

3. Biomasa jako zdroj energie

Autor: [Jiří Škorpík](#) , skorpik@fme.vutbr.cz

Spalování dřeva a dřevního odpadu v kotli na ohřev vody může být nahrazeno například spalováním slámy nebo jiných zbytků rostlinné zemědělské výroby. Podobně při živočišné výrobě vzniká spousta kejdy (hnůj, chlévská mrva), která se může shromažďovat v utěsněných kontejnerech a za pomoci bakterií rozkládat na plynné produkty (methan), který lze spalovat přímo ve spalovacích motorech nebo plynových kotlů. Dnes je aktuální pojem bionafta – nafta obsahující uhlovodíky získávané úpravou biomasy (například lisování plodů řepky olejné). Těmito a podobným způsobům využití biomasy se říká energetické využití biomasy. V ČR se takto v roce 2006 přibližně vyrobilo 40 GWh elektřiny (bez započítání spoluspalování biomasy s uhlím).

Biomasa jako zdroj energie je nesmírně důležitý lokální zdroj, který lze využít v místě nebo nedaleko místa růstu. Což je dáno poměrně vysokými logistickými náklady. Tyto náklady jsou vysoké zejména pro velký objem biomasy vzhledem k využitelné energii, kterou obsahuje. Výkon energetického zařízení jehož palivem je biomasa tedy závisí i na velikosti spádové plochy, na které je biomasa pěstována.



1.239 Zbytky akátové plantáže (2007) u Litobratřic, která byla hlavním zdrojem topiva v obci ještě v první polovině 20. století.

Rostlinná biomasa

Rostlinná biomasa (jiný název **fytomasa**) se skládá převážně z organické hmoty, vody a nízkého obsahu "nehořlavých" minerálů tzv. popeloviny (termín užívaný při spalování biomasy). Každá rostlinná biomasa se skládá z organických prvků C, H, O, N dále ve většině případů obsahuje další hořlavinu jako je S, Ch nebo jiné neorganické hořlavé prvky, nehořlavé neorganické prvky (minerální) a přirozeně H₂O. Většinu organické hmoty získává rostlinná biomasa během růstu ze vzduchu, vodu a minerály z půdy:

44	4	34,7	0,9	0,4	4	12	%
C	H	O	N	S	A	w	
organická hmota 83,6 %							

hořlavina 84%							

suchá hmota 88 %

celková hmota 100 %

2.240 Příklad prvkového složení biomasy – obilná sláma.

C uhlík; H vodík; O kyslík; N dusík; S síra; A popelovina; W voda. Do obsahu síry je započítán i obsah chlóru. Zdroj dat [1].

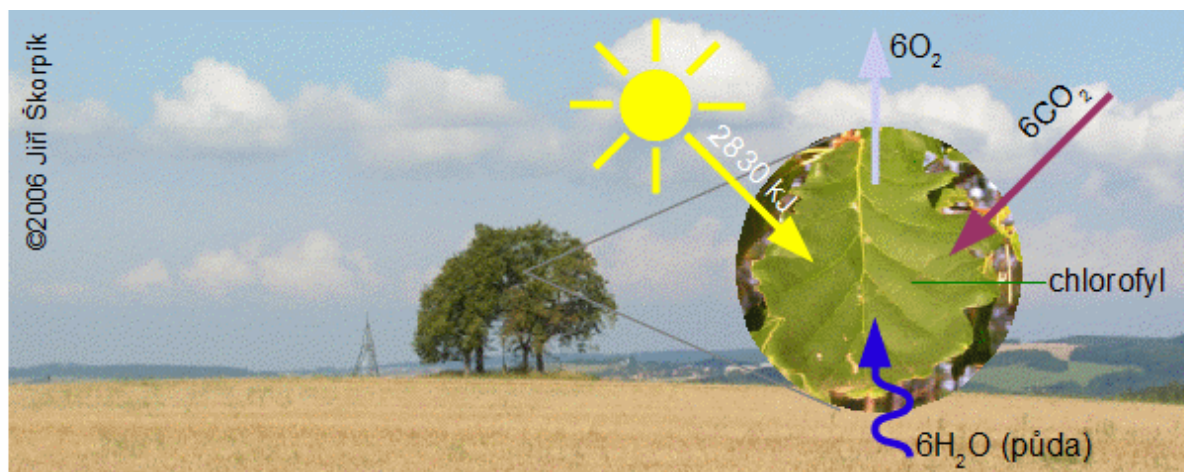
Rostlinná biomasa by síru a chlór neměla vůbec obsahovat (v tak velkém množství). Tyto prvky se do biomasy dostávají přímo nebo nepřímo z atmosféry kam se dostávají z větší části díky lidské činnosti a z menší přírodním katastrofám (výbuch sopky...).

Popelovin je v rostlinné biomase velice málo od 0% až po několik málo procent. Jsou to minerály pocházející z půdy. Proto výrobce kotlů na dřevoplyn s dokonalým spalováním uvádí, že popel z tohoto kotle stačí vynést jednou za několik dní. Popel je tvořen ideálně pouze těmito minerály (především u dřeva) a z velké části hrubými nečistotami, které byly do kotle přineseny spolu s palivem (hlína, prach...).

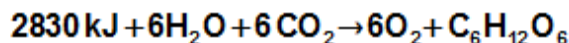
Fotosyntéza a vznik rostlinné biomasy

Základním stavebním kamenem rostlinné biomasy jsou organické látky. Z těchto látek se za pomoci **fotosyntézy** vytváří organická sloučenina glukóza (cukr), která je základním stavebním prvkem rostlinné biomasy a energetickým zdrojem živočichů. Proto všechny organické sloučeniny obsažené ve všech organismech byly vytvořeny ze sloučenin, které byly kdysi primárními produkty fotosyntézy.

Fotosyntéza je proces, při kterém se plynné produkty vzduchu (především CO_2) nejdříve rozloží a potom složí do potřebných organických sloučenin (glukózy) za pomoci **sluneční energie**. Fotosyntéza probíhá za přítomnosti chlorofylu, který je obalen dvojitou membránou. Pigmenty chlorofylu zachytávají **světlo** pomocí něhož rozkládají vodu na kyslík a ionty vodíku H^+ tomuto ději se říká **fotolýza** (podobný princip jako u palivového článku). Elektrina (putující elektron) a ionty vodíku při tomto ději vzniklé jsou využity k tvorbě organických sloučenin. Kyslík je vypuštěn do atmosféry (představuje polovinu produkce kyslíku při fotosyntéze). Tento popis je značně zjednodušen, vzniku glukózy z CO_2 je doprovázen dalšími procesy při nichž se také uvolňuje kyslík:



3.241 Vznik glukózy a produkce kyslíku při fotosyntéze.



4.561 Vznik glukózy a produkce kyslíku při fotosyntéze – textový zápis reakce.

Fotosyntéza je tedy reakcí endotermickou, energii spotřebovává. $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ je glukóza, která později slouží k tvorbě biomasy jako je například celulóza. Účinnost fotosyntézy je mezi 0 až 3 % viz úloha níže. Opakem fotosyntézy jsou typické oxidační reakce jako [hoření](#) nebo složitějším procesem jako je transformace energie v živé [buňce](#), kdy pomocí enzymu při sloučení glukózy (upravené organismem) s kyslíkem vznikne opět voda a CO_2 + energie. Při hoření se rozpadají molekuly glukózy a slučují s kyslíkem, množství takto uvolněné energie se nazývá [spalné teplo](#) popřípadě [výhřevnost](#).

Vysušená biomasa má výhřevnost kolem $15 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ přičemž na 1 m^2 za rok lze vypěstovat jen 0,5 až 1 kg rostlinné biomasy výjimečně 2,5 kg (energetické rostliny). Pokuste se přibližně určit efektivitu ukládání sluneční energie dopadající na m^2 v biomase.

Úloha 1.562

 $\eta \text{ [%]} 0,2..1^1$

Výsledky k Úloze 1.

¹Poznámka

Čistě energeticky k výsledku nelze přistupovat, protože růst biomasy má i jiné efekty, které nelze vyjádřit energeticky. 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). Dále vyrábí kyslík....

Výnosy

Výnosy v přepočtu na potenciálně získanou energii v biomase v podmínkách ČR jsou uvedeny v následující tabulce:

Plodina (termín sklizně)	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	Vlhkost [%]	Výnos [t/ha]		
			min.	prům.	opt.
Sláma obilovin (VII.X)	14 ²	15	3	4	5
Sláma řepka (VII)	13,5	17-18	4	5	6
Energetická fytomasa-orná půda (X-XI)	14,5	18	15	20	25
Rychle rostoucí dřeviny-zem. půda (XII-II)	12	25-30	8	10	12
Energetické seno-zem. půda (VI;IX)	12	15	2	5	8
Energetické seno-horské louky (VI;IX)	12	15	2	3	4
Energetické seno-ostatní půda (VI-IX)	12	15	2	3	4
Rychle rostoucí dřeviny-antropogenní půda (XII-II)	12	25-30	8	10	12
Jednoleté rostliny-antropogenní půda (X.XI)	14,5	18	15	17,5	20
Energetické rostliny-antropogenní půda (X.XII)	15	18	15	20	25

5.242 Energetický výnos rostlinné biomasy v podmínkách ČR.

Zdroj dat [4] publikováno v [5].

²Poznámka

Z jednoho hektaru lze tedy získat kolem 16 000 kWh. Pro představu roční spotřeba tepla (teplá voda+topení) rodinného domku (nezateplený) může převyšovat 25 000 kWh.

Typy konverzí biomasy pro energetické účely

Organické sloučeniny v kyslíkovém prostředí podléhají rozkladu. Se vzdušným kyslíkem reaguje i povrch lidského těla, který musí být neustále regenerován jinak by časem došlo k rozložení všech organických sloučenin v lidském těle³. Podobně reaguje i povrch ostatní biomasy. Odumřelá větev stromu se časem vlivem interakce se vzdušným kyslíkem také rozpadá, 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 CO₂, H₂O. Při tomto rozkladu se uvolňuje energie ve formě tepla. Rychlost rozpadu při běžných venkovních podmínkách není ale tak velká, aby uvolněné teplo významně zvýšilo okolní teplotu. Rychlost uvedeného rozkladu významně závisí na teplotě okolí (roste přibližně 2 až 3x při zvýšení o 10 °C), na vzdušnosti okolí a klimatických podmínkách.

³Zajímavost

Vlivu stárnutí tedy reakcí se vzdušným kyslíkem podléhá i plast. Tuto reakci urychluje přítomnost slunečního světla (především UV složka) a tepla, proto se do plastů přimíchává tzv. antioxidanty. Daleko horší je pro plast ztráta jeho vlastností vlivem přetváření jeho makromolekul způsobené stárnutím (křehne).

Biomasa se rozkládá i bez přítomnosti kyslíku (mnohem pomaleji) jednak reaguje uhlík s kyslíkem v biomase na CO, ale především uhlík reaguje s vodíkem na CH₄. K rozkladu bez přítomnosti kyslíku, ale dochází pouze při vyšších než pokojových teplotách nebo za přítomnosti bakterií. Rozkladu či hoření za přítomnosti kyslíku nazýváme **aerobní** a bez přítomnosti kyslíku **anaerobní**.

Biomasa tedy reaguje ve velké míře s kyslíkem a i bez přítomnosti kyslíku podléhá rozkladu. Procesy jenž vedou k rozpadu biomasy se různým způsobem využívá k získávání paliva, energie a jiných produktů:

typ konverze	způsob konverze biomasy	energetický výstup	odpadní materiál nebo druhotná surovina
	spalování ⁶	teplo	popeloviny
thermochemická ⁴	zplyňování ⁷	generátorový plyn a teplo	dehtový olej ----- uhlíkaté palivo
	pyrolýza ⁸	generátorový plyn	dehtový olej -----

			pevné hořlavé zbytky
biochemická ⁵	alkoholová fermentace ⁹	etanol, methanol	vykvašený substrát
	aerobní fermentace ¹⁰	teplo	fermentovaný substrát
	anaerobní fermentace ¹¹	bioplyn	fermentovaný substrát
fyzikálně-chemická ¹²	esterifikace bioolejů	metylester biooleje	glycerin

6.243 Typy konverzí biomasy pro energetické účely.

^{4, 5}Poznámka

Termochemické konverze se označují i jako suché procesy, a biochemické konverze se označují jako mokré procesy zpracování biomasy.

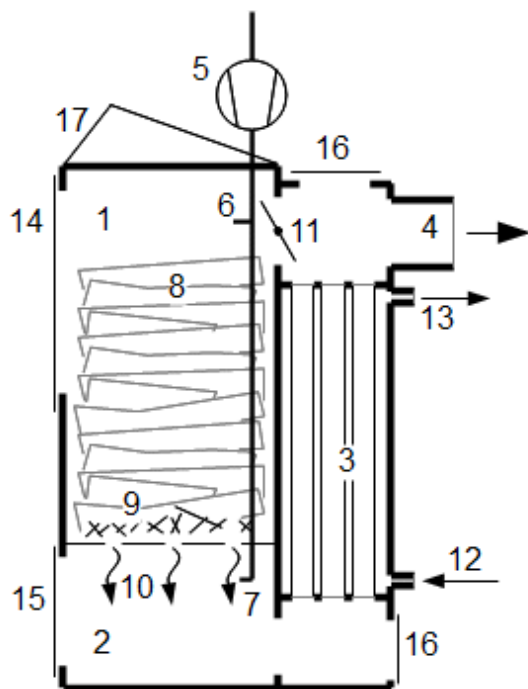
⁶Spalování

Při spalováním hoří pevný uhlík případně vodík obsažený v palivu i unikající plynné látky z biomasy ve společném prostoru (topeniště). Vzduch je pokud možno přiváděn ve všech částech topeniště.

⁷Zplyňování

Při zplyňování (nedokonalé spalování) hoří pevný 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). Na obrázku níže je zjednodušený řez teplovodním zplyňovacím kotlem s pevným ložem na ohřev vody pro ústřední vytápění, ve kterém je palivem kusové dřevo. Do horní komory, která je zároveň i zásobníkem paliva 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 spalovací komory, kde je přiveden další vzduch (sekundární), kde shoří vzniklé CO a další hořlavé plyny. Vzniklými horkými spalinami se ohřívá voda. Při zplyňování v zařízení s pevným ložem probíhá hoření při atmosférickém tlaku a nižších teplotách. Dále se uvolňují dehtové látky a odpadní fenolové vody [6]. Existují i jiné způsoby zplyňování [3], ale podstata zůstává stejná. Například zplyňování při tlaku až 2,5 MPa 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, ale existují i způsoby zplyňování, u kterých je podíl dusíku mnohem menší a výhřevnost až 14 MJ·m⁻³). Tento plyn nebývá okamžitě spalován za pomoci primárního vzduchu ale zbaven tuhých částic (filtry) a chlazen. Vzniklý 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. Výhodou zplyňování je vysoká účinnost využití energie v palivu a nižší škodlivé emise oproti klasickému spalování. Nevýhodou je složitější zařízení.



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

1 zásobník paliva; 2 spalovací komora; 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 spalínová klapka (slouží k rozdělení ohně, kdy je otevřena v okamžiku, kdy se začne dřevo zplyňovat se tato 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.

©2006 Jiří Škorpík

⁸Pyrolýza

Pyrolýza je termický rozklad biomasy bez přístupu kyslíku. Tímto způsobem se vyrábí například dřevěné uhlí. Většina v současné době provozovaných pyrolýzních systémů je založena na termickém rozkladu odpadu v rotační peci vytápěné zevně spalinami, které vznikají z následného spalování pyrolýzních plynů v tzv. termoreaktoru. K ohřátí biomasy lze použít přímo i horkého inertního plynu (neobsahující kyslík).

V závislosti na dosažené teplotě, lze při pyrolytickém procesu pozorovat řadu dějů, které je možné pro jednoduchost rozdělit do 3 teplotních intervalů. V oblasti teplot do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálním odštěpením vody. Tyto 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. Produkty pyrolýzního rozkladu kusového dřeva jsou uvedeny v tabulce níže.

Zahříváním dřeva bez přístupu vzduchu nezačne hořet pevný uhlík z něhož se skládá zbytek dřeva pokud teplota nedosáhne na teplotu hoření uhlíku – vznikne dřevěné uhlí, které se využívá například ke kování, jako palivo pro grilování (dřevěné uhlí je totiž čistý uhlík a tedy produktem spalování je pouze CO₂, který je bezbarvý a bezpachý, což je při opékání to nejpodstatnější, pokud by se topilo dřevem tak vlivem velkého prchavého podílu by oheň dýmil a jeho kouř by obsahoval velice mnoho pro přípravu

jídla nežádoucích látek) nebo i jako hnojivo:

produkty rozkladu	hmotnostní podíl [%]	výhřevnost produktu [kJ·kg ⁻¹]
uhlí	31,8	10215,79
živice	15,8	4689,22
kyselina octová	7,08	1009,02
metylalkohol	1,6	355,88
aceton	0,19	62,8
CO ₂	9,96	0
CO	3,32	339,13
CH ₄	0,54	0
C ₂ H ₄	0,19	0
různé organické látky	10,03	1624,48
voda	19,49	0
celkem	100	18296,32

8.245 Produkty rozkladu (pyrolýzou) suchého březového dřeva (bez hrubé vody) a jejich výhřevnost. Tabulka ukazuje produkty rozpadu dřeva při pyrolýze za dokonalých podmínek. Při běžném pyrolýzním rozpadu je množství vzniklého uhlí nižší, přibližně 10%, zvýší se tedy poměr vzniklých plynných produktů. Zdroj [7].

⁹Alkoholová fermentace

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ katalyzátorem této reakce je enzym (obsažený v kvasinkách), který urychluje přírodní procesy [2, s. 252], CH_3CH_2OH je Ethanol (alkohol – líh). Toto kvašení probíhá bez přístupu vzduchu. Alkohol je velice dobré palivo a v některých případech může být náhražkou za kapalná fosilní paliva. Zdrojem pro alkoholové kvašení ve velkých objemech vhodné pro energetické využití je cukrová třtina, která se nejvíce pěstuje v Brazílii, proto je tam nejvíce tento druh paliva i využíván.

¹⁰Aerobní fermentace

$CH_3CH_2OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$ jedná se o pokračování kvašení (předchozího procesu) v případě, že prostor není uzavřen a je přiváděn vzduch. Je nutná přítomnost octových bakterií. Výsledkem může být např. kyselina octová (ethanová kyselina) a voda (mezi přeměnou alkoholu na octovou kyselinu provází vznik mezi produktů jako je acetaldehyd [2, s. 256]). Známý je tento jev, kdy po otevření láhve vína začne kysnout. Ocet obsahuje pouze 5 až 8% kyseliny octové.

¹¹Anaerobní fermentace

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$ spočívá v mikrobiologické transformaci organických složek zvířecích exkrementů a jiné vhodné biomasy v podmínkách bez přístupu vzduchu při mírně zvýšené teplotě (35 až 35 °C) přičemž vznikne **bioplyn** a stabilizované hnojivo či kompost. Bioplyn obsahuje 55 až 60% CH_4 , 40 až 45% CO_2 a jiné plyny (1% sirovodík...) [6]. CH_4 se nazývá methan, který má velkou výhřevnost, ovšem při tomto procesu se uvolňuje velké množství vody a čpavku, což může způsobovat korozi zařízení. Tento způsob zplyňování biomasy se často používá u tzv. bioplynových stanic, u kterých se vzniklý plyn spaluje ve spalovacích motorech se el. generátorem.

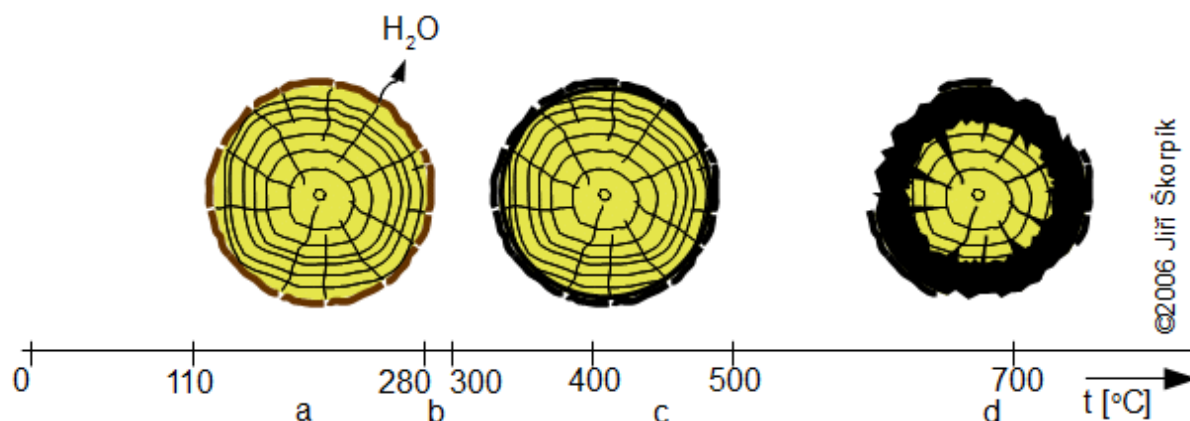
K anaerobní fermentaci na bioplynových stanicích v ČR se používají velké nádrže (cca o objemu $4\ 000\ m^3$) do kterých se dávkuje kejdá obvykle velké množství nařezané kukuřice. Plyn se jímá do rozvodu plynu a rozpadlá biomasa ve formě řídké "kaše" (tzv. fermentovaný substrát) se odčerpává mimo zásobník a většinou se používá jako hnojivo.

¹²Fyzikálně-chemická

Například lisování, drcení. Tímto procesem vzniká například řepkový olej, který se pomocí rafinace vylisovaného oleje například z Řepky olejné může využívat jako tzv. bionafta.

Hoření dřeva

Dřevo (jiný název **dendromasa**) je z energetického pohledu velmi složitý materiál. Protože obsahuje mnoho různých druhů hořlaviny, které mají jinou teplotu hoření, proto hoří při určité teplotě vždy jen určitá část dřeva [7]. Nejdříve je však nutné dřevo zahřát na patřičnou teplotu a odpařit vodu:



9.246 Průběh hoření dřeva.

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

Při zahřívání dřeva na $110\ ^\circ C$ se z něho uvolňuje vlhkost (vázaná voda) při vyšších teplotách dochází k pomalému rozkladu. Tento proces je provázen uvolňováním tepla. Celkové množství tepla uvolněného při rozkladu představuje 5 až 6% jeho výhřevnosti (uvolňují se totiž CH_4 a další uhlíkové řetězce, které „odnáší“ velkou část chemické energie ve svých vazbách sebou do atmosféry. Při teplotách, které odpovídají maximálním výtěžkům plynných produktů (280 až $300\ ^\circ C$) je množství tepla, které se uvolní při rozkladu tak velké, že dřevo je schopné samozahřívání.

Po vznícení unikajících plynných produktů se teplota dřeva zvyšuje sálavým teplem plamene. Při 290 až $300\ ^\circ C$ dochází k největšímu výtěžku plynných produktů. Rozkladem zůstává v horní vrstvě dřeva uhlík (dřevěné uhlí), povrch dřeva má černou barvu a vznik plynných produktů se postupně zastavuje. Teplota uhlí v tomto okamžiku postupně dosahuje 400 až $500\ ^\circ C$. V závislosti na zahřátí horní vrstvy dřeva a jeho

přeměny na dřevěné uhlí probíhá zahřátí níže ležící vrstvy dřeva na $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dochází k jejímu rozkladu. Postupné zvětšování vrstvy uhlí je provázáno zvyšováním jeho teploty na $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zmenšováním množství tepla, odevzdaného rozkládající se vrstvou dřeva. V důsledku toho se výtěžek plynných produktů zmenšuje a plamen se nevytváří nad celým povrchem hořícího dřeva, ale jen nad trhlinami v uhlí. K takovému okamžiku hoření dochází při síle vrstvy uhlí $1,5$ až 2 cm . Zápalná teplota uhlíku na CO_2 je $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, methanu již $597\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vodík snižuje zápalnou teplotu uhlíku). Z těchto důvodů pokud nedosáhne teplota dřeva zápalné teploty uhlíku dřevo zcela neshoří. Například při požáru řídkých dřevěných konstrukcí nemusí být vývin tepla takový, aby shořela celá konstrukce a z mohutných dřevěných trámů se stanou ohořelé pahýly s vrstvou dřevěného uhlí, ale s relativně nepoškozeným jádrem trámu viz *Obrázek 9d.* a konstrukce se nemusí zřítit.

Spalování biomasy

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

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. Teplo, které se při těchto reakcích dohromady uvolní je spalné teplo. Při výpočtu spalného tepla lze vycházet z prvkového rozboru paliva (zastoupení jednotlivých prvků v palivu) a z následující tabulky, ve které jsou uvedeny nejčastější chemické reakce při hoření:

prvek nebo sloučenina	molární hmotnost [kg/kmol]	molární objem [m ³ n/kmol]	reakce s kyslíkem	uvolněné teplo ΔH [MJ/kmol]
C	12,01	-	$2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	110,55 393,69
CO	28,01	22,4	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	283,2
H ₂	2,016	22,43	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	241,87
N ₂	28,016	22,4	záleží na přebytku kyslíku a množství N v palivu	
S	32,06	-	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	295
C _m H _n m=1; n=4 m=3; n=8	16,04 44,09	22,36 21,92	reakce A	reakce B
O ₂	32	22,39		
Ar	39,944	22,39	INERTNÍ PLYN	
CO ₂	44,01	22,26		
SO ₂	64,06	21,89	PRODUKTY HOŘENÍ	
H ₂ O	18,016	22,4		

reakce A: $C_mH_n + (m+n/4)O_2 \rightarrow m \cdot CO_2 + (n/2)H_2O$

reakce B: $m \cdot q(C_m) + (n/2) \cdot q(H_n)$

10.247 Tabulka chemických reakcí při hoření.

$q(C_m)$; $q(H_n)$ [MJ·kmol⁻¹] spalné teplo příslušného množství atomů jednotlivých prvků.

V mnoha případech je množství uvolněné energie změřeno experimentálně a spalné teplo či výhřevnost se u jednotlivých paliv většinou už počítat nemusí.

Stanovení množství spáleného kyslíku respektive spotřebu vzduchu při dokonalém hoření se vypočítá z příslušných reakcí stejně tak, jako výsledné složení spalin. Přitom lze vycházet z uvedené *Tabulky 10*, ze které lze přepočítat například i hmotnost daného plynného prvku či sloučeniny ze znalostí objemového množství.

Vypočítejte objemové množství vzduchu nutného pro dokonalé spálení 1 kg slámy a objemové množství a složení spalin. Součinitel přebytku vzduchu $\alpha=1$.

Úloha 2.564

Prvkový rozbor slámy		Prvkový rozbor vzduchu	
prvek	kg/kg pal	prvek	m ³ n/m ³ n, vz
ω_C	0,449	ω_{O_2}	0,21
ω_H	0,054	ω_{N_2}	0,78
ω_O	0,48	ω_{Ar}	0,01
ω_N	0,017		

Tabulka složení paliva a spalovacího vzduchu k Úloze 2.

V _{vz}	[m ³ n · kg ⁻¹ pal]	3,81147	V _{CO₂, sp}	[m ³ n · kg ⁻¹ pal]	0,83
V _{Ar, sp}	[m ³ n · kg ⁻¹ pal]	0,04	V _{H₂O, sp}	[m ³ n · kg ⁻¹ pal]	0,6
V _{N₂, sp}	[m ³ n · kg ⁻¹ pal]	2,989			

Úloha 2: výsledek.

Ve vzduchotěsné ohnivzdorné sušárně dřeva o objemu 95 m³ vznikl požár. Vypočítejte jaké množství dřeva (v kg) v místnosti může shořet. Hoření se zastavuje, když obsah kyslíku ve vzduchu je 16%. Uvažujte dokonalé spalování, zanedbejte objem dřeva v místnosti tj. objem vzduchu je stejný jako objem místnosti. Prvkový rozbor vzduchu převezměte z předchozí úlohy.

Úloha 3.563

Úloha převzata z [7].

prvek	kg/kg	prvek	kg/kg
ω_C	0,49	ω_N	0,02
ω_H	0,05	ω_W	0,04
ω_O	0,4		

Tabulka složení dřeva k Úloze 3.

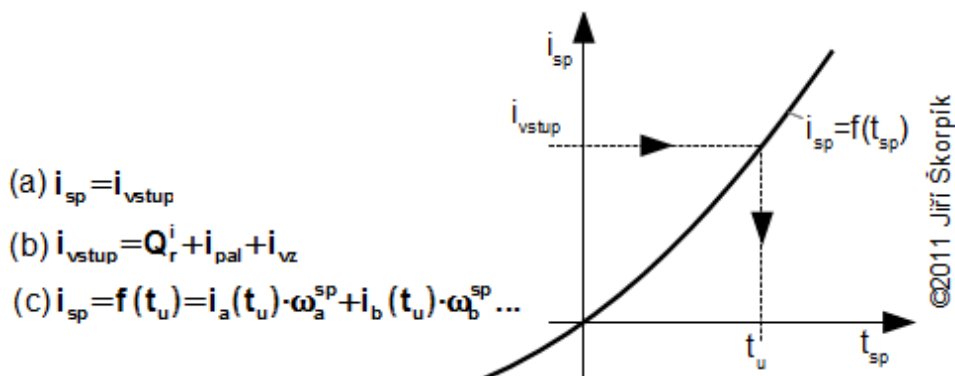
m [kg] 5,21

Úloha 3: výsledek.

Teplotu nechlazeného plamene lze vypočítat z [entalpie](#) spalin¹³. 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) a funkci $i_{sp}=f(t)$.

¹³Entalpie spalin - entalpie směsi plynů

Charakteristickou veličinou pro daný plyn je jeho měrná entalpie, která je vztažena buď na 1 kg směsi $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ nebo na 1 m^3_n kde n značí normální (jedná se o objem při normálních podmínkách, které bývají definovány při [atmosférickém tlaku](#) a $0 \text{ }^\circ\text{C}$). V ideálním případě (dokonalé spalování) entalpie spalin odpovídá výhřevnosti paliva, to znamená, že při hoření se netransformuje energie spojená se slučováním molekul pouze na [vnitřní tepelnou energii](#) spalin, ale také na [tlakovou energii](#). Při spalování paliva ve volném plynném prostředí zvětšující se objem spalin musí totiž vykonat i práci [8, s. 36] (ale velikost této práce vzhledem k uvolněné energii není velká, a proto se při výpočtu zanedbává).



11.700 Výpočet teploty spalin (nechlazeného plamene).

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_r^i [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] výhřevnost paliva; i_a [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] měrná entalpie spalin a složky spalin při teplotě hoření; i_b [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] měrná entalpie spalin b složky spalin při teplotě hoření; ω_a [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] hmotnostní podíl a složky ve spalinách; ω_b [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] hmotnostní podíl b složky ve spalinách atd. Podle složení spalin a entalpie jednotlivých jejich složek (viz tabulky v [9, s. 350], [10], [11] nebo výpočet měrné entalpie pomocí měrné [tepelné kapacity při stálém tlaku](#)) se zkonstruuje funkce $i_{sp} = f(t)$ a z množství vstupní entalpie odečte přibližná teplota nechlazeného plamene.

Vypočítejte teplotu nechlazeného plamene při hoření slámy z Úlohy 2.

Úloha 4.701

$$t_u \text{ [}^\circ\text{C]} = 1842,9$$

Úloha 4: výsledek.

Ve skutečnosti bude teplota nechlazeného plamene mnohem menší, protože při reálném spalování se používá významný přebytek spalovacího vzduchu a samotné hoření neprobíhá dokonale.

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, *Konference OZE 2010*, 2010. Kouty nad Desnou. Dostupné z <http://files.tretiruka.cz/200001013-a770ca86ad/109.pdf>.
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).

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Biomasa jako zdroj energie, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2011-08]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/03.html>.

©Jiří Škorpík, [LICENCE](#)

www.transformacni-technologie.cz

Přílohy

$$V_{sp} = N_{2,sp} + Ar_{sp} + CO_{2,sp} + N_{2,sp} = 4,4594 \text{ m}_n^3 \cdot \text{kg}_{pal}^{-1}$$

Tabulka výsledků

	$[\text{m}_n^3 \cdot \text{kg}_{pal}^{-1}]$	$[\text{m}_n^3 \cdot \text{kg}_{pal}^{-1}]$
V_{vz}	3,8147	$N_{2,sp}$ 2,9890
V_{sp}	4,4594	$CO_{2,sp}$ 0,8322
Ar_{sp}	0,0381	H_2O_{sp} 0,6000

592 Příloha článku [4. Využití energie větru](#)

Řešení Úlohy 592

Cílem je vypočítat poměr mezi skutečně vyrobenou elektrickou energií a elektrickou energií, kterou by elektrárny vyrobily při stálém maximálním výkonu:

$$\eta = \frac{E}{E_{max}}, \quad E = 49,1 \text{ GWh}.$$

$E_{max} = P_{inst} \cdot 365 \cdot 24$,
 P_{inst} [GW] instalovaný výkon ve větrných elektrárnách mezi roky 2005 a 2006.

Instalovaný výkon P_{inst} se během uvedených let měnil z hodnoty 21,99 MW na 43,75 MW. Z těchto důvodů budeme pro přibližné stanovení vycházet z průměrného instalovaného výkonu:

$$P_{inst} = \frac{P_{inst,2005} + P_{inst,2006}}{2} = 32,87 \text{ MW}.$$

$$E_{max} = 287,9412 \text{ GWh}.$$

$$\eta = 0,1705.$$

Pro zajímavost v roce 2005 byla průměrná využitelnost instalovaného výkonu dvou větrných elektráren v Jidřichovicích pod smrkem 10 %. Břežany mají 11,9 % (2006) viz ERU.

593 Příloha článku [4. Využití energie větru](#)

Řešení Úlohy 593

$$\frac{P_{t,15}}{P_{t,5}} = \frac{\frac{1}{2} A \rho \cdot c_{1,15}^3}{\frac{1}{2} A \rho \cdot c_{1,5}^3} = \frac{c_{1,15}^3}{c_{1,5}^3} = \frac{15^3}{3^3} = 27 \quad [4.217].$$

Rychlost větru klesla 3x avšak výkon elektrárny 27x.

620 Příloha článku [6. Tepelné oběhy a jejich realizace](#)

Odvození rovnic pro výbušný (Ottův) oběh

Teplo je do oběhu přiváděno při izochorické změně na úseku 2-3 [6.620]:

$$q_D = \int_2^3 du + \int_2^3 p \cdot dv \quad [43.956],$$