

3. BIOMASA JAKO PALIVO

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, skorpik.jiri@email.cz

Úvod 1

Rostlinná biomasa 1

- Prvkové složení rostlin 1
- Příklad prvkového složení biomasy – obilná sláma [T.240] 1
- Fotosyntéza a růst fytohmoty 2
- Energetické výnosy fytohmoty 3
- Energetický výnos fytohmoty v podmínkách ČR [T.242] 3
- výpočet efektivity ukládání sluneční energie ve fytohmotě [Ú.562] 3

Klasifikace energetických transformací biomasy 3

- Přírodní rozpad biomasy 4
- Spalování biomasy 4
- Zplyňování biomasy 4
- Pyrolýza biomasy 6
- Produkty pyrolýzního rozkladu suchého březového dřeva (bez hrubé vody) a jejich výhřevnost [T.245] 6
- Alkoholová fermentace biomasy a výroba bioplynu 7
- Drcení a lisování biomasy 8

Hoření biomasy 8

- Hoření dřeva 8
- Výpočet hoření biomasy 9
- Molární hmotnost a objem prvků a sloučenin, které bývají nejčastěji přítomny při hoření [T.247] 10
- výpočet hoření slámy [Ú.564] 11
- výpočet teploty nechlazeného plamene při hoření [Ú.701] 11
- výpočet zastavení hoření při nedostatku kyslíku [Ú.563] 11

Odkazy 12

Přílohy 13

- 562 Řešení úlohy 13
- 563 Řešení úlohy 13
- 564 Řešení úlohy 14
- 701 Řešení úlohy 16

Úvod

Příklady biomasy a jejího využití jako paliva

Spalování dřeva a dřevěného odpadu v kotli¹ na ohřev vody může být nahrazeno spalováním slámy nebo jiných zbytků rostlinné zemědělské výroby. I v živočišné výrobě vzniká odpad v podobě kejdy a chlévské mrvy, který lze ve speciálních kontejnerech, za pomoci bakterií rozkládat na plynné produkty. Takové plynné produkty lze dokonce spalovat přímo ve spalovacích motorech¹ nebo v plynových kotlích. Jako palivo pro spalovací motory se používá i bionafta – nafta obsahující uhlovodíky získávané úpravou biomasy (například lisování plodů řepky olejné). Těmto a podobným způsobům využití biomasy se říká energetické využití biomasy.

Omezení využívání biomasy

Biomasa je důležitý lokální zdroj energie, protože ji lze využít pouze v místě nebo nedaleko místa produkce. To je dáno vysokými přepravními náklady biomasy, které jsou způsobené její nízkým měrným energetickým obsahem. Výkon energetického zařízení jehož palivem je biomasa, tedy závisí i na velikosti spádové plochy, na které může být biomasa produkována, *Obrázek 239*.



©2007 Jiří Škorpík

239 Zbytky akátové plantáže (2007) u Litobratřic, která byla hlavním zdrojem paliva v obci

Rostlinná biomasa

Prvkové složení rostlin

Hlavně organické prvky

Rostlinná biomasa neboli fytomasa se skládá z organické hmoty, vody a nízkého obsahu nehořlavých minerálů tzv. popelovin. Organická hmota je tvořena organickými prvky C, H, O, N, viz *Tabulka 240*. Ve fytomase lze nalézt i neorganické hořlavé prvky nejčastěji S, Ch. Uvedené prvky jsou vázány v hmotě rostlin ve sloučeninách⁴⁷.

240 *Příklad prvkového složení biomasy – obilná sláma*

	C	H	O	N	S	A	W
σ	44	4	34,7	0,9	0,4	4	12

σ [%] hmotnostní podíl. **C** uhlík; **H** vodík; **O** kyslík; **N** dusík; **S** síra; **A** popelovina; **W** voda. V tomto případě tvoří organická hmota 83,6 %, hořlavina 84 %, suchá hmota 88 % z celkové hmoty obilné slámy. Do obsahu síry je započítán i obsah chlóru. Zdroj dat [1].

Kde se berou chlór a síra?

Fytomasa by v tak velkém množství síru a chlór neměla obsahovat. Tyto prvky se do biomasy dostávají ze vzduchu, do

kterého se dostávají z části díky lidské činnosti (spalování fosilních paliv) a z části při přírodních "katastrofách" (výbuch sopky...).

Popelovina, ale i důležitý biogenní prvek

Popelovin je v rostlinné biomase velice málo od 0 % až po několik málo procent, jsou to minerály pocházející z půdy a rostliny je potřebují ke svému růstu. Proto při spalování biomasy vzniká tak málo popela. Popel navíc může obsahovat nespalitelné zbytky hrubých nečistot, které byly do kotle přineseny spolu s palivem (hlína, prach...).

Fotosyntéza a růst fytomasy

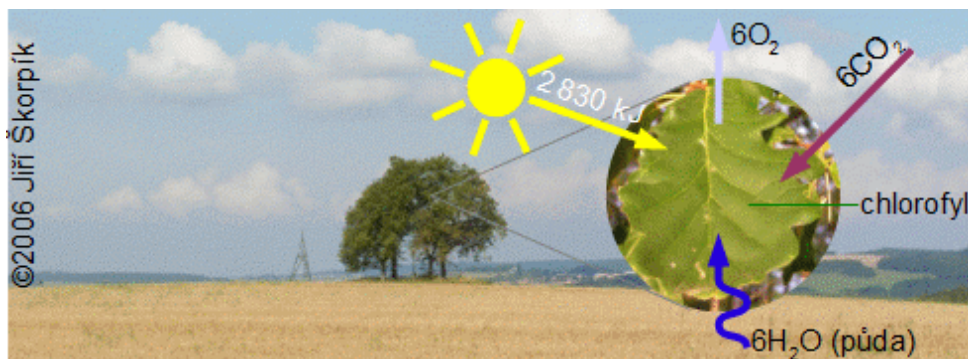
Vzduch je dominantním zdrojem hmoty

Uhlík získává fytomasa ze vzduchu, zbylé prvky a vodu z půdy. Potřebné procesy probíhající v rostlině (doprava potřebných sloučenin, stavba a regenerace živé hmoty) jsou energeticky, a z velké části i prvkově, hrazeny respirací glukózy $C_6H_{12}O_6$ (oxidace glukózy vzdušným kyslíkem při vylučování molekuly CO_2 – porovnejte s dýcháním¹), která vzniká v listech při jejich oslunění procesem zvaným fotosyntéza.

Fotosyntéza

Fotosyntéza je proces, při kterém se plynná složka vzduchu CO_2 rozkládá, respektive přetváří v molekuly glukózy pomocí sluneční energie². Fotosyntéza probíhá za přítomnosti chlorofylu, který je katalyzátorem probíhajících chemických reakcí, *Obrázek 241*.

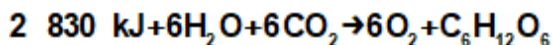
241 Vznik glukózy a produkce kyslíku při fotosyntéze



Princip fotosyntézy

Při fotosyntéze pigmenty chlorofylu zachytávají světlo⁴⁶ pomocí něhož rozkládají molekuly vody H_2O na kyslík a ionty⁴⁷ vodíku H^+ , tomuto ději se říká fotolýza (podobný princip jako u palivového článku). Elektrická energie (putující elektron) a ionty vodíku jsou využity k tvorbě organických sloučenin. Odpadem je čistý kyslík uvolňovaný do atmosféry (ve formě O_2 jehož jednotlivé atomy jsou původem z rozkladu H_2O a nikoliv CO_2 [12], [13]). Tento popis fotosyntézy lze zapsat *Rovnicí 561*, nicméně se jedná o značné zjednodušení se zaměřením se pouze na počáteční a výsledné produkty.

561 Rov. fotosyntézy



Rovnice popisuje souhrnnou reakci při, které vzniká glukóza a produkce kyslíku.

Účinnost fotosyntézy

Účinnost fotosyntézy je až 3 % (roční průměr kontinentální biomasy je asi 0,33 % a oceánské jen 0,1 % [13] – vztaženo k celkové osluněné ploše).

Energetické výnosy fytomasy

Výhřevnost a výnos

Biomasa jako palivo má své energetické parametry. Těmi nejdůležitějšími ukazateli v tomto směru je její výhřevnost¹, případně spalné teplo¹ při hoření. Tyto parametry jsou dány druhem biomasy. Chceme-li pěstovat například fytomasu pro energetické účely, pak nás musí zajímat kolik využitelné energie případně hmoty či objemu jsme schopni sklídit ve fytomase z jednotky plochy – taková veličina se nazývá výnos., viz *Tabulka 242*. Například v případě obilné slámy lze získat z jednoho hektaru kolem *16 000 kWh* – pro představu roční spotřeba tepla (teplá voda+topení) rodinného domku (nezateplený) může převyšovat *25 000 kWh*.

242 Energetický výnos fytomasy v podmínkách ČR

	Q	x	V
1 sláma 1	14	15	3-5
2 sláma 2	13,5	17-18	4-6
3 seno 1	12	15	2-8
4 seno 2	12	15	2-4
5 jiné jednoleté	14,5	18	15-20
6 dřeviny	12	25-30	8-12
7 energo rostliny	14,5	18	15-25

sláma 1 sláma obilovin; **sláma 2** sláma řepka; **seno** seno z energeticky bohatých travin vysetých na zem. půdě (**seno 1**), horské louce nebo ostatních půdách (**seno 2**); **jiné jednoleté** jiné běžné jednoleté rostliny; **dřeviny** rychle rostoucí dřeviny; **energo rostliny** energetická fytomasa – orná půda. **Q** [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] výhřevnost; **x** [%] vlhkost; **V** [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$] výnos. Zdroj dat [4] publikováno v [5].

I jiné důvody k pěstování fytomasy

K pěstování fytomasy nelze přistupovat čistě energeticky, protože její existence má i jiné efekty. Rostliny vyrábí kyslík, jsou potravou apod. Navíc přímo i nepřímo ovlivňují klima či počasí, například velké množství vody se pomocí rostlin odpaří, a tím ochlazuje okolí, a naopak tato energie se vrací v noci jako rosa (udržování teploty i v noci). Obvykle zemědělec nemůže pěstovat jen fytomasu s nejvyšším en. výnosem, ale je omezen i půdou, problémy monokultur, případně legislativními podmínkami a pod.

562 Úloha

Pokuste se určit efektivitu ukládání sluneční energie dopadající na m^2 ve fytomase určené jako palivo pro spalování. Výpočet proveďte pro podmínky ČR. Počítejte, že za rok lze vypěstovat na $1 m^2$ přibližně *0,5 až 1 kg* suché fytomasy, výjimečně *2,5 kg*. Počítejte s výhřevností kolem $15 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Porovnejte tuto efektivitou s efektivitou fotovoltaického panelu², který je schopen transformovat na elektřinu *10-15 %* ročního úhrnu dopadajícího slunečního záření. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 562, s. 13*.

Klasifikace energetických transformací biomasy

Nejen spalování

Energii obsaženou v biomase lze získat nejen jejím spálením ve formě tepla za vzniku spalin a tuhých zbytků (popel), ale také dalšími cestami. Jejich základní rozdělení je podle toho, co je

hlavním hybatelem rozkladu sloučenin v biomase obsažených, kterým může být buď teplota, bakterie nebo mechanická destrukce.

Přirozený rozpad biomasy

Čím vyšší teplota, tím rychlejší rozpad

Jedná se o rozpad způsobený reakcí organických sloučenin s kyslíkem podporované tepelným pohybem atomárních struktur často za vzniku nových sloučenin. Organické sloučeniny v kyslíkovém prostředí podléhají rozkladu a dokud je organismus živý, tak tento rozklad kompenzuje regeneračními procesy. Nicméně mrtvý organismus, například odumřelá větev stromu, se časem rozpadá vlivem interakce se vzdušným kyslíkem, až po několika letech zcela zmizí, a zbudou po ní jen složky nepodléhající při daných podmínkách oxidaci (různé anorganické složky, minerály...). Za ideálních podmínek se biomasa rozpadá na CO_2 a H_2O . Při tomto rozkladu se uvolňuje energie ve formě tepla. Rychlost rozkladu významně závisí na teplotě okolí (roste přibližně 2 až 3x při zvýšení o $10\text{ }^\circ\text{C}$), na vzdušnosti okolí a klimatických podmínkách.

Rozpad i bez kyslíku

Biomasa se rozkládá i nezávisle na kyslíkové atmosféře (tzv. anaerobní děj). Uhlík reaguje s kyslíkem a vodíkem v biomase a vytváří CO , respektive CH_4 . K rozkladu bez přítomnosti vzdušného kyslíku, ale významně dochází pouze při vyšších než pokojových teplotách nebo za přítomnosti bakterií. Popišme si ale rychlejší termochemické transformace biomasy, které lze v reálném čase využít k energetickým účelům.

Spalování biomasy

Hoření

Spalování je vysokoteplotní a současně nejrozšířenější způsob využití biomasy, kdy se využívá slučovací entalpie⁴⁷ uvolněná při hoření¹ k rozpadu organických sloučenin a k ohřevu okolí. Produktem jsou spaliny a popel.

Hoří uhlík a vodík uvolněný při termickém rozkladu

Při spalování hoří pevný uhlík, případně vodík obsažený v palivu, i unikající plynné látky. Vzduch je pokud možno přiváděn ve všech částech spalovacího prostoru (topeniště) a jeho celkové množství je vyšší než odpovídá stechiometrickému spalování – viz podkapitola Hoření jako chemický proces¹. Pro hoření biomasy je charakteristická vysoká teplota. Proces hoření má v tomto článku samostatnou kapitolu *Hoření biomasy*, s. 8

Zplyňování biomasy

Nedokonalé hoření a vznik organických látek

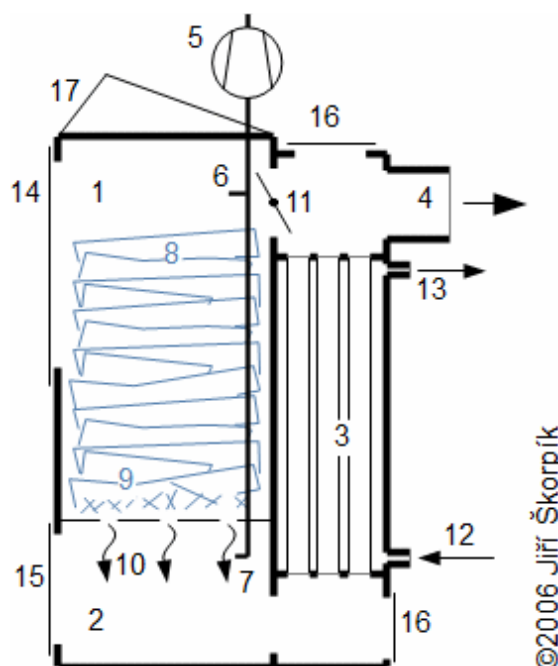
Při zplyňování (nedokonalé hoření) hoří uhlík obsažený v palivu v jiné části spalovacího zařízení než unikající plynné produkty (ty není nutné ihned spalovat, ale mohou se odvádět a využívat mimo zplyňovací zařízení). Takže mimo popela je produktem ještě hořlavý plyn zvaný generátorový, zuhelnatělé zbytky (hořlavé)

a dehtový olej. Aby tyto produkty vznikly, musí hoření probíhat nedokonale s malým množstvím kyslíku, tzv. podstechiometrické spalování.

Princip zplyňovacího kotle na dřevo

Na *Obrázku 244* je řez zplyňovacím kotlem na kusové dřevo s pevným ložem. Do horní části spalovací komory je přiváděno takové množství vzduchu, aby probíhalo pouze podstechiometrické hoření. Zde hoří především uhlík na CO (typický produkt nedokonalého spalování) a CO₂. Přitom dochází k uvolnění dalších hořlavých plynů z termického rozpadu dřeva. Vzniklé spaliny a plyn jsou vedeny do dolní části spalovací komory, kam je také přiváděn další vzduch (sekundární), který hoří s CO a dalšími plyny. Vzniklými horkými spalinami se ohřívá voda. Dále se uvolňují dehtové látky a odpadní fenolové vody [6]. Zplyňování v zařízení s pevným ložem probíhá při atmosférickém tlaku.

244 Zjednodušený řez zplyňovacím kotlem na kusové dřevo pro ohřev topné vody o výkonu 20 kW



1 horní část spalovací komory (zásobník paliva); 2 dolní část spalovací komory; 3 žárotrubný kotel; 4 odvod spalin; 5 vzduchový ventilátor; 6 přívod primárního vzduchu; 7 přívod sekundárního vzduchu; 8 palivo (kusové dřevo); 9 hoření pevného uhlíku a tvorba hořlavých plynů; 10 hoření plynů; 11 spalinová klapka (otevřená slouží k rozdělení ohně, v okamžiku, kdy se začne dřevo zplyňovat se klapka uzavře); 12 přívod studené vody; 13 odvod teplé vody; 14 víko zásobníku paliva; 15 obslužné víko spalovací komory (odběr popela); 16 čistící víka kotle; 17 ovládací panel.

Jiné způsoby zplyňování

Existují i jiné způsoby zplyňování [3], ale podstata zůstává stejná. Například zplyňování při tlaku až 2,5 MPa a teplotách 850 °C až 1000 °C. Toto zplynění probíhá pomocí fluidní vrstvy ve fluidních generátorech. Při těchto teplotách dochází k rozkladu dehtů, fenolů i mastných kyselin na spalitelné plyny. K vysokotlakému zplyňování je zpravidla přistoupeno kvůli tomu, aby generátorový plyn byl co nejčistší (typické objemové složení 8 až 10 % CO, 4 až 8 % CH₄, 8 až 12 % H₂, 11 až 8 % CO₂, 7 až 10 % H₂O, zbytek je N₂, potom je výhřevnost vyrobeného plynu

2,5 až 8 MJ·m⁻³_n, ale existují i způsoby zplyňování, u kterých je podíl dusíku mnohem menší a výhřevnost až 14 MJ·m³_n). Tento plyn není dále spalován, ale je zbavován tuhých částic (filtry) a chlazen. Výsledný plyn je potom dále využit třeba jako palivo do spalovacího motoru kogenerační jednotky, nebo je možné ještě horký plyn převést pomocí syntézy na kapalné palivo.

Výhody zplyňování

Výhodou zplyňování je vysoká účinnost využití energie v palivu a nižší škodlivé emise oproti klasickému spalování. Nevýhodou je složitější zařízení.

Pyrolýza biomasy

Termický rozpad bez
přívodu vzduchu

Pyrolýza je rozklad biomasy při vysoké teplotě (termický rozklad) bez přívodu vzduchu na pevný hořlavý zbytek (většinou dřevěné uhlí), pyrolýzní plyn a dehtový olej, viz *Tabulka 245*.

245 Produkty
pyrolýzního rozkladu
suchého březového
dřeva (bez hrubé vody)
a jejich výhřevnost

	σ	Q
1 uhlí	31,8	10 216
2 živice	15,8	4 689,2
3 kyselina octová	7,08	1 009
4 metylalkohol	1,6	355,88
5 aceton	0,19	62,8
6 CO ₂	9,96	0
7 CO	3,32	339,13
8 CH ₄	0,54	0
9 C ₂ H ₄	0,19	0
10 různé organické látky	10,03	1 624,5
11 voda	19,49	0
12 celkem	100	18 296

Tabulka ukazuje produkty rozpadu dřeva při dokonalé pyrolýze. Při běžném pyrolýzním rozpadu je množství vzniklého uhlí nižší přibližně o 10 %. Zdroj [7]. σ [%] hmotnostní podíl látky; Q [kJ·kg⁻¹].

Průběh pyrolýzy

Pyrolýzní proces lze rozdělit podle dosažené teploty na tři části. V oblasti teplot do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálním odštěpením vody (oba procesy jsou silně endotermické). V rozmezí teplot 200 až 500 °C následuje oblast tzv. suché destilace. Zde nastává ve značné míře odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík. Ve fázi tvorby plynu v oblasti teplot 500 až 1200 °C jsou produkty vzniklé suchou destilací dále štěpeny a transformovány. Přitom, jak z pevného uhlíku, tak i z kapalných organických látek vznikají stabilní plyny, jako je H₂, CO, CO₂ a CH₄.

Pyrolýza v rotační peci

V současné době je většina provozovaných pyrolýzních systémů založena na termickém rozkladu biomasy v rotační peci. Pec je ohřívána spalováním části pyrolýzních plynů odebraných z pece.

K ohřátí biomasy v peci lze použít i horkého inertního plynu (neobsahující kyslík).

Využití dřevěného uhlí z pyrolýzy

Dřevěné uhlí z pyrolýzního spalování se využívá například ke kování i jako palivo pro grilování. Dřevěné uhlí je totiž čistý uhlík a tedy produktem spalování je pouze CO_2 , který je bezbarvý a bezpachý, což je při kování i grilování to nejpodstatnější. Pokud by se topilo dřevem, tak vlivem velkého prchavého podílu by oheň dýmil a jeho kouř by obsahoval látky nevhodné pro přípravu jídla a v případě kování by mohlo dojít k prvkové kontaminaci kovaného materiálu.

Alkoholová fermentace biomasy a výroba bioplynu

Anaerobní fermentace – rozpad pomocí kvasinek

Jedná se asi o nejznámější biochemickou transformaci, při které se glukóza obsažená v biomase transformuje na alkohol a oxid uhličitý – $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$, katalyzátorem této reakce je enzym (obsažený v kvasinkách), který urychluje přírodní procesy [2, s. 252]. Výsledný produkt CH_3CH_2OH je Ethanol (alkohol – líh). Toto kvašení probíhá bez přístupu vzduchu (anaerobní fermentace) a místo alkoholu může vznikat i Methanol. Pevným zbytkem po alkoholové fermentaci se nazývá vykvašený substrát.

Alkohol/lih jako palivo

Alkohol je velice dobré palivo a v některých případech může být náhražkou za kapalná fosilní paliva. Takový druh paliva je nejvíce využíván v Brazílii, kde je pro alkoholové kvašení ve velkých objemech používána cukrová třtina.

Aerobní fermentace – z lihu dále na kyselinu octovou a acetaldehyd

Pokračováním alkoholové fermentace při přístupu vzduchu se nazývá aerobní fermentace. Jedná se o transformaci lihu například na kyselinu octovou a vodu přitom se uvolňuje i teplo – $CH_3CH_2OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$. Je nutná přítomnost octových bakterií. Výsledkem může být např. kyselina octová (ethanová kyselina) a voda (přeměnu alkoholu na octovou kyselinu provází vznik meziproduktů, jako je acetaldehyd [2, s. 256]). Znamé je kysnutí vína po jeho otevření apod. Pevný zbytek na konci aerobní fermentace se označuje jako fermentovaný substrát.

Anaerobní fermentace živočišné biomasy – bioplyn

Podobný proces jako při alkoholové fermentaci se používá i při biochemické transformaci organických složek zvířecích exkrementů a jiné podobné biomasy. Protože tato biomasa má výrazně jiné složení než fytomasa, tak výsledek je také odlišný, při kterém postrádáme vznik lihu a místo něj vzniká tzv. bioplyn a fermentovaný substrát, proto mluvíme o anaerobní fermentaci. Navíc, oproti alkoholové fermentaci, je nutné udržovat teplotu kolem $35\text{ }^\circ\text{C}$.

Složení bioplynu

Složení bioplynu odpovídá převažující sloučeninové transformaci při anaerobní fermentaci $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$. Typicky bioplyn obsahuje 55 až 60 % CH_4 , 40 až 45 % CO_2 a jiné plyny (1 % sirovodík...) [6]. Problémem při této transformaci je

velké množství uvolněné vody a čpavku, což může způsobovat korozi zařízení.

*Anaerobní fermentace
v bioplynových
stanicích*

Tento způsob zplyňování biomasy se často používá v bioplynových stanicích se spalovacími motory, pro které je bioplyn palivem. K anaerobní fermentaci na bioplynových stanicích se používají velké nádrže (cca 4000 m^3), do kterých se dávkuje kejda a obvykle velké množství nařezané kukuřice. Plyn se jímá do rozvodu plynu a rozpadlá biomasa ve formě řídké "kaše" (tzv. fermentovaný substrát) se odčerpává mimo zásobník a většinou se používá jako hnojivo.

Drcení a lisování biomasy

Rafinace a bionafta

Při drcení a lisování se základní složky biomasy oddělí fyzikální cestou, a kapalná frakce se může případně rafinovat. Tímto procesem vzniká například řepkový olej, který se pomocí rafinace vylisovaného oleje z Řepky olejné může využívat jako tzv. bionafta. Zbylé pevné složky lze například použít jako palivo pro spalování.

Hoření biomasy

*Průběh hoření různých
druhů biomasy je
podobný*

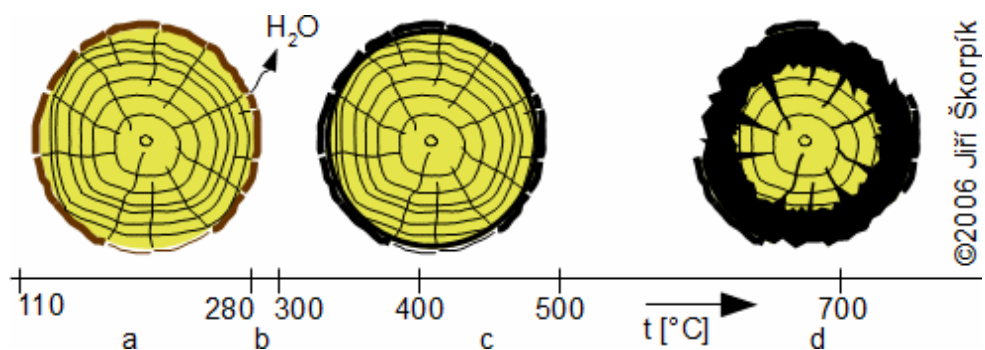
Biomasa má různou strukturu, ale většinou základní fáze hoření (od termického rozkladu s uvolňováním hořlavých plynů a páry až po hoření uhlíkových zbytků) mají stejnou. V tomto článku je proto uveden detailněji jen popis hoření dřeva, které napovídá o technických potřebách spalovacího zařízení biomasy obecně.

Hoření dřeva

*Postupné hoření podle
teploty*

Dřevo (jiný název dendromasa) obsahuje mnoho druhů hořavin, které mají jinou teplotu hoření, proto při dané teplotě hoří vždy jen určitá část dřeva [7]. Nejdříve je však nutné dřevo zahřát na patřičnou teplotu a odpařit vodu, viz *Obrázek 246*.

246 *Průběh hoření
dřeva*



a odpar vázané vody (její var); **b** maximální zisk plyných produktů (únik je tak vysoký, že dřevo už je schopno samozahřívání); **c** povrch dřeva uhelnatí, plyné produkty už unikají pouze prasklinami; **d** plyné produkty již neunikají (neproniknout vrstvou uhlíku, která je 1,5 až 2 cm), hoří směs pevného uhlíku a plynů nad prasklinami. **t** [°C] teplota.

*110-300 °C odpar vody
uvolňování plynů,
vnitřní rozklad*

Při zahřívání dřeva do 110 °C se z něho uvolňuje vlhkost (vázaná voda), při vyšších teplotách dochází k pomalému rozkladu, který je provázen uvolňováním tepla. Při těchto teplotách se také uvolňuje CH₄ a další uhlíkové řetězce ve formě plynu. Z těchto plynů jen asi 5 až 6 % okamžitě oxiduje. Při teplotách, které odpovídají maximálním výtěžkům plyných produktů (280 až 300 °C) je množství tepla, které se uvolní při rozkladu (oxidace plynů) tak velké, že dřevo je schopné samozahřívání.

*300-690 °C maximální
množství plynů,
uhelnatění a hoření
uhlíku*

Při 290 až 300 °C dochází k největšímu výtěžku plyných produktů, ale na povrchu už se vytváří zuhelnatělná vrstva – pevný uhlík (dřevěné uhlí), a vznik plyných produktů se postupně zastavuje. Teplota uhlí v tomto okamžiku postupně dosahuje 400 až 500 °C. V závislosti na zahřátí horní vrstvy dřeva a jeho přeměny na dřevěné uhlí probíhá zahřátí níže ležící vrstvy dřeva na 300 °C a dochází k jejímu rozkladu. Postupné zvětšování vrstvy uhlíku je provázeno zvyšováním jeho teploty na 700 °C a zmenšováním množství tepla odevzdaného rozkládající se vrstvou dřeva. V důsledku toho se výtěžek plyných produktů zmenšuje a plamen se nevytváří nad celým povrchem hořícího dřeva, ale jen nad trhlinami v povrchu pokrytém uhlíkem. V této fázi je vrstva uhlíku silná 1,5 až 2 cm. Zápalná teplota uhlíku je 690 °C, methanu již 597 °C (vodík snižuje zápalnou teplotu uhlíku), proto dřevo zcela neshoří, dokud teplota dřeva nedosáhne zápalné teploty uhlíku. Například při požáru řídkých dřevěných konstrukcí nemusí být vývin tepla takový, aby shořela celá konstrukce. Z mohutných dřevěných trámů se pouze stanou ohořelé pahýly s vrstvou dřevěného uhlí, ale s relativně nepoškozeným jádrem viz *Obrázek 246d* a konstrukce se nemusí zřítit.

Výpočet hoření biomasy

Proč počítat

Pro konstrukční návrh spalovacího zařízení je nutné znát množství uvolněné energie, množství spáleného kyslíku, respektive vzduchu, výsledné složení spalin a teplotu nechlazeného plamene označovanou t_u (tzv. teplota adiabatického^{43.} hoření – je to maximální teplota spalin, jestliže žádné teplo při hoření není odváděno do okolí).

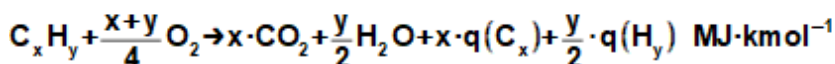
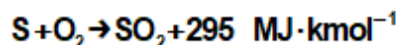
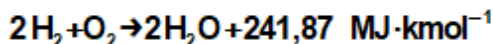
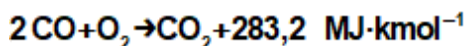
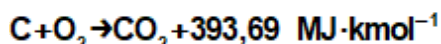
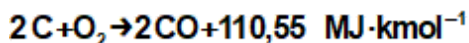
Jak počítat

Množství uvolněné energie spálením 1 kg biomasy se vypočítá z prvkového složení paliva a příslušných chemických reakcí. Například bude-li palivo obsahovat hmotnostně 90 % uhlíku 5 % vodíku a 5 % vody připadají v úvahu chemické reakce, při kterých reaguje uhlík s kyslíkem a vodík s kyslíkem, viz *Rovnice 234, s. 10*. Jestliže od entalpie^{43.}, která se při těchto reakcích uvolní odečteme slučovací entalpii původních sloučenin, pak získáme spalné teplo. Takový výpočet je komplikovaný a náročný na rozbor složení biomasy, takže mnohem jednodušší je stanovit spalné teplo a výhřevnost pomocí jednoduchého kalorimetrického experimentu.

3. Biomasa jako palivo

Navíc prakticky pro většinu známých druhů fytomasy jsou tyto parametry již změřeny, viz *Tabulka 242*. V mnoha případech je množství uvolněné energie změřeno experimentálně, a spalné teplo či výhřevnost se u jednotlivých paliv většinou už počítat nemusí.

234 Rovnice chemických reakcí obvyklých při hoření biomasy



$q(\text{C}_x)$; $q(\text{H}_y)$ [$\text{MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$] spalné teplo příslušného množství atomů jednotlivých prvků.

Nežádoucí hoření dusíku

Při vysokoteplotním hoření (nad $1000-1300 \text{ }^\circ\text{C}$) může ještě hořet i dusík obsažený v palivu a ve vzduchu, ale tato reakce je nežádoucí, protože sloučeniny NO_x patří mezi škodliviny, proto je hoření řízeno tak, aby tato teplota nebyla překročena.

Výpočet spotřeby vzduchu

Množství spáleného kyslíku, respektive spotřebu vzduchu při dokonalém hoření se vypočítá z příslušných reakcí stejně tak, jako výsledné složení spalin. Přitom lze vycházet z *Tabulky 247*, pomocí které lze přepočítat hmotnost daného plynného prvku, či sloučeniny, ze zadaného objemového množství na molové množství.

247 Molární hmotnost a objem prvků a sloučenin, které bývají nejčastěji přítomny při hoření

		M	V_M
1	C	12,01	–
2	CO	28,01	22,4
3	H_2	2,016	22,43
4	N_2	28,016	22,4
5	S	32,06	–
6	CH_4	16,04	22,36
7	C_3H_8	44,09	21,92
8	O_2	32	22,39
9	Ar	39,944	22,39
10	CO_2	44,01	22,26
11	SO_2	64,06	21,89
12	H_2O	18,016	22,4

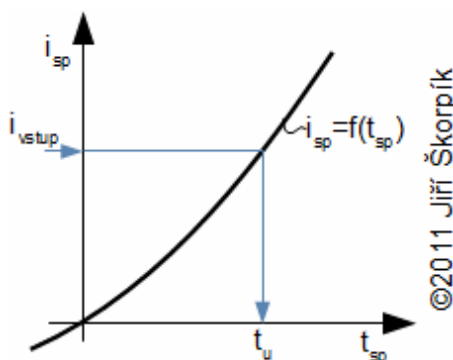
M [$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$] molární hmotnost; V_M [$\text{m}^3_n \cdot \text{kmol}^{-1}$] molární objem – dolní index n u jednotky objemu označuje normální metr krychlový tj objem plynu za normálních podmínek (standardní atmosférický tlak a $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Výpočet teploty nechlazeného plamene

Teplotu nechlazeného plamene lze vypočítat z entalpie spalin. K výpočtu je nutné vědět jaké množství energie (entalpie) do spalovacího procesu sebou přináší jednotlivé vstupní produkty (palivo, vzduch), jaké množství energie se uvolní při spalování (výhřevnost) – o kolik se zvýší po spálení entalpie spalin

a závislost celkové entalpie spalin na teplotě, respektive funkci $i_{sp}=f(t)$, viz *Obrázek 700*.

700 Výpočet teploty spalin (nechlazeného plamene)



©2011 Jiří Škorpík

(a) $i_{sp} = i_{vstup}$

(b) $i_{vstup} = Q + i_{pal} + i_{vz}$

(c) $i_{sp} = f(t_u) = i_a(t_u) \cdot \sigma_a^{sp} + i_b(t_u) \cdot \sigma_b^{sp} \dots$

i_{sp} [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie spalin při dané teplotě spalin; t_{sp} [$^{\circ}\text{C}$] teplota spalin; i_{vstup} [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie vstupních produktů spalování se započtením energie uvolněné při hoření; i_{pal} [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie paliva při vstupní teplotě; i_{vz} [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie vzduchu při vstupní teplotě; Q [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] výhřevnost paliva; i_a [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie spalin složky *a* spalin při teplotě hoření; i_b [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] měrná entalpie spalin složky *b* spalin při teplotě hoření; σ_a [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$] hmotnostní podíl složky *a* ve spalinách; σ_b [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$] hmotnostní podíl složky *b* ve spalinách atd. Podle složení spalin a entalpie jednotlivých složek (viz tabulky v [9, s. 350], [10], [11] nebo výpočet měrné entalpie pomocí pomoci porovnávací izobary⁴³) se zkonstruuje funkce $i_{sp}=f(t)$ a z množství vstupní entalpie odečte přibližná teplota nechlazeného plamene.

Entalpie spalin je přibližně rovna výhřevnosti paliva

V ideálním případě (dokonalé spalování) zvýšení entalpie spalin v důsledku hoření odpovídá výhřevnosti paliva. To znamená, že při hoření se transformuje energie spojená se slučováním molekul pouze na vnitřní tepelnou energii⁴³ spalin a tlakovou energii⁴³. Při spalování paliva ve volném plynném prostředí musí totiž zvětšující se objem spalin vykonat i práci – při svém vzniku spaliny vytlačují okolní plynné prostředí [8, s. 36] (velikost této práce vzhledem k uvolněné energii není velká a ve výpočtu se vynechává).

564 Úloha

Vypočítejte objemové množství vzduchu nutného pro dokonalé spálení 1 kg slámy a objemové množství a složení spalin. Složení slámy převezměte z *Tabulky 240*, s. 1. Při stanovení složení vzduchu počítejte jen se složkami s hmotnostním podílem větším jak 1 %, uvažujte současně, že se jedná o suchý vzduch. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 564*, s. 14.

701 Úloha

Vypočítejte teplotu nechlazeného plamene při hoření slámy z *Úlohy 564*. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 701*, s. 16.

563 Úloha

Ve vzduchotěsné ohnivzdorné sušárně dřeva o objemu 95 m³ vznikl požár. Vypočítejte jaké množství dřeva (v kg) v sušárně může shořet. Hoření se zastavuje, když obsah kyslíku ve vzduchu klesne na objemový podíl 16 %. Uvažujte dokonalé spalování, zanedbejte objem dřeva v sušárně, tj. objem vzduchu je stejný jako objem sušárny. Prvkový rozbor vzduchu převezměte z předchozí *Úlohy 564*. Prvkový rozbor dřeva v sušárně a řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 563*, s. 13 a v [7].

Odkazy

- [1] IBLER, Zbyněk, KARTÁK, Jan, MERTLOVÁ, Jiřina, IBLER, Zbyněk ml. *Technický průvodce energetika-1. díl*, 2002. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, ISBN 80-7300-026-1.
- [2] VACÍK, Jiří, BARTHOVÁ, Jana, PACÁK, Josef, STRAUCH, Bohuslav, SVOBODOVÁ, Miloslava, ZEMÁNEK, František. *Přehled středoškolské chemie*, 1995. 1. vydání. Praha: SPN-pedagogické nakladatelství, a.s., ISBN 80-85937-08-5.
- [3] POHOŘELÝ, Michael, JEREMIÁŠ, Michal, SKOBLIA, Siarhei, KAMENÍKOVÁ, Petra, SVOBODA, Karel, TOŠNAROVÁ, Markéta, ŠYC, Michal, PUNČOCHÁŘ, Miroslav, GÁL, Leoš. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění, *Konfernce OZE 2010*, 2010. Kouty nad Desnou. Dostupné z <http://files.tretiruka.cz>.
- [4] *Výzkumný ústav rostlinné výroby*. Veřejná výzkumná instituce. Web: <http://www.vurv.cz>, [2010].
- [5] BERANOVSKÝ, Jiří, TRUXA, Jan a kolektiv. *Alternativní energie pro váš dům*, 2004. 2. aktualizované vydání. Brno: ERA.
- [6] KRBEK, Jaroslav, OCHRANA, Ladislav, POLESNÝ, Bohumil. *Zásobování teplem a kogenerace*, 1999. 1. vydání. Brno: FSI VUT v Brně, ISBN 80-214-1347-6.
- [7] DĚMIDOV, P. *Hoření a vlastnosti hořlavých látek*, 1966. Praha: Mír, novinářské závody.
- [8] ATKINS, Peter. *Čtyři zákony, které řídí vesmír*, 2012. První vydání. Praha: Academia, ISBN 978-80-200-2108-3.
- [9] DOLEŽAL, Richard a kol. *Kotle a spalovací zařízení*, 1965. 1. vydání. Praha: SNTL. 424 s. 04-225-65.
- [10] POLESNÝ, Bohumil a kol. *Termodynamická data pro výpočet tepelných a jaderných energetických zařízení*, 1990. Brno: Vysoké učení technické v Československé redakci VN MON, ISBN 80-214-0160-5.
- [11] RAŽNJEVIĆ, Kuzman. *Termodynamické tabulky*, 1984. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 2 sv. Edícia energetickej literatúry (Alfa).
- [12] ŠIMEK, Zdeněk. *Krása a velikost technické chemie*. Praha: Orbis, 1962. Vědění všem (Orbis).
- [13] SMIL, Vaclav. *Energie: průvodce pro začátečníky*. Přeložil Pavel KAAS. Praha: Kniha Zlín, 2018. Tema (Kniha Zlín). ISBN 978-80-7473-634-6.
- [14] VOHLÍDAL, Jiří. JULÁK, Alois. ŠTULÍK, Karel. *Chemické a analytické tabulky*, 1999. První vydání, dotisk 2010. Praha: Grada, ISBN 978-80-7169-855-5.

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Biomasa jako palivo, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2020-10-23]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/03.html>.