyhnitých substrátov a nerozložiteľných zvyškov organickej hmoty. [15]



Obr. 10 Priebeh anaeróbneho procesu [17]

Technológie na anaeróbnú fermentáciu podľa obsahu sušiny v biomase môžeme rozdeliť na [16]:

- Technológia mokrej fermentácie – využíva sa surovina s nízkym obsahom sušiny (poľnohospodárske odpady a bioodpady), optimálny obsah sušiny je v rozmedzí 8 – 12 %.
- Technológia suchej fermentácie – využíva sa surovina v tuhom stave, ktorý má obsah sušiny v intervale 18 – 35 %.

10 Účinnosť výroby energie jednotlivých technológií

V nasledujúcej kapitole sa budem zaoberať účinnosťami jednotlivých vyššie popísaných energetických procesov.

10.1 Účinnosť výroby energie pomocou spaľovania

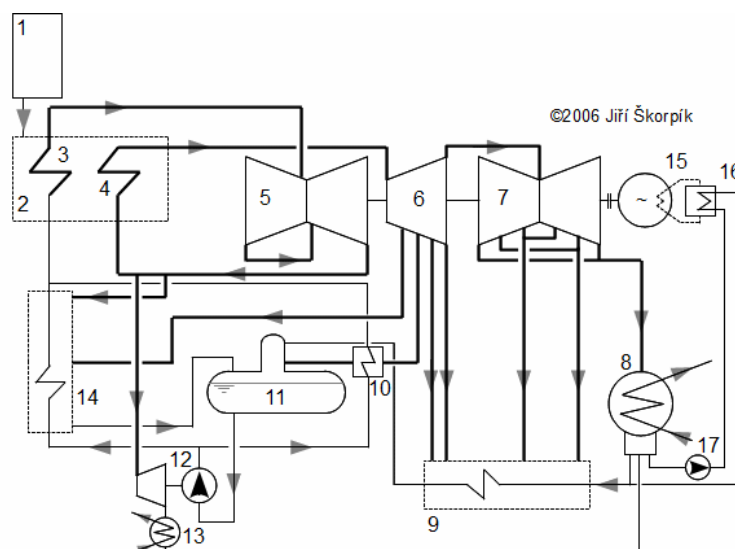
Spaľovanie je jediný priamy proces medzi technológiami. Pomocou spaľovania získame teplo, ktoré môžeme použiť na vykurovacie účely, na výrobu tepelnej energie alebo na kombinovanú výrobu tepla a elektrickej energie.

10.1.1 Výroba elektrickej energie z biopaliva pomocou spaľovania

Podľa druhu použitého biopaliva a zariadenia na premenu bioenergie na elektrickú energiu, existuje viac spôsobov výroby elektrickej energie [19]:

- parný kotol na pevné, resp. plyné biopalivo s parnou turbínou a generátorom,
- spaľovacia turbína s generátorom, poháňaná bioplynom zo živočíšnych exkrementov alebo na drevný plyn,
- piestový motor s generátorom, poháňaný bioplynom, bionaftou, etanolom alebo drevným plynom,
- elektrochemický palivový článok napájaný bioplynom alebo kvapalným biopalivom.

Táto práca z uvedených možností sa zaoberá s účinnosťou výroby elektrickej energie v kondenzačnej elektrárni.



Obr.11 Schéma zariadenia elektrárenského bloku 200 MW Škoda [20]

1 skládka paliva; 2 parný kotol; 3 prehrievač; 4 prihrievač, 5 VT diel turbíny, 6 ST diel turbíny; 7 NT diel turbíny; 8 kondenzátor; 9 systém nízkotlakové regenerácie; 10 zrážac prehriatiu pred odplyňovačom; 11 napájacia nádrž; 12 napájacie čerpadlo kotla; 13 kondenzátor turbíny poháňajúci napájacie čerpadlo; 14 systém vysokotlakové regenerácie; 15 systém chladenia generátora a budiče; 16 odvod tepla zo systému chladenia generátora a budiče; 17 kondenzačné čerpadlo kotla

Kondenzačné elektrárne slúžia k hlavne k výrobe elektrickej energie. Pre pohon generátorov sa v takýchto elektrárnach využívajú kondenzačné alebo odberové kondenzačné turbíny. [19]

Výpočet celkovej účinnosti kondenzačnej elektrárne na konkrétnom prípade [19]:

Teplota pary na vstupe do turbíny: $T_1 = 500 \text{ °C} = 500 + 273,15 = 773,15 \text{ K}$.

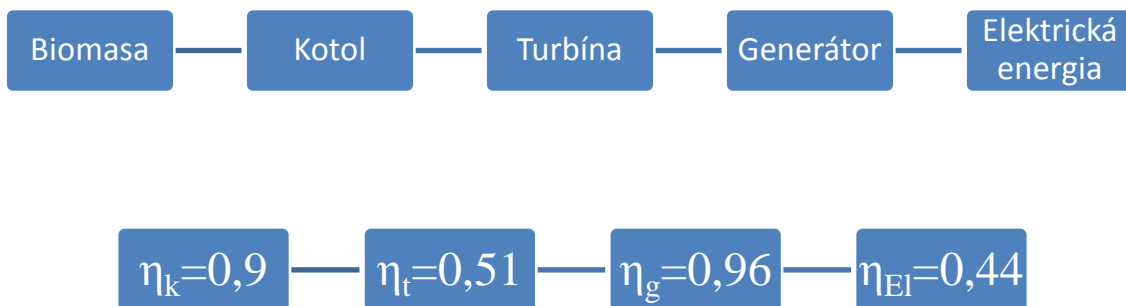
Teplota pary na výstupe z turbíny $T_2 = 40 \text{ °C} = 40 + 273,15 = 313,15 \text{ K}$.

Termická účinnosť turbíny : $\eta_{th} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{773,15 - 313,15}{773,15} = 0,59$

Mechanická účinnosť turbíny: $\eta_m = 0,86$

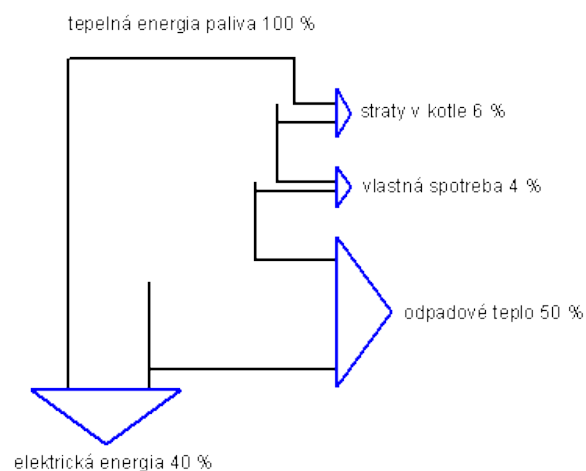
Celková účinnosť turbíny: $\eta_{tur} = \eta_{th} \cdot \eta_m = 0,59 \cdot 0,87 = 0,51$

Výsledná účinnosť tepelnej elektrárne: $\eta_{EI} = \eta_k \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_g = 0,90 \cdot 0,51 \cdot 0,96 = 0,44$



Obr.12 Schéma kondenzačnej elektrárne a účinnosti pri jednotlivých zariadeniach

Vo vyššie uvedenom prípade účinnosť kondenzačnej elektrárne dosahuje 44%, ale v tom nie je ešte zahrnutá vlastná spotreba. Pri uvažovaní vlastnej spotrebe účinnosť klesne približne o 4 % a tým pádom je výsledná účinnosť až 40 %. Najväčší podiel zo strát, ktoré tvoria vlastnú spotrebu, má napájacie čerpadlo. K najmarkentnejšej strate v kondenzačných elektrárnach dochádza v kondenzačnom obeh, čo tvorí teplo odvedené chladiacou vodou z kondenzátoru (odpadové teplo). Okrem týchto strat musíme uvažovať aj stratami, ktoré vzniknú u kotla (ventilátor na vzduch, podávanie paliva, čistenie). [19]



Obr. 13 Celková energetická bilancia kondenzačnej elektrárne [19]

Zvyšovanie účinnosti kondenzačných elektrární je možné nasledujúcimi spôsobmi [19]:

- znížením tlaku v kondenzátore,
- zvyšovaním parametrov vstupnej pary do turbíny,
- regeneráciou tepla,
- prehrievaním pary.

Pre dosiahnutie maximálneho využitia energie v palive sú uvedené zdroje realizované prevažne ako kombinovaná výroba tepla a elektrickej energie – kogeneračné jednotky.

Kogeneračné jednotky

Celková účinnosť využitia energie obsahovaná v primárnom palive je cca 77–87 %, pričom dominantní je účinnosť výroby tepla (v závislosti na tlaku pred a za turbínou cca 62–76 %). Účinnosť výroby elektriny sa pohybuje medzi 8–20 %. Stupeň zhodnotení primárneho paliva na elektrinu je nízky. Oproti plynovej kogenerácii je však výhodou možnosť spaľovania obnoviteľného paliva (biomasy) alebo lacného paliva (uhlí). [20]

Tab. 9 Základné parametre jednotlivých typov kombinovanej výroby elektriny a tepla [20]

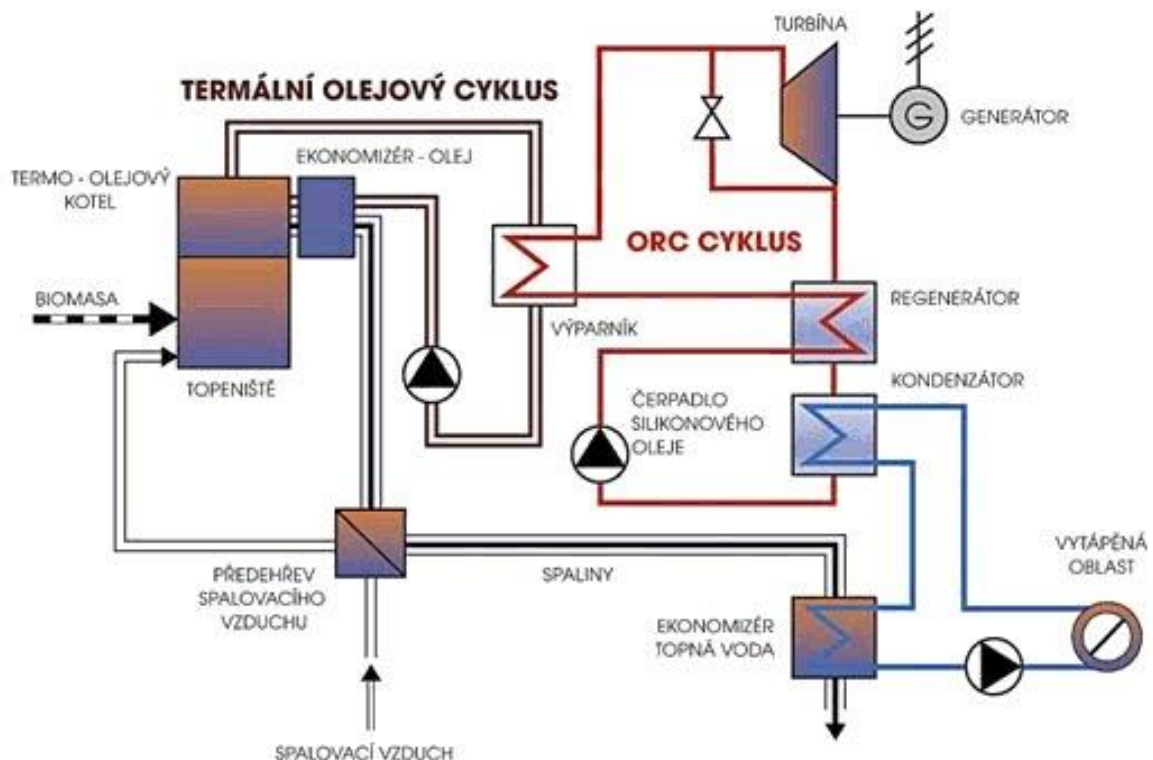
Typ teplárne	Podiel výroby elektriny a tepla	Účinnosť elektrická	Účinnosť tepelná	Celková účinnosť	Elektrický výkon teplárni
	(–)	(%)	(%)	(%)	(MW)
S parným strojom	0,16 – 0,25	8 – 12	60 – 67	68 – 87	0,1 – 2
S parnými turbínami	0,24 – 0,34	12 – 15	6 – 8	72 – 90	0,15 – 100
So spaľovacími motormi	0,7 – 1	32 – 41	44 – 53	82 – 90	0,1 – 10
S spaľovacími turbínami	0,5 – 0,8	23 – 38	36 – 50	68 – 85	2 – 100
Para–plynové	0,5 – 1,5	35 – 44	32 – 50	78 – 87	5 – 200 a viac

Princíp kombinovanej výroby elektriny a tepla pomocou ORC, je založený na uzatvorenom parnom Rankinovom cykle, kde médiumom je organická látka (namiesto vody), ktorá sa pri nízkych teplotách a tlakoch odparuje.

Výstupom procesu je elektrická energia a teplo, počas ORC procesu namiesto vody (resp. vodné pary) na pohon sa využívajú organické uhľovodíky, ktoré vykazujú v Rankinovom diagrame oveľa lepšie vlastnosti. K odparovaniu týchto uhľovodíkov sa používa termoolej, ktorý je ohrievaný na teplotu cca 300 °C. [21]

Hlavné výhody ORC:

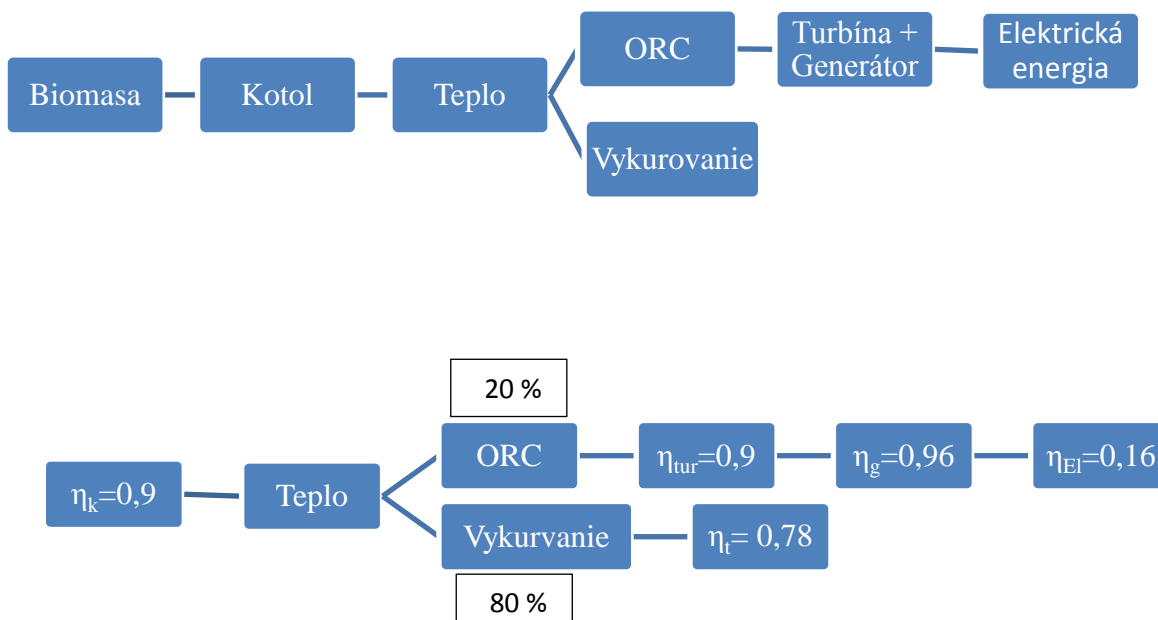
- Teplota počas celého cyklu je maximálne 300 °C a tlak dosahuje maximálne 1 MPa (10 barov) – vysoká životnosť zariadenia,
- Vysoká účinnosť turbíny – najmä pri čiastočnom zaťažení,
- Energia je využívaná v systéme pri relatívne nízkej teplote,
- Vysoká pracovná spoľahlivosť pri nízkych prevádzkových nákladoch,
- Nízke otáčky turbíny umožňujú priamy pohon generátora,
- Bezobslužná prevádzka,
- Malá (zanedbatelná) erózia turbínových lopatiek.



Obr.14 Schéma ORC systému [21]

Výpočet celkovej účinnosti ORC cyklu:

- Účinnosť turbíny [23]: $\eta_{\text{tur}} = 0,9$
- Účinnosť kotla [24]: $\eta_{\text{k}} = 0,9$
- Účinnosť generátora: $\eta_{\text{g}} = 0,96$
- Podiel tepla na výrobu elektrickej energie: 20 %
- Teplo na vykurovacie účely: 80 %
- Elektrická účinnosť: $\eta_{\text{El}} = \eta_{\text{k}} \cdot \eta_{\text{tur}} \cdot \eta_{\text{g}} \cdot 0,2 = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,96 \cdot 0,2 = 0,16$
- Účinnosť tepelná: $\eta_{\text{t}} = \eta_{\text{k}} \cdot 0,8 = 0,9 \cdot 0,8 = 0,72$
- Celková účinnosť cyklu: $\eta_{\text{cel}} = \eta_{\text{t}} + \eta_{\text{El}} = 0,88$



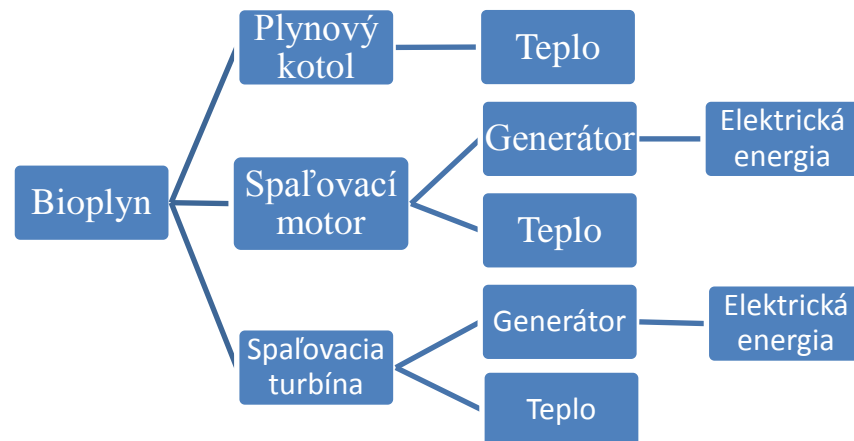
Obr. 15 Schéma kogeneračného procesu pomocou ORC a účinnosti jednotlivých zariadení

10.2 Účinnosť výroby energie z bioplynu

V tejto kapitole budú znázornené 3 hlavné možnosti energetického využitia bioplynu.

10.2.1 Výroba tepelnej energie a kogenerácia z bioplynu

Teplo z bioplynu sa získava pomocou spaľovania v kotle (spaľovacej komore), ale ekonomicky priaznivejším procesom je kombinovaná výroba tepla a elektrickej energie, ktorá sa uskutočňuje v kogeneračnej jednotke.



Obr. 16 Schéma využitia bioplynu na energetické účely

- Účinnosť samostatnej výroby tepla: $\eta_t = \eta_k = 0,9$

Kogenerácia pomocou spaľovacieho motora [25]

- Účinnosť výroby elektrickej energie pri kogenerácii: $\eta_{EI} = \eta_g \cdot \eta_s = 0,96 \cdot 0,42 = 0,40$
- Účinnosť výroby tepla pri kogenerácii: $\eta_t = 0,48$
- Celková účinnosť kogenerácie: $\eta_{cel} = \eta_t + \eta_{EI} = 0,88$

Kogenerácia pomocou spaľovacej turbíny [26]

- Účinnosť výroby elektrickej energie pri kogenerácii: $\eta_{EI} = \eta_g \cdot \eta_{tur} = 0,96 \cdot 0,33 = 0,3$
- Účinnosť výroby tepla pri kogenerácii: $\eta_t = 0,40$
- Celková účinnosť kogenerácie: $\eta_{cel} = \eta_t + \eta_{EI} = 0,70$

Vyššie uvedené hodnoty udávajú účinnosť využitia bioplynu na výrobu energetických výstupov (teplo, elektrická energia), avšak v týchto kalkuláciách nie sú zahrnuté účinnosti bioplynových staníc (fermentor). Účinnosti týchto fermentorov sa pohybujú od 50 % až do 70 % [16].

11 Záver

Pri tvorbe bakalárskej práce som získal cenné poznatky o problematike využívania biomasy na energetické účely. Táto problematika je veľmi rozsiahla a siaha späť do dejín veľmi ďaleko. V tejto záverečnej práci je dôraz vkladajú na rolu biomasy, ktorú plní energetickom priemysle v dnešnej dobe. Táto rola sa stáva v posledných rokoch stále markantnejšou, čo je spôsobené urýchľovaním vývoja modernej techniky, snahou zvýšiť podiel obnoviteľných zdrojov energie v energetickom priemysle, a tým čiastočne nahradiť užívanie a závislosť na fosílnych palivách. Spektrum energetického využitia biomasy je veľmi široké, čo si vyžaduje viacero technologických procesov. Tieto procesy sa navzájom líšia, čo je spôsobené v najväčšej miere odlišnými chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami vstupnej biomasy a rôznymi požiadavkami na energetické výstupy. Práve tie sú hlavné dôvody, že neexistuje smerodajné poradie medzi jednotlivými technologickými procesmi, a preto k jednotlivým projektom treba pristúpiť individuálne a je potrebné zohľadniť miestne faktory.

U vyššie spomínaných projektov je jedným z hlavných hľadísk, aby bolo využitie biomasy na energetické účely ekonomicky priaznivé. Práve s tým veľmi úzko súvisí účinnosť zvoleného technologického procesu. Aby biomasa bola hodným vyzývateľom fosílnych palív je nepostrádateľný technologický rozvoj a vysokoúčinné využitie v ňom skrývajúceho potenciálu. Na tento cieľ slúži efektívne využitie nielen primárnych, ale aj sekundárnych výstupov (druhotné suroviny) z jednotlivých procesov, a využitie kogenerácie pri výrobe tepla a elektrickej energie, pri ktorej je odpadové teplo využívané na vykurovanie alebo na ohrev vody.

V poslednej časti mojej práce som sa zaoberal účinnosťami jednotlivých procesov, ktoré sú vhodné pre výrobu elektrickej energie a tepla. Účinnosti pri výrobe elektrickej energie vykázali väčšie rozdiely, než účinnosti pri výrobe tepla. K tomuto tvrdeniu som sa dostal po vypracovaní viacerých procesov, ako napr. výroba elektrickej energie pomocou kondenzačnej elektrárne, kogeneračných jednotiek (aj pomocou ORC), spaľovacej turbíny a spaľovacieho motora na bioplyn. Na výrobu tepla sú znázornené procesy, pri ktorých primárne výstupy sú vyrobené pomocou plynového kotla, spaľovacej turbíny a spaľovacieho motora na bioplyn a kogeneráciou (aj pomocou ORC).

Túto problematiku som riešil všeobecne a nemal som k dispozícii dáta o vlastných spotrebách. Práve to je hlavným dôvodom, že účinnosti, ktoré sú uvedené v tejto bakalárskej práci sú o 3–4 % vyššie, ako účinnosti, ktorými sa môžeme stretnúť v praxi.

12 Zoznam použitej literatúry

- [1] Jandačka, J. Malcho, M. Mikulík, M.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2007, ISBN 978-80-969161-4-6.
- [2] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: ERA, 2006. 21. století. ISBN 80-7366-071-7.
- [3] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [4] NÁTR, Lubomír. *Vliv CO₂ na rostliny: Fotosyntéza* [online]. 2007 [cit. 2016-09-19]. Dostupné z: <http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/others-CZ.htm>
- [5] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-865-3406-5.
- [6] Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy. OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy* [online]. 2007 [cit. 2016-09-20]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>
- [7] *Vlastnosti biomasy z hlediska vhodnosti pro spalování* [online]. VŠB-TU Ostrava, [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/?C=N;O=A
- [8] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [9] NOSKIEVIČ, Pavel. *Biomasa a její energetické využití*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1996, 68 s. ISBN 80-707-8367-2.
- [10] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 987-80-248-1426-1. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/tech.pdf>
- [11] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění: Biom.cz* [online]. [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [12] LISÝ, Martin, Marek BALÁŠ, Přemysl KOHOUT a Zdeněk SKÁLA. *Energie z biomasy VII: Možnosti fluidního zplyňování pro kogeneraci* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2016-10-10]. ISBN 978-80-214-3542-1. Dostupné z: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf
- [13] JELEMENSKÝ, Ludovít, GAŠPAROVIČ, Lukáš, MARKOŠ, Josef: Energetické využitie rastlinnej biomasy 2 – Termické procesy. *Biom.cz* [online]. [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-rastlinnej-biomasy-2-termicke-procesy>. ISSN: 1801-2655.

- [14] JEVIČ, Petr: Energetická bilance a životní cykly biogenních pohonných hmot – 2. *Biom.cz* [online]. [cit. 2016–11–26]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticka-bilance-a-zivotni-cykly-biogennich-pohonných-hmot-2>>. ISSN: 1801–2655
- [15] ŽÍDEK, Michal. *Energie z biomasy III: Anaerobní digesce zvolených substrátů na laboratorním fermentoru* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016–12–01]. Dostupné z: http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iii/papers/08-Zidek.pdf
- [16] *Anaerobní technologie* [online]. Bioprofit, © 2007 [cit. 2016–12–05]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [17] Anaeróbna fermentácia [online]. BIOTEC, 2013 [cit. 2017–01–08]. Dostupné z: <http://www.bioteck.sk/sk/bioplynove-stanice/technologie-a-chemicke-procesy/73-anaerobna-fermentacia>
- [18] STAF, Marek. *Výzkum termické konverze odpadní biomasy na plynná a kapalná paliva: Biom.cz* [online]. [cit. 2017–01–08]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-termicke-konverze-odpadni-biomasy-naplynná-a-kapalna-paliva>
- [19] Elekrárne [online]. KVES, 2013 [cit. 2017–03–20]. Dostupné z: http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EEENERGETIKA/ELEN-3_2.htm#3.2.1.4
- [20] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla [online]. *EkoWATT*, 2007 [cit. 2017–03–29]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/uspory-energie/kombinovana-vyroba-elektřiny-a-tepla>
- [21] Kombinovaná výroba tepla a elektřiny [online]. *Menert*, 2008 [cit. 2017–04–02]. Dostupné z: https://www.zpoe.sk/fotky4725/KPE32/Wollner_Kombinovana_vyroba_tepla_a_elektřiny.pdf
- [22] Spalování ve fluidním loži. HEIJBOER, Jaap. *BIOM – České sdružení pro biomasu* [online]. 2001 [cit. 2016–10–12]. Dostupné z: <http://stary.biom.cz/biom/8/04.html>
- [23] STATE OF THE ART OF ORC TECHNOLOGY FOR BIOMASS PLANTS [online]. *Turboden*, 2010 [cit. 2017–03–24]. Dostupné z: <http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/03/06-Bini-Turboden.pdf>
- [24] Kochlbach biomass boilers [online]. *INNASOL LTD*, 2017 [cit. 2017–03–24]. Dostupné z: <http://www.innasol.com/our-products/kochlbach-biomass-boilers/>
- [25] Kogeneračné jednotky [online]. *TTS Martin*, 2016 [cit. 2017–04–29]. Dostupné z: http://www.tts-martin.sk/img/cms/mp-600-1-bcu-shrt_spec.pdf
- [26] Mikroturbinák [online]. *REGALE Energy*, 2012 [cit. 2017–02–28]. Dostupné z: <http://www.regale.hu/hu/mikroturbinak.html>

Zoznam skratiek

BRKO	biologicky rozložiteľný komunálny odpad
FAME	skratka biodieselu v Európe (fatty acid methyl esters)
MERO	metyléster repky olejnej
NT	nízkotlakový
ORC	organický Rankinov cyklus
OZE	obnoviteľné zdroje energie
ST	stredotlakový
VT	vysokotlakový

Zoznam symbolov

A	obsah popola	[-]
H_u	skutočná výhrevnosť paliva	[MJ.kg ⁻¹]
H_{uWf}	výhrevnosť sušiny	[MJ.kg ⁻¹]
i_{nv}	entalpia napájacej vody	[kJ.kg ⁻¹]
i_p	entalpia vyrobenej pary	[kJ.kg ⁻¹]
m_1	hmotnosť vzorky pred vysušením	[kg]
m_2	hmotnosť vzorky po vysušení	[kg]
M_{pp}	hmotnostný tok vyrobenej pary	[kg.s ⁻¹]
M_{pv}	hmotnostný tok dodávaného spaľovaného paliva	[kg.s ⁻¹]
Q_i	výhrevnosť	[MJ.kg ⁻¹]
Q_i^f	výhrevnosť spaľovaného paliva	[kJ.kg ⁻¹]
q_r	maximálny tepelný výkon	[kW.m ⁻²]
Q_s	spalné teplo	[MJ.kg ⁻¹]
w	relatívna vlhkosť	[%]
w_{dr}	absolútna vlhkosť	[%]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
ξ_i	tepelné straty kotla v stacionárnom stave	[-]
η_{cel}	celková účinnosť	[-]
η_{El}	elektrická účinnosť	[-]
η_g	účinnosť generátora	[-]
η_k	účinnosť kotla	[-]
η_m	mechanická účinnosť turbíny	[-]
η_s	účinnosť spaľovacieho motora	[-]

η_t	tepelná účinnost	[-]
η_{th}	termická účinnost turbíny	[-]
η_{tur}	účinnost turbíny	[-]