

Prof. Ing. František HRDLIČKA, CSc.
Ing. Jan Hrdlička
ČVUT v Praze
Fakulta strojní

Spalování biomasy – zdroje obnovitelné energie



Biomass Combustion as a Source of Renewable Energy

Recenzent
doc. Ing. Jiří Hemerka, CSc.

Článek se zabývá využitelností obnovitelných zdrojů energie se zaměřením na spalování biomasy. Na základě laboratorních experimentů uvádí vlastnosti hořlaviny biomasy, prvkový rozbor paliva, popela i složení emisí při spalování. Upozorňuje na možnost vzniku emisí toxických dioxinů – pro jejich omezení je nutná správná konstrukce spalovacích zařízení i správná volba druhu porostů energetické biomasy.

Klíčová slova: biomasa, obnovitelné zdroje energie, spalování, emise, dioxin

The article deals with the applicability of renewable energy sources aimed primarily at biomass combustion. On the basis of laboratory experiments the article shows the biomass properties, analysis of fuel and ash elements and also the composition of combustion emissions. It draws attention to the possibility of producing toxic dioxins emissions. To limit these emissions an appropriate design of combustion equipment and a right choice of vegetation kinds for energy biomass are necessary. These approaches are presented in the article.

Key words: biomass, renewable energy sources, combustion, emissions, dioxins

1. ÚVOD

Vývoj spotřeby energie na Zemi se v posledních dvou stoletích vyznačuje progresivním růstem, který souvisí jak s demografickým vývojem, tak především s industrializací lidské společnosti spojené s významným růstem individuální i kolektivní spotřeby obecně. 19. i 20. století se vyznačovalo naprosto jednoznačným trendem orientace opatřování energie na fosilní paliva. Až druhá polovina 20. století a zejména tzv. 1. ropná krize, se stávají bodem postupného obrátu k šetrnějšímu přístupu ke zdrojům energie a významnější orientací na obnovitelné zdroje energie. Dva z možných scénářů světové spotřeby primárních zdrojů energie zpracované firmou SHELL [1]

jsou uvedeny na obr.1. Oba scénáře uvažují s významným podílem nových zdrojů obnovitelné energie, které by měly krýt nárůst spotřeby.

Česká republika má velmi omezené zdroje fosilních paliv, které jsou reprezentovány téměř výhradně černým a hnědým uhlím. Zejména hnědé uhlí, které je dosud významným a laciným zdrojem latentního chemicky vázaného tepla se vyznačuje i v evropském měřítku významně vysokým měrným obsahem spalitelné síry a popelovin. Tato skutečnost a světový trend k vyššímu využívání obnovitelných energetických zdrojů zvýrazňují nezbytnost usměrňování energetické strategie na podporu využívání těchto obnovitelných energetických zdrojů a na vyšší energetickou efektivnost využívání existujících zásob fosilních paliv.

Situace v zemích EU je z hlediska závislosti na fosilních palivech obdobná a proto byla EU přijata direktiva, která předpokládá významné zvýšení využívání obnovitelných zdrojů energie ve dvou desetiletích mezi roky 2000–2010 a následně do roku 2020.

Domníváme se proto, že je vhodné ukázat starší hodnocení EU možnosti využívání obnovitelných zdrojů v ČR a dalších transformačních zemích střední a východní Evropy, které je uvedeno na obr. 2 [2].

Cílové optimistické procento předpokládané náhrady celkové spotřeby energie, tj. 8 % v ČR v roce 2020, se jeví jako velmi reálné ohodnocení možnosti našeho obnovitelného energetického potenciálu i možnosti investičního kapitálu při vhodné legislativní a dotační podpoře. Na rozdíl od tohoto reálného hodnocení využitelnosti obnovitelných zdrojů pro pokrytí celkové energetické spotřeby ČR se jeví snaha o dosažení 8 % pokrytí výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů do roku 2010 jako nereálná

nebo uskutečnitelná za cenu hrubé deformace tržních vztahů v oblasti domácích energetických zdrojů, a to v neprospěch výroby tepla z biomasy. Již dosavadní zvýšení cen odpadní biomasy na více než dvojnásobek za poslední 3 roky významně poškodilo zejména občany, kteří se rozhodli pro využití biomasy k vytápění a do tohoto státem podporovaného zásobování teplem investovali.

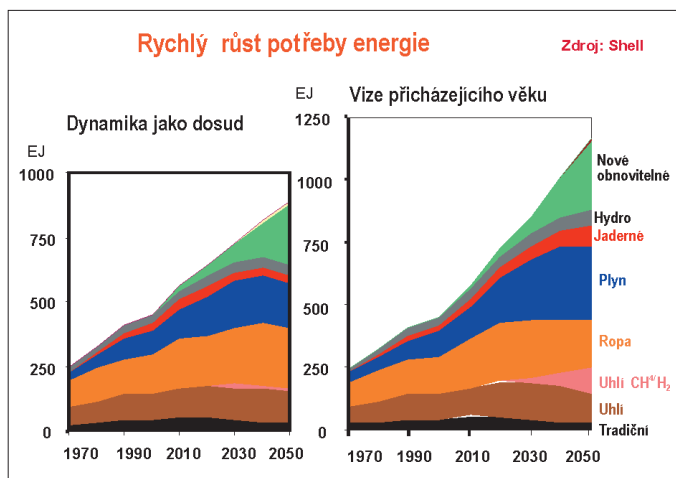
Zdroje obnovitelných energií jsou v ČR charakterizovány relativně vysokou mírou využívání hydrologického potenciálu (zejména v posledních letech došlo k významné rehabilitaci využívání potenciálu dříve silně zanedbaných malých vodních elektráren), geograficky a dosud také investičně nevýhodnou možností přímé transformace sluneční energie na elektrickou fotovoltaickými články a pouze malým počtem lokalit vhodných pro vyšší využívání energie větru. Do výčtu technologií využívání obnovitelných zdrojů energie nezahrnujeme zařízení vhodná pouze pro čistě lokální nízkopotenciální transformace energie typu sluneční kolektory, apod. Na pomezí obou skupin výše zmíněných obnovitelných energetických zdrojů je obnovitelný zdroj využívaný dosud značně omezeně a to biomasa.

Charakterizujeme tento zdroj jako zdroj, který možnostmi svého využívání patří jak do kategorie ryze lokální (přímá výroba tepla pro spotřebu v domácnostech) až po zdroj střední až velké kategorie, který je schopen produkovat energii na nejvyšší potenciální úrovni, tzn. elektrickou energii, nebo pracovat jako zdroj kogenerační s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny.

Prvním významným krokem pro zlepšení využívání obnovitelných zdrojů energie bylo schválení zákona „o hospodaření energií“ č. 406/2000 Sb. a příslušných prováděcích vyhlášek a v současné době novelizace tohoto zákona. Tímto legislativním rámcem jsou podporovány obnovitelné zdroje energie a proto i využívání biomasy pro energetické účely. Další podpůrný krok pro využívání obnovitelných zdrojů energie učinil Regulační úřad vyhlášením povinných výkupních cen elektrické energie produkované obnovitelnými zdroji energie. Tento podpůrný krok však nemá charakter legislativní.

2. ENERGIE SLUNCE A BIOMASA

Sluneční záření, které dopadá na Zemi je základním zdrojem energie, kterou považujeme z hlediska délky lidského života, respektive délky trvání homo sapiens sapiens na Zemi, za zdroj trvalý. Tento zdroj je nezávislý na zásobách energie, které jsou k dispozici na Zemi a které využíváme s vě-



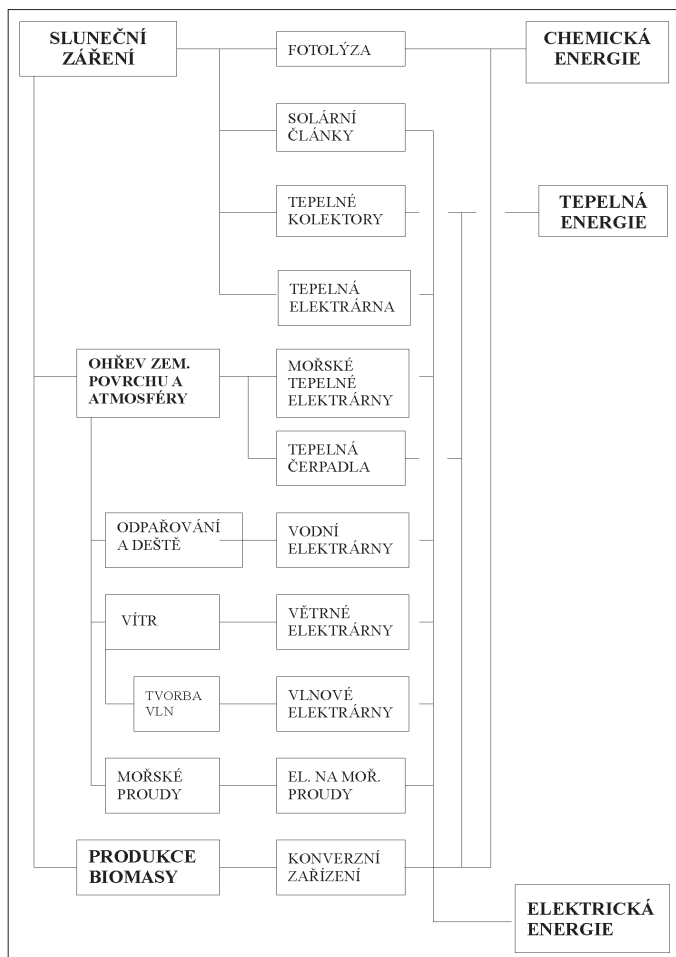
Obr.1 Scénáře světové spotřeby primárních zdrojů energie [1]

domím, že je nelze obnovit. Jedná se především o fosilní paliva a do jisté míry i o jaderná paliva na bázi uranu.

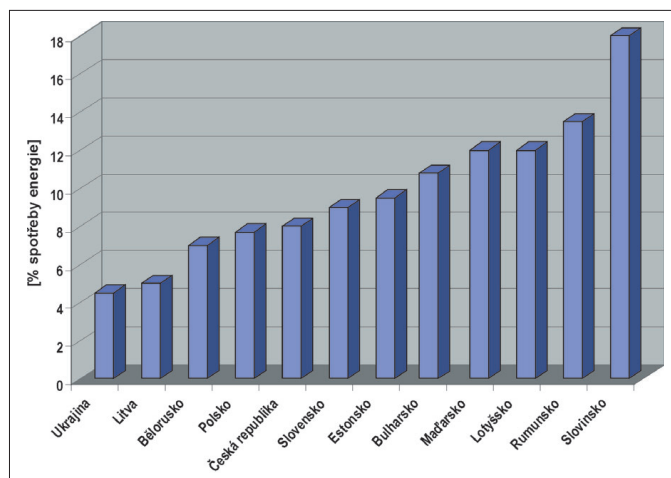
Slunce proto můžeme považovat za zdroj obnovitelné energie, kterou můžeme využívat. Formy využitelné sluneční energie naznačuje schéma uvedené na obr. 3.

Z obr. 3 je zřejmé, že biomasa je pouze jedním z řady možných způsobů, jak využít energii Slunce. Zásadní předností biomasy je přímá možnost konverze do všech tří užitečných forem energie – tepelné, elektrické i chemické.

Z pohledu České republiky je biomasa potenciální obnovitelný zdroj, který je z hlediska reálného využití nejnadějnější.



Obr.3 Možnosti využití sluneční energie

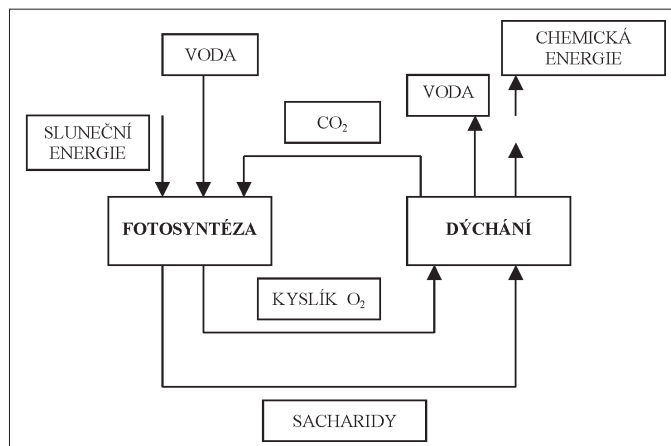


Obr.2 Procentuální podíl obnovitelných zdrojů jako primárních zdrojů energie v zemích východní Evropy – výhled do roku 2020

3. FOTOSYNTÉZA A DÝCHÁNÍ ROSTLIN

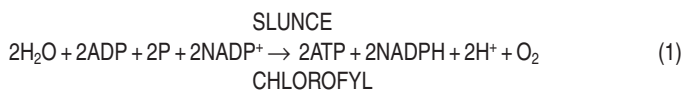
Význam biochemických pochodů při tvorbě biomasy je zdůrazněn tím, že na stavbu biomasy je spotřebováván skleníkový plyn CO₂ a současně je do ovzduší produkován uvolněný kyslík. Tato reakce probíhá při působení slunečního záření, tedy nikoliv v noci, kdy rostliny CO₂ produkují (výrazně méně než je konzumace ve dne), ale současně je uvolňována energie pro syntézu stavebních látek rostlin.

Tvorba produktů fotosyntézy a jejich přeměna dýcháním rostlin je uvedena na obr. 4.



Obr.4 Tvorba produktů fotosyntézy a dýchání rostlin

Reakce slunečního záření při fotosyntéze je popisována vztahem



kde

ADP – adenosindifosfát,

P – fosforečnanový aniont (fosfát),

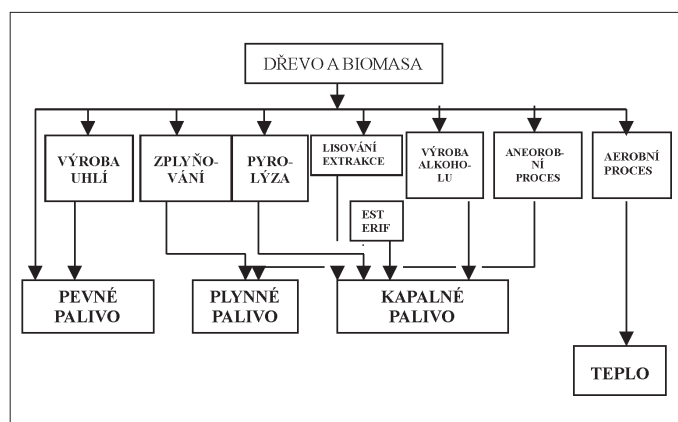
NADP⁺ – nikotinamid adenindinukleotid fosfát,

ATP – adenosintrifosfát,

NADPH – nikotinamid adenindinukleotid fosfát hydrogenovaný,

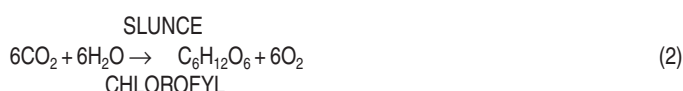
H⁺ – vodíkový atom,

ATP a NADPH jsou stabilní energetické produkty reakce slunečního záření.



Obr.5 Možnosti využití biomasy

Proces asimilace CO_2 rostlinami popisuje tzv. sumární reakce



kde konečným energetickým produktem fotosyntézy jsou cukry $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$.

4. MOŽNOSTI VYUŽITÍ BIOMASY JAKO ZDROJE ENERGIE

Jak již bylo řečeno, biomasa patří k typu obnovitelného zdroje, který je schopen transformace na teplo, elektrickou energii i na chemicky vázanou energii (obr. 2). Tato zcela zřejmá přednost biomasy však není obecně vázána na jakýkoliv druh a stav biomasy, ale konkrétní použití záleží na celé řadě vnějších i vnitřních faktorů. Za nejvýznamnější vnější faktor je obsah vody v biomase, vnitřní faktory (respektive biologické složení biomasy) je vázáno na konkrétní druh biomasy.

Jednotlivé transformační možnosti biomasy jsou uvedeny na obr. 5.

4.1 Biomasa jako palivo

Biomasa, respektive dřevo, bylo do poloviny 18. století prakticky jediným palivem využívaným pro získávání užitečné tepelné energie člověkem. V 19. století tuto dominantní pozici dřevo ztratilo ve prospěch fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn). Druhá polovina 20. století je charakterizována návratem biomasy mezi významné položky palivové bilance i v technicky vyspělých zemích a to právě proto, že se jedná o obnovitelný zdroj energie.

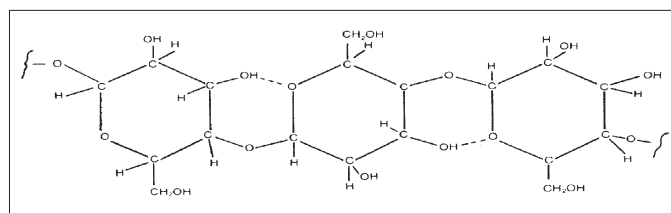
Ve scénáři využívání obnovitelných zdrojů energie by měla biomasa sehrát velmi významnou roli, protože energetický potenciál v ČR lze hodnotit pouze v oblasti tzv. bioodpadu (hobliny, piliny, štěpka, kůra, odpad z výroby buničiny, nevyužitý zemědělský odpad apod.) hodnotou 10 PJ. Tato hodnota nezahrnuje novy, potenciálně stejně významný, zdroj biomasy a to cílené pěstování energetické biomasy na zemědělských pozemcích dosud využívaných pro klasické zemědělské plodiny.

Rostlinná hmota v surovém stavu je charakterizována vysokým hmotnostním podílem vody a charakteristickým složením sušiny s absolutní převahou dvou prvků C – uhlíku a O_2 – kyslíku. Obsah nespalitelných látek v sušině je variabilní, ale obecně velmi nízký s maximem do cca 5 % hm.

Chemické složení biomasy

Biomasa se skládá z následujících hlavních složek:

- ☐ stavební složky,
- ☐ popeloviny,
- ☐ extrahovatelné složky,
- ☐ voda.



Obr. 6 Vzorec chemického složení celulózy biomasy

Stavební složky: celulóza, hemicelulóza, lignin; 70 až 90 % suché hmoty rostliny.

Extrahovatelné složky: pryskyřice, vosky, pigmenty; 4 až 20 % suché hmoty rostliny.

Popeloviny: anorganické sloučeniny obsažené v rostlině; 0 až 6 % suché hmoty.

Voda: v původní vegetační hmotě cca 40 až 60 %.

Biomasa je vládním nařízením č. 352/2002 Sb. definována jako rostlinný materiál, který lze použít jako palivo pro účely využití jeho energetického obsahu, pokud pochází ze zemědělství, lesnictví nebo z potravinářského průmyslu, z výroby buničiny a z výroby papíru z buničiny, ze zpracování korku, ze zpracování dřeva s výjimkou dřevního odpadu, který obsahuje halogenové sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, a dřevní odpad pocházející ze stavebnictví.

Můžeme proto říci, že čistá (průmyslovým zpracováním neznečištěná) biomasa je považována z hlediska termického zpracování za účelem výroby tepla a elektrické energie za produkt rovnocenný palivu a není v kategorii odpad a to i v případě, kdy vznikla jako odpad konkrétní průmyslové výroby. Důvodem pro takovéto zařazení biomasy nebylo přání zákonodárců preferovat biomasu, ale skutečnost, že tzv. čistá biomasa má z hlediska základního prvkového složení sušiny (vzorku bez obsahu vody) **standardní zastoupení** hlavních posuzovaných prvků (C, H, S, O, N) a má tudíž vlastnosti požadované proto, abychom mohla být ke kategorii **palivo** přiřazena. Přesto však má biomasa určitou zásadní odlišnost od pevných fosilních paliv, ke kterým je přiřazena.

Biomasu lze z hlediska složení popsat následujícím vztahem

$$h + A + W = 1 \quad (3)$$

kde je

- h – hmotnostní podíl hořlaviny [kg.kg⁻¹]
- část hořlaviny se po ohřátí paliva uvolní v plynné formě a nazýváme ji *prchavý podíl* V^{daf} , zbylou část nazýváme koksový zbytek
- A – hmotnostní podíl popelovin [kg.kg⁻¹]
- W – hmotnostní podíl vody [kg.kg⁻¹]

Hořlavinu lze popsat obdobně jako pevné palivo podle jejího prvkového složení a to vztahem

$$h^{daf} = \frac{h}{1 - A - W} = C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + N^{daf} + O^{daf} = 1 \quad (4)$$

kde jsou

$C^{daf}, H^{daf}, S^{daf}, N^{daf}, O^{daf}$ hmotnostní podíly prvků v hořlavině [kg.kg⁻¹].

Složení hořlaviny z různých typů biomasy je uvedeno v tab.1, kde podstatnou variabilitu představuje prchavý podíl v hořlavině.

Tab. 1 Vlastnosti hořlaviny biomasy – hrubý rozbor

Palivo	Popel	Voda	Prchavá hořlavina	Výhřevnost [kJ/kg]
Hmotnostní podíl [%]				
Dřevo	0,22	7,79	85,21	17 256
Obilní zbytky	6,15	10,47	82,61	17 063
Šťovík	4,95	9,32	80,27	16 825
Šťovík + chrastice 1 : 1	4,99	9,20	79,23	16 768
Šťovík + piliny 1 : 1	3,94	7,49	79,07	15 084
Šťovík + uhlí 1 : 1	12,42	9,65	71,79	19 289
Řepková sláma + uhlí 9 : 1	4,10	8,50	72,30	17 900
Seno	9,01	8,27	81,30	15 070

Porovnání s uhlím:

- Vyšší obsah prchavé hořlaviny – delší plamen, nižší teplota.
- Výhřevnost srovnatelná s hnědým uhlím.
- Nižší obsah popela.

Samostatným problémem biomasy je složení popelovin. O jak komplexní problém se jedná ukazuje tab.2 – porovnání obvykle literárně uváděných hodnot a hodnot naměřených u paliv, která byla zkoušena v tepelné laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Analyzované hodnoty hmotnostního zastoupení hlavních prvků v popelu jsou dále uvedeny pro vybraná fytopaliva na obr. 7.

Z hodnot uvedených v tab. 1 a 2 je zřejmé, že obsah některých prvků, které významně ovlivňují vlastnosti popelovin při spalování (sodík, hořčík, fosfor), může být reálně vysoký (viz krajní meze literárních údajů) a palivo z biomasy s takovýmto zastoupením prvků bude způsobovat řadu provozních problémů u všech typů spalovacích zařízení.

Výsledky měření hmotnostního podílu stopových prvků v popelu jsou uvedeny v následující tab. 3.

Tím zásadním odlišením biomasy od uhlí je především extrémně vysoký podíl prchavé hořlaviny, který je důvodem, proč je emisně příznivé spalování biomasy obtížné a náročné z hlediska konstrukce spalovacího zařízení a to včetně přípravy paliva pro spalování.

Tab. 2 Prvkový rozbor hořlaviny a popelovin paliva

Údaje uvedené v literatuře, obsahy v hořlavině a v popelovinách

C	H	O	N	P	K	Na	S	Ca
hořlavina [%hm bez siry]				popeloviny – hlavní prvky [%hm v popelovinách]				
40 až 47	6	40 až 44	1 až 5	1,0 až 16	6 až 50	0,4 až 10	1,0 až 16	6 až 50
Si	Mg	B	Cl	Cu	Fe	Mn	Zn	
1,0 až 60	1,0 až 20	0,1 až 0,2	0,4 až 0,8	0,004 až 0,04	0,1 až 2	0,04 až 0,6	0,02 až 0,2	

Naměřené hodnoty hmotnostních podílů hlavních prvků v popelu.

Palivo	Ca	Na	K	Mg	Al	Si	P	S	Cl
Dřevo	22,71	0,41	49,32	3,87	1,53	8,37	4,85	5,44	1,76
Šťovík	25,43	0,68	41,4	4,15	1,98	12,66	5,55	4,96	0,84
Šťovík + chrastice 1 : 1	18,45	0,37	32,07	3,04	1,57	32,41	5,5	4,29	0,41
Šťovík + piliny 1 : 1	25,42	2,51	39,26	5,16	1,92	11,62	5,25	5,24	0,8
Obilní zbytky	29,95	4,13	9,57	10,31	1,53	9,21	30,18	2,28	0,77
Šťovík + uhlí 1 : 1	24,12	0,28	13,23	1,34	7,76	21,28	1,7	13,83	0,3
Seno	11,14	1,16	14,45	4,01	3,1	48,39	10,23	4,98	0,26

Tab. 3 Naměřené hodnoty hmotnostních podílů stopových prvků v popelu [%]

	Ti	Mn	Fe	Cu	Ba	Sr
Šťovík	0,15	0,132	1,76	0,0138	0,124	0,114
Dřevní odpad	0,11	0,105	1,3	-	0,054	0,091
Šťovík + chrastice	0,153	0,151	1,35	0,0128	0,008	0,087

Zákonnou odlišností biomasy od pevných paliv pak zákonodárce vyjádřil tím, že požaduje pro větší spalovací zařízení (dle nového zákona č. 86/2002 Sb. pro všechny zdroje **nad 1 MW výkonu** – vyhláška č. 352/2002 Sb.) kontrolu kvality spalování měřením ΣC (celkový obsah uhlovodíků vyjádřený jako organický uhlík v suchých spalínách při referenčním obsahu kyslíku a referenčních – normálních podmínkách) na vstupu do vnějšího prostředí.

Kontrola kvality spalování je dalším ukazatelem, který respektuje potenciální tvorbu a tím i emise do ovzduší, odpovídá právě skutečnosti, že při spalování biomasy dochází při tepelném namáhání na vysoké teplotové úrovni ke spontánnímu uvolnění spalitelných látek v plynné formě. Na rozdíl od plyných nebo kapalných paliv však není možné jednoduchým způsobem aplikovat předsmíšení paliva a okysličovačla ve fázi před spalováním.

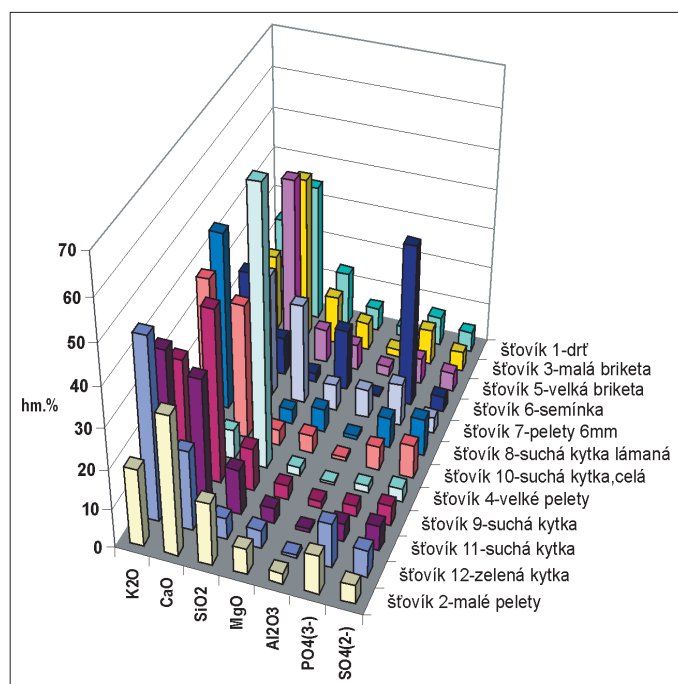
4.2 Spalování biomasy

Pro dokonalé spálení biomasy je nezbytné respektovat specifika, kterými se biomasa vyznačuje. Tím specifickým rozdílem není pouze vysoký obsah prchavého podílu hořlaviny a vysoké procento kyslíku v hořlavině vázané. Dalším významným faktorem je pórovitá uhlíková struktura pevného podílu hořlaviny (dřevěné uhlí), které bez mechanického narušení odhořívá velmi pomalu. Dalším dosud ne zcela jednoznačně popsáním specifikem je různé strukturální složení rostlinné hmoty, které má jednak rozdílné zastoupení hlavních obsahových složek, jednak má zřejmě jinou funkci u jednoletých a u víceletých rostlin. Hlavní složky, které tvoří biomasu jsou lignin, celulóza a hemicelulóza. Až potud a po jejich rozdílné zastoupení u různých rostlinných druhů je z energetického hlediska vše známo. Přesto současný intenzivní výzkum v oblasti energetického využití biomasy ukázal významné rozdíly při spalování např. pelet z dřevního odpadu a pelet z běžných jednoletých produkčních rostlin. Výsledky spalování za shodných podmínek na shodném spalovacím zařízení (automatický teplovodní kotel na pelety VERNER A 25 o jmenovitém výkonu 25 kW – obr. 8 pokročilá konstrukce se vzduchovým ventilátorem a řízenou distribucí vzduchu z produkce firmy VERNER a.s.) jsou velmi odlišné.

5. EMISE Z KOTLŮ NA BIOMASU

Moderní energetické zdroje i malých výkonů, musí respektovat stále se zpřísňující požadavky na energetické zdroje z hlediska vlivu na životní prostředí, tzn. na zatížení ovzduší emisemi, které tyto zdroje produkují. V poslední době se objevil i další faktor, který tyto zdroje musí respektovat a to je trend omezování produkce CO₂. Tento trend je důsledkem mezinárodních závazků (v tomto případě se jedná o tzv. Kjótský protokol), které požadují omezování podílu uhlíku z fosilních zdrojů paliv využívaného pro získávání tepla a elektrické energie.

Z hlediska ochrany ovzduší rozdělujeme energetické zdroje na **malé** (o tepelném výkonu do



Obr. 7 Naměřené hodnoty hmotnostních podílů hlavních prvků v popelu

200 kW), na **střední** (o výkonu 200 až 5 000 kW), velké (od výkonu 5 MW do příkonu 50 MW) a na zvláště velké s tepelným příkonem větším než 50 MW.

Legislativa pro **střední zdroje** vychází ze zákona č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší a navazujících právních prováděcích předpisů (nařízení vlády a vyhlášky MŽP) č. 350/2002 Sb. až č. 358/2002 Sb. Pro **malé zdroje** platí harmonizovaná norma ČSN EN 303-5. Požadavky obou právních (závazných) předpisů se dokonce překrývají, protože ČSN EN 303-5 platí až pro jednotkové výkony kotlů do 300 kW, přičemž zákon č. 86/2002 Sb. platí již pro zdroj o výkonu 200 kW, tzn. například pro zdroj složený ze dvou kotlů o výkonu 100 kW (tedy hluboko v oblasti platné normy pro jednotlivé kotle).

Hlavní znečišťující látky

Při spalování fosilních paliv, ale i dřeva a biomasy, vznikají hlavní znečišťující látky, které podle současné legislativy v ochraně ovzduší patří mezi základní znečišťující látky. Jsou to následující znečišťující látky:

- ☐ oxid uhelnatý – CO
- ☐ oxid siřičitý – SO₂
- ☐ oxidy dusíku – NO_x (suma NO + NO₂, vyjádřené jako NO₂)
- ☐ tuhé znečišťující látky (TZL) – tuhé částice ve spalínách
- ☐ organické látky (OL), vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC).

Tab. 4 Emisní limity platné ze zákona č. 86/2002 Sb. a nařízení vlády č. 352/2002 Sb. pro střední zdroje na dřevo a biomasu o tepelném výkonu od 0,2 MW do 5 MW

Jmenovitý tepelný výkon P_t (MW)	Emisní limit (mg/m ³)					Ref. obsah O ₂ [%]
	TZL	SO ₂	NO _x jako NO ₂	CO	Org. látky jako ΣC	
$P_t = 0,2$ až 5 MW	250	2 500	650	650	50 ^{a)}	11

Odkazy:

1. rovněž tak nekontaminovaný dřevní odpad, kůru a podobné rostlinné látky,
2. emisní limit platí pro tepelný výkon $P_t > 1$ MW.

Tyto znečišťující látky jsou svým původem vznikou součástí paliva nebo okysličovačů a ve výše uvedené formě se do ovzduší dostávají v důsledku uvolnění tepla obsaženého v palivu spalovacím procesem.

Pro tyto hlavní znečišťující látky platí tzv. **emisní limity**, což jsou hmotnostní koncentrace uvedených znečišťujících látek ve spalínách z kotle, a to za definovaných podmínek, které jsou určeny **normální tlakem (101,325 kPa, a teplota 0 °C, suché – bezvodé – spaliny a definovaný obsah kyslíku v těchto spalínách).**

5.1 Emisní limity pro kotle malého a středního výkonu

Pro kotle malého a středního výkonu platí emisní limity uvedené v tab. 4. Pro malé zdroje platí ustanovení normy ČSN EN 303-5, která rozlišuje ohniště s ručním a samočinným přikládáním. Pro potřeby kotlů se **samočinným přikládáním** jsou pak v tab. 5 uvedeny požadované emisní hodnoty (vztahované na referenční obsah kyslíku 10 %). Kromě požadovaných mezních emisních hodnot musí být funkce kotlů doložena i dodržением nejnižší stanovené účinnosti při jmenovitém výkonu kotle.

5.2 Naměřené emise hlavních plynných znečišťujících látek

Na kotli VERNER A 25 byla provedena řada porovnávacích měření různých druhů biomasy. Biomasa byla vždy upravena na standardní peletizované palivo a takto byla v kotli spalována. Obr. 9 ukazuje výsledky z těchto zkoušek – koncentrace hlavních znečišťujících látek přepočtené na suché spaliny a referenční podmínky a umožňuje porovnání vlivu složení standardizovaného paliva na potenciální emise.

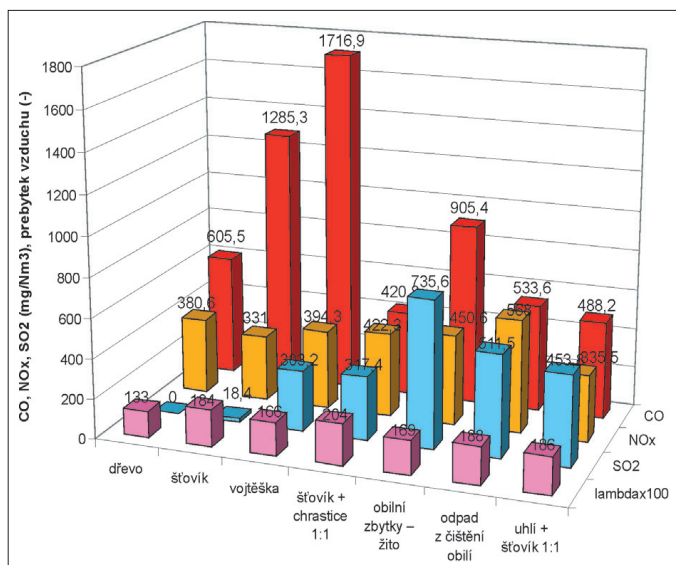
Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že vstupní biomateriál pro palivo podstatným způsobem ovlivňuje emise hlavních znečišťujících látek.

Kromě hlavních znečišťujících látek je nutné při spalování biomasy respektovat skutečnost, že pěstovaná biomasa (zejména se jedná o tzv. energetické rostliny – např. šťovík uteša nebo o slámu – zejména o řepkovou) obsahuje chlór. Přítomnost chlóru v palivu pak by mohla být příčinou, proč se při nevhodném způsobu spalování objevují ve spalínách z biomasy i velmi toxické organické látky typu dioxinů (PCDD a PCDF).



Obr. 8 Spalovací zařízení – kotel VERNER A 25

a – Pohled na kotel se zásobníkem paliva v tepelné laboratoři FS ČVUT, b – Pohled do spalovací komory, c – Spalovací komora se zbytky po spálení pelet z biomasy rostlinného původu



Obr. 9 Emise plyných znečišťujících látek a součinitel přebytku vzduchu v ohništi

Výskyt dioxinů ve spalínách je popisován i v monografiích o biomase [Kaltschmidt], kde je míra tvorby dioxinů spojována s obsahem kyslíku ve spalínách v ohništi – tedy se součinitelem přebytku vzduchu a obsah dioxinů v popelu s nedopalem ve zbytcích po spalování. Převzatý graf této závislosti je uveden na obr. 10.

5.3 Pravděpodobný model vzniku dioxinů při spalování biomasy

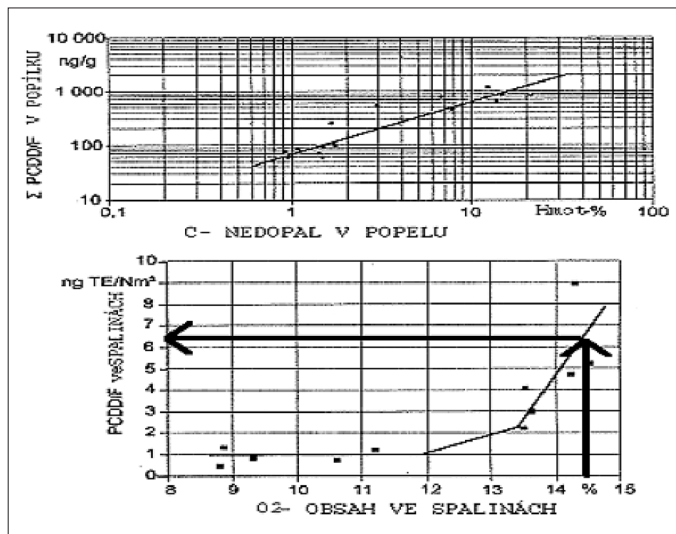
Látky, které označujeme jako dioxiny jsou popsány v následujícím odstavci a to i s jejich nepříjemnými vlastnostmi.

Sloučeniny mají schopnosti

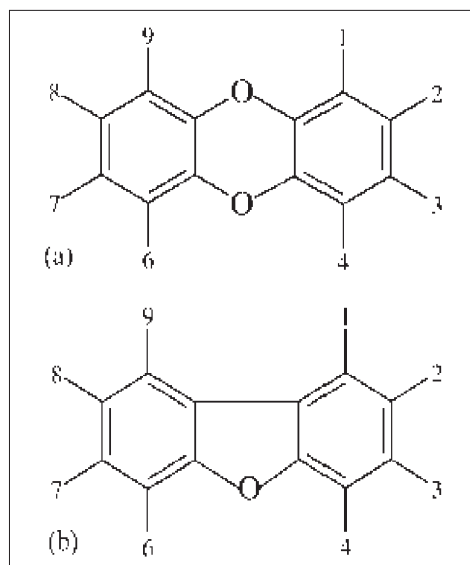
- ☐ přetrvávat v prostředí,
- ☐ dálkového přenosu,
- ☐ bioakumulace.

Patří mezi ně sloučeniny, které jsou extrémně toxické, mutagenní, teratogenní, poškozující imunitní systém. Mají lipofilní charakter, vyskytují se obvykle v přírodě v nízkých koncentracích, ve všech fázích (plyn, kapalina, pevná látka).

Celkem existuje známých **75 PCDD** a **135 PCDF** sloučenin, z toho 17 prokázaných jako extrémně toxické.



Obr. 10 Obsah PCDD a PCDF v popílku jako funkce nedopalu C v popelu – nahoře, obsah PCDD a PCDF ve spalínách v závislosti na obsahu kyslíku O₂ ve spalínách – dole



Obr. 11

Vzorce polychlorované dibenzo dioxiny PCDD (a) a furany PCDF (b) a) struktura PCDD, b) struktura PCDF, v polohách 1 až 9 substituovány atomy Cl

Pro spalování biomasy lze uvažovat s potenciálním vznikem dioxinů dvěma základními způsoby:

- ☐ z tzv. prekurzorů – to jsou látky, ve kterých jsou přítomny již chlorované sloučeniny (tento model lze vyloučit pro čistou biomasu, tak jak předpokládá zákon o ovzduší, že jiná než čistá biomasa nebude v kotlích spalována);
- ☐ procesem de novo.

Oba modely vzniku dioxinů jsou popsány v následujících dvou odstavcích.

Vznik PCDD/F z prekurzorů

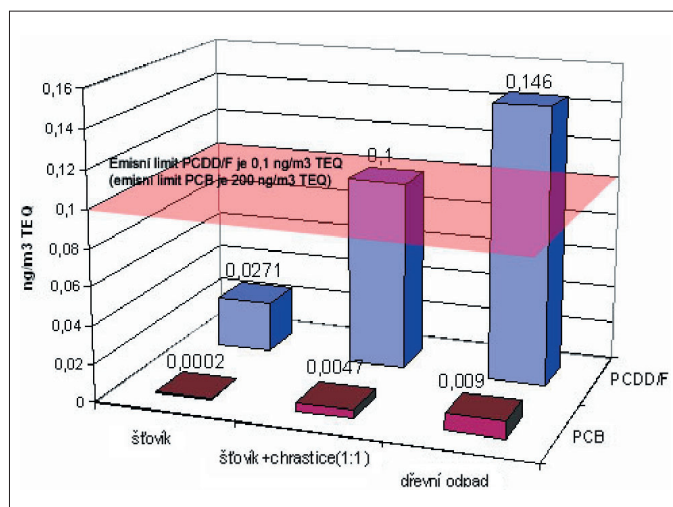
Prekurzor je sloučenina, ze které může nežádoucí látka vzniknout relativně jednoduchou reakcí; prekurzor je buď přítomen v palivu nebo může při spalování vzniknout (obvykle se jedná o produkt nedokonalého spalování), a to při následujících podmínkách :

- ☐ vhodné reakční teploty **400 až 750 °C**,
- ☐ katalytické povrchové reakce na částicích popílku – katalyzátor funguje jako oxidační přenašeč elektronů při vytvoření vazeb mezi aromatickými jádry

Katalyzátory mohou být především kationty kovů – nejsilnější účinek mají Cu⁺, dále pak různé kationy typu Fe, Ni nebo Pd.

Typické prekurzory pak jsou:

- ☐ chlorované fenoly,



Obr. 12 Výsledky měření emisí PCB a PCDD/F na kotli Verner A25

- ❑ deriváty antrachinonu,
- ❑ deriváty benzenu.

Jsou obsaženy např. v pesticidech, ochranných prostředcích pro dřevo, mořidlech, barvivech, léčivech, aj. Zdrojem nezbytného chlóru pak obvykle bývá přímo prekurzor.

De novo syntéza PCDD/F (vznik dioxinů z látek, ve kterých se prekurzory primárně nevyskytovaly).

Zásadní rozdíl proti vzniku z prekurzorů je v tom, že dioxinové (furanové) struktury nevznikají z podobné sloučeniny, ale nově se vytváří z úplně odlišných (netoxických) struktur. Stejně jako při vzniku z prekurzorů dochází k reakci na povrchu pevných částic, např. popílku; reakce jsou katalytické. Mechanismus této reakce však není dosud dokonale známý.

Nutné předpoklady pro de novo syntézu

- ❑ reakční teplota 250 až 450 °C › oblast vzniku především za spalovací zónou;
- ❑ přítomnost uhlíkaté matrice s aktivním povrchem › čím dokonalejší spalování, tím méně aktivního uhlíku pro syntézní reakce;
- ❑ přítomnost kyslíku (není ale jisté, že se plynný kyslík zabudovává přímo do dioxinové struktury);
- ❑ zdroj chloru pro substituční reakce – především se jedná o chloridy kovů pocházející z anorganických částic – popela, sporné, nicméně možné je působení HCl; chlor ve spalinách nemá vliv;
- ❑ katalyzátor – stejné kationty kovů jako v případě syntézy z prekurzorů (především mědné kationty).

5.4 Naměřené hodnoty dioxinů při spalování biomasy pro různé druhy biomasy na stejném spalovacím zařízení

Kotel VERNER A 25 byl jako porovnávací spalovací zařízení vybrán v rámci porovnávacích zkoušek provedených ve Státním zkušebním ústavu v Brně, kde byly hodnoceny emisní charakteristiky 4 kotlů na pelety z biomasy. Zkoušky byly provedeny pro stejné dva druhy pelet a právě na základě výsledků těchto zkoušek byl vybrán kotel A 25 VERNER jako nejvhodnější. Přesto, že byl nejvhodnější, došlo k jeho dalším úpravám, které byly doporučeny Tepelnou laboratoří odboru energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Výsledky měření emisí PCB a PCDD/F na kotli Verner A25 (obr. 12)

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že při správně vedeném spalovacím procesu jsou naměřené hodnoty emisí dioxinů v úrovni požadavku na spalovny, tzn. plní nej přísnější dosud stanovené zákonné požadavky. Na obrázku 12 jsou uvedeny i výsledky měření PCB (polychlorovaných bifenylů), které jsou hluboko pod emisním limitem stanoveným pro spalovny. Přesto z výsledků měření vyplývá, že je nezbytné konstruovat spalovací zařízení na biomasu s ohledem na rizika tvorby dioxinů a současně správně volit i druhy porostů tzv. energetické biomasy, aby rizika emisí dioxinů byla snížena na nejnížší možnou míru.

Koncentrace dioxinů uváděná v TEQ [ng.m⁻³] značí výslednou koncentraci přepočtenou z jednotlivých zjištěných dioxinů pomocí příslušných ekvivalentů toxicity.

Možnosti ovlivnění vzniku dioxinů lze stručně shrnout následujícím způsobem:

1. Vyloučit **prekurzory** v palivu.
2. **Omezit chlor v palivu**: pro vznik dioxinů je nutná přítomnost chloru v palivu v určité formě, ale dosud **nebyla** prokázána žádná důvěry-

Tab. 5 Mezní hodnoty emisí dle ČSN EN 303-5

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon kW	Mezní hodnoty emisí								
			CO			organický C			tuhé látky		
			mg/m³ při 10 % O₂, suché spaliny, 273,1 K a 1013 mbar								
			třída								
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
ruční	biologické	≤50	25000	8000	5000	2000	300	150	200	180	150
		50 až 150	12500	5000	2500	1500	200	100	200	180	150
		150 až 300	12500	2000	1200	1500	200	100	200	180	150
	fosilní	≤50	25000	8000	5000	2000	300	150	180	150	125
		50 až 150	12500	5000	2500	1500	200	100	180	150	125
		150 až 300	12500	2000	1200	1500	200	100	180	150	125
samočinná	biologické	≤50	15000	5000	3000	1750	200	100	200	180	150
		50 až 150	12500	4500	2500	1250	150	80	200	180	150
		150 až 300	12500	2000	1200	1250	150	80	200	180	150
	fosilní	≤50	15000	5000	3000	1750	200	100	180	150	125
		50 až 150	12500	4500	2500	1250	150	80	180	150	125
		150 až 300	12500	2000	1200	1250	150	80	180	150	125

hodná korelace mezi obsahem chloru v palivu a emisí dioxinů; obecně lze však uvažovat s tím, že zvýšený obsah chloru vede k vyšším emisím PCDD/F.

3. **Spalovací podmínky**: pro zamezení vzniku dioxinů je důležitá vysoká účinnost spalování (malé ztráty nedopalem), dostatečná doba zdržení v pásmech s vyšší teplotou, dostatečné množství kyslíku pro oxidaci, vysoká výhřevnost paliva, nízký obsah popela a vody.
4. **Spalovací teplota**: při teplotách nad 900 °C dochází k destrukci dioxinových struktur, společně s bodem 3; největší problém spalovny odpadu – kombinace nízké výhřevnosti, vysoké vlhkosti, velkého obsahu popela paliva a nízká spalovací teplota.
5. **Zpracování paliva**: souvisí s výše uvedenými body 3 a 4; případně je možno využít spoluspalování s výhřevnějším palivem.

ZÁVĚR

Biomasa bude představovat v palivové bilanci ČR velmi pravděpodobně významnou součást tzv. palivového koláče. Její velmi efektivní využití je zcela zřejmé pro zásobování rozptýlené venkovské zástavby a pro distribuovanou (respektive decentralizovanou) energetiku, a to včetně malých a středních zdrojů s kombinovanou výrobou elektrické energie a tepla.

Z uvedených důvodů a výše uvedených, již dnes známých, skutečností je třeba soustředit aplikovaný výzkum a vývoj v této oblasti jak na konstrukci spalovacích zařízení, tak na výběr vhodných druhů dendromasy a fyto-masy, s ohledem na možná emisní omezení. Významným faktorem je také otázka přípravy a skladování paliva z biomasy, včetně dnes již téměř nezpochybnované nutnosti standardizace paliva minimálně pro malé zdroje. Standardizace paliva (peletizace se stanovenými vlastnostmi pelet) je jak zárukou komfortnosti zásobování teplem pro uživatele kotlů na biomasu, tak minimalizace emisí z těchto malých, ale četných, energetických zdrojů.

Poděkování: Příspěvek vznikl za podpory grantu MŽPČR č. SM/320/14/03.
Kontakt na autora: frantisek.hrdlicka@fs.cvut.cz, jan.hrdlicka@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Fa SHELL – scénáře světového vývoje spotřeby energie a zdroje jejího pokrytí
- [2] Politika obnovitelných zdrojů ve střední a východní Evropě, SYNERGY, Vídeň 1997