

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

Katedra technologických zařízení staveb

**Návrh generátoru plynu pro zplyňování  
fermentačního digestátu**

diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

Diplomant: Ondřej Havel

PRAHA 2015





## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Návrh generátoru plynu pro zplyňování fermentačního digestátu“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Malaťáka, Ph.D. Vycházel jsem pouze ze svých vědomostí a znalostí, odborných konzultací a literatury, jejíž seznam je uveden na konci v příložené bibliografii.

V Hradci Králové, dne .....

Ondřej Havel

.....

## Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval všem, kteří se ať přímo, či nepřímo podíleli na vzniku této práce. V první řadě bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D., za cenné rady, veškerou odbornou pomoc a připomínky při vzniku této práce. Dále děkuji mému kolegovi Ing. Pavlu Stočkovi ze společnosti ATEKO a.s. za odborné konzultace, podklady a vstřícnost.

Nakonec bych chtěl poděkovat své ženě Alence, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Ondřej Havel

## **Návrh generátoru plynu pro zplyňování fermentačního digestátu**

**Abstrakt:** Cílem této diplomové práce je seznámení se s problematikou kogenerované výroby elektrické energie a tepla zplyňováním fermentačního digestátu s ohledem na možnosti čištění plynu. Navrhnout generátor plynu pro zplyňování fermentačního digestátu s technologickými návrhy a výpočty dílčích procesů. Dále tuto problematiku zhodnotit z technické a ekonomické stránky. Celá práce je rozdělena do několika kapitol. První se věnuje obecnému úvodu. Druhá kapitola se věnuje biomase, obecnému popisu procesu zplyňování, konstrukčním řešením zplyňovačů a čištění plynu. V kapitole tři jsou popsány výchozí podmínky. Kapitola čtyři se věnuje technologii sušení, návrhu technologie zplyňování, návrhu generátoru plynu - potřebným výpočtům a samotnému konstrukčnímu řešení, a kogenerované výrobě elektrické energie. V kapitole pět je provedeno ekonomické zhodnocení technologie zplyňování a kapitola šest obsahuje závěr celé práce.

**Klíčová slova:** biomasa, emise, energie, výhřevnost, zplyňování

---

**Proposal for a gas generator for gasification of fermentation digestate**

**Summary:** The aim of this diploma thesis is to explain issues of cogeneration electricity and heat production by gasification of fermented digestate with respect to possibility of gas purification. Design of gas generator for fermented digestate gasification together with technological design and partial processes calculation. This issue was also evaluated technically and economically. The thesis is divided into several chapters. The first one contains a general introduction. The second one consists of biomass, general description of the gasification process, design solution of gasification units and gas purification. There is description of initial conditions in chapter three. Chapter four deals with the drying technology, the gasification technology design, the generator design - necessary calculations and its detail solution, and cogeneration electricity production. There is economical evaluation of gasification technology in chapter five and chapter six contains the conclusion of the thesis.

**Key words:** biomass, emissions, energy, calorific value, gasification

---

## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Teoretická část řešené problematiky.....	12
2.1 Biomasa.....	12
2.1.1 Rozdělení biomasy z hlediska původu.....	12
2.1.2 Biomasa jako surovina pro zplyňování.....	13
2.2 Základní vlastnosti paliva.....	14
2.2.1 Výhřevnost.....	14
2.2.2 Obsah vlhkosti.....	14
2.2.3 Obsah popelovin a jejich složení.....	15
2.2.4 Zrnitost a sypná hmotnost.....	16
2.2.5 Obsah prchlavé hořlaviny.....	17
2.2.6 Obsah znečišťujících látek.....	17
2.3 Zplyňování.....	18
2.3.1 Procesy při zplyňování.....	19
2.3.2 Reakce.....	20
2.3.3 Vliv množství zplyňovacího média na kvalitu plynu.....	21
2.4 Konstrukční řešení zplyňovačů.....	22
2.4.1 Zplyňovače s pevným ložem.....	23
2.4.2 Fluidní zplyňovače.....	25
2.5 Nečistoty ve vyrobeném plynu a jejich čištění.....	27
2.5.1 Částice nespálených podílů.....	27
2.5.2 Alkalické sloučeniny.....	28
2.5.3 Dehty.....	28
2.5.4 Dusíkaté sloučeniny.....	30



---

2.5.5	Sloučeniny síry .....	31
2.5.6	Sloučeniny chloru.....	31
3.	Výchozí podmínky .....	32
4.	Návrh řešení.....	32
4.1	Návrh technologie sušení a úpravy paliva.....	32
4.2	Návrh technologie zplyňování .....	35
4.3	Návrh generátoru plynu.....	36
4.3.1	Složení paliva [d] .....	36
4.3.2	Složení plynu[g] .....	37
4.3.3	Palivová bilance [r] .....	38
4.3.4	Plynová bilance [g] .....	39
4.3.5	Bilance zplyňovacího vzduchu [a] .....	40
4.3.6	Zplyňovací bilance .....	40
4.3.7	Bilanční přepočít na navržené parametry .....	43
4.4	Výpočet generátoru plynu .....	44
4.4.1	Sféricita nekulové částice.....	45
4.4.2	Návrh fluidní vrstvy .....	45
4.5	Konstrukční návrh generátoru plynu.....	47
4.6	Technologie kogenerované výroby elektrické energie.....	49
5.	Ekonomické zhodnocení.....	50
5.1	Náklady a výnosy .....	50
5.2	Zhodnocení investice.....	52
6.	Závěr .....	55
7.	Seznam použitého značení.....	56
8.	Seznam obrázků.....	58
9.	Seznam grafů .....	58

---

10. Seznam tabulek .....	58
11. Seznam zkratek .....	59
12. Použitá literatura .....	60

## 1. Úvod

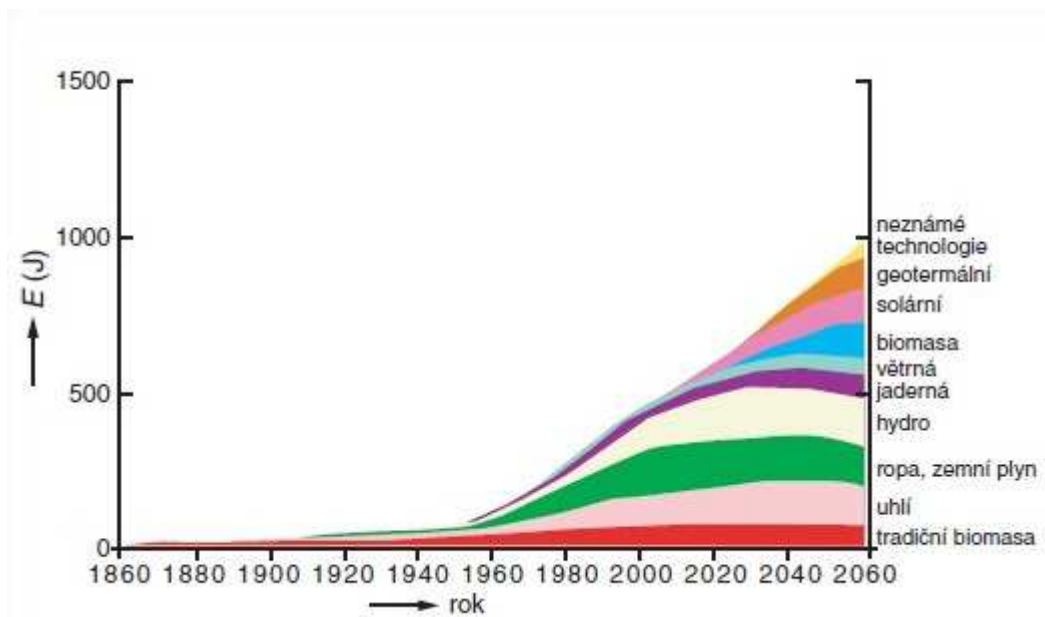
V Evropské Unii (EU) a současně i v České republice (ČR) je již delší dobu často diskutované téma zpracování biologicky rozložitelného odpadu (BRO) a biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO), a to zejména jeho další energetické využití. Děje se tak z několika důvodů. Jedním z nich je snížení emisí skleníkových plynů, nahrazováním tradičních fosilních paliv biopalivy. Dalším důvodem je nárůst odpadu související s rozvojem civilizace a se stoupající životní úrovní. A nakonec nedostatek zdrojů energie, který tíží Evropu a ta je tak již nyní poměrně silně závislá na dovozu energetických surovin a tudíž je třeba hledat pokud možno snadno dostupné a ekonomicky výhodné zdroje obnovitelných energií (OZE).

Snahu řešit tyto problémy v EU a potažmo v ČR odrážejí tyto dokumenty:

- Státní energetická koncepce České republiky.
- Plán odpadového hospodářství České republiky.
- Akční plán pro biomasu v České republice.
- Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů.
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/27/EU ze dne 25. října 2012 o energetické účinnosti, o změně směrnic 2009/125/ES a 2010/30/EU a o zrušení směrnic 2004/8/ES a 2006/32/ES.
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění).

Na základě těchto dokumentů vznikla celá řada zákonů a pozměňovacích návrhů, přičemž jedny nejdůležitějších pro tuto práci jsou: *Zákon č. 229/2014 Sb., kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů*, který vstoupil v platnost dne 1. 1. 2015 a který v § 21 odst. 7 zakazuje ukládat směsný komunální odpad a recyklovatelné a využitelné odpady stanovené prováděcím právním předpisem na skládky. Zároveň bude k 31. 12. 2015 ukončena podpora spoluspalování biomasy s fosilními palivy bez vysoce účinné kogenerace. Toto vyplývá ze *Zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*.

Důsledkem shora uvedeného je uvolnění velkého objemu biomasy. Aby ji bylo možné spalovat, bylo by totiž nutné dosáhnout účinnosti 70 % a zdrojů, které této hranice dosáhnou, bude pravděpodobně velmi málo. Očekává se, že tím bude k dispozici až 400 tisíc tun biomasy. Zároveň naroste objem biomasy ze směsného komunálního odpadu (SKO), který již nebude možné ukládat na skládky. Tím se otevírají možnosti pro nové projekty energetického využití biomasy. Jednou z cest, jak biomasu přeměnit na energii je její zplyňování, kterým se bude tato práce zabývat. [1,2,3]



Graf č. 1 – Předpokládaný vývoj celosvětové produkce energie[4]

## 2. Teoretická část řešené problematiky

### 2.1 Biomasa

Zákonem č. 165/2012 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů (dále jen OZE) je definována biomasa jako biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětví, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a rovněž biologicky rozložitelná část vyříděného průmyslového a komunálního odpadu. [2]

#### 2.1.1 Rozdělení biomasy z hlediska původu

##### **Záměrně pěstovaná biomasa:**

- **Lignocelulózové** – dřeviny (vrby, topoly, olše, akáty), obiloviny (celé rostliny), travní porosty (sloní tráva, chrastice, trvalé travní porosty), ostatní rostliny (konopí seté, čirok, křídlatka, šťovík krmný, sléz topolovka).
- **Olejnate** – řepka olejná, slunečnice, len, dýně na semeno.
- **Škrobno-cukernaté** – brambory, cukrová řepa, obilí (zrno), topinambur, cukrová třtina, kukuřice.

##### **Odpadní biomasa:**

- **Rostlinné odpady** ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny – řepková, obilná a kukuřičná sláma, seno, zbytky po likvidaci křovin a lesních náletů, dřevní odpady ze sadů a vinic, luk a pastvin.
- **Lesní odpady** (dendromasa) – dřevní hmota z lesních probírek, pařezy, kořeny, kůra, větve, šišky technické odřezky.
- **Organické odpady z průmyslových a potravinářských výrob** - z dřevařských provozoven, odřezky, piliny, hobliny, kůra, odpady z papíren, odpady z provozů na zpracování a skladování rostlinné produkce cukrovary, odpady z jatek, mlékáren, lihovarů, konzerváren, vinařských provozů.

- **Odpady ze živočišné výroby** – hnůj, kejda, zbytky krmiv, odpady z mléčnic z přidružených zpracovatelských kapacit.
- **Komunální organické odpady** – kaly z čistíren odpadních vod, organický tuhý komunální odpad (TKO). [5]

### 2.1.2 Biomasa jako surovina pro zplyňování

Jako nejperspektivnější surovina se jeví dřevní hmota, avšak v posledních letech se zvyšuje zájem také o možnost zpracovávání jiných energetických plodin. Teoreticky mohou být zplyňovány všechny druhy biomasy s obsahem vlhkosti mezi 5 ÷ 30 %, ale ne vždy je to ekonomicky nebo technicky proveditelné. Jedna z možných surovin je i fermentační digestát z bioplynových stanic (BPS).

Digestát tak, jak opouští reaktor, a to v případě mokré i suché fermentace, je možné uplatnit dle zákona č. 156/1998 Sb., v platném znění, a vyhlášky 341/2008 Sb., o bioodpadech, a to především jako hnojivo na zemědělské půdě. Avšak aby mohl být digestát použit jako hnojivo, je nezbytné sledovat obsahy některých prvků, jako je např. Zn, Cu, As, které mohou mnohdy překračovat platné limity. V případech, kdy nemá BPS vazbu na zemědělský sektor, nebo jsou hodnoty sledovaných prvků nadlimitní, představuje zpracování digestátu zcela zásadní provozní otázku.

Jedním z řešení tohoto problému může být přeměna odpadu z fermentace biomasy v BPS na energoplyn zplyňováním v generátoru plynu a jeho následná přeměna na energii. [6,7]

## 2.2 Základní vlastnosti paliva

Každý typ biomasy má své specifické vlastnosti, které působí na zplyňovací proces. Jedny z nejdůležitějších jsou:

- Výhřevnost.
- Obsah vlhkosti.
- Obsah popelovin a jejich složení.
- Zrnitost a sypná hmotnost.
- Obsah prchavé hořlaviny.
- Obsah znečišťujících látek (obsahující dusík, síru, chlor, alkálie, těžké kovy).

### 2.2.1 Výhřevnost

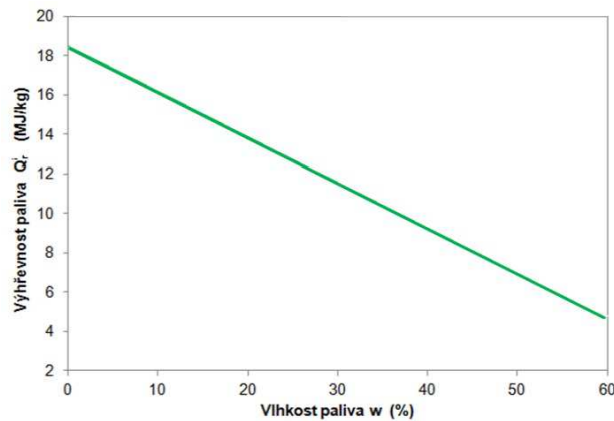
Je ovlivněna chemickým složením, obsahem popela a především obsahem vlhkosti v biomase. Hořlavina má u většiny biomasy výhřevnost okolo 19 [MJ·kg<sup>-1</sup>]. Výhřevnost  $Q_i$  je hodnota spalného tepla uvolněného za stejných podmínek zmenšená o hodnotu kondenzačního tepla vody přítomné ve spalinách v plynné formě. Výhřevnost se vypočítá z hodnoty spalného tepla  $Q_s$ , obsahu vlhkosti  $W$  a množství vody vzniklé při spalování palivového vodíku  $H$  přítomného v původním materiálu.

### 2.2.2 Obsah vlhkosti

V energetice se vlhkost vyjadřuje jako podíl vody v palivu k hmotnosti vlhkého paliva. U tepelných procesů jako je zplyňování se dává přednost relativně suché biomase z důvodu vyšší kvality produkovaného plynu – vyšší výhřevnost, nižší podíl dehtů a vyšší účinnost. Obsah vlhkosti v palivu je taktéž důležitý ve vztahu k zásobníkům a dopravním cestám v technologii, aby se nevytvářely klenby a shluky ve šnekových dopravnících.

Obsah vlhkosti se pohybuje v širokém rozmezí od 5 do 60 %<sub>hm.</sub>, pro biomasu ve stavu vysušeném od 10 do 25 %<sub>hm.</sub>. Pro bezproblémové dávkování a spalování je vhodné

snížit vlhkost biomasy přirozeným, nebo umělým sušením pod relativní vlhkost 25 %<sub>hm</sub>. [8,9]



Graf. č. 2 – Závislost výhřevnosti paliva na jeho vlhkosti [7]

### 2.2.3 Obsah popelovin a jejich složení

Popeloviny představují obsah anorganických, nebo minerálních látek v biomase, který zůstane po dokonalém spálení. Ve skutečnosti může popel obsahovat i malou část nespáleného paliva, tzv. nedopal. Obsah popela v různých typech biomasy je dosti široký, od 0,1 % u dřeva až po 15 % u zemědělských plodin, což významně ovlivňuje konstrukci reaktoru, zvláště systém odvodu popela.

Výhoda nižšího obsahu popelovin je ovšem anulována skutečností, že oproti uhlí má popel z biomasy méně příznivé vlastnosti. Složení a vlastnosti popela mohou do značné míry ovlivnit bezporuchový chod a životnost zařízení. Pokud zpracováváme biomasu k energetickým účelům, jsou pro nás nejdůležitější charakteristické teploty popelovin. Při zplyňování se pohybujeme v rozsahu teplot 750 ÷ 900 [°C]. Biomasa obsahuje nízkotavitelné minerální látky, které mohou způsobovat problémy se spékáním při teplotách nad 850 [°C], v některých případech i u teplot nižších. U vysokoteplotních zplyňovacích generátorů se dá těmto problémům vyhnout tím, že se popel kompletně roztaví a odvede v tekuté formě. Chemické složení popela je tedy zásadní, protože ovlivňuje jeho tavitelnost, která může zapříčinit struskování a tvorbu klenby v reaktoru, což může v konečném důsledku celý reaktor zablokovat. Navíc se také zvyšuje obsah dehtu v plynu.



Obecně platí, že pokud obsah popelovin v palivu činí méně než 5 %, popeloviny nestruskují. [7,8]

#### 2.2.4 Zrnitost a sypná hmotnost

Zrnitost (granulometrii) a její distribuci je nutno volit především v závislosti na konstrukci reaktoru (s pevným ložem, fluidním) a tomu přizpůsobit i dopravní cesty. Je totiž jedním z rozhodujících faktorů ovlivňujících tlakový spád v generátoru plynu, který musí být překonáván při proudění zplyňovacího media a vzniklého plynu. Při velké tlakové ztrátě se teplota v reaktoru snižuje a produkce dehtovitých látek zvyšuje. Příliš velké částice způsobují pokles reaktivity paliva, čímž kvalita plynu klesá a doba potřebná k uvedení reaktoru do chodu se prodlužuje. U většiny zplyňovacích generátorů na dřevo se vhodná velikost částic pohybuje v rozmezí 50 x 10 x 10 [mm] až 80 x 40 x 40 [mm].

Reaktory s pevným ložem používají převážně palivo ve formě dřevního odpadu, což jsou: hrubá štěpka, brikety, pelety, piliny, hobliny apod. Tento materiál je možno dodávat do všech typů fluidních generátorů, avšak granulometrie musí odpovídat fluidizačním parametrům, jako je práh fluidace a úletová rychlost. Granulometrie má rovněž velký vliv na klenbování paliva v zásobnících, bývá zvykem osazovat zásobníky rozrušovačem klenby.

Jsou-li velké rozdíly v zrnitosti paliva, začnou se tvořit kanály, můstky, zplynění probíhá nekompletně, kvalita plynu kolísá a kapacita zplyňovacího generátoru klesá. Vhodně rozměrově upravené a zhomogenizované palivo má pozitivní vliv na provoz zařízení.

Sypná hmotnost představuje hustotu materiálu, která může být u různých druhů a forem biomasy odlišná – pohybuje se od 100 do 1000 [kg·m<sup>-3</sup>]. Spolu s výhřevností tvoří energetickou hustotu materiálu, tedy potenciál energie v jednotce objemu. Biomasa s malou hustotou je náročná na manipulaci, transport a skladování. Sypná hmotnost je proto

velice důležitým parametrem, který má zásadní vliv na provedení generátoru plynu. [7,8,10]

### 2.2.5 Obsah prchavé hořlaviny

Oproti klasickým ušlechtilým palivům má biomasa vysoký podíl prchavé hořlaviny, mezi 50 až 80 %. Jakmile se palivo v průběhu zplyňování zahřeje na teplotu 200 až 500 [°C] (oblast pyrolýzy), začne se z paliva uvolňovat prchavá hořlavina. Uvolněná prchavá hořlavina částečně vyhořívá v oblasti přívodu zplyňovacího média a postupuje do oblasti redukce, kde dále reaguje s pevnou fází (polokoks) za vzniku syntetického plynu.

Ve fluidních reaktorech nejsou jednotlivá pásma fyzicky oddělena, což je důvodem vyššího obsahu dehtovitých látek ve vyrobeném plynu, neboť produkty pyrolýzy neprochází zónou oxidace, kde se jednak částečně spálí a částečně rozštěpí na plyn.

Při zplyňování je vyšší obsah prchavé hořlaviny příčinou vyššího množství uhlovodíků v generovaném plynu, a to ve formě permanentních plynů (etylen, acetylen), BTX (benzen, toluen, xylen) a dehtů (fenol a vyšší uhlovodíky C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>). [10]

### 2.2.6 Obsah znečišťujících látek

Pro návrh generátoru plynu jsou nejvýznamnější znečišťující látky:

#### **Síra (S):**

Většina paliv na bázi biomasy obsahuje velmi malé procento síry (0,1 ÷ 0,4 %<sub>hm.</sub>), v průběhu zplyňování je síra obsažená v palivu přeměněna na sulfan H<sub>2</sub>S nebo oxidy síry SO<sub>x</sub>. Ovšem stejně jako alkalické kovy, způsobuje síra vysokoteplotní korozi. Jedná se o tzv. sulfidaci, která je aktivní až při teplotách nad 560 [°C], zvláště intenzivní je pak při teplotě nad 810 [°C]. Nízká koncentrace síry je výhodou, avšak používají-li se k redukcí obsahu dehtovitých látek katalyzátory, může i malé množství síry představovat potenciální problém, neboť může katalyzátor deaktivovat. V těchto případech je nutné dokonale odstranit veškeré síry z plynu, stejně jako je-li plyn používán v palivových člancích.[7]

**Chlor (Cl):**

Chlor se významně podílí na korozi konstrukčních materiálů. Mimo to je nežádoucím prvkem i z hlediska tvorby dioxinů (polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF)), které jsou zejména v posledních letech pečlivě sledovány. Dioxiny se tvoří při spalování i zplyňování a jejich toxický ekvivalent často převyšuje normu stanovenou pro spalovny odpadů [10].

## 2.3 Zplyňování

Proces zplyňování je termochemický pochod, při kterém postupně dochází k oxidaci uhlovodíků a vodní páry z paliva a k jejich následné bezprostřední redukci na hořlavé plyny, destilační produkty a minerální zbytek. Proces probíhá v generátoru za přítomnosti kontrolovaného množství zplyňovacího media (obvykle vzduchu nebo vodní páry) a potřebného reakčního tepla.

Zplyňování zvyšuje hodnotu základní suroviny, která může mít velice nízkou nebo dokonce zápornou hodnotu, přeměnou na palivo s vyšší užitnou hodnotou či další produkty.

Z chemického hlediska je proces zplyňování biomasy poměrně složitý. Zahrnuje mnoho kroků, mezi které patří:

- Tepelný rozklad paliva na plyn, kondenzující páry a dřevěné uhlí (pyrolýza).
- Následné tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík.
- Zplyňování pevného uhlíku vodní parou nebo oxidem uhličitým.
- Částečná oxidace hořlavých plynů, složek a pevného uhlíku.

Zatímco při spalování se chemická energie obsažená v palivu transformuje na energii tepelnou, při zplyňování se transformuje na jiný druh chemické energie, vázané na plynnou fázi. Dochází k tepelné rovnováze mezi reakcemi spotřebovávajícími teplo (endotermické) a reakcemi produkujícími teplo (exotermické). Stav, kdy teplo vzniklé v exotermických

reakcích kryje potřeby reakcí endotermických a tepelné ztráty a teplota se v reaktoru nemění, se nazývá autotermní.

Zplyňování biomasy jako jedna z možností energetického využívání biomasy má na rozdíl od jiných způsobů využití řadu předností:

- Možnost kogenerace.
- Převedení pevného paliva s velkým měrným objemem na plynné palivo s možností spalování v tepelných strojích.
- Možnost využít různá alternativní paliva.
- Technologické výhody. [7]

### 2.3.1 Procesy při zplyňování

Biomasa je v reaktoru vystavena působení vysokých teplot a podléhá různým termochemickým procesům. Při použití různých typů reaktorů mohou jednotlivé procesy probíhat v stabilních zónách (reaktory s pevným ložem), nebo mohou probíhat v celém prostoru reakčního lože současně (fluidní reaktory). Rozložení jednotlivých zón, jejich výška a doba zdržení plynu v jednotlivých zónách jsou závislé na typu a konstrukci reaktoru a v menší míře na podmínkách jeho provozu.

- **Zóna sušení** – palivo je sušeno při teplotách pod 200 [°C], dochází k odpaření fyzicky vázané vody a ohřátí paliva, uvolňují se adsorbované plyny. Po překročení teploty 200 [°C] nastává pyrolýza.
- **Zóna pyrolýzy (odplynění)** – pyrolýza je velice rychlý, mírně endotermní proces probíhající při teplotách 300 až 500 [°C], během kterého vzniká pevný uhlíkatý zbytek podobný koksu a uvolňuje se prchavá hořlavina, která je hlavním zdrojem plynných a kapalných složek plynu.
- **Zóna oxidace** – probíhá zde spalování plynu a uhlíkatého zbytku při teplotách nad 600 [°C]. Spalovací exotermní reakce v této zóně dodávají potřebné teplo pro endotermní reakce zplyňovacího procesu.

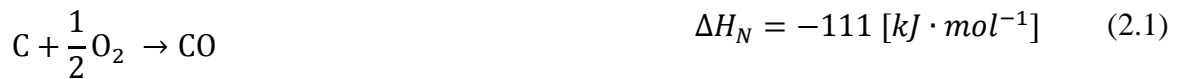
- **Zóna redukce** – probíhá zde zplyňování zbytku po pyrolýze, jedná se o endotermní pomalou reakci s H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub> od 500 [°C]. Při teplotách nad 800 [°C] má dostatečnou rychlost a významně ovlivňuje obsah CO a H<sub>2</sub> v plynu. [11]

### 2.3.2 Reakce

Procesní reakce při vzniku energoplynu zplyňováním v generátoru plynu popisují následující chemické rovnice:

#### Oxidace:

Částečná oxidace pevného uhlíku:



Úplná oxidace pevného uhlíku:



Oxidace vodíku:



Oxidace metanu:



Oxidace oxidu uhelnatého:



#### Redukce:

Boudouardova reakce:



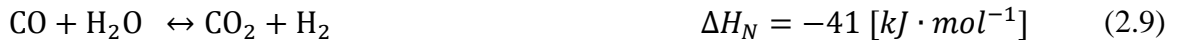
Heterogenní reakce vzniku vodního plynu:



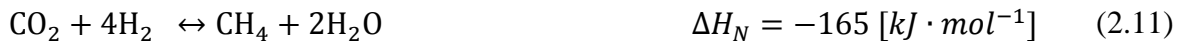
Heterogenní vznik metanu:



Homogenní reakce vodního plynu:



Homogenní vznik metanu:



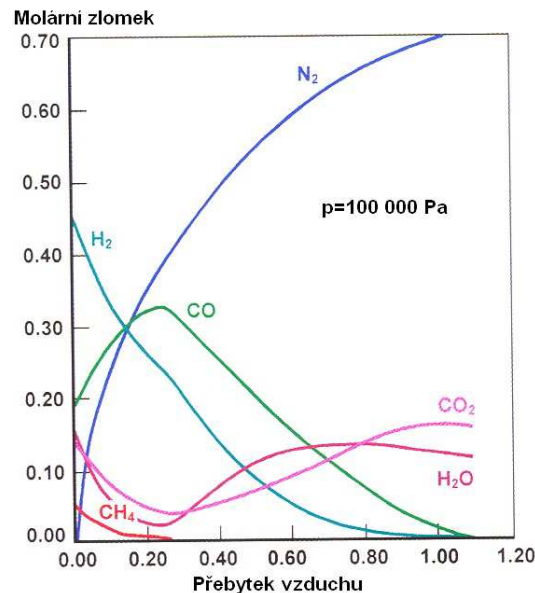
Kde je  $\Delta H_N$  reakční teplo, které soustava vydá (exotermní reakce), nebo které soustava přijme (endotermní reakce) za normálních podmínek.

### 2.3.3 Vliv množství zplyňovacího média na kvalitu plynu

Energie potřebná pro chod zplyňovacího procesu je zajišťována spálením části produkovaného plynu přímo v reaktoru. Jako nejčastější zplyňovací médium se používá vzduch. Kvalita produkovaného plynu je závislá na zplyňovacím poměru  $\lambda$ . V případě čistě autotermního procesu závisí na hodnotě  $\lambda$  také adiabatická teplota v reaktoru a rozložení energie mezi hlavní produkty zplyňování. Závislost obsahu hlavních složek plynu na hodnotě  $\lambda$  vypočtených na základě termodynamického modelu je uvedena v grafu č. 3. Pro odhad složení plynu z generátoru lze použít výpočet vycházející z předpokladu dosažení chemické rovnováhy, který je však aplikovatelný pouze v případě, má-li plyn na výstupu z generátoru vysokou teplotu  $> 700$  [°C] a je-li zajištěna dostatečná doba zdržení plynu v reaktoru. Rovnovážný princip lze uplatnit pro odhad složení plynu z fluidních, souprůdých a únosových generátorů. U protiproudého reaktoru lze aplikovat rovnovážné výpočty pro odhad složení plynu pouze do hranice redukční oblasti.

Ze závislostí uvedených v grafu č. 3 je patrné, že maximálního obsahu spalitelných složek v plynu je dosaženo při  $\lambda = 0,2$  až  $0,4$ . V tomto rozmezí hodnoty  $\lambda$  lze dosáhnout maximálního podílu energie v plynu. Při těchto hodnotách  $\lambda$  jsou také provozovány autotermní procesy zplyňování biomasy vzduchem. Při nízkých hodnotách ( $0,2 < \lambda$ ) nastává odplyňování biomasy při nižší teplotě a vzniká větší množství uhlíkatého zbytku. Při zplyňování paliva kyslíkem platí pro  $\lambda$  stejné principy jako při zplyňování vzduchem, složení plynu je však odlišné, protože není přítomen dusík zředující produkovaný plyn.

Obsahuje-li biomasa více vody, je nutné použít větší množství zplyňovacího média k jejímu ohřátí, odpaření a dalšímu ohřevu. Plyn získaný z vlhké biomasy obsahuje větší množství páry, dusíku a vodíku. Celková výhřevnost však zpravidla bývá nižší, proto je nutno před zplyňováním obsah vody v biomase snížit (neplatí pro protiproudý generátor). [11]



Graf. č. 3 – Teoretická závislost složení plynu ze zplyňování biomasy vzduchem

## 2.4 Konstrukční řešení zplyňovačů

S vývojem oboru zplyňování bylo v průběhu více než sta let zkonstruováno a testováno mnoho variant generátorů pro zplyňování biomasy. Jejich rozdělení může být provedeno na základě různých hledisek jako jsou:

Dle zplyňovacího média:

- Vzduchové.
- Kyslíkové.
- Parní (kyslíko-parní směs).

Podle zdroje tepla pro zplyňování:

- Autotermní neboli přímý zplyňovač: teplo dodáváno spalováním části biomasy.

- Alotermní neboli nepřímý zplyňovač: teplo je dodáváno nepřímým ohřevem.

Podle tlaku ve zplyňovači:

- Atmosférické.
- Tlakové.

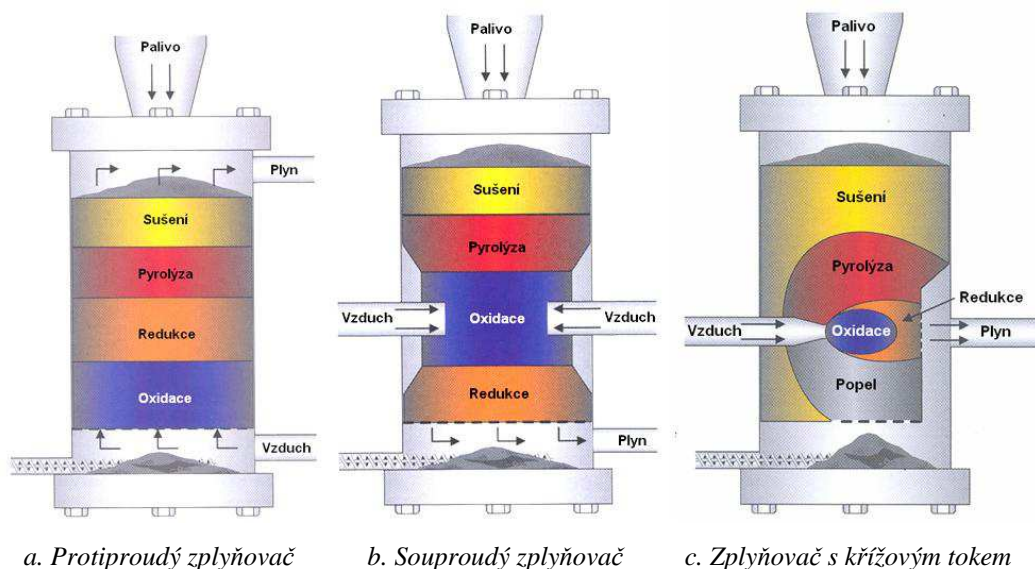
Podle konstrukce reaktoru (nejrozšířenější způsob rozlišení zplyňovacích generátorů):

- S pevným ložem (souprouté a protiproudé).
- S fluidním ložem.
- S unášivým proudem.

### 2.4.1 Zplyňovače s pevným ložem

Reaktory s pevným ložem jsou charakterizovány směrem toku paliva a energoplynu, jejich členění je tím odvozeno následovně:

- Protiproudé.
- Souprouté.
- S křížovým prouděním.



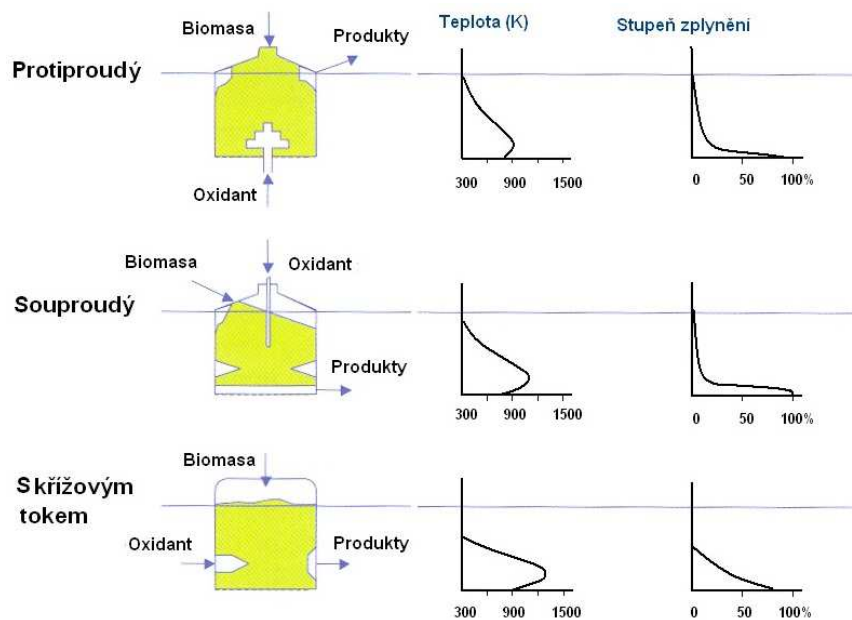
Obr. č. 1 – Zplyňovače s pevným ložem



Protiproudý zplyňovač obr. č. 1a má vnitřní výměnu tepla, která vede k relativně nízké teplotě výstupního plynu a vysoké účinnosti zplyňování. Díky této výměně a sušení v horní části může být zplyňováno i velice vlhké palivo s různou zrnitostí. Hlavní nevýhodou je velké množství dehtů a pyrolýzních produktů, jelikož není pyrolýzní plyn zplyňován. Pokud není energoplyn využit přímým spálením, je nutné jej vyčistit.

Souproudý zplyňovač obr. č. 1b je v podstatě zplyňovač se zdvojenou zónou (dvojím spalováním) s postupným přívodem, což má za následek nízké emise dehtů  $<100 \text{ [mg}\cdot\text{Nm}^{-3}]$ . Mezi nevýhody patří velké množství částic v plynu (díky průchodu oxidační zónou), s tím spojenou vyšší teplotu výstupního plynu a tím nižší účinnost. Dále to jsou poměrně přísné požadavky na vlhkost a zrnitost paliva.

Zplyňovač s křížovým tokem obr. č. 1c je původně navržen pro zplyňování dřevěného uhlí. Vyznačuje se malým rozsahem pracovního výkonu a prakticky nulovým rozkladem dehtů.



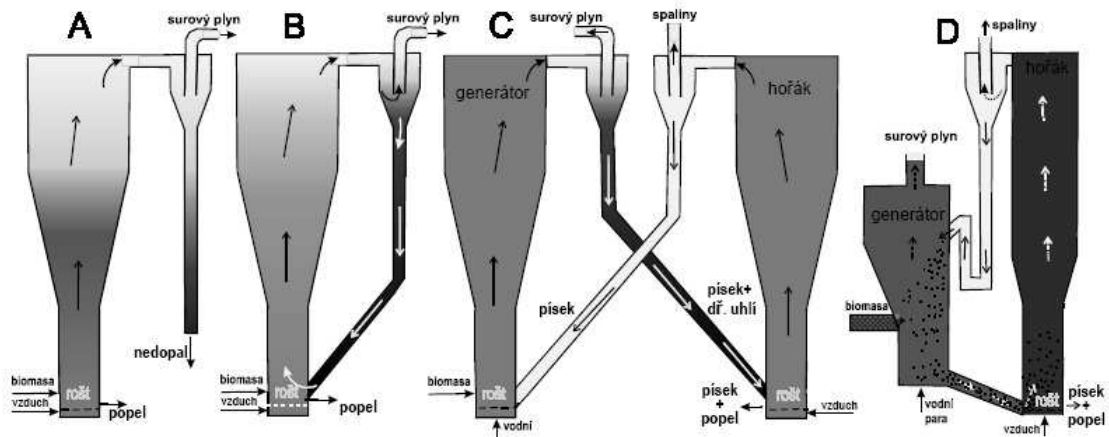
Obr. č. 2 – Charakteristika zplyňovačů s pevným ložem

## 2.4.2 Fluidní zplyňovače

Technologie fluidního zplyňování byla vyvinuta původně pro zplyňování uhlí v roce 1926 firmou Winkler a později byla užita i pro biomasu, aby se předešlo provozním problémům doprovázejícím zplyňovače s pevným ložem, jako jsou:

- Zpracování biomasy s vysokým obsahem popelovin.
- Zpracování biomasy s jemnou zrnitostí - nárůst tlakové ztráty v loži.
- Klenbování a tvorba kanálů.
- Velikostní omezení.
- Nerovnoměrné teploty v loži. [8]

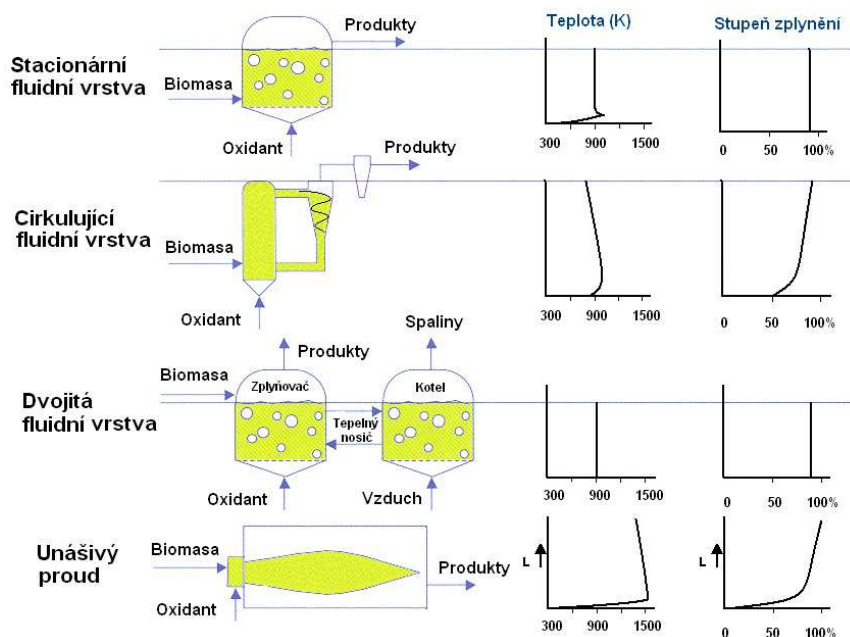
Tyto generátory lze podle intenzity procesu sdílení hmoty a stavu použitého lože rozdělit na reaktory se stacionárním (bublajícím) a cirkulujícím ložem, které pracují jak za normálních podmínek, tak i za zvýšeného tlaku Obr. č. 3a, b. Intenzivní turbulence v reaktoru zajišťuje míchání paliva s materiálem lože a zplyňovacím médiem a umožňuje intenzivnější sdílení hmoty a tepla. Rychlost plynu v cirkulujícím loži je vyšší ( $5 \div 15 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ) než v loži stacionárním ( $2 \div 6 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ) a způsobuje neustálý únos paliva a materiálu fluidního lože. Horký cyklon umístěný za generátorem vrací zachycené částice zpět do reaktoru. Fluidní generátory s cirkulujícím ložem umožňují dokonalejší využití paliva, zvláště při větším zatížení. Průmyslové generátory s fluidním ložem zpravidla pracují při vyšších teplotách  $> 800 \text{ [}^\circ\text{C]}$  a produkují plyn o vysoké teplotě, což způsobuje, že alkalické kovy (Na, K) jsou přítomny v plynné fázi a nejsou v cyklonu zachycovány. V důsledku intenzivního otěru částic paliva a vyšší rychlosti proudění je z generátoru odnášeno poměrně velké množství prachových částic.



a. Stacionární lože, b. Cirkulující lože, C. Zplyňovací a spalovací reaktory s cirkulujícím ložem, D. Duální cirkulační zplyňovací generátor

Obr. č. 3 – Zplyňovače s fluidním ložem

Obsah dehtu je závislý na typu generátoru a zpravidla leží mezi hodnotami souprroudého a protiproudého generátoru. Jeho složení se v důsledku intenzivního sdílení hmoty a vysokých teplot blíží vysokoteplotnímu dehtu. Vhodným nastavením zplyňovacího poměru  $\lambda$  a rozdělením přívodu vzduchu do více oblastí reaktoru lze při dosažení optimálních teplotních podmínek v reaktoru a v kombinaci s použitím vhodného materiálu lože snížit obsah dehtu v plynu na poměrně nízké hodnoty. [11]



Obr. č. 4 – Charakteristika zplyňovačů s fluidním ložem

## 2.5 Nečistoty ve vyrobeném plynu a jejich čištění

Pokud není energoplyn využit přímým spálením, je potřeba jej vyčistit od nežádoucích látek, jako jsou částice nespálených podílů, alkalické sloučeniny, dehty, oxidy dusíku, sloučeniny síry a sloučeniny chloru. Podle konstrukce zplyňovače a typu biomasy použité jako paliva, může být zmiňovaných částic různé množství. Stupeň čištění závisí na technologických požadavcích zařízení, použitých pro výrobu elektrické energie.

### 2.5.1 Částice nespálených podílů

Částice nespálených podílů obsažených v plynu jsou definovány jako tuhé nezreagovaná částice (polokoks) a anorganické látky (popeloviny). Obsah těchto látek závisí na konstrukci reaktoru, druhu biomasy a rychlosti proudění plynu. Palivo v průběhu zplyňovacího procesu zmenšuje svůj objem, těžší částice jsou z lože odváděny popelníkem a lehčí částice jsou unášeny proudem plynu.

Plyn s vysokým obsahem tuhých látek je typický pro fluidní zplyňovače s bublajícím a cirkulujícím ložem, a to kvůli turbulentním podmínkám uvnitř reaktoru. Z tohoto důvodu bývá nejčastěji za reaktor zařazen cyklonový odlučovač pro odloučení částic větších rozměrů. U fluidních reaktorů jsou tyto částice vráceny zpět do lože, aby byla zvýšena účinnost konverze uhlíku a tím i celková účinnost procesu. [12]

Způsoby odstraňování tuhých látek:

- Cyklony (vírové odlučovače).
- Multicyklony.
- Elektrostatické filtry.
- Tkaninové filtry.
- Keramické filtry (horké filtry).
- Usazovací komory.

## 2.5.2 Alkalické sloučeniny

U alkalických sloučenin přítomných v plynu nezáleží jenom na jejich množství, ale také na jejich složení, které ovlivňuje fyzikální vlastnosti popelovin, jako jsou bod měknutí, tání či odpařování. Biopaliva obsahují značné množství alkalických solí, zejména draslíku. Tento prvek je důležitý pro rychlý růst rostlin, zejména u rychlerostoucí energetické biomasy. Vysoký obsah alkálií v biomase může výrazně znepríjemnit následné čištění plynu. Eutektické sodíkové a draslíkové soli v popelovině se odpařují při teplotách okolo 700 [°C]. Odpar z alkálií zůstává v horkém plynu a nemůže být odstraněn běžnou filtrací. Vypařování alkalických solí z popelovin biomasy zahrnuje složitý komplex vzájemných působení těchto alkálií. Během spalování nebo zplyňování se alkálie odpařují a vytváření rozličné sloučeniny, jako například KOH nebo KCl, které okamžitě reagují s chlórem a sírou.

Odstraňování alkálií z plynu závisí na způsobu jeho konečného využití. Pro spalování v plynových kotlích je obsah alkálii přípustný, zatím co u plynových turbín a spalovacích motorů je čištění nutností. Alkalické součeniny se podílejí na korozi materiálů a deaktivaci katalických materiálů.

Problém usazování alkalických solí je obvykle řešen ochlazením plynu a odloučením jemných částic, na nichž soli kondenzují. S dobrými výsledky jsou zkoušeny vysokoteplotní filtry (650 ÷ 725 [°C]) s pevnou vrstvou aktivovaného bauxitu. [12, 13]

## 2.5.3 Dehty

Dehet je jednoznačně nežádoucí složka plynu, která patří do nejsledovanější oblasti při zplyňování biomasy. Pod pojmem dehet rozumíme směs organických látek kondenzujících při ochlazení plynu.

Hlavním zdrojem dehtu v plynu je prchavá hořlavina uvolňovaná při pyrolýze biomasy. Při zplyňování probíhá částečná oxidace primárních produktů pyrolýzy a nastává jejich transformace vlivem vysokých teplot v generátoru. Vlastnosti dehtu (jeho množství, typ a složení) jsou funkcí rychlosti ohřevu, teploty a doby zdržení v generátoru. Při

nízkých teplotách ( $450 \div 500$  [°C]) je dehet reprezentován bezprostředně uvolněnou prchavou hořlavinou, tj. převážně nestabilními kyslíkatými sloučeninami jako jsou např. estery nebo kyseliny. S rostoucí teplotou nebo dobou zdržení probíhá jejich další termické štěpení a transformace. Složky prchavé hořlaviny jsou postupně transformovány na látky stabilnější, jejich celkové množství v plynu pozvolna klesá.

Zjednodušená klasifikace dehtů:

- Primární dehet – fragmenty holocelulosity a ligninu, kyseliny, aldehydy, alkoholy, furany, furfuraly a jiné.
- Sekundární dehet – převážně stabilnější fenoly a olefiny.
- Terciární dehet – benzen, alkylaromáty (ethylbenzen, xylen, toluen, styren) a polyaromatické uhlovodíky (indan, naftalen, methylnaftaleny, acenaftylen, fenantren, fluoranten, pyren).

Primární dehet je přítomen ve značném množství v plynu u protiproudých reaktorů a terciální dehet je zpravidla produkován souproudými a fluidními reaktory. Pochopení procesu tvorby a transformace dehtu v generátoru umožňuje identifikovat problémy spojené s nastavením optimálních podmínek chodu generátoru. Obsahuje-li dehet ze souproudého nebo fluidního generátoru větší množství látek charakteristických pro primární a sekundární dehet, pak provoz generátoru není v optimálním stavu (fluidní reaktor) anebo v reaktoru vznikají zkratové proudy (souproudý reaktor) způsobující průnik primárních produktů do vyráběného plynu.

Pro lepší orientaci a pochopení chování dehtu lze velký počet jednotlivých sloučenin roztřídit do několika skupin. Náchylnost jednotlivých složek dehtu ke kondenzaci a jejich rozpustnost ve vodě jsou hlavními kritérii klasifikace dehtů používané skupinou ECN. Složení dehtu je rozděleno do šesti kategorií uvedených v tab. č.1.

Tab. č. 1 – Klasifikace jednotlivých sloučenin přítomných v dehtu

Skupina	Typ	Hlavní komponenty
1	nedetekovatelné pomocí GC	fragmenty biomasy, pyrolýzní oleje, část gravimetricky stanoveného dehtu
2	heterocyklické sloučeniny – polární sloučeniny obsahující kyslík, dusík	fenoly, kresoly, chinolin, pyridin
3	aromatické uhlovodíky (jednokruhové)	toluen, xylen, etylbenzen, styren
4	lehké polyaromatické uhlovodíky (2 – 3 kruhové PAH)	inden, naftalen, methylnaftaleny, acenaftylen, bifenylnaftalen, acenaftylen, fluoren, fenantren, antracen
5	těžké polyaromatické uhlovodíky ( $\geq 4$ kruhové PAH)	fluoranten, pyren, chrysen, benzoantraceny, benzopyreny, perylen, indenopyren, benzoperylen, koronen
6	sloučeniny neidentifikované pomocí GC	neznámé

Látky v jednotlivých skupinách vykazují podobné fyzikálně-chemické vlastnosti. Daná klasifikace je vhodná pro dehet sekundární a terciární. [11,14]

Omezení obsahu dehtu v plynu je možno řešit primárně v reaktoru, nebo posléze pomocí následujících postupů:

- Termický rozklad.
- Katalitický rozklad.
- Sorpční metody.
- Mokrý čištění (vypírka).

#### 2.5.4 Dusíkaté sloučeniny

Hlavním dusíkatým kontaminantem surového plynu ze zplyňování biomasy je amoniak ( $\text{NH}_3$ ). Amoniak se tvoří zejména z proteinu a dalších dusíkatých sloučenin v biomase. Mezi paliva s vysokým obsahem proteinů patří zejména živočišné zbytky nebo např. vojtěška. Produkce amoniaku je vysoká zejména při vysokých tlacích a při pyrolýze, díky silně redukčnímu prostředí. Přítomnost amoniaku je nežádoucí zejména z důvodu tvorby emisí  $\text{NO}_x$  při následném spalování energoplynu. Proto je odstraňování amoniaku

nutné tam, kde jsou přísné limity emisí  $\text{NO}_x$ . V některých zplyňovačích vzniká přímo  $\text{NO}_x$  reakcí dusíku, nebo molekul obsahujících dusík s kyslíkem za vysokých teplot. Tyto koncentrace jsou zanedbatelné, protože nízké teploty ve zplyňovačích limitují tvorbu  $\text{NO}_x$  sloučenin. Větší problém představuje tvorba  $\text{NO}_x$  při spalování energoplynu v kogeneračních jednotkách. Mezi jednu z výhod zplyňování patří fakt, že spalování plynu je lépe říditelný proces než spalování pevného paliva. Také z tohoto důvodu, zplyňování představuje ekologicky přijatelnější energetickou technologii než přímé spalování pevné biomasy. [12]

### 2.5.5 Sloučeniny síry

Většina biopaliv obsahuje nízké procento síry. Obsah síry v dřevní hmotě se většinou pohybuje pod hranicí 0,1 %<sub>hm</sub>, u travin a stébelnin může dosahovat hodnoty až 0,4 %<sub>hm</sub>, u tříděného odpadu překročuje hranici 1 %<sub>hm</sub>. Síra přítomná v palivu přechází při zplyňování většinou na sulfan  $\text{H}_2\text{S}$  nebo oxidy síry  $\text{SO}_x$ , dle podmínek v reaktoru. U většiny zařízení, která využívají jako palivo energoplyn produkovaný zplyňováním biomasy není třeba sloučeniny síry odstraňovat.

Potenciální problém s výskytem síry i při nízkých koncentracích hrozí při použití určitých typů katalyzátorů (např. kovové katalizátory). Síra má rovněž spolu s chlorem, fluorem a alkalickými solemi korozivní účinek na ocelové konstrukční materiály. K odstranění sloučenin síry z plynu jsou dostupná v praxi dobře odzkoušená zařízení mokré vypírky, nebo reakce s vhodným sorbentem. [12,15]

### 2.5.6 Sloučeniny chloru

Chlor je v biomase obsažen v poměrně nízkých koncentracích. V plynu se vyskytuje nejčastěji ve formě  $\text{HCl}$ , avšak mimo vodíku reaguje s celou řadou jiných prvků a sloučenin. Chlor může být příčinou tvorby perzistentních organických látek, a s tím je spojená problematika koroze konstrukčních materiálů a omezení reaktivity některých



---

katalyzátorů. Některé sloučeniny chloru, zejména HCl, je možno odstranit mokrou vypírkou.

### 3. Výchozí podmínky

Cílem tohoto projektu je postavit na "zelené louce" technologii pro zpracování BRO a BRKO procesem suché fermentace. Dále energeticky zhodnotit vzniklý fermentační digestát fluidním zplyňováním.

Tato práce se bude zabývat návrhem *Technologie sušení a úpravy paliva*, *Technologie zplyňování a Technologie kogenerované výroby elektrické energie* od vstupu vlhkého paliva z BPS, po energetický výstup ve formě vyrobené elektrické energie a tepla.

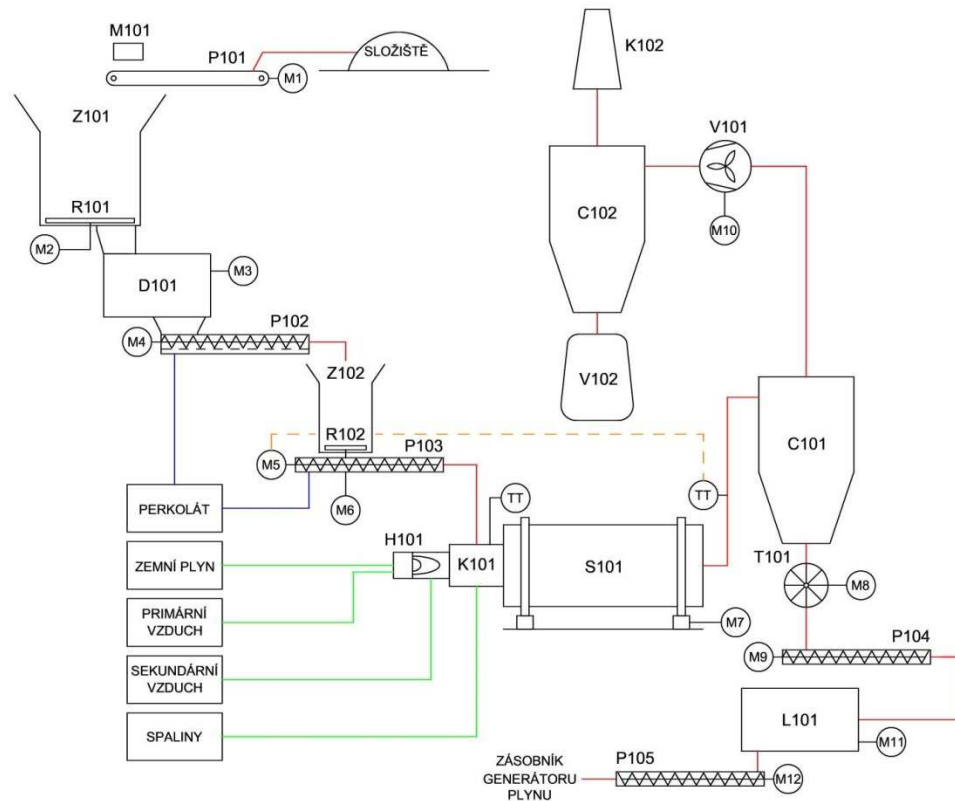
## 4. Návrh řešení

### 4.1 Návrh technologie sušení a úpravy paliva

Kvalita paliva při zplyňování je jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje stabilitu celého procesu zplyňování a následně také kvalitu vyrobeného plynu. Zplyňovací generátor, schopný zpracovat surovinu jakéhokoliv typu neexistuje, a proto je nutno biomasu před jejím zplyněním vhodně připravit. Již při návrhu zařízení je třeba znát základní údaje charakterizující palivo, aby bylo možno vybrat optimální typ zplyňovací technologie. [7]

Vzhledem k tomu, že fermentační digestát ze suché fermentace v BPS má vlhkost okolo 70 % a různou zrnitost, je potřeba surovinu mechanicky upravit a následně odvodnit.

Na obrázku č. 5 je znázorněn návrh technologie sušení a úpravy paliva:



Obr. č. 5 – Technologie sušení a úpravy paliva : P101 – Vynášecí pásový dopravník, M101 – Magnetická separace, Z101 – Zásobník, R101 – Rozrušovač, D101 – Drič, P102 – Šnekový lis, Z102 – Zásobník, R102 – Rozrušovač, P103 – Dávkovací dopravník, H101 – Hořák, K101 – Uklidňovací komora, S101 – Rotační bubnová sušárna, C101 – Cyklon, V101 – Ventilátor, C102 – Cyklon uklidňovací, V102 – Vak, K102 – Komín, T101 – Turniket, P104 – Šnekový dopravník, L101 – Peletovací lis, P105 – Šnekový dopravník, M – Motor, TT - Termočlánek.

Ze složiště je digestát vynášen pásovým dopravníkem do zásobníku, během čehož dojde k odloučení železných příměsí. Následně je nadrcen, odvodněn a putuje do dávkovacího zásobníku. Z něho je šnekovým dopravníkem digestát dopravován do rotační bubnové sušárny (dále jen sušárna). Regulace tohoto dopravníku vyhodnocuje výstupní teplotu ze sušárny, přičemž dávkování je závislé na této teplotě.

Digestát je sušen v proudu vzduchu a spalin na vlhkost  $15 \div 25$  %, v důsledku otáčení sušárny je neustále promícháván. Promíchávání digestátu v sušárně umožňuje

dosáhnout jeho rovnoměrného prosušení za relativně krátkou dobu. Spaliny se vzduchem vstupují do sušárny z ukladňovací komory, jejíž součástí je plynový hořák s modulačním řízením výkonu. Pro vlastní sušení digestátu lze využít jako zdroje tepla spaliny vznikající v dopalovací komoře (viz. obr. č. 9), plynový hořák sušárny, nebo jejich kombinaci. Teplota spalin na vstupu do sušárny, teplota spalin na výstupu ze sušárny, množství spalin procházející sušárnou a rozdíl vlhkostí digestátu na vstupu a výstupu ze sušárny jsou hlavní parametry, které ovlivňují množství usušeného digestátu v sušárně.

Poté je digestát unášen proudem spalin do cyklonu, kde se oddělí pevná frakce od spalin na základě odstředivé a gravitační síly. Z cyklonu je vynášen dávkovacím turniketem na šnekový dopravník, který dopravuje sušený digestát do peletovacího lisu. Zde vzniknou peletky s rozměry  $\varnothing 30 - 30$  [mm], které jsou následně šnekovým dopravníkem dopravovány do technologie zplyňování.

Spaliny jsou z cyklonu odsávány ventilátorem do ukladňovacího cyklonu, ve kterém se oddělí prachové částice od spalin a zachytí se ve vaku. Spaliny jsou následně vypouštěny komínem do okolní atmosféry.

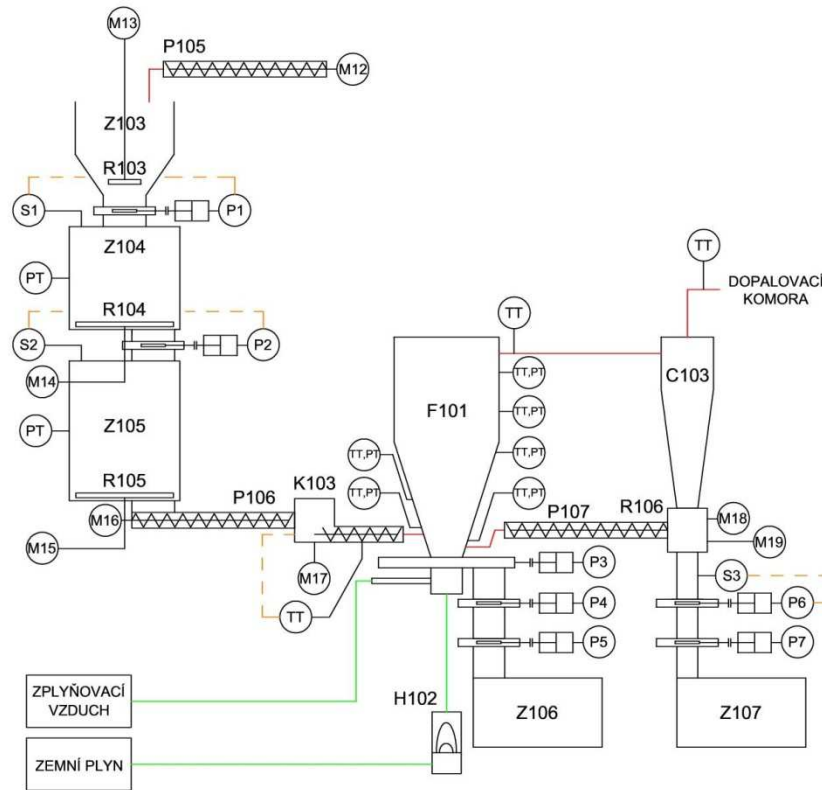
Požadované vlastnosti paliva, pro různé druhy zplyňovačů znázorňuje tab. č. 2:

Tab. č. 2 – Požadované vlastnosti paliva u jednotlivých zplyňovačů

Typ zplyňovače		Souproudý	Protiproudý	Fluidní	Unášivý
Rozměr paliva	[mm]	10 ÷ 100	5 ÷ 100	0 ÷ 30	< 1
Vlhkost paliva	[% <sub>hm.</sub> ]	< 20	< 50	< 40	< 15
Obsah popelovin	[% <sub>hm.</sub> ]	< 5	< 15	< 45	< 40
Zrnitost paliva	[-]	stejnorodá	téměř stejnorodá	stejnorodá	stejnorodá
Sypná hmotnost	[kg·m <sup>-3</sup> ]	> 500	> 400	> 100	> 400
Teplota tavení popelovin	[°C]	> 1250	> 1000	> 1000	> 1250

## 4.2 Návrh technologie zplyňování

Klíčovou částí celé technologie energetického využití fermentačního digestátu je technologie zplyňování. Její návrh je znázorněn na obr. č. 6:



Obr. č. 6 – Technologie zplyňování : P105 - Šnekový dopravník z technologie sušení a úpravy paliva, Z103 - Mezizásobník, R103 - Rozrušovač, Z104 - Zásobník, R104 - Rozrušovač, Z105 - Zásobník, R105 - Rozrušovač, P106 - Šnekový dopravník, K103 - Ochrana proti zpětnému prohoření, F101 - Generátor plynu, H102 - Hořák, Z106 - Zásobník popela, C103 - Cyklon, R106 - Vibrační síto, P107 - Šnekový dopravník, Z107 - Zásobník popela, P - Pneumatický pohon, M – Motor, PP - Manometr, TT - Termočlánek, S - Snímač hladiny.

Vysušený fermentační digestát v podobě peletek z technologie sušení a úpravy paliva je dopravován šnekovým dopravníkem do mezizásobníku, který slouží k pokrytí nerovnoměrné výroby a spotřeby paliva. Poté je palivo vyhrnováno do přetlakového dvojjásobníku. Z něho je šnekovým dopravníkem s ochranou proti zpětnému prohoření dávkováno do generátoru plynu (dále jen reaktor). Pro vlastní najetí reaktoru slouží hořák, který vyhřeje vyzdívku na provozní teplotu. Na spodní části reaktoru je posuvný rošt, který

---

vynáší popel do zásobníku popela a hrdlo zplyňovacího vzduchu. Průtok vzduchu udržuje fluidní vrstvu ve vznosu. Ve vrchní části reaktoru vystupuje energoplyn společně s unášenými částicemi nespálených podílů, které se nazývají polokoks. Polokoks je z energoplynu odstraňován v cyklonu pomocí odstředivé a gravitační síly. Odloučený polokoks je odváděn ze spodní části cyklonu na vybrační síto. Zde je tříděn a buď propadává do zásobníku popela, nebo putuje nazpátek do reaktoru. Energoplyn zbavený polokoksu vystupuje vrchem cyklonu do dopalovací komory v technologii kogenerace.

### 4.3 Návrh generátoru plynu

Pro návrh generátoru plynu je třeba znát, složení paliva, zplyňovací médium a složení vzniklého energoplynu. Z BPS byl odebrán vzorek, který byl analyzován (viz. rozborů níže).

#### 4.3.1 Složení paliva [d]

Prvkové složení paliva bylo zjištěno elementární analýzou. Vzorky fermentačního digestátu byly spáleny v kyslíkové atmosféře a jednotlivé prvky byly oxidovány. K detekci byly použity nedisperzní infračervené a tepelně-vodivostní cely.

Obsah popela byl stanoven gravimetricky. Po spálení vzorku při 550 [°C], se žíhal do konstantní hmotnosti. V případě nedopalu byl popel žíhán při teplotě 815 [°C] opět do konstantní hmotnosti.

Spalné teplo bylo naměřeno spálením vzorku v kalorimetru. Výhřevnost bude stanovena výpočtem.

Tab. č. 3 – Prvkové složení paliva, spálené teplo

Prvkové složení paliva, spálené teplo						
C <sup>d</sup>	H <sup>d</sup>	N <sup>d</sup>	O <sup>d</sup>	S <sup>d</sup>	A <sup>d</sup>	Q <sub>s</sub> <sup>d</sup>
[% <sub>hm.</sub> ]	[% <sub>hm.</sub> ]	[% <sub>hm.</sub> ]	[% <sub>hm.</sub> ]	[% <sub>hm.</sub> ]	[% <sub>hm.</sub> ]	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]
30,44	3,45	2,35	18,02	0,35	45,39	11,39

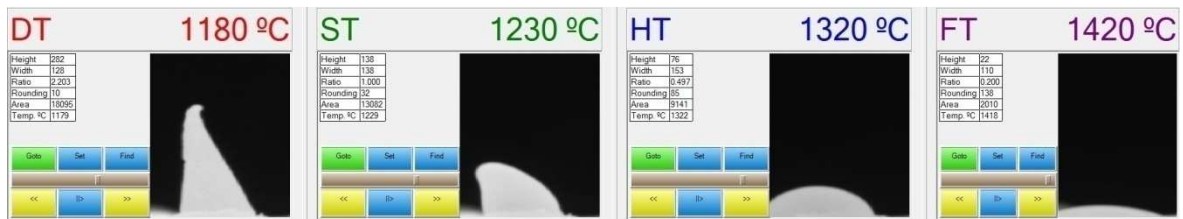
Výhřevnost sušiny [d]:

$$Q_i^d = Q_s^d - 2,453 \cdot 8,94 \cdot \frac{H^d}{100} = \quad (4.1)$$

$$= 11,39 - 2,453 \cdot 8,94 \cdot \frac{3,45}{100} = 10,63 [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Kde hodnota 8,94 je koeficient pro přepočítání vodíku na vodu a 2,453 je koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 20°C.

Tavitelnost popela byla stanovena teplotní deformací jehlanových vzorků v inertní atmosféře.



Obr. č. 7 – Tavitelnost popela

### 4.3.2 Složení plynu[g]

Prvkové složení suchého plynu, bylo určeno ze zplynění vzorku fermentačního digestátu. Naměřené hodnoty při experimentu jsou zaznamenány v následující tabulce. Výpočty budou provedeny s následujícím složením plynu:

Tab. č. 4 – Prvkové složení suchého energo plynu

Prvkové složení suchého plynu						
CO <sup>g</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>g</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>g</sup>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> <sup>g</sup>	H <sub>2</sub> <sup>g</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>g</sup>	N <sub>2</sub> <sup>g</sup>
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
8,53	16,04	6,31	0,13	7,16	0	61,83

### 4.3.3 Palivová bilance [r]

Naměřená vlhkost paliva  $w^r = 23,7$  [%]

**Výpočet složení vlhkého paliva [r]:**

$$C^r = \frac{C^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{30,44}{100} \cdot (100 - 23,7) = 23,23 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.2)$$

$$H^r = \frac{H^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{3,45}{100} \cdot (100 - 23,7) = 2,63 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.3)$$

$$N^r = \frac{N^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{2,35}{100} \cdot (100 - 23,7) = 1,79 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.4)$$

$$O^r = \frac{O^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{18,02}{100} \cdot (100 - 23,7) = 13,75 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.5)$$

$$S^r = \frac{S^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{0,35}{100} \cdot (100 - 23,7) = 0,27 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.6)$$

$$A^r = \frac{A^d}{100} \cdot (100 - w^r) = \frac{45,39}{100} \cdot (100 - 23,7) = 34,63 \text{ [%}_{hm.}] \quad (4.7)$$

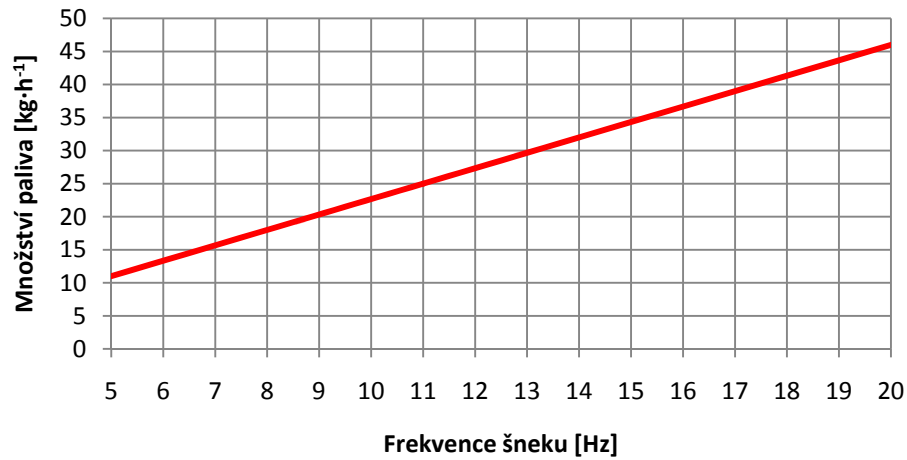
**Kontrola složení:**

$$\Sigma X^r = C^r + H^r + N^r + O^r + S^r + A^r + w^r = 100 \text{ [%]} \quad (4.8)$$

**Hmotnostní tok paliva:**

Naměřená hodnota při experimentu byla  $F_{pal} = 13,289$  [Hz]. Z grafu odečteme poměr množství paliva v závislosti na frekvenci pro výpočet hmotnostního toku.

## Podávací schopnost šneku



Graf č. 4 – Podávací schopnost šneku

$$\dot{m}^r = F_{pal} \cdot \frac{25}{11} = 13,289 \cdot \frac{25}{11} = 30,2 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (4.9)$$

## 4.3.4 Plynová bilance [g]

Objemové zlomky složek ve vyrobeném plynu:

$$y_{CO^g} = \frac{CO^g}{100} = \frac{8,53}{100} = 0,0853 \quad (4.10)$$

$$y_{CO_2^g} = \frac{CO_2^g}{100} = \frac{16,04}{100} = 0,1604 \quad (4.11)$$

$$y_{CH_4^g} = \frac{CH_4^g}{100} = \frac{6,31}{100} = 0,0631 \quad (4.12)$$

$$y_{C_xH_y^g} = \frac{C_xH_y^g}{100} = \frac{0,13}{100} = 0,0013 \quad (4.13)$$

$$y_{H_2^g} = \frac{H_2^g}{100} = \frac{7,16}{100} = 0,0716 \quad (4.14)$$

$$y_{N_2^g} = \frac{N_2^g}{100} = \frac{61,86}{100} = 0,6183 \quad (4.15)$$



**Relativní molekulová hmotnost:**

$$M^g = \frac{CO^g \cdot 28 + CO_2^g \cdot 44 + CH_4^g \cdot 16 + C_xH_y^g \cdot 28 + H_2^g \cdot 2 + N_2^g \cdot 28}{100} = \quad (4.16)$$

$$= \frac{8,53 \cdot 28 + 16,04 \cdot 44 + 6,31 \cdot 16 + 0,0013 \cdot 28 + ,0716 \cdot 2 + 0,6183 \cdot 28}{100} =$$

$$= 27,96 [g \cdot mol^{-1}]$$

Kde hodnoty 28; 44; 16; 28; 2; 28 jsou molární hmotnosti CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>.

**Hustota plynu za normálních podmínek:**

$$\rho^g_N = \frac{M^g}{22,414} = \frac{27,96}{22,414} = 1,25 [kg \cdot m^{-3}] \quad (4.17)$$

Kde hodnota 22,414 je konstanta molárního objemu.

**4.3.5 Bilance zplyňovacího vzduchu [a]**

Naměřený objemový tok zplyňovacího vzduchu  $\dot{V}^a = 21,16 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$

**Objemové zlomky složek ve zplyňovacím vzduchu [a]:**

$$yN_2^a = \frac{N_2^a}{100} = \frac{79}{100} = 0,79 \quad (4.18)$$

$$yO_2^a = \frac{O_2^a}{100} = \frac{21}{100} = 0,21 \quad (4.19)$$

**Hmotnostní tok zplyňovacího vzduchu:**

$$\dot{m}^g = \dot{V}^a \cdot 1,29 = 27,3 [kg \cdot h^{-1}] \quad (4.20)$$

Kde hodnota 1,29 je hustota vzduchu.

**4.3.6 Zplyňovací bilance****Měrný objem dusíku v palivu z palivové bilance:**

$$vN^r = \frac{22,414 \cdot \frac{N^r}{28}}{100} = \frac{22,414 \cdot \frac{1,79}{28}}{100} = 0,014 [Nm^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.21)$$

Kde hodnota 22,414 je konstanta molárního objemu a 28 je molární hmotnost N<sub>2</sub>.

**Objemový tok suchého plynu z dusíkové bilance:**

$$\dot{V}^g = \frac{\dot{m}^r \cdot vN^r + \dot{V}^a \cdot yN_2^a}{yN_2^g} = \frac{30,2 \cdot 0,014 + 21,16 \cdot 0,79}{0,6183} = \quad (4.22)$$

$$= 27,72 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$$

**Měrný objem kyslíku v palivu z palivové bilance:**

$$vO^r = \frac{22,414 \cdot \left(\frac{O^r}{32} + \frac{w^r}{2 \cdot 18}\right)}{100} = \frac{22,414 \cdot \left(\frac{13,75}{32} + \frac{23,7}{2 \cdot 18}\right)}{100} = 0,24 [Nm^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.23)$$

Kde hodnoty 32; 18 jsou molární hmotnosti O, H<sub>2</sub>O.

**Objemový tok jednotlivých složek plynů:**

$$\dot{V}CO^g = yCO^g \cdot \dot{V}^g = 0,0853 \cdot 27,72 = 2,36 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.24)$$

$$\dot{V}CO_2^g = yCO_2^g \cdot \dot{V}^g = 0,1604 \cdot 27,72 = 4,45 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.25)$$

$$\dot{V}CH_4^g = yCH_4^g \cdot \dot{V}^g = 0,0631 \cdot 27,72 = 1,75 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.26)$$

$$\dot{V}C_xH_y^g = yC_xH_y^g \cdot \dot{V}^g = 0,0013 \cdot 27,72 = 0,036 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.27)$$

$$\dot{V}H_2^g = yH_2^g \cdot \dot{V}^g = 0,0716 \cdot 27,72 = 1,98 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.28)$$

$$\dot{V}N_2^g = yN_2^g \cdot \dot{V}^g = 0,6183 \cdot 27,72 = 17,14 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.29)$$

$$\dot{V}H_2O^g = \frac{\dot{m}^r \cdot vO^r + \dot{V}^a \cdot yO_2^a - \frac{VCO^g}{2} - VCO_2^g}{0,5} = \quad (4.30)$$

$$= \frac{30,2 \cdot 0,24 + 21,16 \cdot 0,21 - \frac{2,36}{2} - 4,45}{0,5} = 12,12 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$$

**Objemový tok vlhkého plynu:**

$$\dot{V}^{g'} = \dot{V}CO^g + \dot{V}CO_2^g + \dot{V}CH_4^g + \dot{V}C_xH_y^g + \dot{V}H_2^g + \dot{V}N_2^g + \dot{V}H_2O^g = \quad (4.31)$$

$$= 2,36 + 4,45 + 1,75 + 0,036 + 1,98 + 17,14 + 12,12 = 39,84 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$$

**Objemové zlomky složek vlhkého plynu:**

$$yCO^{g'} = \frac{\dot{V}CO^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{2,36}{39,84} = 0,0592 \quad (4.32)$$

$$yCO_2^{g'} = \frac{\dot{V}CO_2^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{4,45}{39,84} = 0,1117 \quad (4.33)$$

$$y_{CH_4}^{g'} = \frac{CH_4^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{1,75}{39,84} = 0,0439 \quad (4.34)$$

$$y_{C_xH_y}^{g'} = \frac{C_xH_y^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{0,036}{39,84} = 0,0009 \quad (4.35)$$

$$y_{H_2}^{g'} = \frac{H_2^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{1,98}{39,84} = 0,0497 \quad (4.36)$$

$$y_{N_2}^{g'} = \frac{N_2^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{17,14}{39,84} = 0,4302 \quad (4.37)$$

$$y_{H_2O}^{g'} = \frac{N_2^g}{\dot{V}^{g'}} = \frac{17,14}{39,84} = 0,4302 \quad (4.38)$$

**Spalné teplo suchého plynu:**

$$Q_s^g = \Sigma Q_s^g \cdot yq^g = 4,57 [MJ \cdot Nm^{-3}] \quad (4.39)$$

**Spalné teplo vlhkého plynu:**

$$Q_s^{g'} = \Sigma Q_s^g \cdot yq^{g'} = 3,19 [MJ \cdot Nm^{-3}] \quad (4.40)$$

**Výkon ze spalného tepla vlhkého plynu:**

$$P_s^{g'} = Q_s^{g'} \cdot \frac{\dot{V}^{g'}}{3600} \cdot 1000 = 3,19 \cdot \frac{39,84}{3600} \cdot 1000 = 35,3 [kW] \quad (4.41)$$

**Výkon ze specifického tepla vlhkého plynu:**

$$P_s^{cp} = cp \cdot \frac{\dot{V}^{g'}}{3600} \cdot t = 1,49 \cdot \frac{39,84}{3600} \cdot 765 = 12,7 [kW] \quad (4.42)$$

*Kde hodnota  $cp$  je měrná tepelná kapacita a  $t$  je zplyňovací teplota.*

**Celkový výkon z vlhkého plynu:**

$$P_C^{g'} = P_s^{g'} + P_s^{cp} = 35,3 + 12,7 = 48 [kW] \quad (4.43)$$

### 4.3.7 Bilanční přepočít na navržené parametry

Reaktor bude navržen na zpracování 400 [kg · h<sup>-1</sup>] paliva, na bilanční hodnoty (viz. výše). Tomu odpovídá výroba  $\dot{V}_G = 1077 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$  vzniklého energoplynu.

**Hmotnostní tok paliva [S]:**

$$\dot{m}_S = \frac{\dot{V}_G \cdot \dot{m}^r}{\dot{V}^{g'}} = \frac{1077 \cdot 30,2}{39,84} = 816,4 [kg \cdot h^{-1}] \quad (4.44)$$

**Objemový tok zplyňovacího vzduchu [A]:**

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}_G \cdot \dot{V}^a}{\dot{V}^{g'}} = \frac{1077 \cdot 21,16}{39,84} = 572 [Nm^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.45)$$

**Spalné teplo vlhkého paliva [R]:**

$$\begin{aligned} Q_S^R &= Q_S^d \cdot \left(1 - \frac{w^r}{100}\right) - 2,453 \cdot \frac{w^r}{100} = \\ &= 11,39 \cdot \left(1 - \frac{23,7}{100}\right) - 2,453 \cdot \frac{23,7}{100} = 8,11 [MJ \cdot kg^{-1}] \end{aligned} \quad (4.46)$$

Kde hodnota 2,453 je koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 20°C.

**Výhřevnost vlhkého paliva [R]:**

$$\begin{aligned} Q_i^R &= Q_i^d \cdot \left(1 - \frac{w^r}{100}\right) - 2,453 \cdot \frac{w^r}{100} = \\ &= 10,63 \cdot \left(1 - \frac{23,7}{100}\right) - 2,453 \cdot \frac{23,7}{100} = 7,53 [MJ \cdot kg^{-1}] \end{aligned} \quad (4.47)$$

Kde hodnota 2,453 je koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 20°C.

**Celkový výkon z vlhkého plynu pro navržené parametry:**

$$P_{C2}^{g'} = \frac{\dot{V}_G \cdot P_C^{g'}}{\dot{V}^{g'}} = \frac{1077 \cdot 48}{39,84} = 1,3 [MW] \quad (4.48)$$

**Termická účinnost zplyňování:**

Je vyjádřena vztahem hmotnostního toku polokoxsu s jeho spalným teplem, ku hmotnostnímu toku paliva s jeho výhřevností. V našem případě je to  $\mu = 0,69$ , z čehož

vychází, že 31 % výhřevnosti paliva není převedeno na plyn.

## 4.4 Výpočet generátoru plynu

### Výpočtové parametry č. 1:

Množství vyprodukovaného energoplynu:	$\dot{V}_G = 1077 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$
Množství zplyňovacího vzduchu:	$\dot{V}_A = 572 [Nm^3 \cdot h^{-1}]$
Teplota na roštu:	$T_{r1} = 600 [^{\circ}C]$
Teplota nad roštem:	$T_{r2} = 800 [^{\circ}C]$
Tlak:	$p = 1.2 [bar(a)]$
Zrnitost paliva:	$\emptyset 30 - 30 [mm]$

Generátor plynu bude navržen se spodní kuželovou částí, která bude přecházet do části válcové. Průměr spodní podstavy kuželové části (v níž bude umístěn rošt, kterým bude přiváděn zplyňovací vzduch a odváděn popel), bude navržen tak, aby byla prahová rychlost fluidizace překročena 4x. Teplota zplyňovacího vzduchu bude 20 [°C], nicméně cirkulace fluidní vrstvy zajistí okamžitý ohřev na teplotu  $T_{r1}$ . Kuželová část se bude rozšiřovat pod úhlem  $\sim 11^{\circ}$  s předpokladem, že na jejím konci bude palivo zplyněno ze 100 %. Do navazující válcové části bude ulétat již odplyněný polokoks. Tato část bude navržena tak, aby úletová rychlost odpovídala velikosti částic  $\sim \emptyset 0.5 [mm]$  a doba zdržení  $\sim 4 [s]$ .

### Objemový tok zplyňovacího vzduchu (aktuální):

$$\dot{V}_{A,A} = \dot{V}_A \cdot \frac{T_{r1}}{T_N \cdot p} = 572 \cdot \frac{600 + 273,15}{273,15 \cdot 1,2} = 1523,7 [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.49)$$

### Objemový tok plynu (aktuální):

$$\dot{V}_{G,A} = \dot{V}_G \cdot \frac{T_{r2}}{T_N \cdot p} = 1077 \cdot \frac{800 + 273,15}{273,15 \cdot 1,2} = 3526,1 [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (4.50)$$

#### 4.4.1 Sféricita nekulové částice

**Objem peletky:**

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} \cdot 0,03 = 21,21 \cdot 10^{-6} [m^3] \quad (4.51)$$

**Ekvivalentní průměr nekulové částice:**

$$d_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 21,21 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,0343 [m^3] \quad (4.52)$$

**Povrch peletky:**

$$A_p = \pi \cdot d \cdot h + \frac{2 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = \pi \cdot 0,03 \cdot 0,03 + \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,03^2}{4} = 4,2412 \cdot 10^{-3} [m^2] \quad (4.53)$$

**Sféricita:**

$$\Psi = \frac{\pi \cdot d_{ekv}^2}{A_p} = \frac{\pi \cdot 0,0343^2}{4,2412 \cdot 10^{-3}} = 0,87 \quad (4.54)$$

#### 4.4.2 Návrh fluidní vrstvy

**Porozita:**

$$\varepsilon = \sqrt[3]{\frac{0,071}{\Psi}} = \sqrt[3]{\frac{0,071}{0,87}} = 0,434 \quad (4.55)$$

**Hustota plynu (aktuální):**

$$\rho_{g_A}^g = \frac{p \cdot T_N}{T_{r2}} \cdot \rho_N^g = \frac{1,2 \cdot 273,15}{800 + 273,15} \cdot 1,25 = 0,3818 [kg \cdot m^{-3}] \quad (4.56)$$

**Výpočtové parametry č. 2:**

Průměr spodní podstavy (rošt):

$$D_1 = 0,35 [m]$$

Výška fluidní vrstvy:

$$H = 1 [m]$$

Dynamická viskozita plynu:

$$\mu = 4,11 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s]$$

Hustota polokoku:

$$\rho^p = 475 [kg \cdot m^3]$$

**Průtočná plocha reaktoru:**

$$A = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} = 0,0962 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.57)$$

**Mimovrstvová rychlost:**

$$u_f = \frac{\dot{V}_{A,A}}{A} = \frac{1523,7}{0,0962} = 4,4 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (4.58)$$

**Archimedovo kritérium:**

$$\begin{aligned} Ar &= \frac{g \cdot d_{ekv}^3 \cdot \rho_A^g \cdot (\rho^p - \rho_A^g)}{\mu^2} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 0,0343^3 \cdot 0,3818 \cdot (475 - 0,3818)}{4,11 \cdot 10^{-5}^2} = 4,25 \cdot 10^7 \end{aligned} \quad (4.59)$$

Kde hodnoty  $\mu$  jsou viskozita plynu,  $\rho$ : hustota (g-plynu, p-polokoxsu)

**Reynoldsovo kritérium pro min. rychlost fluidace nekulové částice:**

$$\begin{aligned} Re_{min} &= -\frac{2}{7} \cdot \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\Psi} + \sqrt{\left(\frac{2}{7} \cdot \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\Psi}\right)^2 + \frac{4}{7} \cdot \varepsilon^3 \cdot \Psi \cdot Ar} = \\ &= -\frac{2}{7} \cdot \frac{150 \cdot (1 - 0,434)}{0,87} + \sqrt{\left(\frac{2}{7} \cdot \frac{150 \cdot (1 - 0,434)}{0,87}\right)^2 + \frac{4}{7} \cdot 0,434^3 \cdot 0,87 \cdot 4,25 \cdot 10^7} = 1,3 \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (4.60)$$

**Min. rychlost fluidace pro nekulové částice:**

$$u_{min} = \frac{Re_{min} \cdot \mu}{d_{ekv} \cdot \rho_A^g} = \frac{1,3 \cdot 10^3 \cdot 4,11 \cdot 10^{-5}}{0,0343 \cdot 0,3818} = 4,08 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (4.61)$$

**Tlaková ztráta fluidní vrstvy:**

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= H \cdot \rho_A^g \cdot u_{min}^2 \cdot \left(\frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\Psi \cdot Re_{min}} + \frac{7}{4}\right) \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\Psi \cdot d_{ekv} \cdot \varepsilon^3} = \\ &= 1 \cdot 0,3818 \cdot 4,08^2 \cdot \left(\frac{150 \cdot (1 - 0,434)}{0,87 \cdot 1,3 \cdot 10^3} + \frac{7}{4}\right) \cdot \frac{1 - 0,434}{0,87 \cdot 0,0343 \cdot 0,434^3} = \\ &= 2,77 \cdot 10^3 \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (4.62)$$

Reynoldsovo kritérium pro max. rychlost fluidace nekulové částice:

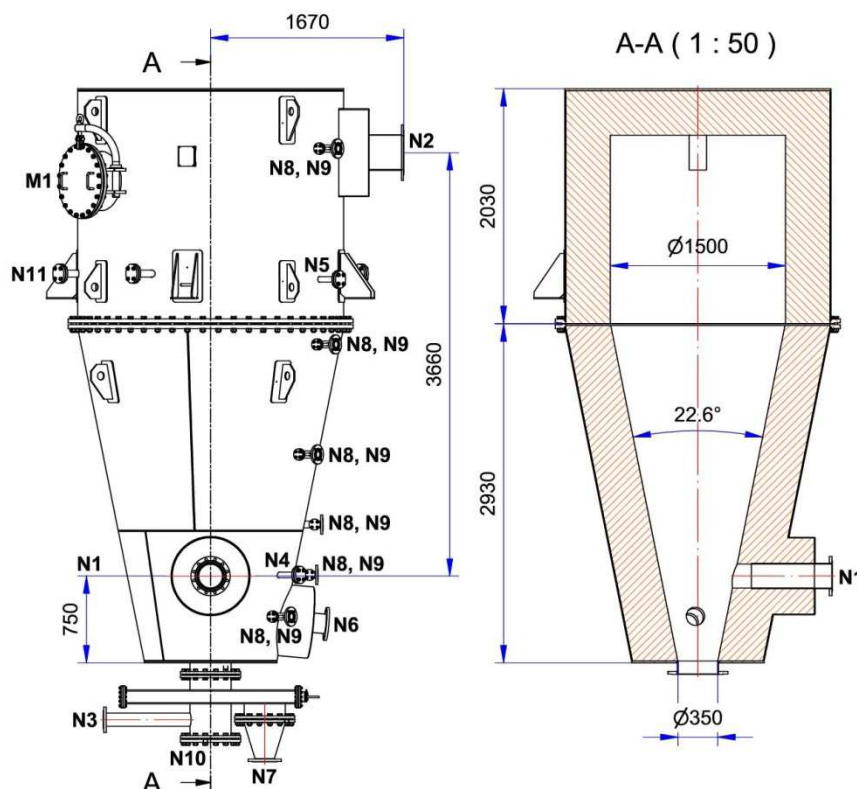
$$Re_{max} = \frac{\sqrt[3]{Ar}}{\left(\frac{10,82}{Ar^{0,549}} + \frac{0,6262}{Ar^{0,137}}\right)^{1,214}} = \frac{\sqrt[3]{4,25 \cdot 10^7}}{\left(\frac{10,82}{4,25 \cdot 10^7^{0,549}} + \frac{0,6262}{4,25 \cdot 10^7^{0,137}}\right)^{1,214}} = 1,13 \cdot 10^4 \quad (4.63)$$

Max. rychlost fluidace pro nekulové částice:

$$u_{max} = \frac{Re_{max} \cdot \mu}{d_{ekv} \cdot \rho^g_A} = \frac{1,13 \cdot 10^4 \cdot 4,11 \cdot 10^{-5}}{0,0343 \cdot 0,3818} = 35,46 [m \cdot s^{-1}] \quad (4.63)$$

## 4.5 Konstrukční návrh generátoru plynu

Na základě provedených výpočtů a zkušeností s fluidním zplyňováním byl navržen a zkonstruován reaktor, který je zobrazen na obr. č. 8:



Obr. č. 8 – Generátor plynu F101



**Reaktor:**

Zplyňovací reaktor je zkonstruován jako vertikální nádoba složená ze tří dílů (válcového a kuželového pláště, roštu), která je uložena na čtyřech patkách do ocelové konstrukce. Vnitřní strana reaktoru je opatřena vyzdívkou, která chrání ocelový plášť před přímým působením vysoké teploty a zároveň slouží pro akumulaci tepla. Do pláště jsou vevařena technologická a technická hrdla, jejichž účel je zpřehledněn v tabulce hrdel (tab. č. 5). Dále jsou na plášti umístěna závěsná oka, která slouží k manipulaci při vyzdívání a při umístění celého reaktoru do ocelové konstrukce. Pro provozní kontroly a servisní práce je do pláště vevařen průlez M1 s rozebíratelnou vyzdívkou. V případě odstranění nápeků se zasunou do hrdel N11 lešeňové trubky, na které se umístí podlážka pro servisního technika. Hrdla N8, N9 slouží k měření aktuální teploty a tlaku. Hrdlem N1 je dávkováno palivo, které je řízeno přes měřenou teplotu v reaktoru. Zplyňovací vzduch vstupuje do reaktoru ve spodní části hrdlem N3. Průtok vzduchu udržuje fluidní vrstvu ve vznosu. Do spodní části fluidní vrstvy vstupuje hrdlem N6 polokos vracený z cyklonu. Vzniklý energoplyn vystupuje společně s unášenými částicemi nespálených podílů (polokoksu) z reaktoru hrdlem N2 do cyklonu.

Tab. č. 5 – Technická a technologická hrdla generátoru plynu F101

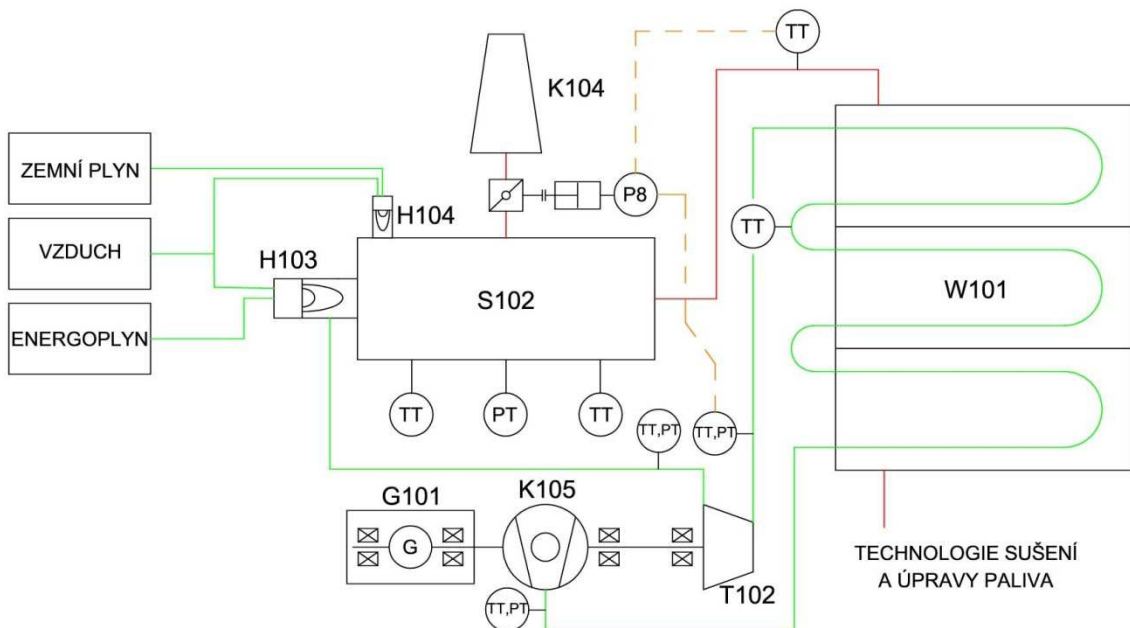
Označení	Ks	DN	PN	Norma	Určení	Poznámka
<b>N1</b>	1	200	16	EN 1092-1/01/D	Vstup paliva	
<b>N2</b>	1	150x300			Výstup plynu	
<b>N3</b>	1	100	16	EN 1092-1/01/B1	Vstup primárního vzduchu	
<b>N4</b>	1	40	16	EN 1092-1/01/D	Vstup sekundárního vzduchu	Protipříruba
<b>N5</b>	1	40	16	EN 1092-1/01/D	Vstup terciálního vzduchu	Protipříruba
<b>N6</b>	1	150	16	EN 1092-1/01/D	Vstup polokosu	
<b>N7</b>	1	150	16	EN 1092-1/01/B1	Výstup popelu	
<b>N8</b>	6	50	16	EN 1092-1/01/D	Měření teploty	
<b>N9</b>	6	15	16	EN 1092-1/01/D	Měření tlaku	
<b>N10</b>	1	350	16	EN 1092-1/01/D	Servisní hrdlo	Protipříruba
<b>N11</b>	4	50	16	EN 1092-1/01/D	Servisní hrdlo	Protipříruba
<b>M1</b>	1	500	16	EN 1092-1/01/B1	Průlez	Protipříruba

**Rošt:**

Vzhledem k vysokému podílu popela v palivu, je funkčnost roštu, a s ním spojený plynulý a bezproblémový odvod popela, klíčový konstrukční prvek. Popelník je spojen s posuvným roštem, který má pracovní zdvih mezi hrdly N7, N10. Po dosažení max. nastaveného zdvihu na pneumatickém pohonu propadne popel do hrdla N7. Odtud je následně přes nožová šoupata odváděn do zásobníku popela.

**4.6 Technologie kogenerované výroby elektrické energie**

Energoplyn vyrobený v technologii zplyňování je v technologii kogenerované výroby přeměněn na elektrickou energii a teplo. Návrh technologie je znázorněn na obr. č. 9:



Obr. č. 9 – Technologie kogenerované výroby elektrické energie: H103 - Hořák, S102 - Dopalovací komora, H104 - Zapalovací hořák, K104 - Komín, W101 - Spalinový výměník, T102 - Mikroturbína, K105 - Kompresor, G101 - Generátor, P - Pneumatický pohon, PP - Manometr, TT - Termočlánek.

Energoplyn je spalován s horkým vzduchem z mikroturbíny a dohořívá v dopalovací komoře. Součástí dopalovací komory je pomocný hořák, který je napojen na zemní plyn. Tento hořák slouží k trvalému zapalování energoplynu uvnitř komory.

Vzniklé spaliny o teplotě 1000 [°C] vstupují do mezitrubkového prostoru spalínového výměníku. Zde dojde k přestupu tepla ze spalin do tlakového vzduchu, který proudí v trubkovém prostoru výměníku. Ochlazené spaliny vystupují z výměníku a dále jsou využity v technologii sušení a úpravy paliva. Tlakový vzduch, který je do výměníku hnán kompresorem, má výstupní teplotu 750 [°C]. Díky teplotnímu rozdílu  $\Delta t$  se zvětší objemový tok tlakového vzduchu, který vstupuje do expanzní turbíny. Expandovaný vzduch se následně využívá v dopalovací komoře. Generátor přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou.

V případě havarijního stavu, který spočívá v překročení vstupní teploty spalin do výměníku, nebo výstupní teploty tlakového vzduchu z výměníku, bude spuštěna ochranná sekvence. Dojde k odstavení turbosoustrojí s okamžitým poklesem tlaku a spaliny jsou odvedeny z dopalovací komory do komínu.

## 5. Ekonomické zhodnocení

Investice na pořízení a zprovoznění technologie energetického využití fermentačního digestátu je financována 25% z vlastních zdrojů a 75% z dotačního fondu EU. Celková investice do technologie sušení a úpravy paliva, technologie zplyňování a technologie kogenerované výroby elektrické energie je rozepsána níže:

### 5.1 Náklady a výnosy

#### Investiční náklady technologické části:

Projektová dokumentace:	2 044 000 Kč
Technologie:	35 728 000 Kč

V ceně technologické části jsou zahrnuty: zásobníky, dopravníky, separátory, rozrušovače, šnekový lis, rotační bubnová sušárna, hořáky, cyklony, komíny, lis, ventilátory, zplyňovač, dopalovací komora, spalinový výměník, mikroturbína, potrubní rozvody, MaR, nátěry, izolace.

Náklady technologické části celkem: 37 772 000 Kč

**Investiční náklady stavební části:**

Projektová dokumentace: 448 000 Kč

Stavební část: 9 156 000 Kč

V ceně stavební části jsou zahrnuty: stavební základy, výstavba haly, nosné ocelové konstrukce.

Náklady stavební části celkem: 9 604 000 Kč

**Investiční náklady celkem: 47 376 000 Kč**

**Provozní náklady:**

Náklady: 1 960 000 Kč·rok<sup>-1</sup>

Provozní náklady se skládají z: nákladů na údržbu, personálních nákladů a provozních nákladů.

**Investiční zdroje:**

Vlastní zdroje (25%): 11 844 000 Kč

Cizí zdroje (75%): 35 532 000 Kč

**Výnosy:**

Vyrobena elektrická energie: 2 307 500 Kč·rok<sup>-1</sup>

Úspora za skládkování odpadu: 2 625 000 Kč·rok<sup>-1</sup>

**Výnosy celkem: 4 932 500 Kč**

## 5.2 Zhodnocení investice

### Odpisový plán technologické části:

Technologická část je zařazena do třetí odpisové skupiny s dobou odepisování 10 let rovnoměrně. Odepisuje se pouze 25 % nákladů, neboť zbylých 75 % bude hrazeno z dotace.

### Odpis pro první rok z:

$$Odpis_{T1} = \frac{5,5}{100} \cdot PC = 519\,365, - K\check{c} \quad (5.1)$$

### Odpis pro druhý až desátý rok:

$$Odpis_{T2-10} = \frac{10,5}{100} \cdot PC = 991\,515, - K\check{c} \quad (5.2)$$

### Odpisový plán stavební části:

Stavební část je zařazena do páté odpisové skupiny s dobou odepisování 30 let rovnoměrně. Odepisuje se pouze 25 % nákladů, neboť zbylých 75 % bude hrazeno z dotace.

### Odpis pro první rok:

$$Odpis_{S1} = \frac{1,4}{100} \cdot PC = 33\,614, - K\check{c} \quad (5.3)$$

### Odpis pro druhý až třicátý rok:

$$Odpis_{S2-30} = \frac{3,4}{100} \cdot PC = 81\,634, - K\check{c} \quad (5.4)$$

### Doba návratnosti investice:

$$DN = \frac{\text{investiční náklady}}{\text{očekávaný roční příjem z investice}} = 2,4 \text{ let} \quad (5.5)$$

Z hlediska doby návratnosti můžeme investici považovat za velmi efektivní, neboť vložené náklady se investorovi vrátí za dobu 2,4 let.

#### Rentabilita investice:

$$R_i = \frac{\text{očekávaný roční příjem z investice}}{\text{investiční náklady}} \cdot 100 = 41,6 \% \quad (5.6)$$

Z hlediska rentability můžeme investici považovat za velmi efektivní, neboť rentabilita 41,6 % je dostatečně vysoká.

#### Celková bilance nákladů a výnosů:

Tab. č. 6 – Celková bilance nákladů a výnosů

Životnost	Cash Flow	Odúročitel	Odúročené CF
[rok]	[Kč]	$[(1+i)^n]$	[Kč]
1	2 512 791	0,98039	2 463 521
2	2 642 924	0,96117	2 540 296
3	2 674 631	0,94232	2 520 365
4	2 706 751	0,92385	2 500 619
5	2 739 288	0,90573	2 481 057
6	2 772 248	0,88797	2 461 677
7	2 805 636	0,87056	2 442 475
8	2 839 459	0,85349	2 423 451
9	2 873 721	0,83676	2 404 601
10	2 908 429	0,82035	2 385 925
11	2 755 200	0,80426	2 215 905
12	2 790 816	0,78849	2 200 539
13	2 826 895	0,77303	2 185 282
14	2 863 443	0,75788	2 170 132
15	2 900 466	0,74301	2 155 089
16	2 937 970	0,72845	2 140 152
17	2 975 962	0,71416	2 125 321
18	3 014 448	0,70016	2 110 594
19	3 053 434	0,68643	2 095 971
20	3 092 927	0,67297	2 081 451

**Čistá současná hodnota:**

$$\check{C}SH = \sum_{n=1}^{20} CF \cdot \frac{1}{(1+i)^n} - IN = 34\,260\,423, - K\check{c} \quad (5.7)$$

Čistá současná hodnota je kladná a zároveň i velmi vysoká, což jen potvrzuje efektivitu investice.

**Vnitřní výnosové procento:**

$$w\% = \sum_{n=1}^{20} CF \cdot \frac{1}{(1+IRR)^n} - IN = 22\% \quad (5.8)$$

Vnitřní výnosové procento je pro investora dostatečně vysoké.

**Závěr ekonomického zhodnocení:**

Ekonomické zhodnocení vychází ze současné situace, avšak do budoucna se dá předpokládat zvyšování výnosů díky legislativním změnám, které podporují tento typ zpracování biomasy. Jedná se o výzkumný pilotní projekt, a proto byla dotace EU poskytnuta v takové výši. I díky tomu ekonomické ukazatele potvrzují vysokou efektivitu investice, kterou tak lze jen doporučit.

## 6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout generátor plynu pro zplyňování fermentačního digestátu s energetickým využitím v kogenerované výrobě.

Touto problematikou se již řadu let zabývá společnost ATEKO a.s., kde působím na pozici konstruktéra. Na základě měření, výpočtů a praktických zkušeností byla týmem procesních inženýrů, konstruktérů a projektantů vyvinuta technologie pro energetické využití fermentačního digestátu. Ze své pozice jsem se podílel na návrzích a konstrukčních řešeních této technologie. V této diplomové práci jsou prezentovány návrhy technologií - *Technologie sušení a úpravy paliva, Technologie zplyňování a Technologie kogenerované výroby elektrické energie* od vstupu vlhkého paliva z BPS, po energetický výstup ve formě vyrobené elektrické energie a tepla.

Návrh generátoru plynu je podložen bilančními a procesními výpočty. Na základě těchto výpočtů jsem v programu Autodesk Inventor zkonstruoval reaktor. Návrh reaktoru je nejen velmi inovativní co se týče samotné fluidace, ale především jsou do návrhu zapracovány předešlé zkušenosti s fluidním zplyňováním se kterým má společnost ATEKO a.s. bohaté a letité zkušenosti.

Technologie fluidního zplyňování má vzhledem k cílům EU (jako jsou snížení emisí, částečná náhrada fosilních paliv, nakládání s odpady, aj.) velmi dobrý potenciál dalšího rozvoje. Biomasa nedokáže plně nahradit fosilní paliva, ale může být vhodným doplňkem v celkové energetické koncepci. S ohledem na vyčerpatelnost fosilních paliv je důležité hledat i jiné alternativy.



## 7. Seznam použitého značení

$Q_s$	Spalné teplo [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$Q_i$	Výhřevnost [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$W$	Vlhkost [%]
$\Sigma X^d$	Prvkové složení sušiny [% <sub>hm.</sub> ]
$Q_i^d$	Spalné teplo sušiny [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$Q_s^d$	Výhřevnost sušiny [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$w^r$	Vlhkost paliva [%]
$\Sigma X^r$	Prvkové složení vlhkého paliva [% <sub>hm.</sub> ]
$F_{pal}$	Frekvence šneku [Hz]
$\dot{m}^r$	Hmotnostní tok vlhkého paliva [ $kg \cdot h^{-1}$ ]
$\Sigma X^g$	Prvkové složení suchého plynu [%]
$\Delta H_N$	Reakční teplo [ $kJ \cdot mol^{-1}$ ]
$\lambda$	Zplyňovací poměr [–]
$y$	Objemový zlomek [–]
$M^g$	Relativní molekulová hmotnost [ $g \cdot mol^{-1}$ ]
$\rho_N^g$	Hustota plynu za normálních podmínek [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\dot{V}^a$	Objemový tok zplyňovacího vzduchu [ $Nm^3 \cdot h^{-1}$ ]
$\dot{m}^g$	Hmotnostní tok zplyňovacího vzduchu [ $kg \cdot h^{-1}$ ]
$v$	Měrný objem [ $Nm^3 \cdot kg^{-1}$ ]
$\dot{V}^g$	Objemový tok suchého plynu [ $Nm^3 \cdot h^{-1}$ ]
$\dot{V}^{g'}$	Objemový tok vlhkého plynu [ $Nm^3 \cdot h^{-1}$ ]
$Q_s^g$	Spalné teplo suchého plynu [ $MJ \cdot Nm^{-3}$ ]
$Q_s^{g'}$	Spalné teplo vlhkého plynu [ $MJ \cdot Nm^{-3}$ ]
$P_S^{g'}$	Výkon ze spalného tepla vlhkého plynu [kW]
$cp$	Měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$P_S^{cp}$	Výkon ze specifického tepla vlhkého plynu [kW]
$P_C^{g'}$	Celkový výkon vlhkého plynu [kW]
$\dot{V}_G$	Objemový tok energoplynu [ $Nm^3 \cdot h^{-1}$ ]

---

$P_{CZ}^{g'}$	Celkový výkon vlhkého plynu pro navržené parametry [MW]
$\dot{m}_S$	Hmotnostní tok paliva [ $kg \cdot h^{-1}$ ]
$Q_S^R$	Spalné teplo vlhkého paliva [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$Q_i^R$	Výhřevnost vlhkého paliva [ $MJ \cdot kg^{-1}$ ]
$T_{r1}$	Teplota na roštu [ $C^\circ$ ]
$T_{r2}$	Teplota nad roštem [ $C^\circ$ ]
$p$	Tlak [ $bar(a)$ ]
$\dot{V}_{A,A}$	Objemový tok zplyňovacího vzduchu aktuální [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]
$\dot{V}_{G,A}$	Objemový tok plynu aktuální [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]
$V$	Objem [ $m^3$ ]
$d_{ekv}$	Ekvivalentní průměr nekulové částice [ $m^3$ ]
$A_p$	Povrch [ $m^2$ ]
$\Psi$	Sféricita [–]
$\varepsilon$	Porozita [–]
$\rho_A^g$	Hustota plynu aktuální [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$D_1$	Průměr spodní podstavy reaktoru [ $m$ ]
$H$	Výška fluidní vrstvy [ $m$ ]
$\mu$	Dynamická viskozita plynu [ $Pa \cdot s$ ]
$\rho^p$	Hustota polokoxsu [ $kg \cdot m^3$ ]
$A$	Průtočná plocha reaktoru [ $m^2$ ]
$u_f$	Mimovrstvová rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$Ar$	Archimedovo krytérium [–]
$Re_{min}$	Reynoldsovo kritérium pro min. rychlost fluidace nekulové částice [–]
$u_{min}$	Min. rychlost fluidace pro nekulové částice [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$\Delta p_Z$	Tlaková ztráta fluidní vrstvy [ $Pa$ ]
$Re_{max}$	Reynoldsovo kritérium pro max. rychlost fluidace nekulové částice [–]
$u_{max}$	Max. rychlost fluidace pro nekulové částice [ $m \cdot s^{-1}$ ]

## 8. Seznam obrázků

- Obr. č. 1 - Zplyňovače s pevným ložem
- Obr. č. 2 - Charakteristika zplyňovačů s pevným ložem
- Obr. č. 3 - Zplyňovače s fluidním ložem
- Obr. č. 4 - Charakteristika zplyňovačů s fluidním ložem
- Obr. č. 5 - Technologie sušení a úpravy paliva
- Obr. č. 6 - Technologie zplyňování
- Obr. č. 7 - Tavitelnost popela
- Obr. č. 8 - Generátor plynu F101
- Obr. č. 9 - Technologie kogenerované výroby elektrické energie

## 9. Seznam grafů

- Graf č. 1 – Předpokládaný vývoj celosvětové produkce energie
- Graf č. 2 - Závislost výhřevnosti paliva na jeho vlhkosti
- Graf č. 3 - Teoretická závislost složení plynu ze zplyňování biomasy vzduchem
- Graf č. 4 - Podávací schopnost šneku

## 10. Seznam tabulek

- Tab. č. 1 - Klasifikace jednotlivých sloučenin přítomných v dehtu
- Tab. č. 2 - Požadované vlastnosti paliva u jednotlivých zplyňovačů
- Tab. č. 3 - Prvkové složení paliva, spálené teplo
- Tab. č. 4 - Prvkové složení suchého energo plynu
- Tab. č. 5 - Technická a technologická hrdla generátoru plynu F101
- Tab. č. 6 – Celková bilance nákladů a výnosů

## 11. Seznam zkratk

EU - Evropská Unie

ČR - Česká republika

BRO - Biologicky rozložitelný odpad

BRKO - Biologicky rozložitelný komunální odpad

OZE - Obnovitelné zdroje energie

SKO - Směsný komunální odpad

TKO - Tuhý komunální odpad

BPS - Bioplynová stanice

BTX - Benzen, toluen, xylen

PCDD - Polychlorované dibenzo-p-dioxiny

PCDF - Polychlorované dibenzofurany

ECN - The Energy research Centre of the Netherlands

GC - Plynový chromatograf

PAH - Polycyklické aromatické uhlovodíky

## 12. Použitá literatura

- [1] – Zákon č. 229/2014 Sb., kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, 2014
- [2] – Zákon 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, 2012
- [3] – HABART J.: Trh s biomasou prochází velkými změnami. Biom.cz [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/trh-s-biomasou-prochazi-velkymi-zmenami> ISSN: 1801-2655.
- [4] – PASTOREK Z., KÁRA J., JEVIČ P.: Biomasa obnovitelný zdroj energie, Praha 2004
- [5] – OCHODEK T., KOLONIČNÝ J., JANÁSEK P., Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy, Ostrava 2006
- [6] – DVOŘÁČEK T., ROSENBERG T., TLUKA P., HABART J., Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO, Ministerstvo životního prostředí, Praha 2009
- [7] – OCHODEK T., NAJSER J., Zplyňování biomasy I., Ostrava 2014, ISBN 978-80-248-3302-6
- [8] – Kolektiv autorů. Handbook Biomass Gasification. Ed BTG biomass technology group, Enschede, 2005, ISBN 90-810068-1-9
- [9] – KUBÍČEK J., Vlastnosti biopaliv ve vztahu k jejich spalování a zplyňování, Seminář energie z biomasy, Brno 2003
- [10] – ALAUDDIN Z.A.B.Z., LAHIJANI P., MOHAMMADI M., MOHAMED A.R.: Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.14, Issue 9, 2010
- [11] – SKOBLJA S., Úprava složení plynu ze zplyňování, Praha 2004.
- [12] – STEVENS D.J., Hot Gas Conditioning: Recent Progress With Larger-Scale Biomass Gasification Systems, Colorado, USA 2001
- [13] – KUBÍČEK J, Vypírání dehtu v kontextu úpravy generátorového plynu pro jeho využití ve spalovacím motoru, Brno 2005
- [14] – KIEL J.H.A. et al., Primary measures to reduce tar formation in fluidized-bed biomass gasifier, Final report SDE project P1999-012, March 2004

- 
- [15] – KLASS D.L.: Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals, Academic Press, San Diego, USA 1998
- [16] – ROUBÍČEK V., BUCHTELE J., Chemie uhlí a jeho využití, Ostrava 1996
- [17] – PILAŘ A., BERÁNEK J., JASANSKÝ J., Chemické inženýrství I-II, Praha 1963
- [18] – SCHREIBEROVÁ L., NEUŽIL L., Fluidizace, Praha VŠCHT
- [19] – CHRZ V., Technologické výpočty procesu zplyňování, Hradec Králové 1999
- [20] – SLOUKA P., Teoretický výpočet zplyňovacího procesu ve fluidním loži, Praha 1983
- [21] – HARTMAN M., SVOBODA K., TRNKA O., BERAN Z., Reaktory s cirkulující fluidní vrstvou, Praha 1999
- [22] – NIST WebBook Chemistry, Nist.gov [online], Dostupné z:  
<http://webbook.nist.gov/chemistry>
- [23] – Air Liquide, Airliquide.com, [online], Dostupné z:  
<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=11>
- [24] – BERVIDOVÁ L., VANČUROVÁ P., Cvičení z ekonomiky podniků I., Praha 2009