



# Agronomická fakulta

3. června 2015, Brno

Připravil: Ing. Petr Trávníček, Ph.D.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ (9)

Technika energetického využívání dřevních odpadů



Mendelova  
univerzita  
v Brně

- Inovace studijních programů AF a ZF MENDELU
- směřující k vytvoření mezioborové integrace
- CZ.1.07/2.2.00/28.0302

## Cíle

- Seznámit studenty s technologiemi termického zpracování dřevních odpadů.

## Klíčová slova

- Dendromasa, spalování, zplyňování, pyrolýza.

## 1. Úvod

Termochemickou konverzí se obecně rozumí rozklad materiálu na bázi uhlíku pomocí vysokých teplot. Je využíváno několik způsobů termochemické konverze:

- spalování
- zplyňování
- pyrolýza

## 1. Úvod

Důvodem využití termochemické konverze biomasy je získání tepelné energie, která se dále využívá pro ohřev teplé vody, vytápění, případně výrobu elektrické energie. Za tímto účelem se nejčastěji využívá dřevního odpadu. Mezi dřevní odpad řadíme:

- štěpka,
- piliny,
- hobliny
- sekané dýhy,
- zbytková kulatina,
- odřezky.

## 1. Úvod

Nezanedbatelným zdrojem odpadní biomasy pro energetické účely je však i zemědělství, jedná se především o tyto produkty:

- obilní sláma
- řepková sláma
- traviny.

## 2. Spalování

Hoření částice pevného paliva se liší od hoření plynných nebo kapalných paliv. Tyto odlišnosti jsou především dány tím, že u pevných paliv musí nejdříve proběhnout ohřev částice, poté odpaření vlhkosti a odplynění, a na závěr musí proběhnout heterogenní reakce mezi kyslíkem a pevným povrchem uhlíku.

- Proces hoření částice pevného paliva se skládá z těchto dějů
- ohřev částice,
- odpaření vlhkosti,
- uvolnění prchavé hořlaviny,
- hoření prchavé hořlaviny,
- hoření uhlíku,

## 2. Spalování

Přičemž hlavní úlohu při hoření pevného paliva (biomasy) má hoření uhlíku. Je to způsobeno tím, že uhlík je primární součástí pevného paliva a v prvkovém složení zaujímá majoritní podíl. Čím je vyšší tento podíl, tím je i vyšší výhřevnost paliva. Proto z tuhých paliv mají největší výhřevnost antracity, kde tento podíl může přesáhnout 90 % hmoty. U dřeva se podíl uhlíku v palivu pohybuje kolem 50 %. Hoření uhlíku je velmi důležité pro celkový proces spalování. Hoření uhlíku totiž zaujímá až 90 % celkové doby, která je zapotřebí pro hoření částice. Pro dokonalé vyhoření uhlíku je velmi důležité vhodné nastavení přívodu vzduchu a vhodná konstrukce topeniště kotle.



## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.1 Obsah prchavé hořlaviny

Oproti ušlechtilým klasickým palivům (uhlí, koks) má biomasa vysoký podíl prchavé hořlaviny. Při spalování na roštu se nejprve prchavá hořlavina z paliva uvolňuje ve formě uhlovodíků (při teplotách 200 až 500 °C) a potom nastává hoření neodplyněného zbytku. Uvolněná prchavá hořlavina částečně vyhořívá v oblasti nad roštem a její zbytek postupuje spolu se spalinami kotlem do pásma nižších teplot.

Palivo	Rašelina	Řepková sláma	Dřevní hmota	Obilní sláma
$V_{daf} (\%_{nm})$	cca 70	80 až 86	80 až 86	až 88

*Obsah prchavé hořlaviny ve vybraných druzích paliv*

## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.2 Obsah a vlastnost popelovin v palivu

Biopaliva se vyznačují nízkým obsahem popelovin. Z tohoto důvodu mají kotle na biomasu méně složitou soustavu na jejich odvod než kotle na paliva klasická, kde tvoří popeloviny až 40 % (lignit). V případě menších zařízení bývá odvod popelovin i diskontinuální.

Složení a vlastnosti popela mohou do značné míry ovlivnit bezporuchový chod a životnost spalovacího zařízení. Pro návrh a provoz kotlů, jsou nejdůležitější charakteristické teploty popelovin a obsah alkalických kovů.

Charakteristické teploty popelovin jsou:

- teplota měknutí  $T_A$  [°C],
- teplota tavení  $T_B$  [°C],
- teplota tečení  $T_C$  [°C].

### 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

#### 3.2 Obsah a vlastnost popelovin v palivu

Dřevní hmota má v porovnání s jinými biopalivy charakteristické teploty poměrně vysoké,  $T_A = 1160 \text{ °C}$ ,  $T_B = 1340 \text{ °C}$ ,  $T_C = 1350 \text{ °C}$ . Naproti tomu teplota měknutí popela  $T_A$  u rašeliny, řepkové slámy, případně obilné slámy je nižší o 300 až 400 °C. Výjimku tvoří šťovík, kde je tato teplota oproti dřevní hmotě vyšší o cca 150 °C. Charakteristické teploty popelovin pro vybraná paliva jsou uvedeny v následující tabulce.

## Technika energetického využívání dřevních odpadů

<b>Palivo</b>	<b>Rašelina</b>	<b>Řepková sláma</b>	<b>Dřevní hmota</b>	<b>Šťovík</b>	<b>Obilní sláma</b>
<b>T<sub>A</sub> [°C]</b>	900	750	1160	1306	830
<b>T<sub>B</sub> [°C]</b>	x	x	1340	>1500	850 – 900
<b>T<sub>C</sub> [°C]</b>	x	x	1350	>1500	850 – 900

*Charakteristické teploty popela*

## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.3 Obsah vody v palivu

Obsah vody v palivu je významnou veličinou jak pro kvalitu samotného spalovacího procesu, tak pro dopravní charakteristiky paliva, především u zařízení používajících šnekových dopravníků. Zvláště jedná-li se o biomasu s jemnou granulometrií bývá vysoká vlhkost příčinou tvorby slepených shluků, které jsou obtížně rozrušitelné, vytváří klenby a brání tak plynulému dávkování paliva. Tento jev je zejména patrný u malých zařízení, kde i lokální – u velkého zařízení nevýznamné – slepence mohou ucpat celý dopravní systém. Při spalování snižuje vysoký obsah vody v palivu jeho výhřevnost, neboť se významná část energie spotřebuje pro její odpaření.

## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.3 Obsah vody v palivu

Vyšší obsah vody také znesnadňuje proces hoření, což se projeví zvýšeným obsahem CO a uhlovodíkových sloučenin ve spalinách. Obsah vody v biomase se pohybuje v širokém rozmezí od surového stavu (dřevo  $W_{rel} = 55 \%_{hm}$ , kůra i  $W_{rel} = 65 \%_{hm}$ ) po stav vysušený (obvykle  $W_{rel} > 10 \%_{hm}$ ).

## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.4 Výhřevnost paliva

Vzhledem k nepatrné závislosti hustoty dřevní substance na druhu dřeva, kterou považujeme za téměř konstantní, se spalné teplo dřeva pohybuje v rozmezí 18 až 19 MJ.kg<sup>-1</sup>. Výjimkou jsou dřeva bohatá na pryskyřice a další hořlavé doprovodné látky. Vlastní výhřevnost je v závislosti na vlhkosti dřeva snižována spotřebovaným výparným teplem na odpaření vody z dřeva. V následující tabulce jsou znázorněné výhřevnosti různých druhů dřev, při různé vlhkosti.

# Technika energetického využívání dřevních odpadů

	<b>Výhřevnost dřeva při dané vlhkosti</b>		
<b>Dřevo</b>	<b>0 %</b>	<b>15 %</b>	<b>60 %</b>
<b>Smrk</b>	17,9	13,4	-
<b>Borovice</b>	18,7	14,5	10,6
<b>Bříza</b>	19,9	15,8	-
<b>Dub</b>	17,0	14,5	-
<b>Buk</b>	17,6	15,4	-
<b>Borka (kůra)</b>	-	19,0	10,5

*Výhřevnost dřeva a kůry v závislosti na druhu a vlhkosti dřeva*



## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.5 Složení paliva

Mezi hlavní elementární prvky paliva se řadí především uhlík, vodík, kyslík a dusík. Přičemž hlavním nositelem energie je uhlík, v menší míře potom vodík. Z následující tabulky je patrné, že oproti klasickým tuhým palivům, jako je například koks či černé uhlí, má dřevo poměrně nízký obsah uhlíku. U dřeva se většinou pohybuje kolem 50 %, kdežto u černého uhlí se tato hodnota pohybuje kolem 90 % a u hnědého uhlí potom v rozmezí 50 – 80 %. Oproti klasickým palivům má však dřevnatá biomasa výhodu v tom, že má nulový či velmi nízký obsah síry.

# Technika energetického využívání dřevních odpadů

<b>Dřevo</b>	<b>Prvky (%)</b>			
	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>
<b>Smrk</b>	50,3 – 51,4	6,1 – 6,3	41,6 – 43,1	0,1 – 0,9
<b>Jedle</b>	50,4 – 51,3	5,9 – 6,0	43,4 – 44,0	0,1 – 0,8
<b>Borovice</b>	49,5 – 49,6	6,4	44,0 – 44,4	0,9
<b>Dub</b>	49,4 – 50,6	6,1 – 6,2	41,8 – 44,5	1,2
<b>Buk</b>	48,5 – 50,9	6,1 – 6,3	42,1 – 45,2	0,12 – 0,9

*Elementární složení dřeva*

## 3. Fyzikálně-chemické vlastnosti dřevních odpadů

### 3.6 Granulometrie

Z geometrického hlediska může mít palivo pocházející z biomasy mnoho forem. Co se týká dřevin, jsou k dispozici většinou ve formě polen, štěpky, briket, pelet, drcených větví, různých odpadních odřezků, případně pilin či hoblin. V případě zemědělských odpadů nebo cíleně pěstovaných energetických bylin to může být například řezanka.

Při konstrukci kotle je nutno uzpůsobit dopravní systém i spalovací komoru daným rozměrům a tvaru paliva.

Z hlediska konstrukce spalovací komory je nutno znát předem rozměry paliva, aby mohla být vhodně navržena soustava přívodu spalovacího vzduchu.

## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

Pro spalování biomasy se převážně využívají kotle roštové. Spalování u roštových ohnišť probíhá jednak ve vrstvě na roštu, jednak v prostoru nad vrstvou paliva. Podíl hoření nad vrstvou paliva je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny. Z tohoto pohledu rozeznáváme dvě základní konstrukční koncepce:

- roštové ohniště s jedním ohniskem hoření
- roštové ohniště s dvěma ohnisky hoření.

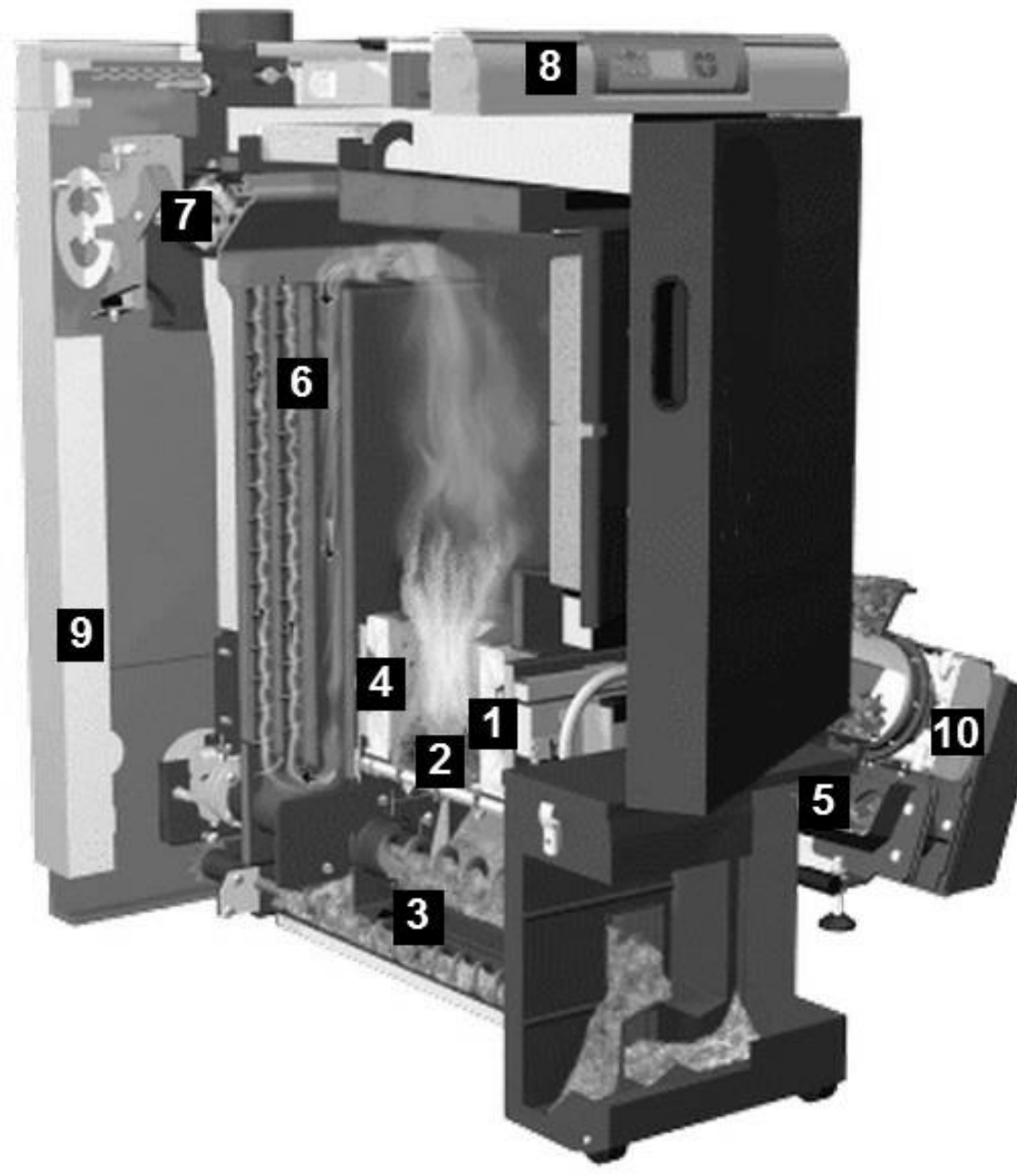
## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

Pro spalování dendromasy se v průmyslovém měřítku využívají i fluidní spalovací zařízení. Nicméně z důvodu vysokých nároků na úpravu paliva nejsou tyto technologie příliš rozšířené a vyplatí se spíše u vyšších výkonů spalovacích zařízení. Pro spalování odpadní biomasy existuje široká škála zařízení o různých výkonech a to od spalovacích zařízení pro domácí použití o výkonech v řádu desítek kilowatt až po velká zařízení o výkonech několika megawattů.

## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

### 4.1 Zařízení menších výkonů

Jedná se o zařízení určená pro vytápění či ohřev teplé vody v rodinných domech. Jejich výkon se pohybuje v řádech několika desítek kilowatt. V této oblasti spíše převažují zdroje spalující konvenční tuhá paliva. Jedná se především o dřevěné pelety, kusové dřevo, polena apod. Na trhu jsou však zařízení, která mimo pelety spalují například i odpadní štěpku, hobliny nebo řezanku. Na následujícím obrázku je uvedena technologie domácího zdroje vytápění pro spalování dřevěných pelet a dřevěné štěpky.



**1** – vysokoteplotní spalovací komora se žáruvzdornou vyzdívkou, **2** – spalovací rošt, **3** – automatický odvod popela pomocí šroubového dopravníku, **4** – primární a sekundární přívod spalovacího vzduchu, **5** – šroubový dopravník pro přívod paliva, **6** – výměník tepla, **7** – ventilátor s regulací rychlosti, **8** – řídicí jednotka pro lamda sondu, **9** – tepelná izolace, **10** – elektrický pohon dopravníků.

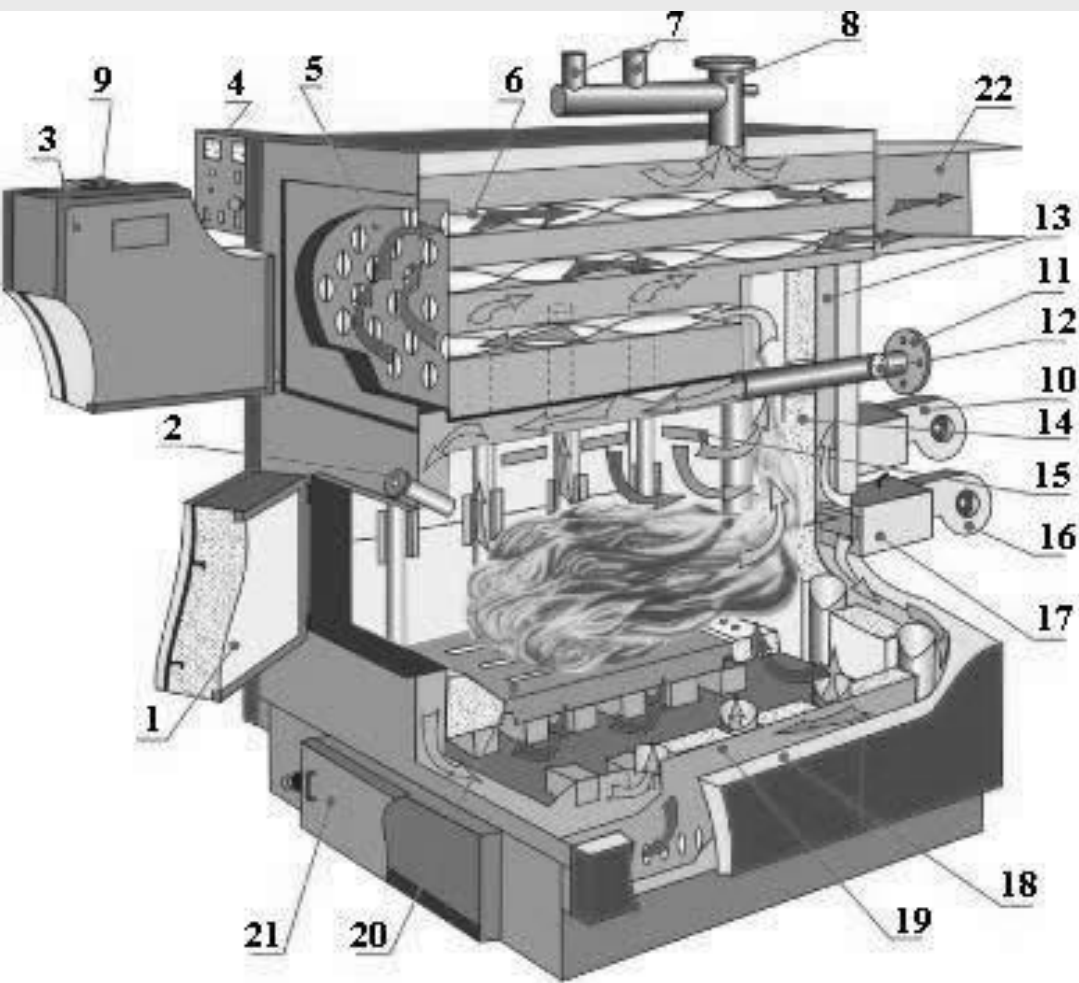
*Spalovací zařízení pro spalování dřevěných pelet a dřevěné štěpky*

## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

### 4.2 Zařízení středních výkonů

Jedná se o zařízení určená pro vytápění či ohřev teplé vody ve větších dílnách, areálech nebo bytových domech. Výkony těchto zařízení se pohybují v řádech několika stovek kilowatt. S výhodou se těchto zařízení může využít například ve stolařských dílnách, kdy jsou spalovány odpady z výroby nábytku jako například hobliny nebo piliny. Na následujícím obrázku je zobrazeno zařízení na spalování dřevěných odpadů jako jsou piliny, hobliny nebo štěpka.





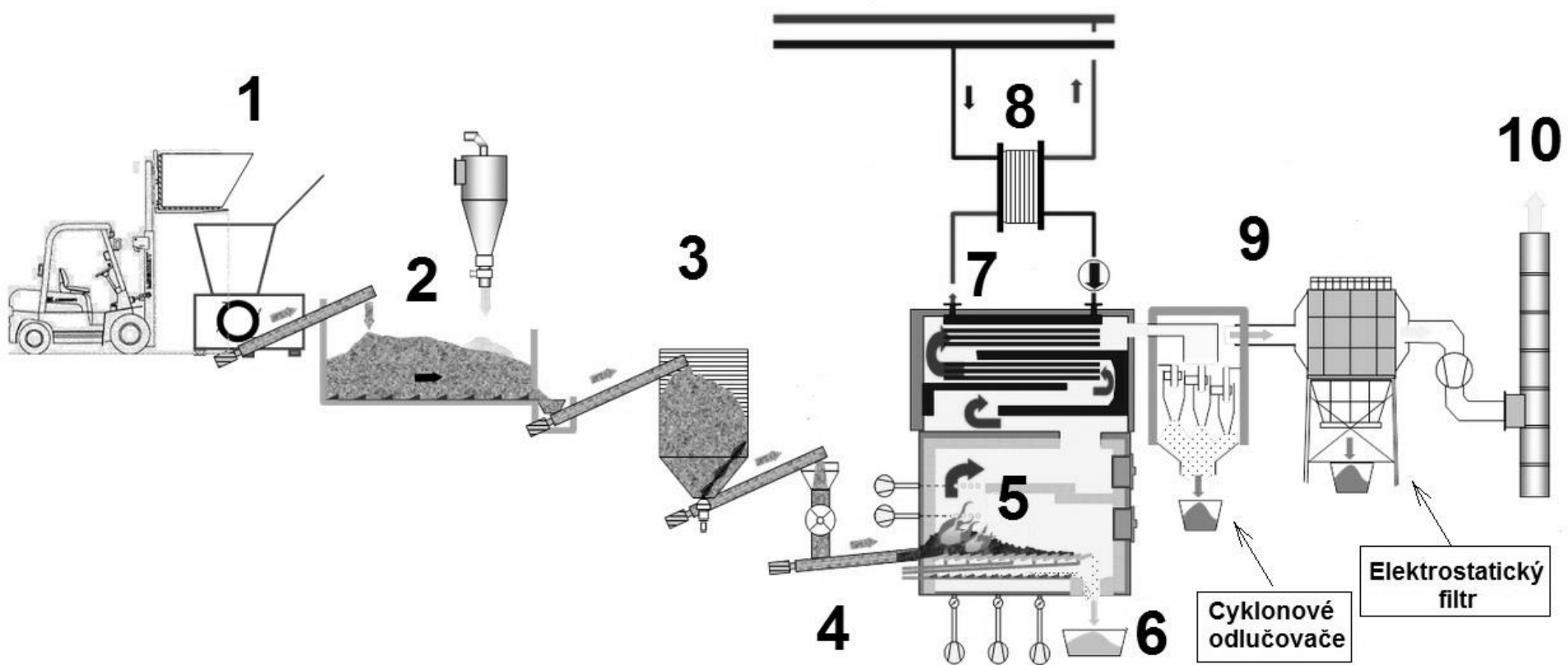
**1** – vstupní dvířka do spalovací komory, **2** – monitorovací otvor, **3** – přístupová dvířka k tepelnému výměníku, **4** – kontrolní panel, **5** – potrubí tepelného výměníku, **6** – odnímatelný turbulátor, **7** – potrubí pro přetlakový pojistný ventil, **8** – potrubí pro horkou vodu, **9** – bezpečnostní ventil, **10** – ventilátor pro přívod sekundárního vzduchu, **11** – potrubí pro přívod vratné vody, **12** – termostat, **13** – komora pro sekundární hoření, **14** – šamotová vyzdívka, **15** – Sekundární přívod vzduchu, **16** – Primární přívod vzduchu, **17** – nastavovací prvek pro přívod vzduchu, **18** – tepelná izolace, **19** – spalovací komora, **20** – spalovací pevný rošt, **21** – přístupová dvířka k popelníku.

*Spalovací zařízení středního výkonu pro spalování dřevěných pilin a hoblin*

## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

### 4.3 Zařízení velkých výkonů

Jsou to zařízení využívaná především v teplárenství. Jejich výkony dosahují hodnot až několika megawatt. Jedná se o složité technologické celky. Technologické řazení jednotlivých zařízení bývá u různých výrobců odlišné. Závisí především na druhu přijímaného materiálu a požadavcích zákazníka na využití tepelné energie nebo na míru čištění spalin. Příklad technologického řazení jednotlivých zařízení včetně popisu je uveden na následujícím obrázku.



*Schéma technologického celku určeného pro spalování odpadního dřeva*

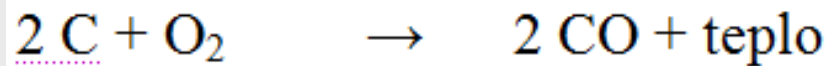
## 4. Zařízení pro spalování odpadní biomasy

### 4.3 Zařízení velkých výkonů

**Popis procesu:** V první fázi se naveze dřevěný odpad do štěpkovacího zařízení (1), štěrka se následně pomocí šnekového dopravníku transportuje do skladu paliva (2). Do skladu paliva může být přiváděn i další materiál jako jsou hobliny, piliny nebo drobný úlet zachycený při odsávání prachu při práci se dřevem. Se skladu paliva je materiál dopraven do zásobníku paliva (3), odkud je materiál dopraven do dávkovacího zařízení (4). Následně je palivo energeticky využito ve spalovací komoře. Popel zbylý po spalování je odveden do popelníku (6). Horké spaliny vzniklé při spalování paliva ohřívají otopnou vodu v tepelných výměnících (7), (8). Spaliny jsou poté čištěny nejdříve v cyklonových odlučovačích, kde jsou odstraněny hrubé částice, následně v elektrostatickém filtru, kde jsou odstraněny částice jemné (9). Po vyčištění jsou spaliny odvedeny do komína (10).

## 5. Zplyňování

Zplyňování na rozdíl od spalování probíhá za podstechiometrického množství kyslíku. Aby oxidační reakce uhlíku proběhla pouze na oxid uhelnatý podle následující rovnice:



Reakce  $2 \text{H}_2 + \text{O}_2$  musí být zcela potlačena. Teplota při zplyňování se pohybuje přibližně v rozmezí 1000 – 1500 °C. V praxi samozřejmě dochází v malém množství i k reakcím, kdy vzniká i  $\text{CO}_2$  a voda. Produktem je syntézní plyn, což je převážně směs  $\text{CO} + \text{H}_2$ , který je možné využít materiálově nebo k výrobě energie.

## 5. Zplyňování

Energeticky využitelným produktem zplyňování je syntézní plyn. Syntézní plyn se skládá z hlavních složek, jimiž jsou výhřevné permanentní plyny ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  a  $\text{CH}_4$ ), balastní permanentní plyny ( $\text{CO}_2$  a  $\text{N}_2$ ) a samozřejmě vodní pára. Dále plyn tvoří vedlejší složky a tuhé znečišťující látky (dehet, popeloviny, nedopal) a sloučenin S, Cl, N aj. Složení plynu nelze generalizovat, protože je závislé na fyzikálně-chemických vlastnostech tuhého paliva, na typu zplyňovacího reaktoru a na provozních podmínkách generátoru. Příkladem je složení plynu z fluidního zplyňování dřevní biomasy různými zplyňovacími tekutinami – vzduchem, vodní parou a paro-kyslíkovou směsí. Hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

# Technika energetického využívání dřevních odpadů

Parametr	Jednotka	Zplyňování vzduchem ( <u>autotermní</u> )	Zplyňování parou ( <u>alotermní</u> )	Zplyňování <u>paro-kyslíkovou směsí</u> ( <u>autotermní</u> )
Výhřevnost	[MJ·m <sub>N</sub> <sup>-3</sup> ]	4–6	12–14	12–15
H <sub>2</sub>	[%]	11–16	35–40	25–30
CO	[%]	13–18	25–30	30–35
CO <sub>2</sub>	[%]	12–16	20–25	23–28
CH <sub>4</sub>	[%]	3–6	9–11	8–10
N <sub>2</sub>	[%]	45–60	<1	<1

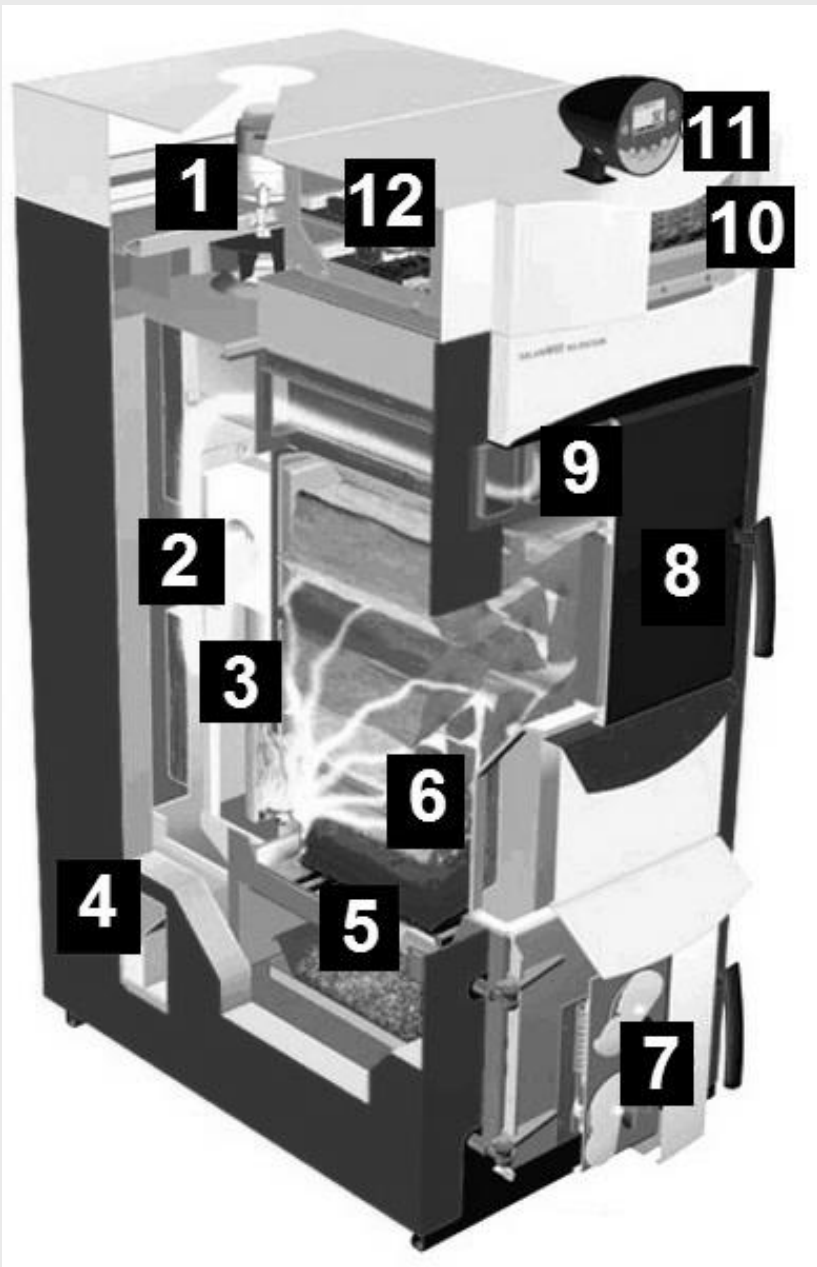
*Hlavní složky plynu ze zplyňování  
dendromasy*

## 5. Zplyňování

### 5.1 Zařízení pro zplyňování

Podobně jako u spalovacích zařízení existuje široká škála zplyňovacích zařízení o různých výkonech. Kotle pro domácí použití jsou vybaveny převážně pevným roštem. U zařízení větších výkonů se používají i jiné typy roštů, případně i jiné druhy technologií zplyňování. Rošty jsou převážně sesuvné (pohyblivé). Dále se může využít i zplyňování pomocí fluidních zařízení. Prozatím v oblasti výzkumu je technologie založena na plazmovém zplyňováním za extrémně vysokých teplot (až 30 000 °C). Konstrukce zařízení závisí na požadovaném výkonu, tvaru zplyňovaného materiálu a na zvolené technologii. Popis a nákres zplyňovacího zařízení o výkonu 20 kW určeného pro vytápění domů je uveden na následujícím obrázku.





1 – ventilátor pro přívod vzduchu, 2 – teplotní sonda, 3 – hořák, 4 – čistící otvor, 5 – integrovaný přívod předehřátého vzduchu, 6 – prostor pro zplyňování dendromasy, 7 – automaticky řízené servomotory pro regulaci přívodu vzduchu, 8 – dvířka pro plnění zplyňovacího prostoru palivem, 9 – odvod karbonizovaného plynu, 10 – kontrolní systém, 11 – displej, 12 – systém regulace spalování syntézního plynu

*Nákres zplyňovacího kotle pro domácí použití*

## 5. Zplyňování

### 5.1 Zařízení pro zplyňování

Především u velkých zdrojů je velmi důležitou součástí technologie čištění syntézního plynu. Důvodem je, že kromě syntézního plynu během zplyňování vznikají také další nežádoucí látky. Jedná se o pevné částice, dehet, alkálie, sloučeniny síry ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$  a organické sloučeniny), dusíku ( $\text{NH}_3$  a  $\text{HCN}$ ), halogenů a jiné. Zastoupení nečistot v plynu je závislé na technologii zplyňování a na složení biomasy. Nároky na čistotu plynu se liší dle jeho následné aplikace.

## 5. Zplyňování

### 5.1 Zařízení pro zplyňování

Obecně existují dva základní přístupy k čištění plynu, které se vzájemně doplňují. Jedná se o tzv. primární opatření a sekundární opatření. Primární opatření jsou metody týkající se samotného procesu zplyňování, které se uplatňují přímo v generátoru. Jsou to např. volba vhodného zplyňovacího média, vhodné teploty zplyňování, tlaku zplyňování atd. U fluidních generátorů se také využívá možnost ovlivňovat kvalitu generátorového plynu použitím katalyzátorů ve fluidním loži. Sekundárními opatřeními je rozuměno použití návazných technologií, jako jsou např. cyklóny, filtry, mokré vypírky (skrubry) a jiné.

## 6. Pyrolýza

Pyrolýza se řadí mezi tzv. termochemické procesy, kam se řadí i spalování nebo zplyňování. Pyrolýza však má svá určitá specifika, kterými se od předchozích dvou procesů odlišuje. Základní odlišností je, že pyrolýza je proces se zamezením přístupu kyslíku, vzduchu nebo jiných zplyňovacích látek. Tímto procesem lze zpracovávat různé druhy materiálů na bázi uhlíku. Pyrolýza probíhá obecně ve třech fázích:

- sušení
- karbonizace
- tvorba plynu.

## 6. Pyrolýza

Moderní pyrolýzní jednotky se využívají jako zdroj chemických látek nebo přímo ke kombinované výrobě tepla a elektrické energie. Biomasa, zvláště poté dendromasa je surovinou velmi vhodnou pro pyrolýzní zpracování. Obecně vzato pyrolýzní procesy zpracovávající biomasu můžeme rozdělit následujícím způsobem:

- pomalá pyrolýza
- rychlá pyrolýza
- pražení.

## 6. Pyrolýza

### 6.1 Pomalá pyrolýza

Technologie pomalé pyrolýzy využívá pomalého ohřevu materiálu za nepřítomnosti kyslíku a to na teplotu přesahující 400 °C, některá literatura uvádí až 500 °C. Tato teplota vyvolává tepelný rozklad lignocelulózy za vzniku syntetického plynu, pyrolýzního oleje a pyrolýzního uhlí. Rychlost tepelného ohřevu zde činí přibližně 5 – 7 °C za minutu.

Pomalé pyrolýzní jednotky mají ve srovnání s ostatními technologiemi určenými pro termochemickou konverzi látek několik výhod, mezi tyto výhody patří především to, že jednotky určené pro pomalou pyrolýzu jsou levné a jsou schopny zpracovat různé druhy vstupních surovin.

## 6. Pyrolýza

### 6.1 Pomalá pyrolýza

Využití pomalých pyrolýzních jednotek ve větším měřítku je však obtížné. Příčinou je pomalý přenos tepla v objemu materiálu a z tohoto důvodu je nutná dlouhá doba zdržení materiálu v komoře.

Pomalé pyrolýzní jednotky produkují relativně vyšší podíl pevného zbytku a menší množství ostatních produktů než ostatní technologie určené pro termochemickou konverzi.

## 6. Pyrolýza

### 6.2 Rychlá pyrolýza

Při rychlé pyrolýze dochází k rychlému ohřevu suroviny (500 až 1000 °C za minutu) bez přístupu kyslíku. Biomasa se rozkládá za vzniku plynů, par, aerosolů a pevného zbytku. Výtěžek kapalného bio-oleje je po zkondenzování par a aerosolů v rozmezí 60 – 75 %<sub>hm.</sub>, 15 – 25 %<sub>hm.</sub> tvoří pevný koks a 10 – 20 %<sub>hm.</sub> plyny. Pro dosažení žádoucího výtěžku bio-oleje je nezbytné splnit některé požadavky. Předně je nezbytná vysoká rychlost ohřevu v celém objemu pyrolyzovaného materiálu, což je zpravidla podmíněno malou velikostí částic, z nichž se pyrolyzovaný materiál skládá. Je tedy nutné vstupní surovinu nejdříve pomlít.



## 6. Pyrolýza

### 6.2 Rychlá pyrolýza

Teplota pyrolýzního procesu musí být pečlivě řízena (většinou v rozmezí 425 – 500 °C), protože pyrolýzní proces silně závisí na teplotě. Dále je nezbytné, aby vznikající parní fáze neměla v reaktoru dobu zdržení delší než 2 s a aby bylo zajištěno co nejrychlejší ochlazení a zkondenzování par a aerosolů, které jinak mohou podléhat sekundárním reakcím.

## 6. Pyrolýza

### 6.3 Pražení

Pražení je další z procesů, které lze považovat za pyrolytický proces. Z energetického hlediska je pražení biomasy zajímavý proces. V některých státech je této úpravě materiálu věnována zvýšená pozornost (například Holandsko, Kanada). Pražením obecně rozumíme tepelnou úpravu materiálu (například biomasy), která je prováděna v inertní atmosféře. V případě procesu pražení biomasy dochází především k odstranění vlhkosti materiálu a lehkých těkavých látek a zároveň k depolymerizaci dlouhých polysacharidových řetězců.

## 6. Pyrolýza

### 6.3 Pražení

Výsledkem je hydrofobní produkt se zvýšenou energetickou hustotou (na jednotku hmotnosti) a s vysokou melitelností. V důsledku této úpravy dochází k výrazně nižší spotřebě energie při následném zpracování praženého paliva. Pro energetické využití tohoto materiálu není nutné stavět speciální spalovací zařízení – lze jej využít již ve stávajících uhelných elektrárnách a spoluspalovat s černým nebo hnědým uhlím.

## 6. Pyrolýza

### 6.3 Pražení

Výsledkem je hydrofobní produkt se zvýšenou energetickou hustotou (na jednotku hmotnosti) a s vysokou melitelností. V důsledku této úpravy dochází k výrazně nižší spotřebě energie při následném zpracování praženého paliva. Pro energetické využití tohoto materiálu není nutné stavět speciální spalovací zařízení – lze jej využít již ve stávajících uhelných elektrárnách a spoluspalovat s černým nebo hnědým uhlím.

## 6. Pyrolýza

### 6.3 Pražení

Lignocelulózová biomasa obsahuje přibližně 80 % těkavých látek a 20 % fixovaného uhlíku v sušině. Během pražení při průměrné teplotě 250 °C až 350 °C a výraznému poklesu kyslíku v pražicí komoře dojde ke snížení přibližně 20 % těkavých látek. Zároveň se výrazně změní i fyzikální vlastnosti výsledného produktu. Uvádí se například, že díky pražení dojde ke změně spalného tepla z 19 MJ·kg<sup>-1</sup> u dřeva na 21 – 23 MJ·kg<sup>-1</sup> po procesu pražení.

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

Pyrolýza materiálů poskytuje tři základní produkty:

- bio-olej
- pyrolýzní plyn
- pevný zbytek.

Bio-olej je směs organických chemikálií a pyrolýzní vody. Alternativně může být nazýván jako pyrolýzní benzín či pyrolýzní olej. Bio-olej je po pyrolýze biomasy tmavě hnědá kapalina s ostrým charakteristickým zápachem.

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

Je to komplexní směs organických sloučenin, obsahující vodu a mnoho derivátů kyslíkatých organických sloučenin, např. kyseliny, alkoholy a fenoly, karbonylové sloučeniny, ethery, estery, cukry, furany a také deriváty dusíkatých sloučenin. Molární hmotnost těchto sloučenin je v širokém intervalu, od  $18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  u vody až po  $5000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  pyrolytického ligninu. Průměrná molární hmotnost pyrolýzního oleje se pohybuje v intervalu  $370 - 1000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Přestože pyrolýzní olej obsahuje velké množství organických sloučenin, většina z nich se vyskytuje v nízkých koncentracích a kompletní chemická analýza pyrolýzního oleje není možná kvůli přítomnosti pyrolytického ligninu.

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

Pyrolytický lignin představuje různě dlouhé deriváty ligninu způsobené tepelnou degradací a jeho koncentraci nelze stanovit plynovou ani kapalinovou chromatografií. Složení pyrolýzního oleje se výrazně liší od paliv na ropné bázi, protože na rozdíl od fosilních paliv, biomasa obsahuje velké množství kyslíku. Analýzou složení pyrolýzního oleje zaměřenou na identifikaci lehčích složek byly mezi hlavními složkami detekovány karbonylové sloučeniny vzniklé degradací celulosy (levoglukosan, acetylacetaldehyd), karboxylové kyseliny (octová, mravenčí), deriváty furanu, fenoly a guajakoly.



## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

Složení pyrolýzního oleje je velmi proměnlivé v závislosti na surovině i technologii zpracování. Pyrolýzní plyn je směs několika plynných uhlovodíků, dále vodíku, oxidu uhelnatého a uhlíčitého a oxidů dusíku. Pevný zbytek je směs nezreagovaných částic rozkládaného dřeva, uhlíkatých úsad, zuhelnatělých částic a také popela. Často se označuje jako pyrolýzní koks.

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

#### Bioolej

Bioolej vzniklý pyrolýzou lignocelulózových materiálů má typicky vyšší obsah vody, může mít vyšší obsah rozpuštěných pevných částic a větší hustotu než konvenční paliva. Základní fyzikální vlastnosti biooleje jsou uvedeny v následující tabulce.

<b>Vlastnosti</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Voda</b>	%	20 – 30
<b>Pevné částice</b>	%	> 0,5
<b>Popeloviny</b>	%	0,01 – 0,1
<b>Dusík</b>	%	> 0,4
<b>Síra</b>	%	> 0,05
<b>Viskosita (40 °C)</b>	cSt	15 – 35
<b>Hustota (15 °C)</b>	kg.dm <sup>-3</sup>	1,10 – 1,30
<b>Bod vznícení</b>	°C	40 – 110
<b>Výhřevnost</b>	MJ.kg <sup>-1</sup>	13 – 18
<b>pH</b>	-	2 – 3

*Fyzikální vlastnosti bio-oleje*

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

#### *Pevný zbytek*

V následující tabulce jsou uvedeny chemicko-fyzikální vlastnosti pevného zbytku u různých typů biomasy. Pyrolytický proces v tomto případě proběhl při 500 °C a jednalo se o pomalou pyrolýzu. Konečný produkt vykazuje velmi vysokou biologickou a tepelnou stabilitu a také vysoký obsah uhlíku. Při srovnání jednotlivých druhů materiálů je velmi nápadný rozdíl mezi obsahem popelovin u slámy a dalších typů biomasy.

<b>Druh analýzy</b>	<b>Vlastnost</b>	<b>Typ materiálu</b>		
		<b>Sláma</b>	<b>Kmenové dřevo</b>	<b>Dřevěná kůra</b>
<b>Fyzikální analýza</b>	Vlhkost	2,07	1,46	0,36
	Prchavé hořlaviny	6,46	12,79	18,14
	Vázaný uhlík	39,1	83,47	68,66
	Popeloviny	52,37	2,28	12,84
<b>Prvková analýza</b>	C	86,28	89,31	84,84
	H	3,12	2,57	3,13
	O	7,35	7,34	10,20
	N	3,25	0,78	1,83
	Výhřevnost [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	13,45	16,46	15,40

*Fyzikální vlastnosti bio-oleje*

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Produkty pyrolýzního zpracování dendromasy

#### Pyrolýzní plyn

Základní chemicko-fyzikální vlastnosti pyrolýzního plynu jsou potom pro srovnání uvedeny v následující tabulce. V tomto případě pyrolýzní proces proběhl při teplotě 650 °C. Obecně lze říci, že podíl vodíku s rostoucí teplotou v pyrolýzním procesu roste. Například v tomtéž experimentu podíl vodíku při teplotě 500 °C činil 6,4 %.

<b>Druh analýzy</b>	<b>Vlastnost materiálu</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Dřevo</b>
<b>Fyzikální analýza</b>	Relativní hustota	1	0,76
	Měrná tepel. kapacita	$\text{kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$	1,02
	Výhřevnost	$\text{MJ.m}^{-3}$	16,97
	Hustota	$\text{kg m}^{-3}$	0,99
<b>Prvková analýza</b>	$\text{H}_2$	%	19,9
	CO	%	30,5
	$\text{CO}_2$	%	16,2
	$\text{CH}_4$	%	15,1
	$\text{C}_2\text{H}_4$	%	3,9
	$\text{C}_2\text{H}_6$	%	1,4

*Chemicko-fyzikální analýza pyrolýzního plynu  
při 650 °C*

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Technologie pro pyrolýzní zpracování materiálů

Pro pyrolýzní zpracování dendromasy existuje celá řada technologií, které se využívají jak v laboratorním měřítku, tak i v tom průmyslovém. Reaktory určené pro pyrolýzu mohou být následující:

- vsázkové reaktory
- fluidní reaktory
- fluidní reaktory s cirkulující vrstvou
- ablační pyrolýzní reaktory
- vakuové pyrolýzní reaktory.



## 6. Pyrolýza

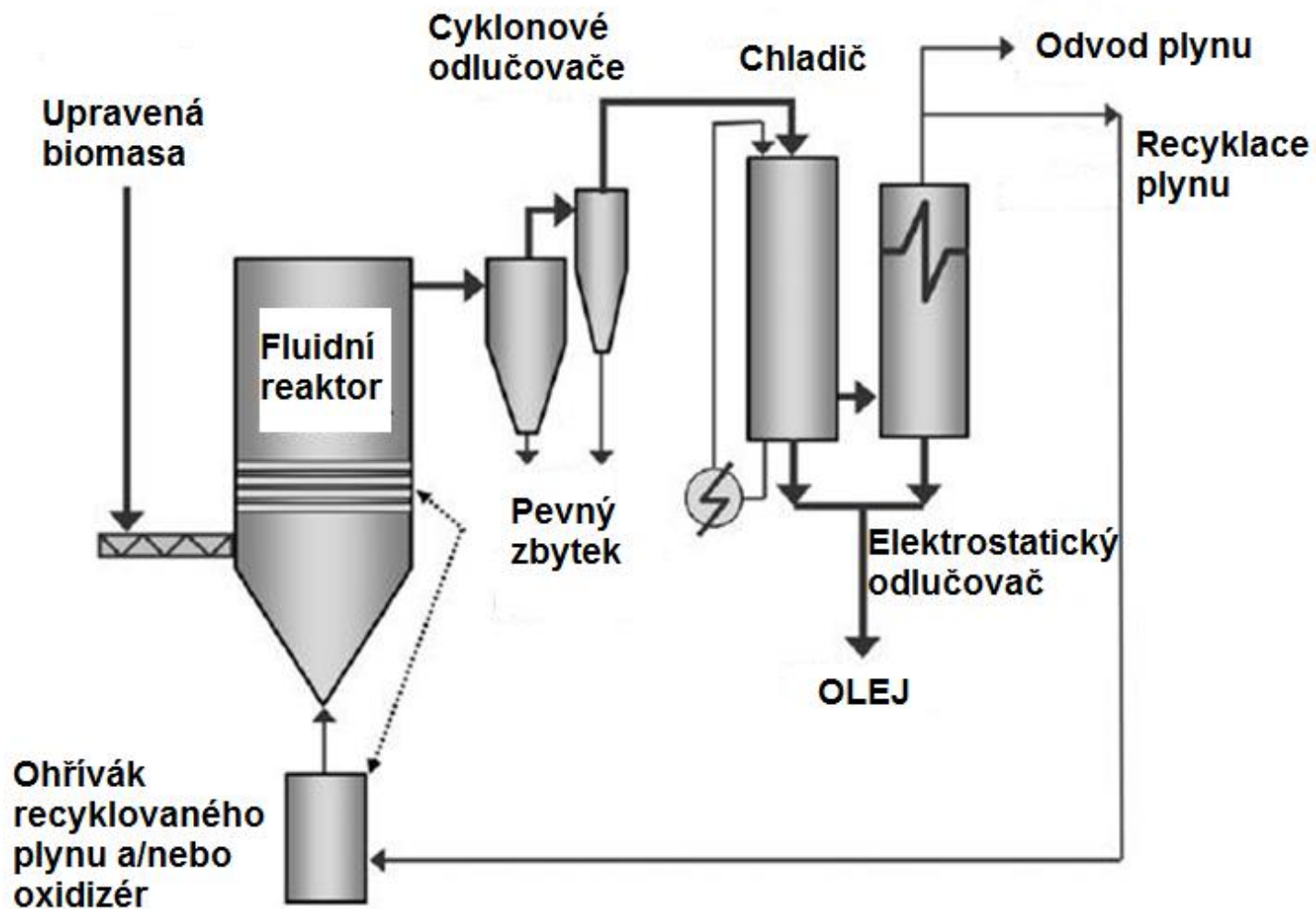
### 6.4 Technologie pro pyrolýzní zpracování materiálů

Pro průmyslové využití jsou vhodné technologie využívající fluidních reaktorů. Jejich nespornou výhodou je, že jsou v současné době po technické stránce dobře zvládnuté. Nevýhodou je potom skutečnost, že vstupní materiál musí upraven mletím či drcením, což zvyšuje provozní náklady. V literatuře se například uvádí, že velikost všech částic by se měla pohybovat v rozmezí 2 – 3 mm, jelikož při těchto velikostech je přenos tepla mezi částicemi nejefektivnější.

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Technologie pro pyrolýzní zpracování materiálů

Schématický náčrt uvedený na následujícím obrázku znázorňuje typickou konfiguraci s využitím fluidního reaktoru se stacionární (bublinkující) fluidní vrstvou a s elektrostatickým odlučovačem. Upravená biomasa/dendromasa vstupuje pomocí dopravníku do fluidního reaktoru, kde proudí velkou rychlostí recyklovaný plyn, který částice uvádí do vznosu. Za fluidním reaktorem jsou řazeny cyklonové odlučovače. Pevné částice jsou zde pomocí tangenciálních sil z horkého plynu odloučeny. Vzniká jeden z produktů pyrolýzy – pevný zbytek. Následně jsou horké plyny chlazeny a dochází ke kondenzaci par obsažených v plynu. Kondenzát je odváděn mimo zařízení – vzniká bio-olej.



*Schematický nákres fluidního reaktoru*

## 6. Pyrolýza

### 6.4 Technologie pro pyrolýzní zpracování materiálů

Zbylý plyn se ohřeje a je částečně využit jako nosný plyn pro fluidizaci vrstvy v reaktoru a částečně může být využit pro další technologie či aplikace (např. spálení plynu a následný ohřev otopné vody).

Fluidní zařízení mají stabilní výkonnost s vysokým výtěžkem kapalného podílu (70 – 75 %<sub>hm</sub> v sušině).