

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA



**SPOLEČNÝ FOND MALÝCH PROJEKTŮ PHARE CBC
ČESKÁ REPUBLIKA 2004 - POLSKO 2004**



MOŽNOSTI ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ BIOMASY

Sborník příspěvků ze semináře

pod záštitou Prof. Ing. Tomáše Čermáka, CSc. , rektora VŠB-TU Ostrava

v rámci projektu

“Možnosti energetického využití biomasy v regionu Slezsko”

Projekt je spolufinancován Evropskou unií
Penzion Beskydy, Visalaje 27. – 29.4. 2005

Tento sborník byl vytvořen za finanční pomoci Evropské unie. Za obsah tohoto sborníku je výhradně odpovědná Vysoká škola báňská Ostrava a nelze jej v žádném případě považovat za názor Evropské unie.

OBSAH

Franciszek Gramatyka

Zasoby i źródła pozyskiwania biomasy	1
---	---

Tadeusz Chmielniak, Gerard Kosman, Wojciech Kosman

Problemy badawcze turbin gazowych ze spalaniem biomasy i przykładowe zastosowania	11
--	----

Tadeusz Chmielniak, Sebastian Lepszy

Spalanie zewnętrzne biomasy speżzone równolegle z zespołem turbiny gazowej	21
---	----

Pavel Janásek

Alternativní paliva z biomasy	28
--	----

Kamil Krpec

Spalování biomasy v kotli Turbomatic 35	37
--	----

Martin Lisý, Jiří Pospíšil, Zdeněk Skála

Modelování fluidního lože v atmosférickém fluidním zplyňovači	43
--	----

Martin Lisý, Marek Baláš, Ladislav Ochrana

Současné výsledky a perspektivy katalytického čištění synplynu	54
---	----

Jan Malaták, Petr Jevič, Eduard Janča, David Plíštil

Emisní charakteristiky briket z biomasy	65
--	----

Jan Najser

Přehled technologií na energetické využití biomasy	73
---	----

Anna Nezhodová Cemerková, Pavel Milčák

Experimentální (provozní) prověření biopaliva na bázi biomasy a kalů z ČOV na středním energetickém zdroji v Roztokách u Křivokláta	82
--	----

Pavel Noskiewiç

Obnovitelné zdroje energie v České republice	88
---	----

Tadeáš Ochodek

Biomasa jako zdroj energie	99
---	----

Lukáš Pravda

Návrh experimentu pro spalování energoplynu	109
--	-----

Marek Pronobis

Współspalanie mączki zwierzęcej w kotłach pyłowych	116
---	-----

Silvie Riedlová, Iva Pečtová, Pavel Sedláček, Peter Fečko

Možnosti využití biomasy při výrobě směsných briket	128
--	-----

Robert Sekret

Wykorzystanie biomasy w procesie spalania w kotle fluidalnym	134
---	-----

Marek Staf, Petr Buryan

Použití DSC pro měření tepelných toků při pyrolýze odpadní biomasy	143
---	-----

Stanislav Vaněk

Měření tepelného toku vyzářeného prosklenými dvířky krbových kamen	151
---	-----

Ondřej Vazda, Martin Polák

Emisní koncentrace při spalování pevných biopaliv na bázi šťovíku	162
--	-----

Michal Žídek

Anaerobní digesce zvolených substrátů v laboratorních podmínkách	169
---	-----

ZASOBY I ŹRÓDŁA POZYSKIWANIA BIOMASY

THE POTENTIAL OF BIOMASS SOURCES

Autor: Ing. Franciszek Gramatyka, Ph.D.¹

¹Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Konarskiego 18, 44-101 Gliwice
gramatyk@kotle.ise.polsl.gliwice.pl

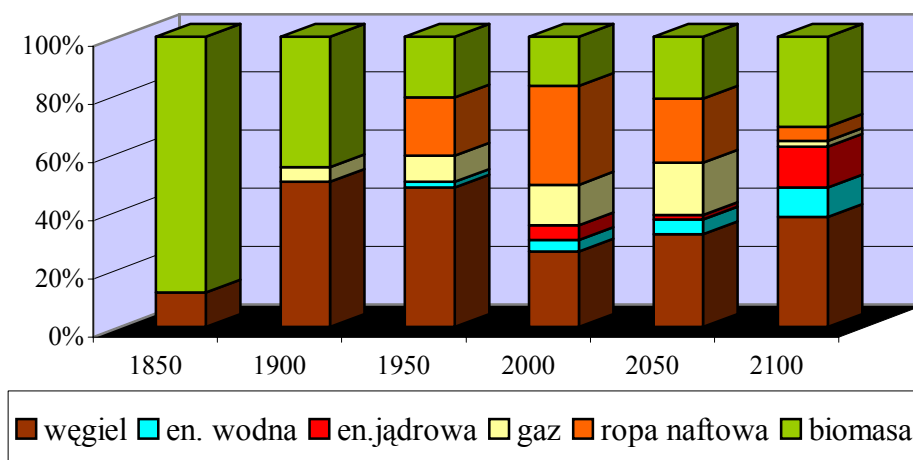
Abstrakt: W pracy przedstawiono strukturę wykorzystania źródeł energii, wielkość zasobów biomasy i źródła jej pozyskiwania oraz jej potencjał energetyczny umożliwiający zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w polskiej energetyce.

Słowa kluczowe: biomasa, zasoby, źródła pozyskiwania

1. Wprowadzenie

Źródła i nośniki energii pierwotnej można podzielić na *nieodnawialne*, które w liczącym się stopniu i w "ludzkim" horyzoncie czasowym (kilkupokoleniowym) nie podlegają odtworzeniu: drewno, torf, węgiel kamienny i brunatny, ropa naftowa, gaz ziemny, uran, tor, oraz *odnawialne*, które podlegają regeneracji.

Struktura wykorzystania źródeł energii pierwotnej w miarę rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego, ulegała istotnym zmianom (rys.1).



Rys.1. Struktura wykorzystania energii pierwotnej na świecie

Rosnące zapotrzebowanie na energię, zwłaszcza w końcu XIX i w XX stuleciu (wieku intensywnego rozwoju przemysłu) spowodowało wzrost zużycia paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej, gazu i paliw jądrowych) do poziomu ok. 80 % światowego zapotrzebowania na energię. Kryzysy naftowe lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, zmniejszające się zasoby paliw kopalnych, a przede wszystkim względy ochrony środowiska przed dalszą degradacją spowodowaną emisją zanieczyszczeń stałych, ciekłych i gazowych, powstających w procesach energetycznego wykorzystania paliw, wywołały zmiany w kierunku zintensyfikowania badań nad zwiększeniem wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Wg Światowej Rady Energetycznej odnawialnymi źródłami energii są: energia promieniowania Słońca, energia wnętrza Ziemi (geotermiczna), energia ruchów planetarnych (fal i pływów morskich i oceanicznych), energia wód i wiatru oraz energia z biomasy. Zasoby odnawialnych źródeł energii (zgodnie z oceną XIV Kongresu Światowej Rady Energetycznej w Montrealu) są teoretycznie bardzo duże, jednakże ich wykorzystanie, przy istniejących możliwościach technicznych, jest ograniczone (tab.1).

Tab.1. Światowe zasoby i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii

Rodzaj energii	Wielkość zasobów energii , PJ		
	teoretyczna	techniczna	wykorzystywana
Słoneczna	$795,470 \cdot 10^6$	795470	0,419
Wiatru	$10,880 \cdot 10^6$	33490	4,186
Z biomasy	$3,140 \cdot 10^6$	66990	52750
Wód	$0,167 \cdot 10^6$	71200	20930
Geotermiczna	$1,088 \cdot 10^6$	20930	4,186
Fal i pływów	$0,628 \cdot 10^6$	16750	4,186
Razem	$811,383 \cdot 10^6$	1004830	73693

Udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w światowej energetyce wynosi około 18%, wielkość ta wynika zarówno z rozwoju nowych technologii stosujących te zasoby, jak również z faktu że część ludności świata nie ma dostępu do konwencjonalnych źródeł energii. Wzrost tego udziału przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania i oszczędzania potencjału surowców energetycznych, poprawy stanu środowiska poprzez redukcję zanieczyszczeń do atmosfery i wód oraz redukcję wytwarzanych odpadów.

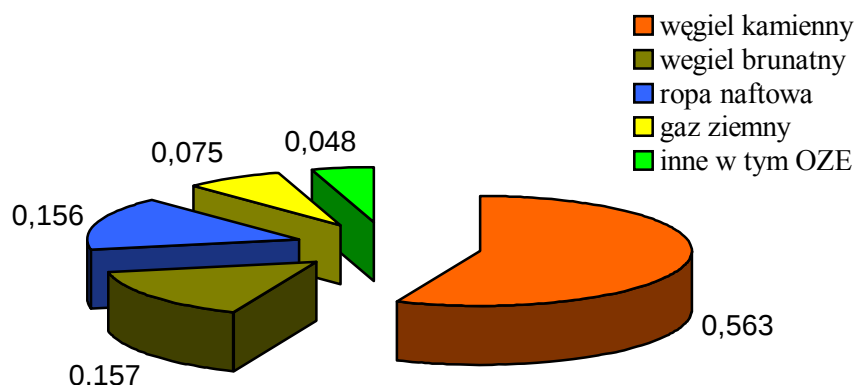
Udział odnawialnych źródeł energii w bilansach paliwowo-energetycznych w poszczególnych krajach jest bardzo różnicowany i w znacznym stopniu zależy od polityki rządu oraz od zastosowanych bodźców, zmierzających do upowszechnienia pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych.

Wspieranie rozwoju OZE stanowi ważny cel polityki Unii Europejskiej. Wyrazem tego stała się opublikowana w 1997 roku, w Białej Księdze Komisji Europejskiej „Strategia rozwoju odnawialnych źródeł energii w krajach UE”, uznana za podstawę działań na poziomie unijnym, których celem na 2010 r. jest osiągnięcie 12% udziału OZE w całkowitym bilansie paliwowo-energetycznym UE oraz 22% udziału OZE w produkcji energii elektrycznej.

Polska wynegocjowała wymagany na 2010 r. poziom 7,5 % udziału energii elektrycznej z OZE w bilansie zużycia energii elektrycznej brutto (zużycie rozumiane jest jako krajowa produkcja energii elektrycznej, łącznie z produkcją na potrzeby własne, powiększoną o import i pomniejszoną o eksport energii elektrycznej). Przyjęta przez Rząd Rzeczypospolitej a następnie zatwierdzona przez Sejm w sierpniu 2001 r. „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej” wzywa do osiągnięcia 14% udziału energii odnawialnej w całkowitym bilansie energii pierwotnej w roku 2020.

2. Biomasa i źródła jej pozyskiwania

W bilansie energetycznym świata od lat sześćdziesiątych dominuje jako paliwo ropa naftowa, z kolei źródłem energii którego konsumpcja wzrastała najszybciej jest gaz ziemny. Polska energetyka opiera się przede wszystkim na węglu (rys.2).



Rys.2. Struktura zużycia energii pierwotnej w Polsce w roku 1997

W Polsce od lat dziewięćdziesiątych występuje stopniowy wzrost udziału energii ze źródeł odnawialnych, mimo to jego wkład do bilansu paliwowo - energetycznego kraju nadal pozostaje znikomy. W roku 2000 wynosił on około 2,6%, z czego aż 98% zostało wyprodukowane w oparciu o energetyczne wykorzystanie biomasy (tab.2).

Tab.2. Struktura wykorzystania odnawialnych zasobów energii w Polsce w roku 2000
(wg ECBREC/IBMER)

Zasoby odnawialne	Energia, PJ	Udział, %
Biomasa	101,8	98,05
Spadki wód	1,9	1,82
Wody geotermalne	0,1	0,10
Wiatr	0,01	0,01
Promienie słoneczne	0,01	0,01
Ogółem	103,82	100,00

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z lipca 2003 r., wspierające produkcję energii ze źródeł odnawialnych, poprzez nałożenie na przedsiębiorstwa obrotu energią, obowiązku zakupu odpowiedniej ilości energii z OZE tak, aby udział tej energii w porównaniu z całkowitą wielkością sprzedaży energii przez dane przedsiębiorstwo wynosił nie mniej niż 3,1% w 2005 r., aż do 7,5% w 2010 r., podaje następującą definicję biomasy. *Biomasa* – substancje (pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego), które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, jak również inne części odpadów, które ulegają biodegradacji. Określenie to jest spójne z definicją, którą można znaleźć w Dyrektywie Unii Europejskiej 2001/77/EC of European Parliament and of the Council on the Promotion of Electricity Produced From Renewable Energy Sources in the Internal Electricity Market, według której biomasa to biodegradowalne frakcje produktów, odpadów i pozostałości z rolnictwa (roślinne i zwierzęce), leśnictwa i pokrewnych przemysłów.

Pochodzenie biomasy może być bardzo różnorodne, poczynając od polowej produkcji roślinnej, przez odpady występujące w rolnictwie, przemyśle rolno-spożywczym, gospodarstwach domowych, jak i w gospodarce komunalnej. Biomasa może również pochodzić z odpadów drzewnych w leśnictwie, przemyśle drzewnym i celulozowo-papierniczym. Podejmuje się też produkcję biomasy na specjalnych plantacjach drzew szybko rosnących (wierzba, platan, topola, eukaliptus), trzciny cukrowej, rzepaku, słonecznika, wybranych gatunków traw.

Ważnym źródłem biomasy są odpady produkcji zwierzęcej (gnojowica, biogaz) oraz odpady w gospodarce komunalnej (osady ściekowe, odpady z gospodarstw domowych i makulatura).

Źródła pozyskiwania biomasy możemy podzielić na:

- tradycyjne leśnictwo,
- uprawy rolnicze i ich odpady,
- szybko rosnące uprawy leśne,
- odpady przemysłu drzewnego,
- plantacje roślin oleistych,
- komunalne i hodowlane odpady stałe.

3. Zasoby biomasy

Szacunki zasobów odnawialnych źródeł energii w Polsce są bardzo różne, lecz generalnie uważa się, że Polska jest krajem o skromnych potencjalnych zasobach energii odnawialnej. Według [5,6] w Polsce najpoważniejsze źródło energii odnawialnej w postaci biomasy stanowi słoma oraz drewno odpadowe w leśnictwie i przemyśle.

3.1. Produkcja i bilans słomy w Polsce

Słoma jako produkt uboczny upraw roślin zbożowych, a także strączkowych, stosowana była i jest nadal w hodowli wszystkich rodzajów zwierząt gospodarskich jako pasza (lub dodatek do pasz), materiał ściółkowy, wykonywania mat, przykrywania kopców lub jako dodatek do nawozów sztucznych. W warunkach polskiego rolnictwa, pomimo wielorakich możliwości zastosowania słomy, po zaspokojeniu potrzeb produkcji zwierzęcej, pozostała nadwyżka słomy może zostać przeznaczona na cele pozarolnicze. Od przedstawionego schematu odbiega słoma rzepakowa, której zastosowanie w produkcji zwierzęcej jest niewielkie.

Biorąc pod uwagę przedstawione uwarunkowania oraz dane Głównego Urzędu Statystycznego [3, 4] odnośnie wielkości arealu zasiewu i zbiorów podstawowych zbóż szlachealnych, mieszanek zbożowych oraz siana z roślin strączkowych i motylkowych oraz wskaźników GUS określających stosunek masowy słomy do uzyskanego ziarna dla poszczególnych rodzajów zbóż, określono łączną, roczną produkcję biomasy z upraw rolniczych w 2000 r. na poziomie 32 mln Mg/a.

Uwzględniając zróżnicowany stopień wykorzystania słomy w hodowli zwierzęcej (bydło, owce, konie, trzoda chlewna) na pasze ($x = 0,648 - 0,765$) i ściółę ($y = 0,29 - 0,33$), na podstawie danych statystycznych pogłowia zwierząt hodowlanych, określono łączne zużycie słomy w gospodarstwach hodowlanych w 2000 r. w ilości 13,7 mln Mg/a.

Teoretyczne zasoby słomy jako biomasy, będące nadwyżką produkcyjną w gospodarstwach rolnych, wynoszą więc ok. 18,7 mln Mg/a. Przeprowadzając analizę wielkości nadprodukcji w poszczególnych województwach Polski, stwierdzono, że istnieje znaczne zróżnicowanie wielkości nadwyżek. Zakładając, że techniczne i ekonomiczne uzasadnienie energetycznego wykorzystania biomasy może istnieć tylko w tych województwach, w których nadwyżka produkcji słomy stanowi co najmniej 5 % całości nadprodukcji krajowej, uzyskano wielkość zasobów do potencjalnego wykorzystania - 15,1 mln Mg/a słomy zbóż szlachealnych i 780 tys. Mg/a słomy rzepakowej.

Kolejnym ograniczeniem możliwości wykorzystania biomasy jest struktura gospodarstw rolnych w Polsce. W strukturze gospodarstw indywidualnych tylko 8,5 %

gospodarstw posiada areał rolny powyżej 15 ha. Znaczne rozdrobnienie gospodarstw powoduje rozproszenie finansowego kapitału inwestycyjnego oraz trudności łączenia interesów właścicieli w energetycznym wykorzystaniu biomasy.

Uwzględniając wszystkie przedstawione wyżej ograniczenia, realne zasoby biomasy w postaci słomy w Polsce należy oszacować następująco:

- słoma rzepakowa pochodząca z upraw przemysłowych na powierzchni o znacznym skupieniu miejscowym to 390 tys. Mg/a,
- do wykorzystania w energetyce (gospodarstwa o znaczącej powierzchni upraw, duże gospodarstwa rolne, kombinaty) pozostały potencjał słomy to 14 % nadwyżki produkcji, czyli 2,1 mln Mg/a,
- do wykorzystania w małej energetyce u odbiorców indywidualnych pozostaje potencjał 8,5 % zasobów teoretycznych, tj. 1,6 mln Mg/a.

Ostatecznie można określić, że zasoby biomasy w postaci słomy do praktycznego wykorzystania na cele energetyczne wynoszą 4,1 mln Mg/a.

Przyjmując średnią wartość opałową słomy – 14,6 MJ/kg przy zawartości wilgoci do 20 %, obliczono potencjał energetyczny słomy - ok. **60 PJ** w skali roku.

3.2. Leśnictwo i przemysł drzewny

Lasy stanowią 28,8% powierzchni Polski tj. ok. 9 mln hektarów z czego lasy państwowe zajmują powierzchnię 7,4 mln ha. Zgodnie z informacjami GUS-u, które potwierdzają politykę gospodarczą państwa w tym zakresie, powierzchnia zalesienia z roku na rok rośnie. Założenia planu gospodarczego do roku 2020 zakładają wzrost zalesienia do 32% powierzchni kraju.

Drewno jeszcze na początku XX wieku było podstawowym źródłem energii, wykorzystywanym zarówno w przemyśle, jak i na cele bytowe. W ostatnim stuleciu zastąpione paliwami kopalnymi, w dalszym ciągu odgrywa ważną rolę w budownictwie, przemyśle meblarskim, chemicznym oraz górnictwie. W latach 1999-2001 w lasach państwowych i prywatnych oraz parkach narodowych pozyskiwano około 27 mln m³ drewna, w tym około 25 mln m³ grubizny.

W państwowych gospodarstwach leśnych (PGL) Lasów Państwowych, które są dominującym dostawcą tego surowca w Polsce, głównymi asortymentami były drewno tartaczne i papierówka. Na opał przeznaczano około 6,4% grubizny oraz ponad połowę pozyskiwanej drobnicy. W ostatnich latach zainteresowanie wykorzystaniem drewna na cele energetyczne zaczęło znowu wzrastać. W gospodarstwach domowych - z uwagi na coraz wyższe ceny tradycyjnych paliw, a w energetyce zawodowej także z uwagi na aspekty środowiskowe, zaś w branży drzewnej wiąże się to z koniecznością zagospodarowania odpadów. W 2001 roku sprzedaż drewna opałowego w Lasach Państwowych (grubizny i drobnicy) w porównaniu do 1999 roku wzrosła o ponad 10%.

Znaczącym źródłem biomasy są odpady z przemysłu drzewnego. Szacuje się, iż ze 100 m³ drewna pozyskiwanego z gospodarki leśnej, otrzymuje się po przeróbce do 60% odpadów, w tym 10 m³ kory, 15 m³ drobnicy gałęziowej, 20 m³ odpadów kawałkowych (ścinki, obrzyny), 19 m³ trocin i zrębków, 36 m³ tarcicy oraz 20-25 m³ produktów finalnych.

Przy założeniu pozyskiwania 15,5 mln m³ drewna w ciągu roku na potrzeby produkcyjne, z czego ok. 60 % będzie odpadami, można przyjąć orientacyjnie, iż w przemyśle drzewnym powstaje rocznie ok. 9,4 mln m³ odpadów drzewnych. Potencjał techniczny drewna odpadowego z przemysłu drzewnego szacować można zatem na ok. 53,9 PJ, przy czym znaczna część odpadów jest aktualnie wykorzystywana

na potrzeby energetyczne, natomiast pozostała część do produkcji wyrobów drzewnych – płyty i paneli wiórowych, itd.

Do produkcji energii może być również wykorzystane drewno z sadów (odnowienia, wyczystki), zadrzewień, zieleni miejskiej oraz recyklingu (połamane opakowania, palety itp.). Jednak ich wykorzystanie dla tych celów jest często utrudnione ze względu na rozproszenie, niejednorodność, zanieczyszczenie związkami chemicznymi i metalami ciężkimi. Z analiz przeprowadzonych przez Europejskie Centrum Energii Odnawialnej w Warszawie wynika, że potencjał techniczny drewna i jego odpadów możliwy do wykorzystania w energetyce wynosi 8,81 mln ton (tab. 3)[6].

Tab. 3. Potencjał techniczny drewna możliwy do wykorzystania na cele energetyczne [7]

Źródło biomasy drzewnej	Zasoby [mln m³]	Zasoby masowe [mln Mg]**	Zasoby do wykorzystania [mln Mg]***	Potencjał energetyczny [PJ]
Gospodarka leśna	17,55	7,02	5,61	101,0
Sadownictwo*	10,00	4,00	3,20	57,6
Całkowity potencjał techniczny i energetyczny drewna pozyskiwanego w leśnictwie i sadownictwie			8,81	158,6

* włączając wyczystki i odnowienia,

** przy założeniu gęstości 0,4 Mg/m³,

*** przy założeniu wilgotności na poziomie 20%

Drewno na cele energetyczne może być wykorzystywane w postaci: drewna opałowego, zrębków, kory, wiórów, trocin, brykietów i pelletów oraz odpadów. Znajomość właściwości fizycznych, takich jak: wielkość, masa, wilgotność, zawartość popiołu czy zanieczyszczeń, ma bardzo duże znaczenie dla wyboru technologii spalania. Poniżej zaprezentowano podstawowe charakterystyki różnych rodzajów biopaliw stałych wytwarzanych z drewna.

Drewno opałowe - pnie, gałęzie, korzenie i wierzchołki, zwykle podzielone na kawałki wielkości 15-35 cm, o wilgotności od 15 do 60%, w zależności od rodzaju surowca, czasu i sposobu przechowywania, popiół stanowi z reguły mniej niż 2% suchej masy.

Zrębki - rozdrobnione drewno o długości około 5 do 50 mm. Najczęściej otrzymuje się je z całych drzew podczas pierwszego trzebień drzewostanów, wierzchołków oraz innych pozostałości po wyrębach, a w tartakach są produktem obrabiania kłód. Ich wilgotność również zależy od rodzaju użytych surowców oraz okresu zrębkowania i waha się od 35 do 60%. Zawartość popiołów zależy od gatunku drzewa, jakości igieł, gałęzi oraz łodyg. Naturalny popiół występujący w igłach może stanowić 5% suchej masy, w gałęziach i korze około 3%, a w łodygach około 0,6%.

Kora, trociny i wióry są produktami ubocznymi przemysłu drzewnego, mocno zróżnicowane pod względem właściwości fizycznych, przede wszystkim wilgotności. Kora to zewnętrzna warstwa drzewa, charakteryzuje się niejednorodną wielkością i bardzo wysoką wilgotnością 55-60% oraz znacznymi zanieczyszczeniami glebą. Trociny i wióry powstają w wyniku skrawania i frezowania drewna, ich średnica (długość) waha się pomiędzy 1 i 5 mm. Poziom wilgotności trocin jest zróżnicowany w zależności od materiału, jaki był poddany obróbce i wynosi od 15 do 60%. Wióry są najczęściej bardzo suche (wilgotność na poziomie 5-15%). zawierają niewielką ilość zanieczyszczeń, a zawartość popiołu szacuje się na poziomie mniejszym niż 0,5%.

Brykiety i pellety są zbudowane z suchego, rozdrobnionego drewna, głównie trocin i wiórów sprasowanych pod wysokim ciśnieniem. Najczęściej o kształcie

prostopadłościennym lub cylindrycznym, różnią się wielkością, brykiety są o długości 10 do 30 cm i średnicy 6-12 mm, pellety zaś o długości 5 do 40 mm i średnicy 8-12 mm. Charakteryzują się bardzo niską wilgotnością (około 10%) oraz zawartością popiołu (0,5 - 1%) [10].

Odpady drzewne to drewno, które było wykorzystywane w innych celach. Spalanie drewna wykorzystywanego w budownictwie oraz innych odpadów drewnianych z przemysłu może przysporzyć pewnych problemów, ze względu na zanieczyszczenia jakie stwarzają resztki farb, kleju, środków konserwujących, metalu, gumy czy materiałów plastikowych [5]. Uwzględniając wielkość odpadów według wskaźników literaturowych opartych na doświadczeniach przemysłowych, łączna ilość odpadów z podziałem na rodzaje wynosi 3,18 mln Mg w skali roku kalendarzowego. Przedstawiona wielkość odpadów stanowi zatem teoretyczny potencjał energetyczny biomasy tego rodzaju.

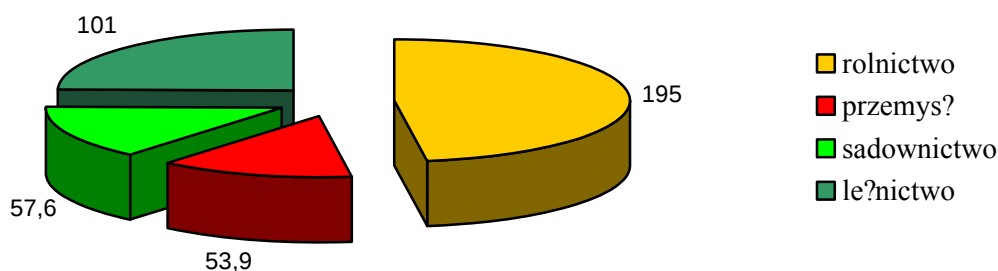
Dodatkowym paliwem możliwym do wykorzystania energetycznego są zrębki pozyskiwane z odpadów drzewnych powstających w trakcie rutynowej pielęgnacji zieleni miejskiej. W efekcie działania naturalnych sił przyrody (wiatry, burze, silne mrozy) oraz planowej zmiany struktur zieleni miejskiej pozyskuje się znaczne ilości biomasy, której wykorzystanie jest na chwilę obecną bardzo różne. Część zrębów używana jest przez zakłady zieleni miejskiej jako pokrycie skwerów zielonych w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się chwastów. Niestety znaczna część wywożona jest na wysypisko odpadów i tam w sposób naturalny ulega biologicznej degradacji bez energetycznego wykorzystania.

Tab.4. Teoretyczny i techniczny potencjał energetyczny drewna i słomy w Polsce

Źródło biomasy	Zasoby całkowite (teoretyczne) mln Mg	Ilości możliwe do wykorzystania, mln Mg	Potencjał energetyczny, PJ
Gospodarka leśna	17,55	5,61	101
Sadownictwo	10	3,2	57,6
Słoma zbóż	21,5	8,9 (3,7)*	147 (61)*
Słoma rzepakowa	2,4	1,4 (0,39)*	23 (6,4)*
Siano	18,1	1,5	25
Całkowity potencjał energetyczny biomasy		20,61 (14,4)	353,6 (251)

* wielkości podane w nawiasach określono na podstawie danych statystycznych GUS

Potencjał biopaliw stałych w Polsce możliwy do przeznaczenia na cele energetyczne oszacowano na 407,5 PJ w skali roku. Składają się na niego nadwyżki biomasy pozyskiwanej w rolnictwie (195 PJ), w leśnictwie (101 PJ), w sadownictwie (57,6 PJ) oraz odpady drzewne z przemysłu drzewnego (ok. 54 PJ).

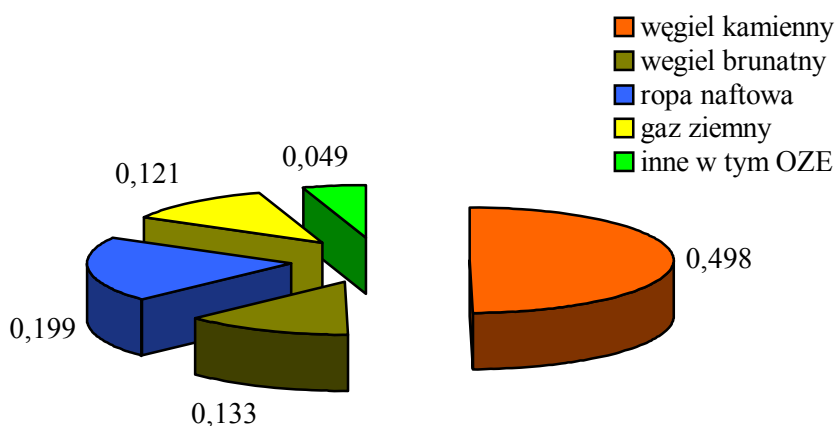


Rys.3. Potencjał energetyczny biopaliw stałych w Polsce, PJ [6]

4. Podsumowanie

Rozwój gospodarczy i cywilizacyjny jest nierozdzielnie związany ze wzrostem zużycia energii, stąd też w ciągu najbliższych kilkunastu lat przewidywany jest dalszy wzrost jej konsumpcji. Według raportu, przygotowanego przez Międzynarodową Agencję Energii (International Energy Administration, IEA), w latach 2000-2020 zapotrzebowanie to wzrośnie o 60%, a zużycie energii w 2020 roku w porównaniu do 1970 roku będzie trzykrotnie większe.

W najbliższych latach węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny będą dalej zajmować wiodącą pozycję w ogólnokrajowym bilansie energetycznym (rys.4), natomiast zmianom ulegać będzie struktura ich wykorzystania.

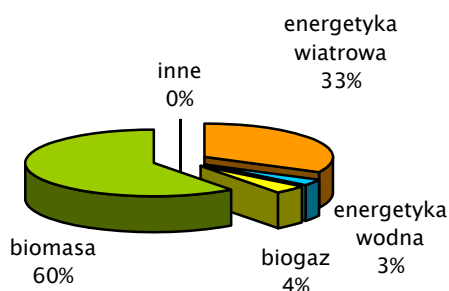


Rys.4. Struktura zużycia energii pierwotnej w Polsce w roku 2003

Racjonalne wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych jest jednym z istotnych komponentów zrównoważonego rozwoju, przynoszącym wymierne efekty ekologiczno-energetyczne. Korzystanie z zasobów odnawialnych jest uwarunkowane takimi czynnikami jak wielkość i dostępność do nich, a także opłacalność pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. W ostatnich latach energia ta jest droższa od energii ze źródeł konwencjonalnych. Z drugiej strony zastosowanie energii odnawialnej w elektroenergetyce wpłynie na zmniejszenie emisji CO₂, co dodatkowo pozwoli Polsce w najbliższej przyszłości uczestniczyć w międzynarodowym rynku handlu emisjami, biorąc pod uwagę fakt, że obecny poziom emisji jest niższy niż zakłada Ramowa

Konwencja ONZ w sprawie zmian klimatu. Do promowania wykorzystywania OZE w krajowej energetyce przyczyniło się m.in. rozporządzenie Ministra Gospodarki z 15.12.2000 roku, nakładające obowiązek zakupu energii elektrycznej i ciepła ze źródeł odnawialnych. Podstawowym dokumentem dotyczącym sektora energetyki odnawialnej jest „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej”, która zakłada wzrost wykorzystania OZE do 7,5% w roku 2010 (14% w 2020 r.).

Prognozowana realizacja osiągnięcia 7,5 % udziału OZE w strukturze zużycia paliw pierwotnych dla Polski opracowana przez ECBREC wg modelu SAFIRE ECBREC'2001 przewiduje 60 % udział biomasy (rys.5) [8].



Rys.5. Struktura OZE w 7,5% udziału zużycia energii pierwotnej w 2010 roku, wg modelu SAFIRE, EC BREC'2001 [8]

Według analiz wykonanych przez Międzynarodowy Instytut Stosowanych Analiz Systemowych, po roku 2020 następować będzie zmniejszanie udziału paliw organicznych: ropy naftowej, gazu ziemnego, węgla. Miejsce konwencjonalnych zasobów zajmować będą odnawialne źródła energii. Obecnie działa w kraju kilka instytucji finansowych wspierających wprowadzanie i stosowanie na szerszą skalę na rynku krajowym OZE, należą do nich: Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, EkoFundusz, fundusz Termomodernizacji, a także wojewódzkie fundusze ochrony środowiska i gospodarki wodnej. Pomimo wszystkich założeń i ustaleń rozwój sektora energetycznego wykorzystania biopaliw stałych następuje w warunkach rynkowych bez istotnego wsparcia ze strony państwa i w oparciu o różne technologie. Najbardziej rozwiniętym kierunkiem wykorzystania biopaliw stałych jest produkcja energii cieplnej na potrzeby ogrzewania c.w.u. oraz pary technologicznej w oparciu o bezpośrednie spalanie w kotłach ciepłowniczych. Węgiel stanowi obecnie główne surowiec do produkcji energii elektrycznej. Koszty energii elektrycznej uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych są jeszcze zbyt wysokie, chociaż wykazują tendencję zniżkową.

Zaliczenie do energii odnawialnej energii wytwarzanej w procesie współspalania doprowadziło do zaangażowania wytwórców energii konwencjonalnej w wytwarzanie "zielonej" energii, jednak wyłącznie w ramach tej technologii. W wytwarzanie tego rodzaju energii zaangażowały się:

- Elektrownia Opole SA (w przeciągu zaledwie 2 dni wytworzyła 178 MWh),
- Elektrownia Połaniec SA (produkcja we wrześniu 2004 r. ponad 4 500 MWh),
- Południowy Koncern Energetyczny SA,

- Zespół Elektrowni Dolna Odra SA,
- Elektrownia Stalowa Wola SA,
- inne jednostki (elektrociepłownie, elektrownie w przemyśle celulozowym).

Rozszerzenie obowiązku na wytwórców sprzedających energię do przedsiębiorstw zużywających energię na potrzeby własne domknęło lukę prawną, nie uczyniło jednak zasad egzekwowania obowiązku bardziej przejrzystymi. Odwrotnie, stały się one jeszcze trudniejsze do realizacji, a przez to mniej znaczące dla podmiotów, których dotyczą. Wprowadzenie od 1 maja 2004 r. świadectw pochodzenia nie przyniosło żadnych korzyści wytwórcom, wręcz przeciwnie - nałożyło na nich dodatkowe obowiązki biurowe. Ułatwiło natomiast handel przedsiębiorstwom obrotu i spowodowało wzrost cen na rynku wtórnym [2].

Literatura

1. Chmielniak T., Gramatyka F.: Zastosowanie słomy jako paliwa w kotłowni ZGK Sępólno Krajeńskie. Ekspertyza EkoFundusz Warszawa, Gliwice, 2003.
2. Giermek K., Włodarczyk W.: Rozwój odnawialnych źródeł energii w latach 1999 – 2004. Biuletyn URE - nr 1/2005. Warszawa 2005.
3. Główny Urząd Statystyczny. Rocznik statystyczny 1998, 2000, 2002.
4. Główny Urząd Statystyczny. Rocznik statystyczny z podziałem na województwa. Warszawa 2000.
5. Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K.: Słoma energetyczne paliwo. Wydawnictwo „Wieś Jutra” Sp. z o.o. Warszawa 2001.
6. Gradziuk P., Grzybek A., Kowalczyk K., Kościuk B.: „Biopaliwa. Pod redakcją Piotra Gradziuka”. Wydawnictwo „Wieś Jutra” Sp. z o.o. Warszawa 2003.
7. Gutowski J.: Energia odnawialna - stan obecny w Polsce na tle „optymistycznych” prognoz jej możliwego wykorzystania. Gospodarka paliwami i energią nr 5-6/2002.
8. Jaworski Ł. : Ocena możliwości produkcji biomasy na cele energetyki zawodowej do 2010 r. Konferencja „Współspalanie biomasy i paliw wtórnych w kotłach energetycznych” Zakopane, 2004.
9. Piwowarczyk J. „Energetyczne użytkowanie biomasy roślinnej” GLOBEnergy nr 02-03/2003 (04).
10. Potocki T. „Hit nowoczesnego ekologicznego ogrzewnictwa. Jak powstają pellety”. Polski Instalator 2/2004.
11. Pronobis M.: „Współspalanie w kotłach energetycznych”. Materiały seminaryjne: „Podstawowe problemy maszyn i urządzeń energetycznych- zbiór referatów”. Jabłonna, 27-28 marca 2003.
12. Rogalska M.: „Wykorzystanie energii biomasy w Polsce”. Pierwsza Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: „Wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych”, Kudowa Zdrój 6-7 czerwca 2002.
13. Strategia rozwoju energetyki odnawialnej. Ministerstwo Środowiska. Warszawa, wrzesień 2000.
14. Tymiński J.: „Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do 2030 roku”. IBMER, Warszawa 1997.
15. Założenia polityki energetycznej Polski do 2020 roku. Ministerstwo Gospodarki. Warszawa, 2000.

PROBLEMY BADAWCZE TURBIN GAZOWYCH ZE SPALANIEM BIOMASY I PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA

RESEARCH PROBLEMS AND APPLICATIONS OF BIOMASS FUELED GAS TURBINES CYCLES

Tadeusz Chmielniak, Gerard Kosman, Wojciech Kosman

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18
wojciech.kosman@polsl.pl

Abstrakt: W referacie omówiono podstawowe problemy związane z wykorzystaniem biomasy jako paliwa do turbin gazowych. Badano struktury technologiczne ze spalaniem zewnętrznym i wewnętrznym biomasy. Dla każdej struktury opisano zakres prowadzonych badań. Podano przykładowe wyniki analiz teoretycznych.

Słowa kluczowe: biomasa, turbiny gazowe

1. Wstęp

Biomasę jako paliwo można wykorzystać w różnych instalacjach energetycznych. W wersji najprostszej biomasę spala się bezpośrednio w instalacjach o małej mocy lub współspala z węglem w kotłach parowych. Badania prowadzone w tym zakresie dotyczą zarówno zagadnień podstawowych jak i praktycznych. Innym obszarem wykorzystania biomasy są instalacje energetyczne z turbinami gazowymi.

Zastosowanie małych zespołów turbin gazowych w układach energetycznej utylizacji biomasy jest ważną tendencją współczesnych badań i aplikacji nad rozproszonymi źródłami generacji energii elektrycznej i ciepła. Przewidywane rozpowszechnienie układów turbin gazowych oraz intensywny rozwój badań nad doskonaleniem ich konstrukcji i zwiększeniem niezawodności, stwarza możliwość istotnego zwiększenia udziału biomasy w bilansie energetycznym przez zastosowanie jej w układach rozproszonych z turbiną gazową.

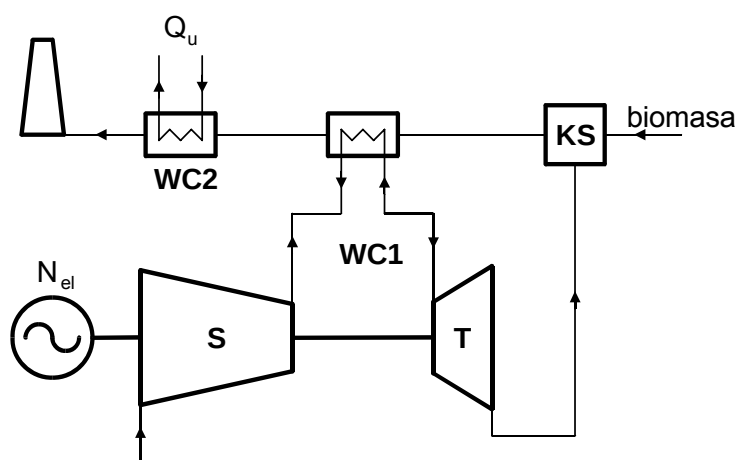
2. Opis badanych struktur technologicznych

Zespoły turbin gazowych do utylizacji biomasy realizuje się w dwóch podstawowych układach. Zasadnicza różnica pomiędzy nimi polega na sposobie spalania biomasy.

2.1. Atmosferyczne spalanie zewnętrzne

Z termodynamicznego punktu widzenia instalacje ze spalaniem zewnętrznym składają się z dwóch połączonych obiegów cieplnych. Główną część górnego obiegu stanowi komora spalania zasilana biomasą. Paliwo spala się przy ciśnieniu nieco wyższym od atmosferycznego. Gorące spaliny kieruje się do wymiennika ciepła, gdzie podgrzewają czynnik roboczy dolnego obiegu. Dolny obieg to układ turbiny gazowej. Czynnikiem roboczym w przypadku instalacji wykorzystujących biomasę jest zazwyczaj powietrze. Po rozprężeniu w części turbinowej kieruje się je do komory spalania biomasy.

Rysunek 1 przedstawia ogólny schemat omawianej instalacji. Podstawowy wymiennik ciepła oznaczono jako WC1. Dodatkowy wymiennik ciepła WC2 służy do wytwarzania dodatkowego ciepła użytkowego.

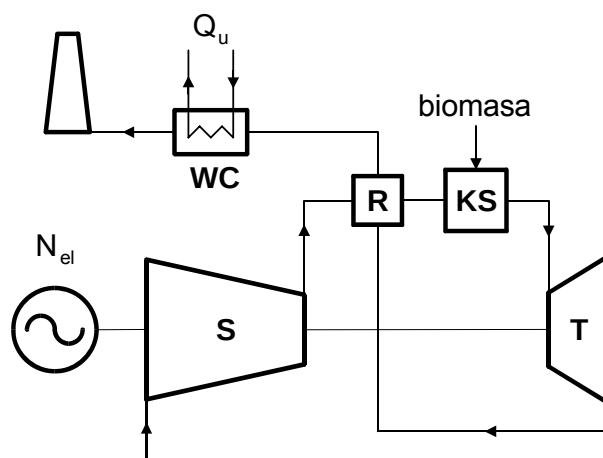


Rys. 1 Układ ze spalaniem atmosferycznym zewnętrznym. WC – wymiennik ciepła, KS – komora spalania, S – sprężarka, T – turbina (ekspander)

Instalacje ze spalaniem zewnętrznym mogą wykorzystać nawet bardzo zanieczyszczone paliwo ponieważ czynnik roboczy dolnego obiegu jest oddzielony od obiegu górnego. Umożliwia to dołączenie do układu turbiny gazowej praktycznie bez żadnych modyfikacji jej części przepływowej.

2.2. Spalanie wewnętrzne

Schemat instalacji wykorzystującej spalanie wewnętrzne biomasy (rys. 2) zasadniczo nie różni się od klasycznego obiegu turbiny gazowej. Paliwo w postaci uszlachetnionej biomasy zasila komorę spalania będącą częścią obiegu turbiny gazowej. Procesy w komorze spalania zachodzą przy zwiększonym ciśnieniu. Spaliny kieruje się do części turbinowej. Zazwyczaj w tego typu układach instaluje się regenerator podgrzewający powietrze za sprężarką. Podobnie jak w poprzednim układzie także tutaj przewiduje się dodatkowy wymiennik wytwarzający ciepło użytkowe.



Rys. 2 Układ z ciśnieniowym spalaniem wewnętrznym: WC – wymiennik ciepła, KS – komora spalania, R – regenerator, S – sprężarka, T – turbina (ekspander)

Ponieważ spaliny wytwarzane w komorze spalania zasilanej biomasą kieruje się bezpośrednio do części turbinowej, to zarówno dobór i przygotowanie paliwa, jak i konstrukcja części przepływowej wymagają szczegółowej analizy.

3. Problemy badawcze

W obecnym stadium rozwoju technologii układów turbin gazowych zasilanych biomasą można wyróżnić szereg koniecznych przedsięwzięć badawczych:

Optymalizacja struktury technologicznej

Zastosowanie układu turbiny gazowej zasilanej biomasą dla konkretnych celów wymaga przede wszystkim wyboru właściwej struktury technologicznej instalacji. Optymalizacja dotyczy zarówno podstawowych parametrów (mocy jednostkowej, charakterystycznych parametrów czynnika roboczego) jak i rozmieszczenia elementów instalacji (liczba i rodzaj wymienników ciepła, ewentualne uwzględnienie regeneracji).

Projekt, wykonanie prototypu i badania komory spalania nowego typu

Wykorzystanie biomasy wiąże się na ogół z zaprojektowaniem nowych rozwiązań technologicznych komór spalania. Dodatkowo należy rozważyć układy przygotowujące paliwo.

Opracowanie konstrukcji wymienników ciepła

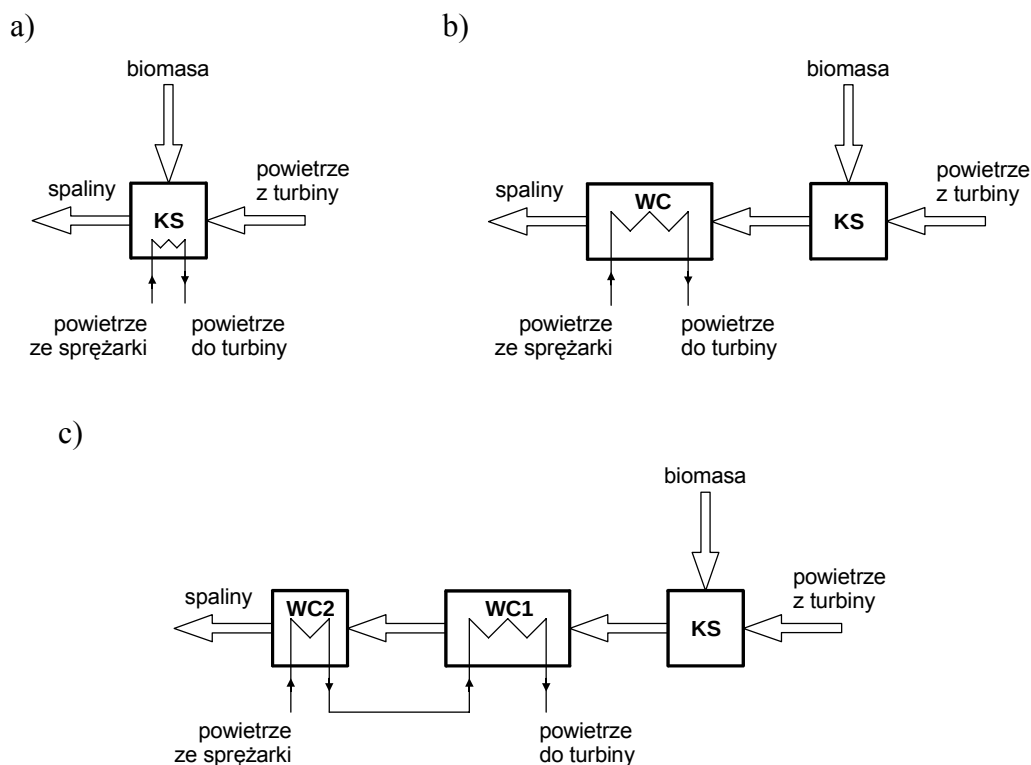
Praktycznie w każdej instalacji utylizującej biomasę znajdują się wymienniki ciepła spaliny-powietrze. Optymalizacja ich konstrukcji powinna zapewnić lepsze osiągi całego układu.

Obok zagadnień czysto inżynierskich kluczowe znaczenie mają uwarunkowania ekonomiczne. Dlatego konieczne staje się opracowanie metodologii oceny potencjału wykorzystania biomasy dla produkcji energii elektrycznej i ciepła. Podstawowym zadaniem jest zgromadzenie informacji i budowa bazy danych służących przygotowaniu instalacji pilotowej nowych technologii utylizacji biomasy z uwzględnieniem lokalnych warunków i koncepcji uszlachetnienia biomasy.

Oprócz podstawowych problemów badawczych opisanych powyżej należy wspomnieć jeszcze o problemach szczegółowych związanych z rodzajem instalacji wykorzystującej biomasę.

3.1. Turbiny ze spalaniem zewnętrznym

Zasadniczym problemem w przypadku instalacji ze spalaniem zewnętrznym jest budowa komory spalania oraz powiązanie górnego i dolnego obiegu cieplnego. Rysunek 3 przedstawia możliwe rozwiązania konstrukcyjne tego zagadnienia.



Rys. 3 Rozwiązania konstrukcyjne zewnętrznej komory spalania biomasy

W ściankach komory spalania pokazanej schematycznie na rysunku 3a zabudowano kanały, przez które przepływa powietrze podawane przez sprężarkę. Nagrzane powietrze kieruje się następnie do części turbinowej.

Kolejne rozwiązanie (rys. 3b) rozdziela komorę spalania i główny wymiennik ciepła. Taka konstrukcja może być wymuszona koniecznością usytuowania wymiennika ciepła bliżej obiegu turbiny gazowej, co pozwala zmniejszyć straty przepływu sprężonego czynnika roboczego.

Dalsza modyfikacja polega na oddzieleniu poszczególnych segmentów wymiennika ciepła. Pierwsze segmenty od strony wlotu spalin i wylotu gorącego czynnika roboczego są narażone na wysokie temperatury. Do ich budowy wykorzystuje się bardziej wytrzymałe materiały. Pozostałe powierzchnie wymiany ciepła pracują w znacznie niższych temperaturach. Dlatego obydwie części wymiennika można od siebie oddzielić (rys. 3c).

W przypadku dwóch ostatnich rozwiązań konieczne staje się badanie struktury spalin (w tym zapylenia) ze względu na przepływ w wymienniku ciepła.

Podczas analizy konstrukcji wymiennika ciepła zakłada się, że temperatura powietrza kierowanego do turbiny nie może przekroczyć narzuconego poziomu. To ograniczenie wynika z wytrzymałości termicznej elementów tworzących układ przepływowy turbiny.

3.2. Turbiny ze spalaniem wewnętrznym

Wśród głównych zadań badawczych i projektowych dotyczących instalacji turbin gazowych z wewnętrznym spalaniem biomasy wyróżnia się następujące zagadnienia:

System przygotowania paliwa

Zmienne własności energochemiczne biomasy wymuszają konieczność opracowania odpowiedniego przygotowania paliwa podawanego do komory spalania. Do podstawowych procesów zalicza się przede wszystkim suszenie. Można je przeprowadzić wykorzystując m. in. gorący czynnik roboczy z wylotu turbiny gazowej.

Analiza procesu spalania

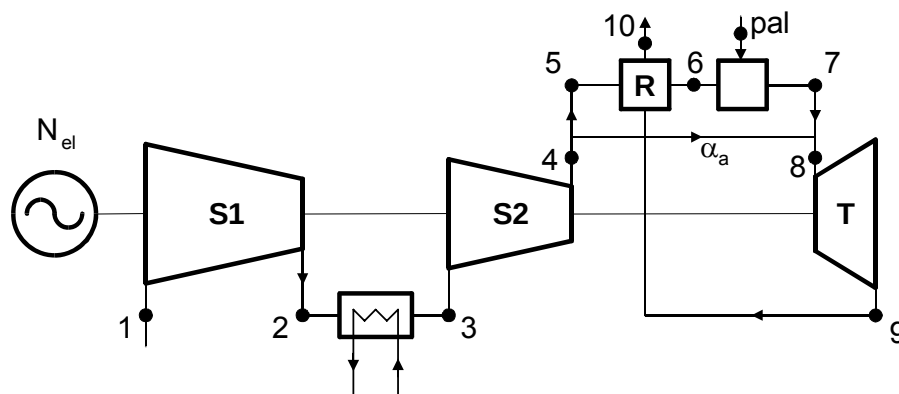
Badanie procesów zachodzących w komorze spalania przeprowadza się biorąc pod uwagę różny skład paliwa oraz różne sposoby wprowadzenia go do układu. Analiza zmierza do określenia stabilnych warunków spalania.

Współpraca modułów instalacji

Poszczególne moduły instalacji turbiny gazowej (sprężarka, komora spalania, część rozprężna) współpracują ze sobą. Szczegółowe badania warunków eksploatacji układu powinny określić zakres współpracy modułów. Bierze się pod uwagę pracę w warunkach nominalnych, jak i częściowe obciążenie. Takie badania pozwalają ustalić charakterystykę pracy całego układu.

4. Przykładowe wyniki analiz teoretycznych

Rozpatrzono dwa zagadnienia dotyczące instalacji turbin gazowych zasilanych biomasą: dołączenie do prostego układu chłodzenia międzykadłubowego sprężarki oraz regenerację ciepła spalin. Do obliczeń wykorzystano pakiet symulacyjny opracowany w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Model układu zastosowany do obliczeń dla obydwu problemów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4 Model układu turbiny gazowej z chłodzeniem międzykadłubowym oraz regeneracją ciepła spalin

Opracowany pakiet symulacyjny modeluje pracę turbiny gazowej w zadanych warunkach eksploatacyjnych. Wyznacza parametry medium roboczego w charakterystycznych punktach obiegu, a także moc elektryczną i sprawność całego układu.

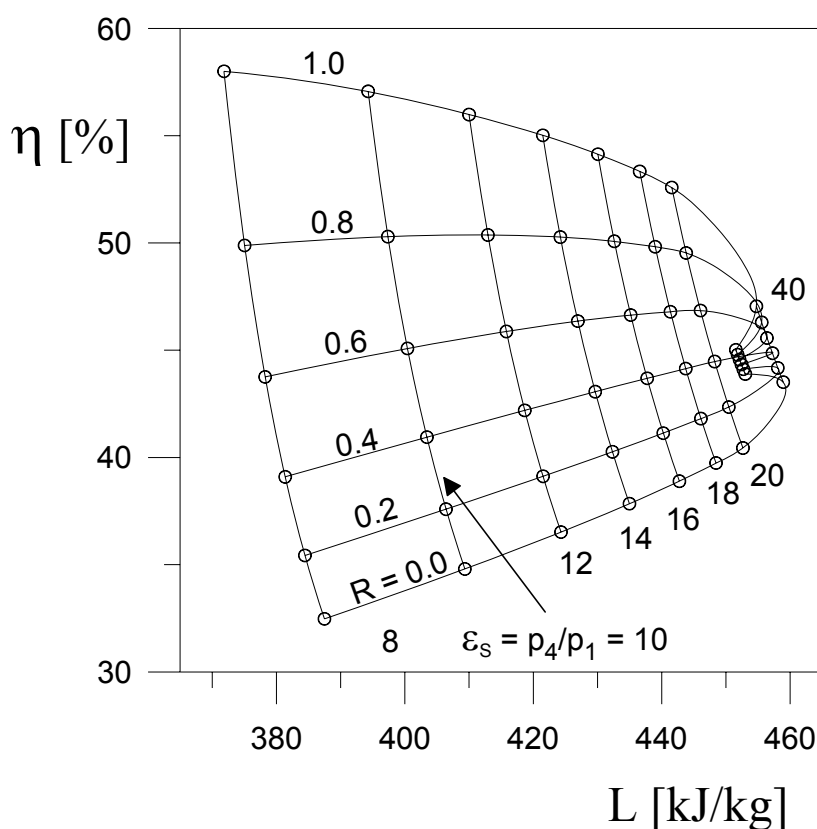
4.1. Regeneracja ciepła spalin

Jednym ze sposobów zwiększenia sprawności układów turbin gazowych jest regeneracja ciepła. Takie rozwiązanie stosuje się zwłaszcza w instalacjach mniejszych mocy (mini- i mikroturbiny). Rozprężone spaliny na wylocie z turbiny posiadają zazwyczaj dosyć wysoką temperaturę. W autonomicznych układach kieruje się je do

regeneratora (R na rys. 4) podgrzewającego powietrze kierowane do komory spalania. Miarą efektywności pracy regeneratora jest stosunek temperatur:

$$R = \frac{T_6 - T_5}{T_9 - T_5} \quad (1)$$

Wartości współczynnika R odpowiadają konkretnym rozwiązaniom konstrukcyjnym regeneratora. Symulację pracy układu przeprowadzono dla wartości z zakresu 0 (brak regeneracji) do 1 (idealna regeneracja ciepła spalin) przy różnych stosunkach ciśnień $\varepsilon_s = p_4/p_1$. W obliczeniach nie uwzględniano chłodzenia sprężarki. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 Analiza pracy układu z regeneracją

Jak wskazują wyniki polepszenie warunków regeneracji, czyli zwiększenie ilości odzyskiwanego ciepła, prowadzi zawsze do zwiększenia sprawności całego układu.

4.2. Chłodzenie międzykadłubowe sprężarki

Efektom chłodzenia w procesie sprężania jest zmniejszenie mocy potrzebnej do napędu sprężarki. Z tego powodu chłodzenie należy do najważniejszych przedsięwzięć poprawy efektywności układów turbiny gazowej i technologii energetycznych zintegrowanych z tymi układami. Proces sprężania z chłodzeniem stosuje się obecnie głównie w układach wielopaliwowych w tym także w instalacjach przeznaczonych do utylizacji biomasy.

Chłodzenie międzykadłubowe (zewnętrzne) realizuje się w chłodnicy umieszczonej między modułami sprężarki.

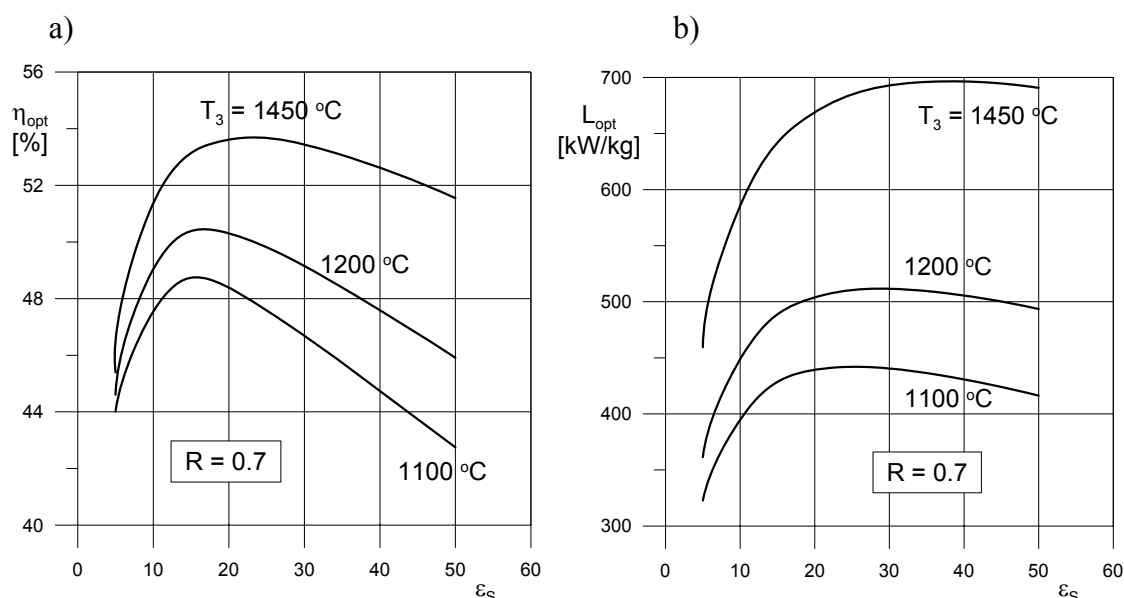
Zasadniczym problemem przy zastosowaniu chłodzenia zewnętrznego jest dobór stosunków ciśnień (spręży) dla poszczególnych modułów sprężarki. Dla złożonych układów turbin gazowych istnieją dwa kryteria optymalizacyjne:

- kryterium maksymalnej sprawności układu (η [%]),
- kryterium maksymalnej pracy jednostkowej (L [kJ/kg]).

Optymalizację doboru stosunków ciśnień przeprowadza się mając na uwadze pozostałe podstawowe parametry charakteryzujące pracę całej instalacji turbiny gazowej. Uwzględnia się między innymi temperaturę za komorą spalania, efektywność regeneracji oraz intensywność chłodzenia pierwszych wieńców turbinowych (α_a na rysunku 4).

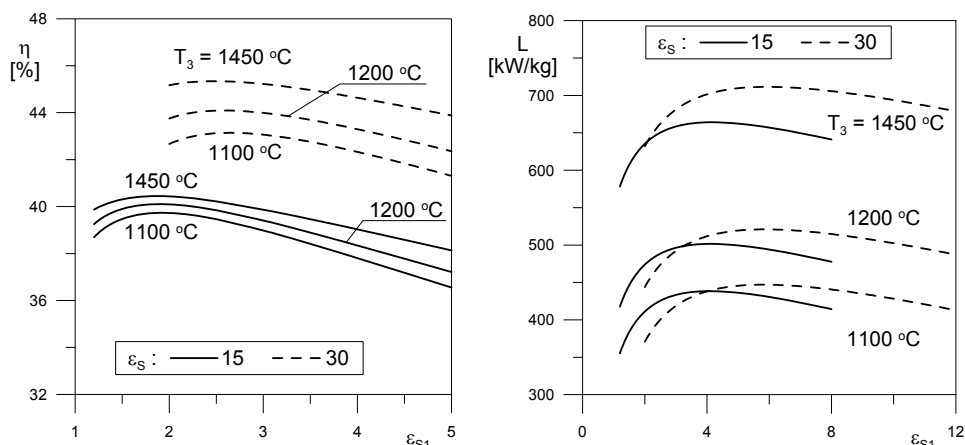
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki analizy sprawności i pracy jednostkowej układu turbiny gazowej. Rozpatrywano trzy poziomy temperatury za komorą spalania. Przedstawione wykresy dotyczą konkretnej wartości efektywności regeneracji.

Postać otrzymanych wykresów wskazuje, że dla założonych parametrów można znaleźć optymalną wartość stosunku ciśnień. Jednakże wartości optymalne dla obydwu kryteriów nie pokrywają się.



Rys. 6 Optymalna sprawność (a) i praca jednostkowa (b) turbiny w zależności od sprężu całkowitego i temperatury za komorą spalania dla ustalonego stopnia regeneracji ($R = 0.7$)

Rysunek 7 przedstawia wyniki optymalizacji podziału stosunków ciśnień pomiędzy dwa moduły sprężarki oddzielone chłodnicą. Optymalizowano stosunek ciśnień pierwszego modułu ($\epsilon_{s1} = p_2 / p_1$) w zależności od całkowitego stosunku ciśnień (ϵ_s) oraz temperatury za komorą spalania.



Rys. 7 Sprawność (a) i praca jednostkowa (b) układu w zależności od stosunku ciśnień pierwszej sekcji sprężarki, całkowitego stosunku ciśnień oraz temperatury za komorą spalania

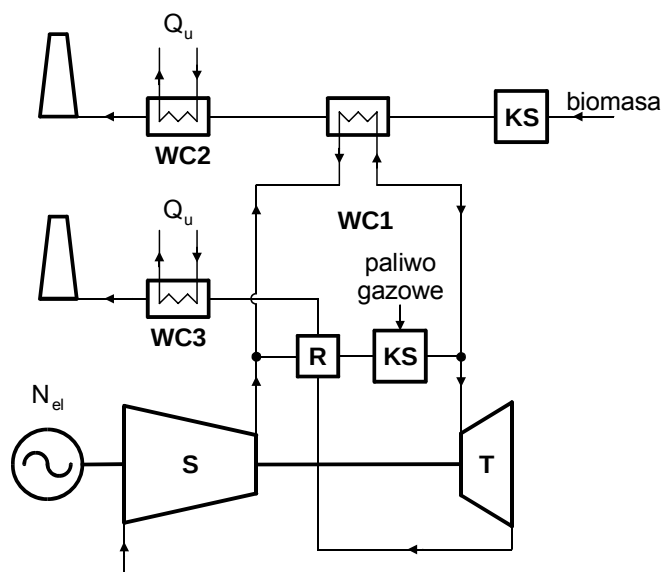
Stosując dwa wymienione wcześniej kryteria można ustalić optymalny podział stosunku ciśnień. Podobnie jak w przypadku optymalnego całkowitego stosunku ciśnień, także w tym przypadku otrzymane wartości optymalne różnią się w zależności od stosowanego kryterium.

5. Przykładowe instalacje energetyczne turbin gazowych ze spalaniem biomasy

Strukturę technologiczną instalacji turbiny gazowej ze spalaniem biomasy dobiera się w zależności od konkretnych potrzeb. Poniżej przedstawiono przykłady rozbudowanych układów zasilanych biomasą.

5.1. Układ dwupaliwowy

Instalacje ze spalaniem zewnętrznym biomasy można połączyć z klasycznym układem turbiny gazowej, np. według koncepcji pokazanej na rys. 8. Dodatkowo można przewidzieć suszenie biomasy za pomocą spalin z jednego lub drugiego układu. Główną zaletą pokazanej instalacji jest elastyczność paliwowa.



Rys. 8 Układ dwupaliwowy: KS – komora spalania, WC – wymiennik ciepła, T – turbina, S – sprężarka, R – regeneracja ciepła spalin

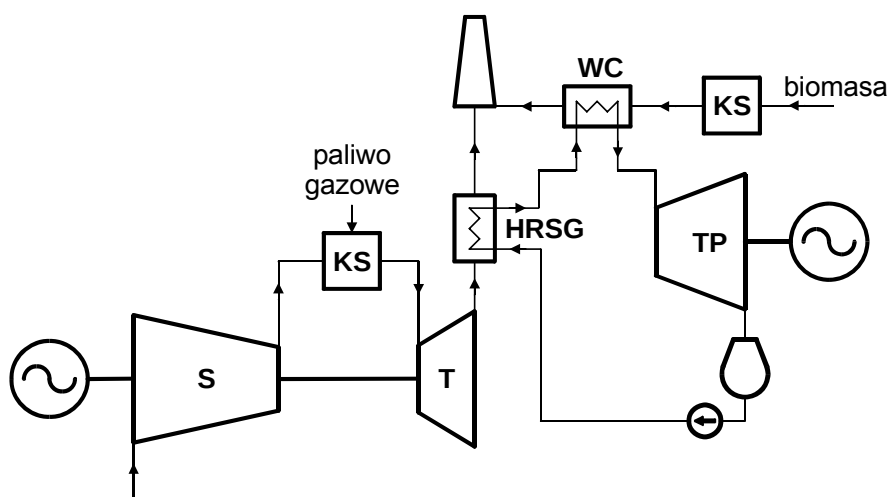
Podczas projektowania układów dwupaliwowych należy uwzględnić dodatkowe problemy badawcze. Wśród głównych zadań można wymienić:

- określenie optymalnej struktury i parametrów połączenia obu układów,
- sprzęgnięcie układów z procesem uszlachetniania biomasy.

5.2. Układ dwupaliwowy parowo-gazowy

Rysunek 9 przedstawia układ złożony z trzech połączonych obiegów termodynamicznych. W skład układu wchodzi turbina gazowa, komora spalania biomasy wraz z całą instalacją przygotowującą to paliwo oraz turbina parowa. Parę wytwarza się w kotle odzyskowym zasilanym spalinami z turbiny gazowej. Przegrzew pary następuje w wymienniku ciepła zasilanym spalinami z komory spalania biomasy.

Podstawowym problemem badawczym w przypadku tego typu układów jest dobór odpowiedniego podziału ilości ciepła przekazywanego w kotle odzyskowym i wymienniku ciepła.

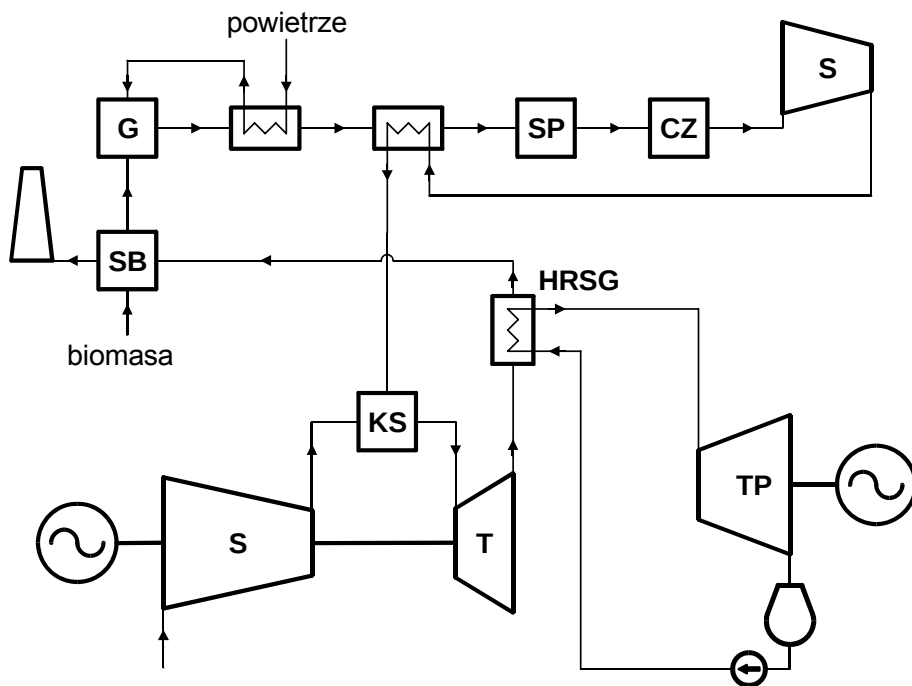


Rys. 9 Układ dwupaliwowy parowo-gazowy

5.3. Układ parowo-gazowy z wewnętrznym spalaniem biomasy

Rozbudowany układ pokazany na rysunku 10 zasila wyłącznie biomasa. Na schemacie pokazano poszczególne etapy wstępnego przygotowania paliwa do spalania wewnętrznego.

Pierwszym procesem jest suszenie biomasy (SB). Dalej następuje jej zgazowanie przy udziale powietrza w ciśnieniu nieco wyższym od atmosferycznego. Zgazowana biomasa przepływa przez szereg wymienników ciepła, które obniżają jej temperaturę. Gaz zostaje następnie przefiltrowany. W pierwszym etapie separuje się ciężkie pyły (SP), a później lżejsze zanieczyszczenia (CZ). Ostatecznie następuje sprężenie gazu i wtrysk do komory spalania. Spaliny z turbiny gazowej zasilają kocioł odzyskowy (HRSG), gdzie wytwarza się parę świeżą dla turbiny parowej (TP).



Rys. 10 Układ parowo-gazowy ze zgazowaniem biomasy

Literatura

1. CHMIELNIAK T., SKOREK G. *Biomass Fueled Combined Cycles*, Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, J. Mikielwicz and W. Nowak, Gdańsk 2004
2. CHMIELNIAK T., SKOREK G. *Analiza układów gazowo-parowych zintegrowanych ze spalaniem biomasy*, Fluidalne spalanie paliw w energetyce, 2004
3. CHMIELNIAK T., SKOREK G. *Biomass Fueled Gas Turbine Cycles*, Contemporary Problems of Thermal Engineering, Ustroń 2004
4. CONSONNI S., MACCCHI E. *Externally Fired Combined Cycles*, Transactions of ASME 96-GT-92
5. CONSONNI S., LARSON E.D. *Biomass Gasifier / Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles*, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, 1996
6. PRONOBIS M. *Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych*, Seminarium PAN Podstawowe Problemy Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Jabłonna 2003

SPALANIE ZEWNĘTRZNE BIOMASY SPRZĘŻONE RÓWNOLEGLE Z ZESPOŁEM TURBINY GAZOWEJ

BIOMASS EXTERNAL COMBUSTION COUPLED PARALLEL WITH GAS TURBINE UNIT

Prof. Dr hab. Inż. Tadeusz Chmielniak, mgr inż. Sebastian Lepszy

Politechnika Śląska
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
sebastian.lepszy@polsl.pl

Abstrakt: W artykule przedstawiono trzy przykładowe struktury układów turbin gazowych ze spalaniem zewnętrznym biomasy. Obliczono sprawności energetyczne oraz wskaźnik obrazujący efektywność zamiany energii chemicznej biomasy w energię mechaniczną w funkcji ilości powietrza przepływającej przez wysokotemperaturowy wymiennik ciepła.

Słowa kluczowe: biomasa, turbiny gazowe, spalanie zewnętrzne

1. Wprowadzenie

Biomasa jest powszechnie uważana za jedno z głównych paliw odnawialnych. Biomasa roślinna z energetycznego punktu widzenia ma wiele zalet takich jak: wysoka reaktywność, mała zawartość części mineralnych, siarki i azotu, jej wadami są głównie: duża wilgotność oraz niska gęstość energetyczna ($\rho_E \cong 2 \text{ GJ/m}^3$ w stanie powietrzno-suchym), a zróżnicowany skład chemiczny w przypadku korzystania ze specjalnych upraw biomasy jej podaż jest zależna od urodzaju. Rozpatrywane układy energetyczne z biomasą jako paliwem cechuje duża różnorodność. W układach z turbinami gazowymi (głównie małej mocy) rozpatruje się zarówno spalanie zewnętrzne jak i wewnętrzne (w tym ostatnim przypadku proponuje się najczęściej układy gazowo-parowe zintegrowane ze zgazowaniem biomasy). Spalanie zewnętrzne biomasy nie wymaga głębokiego uszlachetniania poza ewentualnym kondycjonowaniem i suszeniem. Zespolecie instalacji turbiny gazowej z procesem suszenia umożliwia uzyskanie stosunkowo wysokich sprawności energetycznych zdefiniowanych dla wartości opałowej mokrej biomasy. Obok tych walorów istnieją jednak także wady tego typu technologii energetycznych. Główną z nich jest konieczność zastosowanie wysokotemperaturowego kosztownego wymiennika ciepła.

Zagadnienia zewnętrznego spalania biomasy są dyskutowane w literaturze zarówno z punktu widzenia poszukiwania optymalnej struktury technologicznej jak i konstrukcji komór spalania i wymienników ciepła [zob. np. 1,2,3,4,5,6,7].

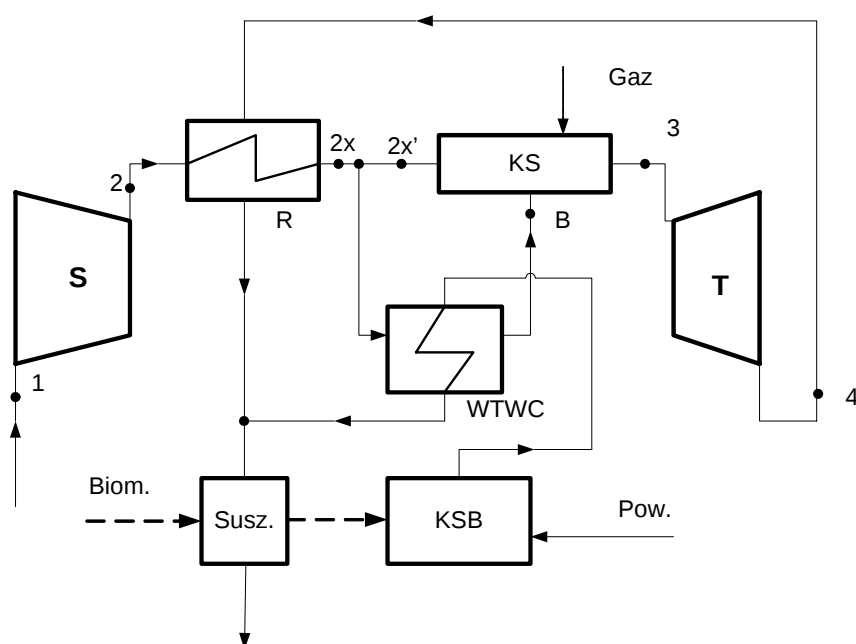
Układy ze zgazowaniem biomasy (reaktory fermentacyjne, atmosferyczne i ciśnieniowe) dają większe możliwości wykorzystania biomasy jako paliwa. Reaktory fermentacyjne stosuje się w małych instalacjach gdzie materiałami wsadowymi są zazwyczaj organiczne odpady rolnicze. W zachodniej Europie w ostatnich latach obserwuje się szybki rozwój instalacji generacji ciepła i elektryczności wykorzystujących ten rodzaj reaktorów [14].

Generatory termiczne atmosferyczne oraz ciśnieniowe stosowane są w układach energetycznych większej mocy [8-13,15,16]. Zgazowanie biomasy umożliwia także budowę hierarchicznych instalacji gazowo-parowych lub jej wykorzystanie (po procesie konwersji) jako paliwa w ogniach paliwowych.

Dla zmniejszenia ryzyka paliwowego można rozważyć utylizację biomasy w układach wielopaliwowych. Klasycznym przykładem technologii dwupaliwowej jest współspalanie biomasy z węglem w kotłach pyłowych i fluidalnych. Istnieje wiele innych możliwych technologicznych struktur dwupaliwowych (wielopaliwowych). Przedmiotem artykułu jest badanie układu równoległego spalania zewnętrznego biomasy i klasycznego układu turbiny gazowej z regeneracją opalanej gazem ziemnym. Przyjęto założenie, że przy baraku biomasy układ z paliwem gazowym może pracować autonomicznie.

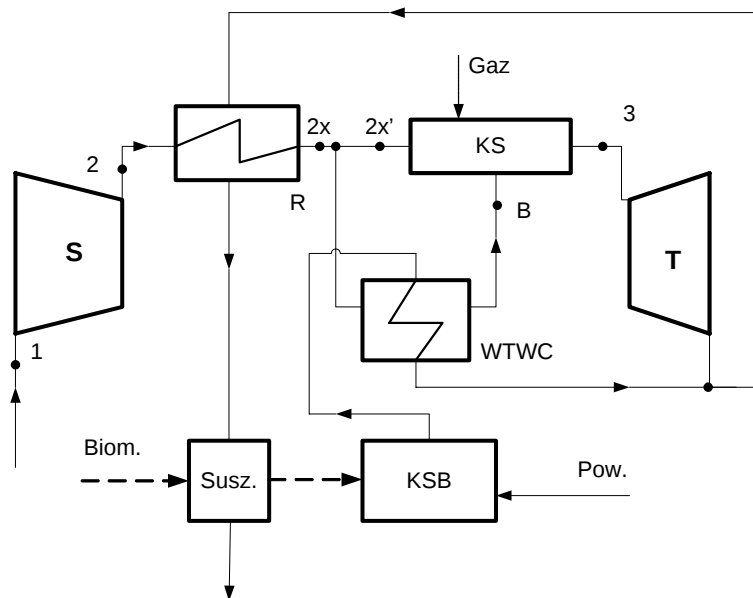
2. Struktura badanych układów

Badane układy ilustrują odpowiednią rys. 1,2 i 3. Cechą wspólną tych obiegów jest rozdzielenie strumienia powietrza wypływającego z wymiennika regeneracyjnego na strumień powietrza wpływający do komory spalania opalanej gazem oraz na strumień powietrza wpływający do wysokotemperaturowego wymiennika ciepła. Poprzez regulację stosunku strumienia powietrza płynącego do komory spalania opalanej gazem i wysokotemperaturowego wymiennika ciepła możliwa jest regulacja pracy układu który może pracować zarówno spalając gaz ziemny jak i biomasę.



Rys. 1. Obieg mikrociepłowni gazowej z zewnętrznym spalaniem biomasy (wariant 1).

W układzie przedstawionym na rys. 1 w wysokotemperaturowym wymienniku ciepła (WTWC) powietrze z obiegu turbiny gazowej zostaje ogrzane przez spaliny opuszczające komorę spalania biomasy (KSB). Ogrzane powietrze opuszczające wymiennik ciepła kierowane jest do komory spalania opalanej gazem ziemnym (KS). Spaliny opuszczające wysokotemperaturowy wymiennik ciepła kierowane są do (Susz) biomasy.



Rys. 2. Obieg mikroturbiny gazowej (wariant 2) z zewnętrznym spalaniem biomasy i mieszaniem spalin.

W trzecim wariancie, rys. 3, zastosowano dodatkowy wymiennik regeneracyjny (R1) w obiegu spalania biomasy. Spaliny opuszczające WTWC wpływały do wymiennika R1 powietrze dostarczane do komory spalania biomasy (KSB).

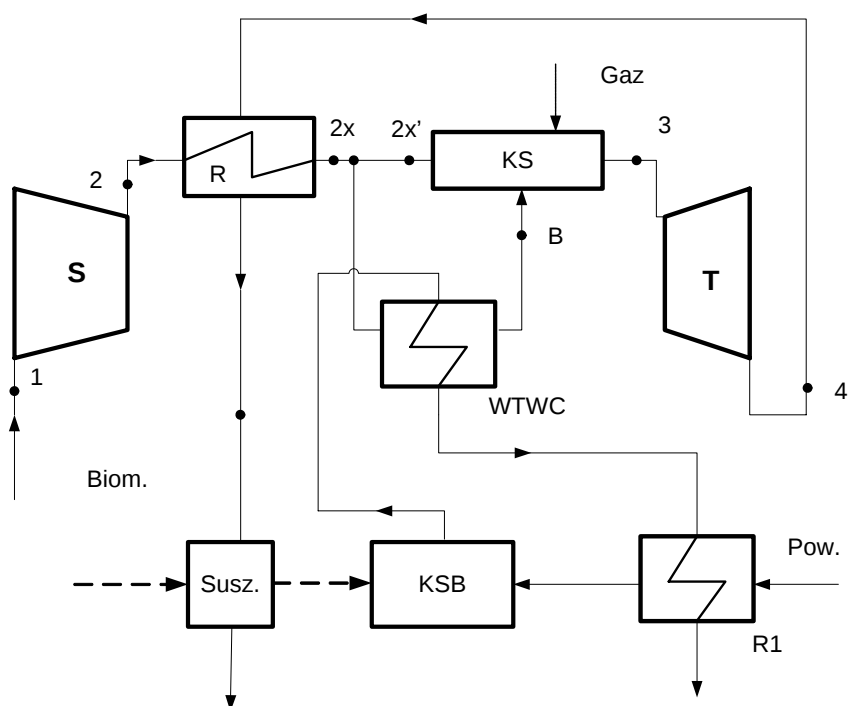
Do obliczeń przyjęto że biomasą spalaną w układach jest drewno wierzby. Biomasa spalana w komorze spalania ma następujący skład:

$c_{daf}=49,4 \text{ \%}$, $h_{daf}=6,1 \text{ \%}$, $o_{daf}=44,1 \text{ \%}$, $n_{daf}=0,4$, $par=1,4 \text{ \%}$, $w_{ar}=14,7 \text{ \%}$. Wartość opałowa takiej biomasy wynosiła $W_{d ar}=14951 \text{ kJ/kg}$ ($W_{d dry}=18020 \text{ kJ/kg}$). Spaliny z układów służyły do podsuszenia biomasy od wilgotność 50% do wilgotności 14,7 %. Wartość opałowa biomasy o wilgotności 50 % wynosiła $W_{dar0.5}=7789 \text{ kJ/kg}$ i obliczono ją z wzoru:

$$W_{dgr} = W_{ddrv} (1 - w_{gr}) - 2442 w_{gr} \text{ [kJ/kg]} \quad (1)$$

Dla wszystkich trzech wariantów przyjęto jednakowe założenia dotyczące parametrów mikroturbiny. Turbina gazowa zbudowana była ze sprężarki o sprężu $\beta=3,68$ i sprawności politropowej $\eta_{ps}=0,85$. Podgrzewacz regeneracyjny skonfigurowano przyjmując sprawność wymiany ciepła $\eta_w=0,8$. W warunkach znamionowych wysokotemperaturowy wymiennik ciepła zwymiarowany był przy następujących założeniach:

- różnica temperatur spalin wylotowych i powietrza wlotowego wynosiła 60K,
- temperatura powietrza wylotowego z wymiennika wynosiła 800^oC,
- strumień masy powietrza przepływającego przez wymiennik wynosił 90 % strumienia wpływającego do układu turbiny gazowej. (do sprężarki)



Rys. 3. Obieg mikroturbiny gazowej (wariant 3) z zewnętrznym spalaniem biomasy i dodatkowym wymiennikiem regeneracyjnym

Temperatura za komorą spalania paliwa gazowego wynosiła 900°C. Sprawność politropową turbiny przyjęto równą $\eta_{pT}=0,85$. Współczynnik nadmiaru powietrza w komorze spalania biomasy wynosił $\lambda=1,1$.

3. Wybrane wyniki symulacji pracy układów

3.1. Zakres obliczeń

Dla uzyskania wstępnej oceny efektywności energetycznej rozpatrywanych układów dwupaliwowych przeprowadzono obliczenia sprawności zdefiniowanych związkami (1) i (2). Pierwsza w nich jest sprawnością energetyczną określoną do mocy wewnętrznej i całkowitego strumienia energii chemicznej doprowadzonej do komory spalania i suszarki biomasy. Sprawność określona przez (2) może być uważana za efektywność konwersji biomasy mokrej w badanych układach. Symulacje przeprowadzono dla różnych wartości α (zal. (3)).

$$\eta_e = \frac{N_e}{m_g W_{dg} + m_b W_{dar0.5}} \quad (1)$$

$$\eta_e^* = \frac{N_e - \eta_{ta} m_g W_{dg}}{m_b W_{dar0.5}} \quad (2)$$

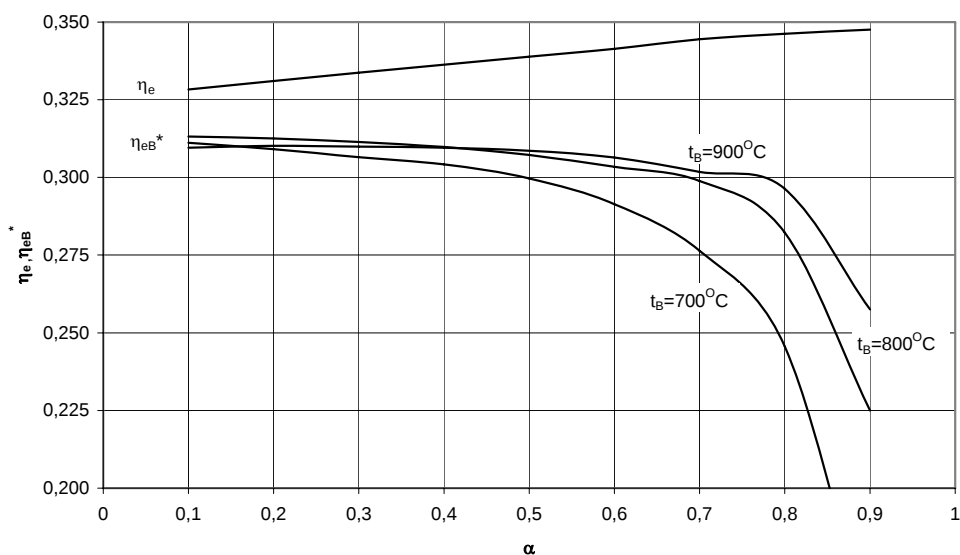
$$\alpha = \frac{m_{2x'}}{m_{2x}} \quad (3)$$

gdzie: N_e – moc mechaniczna układu, m_g, m_b – strumienie masy paliwa gazowego i biomasy wilgotnej, $W_{dg}, W_{dar0.5}$ – wartości opałowa gazu i biomasy wilgotnej, η_{ea} – sprawność energetyczna autonomicznego zespołu turbiny gazowej (bez połączenia z instalacją biomasy).

Wyniki obliczeń układu pierwszego (rys. 1) pokazano na rys. 4. Ze wzrostem α rośnie η_e oraz maleje η_{eb}^* . Istotną cechą tego układu jest mała zmienność sprawności konwersji mokrej biomasy w zakresie do $\alpha \approx 0,5$ dla wszystkich rozpatrywanych wartości temperatury w punkcie B. Różnica między η_e i η_{eb}^* rośnie ze wzrostem α .

Analiza obliczeń układu drugiego (rys. 5) wskazuje na istotne zmniejszenie efektywności η_{eb}^* ze wzrostem α . Jest to następstwem obniżenia temperatury strumieni na wlocie do regeneratora. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano z badań trzeciej struktury technologicznej (rys. 6). Jest interesującym, że sprawność konwersji biomasy zdefiniowana przez zależność (3) jest wyższa od η_e w dużym przedziale zmienności α . Wyniki pokazane dla uzyskania przy odpowiednich założeniach, z których decydujące znaczenie ma wartość temperatury za komorą spalania paliwa gazowego oraz warunki zdefiniowane dla WTWC.

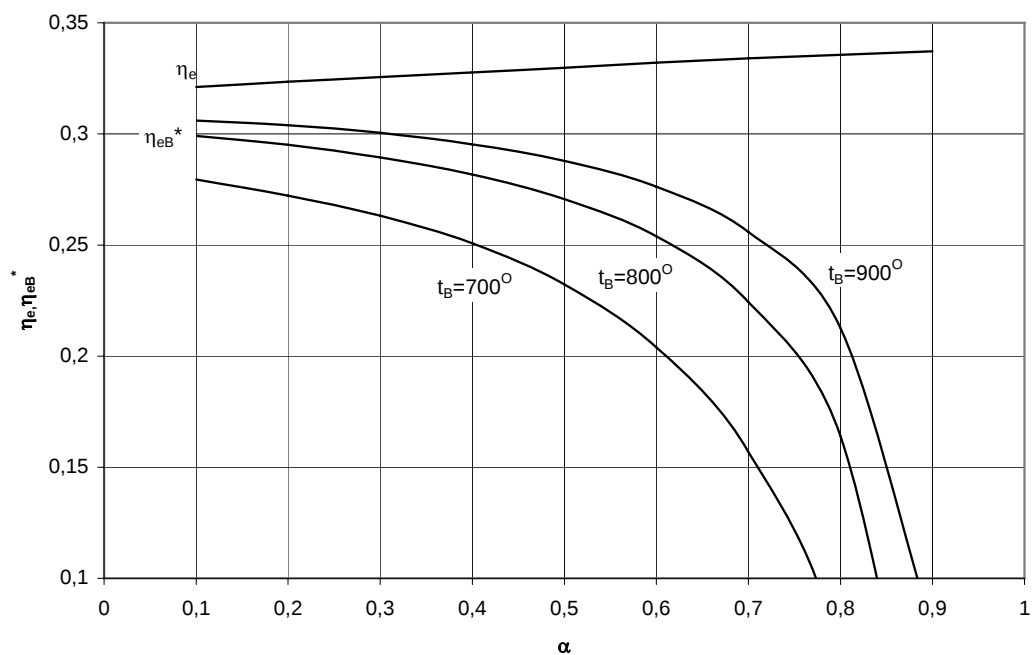
We wszystkich analizowanych przypadkach strumień spalin kierowany do suszarni miał wystarczającą energię chemiczną do uzyskania odpowiedniego stopnia wilgotności biomasy podsuszanej. Dla parametrów znamionowych w wariancie 1 możliwe jest uzyskanie dodatkowego strumienia ciepła w ilości 230 kJ na kg powietrza wlotowego do turbiny gazowej (co stanowi 140% pracy jednostkowej turbiny gazowej), który mógłby być uzyskany przy zachowaniu granicznej wilgotności biomasy podsuszanej ($w = 14,7\%$).



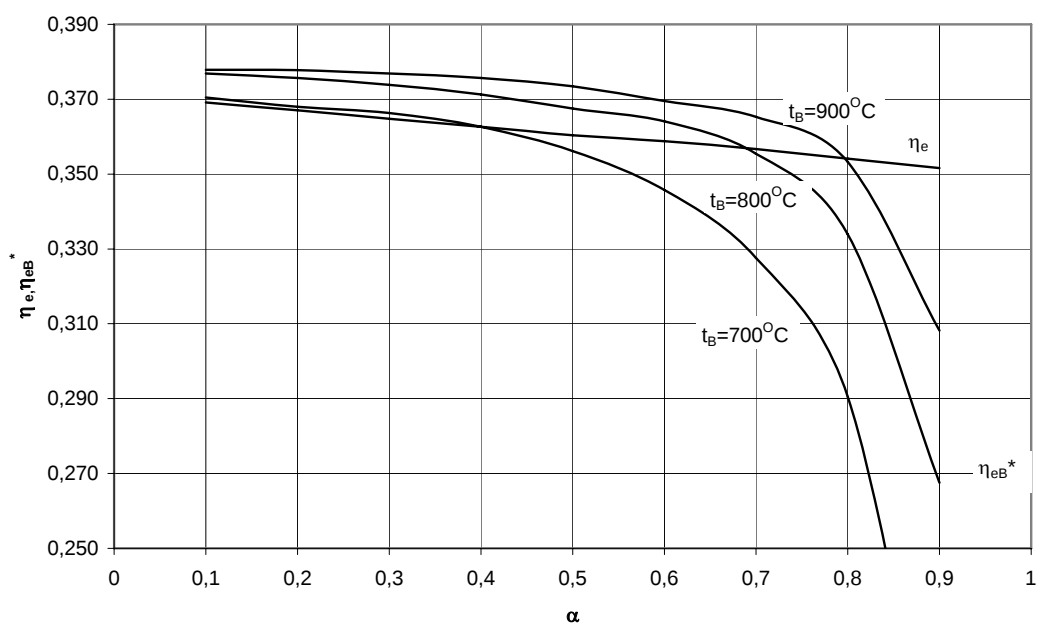
Rys.4. Zależności sprawności η_e , η_{eb}^* od współczynnika α dla wariantu 1.

4. Uwagi i wnioski końcowe

Sprzężenie równoległe spalanie biomasy i układu turbiny gazowej ze spalaniem wewnętrznym stwarza możliwość uzyskania stosunkowo wysokiej sprawności konwersji biomasy mokrej.



Rys.5. Zależności sprawności η_e , η_{eB}^* od współczynnika α dla wariantu 2



Rys.6. Zależności sprawności η_e , η_{eB}^* od współczynnika α dla wariantu 3

W pracy przeprowadzono analizę trzech (z wielu innych możliwych) kombinacji obu modułów. Najlepsze wyniki otrzymano dla układu z podgrzewem powietrza wprowadzonego do komory spalania biomasy.

Ocena poszczególnych sprzężeń wymaga dalszych badań w tym pogłębionych analiz parametrycznych (wpływu sprężu, innych założeń itd.) oraz analiz techniczno-ekonomicznych.

Literatura

1. Elmegard B., et al.: Open-cycle Indirectly Fired Gas Turbine for Wet Biomass Fuels. Proceedings of ECOS 2001, 361-368, 2001.
2. Chmielniak T., Skorek G.: Biomass Fueled Gas Turbines Cycles: Heat Transfer and Renewable Sources of Energy 2004, Międzyzdroje, wrzesień 8-11, 2004.
3. Ferreira S.B., Pilidis P.: On the Economics of the use of Biomass Fuels in gas Turbine Cycles: Gasification vs. Externally Firing. ASME Paper GT 2004-53220.
4. Traverso A. et al.: Demonstration Plant and Expected Performance of an Externally Fired Micro Gas Turbines for Distributed Power Generation. ASME Paper GT 2003-38268.
5. Elmegaard B., Qvale B.: Analysis of Indirectly Fired Gas Turbine for wet Biomass Fuels Based on Commercial Micro Gas Turbine Data. ASME Paper GT-2002-30016, 2002.
6. Eidensten L., Yan J., Svedberg G.: Biomass Externally Fired Gas Turbine Cogeneration. Trans. of ASME. J. of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol 118, July 1996, 604-609.
7. O'Doherty T., Jolly A.J., Bates C.J.: Analysis of a bayonet tube heat exchanger. App. Thermal Engineering, 21, 2001, 1-18.
8. Chmielniak T.J., Skorek G.: Skojarzona produkcja ciepła i elektryczności z wykorzystaniem biomasy. Przegląd Elektrotechniczny LXXX, 9, 2004, 889-893.
9. Liscinsky D.S. et al.: Advanced Technology Biomass-Fueled Combined Cycle. ASME Paper GT 2003-38295, 2003.
10. Ståhl K., Neergaard M.: IGCC Power Plant for Biomass Utilization, Värnamo, Sweden. Biomass and Bioenergy Vol 15, 3, p. 205-211, 1998.
11. Bridgwater A.V.: The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. Fuel Vol 74, 5, 631-653, 1995.
12. Faaij A. et al.: Gasification of Biomass Wastes and Residues for Electricity Production. Biomass and Bioenergy Vol 12, 6, 387-409, 1997.
13. Van der Drift A., de Kant H.F., Rojani J.B.: Commercialization of Biomass Based Gasification Technology. ECN-C-00-080, August 2000.
14. Kalina J., Skorek G., Cebula J.: Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu z biogazowni rolniczych. Gospodarka Paliwami i Energia 11/2003.
15. Cousonni E.D., Larsen E.D.: Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles. Part A and B. Trans. Of ASME, J. of Eng. For Gas Turbine and Power, Vol. 118, July 1996.
16. Belgiorno V., De Feo G., Della Rocca C.: Energy from Gasification of Solid Wastes. Waste Management 23, 2003, 1-15.

ALTERNATIVNÍ PALIVA Z BIOMASY

ALTERNATIVE FUELS FROM BIOMASS

Autor: Ing. Pavel Janásek¹

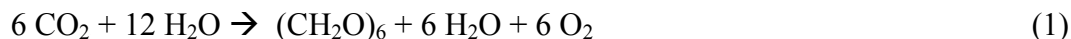
¹VŠB-TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum
17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba
pavel.janasek.fs@vsb.cz

Abstrakt: Ačkoliv biomasa nemůže plně nahradit současně převládající trendy v oblasti energetiky, její možnosti využití jsou do budoucna perspektivní, zvláště pak v oblasti výzkumu. Tento příspěvek charakterizuje biomasu jako palivo, zaměřuje se na její specifické druhy a obecně popisuje její možnosti využití.

Klíčová slova: biomasa, fytomasa, paliva, biopaliva

1. Co je to biomasa

Biomasa vzniká vlivem fotosyntézy, která je nejstarší biochemickou reakcí naší planety. Při fotosyntéze vzniká z oxidu uhličitého a vody za spolupůsobení enzymů, chlorofylu a světelné energie velké množství organických látek. Při fotochemických reakcích se redukuje oxid uhličitý na cukry a voda se oxiduje za vzniku molekulového kyslíku. I když je mechanismus fotosyntézy složitější, je možné tuto biochemickou reakci za účasti světelné energie a chlorofylu schématicky znázornit následovně:



Jako biomasa je obecně označována veškerá živá hmota, tj. rostliny i živočichové. Pojem biomasa v souvislosti s energetickým využitím označuje materiál rostlinného původu, proto by byl přesnější někdy také používaný název fytomasa. Tento materiál může být ve své původní formě, různými způsoby upravený, nebo zbytky a odpady ze zpracování těchto materiálů. V některých případech se také zahrnují materiály jako organický podíl z tuhých komunálních odpadů nebo organické kaly z ČOV apod.

Biomasa není ve smyslu zákona definována jako palivo, ale vyhláškou 252/2000 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 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.

Návrh zákona o podpoře výroby elektřiny a tepelné energie z obnovitelných zdrojů energie uvádí následující definici biomasy: Za biomasu se považuje biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětví, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a rovněž biologicky roztríděná část vytríděného průmyslového a komunálního odpadu.

Zatímco v případě energetického využívání slunce a větru hraje významnou roli počasí a nutnost vyráběnou elektřinu okamžitě spotřebovat, což klade zvýšené nároky na regulaci sítě, disponuje bioenergetika snadnou a přirozenou možností akumulace energie skladováním paliva. Závislost na počasí a klimatických podmínkách existuje také, je však méně výrazná a projevuje se například kolísáním hektarových výnosů v případě pěstovaných energetických plodin. Jak již bylo řečeno, nepatří Česká republika k zemím s vysokým potenciálem vodní, větrné, ani slunečné energie. Lépe je tomu v případě biomasy.

2. Dřevo a dřevní odpad

Význam dřevní hmoty spočívá především v tom, že jde o surovinu domácí, která je při racionálním využívání trvale obnovitelná. Cyklus obnovy samotné dřevní hmoty je však dlouhodobý, dosahuje v průměru 100 let, a proto je nutno hospodařit s lesní půdou nanejvýš opatrně jak z hlediska produkce dříví, tak z významu role jakou tato půda hraje z hlediska klimatického a vodohospodářského. V případě spalování dřevní hmoty se však jedná zejména o dřevní odpady.

Možnosti využití dřevní hmoty jsou dány jejími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Vysoký podíl spalitelných látek je předpokladem k uvolnění velkého množství tepla při spálení dřevní hmoty nebo k získání ušlechtilých paliv. Pro svůj nízký obsah popela a absenci síry je dřevní hmota hodnotným ekologickým palivem. Celkem je z využívaného dřevního odpadu spalováno cca 70 %.

Pro energetické využití se osvědčilo pěstování rychlerostoucích dřevin, některé druhy rychlerostoucích topolů a vrb vynikají při pěstování na zemědělské půdě několikanásobně rychlejším růstem než dřeviny lesní. Sklízňové zralosti dosahují vrby ve 4 a topoly v 5 až 8 letech. Pařízky dobře obrůstají a obmýtní cyklus se může několikrát opakovat. V přepočtu na rok a hektar se dosahují výnosy 10 – 15 tun suché hmoty.

3. Travniny a ostatní stébelniny

Pro energetické využití se poslední dobou využívá mnoho nových zdrojů, zvláště obnovitelných. Jedním z nich jsou travniny a ostatní stébelniny, jako přebytky úrody z běžných travních porostů, pro které není použití v omezené živočišné výrobě či účelově pěstované traviny „rákosového“ charakteru jako např. *Phalaris*. Odlišuje se od obilnin vyšším obsahem dusíkatých látek, dobou sklizně, která se často přesouvá až na jaro příštího roku. Předností je dlouhodobost výskytu na stanovišti, pakliže je zajištěna správná agrotechnika. Výnosy mohou dosahovat u trvalých travních porostů 3 – 8 t/ha.

Mezi úspěšné zástupce této skupiny lze počítat vedle cukrové třtiny taky *Miscanthus* – tzv. „sloní trávu“, která pochází z tropických oblastí. Jedná se o víceletou travinu, která ve svých domovských podmínkách produkuje cca 75 tun sušiny ročně na 1 ha, v Evropě dosahují její výnosy po aklimatizaci cca 40 tun. Výhřevnost hmoty je 18,5 MJ.kg⁻¹. Sklizeň této trávy lze realizovat technickými prostředky určenými pro sklizeň silážní kukuřice a výhodou je, že lze tuto sklizeň provádět celoročně. Spalování této plodiny lze předpokládat ve fluidních topeništích a uvažuje se o současné produkci tepla a elektrické energie.

Dalším energetickým zdrojem může být také *obilninová sláma*, jejíž produkce je 2,5 - 5 tun sušiny na 1 ha za rok při výhřevnosti 17,6 – 18 MJ.kg⁻¹, při podílu popela od 5,3 do 7,1 %. Sláma s prchavým obsahem hořlaviny (cca 80 %) se uvolní a spálí v zóně spalování.

Z rostlin, které se pěstují nejen pro energetické účely se dostává do popředí *Šťovík Uteuša*. Tato plodina je vyšlechtěná na Ukrajině křížením šťovíku zahradního a tjanšanského. Pro energetické účely se plodina sklízí od 2. roku vegetace a dosahuje výnosu 12 t/ha suché hmoty.

Účelově pěstované monokultury rákosovitých travin evropského a asijského původu jsou pro energetické účely mnohem efektivnější. Nemohou být ani v mladých stádiích zkrmovány, dosahují vysokých výnosů, jsou trvalé, vyznačují se pevným stonkem, který nepoléhá ani v zimě. Pěstují se především na vyřazené orné půdě nebo na rekultivovaných loukách. Hlavní představitelkou těchto trav je *lesknice rákosovitá*, ozdobná parková tráva, dorůstající výšky až 1,8 m s výnosem sušiny 4 až 7 tun/ha. Dalším zástupcem je *konopí seté*, které pochází ze Střední Asie, dosahuje výšky až 4 m a výnosu 6 – 15 tun sušiny/ha. Konopí je jednoletou rostlinou, ale na stanovišti vydrží, pokud se vysemení. Ke spalování se hodí především odpad po zpracování na vlákno.

Do popředí se také dostává pěstování některých technických plodin pro energetické účely. Například *topinambury* poskytují 9 až 13 tun biomasy na 1 ha, cukrové proso 9 t/ha a slunečnice až 3 tuny oleje z 1 hektaru. Poměrně vysokou výhřevnost sušiny mají i některé odpady ze zemědělské výroby: *bramborová nat'*, *sláma luštěnin*, *chrást cukrové řepy*, aj. Jejich nevýhodou z hlediska energetického využívání je však vysoká relativní vlhkost v čerstvém stavu.

Mezi energetické rostliny patří mimo jmenované také Krmný sléz, Čínská růže, Křídlatka, Hiso, Mužák, Pupalka dvouletá, Komonice bílá.

Pro přehled jsou v tab. 1 uvedeny Výnosy suché hmoty (t / ha) a spalné teplo u vybraných fytoenergetických rostlin.

Tab. 1 Výnosy suché hmoty (t . ha⁻¹) a spalné teplo u vybraných fytoenergetických rostlin

Jednoleté rostliny	výnosy suché hmoty (t.ha ⁻¹)	spalné teplo (GJ.ha ⁻¹)
konopí seté	12,05	217,62
čirok hyso	19,33	341,31
čirok zrnový	9,83	173,33
čirok cukrový	14,77	259,77
Vytrvalé plodiny		
křídlatka	37,50	729,15
šťovík krmný	12,00	216,29
sléz topolovka	13,40	235,58
bělotrn	16,50	323,56
komonice	20,10	399,82
pajasan žlaznatý	16,97	296,60

4. Odpadní biomasa

Významnou část z celkového potenciálu biomasy, použitelné jako alternativní obnovitelný zdroj energie, tvoří odpadní biomasa.

Obecné rozdělení odpadní biomasy je následující:

- *odpady ze zemědělství a údržby krajiny*
- *odpady ze živočišné výroby (hnoje)*
- *komunální odpad (org. zbytky, kaly z odpadních vod)*
- *organické odpady z průmyslové výroby*
- *dendromasa (lesní odpady) a dřevařské*

5. Možnosti energetického využití biomasy

O tom, jaké jsou možnosti energetického využití biomasy, rozhodují její vlastnosti, jako například obsah vody, hořlaviny a popele, výhřevnost, skladovatelnost, forma biomasy. Přibližnou hranici mezi suchými a mokkými procesy představuje asi 50% obsahu sušiny v biomase. Možnosti přeměny a využití energie z biomasy jsou následující:

1. Termochemická přeměna (suché procesy):
 - spalování (rychle rostoucí dřeviny a energetické plodiny)
 - zplyňování (sláma obilnin a řepky, celé obilní rostliny)
 - pyrolýza (dřevo a veškerá fytomasa)
2. Biochemická přeměna (mokrý procesy)
 - alkoholové kvašení (okopaniny, obilniny)
 - metanové kvašení (sláma a zbytky travin + kejda)
3. Chemická přeměna
 - esterifikace (olejniny)
4. Biologická přeměna
 - kompostování (rostlinné zbytky všeho druhu)
 - čištění odpadních vod apod. (rostlinné zbytky všeho druhu)

5.1. Fytomasa a její spalování

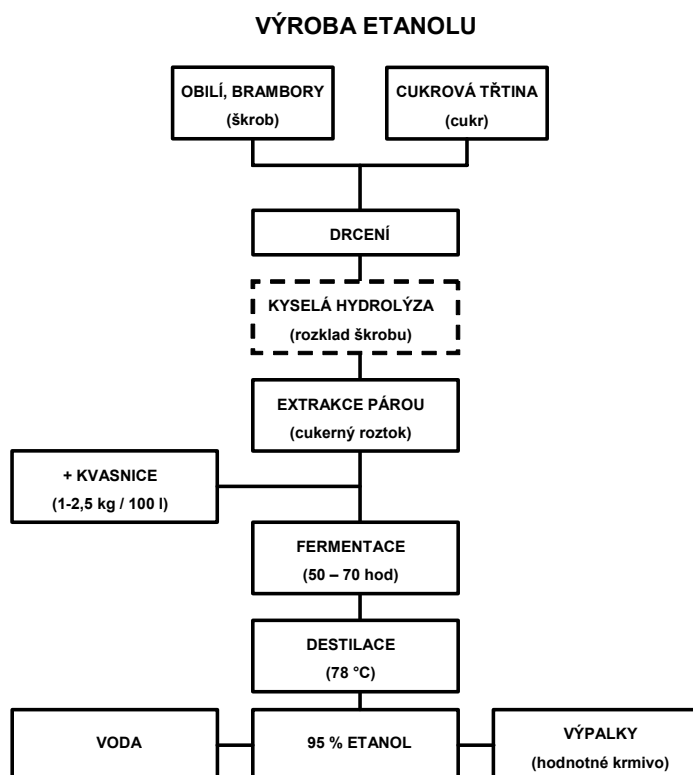
Pevná fytopaliva se vyskytují v několika formách, které se odlišují svou strukturou, obsahem vody, stupněm znečištění, obsahem popele aj. Stupeň obtížnosti jejich zpracování, úprav i využívání je různý, stejně jako ceny a užitečné hodnoty. U dřevních paliv rozlišujeme polena a polínka, kůru, průmyslovou a energetickou štěpku, piliny, hobliny, lesní štěpku, štěpku z rychle rostoucích dřevin, dřevní šrot, pelety a brikety. U paliv ze slámy rozlišujeme malé a obří balíky (válcové a hranolové), řezanku, brikety a pelety. Existují kvalitativní rozdíly mezi slámou obilnin a olejin (slabé stonky) a slámou konopí, miscantu, slunečnice, topinamburu, křídlatky aj. (silné stonky).

Na výhřevnost spalované biomasy má velký vliv vlhkost. Optimální vlhkost pro spalování činí u stébelnin asi 15 – 20%, u dřevin 10 – 20%. Popel ze spálené fytomasy obsahuje množství minerálních látek a stopových prvků, proto jej lze, na rozdíl od popele z uhlí, použít jako hnojivo.

5.2. Lihobenzínový program a výroba etanolu

Jinou možností nepotravinářského využití rostlinné produkce je lihobenzínový program. Na území bývalého Československa bylo využití kvasného lihu jako paliva pro spalovací motory řešeno již od roku 1932 zákonem č. 85/32 Sb. o povinném mísení kvasného lihu s pohonnými látkami, umožňujícím výrobu směsí typu benzín-benzol-etanol o obsahu bezvodého lihu 20 – 25%. Obdobné programy v současnosti využívají např. Brazílie, Kanada či USA.

Etanol vzniká alkoholovým kvašením (viz.obr. 1). Výchozími surovinami jsou cukr, škrob i celulóza. Z jednoho kg cukru lze vyrobit přibližně 0,65l čistého lihu. Praktická výtěžnost je však 90 – 95% (vedlejší produkty – glycerin aj.). K výrobě bioetanolu se hodí především cukrovka, krmná řepa a brambory, ale i tykev, vodnice, tuřín, kedlubny, mrkev. Na rozdíl od výše zmíněných plodin lze obilniny, luskoviny a kukuřici zpracovávat po celý rok.



Obr. 1 Výroba etanolu

K výrobě etanolu se nejlépe hodí žito, velmi vhodná je pšenice a žitovec (tritikale). Destilační výpalky, vznikající při výrobě etanolu z obilovin, jsou cenným krmivem a zisk z jejich použití zlepšuje ekonomiku produkce. Přehled o výtěžnosti etanolu u jednotlivých plodin je znázorněn v tab.2 [4].

Tab. 2 Výtěžnost etanolu u různých plodin

Druh	Výnos plodiny (t.ha ⁻¹)	Škrob nebo cukr (% čisté hmotnosti)	Výtěžnost etanolu	
			(l.t ⁻¹)	(hl.ha ⁻¹)
řepa krmná	90	9,7	59	53
řepa cukrová	30-50	16	90-100	38-48
brambory	20-30	18	100-120	22-33
kukuřice na zrno	4-8	60	360-400	15-30
pšenice	2-5	62	370-420	8-20
ječmen	2-4	52	310-350	7-13
žito	3-4	55,5	36	12,8
proso zrno	2-5	70	330-370	7-18
čirok zrno	1-6	70	340	3,4-20
baláty	10-20	26	140-170	16-31
maniok	12-15	18	175-190	22-23
topinambur	20-40	17	77	15-31

V poslední době jsou zkoumány možnosti získávání alkoholu ze surovin obsahujících celulózu. Celulóza je chemicky hydrolyzována kyselinami nebo louhy za zvýšeného tlaku a teploty. Tato výroba je nákladná, proto jsou zkoumány nové možnosti využitím hub štěpících celulózu (*Trichoderma viride*), případně termofilní kmeny bakterií rodu *Clostridium*.

Etanol je hodnotným palivem pro spalovací motory s přibližně poloviční výhřevností než má benzín či nafta, lze jej však vyrobit prakticky z každé organické hmoty obsahující cukry, škroby, glukózu, ale i celulózu. Ve směsi s benzínem (5 – 10%) je možné etanol spalovat bez zvláštních úprav motoru. Bioteanol jako alternativa pro vznětové motory rozšiřuje možnost využití domácích, plně obnovitelných zdrojů. Hlavním předpokladem je však nezbytná restrukturalizace českého lihovarnictví.

5.3. Bionafta

Řepkový olej (filtrovaný) se bez dalších úprav může stát pohonnou látkou (na prostý rostlinný olej pracoval první Dieselův motor). Pro sjednocení užitečných vlastností s běžnou motorovou naftou se však esterifikuje na metylester řepkového oleje, tzv. MEŘO, plnohodnotnou náhradu fosilní motorové nafty. V praxi se uplatňuje směs metylesteru (MEŘO) s běžnou motorovou naftou, v současnosti nejrozšířenější nepotravinářské využití řepky.

Pěstování řepky určené pro výrobu metylesterů řepkového oleje (MEŘO) patří k častým způsobům ploch vyjmutých z potravinářské produkce. Tento druh zpracování řepky je podporován daňovými úlevami pro spotřebitele bionafty. V EU, ale také u nás, je uplatňován princip uvedení části půd (v EU nyní 10%) do klidu s tím, že na těchto půdách lze pěstovat nepotravinářské plodiny – především řepku.

Metylester řepkového oleje i směsné palivo (32% MEŘO) má velmi dobrou biologickou rozložitelnost (98% , respektive 91% za 21 dní). Směsné palivo vykazuje proti motorové naftě nižší obsah síry a zhruba poloviční kouřivost. Ve spalínách motoru provozovaného na MEŘO je významně nižší obsah rakovinotvorných aromatických uhlovodíků a příznivější složení i dalších emisních složek. (viz. tab. 3) [4].

Tab. 3 Vlastnosti MEŘO v porovnání s motorovou naftou

Ukazatel	Motorová nafta	MEŘO
kinematická viskozita (mm.s ⁻¹): 0°C	3-14	10
20°C	2-8	6,3-8,1
100°C	0,7-2	1,7
cetanové číslo	45	54-55
měrná hmotnost (kg.l ⁻¹)	0,8-0,86	0,87-0,88
bod vzplanutí (°C)	55	130
bod tuhnutí (°C)	0-(-12)	-7
Emise, vznětový motor: Pe=52 kW, VM=4,15 l, n=2 200.min ⁻¹		
CO (g.h ⁻¹)	62	56
CH _x (g.h ⁻¹)	43	31
NO _x (g.h ⁻¹)	223	241
SO ₂ (%)	0,15	0,002
kouřivost (stupnice BOSCH)	0,49	0,26

5.4. Bioplyn

Bioplyn se tvoří všude, kde bez přístupu vzduchu nebo po vyčerpání kyslíku ve hmotě, dochází k rozkladu organické hmoty činností mikroorganismů (městské kaly, kejda, hnojiště, hlubší vrstvy půdy, vodní toky, skládky, rašeliniště apod.). Plyn obsahuje především metan, který je po vodíku a acetyleny nejvýhřevnějším palivem, ale také významným skleníkovým plynem (cca 40krát vyšší účinnost než CO₂). Proto je nařízeno jeho jímání z velkých skládek odpadků a lze očekávat, že i ostatní organické odpady budou povinně zpracovávány v bioplynových stanicích.

Záměrná výroba bioplynu je uměle vyvolaný anaerobní rozklad (metanové kvašení). Současné technologie se od původních liší především homogenizací vstupního materiálu, umožňující příjem a využití jakékoliv biomasy, včetně zpětné cirkulace fermentační kapaliny, která se vrací ve velkém podílu zpět do nově jímané suroviny. Vyžilý substrát s vysokým obsahem sušiny (50%) se po odlisování a dozrání v kompostech zpracovává na tržní hnojivo či aplikuje na vhodné pozemky. Na rozdíl od ostatních organických hnojiv neobsahuje patogenní látky a klíčivá semena plevelů.

Zemědělství produkuje velké množství organických odpadů, které anaerobní fermentace umožňuje likvidovat a přitom energeticky využívat. Ze zemědělských odpadů jsou nejčastěji využívány: kejda, sláma a zbytky travin. Ze záměrně pěstované fytomasy se k výrobě bioplynu hodí především rostliny s nižším obsahem C:N (<33) (biomasa víceletých píceň – jeteloviny z rekultivací, trvale zatravněných ploch apod.).

Bioplyn obsahuje 55 – 80% metanu, 20 – 45% oxidu uhličitého, síru ve formě sirovodíku, dusík, vodu aj. Jde o nízkovýhřevný plyn (při 60% metanu 20 – 25 tis. KJ.m⁻³). Zbytky po vyhnutí jsou využitelné jako hnojivo, po vysušení případně i ke krmení hospodářských zvířat.

Bioplyn má mnohostranné využití, přesto je však z celosvětového hlediska jeho využití poměrně nízké. Pouze v Indii a Číně nachází širší uplatnění. V Evropě, včetně ČR, nemá aktuálně produkce bioplynu z organických odpadních látek větší význam (kromě Dánska).

5.5. Dřevní plyny

I prosté hoření dřeva je z 80% spalování teplem uvolněného dřevního plynu a teprve po jeho spálení shoří zbytek dřevního uhlí přímou oxidací. Lidé tohoto jevu využívají přibližně 400tis. let. Dřevní plyn byl využíván sklárnami, hutěmi i při vytápění.

Dřevní plyn může být vyráběn buď klasicky za omezeného přístupu vzduchu nedokonalým spalováním – dřevoplyn. Obsahující CO, ale s převahou dusíku ze vzduchu (mobilní generátory užívané během války), nebo ve stacionárních zařízeních jako pyrolytický plyn bez přístupu vzduchu podobně jako svítiplyn z uhlí v plynárnách. Plyn získaný pyrolytickým rozkladem dřeva je možné přeměnit na plyn podobný plynu zemnímu, ale i zkapalnit.

5.6. Dřevní oleje

Výrobní dřevního uhlí většinou bez užitku spalují vedlejší produkt výroby - dehtový plyn. Jeho ochlazením a kondenzací přitom můžeme získat cennou kapalnou surovinu (směs dehtů, organických kyselin, vody a dřevních olejů), odpovídající 75 – 80% hmotnosti vstupního materiálu, vhodnou i k výrobě paliv. Některé státy (Kanada, Brazílie) se možností využití dřevních olejů jako paliv vážně zabývají. Nové technologie (rychlá pyrolýza) zkracují proces zplynování na několik vteřin s výkonností několik tun za hodinu. Bez přístupu vzduchu lze při různých teplotách zplynovat a zkapalňovat nejen dřevo, ale prakticky veškerou fyto masu.

6. Základní údaje o použitelné biomase v praxi

Po provedené analýze již existujícího objektu a jeho energetického hospodářství nebo při zpracování (nebo hodnocení) projektu pro výstavbu "na zelené louce" je třeba ověřit, jaký druh biomasy připadá v daném případě v úvahu k energetickému využití.

To znamená, že se musí zjistit nebo ověřit následující skutečnosti:

- forma biomasy
- dostupné a zajištěné roční množství (po celou dobu životnosti zařízení)
- náklady na její získání (vč. nákladů na dopravu)

V průběhu přípravy projektu je nezbytné zjistit podrobnější a ověřené informace o parametrech a vlastnostech biomasy, kterou chceme využívat, jako jsou:

- základní prvkový rozbor
- elementární analýza paliva (včetně charakteristických vlastností popelovin)
- objemová měrná hmotnost
- cena biomasy v místě výskytu (bez dopravy)
- cena biomasy na vstupu do energetického zdroje
- reálné možnosti dodávky (v průběhu roku)
- způsob skladování, kapacita skládky

Například objemová měrná hmotnost pevné biomasy je 3 až 10 krát vyšší než je tomu např. u klasických fosilních pevných paliv (vztaženo na výhřevnost). Pak velikost skladovacího prostoru může být limitujícím faktorem.

Pro informaci jsou uvedeny následující příklady:

Druh biomasy	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]	Objemová měrná hmotnost [kg/m ³]
Polena (měkké dřevo)			(volně ložená)
	0	18,56	355
	10	16,40	375
	20	14,28	400
	30	12,18	425
	40	10,10	450
	50	8,10	530
Dřevní štěpka	10	16,40	170
	20	14,28	190
	30	12,18	210
	40	10,10	225
Sláma (obiloviny)	10	15,50	120 (balíky)
Sláma (řepka)	10	16,00	100 (balíky)
Tříděný komunální odpad	20 - 38	9 - 14	
Bioplyn		cca 25 MJ/m ³	

Tab. 4 Hodnoty vlhkosti, výhřevnosti a objemové měrné hmotnosti biomasy

Pokud uvažujeme o zakládání plantáží rychlerostoucích dřevin, tak v tomto případě je třeba uvažovat s reálnými ročními přírůstky a náklady na ošetřování, sklizeň, zpracování...atp.

Literatura

1. NOSKIEVIČ, P. a kolektiv. *Biomasa a její energetické využití*. Phare, Praha, 1995, s.68. ISBN 80-7078-367-2
2. JANÁSEK, P. Ohniště s řízeným spalováním pro experimentální stanovení energetických parametrů biomasy. In Sborník příspěvků ze semináře: „*Energie z biomasy*“. Brno 2.-3.12.2003. Ed VUT v Brně, 2003, s. 27-39. ISBN 80-214-2543-1.
3. JANÁSEK, P. New results of wood combustion in the experimental furnace. In The second International Conference: „*Combustion, gasification and pyrolysis of biomass and waste*“. Kraków, 26.-28.5.2004. CD-ROM
4. PULKRÁBEK, J. Speciální fytotechnika - Skripta ČZU, dostupné na: <http://etext.czu.cz/>
5. OCHODEK, T. Energetické využití biomasy – habilitační přednáška. Ostrava: VŠB-TU, Výzkumné energetické centrum, 2004. 26 s.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu *Energetické parametry biomasy*, GAČR 101/04/1278

SPALOVÁNÍ BIOMASY V KOTLI TURBOMATIC 35

BIOMASS COMBUSTION IN TURBOMATIC 35 BOILER

Autor: Ing. Kamil Krpec¹

¹VŠB-TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum
17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba
kamil.krpec@vsb.cz

Abstrakt: V práci jsou ve stručnosti popsány zařízení na spalování biomasy, běžně dostupné v ČR. V experimentální části jsou shrnuty dosavadní výsledky získané při měření na kotli Turbomatic 35.

Klíčová slova: biomasa, spalování, kotle

1. Dřevo jako palivo

Z hlediska struktury si můžeme dřevo, používané pro vytápění, rozdělit na dvě hlavní skupiny a to: kusové a sypké. Z ekonomického hlediska je výhodnější spalovat palivo v takové podobě v jaké vzniká, ale ne vždy je to možné. V takovém případě musíme přistoupit k úpravě paliva a to buď na štěpku nebo na peletky. Při rozhodování zda použít kusové dřevo nebo štěpku či peletky je nutno vzít v úvahu skladovací prostory, kterými disponujeme. Dále je nutno vzít v potaz jaký typ kotle chceme pro spalování využít. Z hlediska bezpečnostního a praktického je lepší si vybrat kotel s automatickým přikládáním paliva, který se svým komfortem obslužnosti blíží kotli na plynné palivo.

Oblíbenost automatických kotlů můžeme dokumentovat příkladem z Rakouska, kde v roce 2000 bylo vyrobeno 60 000 tun peletek, v roce 2001 bylo vyrobeno již 90 000 tun a v roce 2005 se má vyrábět až 350 000 tun peletek všeho druhu [1].

2. Přehled kotlů na dřevo

V souvislosti s využíváním dřeva jako paliva, pro lokální vytápění, je nutno si položit otázku „ Jsou na trhu dostupné technologie pro využití tohoto paliva? “.

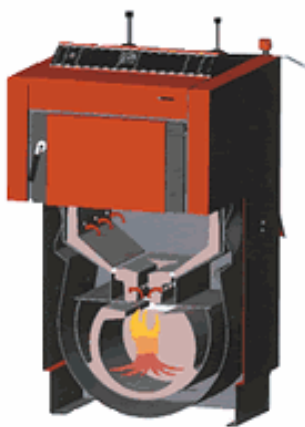
V oblasti spalování kusového dřeva je na našem trhu poměrně velké množství kotlů, které jsou pro tento druh paliva navrženy. Jsou to např. krbová kamna, které lze využít zejména pro vytápění místností, těžko si však můžeme představit, že by kdy byly využívány pro vytápění celých objektů (např. rodinných domů).

Dále jsou na trhu teplovodní kotle, které jsou určeny pro vytápění objektů. Tyto kotle můžeme rozdělit na dva hlavní typy co se týká technologie využití paliva. První typ je kotel, který spaluje dřevo přímo ve spalovací komoře. Zástupcem tohoto typu kotlů je např. kotel DOR 32 D firmy Dakon.



Obr. 1 Kotel DOR 32D, Dakon [2]

Zástupcem druhého typu kotlů je kotel, který v primárním prostoru provede přehřev paliva a jeho zplynění a v jiném prostoru spálí vyvinutý plyn. Zástupcem druhého typu kotle je např. kotel řady DCxxS firmy Atmos.



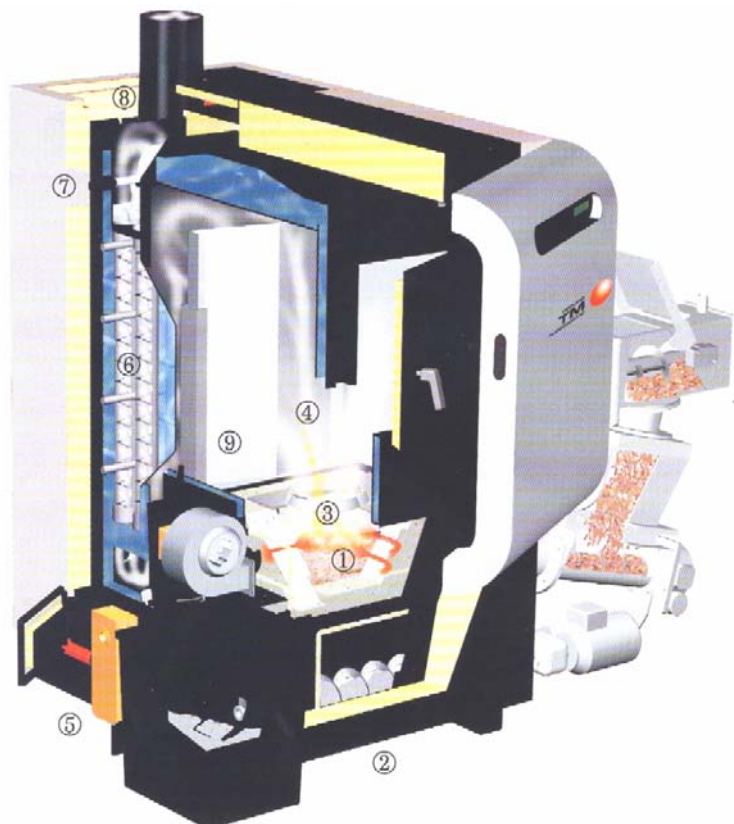
Obr. 2 Kotel řady DCxxS, Atmos [3]

V neposlední řadě je nutno se zmínit o kotlích určených na spalování pelet. Kotle na spalování pelet je na našem trhu dostatek. Mezi hlavní výrobce v ČR patří zejména Viadrus, Atmos, Hamont a mnoho dalších. V oblasti spalování štěrky a pilin však na našem trhu mnoho výrobců nenajdeme (Hamont, Viadrus), což je škoda.

Zástupcem kotlů na spalování dřeva ve formě štěrky, pelet a pilin (v nouzovém případě i kusového dřeva) je např. kotel Turbomatic 35, rakouské firmy Fröling. Tento kotel je v současné době nainstalován na zkušební trati na Výzkumném energetickém centru.

Jedná se o plně automatický teplovodní kotel s vyspělou regulací spalovacího procesu. Kotel je vybaven šnekovým podavačem paliva, rozděleným protipožární klapou. Samozřejmostí je měření podtlaku ve spalovací komoře, měření teploty spalín. Kotel je dále vybaven λ - sondou. Pro dosažení vysoké účinnosti je kotel vybaven automatickým čištěním teplovodního výměníku s následným odvodem. Spalovací komora je vybavena roštěm s automatickým odpopelňováním. V souvislosti s využitím λ - sondy, je nutno se zmínit o automatické regulaci přívodu primárního a sekundárního

spalovacího vzduchu. Zapalování paliva je prováděno přehříváním horkým vzduchem.



- | | |
|---------------------------------|--|
| 1 ... automatický rošt | 6 ... trubkový výměník s automatickým čištěním |
| 2 ... šnekový vynašeč popele | 7 ... pohon aut.čištění výměníku |
| 3 ... šamotová spalovací komora | 8 ... spalínový ventilátor |
| 4 ... velká spalovací komora | 9 ... snímač podtlaku ve spalovací komoře |
| 5 ... zásobník na popel | |

Obr. 3 Kotel Turbomatic 35, Fröling [4]

3. Experimentální měření

Experimentální měření bylo prováděno na již výše zmíněném kotli Turbomatic 35. Vzhledem k tomu, že zařízení bylo nainstalováno nedávno, bylo zatím provedeno malé množství zkoušek.

Jako palivo byla použita dřevní štěpka. Vlhkost paliva byla 25 %, výhřevnost 12 MJ/kg. Vzorek paliva můžete vidět na obr. 4.

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou v tabulce porovnány s hodnotami, které byly naměřeny na kotli Viadrus U22 bio při spalování štěpky.

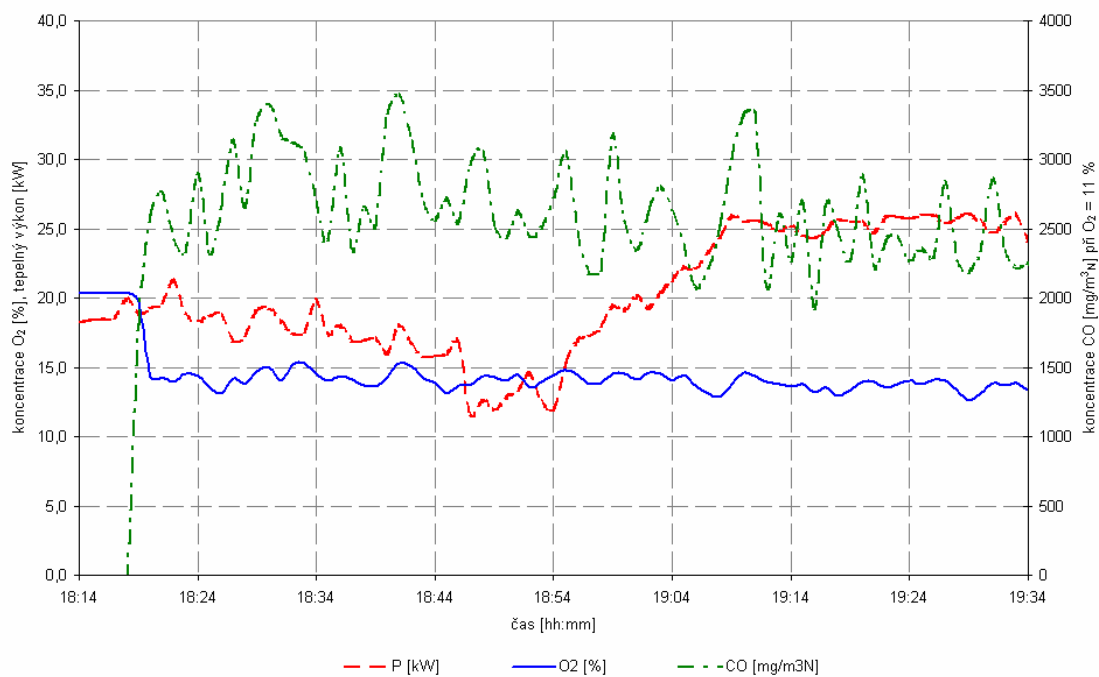
Tab. 1 Naměřené a vypočtené hodnoty

Označení kotle			Turbomatic 35			U22 bio
Druh paliva	-		štěpka	štěpka	štěpka	štěpka
Výkon	kW		18,2	25,3	35,9	28,7
Přebytek vzduchu	-		3,14	2,81	1,92	2,12
Obsah O ₂ v suchých spalínách	obj. %		14,3	13,5	10,1	11,1
Koncentrace plyných emisí v suchých spalínách	CO	ppm	1 497	1 517	937	3 102
	NO	ppm	158	182	247	172
	CO	mg/m ³ _N	1 886	1 911	1 180	3 909
	NO ₂	mg/m ³ _N	324	372	506	353
Koncentrace emisí v suchých spalínách při referenčním obsahu O ₂ (11 %)	CO	mg/m ³ _N	2 819	2 554	1 080	3 948
	NO ₂	mg/m ³ _N	484	498	463	356

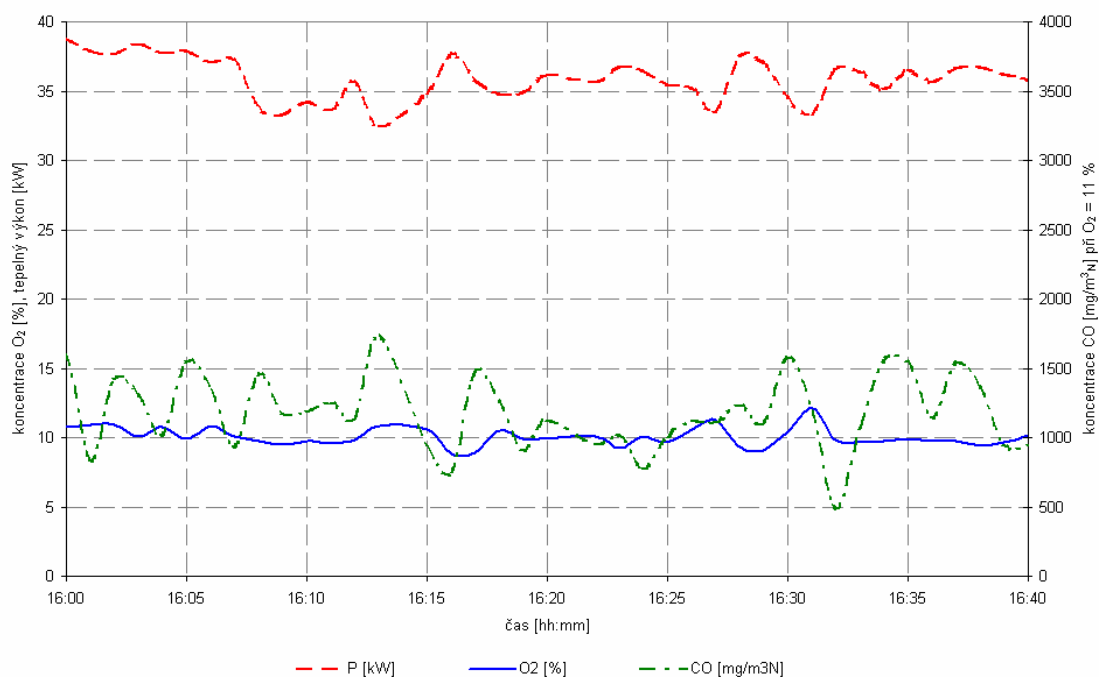


Obr. 4 Palivo použité pro spalování v kotli Turbomatic 35

Průběhy koncentrace CO, O₂ a tepelného výkonu jsou na grafu 1 a 2.



Graf 1 Průběhy CO, O₂ a tepelného výkonu při sníženém výkonu



Graf 2 Průběhy CO, O₂ a tepelného výkonu při jmenovitém výkonu

Z grafů je vidět, že se naměřená koncentrace CO, při snížených výkonech, poměrně dost mění v průběhu zkoušky, což je zřejmě způsobeno nepravidelností v přísunu paliva. U jmenovitého tepelného výkonu se toto kolísání koncentrací CO tolik neprojevuje.

4. Závěr

Při měření bylo zjištěno, že naměřené koncentrace CO a NO_x neodpovídají údajům, které uvádí výrobce kotle. Koncentrace CO uváděné výrobcem byly, při jmenovitém výkonu, překročeny cca 10x. Palivo přitom odpovídalo požadavkům v návodu ke kotli, který uvádí, že vlhkost paliva by měla být maximálně 35 %.

Při měření bylo zjištěno, že řídicí jednotka kotle nereguluje přívody primárního a sekundárního spalovacího vzduchu podle hodnot koncentrace O₂ ve spalínách, získaných z λ - sondy. Toto zjištění bude nutno konzultovat s výrobcem kotle.

Z porovnání s kotlem U22 bio je vidět, že i přes výše uvedené skutečnosti je spalování v kotli Turbomatic 35 dokonalejší. Z tab. 1 je vidět, že hodnoty koncentrací CO vyhoví požadavkům směrnice MŽP č. 13/2002 (ekologicky šetrný výrobek). Tato směrnice uvádí limitní hodnoty CO = 2 000 mg/m³_N a NO_x = 250 mg/m³_N, přepočteno na O₂ = 11 %. Koncentrace NO_x požadavek směrnice nesplnila.

I při tomto měření se ukázalo, že se zvyšujícím se tepelným výkonem klesá koncentrace CO ve spalínách. Toto je nutno zohlednit při návrhu otopné soustavy, kterou je nutno navrhnout tak, aby byl kotel provozován co nejvíce na jmenovitý výkon. Toho lze docílit např. zapojením kotle do systému s akumulací nádobou.

Vzhledem k tomu, že je kotel určen i pro spalování peletek, je možno provést experimenty s peletkami vyrobenými z fytoenergetických rostlin.

Tato publikace vznikla v souvislosti s činností doktorského centra „Energie z biomasy“, projektu GAČR 101/04/H064.

Literatura

1. POLÁŠEK P., JEDLIČKA M. Spalování fytoenergetických rostlin v kotli Viadrus Herkules ECO. *Energie z biomasy*, Brno 2003, str. 71-77. ISBN 80-214-2543-1.
2. Firemní stránky firmy Dakon s.r.o., <http://www.dakon.cz>
3. Firemní stránky firmy ŽDB a.s., závod topenářské techniky Viadrus, <http://www.viadrus.cz>
4. Firemní materiály firmy Fröling

MODELOVÁNÍ FLUIDNÍHO LOŽE V ATMOSFÉRICKÉM FLUIDNÍM ZPLYŇOVAČI

MODELLING OF FLUIDIZED BED IN AFB GASIFIER

Autor: Ing. Martin Lisý, Ing. Jiří Pospíšil, PhD., Doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
Technická 2896/2, 616 69, Brno
lisymartin@seznam.cz

Anotace: Zplyňovací zařízení využívající fluidní lože umožňuje lépe řídit reakční teplotu, při které dochází ke zplyňování a umožňuje větší variabilitu zplyňovaných materiálů. Rozhodujícím parametrem pro dobrou funkci zplyňovacího zařízení využívajícího fluidní lože je vznik stabilní fluidní vrstvy. Stabilita fluidní vrstvy je ovlivněna tvarem částic ve fluidní vrstvě, geometrií zařízení a způsobem přívodu zplyňovacího média, kterým bývá nejčastěji vzduch nebo směs vzduchu a vodní páry. Stabilita fluidní vrstvy klesá se zmenšujícími se rozměry zařízení. U zařízení malých rozměrů je velmi obtížné navrhnout vhodnou geometrii zařízení a odpovídající způsob distribuce zplyňovacího média. Jediným nástrojem umožňujícím řešit rychlostní pole právě v zařízení malých rozměrů s velmi složitým prouděním je počítačové modelování, které bylo v této práci využito pro detailní zviditelnění proudových polí v reaktoru.

Klíčová slova: zplyňovací generátor, rošt, fluidní vrstva, numerické modelování

1. Úvod

Cílem výzkumu bylo detailněji poznat charakter a chování fluidní vrstvy v experimentálním atmosferickém zplyňovacím zařízení BIOFLUID 100. Vzhledem ke skutečnosti, že neexistuje možnost sledovat vizuálně chování fluidní vrstvy během provozu tohoto zařízení, a jedinými pozorovatelnými parametry jsou teplota a tlak, měřené ve třech bodech po výšce reaktoru, zůstával dosud charakter fluidní vrstvy v rovině odhadů.

Fluidní vrstvu nejvíce ovlivňuje distribuce přiváděného zplyňovacího média. V zařízení BIOFLUID 100 je použita distribuce přes rošt složený z kuželových segmentů, seskládaných do vějíře. Pro bližší poznání charakteru proudění nad tímto roštem, v oblasti předpokládané fluidní vrstvy, byl vytvořen matematický model této části reaktoru. Model byl následně použit pro řešení proudových polí, která umožnila objasnit pohyb částic paliva pohybujících se v reaktoru. Změny v rychlostních polích byly sledovány při změně dvou nejvýznamnějších parametrů, kterými je hmotnostní tok zplyňovacího média a zplyňovací teplota.

Vlastní modelování poskytlo korektní popis rychlostních polí, ale pro bližší posouzení vlastní fluidní vrstvy bylo nezbytné získat dostatek informací o množství a velikosti částic setrvávajících v reaktoru v průběhu ustáleného procesu zplyňování. Pro objasnění těchto skutečností byl proveden experiment, kdy se povedlo v průběhu

ustáleného provozu rychle odsát celý objem fluidní vrstvy, a odsáté částice byly zachyceny a následně podrobeny analýze.

2. Experimentální zplyňovací zařízení



Obr. 1 Experimentální stend Biofluid 100

V roce 2000 byl na odboru energetického inženýrství FSI VUT Brno, postaven a uveden do provozu experimentální fluidní atmosférický generátor, který může pracovat se stacionární nebo cirkulující fluidní vrstvou. Zařízení se skládá z dvoudílného generátoru (dolní část - $\text{Ø}209 \times 1500$ a horní část $\text{Ø}300 \times 2250$ mm). Obě části jsou spojeny přechodníkem kónického tvaru. Spodek generátoru byl svařen s menším kuželem, z kterého je vyveden uzávěr popele, a je zde vložen ručně ovládaný rošt. Celková výška generátoru je $H = 4405$ mm. K rychlému provedení experimentů je generátor proveden bez vyzdívky, což vede k dosti velkému kolísání teplot. Dále následuje cyklón, sloužící k odlučování hrubých částic. Další součásti zařízení jsou zásobník paliva, šnekový podavač paliva, šnekový podavač polokoksu, dmychadlo vzduchu, elektroohřívák vzduchu 3×3 kW.

V generátoru probíhá zplyňovací proces ve fluidním loži, tj. ve vznosu způsobeném prouděním zplyňovacího vzduchu a vyrobeného plynu. Zplyňovací reakce probíhají při teplotách $750\text{--}900^\circ\text{C}$. Vzduch pro zplyňování je dopravován dmychadlem přes elektroohřívák. Podle množství vzduchu lze realizovat dva režimy – režim se stabilním fluidním ložem a režim cirkulující. Popel a větší vměstky (kameny, sklovité aglomeráty atd.) jsou vypouštěny skrz rošt a uzávěr do nádoby na popel. Primární vzduch se přivádí do generátoru axiálně skrz rošt, sekundární a terciální vzduch radiálně nad přívodem suroviny a do horní části generátoru.

3. Stručná charakteristika fluidní vrstvy

Za fluidizaci považujeme děj, při němž je soubor pevných částic v poli hmotnostní síly udržován ve formě suspenze pouhým proudem tekutiny.

Jednou z nejvýznamnějších vlastností fluidní vrstvy je značná pohyblivost částic a okolnost, že celý povrch částic je ve styku s proudící tekutinou. Intenzita sdílení tepla a hmoty je ve srovnání s nehybnou vrstvou značná.

Členění fluidních vrstev na různé typy je založeno na charakteru rozložení částic v prostoru fluidní vrstvy. V ideálním případě by bylo jejich rozložení zcela rovnoměrné. Potom mluvíme o ideálně rovnoměrné fluidní vrstvě. Ve fluidní vrstvě však obvykle i při ustáleném přívodu tekutiny do zařízení kolísá místní koncentrace částic během času a prostorové rozložení částic je nerovnoměrné. Takový případ se nazývá nerovnoměrná

fluidní vrstva. Fluidní vrstvu obecně charakterizují parametry mezerovitost, hustota a výška fluidní vrstvy, rychlost volného proudu, tlaková ztráta, velikost a tvar částic.

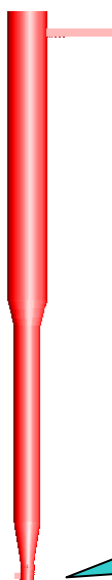
4. Přehled teorie numerického modelování

Pro matematické modelování fluidní vrstvy byl zvolen pracovištěm využívaný software StarCD, který využívá při řešení metodu kontrolních objemů. Matematický popis kontinuální fáze, využívaný v problematice proudění tekutin, vychází z bilance toků veličiny na objemovém elementu. Tento software se stále častěji nasazuje pro detailní popis všech typů spalovacích zařízení. Při řešení vnitřní části experimentálního zplyňovacího zařízení byla pozornost zaměřena především na studium proudění v oblasti předpokládané fluidní vrstvy.

Pro vlastní popis fluidní vrstvy byl použit výpočet dvoufázového proudění, kdy jsou do spojitě fáze dávkovány pevné částice a interakce obou fází utváří výsledné chování v prostoru fluidní vrstvy. Oba přístupy byly aplikovány na vytvořeném matematickém modelu, kde jako vstupní data byly využity výsledky získané při experimentálním odsátí fluidní vrstvy.

5. Matematický model

Pro potřeby numerického řešení byl vytvořen počítačový model experimentálního zplyňovacího zařízení, pomocí komerčního softwaru StarCD. Zvýšená pozornost byla věnována věrnému zachycení geometrie roštu (obr.4), který rozhodujícím způsobem ovlivňuje distribuci vzduchu a následně výsledné proudění v reaktoru. Rošt přivádí vzduch štěrbinami v mezikruží do spodní části fluidní vrstvy. Vnitřní otvor roštu je za provozu utěsněn kuželovým trnem, a uvolňuje se pouze pro potřeby odstranění větších nečistot. Ostatní části zplyňovacího reaktoru jsou jednoduché válcové nebo kuželové geometrie. Pro sestavení modelu bylo využito hexagonálních buněk. Vstup zplyňovacího média byl předepsán na příčném řezu přívodního potrubí, zaústěného do části reaktoru pod roštem. Odvod plynu z reaktoru je umožněn v horní části reaktoru spojovacím potrubím, které plyn zavádí k cyklonovému odlučováku pevných nečistot.



Obr. 3 Pohled na celý matematický model



Obr. 2 Rošt s kuželovými roštnicemi



Obr. 4 Matematický model distribuční části roštu

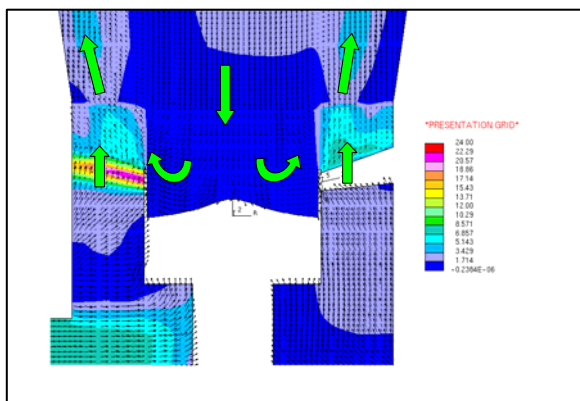
6. Výsledky modelování získané pro původní geometrii roštu

V následujícím textu jsou chronologicky popsány provedené výpočty a okomentovány dosažené výsledky. Pro bližší poznání chování fluidní vrstvy v experimentálním zplyňovacím zařízení byla v první fázi využita skutečná geometrie roštu ("*geometrie 1*"), a do výpočtů byly postupně zahrnovány parametry umožňující věrný popis proudového pole v reaktoru. Získané průběžné výsledky umožňují posoudit vliv jednotlivých parametrů a zvolených zjednodušení. V druhém kroku byla na základě získaných poznatků provedena modifikace geometrie roštu ("*geometrie 2*" a "*geometrie 3*") a otestován její vliv na výsledné rychlostní pole. Při vlastním popisu fluidní vrstvy bylo využito výsledků získaných z provedeného experimentu odsátí fluidní vrstvy [4] pro vhodné nastavení potřebných parametrů.

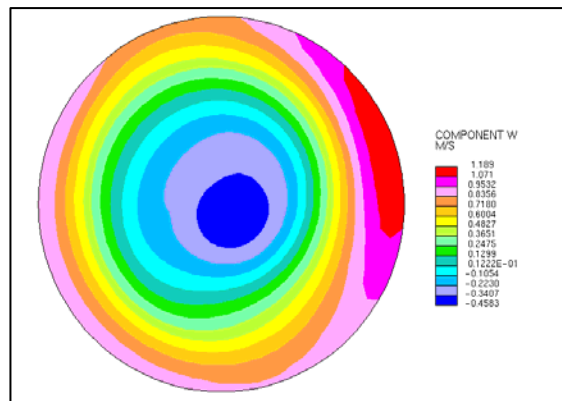
Matematický model označený jako ("*geometrie 1*") věrně zachycuje aktuální stav zplyňovacího zařízení. V prvním kroku byl tento model využit pro studium proudění zplyňovacího média uvnitř reaktoru při absenci fluidní vrstvy. Tyto výpočty měly za úkol blíže poznat charakter distribuce vzduchu přes rošt do prázdného reaktoru, kdy je proud zplyňovacího média ovlivněn pouze přírodním potrubím a roštem. Tomuto stavu se za provozu blíží stav, kdy se v reaktoru nachází pouze velmi malé množství pevných částic (zapalování nebo dohořívání reaktoru). Experimentální zplyňovací zařízení bylo postaveno s možností provozu se stabilní nebo cirkulující fluidní vrstvou. Těmito dvěma režimy odpovídají množství přiváděného vzduchu $24\text{m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$ a $32\text{m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$ (hodnoty získány ze záznamů dříve provedených experimentů). Oba objemové toky vzduchu byly následně testovány ve výpočtech.

Z hlediska fluidní vrstvy je rozhodující svislá složka rychlosti proudění vzduchu v reaktoru (obr.5). Tato složka je vyobrazena v centrálním řezu pro objemový tok $24\text{m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$. Vzduch vstupuje potrubím z levé strany pod rošt. Válcovou komorou pod vlastním roštem postupuje kolem centrálního trnu a vychází štěrbinami uspořádanými v mezikruží vzhůru podél stěny kuželové spodní části reaktoru. Přisátí proudu ke stěně je v oboru fluidní mechaniky známo jako Coandův efekt, který vychází ze snížení statického tlaku v místě intenzivního pohybu tekutiny. Nižší statický tlak proudícího vzduchu je hnacím motorem pro přisávání vzduchu z centrální části do proudu u stěny. Společně se strháváním vzduchu ve směru hybnosti vstupujícího vzduchu dochází k formování konečné podoby rychlostního pole, které je charakteristické vzestupným prouděním podél stěn reaktoru a sestupným prouděním v centrální části. Získané výsledky ukázaly zcela shodný charakter proudění pro oba objemové toky. Výsledná rychlostní pole se odlišují pouze velikostí dosažených rychlostí. Vzhledem k faktu, že při většině prováděných experimentů je použito množství vzduchu $24\text{m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$, bylo v další fázi pokračováno ve vývoji pouze této varianty.

Detailní porovnání nevyrovnanosti vertikální složky rychlosti v horizontálním řezu bylo prováděno v místě, kde kuželová část reaktoru přechází ve válcovou. Příslušná mapa pole získaná pro daný objemový tok $24\text{m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$ vzduchu je znázorněna na obr.6. Charakter zobrazených polí odpovídá výše uvedenému popisu. Největší rychlosti nabývá vertikální složka v obou případech u stěny v pravé části. Detailnější rozbor výsledků ukázal, že nejvyšší rychlosti proudění štěrbinami roštu se nachází také nejčastěji v korespondující pravé části reaktoru - proti zaústění vstupního potrubí

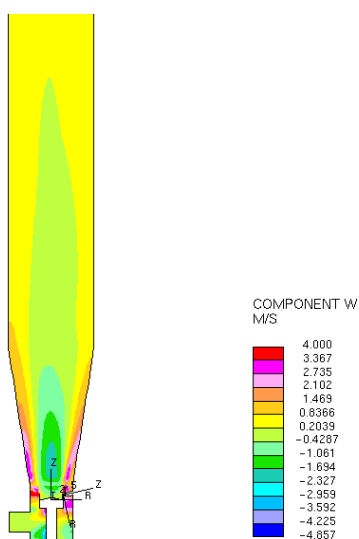


Obr. 5 Vertikální složka rychlosti nad roštem
pro objem.tok $24 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$

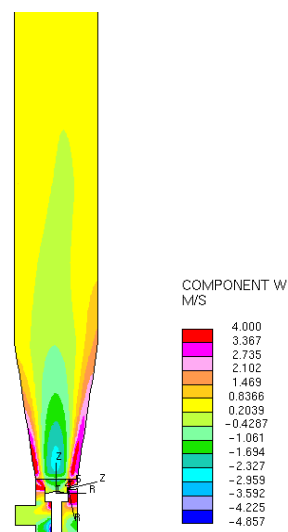


Obr. 6 Vertikální složka rychlosti
pro objemový tok $24 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$

Uvedený charakter proudění je zachován pouze do jisté výšky reaktoru, a s postupným rozšiřováním reaktoru a zvětšováním vzdálenosti od roštu postupně zaniká. Tato skutečnost je dobře patrná při zobrazení polí velikosti svislé složky rychlosti proudění po výšce reaktoru, jak ukazuje obr.7 pro objemový tok $24 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$ a obr.8 pro $32 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$. Zobrazené výsledky ukazují i jisté odchylky v charakteru rychlostního pole, které jsou způsobeny stálými oscilacemi ve vytvořeném rychlostním poli. Vzniklý "jazyk" sestupného proudění ve středu reaktoru se v čase "vlní", a to ovlivňuje i okamžité rychlosti u stěn reaktoru.



Obr. 7 Vertikální složka rychlosti
pro objemový tok $24 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$



Obr. 8 Vertikální složka rychlosti
pro objemový tok $32 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{hod}$

6.1.Zahrnutí pevných částic

Výše popsané výsledky výpočtů byly získány pro čistý reaktor, bez přítomnosti částic zplyňovaného materiálu a dějů provázejících zplyňování. V dalším kroku bylo přistoupeno k zahrnutí částic do modelu, a dále byl zohledněn vývin a pohlcování tepelné energie v průběhu zplyňování částic paliva. Níže uvedené výpočty již tedy

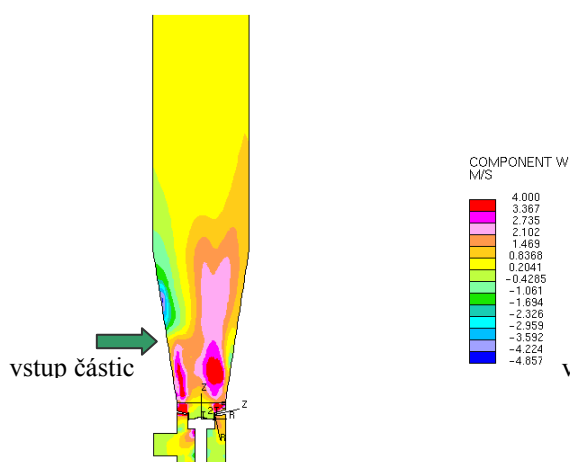
nebudou řešeny jako izotermní, a kromě tepelných bilancí vstupuje do výpočtu i vliv vztlakové síly.

Částice jsou v matematickém modelu přiváděny nad rošt fluidního reaktoru přibližně v polovině výšky kuželové části, kde je ve skutečnosti zaústěn podávací šnekový dopravník. Velikost a množství částic byly zadány na základě provedeného experimentálního odsátí.

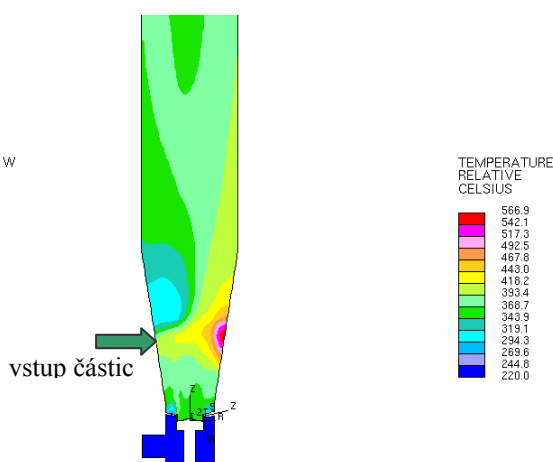
Hodnota tepelného toku uvolňovaného při zplyňování v prostoru fluidní vrstvy byla přebrán z dostupných výzkumných zpráv jako rozdíl tepelného výkonu přiváděného v palivu a tepelného výkonu obsaženého ve výhřevnosti produkovaného plynu. Pro modelovanou situaci uvolňovaný tepelný tok odpovídá cca. 15 kW. Uvolňovaný tepelný tok způsobuje ohřev vzduchu a částic v reaktoru, odpařování vody, pyrolýzu částic paliva a průběh endotermních reakcí, které probíhají při formování spalitelných složek produkovaného plynu.

Pro zahrnutí uvedených přeměn byla v této části zvolena následující zjednodušení. Uvolňovaný tepelný tok byl rovnoměrně zadán pomocí zdrojového členu v rovnici energie do celého objemu předpokládané fluidní vrstvy - kuželová část reaktoru. V první fázi se neuvažovalo s odpařováním částic, a uvolňovaný tepelný tok je snížen na hodnotu 8 kW. Přiváděny byly do reaktoru částice o teplotě 20°C s tepelnou kapacitou 1544 J/kgK. Objemový tok přiváděného vzduchu byl nastaven na 24 m³/hod. Obrázky 9 a 10 ukazují odpovídající pole vertikální složky rychlosti a teploty získané výpočtem.

Oba obrázky ukazují patrný vliv vstupu částic paliva do prostoru reaktoru. Proud vzduchu postupující podél stěny je v tomto místě odkloněn ke středu reaktoru. Kontakt částic o teplotě 20°C s horkým prostředím uvnitř reaktoru způsobuje intenzivní ohřev částic a ochlazování spojitě fáze. V prostoru reaktoru již není uvažován vzduch, ale plyn s objemovým složením 57% N₂, 20% CO, 18% CO₂, 4% CH₄ a 2% H₂. Pro tuto směs jsou zadány fyzikální vlastnosti spojitě fáze. Teploty v reaktoru na obrázku 22 dosahují nižších hodnot, než jsou skutečné provozní teploty, což je důsledek nadhodnocení snížení tepelného toku s ohledem na nezahrnutí odpařování částic paliva.



Obr. 9 Pole vertikální složky rychlosti, částice bez odpařování

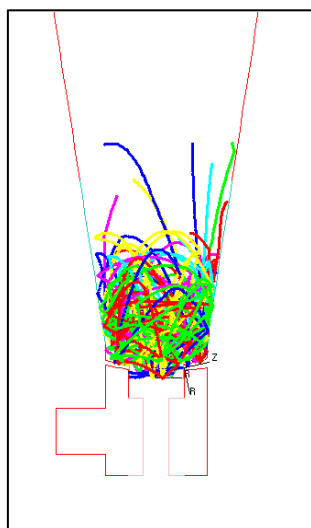


Obr. 10 Teplotní pole, částice bez odpařování

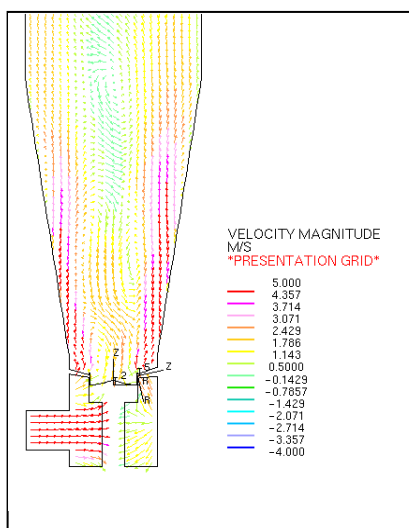
6.2. Zahrnutí odpařování částic

Použitý software je standardně vybaven modulem řešícím odpařování kapiček. Bylo tedy nutné vhodným způsobem využít tento modul pro řešení pyrolýzního mechanismu – odplyňování částic paliva ve fluidní vrstvě. Pro korektní využití mechanismu odpařování k nahrazení pyrolýzního mechanismu byla přiřazena kapička v modelu vysoká viskozita 10^{12} Pa.s, tepelná kapacita dřeva 1544 J/kgK, virtuální teplotu varu 300°C a výparné teplo částice 4kJ/g. Zdrojový člen generované tepelné energie v prostoru fluidní vrstvy byl nastaven na hodnotu odpovídající skutečnosti - 15 kW.

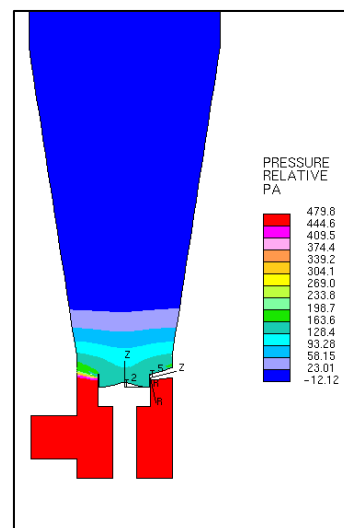
Pokud budeme sledovat vypočtené trajektorie náhodně vybrané skupiny částic (obr.24) vidíme, že jejich chování neodpovídá teorii fluidní vrstvy. Trajektorie tvoří „oblouky“, které jsou důsledkem jakého si „vystřelování“ částic proudem vzduchu nad šterbinami roštu. Zakončení trajektorií v horní části fluidní vrstvy je důsledkem použitého modelu odpařování kapiček. Ten předpokládá úplné odpaření kapičky, a to se projevuje v našem modelu zmenšením částice, jejím vynášením do vyšších hladin a konec trajektorie označuje okamžik úplného odpaření. Vypočtené rychlostní pole (obr.12) má charakter blízký proudovému poli bez zahrnutí částic. Tato skutečnost potvrzuje domněnku, že v průběhu zplyňování nedochází k vytvoření klasické fluidní vrstvy. Vzhledem k velmi malému množství náplně reaktoru během zplyňování, které bylo zjištěno provedeným odsátím fluidní vrstvy, se jedná o extrémně řídkou fluidní vrstvu, kde jsou jednotlivé částice unášeny vzniklým rychlostním polem. Tuto skutečnost potvrzují provedená měření tlakové ztráty fluidní vrstvy, která ukázala tlakovou diferencí pulzující kolem hodnoty cca 500Pa v rozsahu neodpovídajícímu teorii fluidní vrstvy. Vypočtené tlakové pole je vyobrazeno v obr.13 a získaná tlaková diference plně koresponduje s naměřenou hodnotou.



Obr. 11 Zviditelněná trajektorie skupiny částic



Obr. 12 Rychlostní pole

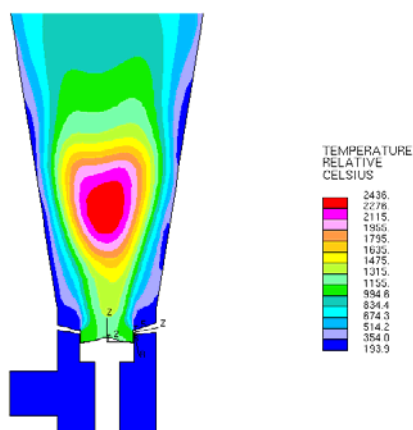


Obr. 13 Tlakové pole

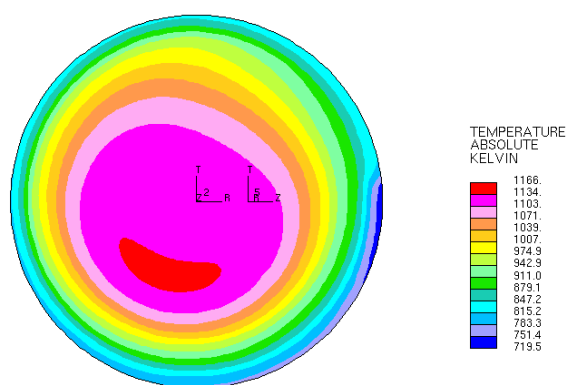
Nejteplejší oblast ve svislém řezu obr.14 dosahuje nereálně vysokých teplot. Tato skutečnost je dána tím, že tepelný tok je zde zadán jako objemový zdroj rovnoměrně dodávající tepelnou energii ve spodní polovině kuželové části reaktoru. Nejvyšší teploty

jsou dosahovány tam, kde je spojitá fáze dlouhodobě vystavena působení uvedeného objemového zdroje. Tomu odpovídají místa s malou rychlostí proudění, nebo místa kde se spojitá fáze otáčí. Oblast reaktoru s nejvyšší teplotou je také charakteristická nejkratкодobější přítomností odpařovaných částic. Řez na obr.15 je již tradičně veden na konci kuželové části reaktoru. Střední teplota v tomto řezu dosažená promícháním stoupajícího plynu již dosahuje reálných hodnot odpovídajících zplyňovacímu procesu, který probíhá při teplotě cca 900°C.

Vzhledem k zjištěné skutečnosti o extrémně řídké fluidní vrstvě, kde je rychlostní pole pouze v omezené míře ovlivněno přítomnými částicemi, a jeho základní charakter je dán distribucí vzduchu přes rošt, je jedinou možností zrovnoměnění rychlostního pole provést vhodnou úpravu geometrie roštu. Vhodná úprava by měla být především reálně realizovatelná na používaném experimentálním zařízení.



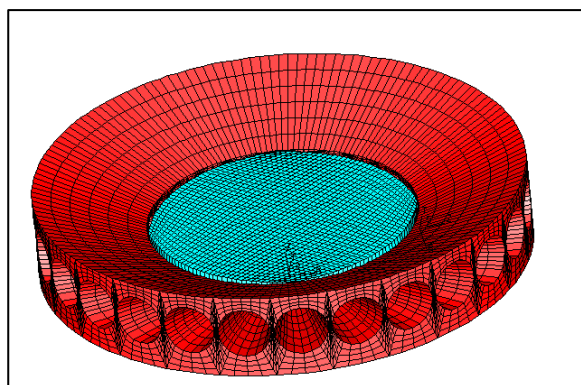
Obr. 14 Teplotní pole ve svislém řezu



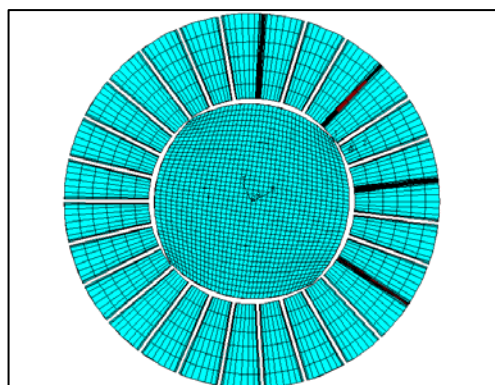
Obr. 15 Teplotní pole v horizontálním řezu

7. Upravená geometrie roštu - "geometrie 2"

První zvolenou úpravou roštu, jejímž cílem je zrovnoměnění vertikální složky rychlosti po průřezu reaktoru, je zaslepení vybraných štěrbin roštu v místech nejvyššího průtoku vzduchu. Tato úprava je snadno proveditelná na stávajícím roštu. Pro zaslepení byly vybrány čtyři štěrbin umístěné na straně protilehlé přívodnímu potrubí (obr.17), kde se vyskytují nejvyšší rychlosti proudění skrz štěrbinu roštu (detailně vysvětleno v předchozím textu).

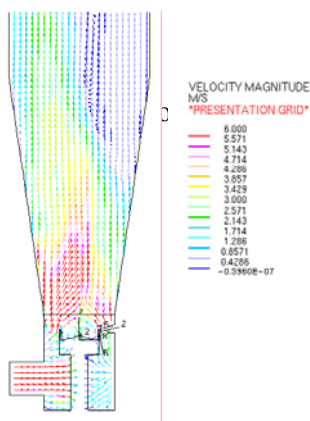


Obr. 16 Pohled na 3D konfiguraci roštu

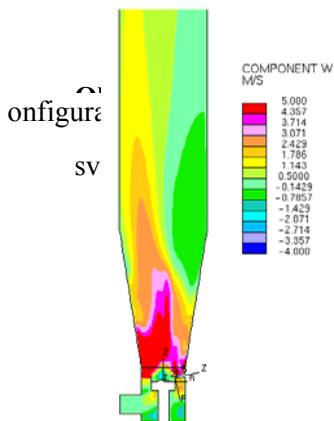


Obr. 17 Rošt se zaslepenými štěrbinami

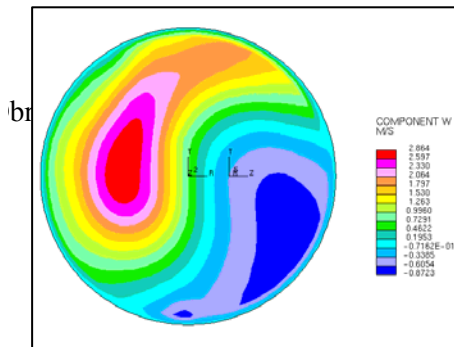
Provedená změna v distribuci vzduchu do prostoru reaktoru omezila proud procházející pravou polovinou roštu. Úměrně větší proud musí procházet levou polovinou roštu, viz obr.19. Vyšší hybnost proudu v levé polovině strhává v nevelké vzdálenosti nad roštem i proud z pravé poloviny reaktoru. Výsledkem není požadované zrovnoměnění vertikální složky rychlosti po obvodu, ale dostáváme opět oblasti stoupavého a klesavého proudu pouze v jiném uspořádání, viz obr.20.



Obr. 18 Vektorové pole rychlostive svislém řezu



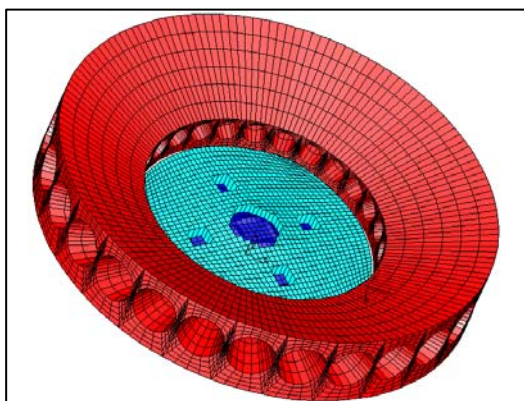
Obr. 19 Pole svislé složky rychlosti ve svislém řezu



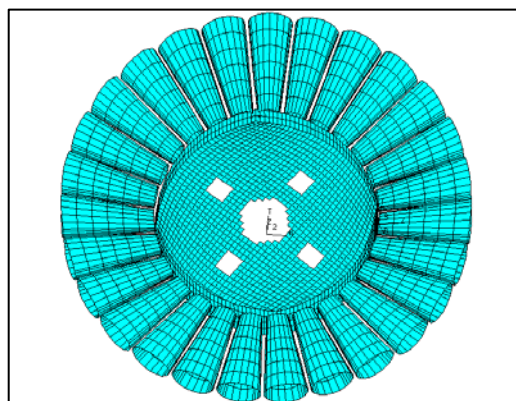
Obr. 20 Pole svislé složky rychlosti ve vodorovném řezu

8. Upravená geometrie roštu - "geometrie 3"

Hlavním zdrojem nerovnoměrnosti vertikálního proudění v reaktoru je skutečnost, že vzduch je roštem distribuován pouze v mezikruží podél stěny reaktoru a střední část je zaslepena použitým centrálním trnem. Pro změnu tohoto stavu bylo v dalším kroku přistoupeno k zavedení části vzduchu do reaktoru přes otvor v centrálním trnu. Žádná štěrbina v původní konfiguraci nebyla zaslepena a nově použitá geometrie roštu je ukázána na obr.21 a obr.22. Na centrálním trnu je vidět pět distribučních otvorů, kterými je přiváděna část vzduchu do prostoru reaktoru. Jelikož je trn lehce vyjímatelný díl a může být vyroben v dutém provedení. Je tato úprava reálně proveditelná na používaném experimentálním zařízení.



Obr. 21 Pohled na 3D konfiguraci roštu "geometrie 3"

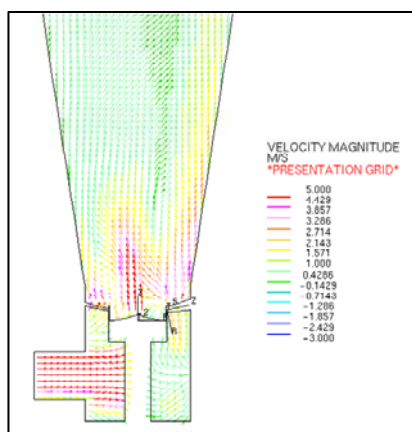


Obr. 22 Centrální trn s distribučními otvory.

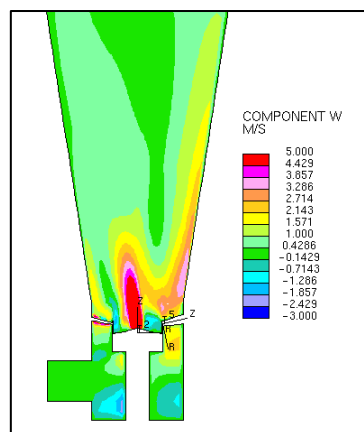
Vlastní výpočet byl proveden při zachování stejných nastavení jako u předchozích výpočtů. Jelikož nebyla předem známa vhodná rychlost proudu, vycházejícího z centrálního trnu, pro výraznější změnu v proudovém poli, bylo přistoupeno k hledání této hodnoty postupným zvyšováním rychlosti vystupujícího proudu.

Jako první hodnota výstupní rychlosti byla zvolena rychlost 2m/s. Množství vzduchu procházejícího šterbinami roštu bylo úměrně sníženo. Nedošlo však k zamýšlené změně v charakteru proudění a rychlostní pole mělo stále ve středu silný klesající proud. V dalších krocích byla rychlost vystupujícího proudu z centrálního trnu zvýšena až na hodnotu 10m/s. Rychlostní pole získané z výpočtu ukazuje obr.23,24.

Zde je již patrná dostatečná síla proudu vycházejícího z centrálního trnu. Tento proud má značný dosah a výrazně ovlivňuje charakter proudění v prostoru celého reaktoru.



Obr. 23 Vektorové pole rychlosti zobrazené ve svislém řezu, vstup 10m/s



Obr. 24 Pole svislé složky rychlosti ve svislém řezu, vstup 10m/s

Z uvedených výsledků je patrné, že došlo k odstranění oblastí se zápornou hodnotou vertikální složky rychlosti. Prakticky v celém objemu kuželové části reaktoru má proudění vzestupný charakter, což je velice příznivé pro fluidní chování unášených částic. Proud vzduchu vystupující z centrálního trnu nemá stabilní polohu, a dochází k jeho kmitání kolem střední osy reaktoru. Zůstávají oblasti nejvyšších a nejnižších rychlostí, rozdíl mezi nimi je pro tuto použitou geometrii nejnižší z uvedených testovaných variant, a rychlostní pole je z tohoto pohledu možno označit za nejvyrovnanější.

9. Závěr

Cílem bylo využít matematické modelování, konkrétně komerční software StarCD, pro popis chování fluidní vrstvy v experiment. atmosferickém zplyňovacím zařízení BIOFLUID 100.

Nejdůležitějším výstupem řešené problematiky je poznání skutečného charakteru fluidní vrstvy v experimentálním zplyňovacím zařízení. Bylo zjištěno, že reaktor za provozu obsahuje velmi malé hmotnostní množství tuhých částic. Takto malé množství částic není schopno vytvořit žádanou stabilní fluidní vrstvu, a dochází k unášení jednotlivých částic ve vytvořeném rychlostním poli. Vliv vlastních částic na rychlostní pole je značně omezený a jeho charakter je dominantně dán distribucí vzduchu přiváděného přes rošt. Použitý rošt vytváří vzestupný proud plynu podél stěn reaktoru a prostřední částí reaktoru se plyn vrací k roštu. Pro odstranění této nevyrovnanosti byly otestovány dvě upravené varianty distribuce vzduchu. Nejlepších výsledků při potlačování sestupného proudu v reaktoru bylo dosaženo při přivedení části primárního vzduchu otvory v centrálním trnu. Toto řešení je reálně proveditelné a poskytlo výsledky, ve kterých bylo sestupné proudění zcela odstraněno.

Poděkování: *Tento příspěvek vznikl za podpory Fondu rozvoje vysokých škol, projekt číslo 1524/2004.*

Literatura

1. BERGMAN, P.C.A a kol.. The Novel „OLGA“ Technology for Komplete Tar Removal from Biomass Producer Gas. *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste. Proceedings of an Expert Meeting*, 2003
2. HIGMAN, Ch., BURGT, v.d. M.. *Gasification*, Gulf Profsessional Publishing, 2003, ISBN 0-7506-7707-4, 381 stran
3. CHRZ, V. a kol.. Zplyňování dřevního odpadu pro náhradu ušlechtilých paliv a výrobu elektrické energie. ČEA, Praha, 1997
4. LISÝ M. Možnosti degradace vysokých uhlovodíků, vznikajících při zplyňování biomasy, pomocí dávkování vápence do reaktoru, *Acta Mechanica Slovaca*, SjF TU Košice, 2004, ISSN 1335-2393
5. MÍKA, V.. *Základy chemického inženýrství*, SNTL Praha, 1981, 2.vydání, 04-605-81, 130 stran
6. NAKAYAMA, Y., BOUCHER, R.F.. *Introduction to Fluid Mechanics*, Butterworth-Heinemann, 2004, ISBN 0-340-67649-3, 308 stran.

SOUČASNÉ VÝSLEDKY A PERSPEKTIVY KATALYTICKÉHO ČISTĚNÍ SYNPLYNU

HOT CATALYTIC GAS CLEANING – PRESENT RESULTS AND PROSPECTS

Autor: Ing. Martin Lisý, Ing. Marek Baláš, Doc. Ing. Ladislav Ochraňa, CSc.

Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
Technická 2896/2, 616 69, Brno

lisymartin@seznam.cz

Abstrakt: Zplyňování, jakožto jedna z možných technologií pro využití alternativních zdrojů energie, vyžaduje, podobně jako ostatní alternativy, soustavný výzkum a vývoj. Pro praktickou aplikaci je nutno, aby byla zvládnuta řada technických a provozních problémů, a to na přijatelné technické i ekonomické úrovni. V případě zplyňování, jehož produktem je nízko až středně výhřevný synplyn, jsou hlavním problémem nečistoty obsažené v produkovaném plynu. Důsledkem jejich přítomnosti je tvorba usazenin, vznik koroze a emise polutantů. Hlavními nežádoucími složkami, v případě fluidního zplyňování vzduchem, jsou dehet a prach. V článku jsou popsány možnosti a perspektivy jednoho ze způsobů čištění plynu, a sice katalytického štěpení dehtu. Uvedeny jsou zejména experimentální výsledky získané na VUT v Brně ve spolupráci s VŠCHT Praha a firmou Ateko Hradec Králové. V rámci stále probíhajícího výzkumu jsou studována jak primární opatření ve formě dávkování katalyzátoru do fluidní vrstvy zplyňovače, tak zejména sekundární opatření spočívající ve vývoji a použití horkého katalytického filtru.

Klíčová slova: fluidní zplyňování, redukce obsahu dehtu a prachu, dolomitový katalyzátor

1. Úvod

V Evropské i celosvětové energetice stále převažuje využívání neobnovitelných zdrojů energie, zejména fosilních paliv (ropa, zemní plyn, uhlí) a také jaderná energie. V celé řadě zemí je stále hlavním zdrojem energie spalování uhlí, resp. zemního plynu, navíc často bez využití kogenerační výroby elektrické energie a tepla, což má za následek vysoké emise hlavního skleníkového plynu CO₂. V posledních letech přibývá alarmujících výzkumů a zpráv o ničivých dopadech znečištění atmosféry na život na Zemi. Proto je nutné změnit přístup, který by měl být s ohledem na udržitelnost vývoje založen na nových a obnovitelných zdrojích energie. Za nejperspektivnější obnovitelný zdroj je v současné době v České republice považována biomasa. Ta může být získávána jako odpad nebo ve formě záměrně pěstované biomasy, jež se v poslední době velmi rychle rozvíjí. Energetický potenciál pěstované biomasy vychází ze studií výnosových kategorií pro „zemědělské“ a energetické plodiny. V současnosti leží ladem v ČR asi 0,5 mil. ha půdy. Potenciál uvažuje produkci biomasy pro přímé využití i pro výrobu biopaliv. Výhody tohoto směřování OZE spočívají v návaznosti na tradiční zemědělskou výrobu, dostupné technologie, podporu a rozvoj regionů, v neposlední řadě účinné využívání a likvidaci bioodpadu, jehož produkce stále stoupá.

2. Zpracování biomasy a odpadů

Základním fyzikálně chemickým procesem energetického využití biomasy a odpadů je spalování nebo zplyňování. K jejich realizaci se užívá různých tepelných schémat, v současné době však převládá pouze spalování v kotlích s výrobou tepla. V poslední době se však rychle rozvíjí i technologie zplyňování biomasy, komunálního a průmyslového odpadu, jehož produkce se neustále zvyšuje, s následným spalováním energoplynu v kogeneračních jednotkách. Uvažované jednotky mají sloužit pro zásobování lokálních regionů teplem, mohou také velmi příznivě ovlivnit nakládání s vybranými odpady.

Termochemické zplyňování je konverze organické hmoty v nízkovýhřevný plyn (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2O) za vyšších teplot, typicky při 750 až 1000°C. Teplo pro endotermické reakce bývá nejčastěji získáváno částečnou oxidací zplyňovaného materiálu (zplyňování vzduchem, kyslíkem nebo vodní párou), přičemž nejrozšířenější technologií je zplyňování pomocí vzduchu. Odpadají náklady a riziko pojící se s produkcí kyslíku a jeho využíváním při tomto typu zplyňování, stejně jako složitost a náklady na řadu reaktorů nutných pro zplyňování v páře či pyrolýze, kdy je zapotřebí dvou reaktorů. Vzniklý plyn je vhodný pro provoz kotlů, motorů a turbín, nikoliv však pro přenos plynovody, a to v důsledku své nízké energetické hustoty (4 - 7 MJ/m³_n).

Průvodními složkami plynu bývají stopová množství vyšších uhlovodíků jako jsou ethan a ethén, drobné částice dřevního uhlí a popela, dehet a další látky. Proces lze shrnout v následných krocích:

Samotné zplyňování lze shrnout v následných krocích:

- sušení, aby se odpařila vlhkost
- pyrolýza, aby vznikl plyn, plynné dehty a oleje a zbytkové dřevěné uhlí
- zplyňování nebo-li částečná oxidace pevného dřevního uhlí, pyrolýza vzniklých dehtů a plynů

Když se pevné palivo zahřeje na 300-500°C za nepřítomnosti oxidačního činidla, dojde k pyrolýze na pevné dřevné uhlí, kondenzovatelné uhlovodíky nebo-li dehet a plyny. Poměrná výtěžnost plynu, kapaliny a dřevního uhlí převážně závisí na rychlosti ohřevu a konečné teplotě. Obecně vzato, k pyrolýze dochází mnohem rychleji než ke zplyňování a proto je zplyňování tím krokem, jenž hlídá příslušná množství. Tyto plynné, kapalné a pevné produkty pyrolýzy pak reagují s oxidačním činidlem - obvykle vzduchem - za vývinu stálých plynů (CO , CO_2 , H_2) a menšího množství HC plynů. Složení plynu ovlivňuje řada faktorů, např. složení zakládky, obsah vody, reakční teplota a rozsah oxidace produktů pyrolýzy.

3. Metody eliminace dehtu

Koncentrace dehtu, a také jeho složení, je hlavně funkcí teploty zplyňování, klesá s jejím nárůstem. Vztah mezi teplotou a množstvím dehtu je funkcí typu reaktoru a podmínek zpracování. Dehty vzniklé pyrolýzou se tepelně krakují ve většině případů na žáruvzdorné dehty, saze a plyny. Zkoušky ukázaly, že produkce dehtu při zplyňování dřeva je mnohem větší než u uhlí nebo rašeliny a že tyto dehty bývají těžší a stabilnější aromatické látky. Ty mohou částečně reagovat při vzniku sazí, které mohou ucpávat filtry, což je problém obzvláště se týkající zplyňování biomasy. To znamená, že

technologie vyvinuté pro odstraňování dehtu při zplyňování uhlí nemusí být přímo přenositelné na zakládanou biomasu. Koncentrace dehtů v plynu přípustná pro aplikaci ve spalovacím motoru je cca. $50 - 100 \text{ mg/m}^3_n$, podle výrobce. U fluidních zplyňovačů se však dehty v surovém plynu vyskytují řádově v gramech/ m^3_n . Proto je cílem celé řady výzkumů snižovat tvorbu dehtů, popř. je účinně odstraňovat.

Opatření ke snížení obsahu dehtu v plynu lze v první řadě rozdělit na primární a sekundární.

3.1. Primární opatření

Jedná se o opatření aplikovaná uvnitř reaktoru, která by vždy měla být uplatňována přednostně, protože mají potenciál zvýšit celkovou účinnost přeměny energie a současně omezují potřebu odstraňovat dehet z plynu mimo reaktor, s čímž je spojen i pokles investičních a provozních nákladů. Obecně jsou používány dva následující postupy:

TERMICKÝ ROZKLAD

Bez přítomnosti katalyzátoru lze dehet úspěšně termicky štěpit při teplotách nad cca. 1000°C , v ideálním případě přes 1200°C , což však klade velké nároky na používané materiály. [11]. Minimální teplota pro požadovanou účinnost destrukce není charakterizována a bude záviset na typu dehtu vznikajících v reaktoru. Např. pro protiproudé sesuvné zplyňovače, kde se typicky tvoří primární dehty, může být dostatečná již teplota okolo 900°C . Literatura uvádí, že dehty rychle teplotně degradují nad teplotou 950°C [4]. Avšak dehty pocházející z biomasy jsou odolnější vůči teplu a tím pádem se samotným teplem krakují obtížněji. Určité tepelné krakování dehtu zajišťují i zvýšené teploty v šachtách zplyňovacích zařízení s fluidním ložem. Vyšší teplota v loži může být však dosažena parciálním spalováním plynu vlivem injektáže sekundárního vzduchu nad hustou fluidní vrstvou do volné části fluidní vrstvy (tzv. „freeboardu“). Avšak nadměrný nebo nevhodný přívod vzduchu může způsobovat vychlazování sekundární reakční zóny a tím pokles štěpení, případně spalování dehtů.

Složení plynu a jeho výhřevnost jsou ovlivňovány zvyšováním poměru primárního a sekundárního vzduchu. Je samozřejmé, že obsah CO , H_2 , plynných uhlovodíků a výhřevnost se snižuje (až o 25 – 30 % [1]), zatímco množství dusíku v plynu poroste.

Degradace dehtu může také částečně proběhnout i při delším setrvání na teplotě zplyňování, ale zvláště účinná je při teplotách vyšších než 1300°C při zplyňování kyslíkem [1], kde jsou kladeny již velmi vysoké nároky na použitý materiál. Další z forem je přímý kontakt s nezávisle otápeným horkým povrchem, což vyžaduje značnou dodávku energie a tak snižuje celkovou účinnost. Také toto je účinné pouze částečně, a to díky tomu, že se musíme spoléhat na dobré promísení.

Oba zmíněné postupy výrazně oslabují ekonomickou stránku zplyňování, a proto v případě zplyňování biomasy není pravděpodobně termický rozklad vhodnou a perspektivní metodou k redukci obsahu dehtu v plynu.

KATALYTICKÝ ROZKLAD

Jak již bylo uvedeno výše, zplyňování biomasy produkuje jiný druh dehtů než uhlí, a obsahuje podstatně větší množství naftalenu a těžších stabilních složek PAH.

Relativní množství PAH komponent v celkovém množství dehtů se s růstem zplyňovací teploty zvětšuje. To indikuje, že tyto komponenty, pokud vzniknou, jsou velmi stabilní a je velmi obtížné je odstranit bez použití katalyzátorů. Vysokoteplotní katalytické čištění plynu (aktivita katalytických látek bývá v rozpětí teplot 500-900°C) je slibná alternativa řešení provozních problémů způsobených dehty. Některé z katalyticky efektivních materiálů jako např. dolomit, olivín, křemenný písek a jiné minerální a kovové látky, mohou být principiálně užity jako aditiva do fluidního lože při zplyňování. Jako nejhodnější se pro svou dostupnost, cenu a vlastnosti jeví dolomit [8,9]. Tento způsob je méně účinný než použití katalyzátoru separátně za zplyňovacím reaktorem, přináší však nespornou výhodu ve své relativní jednoduchosti (např. z pohledu dosažení teploty aktivity této látky, která se pohybuje v oblasti teplot 800-900°C). Ve fluidním loži probíhají reakce velmi intenzivně díky poměrně vysokým teplotám a turbulentnímu proudění, avšak dochází k otěru katalyzátoru. Na druhou stranu v pevném loži bývá nedostatečný kontakt mezi katalyzátorem a dehty, a proto není jejich destrukce tak účinná. Vyvstává zde otázka účinné granulometrie dávkovaného drceného katalyzátoru do fluidního lože, vzhledem ke specifické hmotnosti katalyzátoru a paliva, a dále chování fluidní vrstvy s více frakcemi pevné fáze.

V 80. letech byl prováděn rozsáhlý výzkum katalytického rozkladu dehtu uvnitř reaktoru s řadou zajímavých výsledků. Současný výzkum ale naznačuje, že použití výše zmíněných tzv. *in situ* katalyzátorů sice může snížit úroveň dehtu, nicméně se jeví jako neefektivní přístup pro jeho kompletní odstranění – alespoň pro systémy zplyňování velkého měřítka. Nicméně je možno dosáhnout nezanedbatelného snížení obsahu dehtů v produkovaném plynu (viz. níže), čímž se sníží velikost i zatížení následných filtračních tratí.

3.2. Sekundární opatření

Jedná se o dodatečné odstraňování dehtů v následných filtračních tratích. Sekundární opatření je možno rozdělit do dvou základních skupin: na suché metody (katalyzátory) a mokré metody (vypírka plynu).

MOKRÉ METODY

Vypírka plynu je metoda založená na umělé kondenzaci složek dehtu. Dalšími uplatňujícími se fyzikálními jevy jsou rozpouštění složek dehtu v práci koloně, kolize kapiček dehtu s kapkami prací kapaliny, difúze, popř. jiné. Tento způsob čištění a chlazení plynu je jednoduchý, lze říci ověřený, má však dvě zásadní nevýhody. Degraduje teplo obsažené v plynu, čímž se ztrácí významná část tepelné energie. Druhou, ještě zásadnější nevýhodou je vznik odpadní vody znečištěné dehty, fenoly a dalšími látkami (NH₃, HCl, HCN), což znemožňuje biologické metody čištění odpadní vody. Likvidace této kontaminované odpadní vody je velice komplikovaná a není možno ji provádět v běžných čistírnách odpad. vod. V současnosti existuje v ČR patrně pouze jedno pracoviště ve Vřesové, které tento odpad přijímá a dále zpracovává. Vodní pračka dehty *nelikviduje*, pouze problém jejich likvidace převádí z čištění plynu do vody. Tento problém může odstranit používání organických rozpouštědel, např. methylesteru řepkového oleje, a jejichž likvidaci řeší následné spalování.

KATALYZÁTORY

Působení a vlastnosti katalyzátorů byly již částečně popsány při katalytickém rozkladu uvnitř reaktoru. Oddělená reakční nádoba umožňuje lepší řízení teploty a snížení turbulence v loži, což může přispět k prodloužení reakční doby.

Obecně jsou používány k štěpení dehtů přírodní materiály, jako dolomity, zeolity a kalcity, nebo různé průmyslové kovové katalyzátory na bázi Ni, Mo, Co, Pt, Ru a dalších prvků. Převážná většina kovových katalyzátorů je však citlivá na deaktivaci sírou (tzv. strhávání síry), a proto při samostatném použití je jejich životnost nízká. Již malé koncentrace vodíku ve vyrobeném plynu snižují katalytickou aktivitu systémů na bázi kovů. Jejich výhodou je nižší provozní teplota, neboť dosahují maximální konverze dehtů již při 450-550°C.

Pro dolomit byla v laboratorních podmínkách dosažena konverze 95 až 99 % při 850 až 900 °C. Z toho plyne nevýhoda, a sice nutnost opětovného ohřátí plynu z teploty na výstupu reaktoru (povětšinou pod 800 °C) nad teplotu 900 °C. Je také nutno vytvořit rovnoměrné teplotní pole k zaručení průběhu reakce v celém průřezu. Ohřívání katalyzátor lze interně spalováním části plynu (úbytek výhřevnosti bude nižší než při termickém štěpení), nebo externě přívodem tepla z jiného zdroje. V obou případech probíhá ohřev na úkor účinnosti celého zařízení. Negativním jevem je náchylnost k tvorbě tzv. „coke“ neboli „zakoksování“, kdy se na katalyzátoru začnou usazovat sloučeniny uhlíku. Tyto reakce však nejsou nevratné. Jejich „směr“ je závislý na použité granulometrii, době setrvání a zejména na teplotě. Ve většině případů po nárůstu teplot dochází tedy k opětovnému rozkladu tohoto „koku“.

Katalytickými reakcemi konverze dehtu se zabývá řada publikací a katalyzátory se jeví jako poměrně perspektivní metoda redukce obsahu dehtu v generovaném plynu.

V tab. č. 1 je uvedeno pro srovnání několik metod odstraňování dehtů (autoři vycházeli z účinností jednotlivých zařízení publikovaných v různých pracích). Nelze jednoznačně říci, která z těchto metod je nejvhodnější. Jejich volba je výsledkem optimalizace a kompromisu mezi mnoha důležitými faktory, jako např. účinnost, tlaková ztráta, energetická náročnost, spolehlivost, univerzálnost, investiční a provozní ekonomické ukazatele, tvorba kontaminovaného odpadu, atd..

Tab.1 Zbytkový obsah dehtu v plynu po čištění při vstupní koncentraci 500 mg/m_{n,sp}³

Technologie	na výstupu (mg/m _{n,sp} ³)
in situ katalyzátor	50 – 200
částečné spalování	10 – 100
vnější katalyzátor	50 – 250
vymývací věž (wash tower)	300 – 400
rozprašovací věž (spray tower)	400 – 500
sítová kolona	100 – 200
plněná kolona	100 – 200
sítová kolona, rozpouštědlo	10 – 100
pračka Venturi	40 – 200
adsorpce	50 – 200
spolu-adsorpce na filtr.koláči	200 – 500
chlazený elektrostat. odlučovač	5 – 50

4. Experimentální měření na standu Biofluid 100

V minulých letech se výzkum čištění plynu na pracovišti Energetického ústavu FSI v Brně zabýval spíše mokkými metodami. Bylo dosaženo velmi kvalitních a uspokojivých výsledků, ať už při použití vody, jako prací kapaliny, tak i při použití organického rozpouštědla, konkrétně methylesteru řepkového oleje. V obou případech bylo dosaženo hranice obsahu dehtů v plynu pod $50\text{mg/m}^3_{\text{n}}$. V posledních dvou letech se však směr výzkumu zaměřil na suché katalytické krakování, které by mohlo přinést kvalitnější a ucelenější řešení čištění plynu. Cílem je sestavit poloprovozní ověřovací trať zakončenou spalovacím motorem.

Jak již bylo uvedeno výše, existují nebo zařazení následného horkého katalytického filtru. V rámci experimentů byly zkoumány obě cesty použití katalyzátorů, jeho dávkování přímo do fluidního lože i vývoj technologie horkého katalytického filtru použitelného pro průmyslové aplikace.

4.1. Dávkování katalyzátoru do lože

Během čtyř zkoušek se zkoumal vliv dávkování dolomitu do fluidního lože[8].. Nejprve byly odebrány vzorky plynu a dehtů při zplyňování samotné biomasy, následně byl diskontinuálně přidáván katalyzátor a odebrány srovnávací vzorky.

V době, kdy do reaktoru nebyl dávkován žádný dolomit, byly teplotní průběhy a průběhy složení plynu stálé. Po přidání dolomitu došlo jak k poklesu teploty v reaktoru, tak k nárůstu obsahu CO_2 v plynu. Tyto vlivy jsou jednoznačně způsobeny vývojem CO_2 při částečné nebo úplné kalcinaci dolomitu. Stupeň kalcinace je závislý hlavně na teplotě fluidní vrstvy a obsahu CO_2 . V tomto konkrétním zařízení měla na průběh kalcinace vliv i granulometrie dolomitu.

Podmínky experimentů jsou shrnuty v následujících tabulkách č. 2 a 3.

Tab.2 Vlastnosti a množství dávkovaného paliva a dolomitu

	palivo	vlhkost paliva	zrnitost dolomitu	dávka dolomitu	interval	celkem dolomitu	množství paliva	podíl dol./pal
	-	%	mm	g	min	kg	kg/hod	$\text{kg}_{\text{dol}}/\text{kg}_{\text{pal}}$
č.1	hoblíny	7	1-1,5	200	15	1,2	21,6	0,034
č.2	hoblíny	7	1-1,5	150	15	1,5	18	0,036
č.3	štěpky	25	0,5-1	32	5	1,3	17,5	0,032
č.4	hoblíny	15	0,2-0,5	70	5	2,4	13,5	0,072

Při experimentu č. 3 byla aplikována první dávka 500g dolomitu pro zahuštění vrstvy. Tento fakt se pozitivně projevil nárůstem teploty ve freeboardu. To dokazuje, že materiál v reaktoru fluídoval a byl rozložen po výšce reaktoru. U experimentu č. 4 tato dávka činila 750g kvůli obavám z nadměrného úletu jemnějšího materiálu. Ze stejného důvodu byly navýšeny i následné dávky. Předpoklad byl ten, že část materiálu zůstane ve vrstvě, zbytek bude ulétat s plynem, čímž se prodlouží reakční doba.

Tab.3 Teplotní podmínky experimentů

Průměrné hodnoty teplot v reaktoru během experimentů		spodek reaktoru	střed reaktoru	freeboard
		°C	°C	°C
č.1	bez dolomitu	821	795	731
	s dolomitem	810	770	730
č.2	bez dolomitu	873	813	712
	s dolomitem	865	795	712
č.3	bez dolomitu	880	821	719
	s dolomitem	875	800	735
č.4	bez dolomitu	818	819	752
	s dolomitem	829	825	774

Tab.4 Obsah dehtů v plynu

	bez dolomitu		s dolomitem				pokles dehtu
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	%
č.1	5341	6132	5093	5755	5954	5366	- 3,40 %
č.2	5198	5896	5227	4198	5533	5875	- 6,10 %
č.3	2995	3040	2345	2152	-	-	-25,0 %
č.4	2014	2058	624	986	-	-	-60,5 %

Pozn. Jako „dehet“ byla definovaná skupina uhlovodíků s bodem varu vyšším než má fenol. Benzen, toluen a styren do této skupiny nepatří. Ve vzorcích dehtu byla nalezena široká škála polyaromatických uhlovodíků a jejich derivátů. V menší míře byly identifikovány i fenoly, benzo- a dibenzofurany.

Při aplikaci dolomitu o zrnitosti 1-1,5mm nedošlo k zásadním změnám ve složení plynu, ani v obsahu dehtů v plynu. Tyto částice zřejmě ležely na roštu nebo fluídovaly ve spodní části reaktoru pod vrstvou paliva, a tudíž nepřišly do styku s proudícím plynem. Otěr pak velmi rychle ulétával.

Na základě těchto poznatků byla u exp. č.3 použita menší frakce 0,5-1 mm. Pro větší stabilitu provozu reaktoru byl zkrácen interval dávkování na 5 minut, což snížilo kolísání teplot v reaktoru a skokové změny obsahu CO₂. Další změnou byla aplikace první dávky 0,5 kg dolomitu pro zahuštění fluidní vrstvy v reaktoru. To mělo několik pozitivních dopadů na průběh experimentu. Zrovnoměnilo se teplotní pole po výšce reaktoru – viz. tab. č.2, což je důkaz toho, že materiál fluídoval po celé výšce reaktoru. Dalším přínosem většího zahuštění vrstvy bylo zlepšení vzájemné reakce s dehty v proudícím plynu. Přínosem byl i 2,5- násobný nárůst měrného povrchu částic. I přes nízkou teplotu v horní části reaktoru, obsah dehtů poklesl po aplikaci katalyzátoru zhruba o 25% -viz tab.č.3.

Pro poslední experiment byla zvolena ještě menší frakce 0,1 až 0,5 mm. Protože podle výpočtů bylo zřejmé, že část materiálu bude ulétávat, úvodní dávka činila 750 g. Ze stejného důvodu byly navýšeny i následné dávky na dvojnásobek. Ve složení plynu se poprvé objevuje znatelný nárůst podílu vodíku, v důsledku probíhajících katalytických reakcí. Výhřevnost plynu pak zůstala prakticky stejná. U tohoto experimentu se podařilo snížit obsah dehtů v plynu pod 1 g/Nm³, pokles obsahu dehtů činil více jak 60% oproti původnímu stavu. Společně s větší dávkou dolomitu se také příznivě projevil i sedminásobný nárůst měrného povrchu.

Nedostatkem při odstraňování dehtů touto metodou, u tohoto experimentálního zařízení, je nízká teplota ve freeboardu, což je způsobeno konstrukcí, ale zejména

malou velikostí zařízení. Ačkoliv dosažené teploty byly nižší, než jsou teploty uváděné v literatuře- viz výše, podařilo se dosáhnout velmi dobrých výsledků. Dávkování dolomitu do fluidního lože může tedy být účinným primárním opatřením při snižování obsahu dehtů v energoplynu.

4.2. Modelové laboratorní zařízení horkého katalytického filtru

Vývoj horkého katalytického filtru začal v roce 2002. Řešení projektu navázalo na úspěšnou spolupráci tří pracovišť: Energetického ústavu VUT v Brně, fy. ATEKO a.s. Hradec Králové a Ústavu plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší VŠCHT



v Praze. Po prostudování dostupné literatury a shrnutí teoretických poznatků (viz. výše) bylo rozhodnuto nejprve sestavit laboratorní zařízení.

Jako katalyzátor byl zvolen dolomit kvůli jeho dostupnosti, nízké ceně a faktu, že k prvnímu štěpení dehtů při použití právě dolomitu nastává již při teplotách kolem 700°C.

Při měření byl plyn ohříván na teplotu 800-900°C. Následně vstupoval do dolomitového filtru s elektroohřevem, který umožňoval regulaci teploty od 800 do 1200 °C.

Výsledky jsou shrnuty v tab. č.5. Z nich vyplývá, že při teplotách nad 900°C je pokles dehtů dostatečný pro použití plynu v motoru. Po důkladném vyhodnocení výsledků byl upraven a doplněn projekt návrhu poloprovozního zařízení.

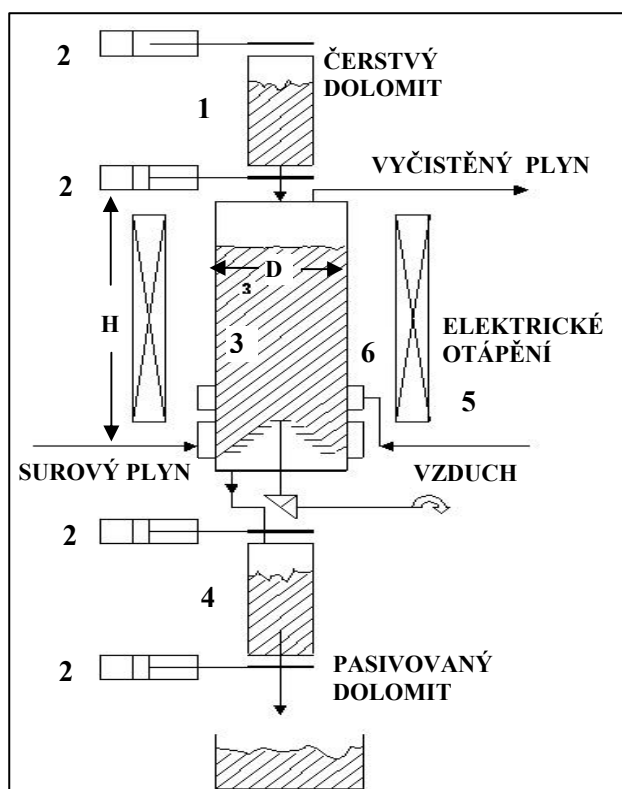
Obr.1 Ověřovací laboratorní trať

Tab. 5 Výsledky redukce dehtů na ověřovací laboratorní trati

Teplota ve filtru	855 °C		936 °C		941 °C	
	vstup	výstup	vstup	výstup	vstup	výstup
Σ BTX ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n}}$)	24 425	4 626	23 305	72	15 865	235
Σ dehtů ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n}}$)	11 625	623	10 980	2	8 185	35
Výhřevnost ($\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{n}}$)	7,450	6,931	7,723	6,267	7,482	6,931

4.3. Poloprovozní horký katalytický filtr

Od počátku byl návrh poloprovozního horkého katalytického filtru (HKF) směřován k vývoji funkční průmyslové technologie [5,6].. K tomu bylo a je třeba odstranit řadu konstrukčních a provozních problémů. Nejsložitějším úkolem bylo zajištění dlouhodobého provozu s obměnou pasivovaného katalyzátoru. K tomu slouží otočný rošt, který zajišťuje jeho vyhrnování. Rošt má na horní kuželové ploše i na spodní rovné ploše evolventní žebra, která zabezpečují pohyb katalyzátoru nejprve směrem k obvodu reaktoru, žebra na spodní části zajišťují pohyb katalyzátoru ke středu reaktoru. Provoz roštu je diskontinuální. Při nárůstu tlakové ztráty filtru je část náplně vyhrnuta, čímž se rozruší nánosy v dolní části reaktoru. Podle předpokládaného průtoku plynu a tlak. ztráty byly stanoveny hlavní rozměry: průměr $D = 0,25$ m, výška $H = 2$ m. Otápění filtru je řešeno elektroohřevem s příkonem 25 kW.



Obr.2 Schéma vysokoteplotního filtru

Dosud byl proveden pouze jeden kompletní experiment, při kterém byla sledována tlaková ztráta a tři teploty po výšce filtru na vnější straně trubky a samozřejmě vliv na Teplota měřená na stěně HKF se pohybovala mezi 950 a 1000 °C. Byly provedeny tři odběry plynu a dehtů před a za HKF. Nárůst obsahu H_2 a CO_2 v plynu svědčí o tom, že probíhala kalcinace dolomitu i reformingová reakce snižování dehtů. Přehled výsledků je v následující tabulce č. 6.

Pokud jde o měření prachu, procentuální pokles byl sice značný, absolutní hodnota obsahu prachu v plynu je však stále vysoká. To bylo způsobeno zejména fluidováním dolomitu v HKF a jeho otěrem, neboť přes filtr se pouštěl veškerý produkovaný plyn. Došlo tak k překročení výpočtového průtoku.

Postupným vývojem bude tento způsob nahrazen částečným spalováním synplynu přímo ve filtru. Přívod vzduchu je proveden ve třech úrovních v oblasti roštu. Probíhající oxidace by měla zároveň odstranit nánosy zachycených sazí. Celková koncepce HKF je patrná z obr. č 2. Čerstvý dolomit je do reaktoru přiváděn z nádoby 1, na jejímž vstupu a výstupu jsou periodicky přepínaná šoupátka 2. Reaktor 3 je válcová nádoba, na jejímž dně je rotační rošt zajišťující vyhrnování pasivované náplně do nádoby 4, která je rovněž na vstupu i výstupu vybavena šoupátkem 2. Plyn se přivádí do spodní části reaktoru, proudí vzhůru katalytickým ložem a vystupuje z horní části reaktoru. Reaktor je vybaven elektr.otápěním 5 a přívodem vzduchu 6.



Obr.3 Stend Biofluid100 s HKF

Tab. 6 Přehled výsledků experimentu na HKF

		Odběr č. 1	Odběr č. 2	Odběr č. 3
Dehet před HKF	mg/m^3_n	5 615	1 624 ¹⁾	3 042
Dehet za HKF	mg/m^3_n	942	1 046	1 117
Pokles dehtu	%	83	36	63
Prach před HKF	mg/m^3_n	10 466	2 540	3 000
Prach za HKF	mg/m^3_n	143	98	210
Pokles prachu	%	99	96	93

1) Při odběru vzorku nebyl plyn dostatečně podchlazen

Ani pokles dehtů nedosáhl požadovaných hodnot. Důvodů lze najít několik:

- nebyla měřena teplota přímo v loži dolomitu, ale na vnější straně stěny reaktoru, která může být podstatně vyšší. Z tohoto důvodu byly doplněny termočlánky, které měří teplotu ve středové, axiálně umístěné trubce. Údaje z těchto termočlánků následně prokázaly, že prohřívání dolomitu směrem ke středu lože je výrazně pomalejší, než se předpokládalo. Dolomit tedy nebyl zcela zkalcinován, navíc většina dolomitu měla nižší teplotu, než bylo potřebné pro průběh štěpných reakcí.

- použitá granulometrie 2 – 5 mm je pravděpodobně příliš vysoká. Buď bude zkoumán vliv jemnější frakce, což výrazně zvýší měrný povrch, ale způsobí i nárůst tlakové ztráty HKF. Její spodní mez je však omezena prahovou rychlostí fluidace, která nesmí být překročena. Z tohoto důvodu se musí větší pozornost věnovat přesnému stanovení průtoku plynu přes HKF.

- je používán nekalcinovaný dolomit. Jeho kalcinace se prováděla den předem vyhřátím přímo v HKF. Je však známo, že kalcinační teplota CaCO_3 stoupá s nárůstem obsahu CO_2 . Při experimentu byl ve vzorcích plynu za HKF zaznamenán nárůst obsahu CO_2 , což ukazuje na to, že dolomit nebyl dostatečně zkalcinován a v HKF stále ještě probíhala kalcinace. Příště je třeba během kalcinace monitorovat koncentraci CO_2 v HKF a periodicky jej profukovat vzduchem.

Při hodnocení pokusu lze říci, že se jednalo o první zkoušku, která splnila své poslání. Přinesla celou řadu důležitých poznatků o chování a provozních parametrech HKF. Odhalila problematická místa a nedostatky, které bude nutno odstranit. Po důkladné analýze průběhu experimentu a jeho výsledků byly vyvozeny závěry ke zdokonalení a optimalizaci provozu HKF (viz. výše).

Nejdůležitějším a nejnáročnějším úkolem bude náhrada elektroohřevu otápěním pomocí spalování části plynu. Bez toho nelze pomýšlet na vytvoření funkční průmyslové technologie.

5. Závěr

Srovnání horkého katalytického filtru s mokkými metodami redukce dehtů je možné pouze v obecné rovině. Nelze zatím korektně porovnat konkrétní dosažené výsledky. Samotná technologie se zdá být velmi perspektivní. Zejména proto, že nedochází k produkci kapalného kontaminovaného odpadu. Odpadním produktem je pouze pasivovaný dolomit. Jeho znehodnocování bude hlavně vinou nánosů, které se dají odstranit oxidací. Pak by se mohl tento „odpad“ využít pro primární dávkování do reaktoru. Je třeba zvážit i jeho opětovné navracení do HKF.

Dalším přínosem je využití většiny potenciálního tepla plynu. Při aplikaci praček plynu je část tepla, obsaženého v plynu, převedena do vody o nízké teplotě. Jeho tepelný potenciál v rozmezí teplot cca. 350°C až 20°C tak není využit. Na druhou stranu ale tento HKF pracuje při teplotách přes 900°C . Část plynu se tedy bude spalovat pro jeho otápění, což se projeví nepříznivě na celkové bilanci. Teplo plynu však může být bez problému dále využito.

Negativním jevem je i vyšší tlaková ztráta, která se zmenšující se zrnitostí náplně exponenciálně vzrůstá.

Z prozatím dosažených výsledků vyplývá, že horký katalytický filtr může být dalším důležitým krokem k vytvoření funkční průmyslové aplikace fluidního atmosférického zplyňovače se zařazením spalovacího motoru.

Literatura

1. BRIDGWATER A. V. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation, *Fuel* Vol.74 –No. 5, 1995, Energy Research Group, Aston University, Birmingham
2. DITTRICH M. Možnosti čištění energoplynu vyrobeného zplyňováním alternativních paliv, *Days of Combustion 2004*, VUT Brno, 2004, s. 109 – 115
3. HOFBAUER H. A KOL.: Biomass CHP Plant Güssing – A Success Story, TU Vienna, Biomass Kraftwerk Güssing – Austria. *Proceedings of Expert Meeting „Pyrolysis and Gasification and Waste“* edited by A.V. Bridgwater, chapter 54. CPL Press, 2003, ISBN 1-872691-77-3
4. CHRZ V. A KOL. Zplyňování dřevního odpadu pro náhradu ušlechtilých paliv a výrobu elektrické energie, ČEA, Praha, 1997.
5. CHRZ V., LEDECKÝ J., DITTRICH M., BRÁDLER O. Horký filtr na čištění plynu vyrobeného zplyňováním tuhých alternativních paliv od vysokomolekulárních pyrolýzních produktů, sloučenin síry, chlóru a fluóru. *Zpráva ATEKO Hradec Králové*, č.70060–Z-PI-0916, únor 2004.
6. CHRZ V., LEDECKÝ J., DITTRICH M., BRÁDLER O. Horký filtr na čištění plynu vyrobeného zplyňováním tuhých alternativních paliv od vysokomolekulárních pyrolýzních produktů, sloučenin síry, chlóru a fluóru. *Zpráva ATEKO Hradec Králové*, č.70060–Z-PI-1083, prosinec 2004.
7. KLEINHAPPEL M. Gas Cleaning in Biomass Gasification Plants, TU Graz – Austria. *Proceedings of Expert Meeting „Pyrolysis and Gasification and Waste“* edited by A.V. Bridgwater, chapter 56. CPL Press, 2003, ISBN 1-872691-77-3.
8. LISÝ M. Možnosti degradace vysokých uhlovodíků, vznikajících při zplyňování biomasy, pomocí dávkování vápence do reaktoru, *Acta Mechanica Slovaca*, SjF TU Košice, 2004, ISSN 1335-2393
9. MILNE T.A., ABATZOGLOU N., EVANS R.J. *Biomass Gasifier „Tars“: Their Nature, Formation, and Conversation*, National Renewable Energy Laboratory–Colorado, (1998), NREL/TPR-570-25357
10. OCHRANA L., SKÁLA Z., TUYEN N., DVOŘÁK P., POSPÍŠIL J., FIEDLER J. Research into Gasification of Alternative Fuels, *Final Report*, Technical University of Brno, 12/2001, VUT-EÚ-QR-04/02.)
11. STEVENS DON J.: *Hot Gas Conditionig: Recent Program With Larger-Scale Biomass Gasification Systems*. National Renewable Energy Laboratory – Colorado, 2001, NREL/SR-510-29952

EMISNÍ CHARAKTERISTIKY BRIKET Z BIOMASY

EMISSION CHARACTERISTIC OF BRIQUETTES FROM BIOMASS

Ing. Jan Malaták, Ph.D.¹, Ing. Petr Jevič, CSc.², Ing. Eduard Janča¹, Ing. David Plíštil²

¹Česká zemědělská univerzita v Praze
Kamýcká 872, 165 21 Praha 6 - Suchbátka
malatak@tf.czu.cz, ejanca@tf.czu.cz

²Výzkumný ústav zemědělské techniky
Drnovská 507, 161 01 Praha 6 - Ruzyně
petr.jevic@tf.czu.cz

Abstrakt: Příspěvek se zabývá aktuální problematikou energetického využití pevné biomasy ve formě briket ze zemědělské, lesnické a potravinářské produkce. Jedná se o možnosti využití biomasy jako paliva pro tepelně energetická zařízení do tepelného výkonu 10kW. Je proto nezbytně nutné vycházet z prvkového složení použitých paliv, stechiometrických výpočtů a provozních parametrů daného typu zařízení. Řešená problematika přispívá svojí aktuálností k omezování emisí a tím ke snížení úrovně znečišťování ovzduší. Významný cíl práce je stanovení stechiometrie spalované biomasy a stanovení emisních koncentrací kouřových plynů v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu a druhu spalované biomasy ve formě briket.

Klíčová slova: biomasa, směsná briketovaná paliva, stechiometrie, spalování

1. Úvod

Ovzduší patří mezi nejdůležitějším faktorem životního prostředí. Ochranou ovzduší se rozumí soubor technických a administrativních opatření, která směřují buď přímo nebo nepřímo ke zmírnění, zastavení jejich růstu nebo dokonce ke snížení úrovně znečišťování ovzduší. Mezi nejdůležitější technická opatření patří omezování emisí ze zdrojů.

Problematika emisí je velmi rozsáhlá a závažná, jedná se především o problematiku dokonalého spálení biomasy. Mezi možnosti snižování těchto emisí patří zejména kontinuální dávkování, dostatečně vysoká teplota ve spalovací komoře, přívod sekundárních, popř. terciálních vzduchů, výběr optimální vlhkosti paliva. Vzhledem k tomu, že uhlovodíky a další neúplně spálené produkty se chovají stejně jako oxid uhelnatý, je oxid uhelnatý používán jako indikátor kvality odhořívání.

2. Materiál a metody

Základem každého výpočtu stechiometrie paliv a tepelné práce spalovacích zařízení je prvkový rozbor paliv. Prvkové složení paliv má vliv na veškeré stechiometrické výpočty, výpočty tepelných účinností a ztrát spalovacích zařízení a významně ovlivňuje tepelnou práci spalovacího zařízení. U tuhých paliv se pro zjištění prvkového složení používá tzv. elementární (prvkové) analýzy, kterou se zjišťuje procentuální hmotnostní podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu. Pro vlastní stanovení emisních složek je vybrána biomasa ve formě briket. Byla vybrána směsná briketovaná paliva složená z chřastice rákosovitá, šťovík, odpad po čištění

zrnin, saflor, slupky kakaových bobů. Spalné teplo je určeno měřením v kalorimetru podle ČSN 44 1352. Výsledné prvkové složení spalované biomasy jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Prvkové složení (elementární analýza) spalovaná pevné biomasy

		Zbytky po čištění obilí	Slupky z kakaových bobů	Energetický šťovík	Saflor	Chrastice rákosovitá
W_t^r	Voda (% hm.)	8,33	7,18	7,95	7,15	9,12
A^r	Popel (% hm.)	6,49	13,10	4,45	3,29	6,74
Q_i^r	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	16,25	14,04	15,16	16,15	15,21
C_t^r	Uhlík - C (% hm.)	42,64	41,73	42,70	43,7	41,81
H_t^r	Vodík - H (% hm.)	6,48	5,86	5,42	5,75	4,85
N_t^r	Dusík - N (% hm.)	3,67	2,32	1,65	0,82	0,84
S_t^r	Síra - S (% hm.)	0,16	0,10	0,11	0,045	0,07
O_t^r	Kyslík - O (% hm.)	32,05	29,63	37,61	39,02	36,45
Cl_t^r	Chlor - Cl (% hm.)	0,20	0,08	0,11	0,22	0,12

Významným úkolem je stanovení stechiometrie biopaliv. Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako při kontrole práce stávajících spalovacích agregátů. Při těchto výpočtech se především stanoví:

- výhřevnost paliv a spalné teplo podle ČSN 44 1352,
- teoretické množství kyslíku a vzduchu pro dokonalé spalování,
- skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování,
- hmotnostní a objemové množství vlhkých a suchých spalín,
- hmotnostní a objemové množství CO₂, SO₂, H₂O, N₂, O₂, Ar,
- vyjádření jednotlivých složek spalín v % hm. a obj.

Výsledné stechiometrické výpočty u spalované biomasy jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Výsledné stechiometrické výpočty spalované biomasy

		Palivo:	Zbytky po čištění obilí	Slupky z kakaových bobů	Energetický šťovík	Saflor	Chrastice rákosovitá
Objemové spalování							
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	m ³ N.kg ⁻¹	0,93	0,89	0,83	0,86	0,79
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	m ³ N.kg ⁻¹	4,44	4,27	3,97	4,10	3,78
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	m ³ N.kg ⁻¹	11,64	11,21	10,43	10,76	9,92
n	Součinitel přebytku vzduchu (O ₂ = 13 % ve spalínách)		2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
v_{sp}^v	Objemové množství vlhkých spalín	m ³ N.kg ⁻¹	12,82	12,29	11,52	11,88	10,96
v_{sp}^s	Objemové množství suchých spalín	m ³ N.kg ⁻¹	11,53	11,11	10,40	10,72	9,92
v_{spmin}^s	Teoretické objemové množství suchých spalín	m ³ N.kg ⁻¹	4,28	4,13	3,91	4,018	3,73
Vyjádření jednotlivých složek spalín v % ob.							
CO _{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách	%	18,46	18,75	20,26	20,17	20,76
SO _{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalínách	%	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
CO ₂	Oxid uhličitý	%	6,19	6,32	6,90	6,85	7,10
SO ₂	Oxid siřičitý	%	0,01	0,01	0,01	0,0	0,0
H ₂ O	Voda	%	10,6	9,67	9,71	9,75	9,75
N ₂	Dusík	%	71,10	71,31	70,78	70,78	70,72
O ₂	Kyslík	%	11,80	11,85	11,77	11,78	11,77

Veškeré naměřené hodnoty jsou přepočítávány na normální podmínky (při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$) a pro referenční obsah kyslíku ve spalínách O_r , její hodnota je $O_r = 13 \%$.

Měření je zaměřeno na koncentrace emisí vzniklé spalováním směsných briketovaných paliv, jsou zjišťovány oxidy uhlíku (oxid uhličitý CO_2 a oxid uhelnatý CO), oxidy dusíku (oxid dusnatý NO a oxid dusičný NO_2), oxidy síry (SO_2) a chlorovodík (HCl). Oxid uhličitý stanoven na základě naměřené koncentrace kyslíku a charakteristiky paliva Prostřednictvím těchto měření je posuzováno palivo i spalovací zařízení, pokud jde o jeho tepelné parametry a emisní poměry.

Emisní koncentrace kouřových plynů jsou stanoveny přístrojem GA-60. Přístroj GA-60 je víceúčelový analyzátor kouřových plynů. Jeho princip je založen na využití elektrochemických převodníků.

Mimo to je možné přístrojem GA-60 měřit jak teplotu okolí, tak teplotu spalín. Na základě těchto teplot a chemických parametrů se provádí výpočet charakteristik spalování podle následujících vztahů:

$$q_a = (t_a - t_r) \left(\frac{A_1}{\text{CO}_2} + B \right) \quad (\%) \quad (1)$$

kde: q_a je poměrná ztráta citelným teplem spalín podle tzv. „Siegertova vzorce“ v %;
 t_a .. teplota spalín v $^\circ\text{C}$;
 t_r .. teplota v prostoru zkoušek v $^\circ\text{C}$;
 A_1 .. konstanta závislá na palivu;
 CO_2 .. objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách v % v/v;
 B .. konstanta závislá na palivu.

$$q_b = \frac{\alpha \cdot \text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} \quad (\%) \quad (2)$$

kde: q_b je poměrná ztráta plynným nedopalem v %;
 α .. parametr zadaného paliva;
 CO .. objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalínách v % v/v;
 CO_2 .. objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalínách v % v/v.

$$\eta_t = 100 - (q_a + q_b) \quad (\%) \quad (3)$$

kde: η_t je tepelně-technická účinnost spalování v %.

$$n = \frac{20,95}{20,95 - O_{2M}} \quad (-) \quad (4)$$

kde: n je přebytek vzduch jako bezrozměrná veličina;
 O_{2M} .. měřený obsah kyslíku v % v/v.

Pomocí přístroje je dále možné měřit přetlak i podtlak a zároveň diferenční tlak, a tím nepřímo i rychlost proudění spalin v kouřovodu. Dále přístroj umožňuje, na základě Bacharachovy metody, měřit i sazové číslo.

Provozní zkoušky proběhly podle ČSN EN 13229 „Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody“ na krbových akumulacích kamnech s otevřeným systémem s jmenovitým tepelným výkonem 8 kW (viz. obr. 1). Protože bylo zkoušeno topné zařízení s uzavíratelným ohništěm, hodnoty tahu komína v závislosti na jmenovitém tepelném výkonu se pohybovaly v předepsaném rozmezí 12 ± 2 Pa (hodnoty statického tlaku v měřicím úseku spalin). Při měřeních byla průměrná koncentrace oxidu uhelnatého a dalších plynných emisí přepočtena na 13 % obsah kyslíku (O_2). Podle zmíněné normy musí průměrné hodnoty oxidu uhelnatého ve spalinách splňovat mezní hodnoty pro příslušnou třídu CO tak, jak uvádí tab. 3.

Tab. 3 Třídy emisí oxidu uhelnatého pro lokální spotřebiče na pevná paliva
podle ČSN EN 13229

Třída CO spotřebiče	Spotřebiče s uzavřenými dvířky
	Mezní hodnoty tříd emisí CO (při 13 % O_2) %
Třída 1	$\leq 0,3$ ¹⁾
Třída 2	$> 0,3 \leq 1,0$ ¹⁾

¹⁾ $1 \text{ mg.m}_N^{-3} = 0,0001 \%$

Účinné využití tepelné energie při provozování spotřebiče v souladu s údaji výrobce a při spalování zkušebních paliv je hodnoceno podle účinnosti při jmenovitém tepelném výkonu. Naměřená celková účinnost musí odpovídat mezním hodnotám pro příslušnou třídu účinnosti uvedenou v tab. 4.

Tab. 4 Třídy účinnosti při jmenovitém tepelném výkonu pro lokální spotřebiče na pevná paliva
podle ČSN EN 13229

Třída účinnosti spotřebiče	Spotřebiče s uzavřenými dvířky
	Mezní hodnoty tříd účinnosti %
Třída 1	≥ 70
Třída 2	$\geq 60 < 70$
Třída 3	$\geq 50 < 60$
Třída 4	$\geq 30 < 50$

Kamna jsou určena ke spalování jakéhokoliv dřeva nebo dřevěných briket. Jejich hlavní částí je krbová vložka z ocelového plechu, nebo kamnářské litiny tloušťky 5 - 8 mm. Je obložena ze stran a ze shora feolitovými cihlami, které umožňují naakumulovat tepelnou energii a vydávat ji určitou dobu po skončení topení. Akumulační cihly jsou obloženy izolační vrstvou speciálně vyrobenou a tvarovanou z izolace Kalcium - silikát. Dvířka jsou opatřena keramickým sklem s odolností do 750 stupňů Celsia.

Vzduch je přiváděn z prostoru popelníku do topeniště přes uzavíratelnou klapku. Horní i spodní částí skla je přiváděn sekundární vzduch, který zabraňuje usazování splodin na skle. Spaliny jsou odváděny z topeniště do kouřovodu o průměru 150 mm. Spalovací kamna jsou připojena odvodem spalin do komína dle ČSN 374210.



Obr. 1 Krbová akumulční kamna s jmenovitým tepelným výkonem 8 kW
a měřicí aparatura s analyzátořem spalín GA 60

3. Výsledky a diskuse

Vzhledem k tomu, že uhlovodíky a další neúplně spálené produkty se chovají stejně jako oxid uhelnatý CO, představuje tato emisní složka významný indikátor kvality spalovacího procesu. Při porovnání naměřených a zpracovaných hodnot CO s třídami emisí CO podle rozhodující ČSN EN 13229 (viz tab. 5) splňují, až na briketovanou směs šťovíku a slupek kakaových bobů v poměru 1 : 1 a drůbeží podestýlku, všechna ostatní sledovaná paliva třídu 2, kde je limit $10\,000\text{ mg.mN}^{-3}$ při 13 % referenčním kyslíku.

Velmi dobře lze hodnotit u všech sledovaných paliv hodnoty NO_x . U používaného spalovacího zařízení s ohledem na nízký tepelný výkon není pro NO_x stanovena limitní hodnota. Pokud však provedeme srovnání limitní hodnoty pro NO_x (250 mg.mN^{-3} při 11 % O_2) ze Směrnice č. 13-2002 MŽP ČR s požadavky pro propůjčení ochranné známky „Ekologicky šetrný výrobek“, týkající se teplovodních kotlů pro ústřední vytápění na spalování biomasy do 0,2 MW (ČSN 07 0240 a ČSN EN 303-5), tak tato hodnota nebyla překročena u žádného sledovaného paliva.

U emisí HCl, které nejsou rovněž zatím legislativně limitovány, nebyla překročena hodnota 200 mg.mN^{-3} při 13 % vztažného kyslíku.

Síra obsažená v biopalivech obdobně jako chlór odchází rovněž z větší části během spalování do plynné fáze jako SO_2 nebo SO_3 . Emise síry u zkoušené biomasy nepředstavují, co se týče limitních hodnot, normálně žádný problém. Rozhodujícím faktorem však může být korozivní chování síry.

Přebytek vzduchu n je velmi důležitou provozní veličinou, která ovlivňuje emise a účinnost topného zařízení. Určuje také vedle množství oxidujících prostředků v ohništi spalovací teplotu. Provozně optimální hodnotu lze stanovit u spotřebičů této výkonové řady v rozsahu $1,4 \leq n \leq 2,6$. Hodnot, daných tímto intervalem, se dařilo dosahovat při spalování briket chřastice rákosovité, briketované směsi šťovíku a chřastice rákosovité v poměru 3 : 2 a hnědého uhlí 10% m/m, briketované směsi chřastice rákosovité a lničky v poměru 1 : 1 a hnědého uhlí 15% m/m, briketované směsi chřastice rákosovité a topolové štěpky v poměru 1 : 1 a s přídatkem 10 % m/m hnědého uhlí, a briketované směsi chřastice rákosovité a topolové kůry 1 : 1 s přídatkem 10 % m/m hnědého uhlí.

Tab. 5 Výsledky provozního měření vybraných plynných emisí a tepelně-technických parametrů - spalovací akumulární kamna o jmenovitém tepelném výkonu 8 kW. Veškeré naměřené hodnoty jsou přepočítávány na normální podmínky (při teplotě $t = 0^{\circ}\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$) a pro referenční obsah kyslíku ve spalínách $O_r \% = 13 \%$.

	Teplota spalin	O₂	n z O₂	CO₂	CO (O₂=13%)	NO (O₂=13%)	SO₂ (O₂=13%)	NO₂ (O₂=13%)	HCl (O₂=13%)	NO_x (O₂=13%)	Tepelně technická účinnost spalování
	°C	%	0	%	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³	mg.m ⁻³	%
Chrastice rákosovitá brikety prům. 65	487,05	10,24	2,01	9,92	1805,03	143,25	0,00	0,00	177,65	219,63	55,90
Šťovík a chrastice rákosovitá v poměru 3 : 2 a hnědé uhlí 10% brikety prům. 65	562,86	8,85	1,84	11,20	1843,77	103,92	0,00	0,00	128,88	159,33	57,76
Chrastice rákosovitá a lnička v poměru 1 : 1 a hnědé uhlí 15% brikety prům. 65	554,41	7,10	1,54	12,83	3057,32	100,44	227,29	0,77	125,11	154,60	85,40
Chrastice rákosovitá a topolová štěpka v poměru 1 : 1 a hnědé uhlí 10% brikety prům. 65	378,31	9,21	1,81	10,88	4643,17	108,72	7,55	0,83	135,47	167,40	85,50
Chrastice rákosovitá a topolová kůra v poměru 1 : 1 a hnědé uhlí 10% brikety prům. 65	474,93	11,93	2,47	8,24	4361,46	125,14	11,94	0,05	155,23	191,91	60,30
Brikety – šťovík brikety prům. 65	361,22	14,90	3,67	5,53	5992,80	82,92	0,00	0,65	103,34	127,66	59,56
Odpad po čištění zrnin brikety prům. 65	288,15	18,16	7,511	2,55	6539	145,94	0,00	0,05	181,01	223,78	24,30
Safflor brikety prům. 65	403,38	16,16	4,77	4,38	5244,18	118,53	0,00	0,00	147,11	181,72	46,80
Šťovík a slupky kakaových bobů 1 : 1 brikety prům. 65	277,30	17,61	6,28	3,05	14492,23	127,17	0,00	0,00	157,71	194,97	33,40

Vyšší než 70 % tepelně technické účinnosti (třída 1) bylo dosaženo při spalování briketované směsi chřastice rákosovité a lničky a briketované směsi chřastice rákosovité a topolové štěpky. Do třídy 2 (účinnost $60 < 70$ %) lze zařadit briketovanou směs chřastice rákosovité a topolové kůry 1 : 1 + 10 % m/m hnědého uhlí.

Třidu 3 (účinnost n $50 < 60$ %) splnila briketovaná směs šťovíku a chřastice rákosovité v poměru 3 : 2 s přídatkem 10 % m/m hnědého uhlí, brikety chřastice rákosovité a brikety šťovíku. Naprosto nevhodné účinnosti bylo dosaženo u briket z odpadu po čištění zrnin, spalovaných při vysokém přebytku vzduchu $n = 7,51$. Jako emisně nevyhovující lze označit brikety safloru ($n = 4,77$) a směs šťovíku se slupkami kakaových bobů v poměru 1 : 1 ($n = 6,28$), rovněž spojené s nízkou tepelně-technickou účinností spalování.

4. Závěr

Požadavky na kvalitu vytápění značně stoupají, a to i z pohledu jeho vlivu na životní prostředí. U lokálních spotřebičů na pevná paliva, která se především používají v domácnosti, nelze řešit systém čištění spalin jako u větších zařízení, a proto je nutné preferovat standardizovaná pevná paliva vysoké jakosti. Použitím uzavřené regulovatelné spalovací komory krbových vložek se odstraňují špatné spalovací podmínky otevřených krbů. U vložek kachlových kamen se prosazují především spalovací komory s horním odhoříváním, obzvláště tam, kde přicházejí v úvahu akumulární kamna. Z těchto důvodů byla jako ověřovaná spalovací zařízení zvolena akumulární kamna s jmenovitým tepelným výkonem 8 kW.

Ověřovaná směsná briketovaná paliva, vykazující dobré emisní parametry dané třídou 2 a účinností v rozsahu tříd 1 až 3, mohou být při splnění dalších certifikačních požadavků vhodná i pro obdobné lokální spotřebiče na pevná paliva.

Pro využívání pevných směsných briketovaných paliv z biomasy (ale i jiných paliv) je nutné, aby spalovací proces probíhal za optimálních podmínek. Bez těchto předpokladů není spalování přínosem. Proto je vždy potřebné spalovat v daném zařízení palivo, které je určené druhem i strukturou, jakostí atd. Těmto aspektům je nutné věnovat trvalou pozornost.

Literatura

1. MALAŤÁK, J.: Assessment of the Emission and Performance Characteristic at the Power Use of Solid Biomass in the Combustion Equipments with the Heat Output up to 100 KW. In.: *International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment, Bornova - Izmir 2003, Turkey 2003*, s. 633 - 639, ISBN 975-483-598-5
2. MALAŤÁK, J.; PLÍŠTIL, D.; JEVIČ, P.; PŘIKRYL, M.: Emissive Characteristics of Combustion Equipment to Plant Biomass with the Heat Output up to 20 kW. In.: *International Conference of Science: Technical Instruments and Technological Procedures of Processing Primary Commodities for Food Industry and Rational Assessing of the Waste Products*, DTEB – TF - CUA Prague 2004, s. 47 – 52, ISBN 80 - 213 - 1177 - 0
3. MALAŤÁK, J.; PLÍŠTIL, D.; PŘIKRYL, M.; JEVIČ, P.: Stoichiometric Characteristics of Biomass. In.: *International Conference of Science: Technical Instruments and Technological Procedures of Processing Primary Commodities for*

Food Industry and Rational Assessing of the Waste Products, DTEB – TF - CUA Prague 2004, s. 53 – 58, ISBN 80 - 213 - 1177 - 0

4. MALAŤÁK, J.; PLÍŠTIL, D.; PŘIKRYL, M.: Emission Characteristic of Solid Biomass in the Combustion Equipments. *In.: International Conference - Conference Proceedings, Science and Research - Tools of Global Development Strategy*, CUA Prague - Technical Faculty 2004, s. 125-130, ISBN 80-213-1238-6
5. PLÍŠTIL, D.; BROŽEK, M.; MALAŤÁK, J.; HENEMAN, P.: Heating briquettes from energy crops. *In.: Research in Agricultural Engineering*, Prague 2004, s. 136-139, ISSN 1212 – 9151
6. PLÍŠTIL, D.; MALAŤÁK, J.: Utilize Residual Biomass from Agricultural Produce. *In.: International Conference - Conference Proceedings, Science and Research - Tools of Global Development Strategy*, CUA Prague - Technical Faculty 2004, s. 177-180, ISBN 80-213-1238-6
7. ČSN EN 13229: Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva. Požadavky a zkušební metody. Český normalizační institut, Praha 2002, s. 64
8. Směrnice č. 13-2002 s požadavky pro propůjčení ochranné známky „Ekologicky šetrný výrobek“. *Teplovodní kotle pro ústřední vytápění, na spalování biomasy*. Praha, MŽP ČR, 19. 12. 2001, s. 5

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory grantu č. 31170/1312/3131XX, s názvem: Energetické využití pevné a kapalně biomasy: „Celouniverzitní interní grantová agentura České zemědělské univerzity v Praze – CIGA.“

PŘEHLED TECHNOLOGIÍ NA ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY

VIEW OF THE TECHNOLOGIES FOR ENERGY BIOMASS UTILIZATION

Autor: Ing. Jan Najser¹

¹VŠB-TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum
17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba
jan.najser@vsb.cz

Abstrakt: Tento příspěvek uvádí možnosti energetického využití biomasy. Jsou zde popsány jednotlivé technologie pro termochemickou a biochemickou přeměnu biomasy.

Klíčová slova: biomasa, technologie

1. Úvod

Jako zdroj tepla byla od pradávna téměř výhradně používána biomasa. Tento stav trval až do začátku průmyslové revoluce, kdy v některých průmyslových regionech (u nás např. na Ostravsku) docházelo k velkým problémům s nedostatkem této suroviny. Problém byl vyřešen v 18. století po objevení uhlí, které na dlouhou dobu a v daleko větším měřítku biomasu nahradilo. Biomasa se jako jeden z obnovitelných zdrojů znovu dostává do centra pozornosti v období druhé světové války, v 70. letech (ropná krize) a na konci 20. století, kdy si lidstvo začalo uvědomovat vyčerpatelnost fosilních paliv a nepříznivé dopady vysoké spotřeby energií na životní prostředí (např. dodatkový skleníkový efekt).

Rozvoj využití biomasy i jejího pěstování pro energetické účely je podporován v Evropské Unii jako součást řešení ekologických otázek energetiky, problémů zemědělské politiky a politiky rozvoje venkova. V jejím rámci by do roku 2010 měla výroba elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů energie v České republice oproti současnosti významně stoupnout. Hlavním tahounem má být především výroba elektrické energie z biomasy, tedy energetických plodin a rozložitelných výrobků či odpadů. Nástrojem růstu má být schválený zákon o podpoře výroby elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů energie.

V současnosti leží v České republice ladem asi půl miliónu hektarů půdy. Pro naplnění cíle roku 2010 by postačilo využít asi polovinu této výměry. V horizontu 30 let lze využít až 1,5 miliónu hektarů, tedy asi třetinu tuzemské zemědělské půdy.

Předpokládá se, že do roku 2010 stoupne v Česku podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě na osm procent, v současné době je zhruba na poloviční úrovni. České republice to ukládá směrnice EU. Plán pro všechny země Evropské unie je 12 procent. Nejvyšší podíl mají stanoven například Švédsko a Rakousko s vysokým zastoupením vodních elektráren. Těm směrnice určuje 60, respektive 78 procent. Naopak nejméně, 3,1 procenta, má Maďarsko. U Belgie je to šest procent.

Nejjednodušším řešením pro výrobu energie z biomasy je využití biopaliva pro vytápění. Zde lze zaznamenat pozoruhodný rozvoj. Roste zájem o individuální vytápění, budují se systémy centrálního zásobování palivem. Značný podíl ze všech kotlů tvoří krbová kamna. Tři největší domácí výrobci produkují ročně zhruba 73 tisíc kamen, z toho 21 tisíc se prodá na českém trhu. Při průměrném jmenovitém výkonu 7 kW to ročně představuje nově instalovaný tepelný výkon cca 150 MW. *Nutno ovšem podotknout, že tento trend je spíše módní záležitostí a v žádném případě se nedá předpokládat nějaký větší podíl na výrobě tepelné energie. Většina těchto kamen je provozována jen občas a jako hlavní zdroj pro vytápění jsou používány kotle na fosilní paliva (uhlí, zemní plyn apod.).*

Z důvodu snahy o vysokou efektivitu využití paliva a zejména z důvodu požadavku na čistou a operativní energii elektrickou je v současnosti soustředěn zájem na kogenerační systémy se spalovacími motory, či turbínami a reálně se jeví i použití palivových článků po vhodné konverzi plynu, získaného zplyňováním. Na kvalitu plynu pro zplyňování jsou kladeny vysoké nároky. Cílem je kogenerace se spalovacím motorem, nebo turbínou, s výrazně vyššími kvalitativními požadavky na čistotu plynu. V dnešní době představuje kogenerace se zplyňováním biomasy dosud na zcela zvládnutý úkol. Existuje zde řada technických problémů, většina z nich je dána přísnými environmentálními požadavky a požadavky výrobců kogeneračních jednotek.

Co se týká investičních nákladů lze obecně ke všem typům netradičních a obnovitelných zdrojů energie říci, že jejich žádoucí širší uplatnění není bez dotace třetí stranou ekonomicky efektivní a zde nastupuje role státu a zákon o podpoře výroby elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů energie.

2. Technologie pro energetické využití biomasy

Z principiálního hlediska lze rozlišit několik způsobů získávání energie z biomasy:

- a) termochemická přeměna biomasy (suché procesy pro energetické využití biomasy):
 - spalování biomasy
 - zplyňování
 - pyrolýza
- b) biochemická přeměna biomasy (mokrý procesy pro energetické využití biomasy):
 - alkoholové kvašení
 - metanové kvašení
 - esterifikace surových bioolejů
- c) získávání odpadního tepla při zpracování biomasy (např. při kompostování, aerobním čištění odpadních vod, anaerobní fermentaci pevných odpadů apod.).

Přestože existuje více způsobů využití biomasy k energetickým účelům, v praxi převládá ze suchých procesů spalování biomasy, z mokrých procesů výroba bioplynu anaerobní fermentací.[1]

Přehled jednotlivých technologií pro výrobu elektrické energie udává tabulka č.1.

Tab. 1 Přehled technologií pro výrobu elektřiny z biomasy

Technologie	Účinnost	Výkon	Stav vývoje
Parní stroj	10 – 12 %	200-2000 kW	konečné využití
Parní turbína	15 – 40 %	0,5-240 MW	konečné využití
Organický Rankinův cyklus	10 – 12 %	300-1500 kW	připraveno ke komerci
Spalovací motor	27 – 31 %	100-2000 kW	demonstrační jednotky
IGCC	40– 55 %	> 10 MW	demonstrační jednotky
Šroubový parní stroj	10 – 12 %	20-1000 kW	demonstrační jednotky
Stirlingův motor	18 – 22 %	0,5-100 kW	demonstrační jednotky
Mikroturbína	15 – 25 %	5-100 kW	výzkum a vývoj
Palivový článek	25 – 40 %	20-2000kW	výzkum a vývoj

2.1. Spalování

Nejjednodušší metodou pro termickou přeměnu biomasy je spalování za dostatečného přístupu kyslíku. Tato technologie je dokonale zpracovaná a pro investory představuje minimální riziko. Produktem je tepelná energie, která se následně využije pro vytápění, technologické procesy nebo pro výrobu elektrické energie. Spalování většinou nevyžaduje předběžnou speciální úpravu biomasy. Je přijatelná i vyšší vlhkost suroviny. Vzhledem k charakteru biomasy a jejímu proměnnému složení je nutno věnovat značnou pozornost optimálním podmínkám při spalování a při čištění výstupních spalin, kde je nutno především kontrolovat emise oxidu uhelnatého a tuhých látek. Spalování biomasy je v současnosti technicky dostatečně vyřešeno a to ve dvou hlavních koncepcích:

- spalování na roštu,
- spalování na fluidní vrstvě.

Rozšířenější je dosud spalování na roštu, avšak fluidní technologie má některé významné výhody a její technický vývoj stále postupuje. Samostatnou kapitolu pak tvoří spoluspalování biomasy s tuhými fosilními palivy v již existujících velkokapacitních tepelných elektrárnách. Nová koncepce kotlů, při nichž se biomasa spaluje spolu s uhlím, rašelinou, či palivem daným zpracováním městského odpadu (RDF = refuse derived fuel) nebo s jinými palivy, umožňuje dosažení vysoké efektivnosti vzhledem k spalovaným množstvím a omezenému riziku nedostatku

spalovaného paliva, jelikož je možné využívat více druhů paliv a tím kompenzovat sezónní vlivy při dodávkách biosurovinové vsázky.

2.1.1. Spalovací zařízení

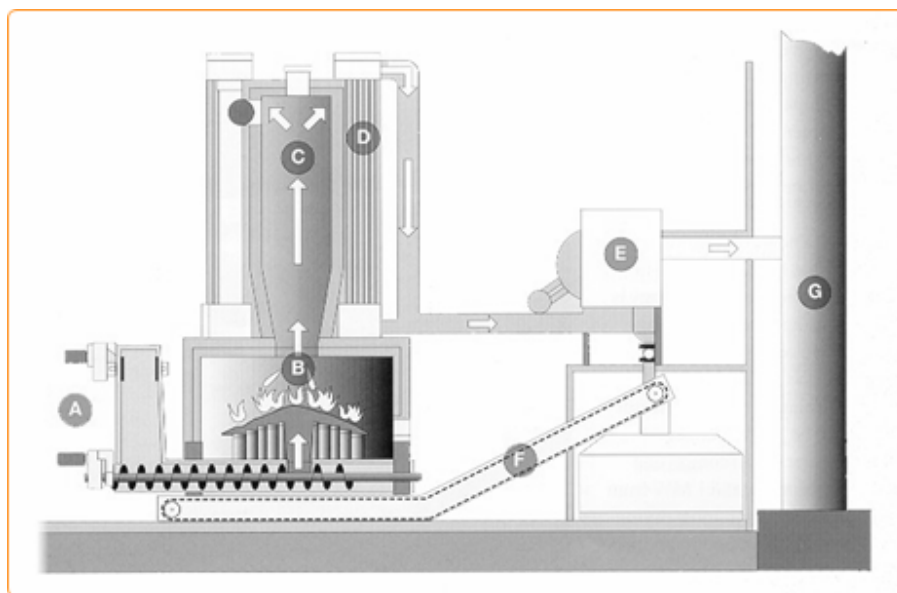
Kotle nad 100 kW se používají pro průmyslové aplikace nebo systémy centrálního zásobování teplem. Spalují nejčastěji dřevěné štěpky nebo balíky slámy. Často jsou vybaveny automatickým přikládáním paliva a jsou schopny spalovat i méně kvalitní o vlhčí biomasu. Někdy tato zařízení využívají kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (kogenerace).

Kotle pro rodinné domky pracují obvykle tak, že se palivo nejprve zplyňuje a teprve potom se plyn spaluje. Takový systém umožňuje velmi dobrou regulaci srovnatelnou s plynovými kotli. Kotle spalují nejčastěji polenové dříví či pilinové brikety, někdy v kombinaci se štěpkou nebo dřevním odpadem. Přikládat je nutno asi čtyřikrát za den; popel se vybírá přibližně jednou týdně. V zahraničí si získávají oblibu lisované pilinové pelety, které umožňují bezobslužný provoz kotle a komfortní dopravu a skladování.

Cihlové pece, kachlová kamna na dřevo se v Čechách používaly už od pradávna. Jsou zajímavou součástí celého interiéru, mají vysokou účinnost, jsou dostatečným zdrojem tepla po celý den. Poskytují příjemné sálavé teplo, čímž jsou ve srovnání s radiátorovým vytápěním úspornější.

Kovová kamna se vyrábějí jak z plechu, tak z litiny. Výhodou je, že se rychle rozežehřejí. Účinnost kamen závisí na konstrukci i na uživateli. Dokonalé spalování dává často mnohem více tepla, než vyžaduje aktuální spotřeba. Často se tedy dává přednost méně dokonalému spalování (nižší účinnost, více kouře) a rovnoměrnější dodávce tepla. Některá moderní kamna mají také vestavěnou topnou vložku, takže pracují zároveň i jako kotel ústředního vytápění.

Obrázek č.1 ukazuje jednu z možných technologií na spalování biomasy.



Vysvětlivky: A – dávkování paliva, B – primární spalovací komora,
C – sekundární spalovací komora, D – výměník,
E – čištění spalín, F – vynášení popele, G – komín

Obr. 1 Schéma kotle na spalování biomasy

2.2. Zplyňování

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

Pro zplynění biomasy jsou v současné době používány dva základní způsoby:

- zplyňování v generátorech s pevným(sesuvným) ložem,
- zplyňování ve fluidních generátorech.

Hlavní snahou při procesu zplyňování je transformovat co největší podíl energie paliva do co nejvyššího energetického obsahu plynu. Hlavními hořlavými složkami plynu jsou CO, H₂ a CH₄. Řízením zplyňovacího procesu se dá dosáhnout toho, aby vyvinutý plyn prakticky neobsahoval sirné sloučeniny a prachové podíly. Ty zůstanou vázány na minerální zbytek. Teplo, které z procesu zplyňování odchází spolu s horkým plynem, je využitelné jako vedlejší produkt, nebo se vrací do procesu ke zlepšení energetické bilance např. předehříváním zplyňovacího vzduchu. Zplyňování biomasy probíhá zpravidla za atmosférického tlaku.

Oproti spalování má zplyňování nižší tepelné ztráty a lepší energetické využití paliva. Energetická účinnost se pohybuje v rozmezí 80 až 90 %.

Jako výhody zplyňovacích technologií oproti spalování lze považovat :

- možnost použití kogenerace s vyšším teplotenským modulem, vedoucí k vyšší úspoře primárních paliv a nižším měrným provozním nákladům
- převedení pevného paliva s velkým měrným objemem na plynné palivo s možností spalování v tepelných strojích
- možnost využít různá alternativní pevná paliva, např. odpady
- snížení produkce CO₂ a emisních škodlivin

Nezbytným průvodním jevem zplyňování je vznik destilátů, kterých je tím více, čím nižší je teplota zplyňování.

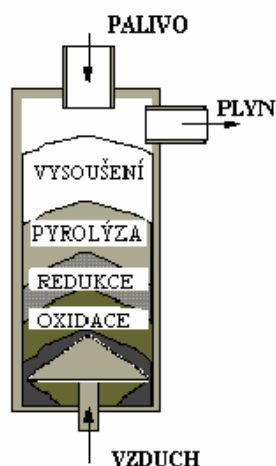
Pro zplyňování lze použít jak všechny druhy dřeva, slámy, pěstované energetické rostliny, tak i tříděných odpadů.[4]. Tato koncepce (nazývána vícepalivové zplyňování) výrazně zvyšuje konkurenční výhody biomasy. V současnosti je právě zplyňování dřeva, spojené s kogeneračními jednotkami, v popředí zájmu mezi alternativními zdroji. Vzniklý plyn je možno využít i v ostatních průmyslových pecích.

Vývoj zplyňovacích technologií je v poslední době značně intenzivnější a ve světě poměrně roztržštěný. Většina z vyvíjených zařízení je zatím ve stadiu pokusů, projektů nebo pilotních zařízení. To vyžaduje další výzkumy pro postupné uvádění do stadia demonstračních zařízení a do komerční podoby.

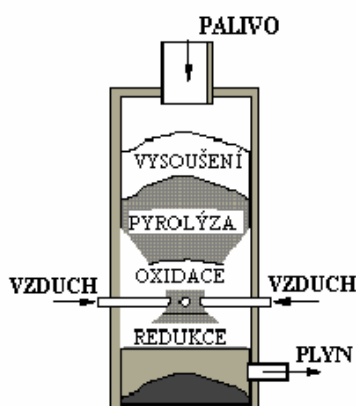
Cílem výzkumů je jednak rozšíření teoretických poznatků procesu zplyňování, tak experimentální ověřování vlastností vyrobených plynů z různých paliv a jejich další využití.

Výhřevnost vyrobeného energoplynu se pohybuje v rozmezí 4 až 6 MJ / m³_n. Surový plyn pak můžeme použít ke spálení ve speciálně upravených hořácích (např. pro otop cementářských a vápenických pecí). Po zchlazení a vyčištění je energoplyn používán k výrobě elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách se spalovacími motory. [2]

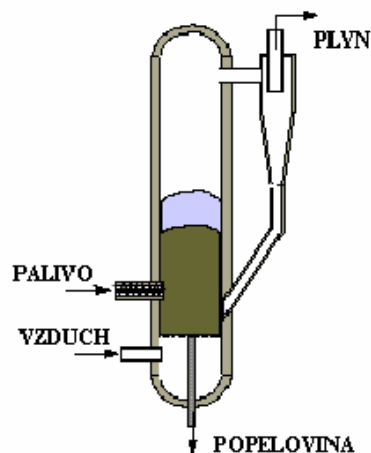
PROTIPROUDÝ REAKTOR



SOUPROUDÝ REAKTOR



FLUIDNÍ REAKTOR



Obr. 2 Hlavní typy zplyňovacích reaktorů

2.3. Pyrolýza

Pyrolýza je velmi slibná technologie, která by se mohla v budoucnosti uplatnit. Je definována jako proces rozkladu při zvýšených teplotách (300 – 700 °C) bez přítomnosti kyslíku. Výsledkem pyrolýzy biomasy jsou pevné produkty (zuhelnatělé zbytky, dřevěné uhlí), produkty kapalné (pyrolýzní oleje) a směs spalitelných plynů. Po dlouhá staletí se pyrolýza využívalo při výrobě dřevěného uhlí (karbonizace). Tento proces probíhá při relativně nízké teplotě a dlouhé době setrvání tak, aby se docílilo maximálních výnosů dřevěného uhlí, přibližně 35%.

V posledních letech se zvýšená pozornost věnovala výrobě pyrolýzních olejů (bioropa), protože se s nimi snadno manipuluje a mají mnohem větší energetickou vydatnost než pevná biomasa. Pyrolýzní kapaliny, o kterých se v současnosti mluví jako o bioolejích nebo bioropě, jsou určené k přímému spalování v kotlech, motorech nebo turbínách. Nicméně určité úpravy bioolejů jsou nezbytné, aby se odstranily nežádoucí vlastnosti, jako např. malá tepelná stabilita nebo výhřevnost, či vysoká viskozita a korozivita. Dřevěné uhlí se může užívat v malých zplyňovacích zařízeních (v rozsahu kW) nebo se může využívat jako cenné palivo. Hlavní výhodou rychlé pyrolýzy je, že výroba paliva se děje odděleně od výroby energie.

Proces okamžité pyrolýzy je prozatím ve stavu demonstračních projektů, přičemž úprava bioolejů je na mnohem nižším stupni vývoje. Pyrolýza může být zajímavá ve spojení s existujícími systémy velkokapacitní výroby elektřiny, zvláště pokud je to spojeno s přepravou biomasy, protože výsledky pyrolýzy jsou produkty s vysokou energetickou koncentrací, které se mohou využívat např. v již existujících uhelných kotlích. Největší prozatím vybudovaná elektrárna má kapacitu 2 t/h, ale elektrárny s kapacitou 4 – 6 t/h (což odpovídá 6 – 10 MW_e) jsou ve stavu pokročilého vývoje. V dlouhodobém výhledu bude možné využívat pyrolýzních olejů jako dopravních paliv (náhrada nafty) po procesech stabilizace a jiných úpravách. Toto využití je prozatím neekonomické. Vyvíjí se také řada technologií, které kombinují pyrolýzu a zplyňování, aby se tím odstranily jednotlivé nedostatky obou technologií, ale aby se současně uplatnily jejich výhody.

2.4. Alkoholové kvašení

V současné době je bioetanol vyráběn pouze z lihových plodin. Energetická náročnost agroalkoholů je vysoká, zejména z důvodů energetických vstupů při pěstování plodin, které jsou zdrojem cukernatých nebo škrobnatých surovin. I když zahrneme k energii bioetanolu získaného klasickým postupem energii vedlejších produktů, je vztah output : input cca 1,3 - 1,5 : 1. Výrobní náklady bioetanolu vyrobeného klasickým způsobem jsou 3 x vyšší než výrobní náklady konvenčních motorových paliv, což brání otevření trhu s bioetanolem.

Bioetanol je možno vyrábět ekonomicky a energeticky efektivnějším alkoholovým kvašením hemicelulóзовých a celulóзовých cukrů z obnovitelné lignocelulóзовé suroviny ze zemědělství lesnické výroby a z odpadů dřevařského průmyslu.

Ve VÚRV Praha - Ruzyně je řešen projekt, který se zabývá vývojem kontinuální hydrolýzy lignocelulóзовých substrátů (slámy, dřevního odpadu, různých sklizňových zbytků a pod) a předpokládá dosažení 70 - 80% výtěžnosti hemicelulóзовých cukrů z celkového vstupu hemicelulóзы a 50 - 75% výtěžnosti glukóзы a celkového vstupu celulóзы. Předpokladem této výtěžnosti je úplné odštěpení ligninu od celulóзы termicko tlakovou hydrolýzou. Budované prototypové zařízení s hodinovým výkonem 20 - 30 kg lignocelulóзовé fytomasy umožní stanovit optimální parametry hydrolýzy při které se dosáhne nejvyšší produkce cukrů a nedojde k degradaci xylóзы a glukóзы. Při připravovaných experimentech s hydrolýzou slámy obilnin a olejnin je uvažováno s teplotami 140 - 230°C, s tlakem 0,4 - 2,85 MPa a se zdržením 10 - 17 minut. U zkoušek s kratší dobou zdržení se předpokládá s vratkou odštěpené celulóзы nepřeměněné na glukózu na počátek hydrolýzního procesu. Ve výzkumném projektu je třeba řešit řadu technologicko technických problémů jako je úprava vstupních surovin, separaci roztoků cukrů a zbytkové tuhé fáze a proti stávajícím technologiím výroby agroalkoholů zefektivnit fermentaci, separaci kvasinek, destilaci a rektifikaci.

Cílem projektů je podstatné snížení ceny bioetanolu a snížení celkových energetických vstupů při jeho výrobě. Technologie bude produkovat kromě bioetanolu řadu vedlejších výrobků (podle poptávky), zejména čistý práškový lignin, fural, kyselinu octovou, metanol a krmné kvasnice.

2.5. Metanové kvašení

Anaerobní fermentace spočívá v mikrobiologické transformaci organických složek zvířecích exkrementů, odpadních vod a jiné vhodné biomasy v podmínkách bez přístupu vzduchu při mírně zvýšené teplotě (35-45°C), přičemž vznikne bioplyn a stabilizované hnojivo či kompost. Bioplyn obsahuje 55-60 % metanu a má výhřevnost 20-23 MJ/m³. Zbytek hmoty po fermentaci má vlastnosti výrazně lepší než původní biomasa a představuje výborné hnojivo. Jsou v něm zachovány hlavní živiny a humusotvorné komponenty a naopak zničeny patogenní zárodky a semena plevelů. Je bez zápachu a při použití na polích neohrožuje podzemní ani povrchové vody.

Bioplyn z čistíren odpadních vod je jednou z mála oblastí, kde jsou i u nás již dlouhodobě používány kogenerační jednotky a to jak se spalovacími motory, tak se spalovacími turbínami. Použití kogeneračních jednotek je zde výhodné a tyto jednotky jsou jednotnou součástí celého technologického procesu čištění odpadních vod. V současné době se zde dává přednost kogeneračním jednotkám se spalovacími motory.

Další možností je využití bioplynu ze skládek. Komunální odpady se značným podílem organických látek jsou sváženy na skládky a zhutněny. Organické podíly postupně podléhají rozkladu a anaerobním procesům. V prostředí s malým podílem

kyslíku se samovolně množí bakterie produkující bioplyn, který může obsahovat až 50 až 70 % metanu. Zbytek je tvořen převážně oxidem uhličitým a dusíkem. Ostatní plynné složky, jako vodík, kyslík, sirovodík apod. tvoří jen zlomek procenta. Výhřevnost skládkového plynu je, v závislosti na obsahu metanu, nejčastěji v rozpětí 18 až 24 MJ/m³. Skládkový plyn se jímá pomocí řady odběrných sond a sběrným potrubím se svádí do strojovny kogeneračních jednotek se spalovacími motory. Plyn je vhodným palivem motorů, které pro jeho spalování nepotřebují téměř žádnou úpravu. Teplo kogeneračních jednotek se používá pro vytápění komunálních objektů, otop skleníků nebo zemědělských sušáren, apod. Význam tohoto systému je nejen energetický, ale i ekologický, neboť zabraňuje úniku vytvářeného metanu do ovzduší. V zahraničí je tento způsob využití skládek již značně rozšířen.

2.6. Esterifikace surových bioolejů

Esterifikace je chemická proměna rostlinných olejů na estery, které jsou vhodné pro použití v dieselových motorech a odtud i termín bionafta. Rostlinné oleje se vyrábějí z olejnatých plodin, např. řepky nebo slunečnice, při použití tlakových a extrakčních postupů. Doprovodným produktem je na protein bohatý koláč (zbytek), který je cenným živočišným krmivem. Při esterifikační reakci se rostlinné glyceridy v přítomnosti metanolu nebo etanolu a vhodného katalyzátoru (obvykle vodného roztoku NaOH nebo KOH) přeměňují na metylnaté nebo etylnaté estery s tím, že jako vedlejší produkt vzniká glycerín. Nejslibnější ester pro výrobu bionafty z rostlinných olejů je RME (metyl ester řepkového oleje). Estery rostlinných olejů se mohou užívat ve směsi s běžnou naftou. [3]

Ve srovnání s konvenční naftou je používání bionafty spojeno s menšími emisemi škodlivých látek, čímž se omezuje výskyt respiračních problémů a snižuje se riziko vzniku rakoviny. Vzhledem k tomu, že v řepkovém oleji je obsaženo velmi malé množství síry, nevzniká při spalování bionafty SO₂, který je právě původcem uvedených respiračních problémů, a který rovněž přispívá ke vzniku kyselého deště. Na druhé straně se ovšem mohou vyskytnout problémy se zápachem – je podobný zápachu oleje při smažení – je-li RME využíván jako palivo.

Proces výroby RME je velmi dobře propracován a výrobek je komerčně uplatňován ve Francii, v Německu, Itálii i v ČR. Poslední výsledky výzkumného programu Evropské komise Thermi (Thermi Programme) ukázaly, že u běžných motorů, jež pracují se směsnými palivy obsahujícími až 50 % RME, se nevyskytují žádné problémy.

Současně ovšem platí, že v EU jsou zdroje pro výrobu bionafty omezené. Celková produkce řepkového semena pěstovaného k nepotravinovým účelům se omezuje na 0,7 – 1,2 Mha, jak je to dáno dohodou z roku 1993 a vyhrazené kvóty jsou rychle vyčerpávány jednotlivými členskými státy, jak to ukazuje růst skutečně obdělávané půdy v EU pro tyto účely. V roce 1993 to bylo 0,2 Mha, ale v roce 1994 už to bylo 0,6 Mha. Většina tohoto růstu se týká řepky. Největšími výrobci jsou Francie a Německo. Platí ovšem, že bionafta je drahým transportním palivem a stojí o 0,20 – 0,25 EURO více na jeden litr, než ekvivalent vyrobený z fosilních zdrojů.

Hlavními překážkami uplatnění bionafty na trhu jsou vysoké výrobní náklady, omezené množství surovin, které se umožňují vypěstovat v EU, a nedostatek vůle jednotlivých států zavést na biopaliva daňové úlevy. Nedostatek konkurenceschopnosti bionafty ve srovnání s fosilní naftou odrazuje kapitálové investice do dalšího vývoje esterifikačních metod.

3. Závěr

Využití biomasy a aktivity s tímto problémem spojené mají své příznivce i odpůrce, přesto je energetickému využití biomasy věnována mimořádná pozornost ve všech vyspělých zemích světa. Vedle klasických systémů se spalováním dřeva pro vytápění nebo výroby technologické páry jsou vyvíjeny systémy pro zplyňování, umožňující kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie a velký význam je přikládán možnosti kombinovaného spalování uhlí a biomasy.

Omezené zásoby fosilních paliv jako nejvýznamnějšího zdroje energie vedou v současné době ke snaze zefektivnit využívání fosilních paliv, ale především též k hledání nových zdrojů, aby bylo možno i nadále zajišťovat strmě narůstající trend spotřeby energie. Materiálem, do něhož jsou vkládány velké naděje je právě biomasa.

Tato se řadí k široké skupině tzv. „obnovitelných zdrojů energie“. Biomasa neobsahuje síru, tudíž nevznikají emise SO_2 . Ovšem nezodpovědné a laické provozování spalovacích zařízení může i v případě, že palivem je biomasa, mít za následek výrazné překročení emisních limitů některých škodlivin. Jistou nevýhodou používání biopaliv může být ovšem vyšší cena oproti klasickým fosilním palivům.

Vzhledem k tomu, že ložiska fosilních paliv nejsou nevyčerpatelná a navíc tato paliva produkují při spalování více škodlivých emisí než paliva získaná z biomasy, je zřejmé, že výroba a používání paliv vyrobených z biomasy a také výzkumy technologií na zpracování těchto paliv budou v budoucnu velmi perspektivní nebo dokonce nevyhnutelné.

Literatura

1. MOTLÍK J., VÁŇA J.: Biomasa pro energii (2) <http://biom.cz/>
2. NAJSER J., Elektřina z biomasy, odborný časopis *Energie kolem nás*, 5-6/2004, s. 38-40, ISSN 1214-5998
3. KOUKIOS, E. G. 2002. *Biomasa*. VŠB – TU Ostrava, 2002
4. OCHRANA L., SKÁLA Z., DVOŘÁK P., KUBÍČEK J., NAJSER J., Gasification of Solid Waste and Biomass. *VGB PowerTech*, 2004, vol. 84, no. 6, p. 70-74. ISSN 1435-3199

EXPERIMENTÁLNÍ (PROVOZNÍ) PROVĚŘENÍ BIOPALIVA NA BÁZI BIOMASY A KALŮ Z ČOV NA STŘEDNÍM ENERGETICKÉM ZDROJI V ROZTOKÁCH U KŘIVOKLÁTU

EXPERIMENTAL VERIFICATION BIOFUEL BASED ON SLUGE AND BIOMASS AN MIDLE SORCE IN ROZTOKY U KRIVOKLATU

Autor: Ing. Anna Nezhodová Cemerková, Ing. Pavel Milčák

¹Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15, 708 33, Ostrava-Poruba
cemerкова@email.cz

Abstrakt: V příspěvku je popsána výroba a tepelné použití biopaliva na bázi biomasy a kalů z čistíren odpadních vod (ČOV) v energetickém zdroji středního výkonu. Fluidní kotel slouží pro výrobu tepelné energie a TUV a je přizpůsoben na spalování směsi hnědouhelného prachu a aditiva.

Klíčová slova: biomasa, kotel, čistírenské kaly, spalování.

1. Úvod

„Státní energetická koncepce“ považuje zvýšení podílu výroby elektřiny a tepelné energie z obnovitelných zdrojů energie za cíl s velmi vysokou prioritou. V koncepci je uvedeno, že „Stát bude podporovat využívání všech zdrojů energie, které lze dlouhodobě reprodukovat a jejichž používání přispěje k posilování nezávislosti státu na cizích zdrojích energie a k ochraně životního prostředí. Preferovat se budou všechny typy obnovitelných zdrojů (OZE) tzn. sluneční energii, energii větru a vodních toků, geotermální energii i biomasu jako zdroje pro výrobu elektřiny a tepelné energie“. Podíl výroby elektřiny v zařízeních na bázi OZE na hrubé spotřebě elektřiny se má zvýšit do roku 2010 na 8 %.

Dále jedním ze zásadních úkolů daných POH ČR je požadavek na snižování množství biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO) ukládaného na skládky. Pod pojmem palivo z biomasy si lze představit různé substráty. Díky tradici patří v naší mysli výsadní místo dřevu ve všech jeho podobách. Vedle něj existuje však celá řada přirozeně se vyskytujících biologických substrátů, které jsou bohaté na energii a můžeme je s úspěchem využít jako palivo. Jedná se o různé vedlejší výrobky nebo odpady ze zpracování biomasy. Problémem velkého množství separovaně sbíraných BRKO (z údržby veřejné a soukromé zeleně) a dalšího odpadu jako jsou kaly z ČOV se zabývá projekt na výrobu a energetické využívání biopaliva vyrobeného fermentační technologií. Projekt byl realizován firmami Agro-Eko Albrechtice a Trigad, a.s.

2. Výroba biopaliva

Výroba biopaliva byla realizována na referenčním zařízení firmy AGRO-EKO v Albrechticích u Českého Těšína v zařízení fermentačního reaktoru EWA-FERM. Vstupní suroviny se v určeném poměru (Tab. 1) naložily nakladačem do míchacího a řezacího zařízení. Po smíchání a rozřezání na požadovanou velikost byla směs vyskladněna na naskladňovací pás a dopravena k plnicímu zařízení fermentačního reaktoru. Po naplnění se fermentační reaktor uzavřel a proces fermentace byl zahájen.

Proces je řízen automaticky v závislosti na teplotě fermentovaného materiálu. Uvnitř reaktoru je směs převrstvována a provzdušňována. Po 14 dnech byla ukončena hygienizační fáze fermentačního procesu a prosušení a pomocí vyskladňovacího zařízení se fermentát - sypné biopalivo vyskladnilo. Vyskladňovacím pásem, korečkovým elevátorem a návazným dopravníkem bylo biopalivo přepraveno k testování ve fluidním kotli v Roztokách u Křivokláta.

Pro vlastní spalovací zkoušku bylo použito palivo v sypném i granulovaném stavu. Proto část připraveného biopaliva ve formě sypného paliva bylo pomocí dopravníku dopraveno do mezizásobníku a z něho dále šnekovým dopravníkem ke granulátoru. Po granulaci byly granule taktéž přepraveny do Roztok u Křivokláta. Na výrobě biopaliva se podílely substráty uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Složení biopaliva

Složení	t	hm. %
Kaly ČOV Sedlčany	9,31	30
piliny	5,50	18
sláma	16,15	52
Množství (celkem)		
zakládka	30,96	t
palivo	17,89	t
výtěž	57,75	%

2.1. Palivo

Jako palivo byly použity čistírenské kaly ze Sedlčan ve směsi s biomasou. Rozbor kalů vykazuje Tab. 2 a analýzy již vyrobeného biopaliva se nacházejí v tabulkách Tab. 3 a,b,c.

Tab. 2 Rozbory kalů z ČOV Sedlčany

		Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Voda celk.	%	77,55		
Popel	%	10,47	46,62	
Hořlavina	%	11,98	53,38	100,00
Spalné teplo	kJ/kg	2 286	10 183	19 076
Výhřevnost	kJ/kg	292	9 246	17 321
Vodík	%	1,02	4,548	8,52
Uhlík	%	5,57	24,808	46,47
Dusík	%	0,83	3,712	6,95
Kyslík	%	4,27	19,01	35,61
Síra	%	0,29	1,306	2,45

Pozn: Metodika: elementární analyzátor EURO EA (stanovení C,H,N,S,O)
Spalné teplo: (kalorimetr Ac350, firmy LECO podle ČSN ISO 1928

Tab. 3a Rozbory biopaliva (fermentát vlhký)

popis veličiny	veličina	jednotka	zjištěná hodnota
voda původní veškerá	w_t^r	%	49,50
popel původní	A^r	%	7,92
popel bezvodý	A^d	%	15,69
výhřevnost původní	Q_i^r	MJ/kg	6,96
spalné teplo	Q_s^{daf}	MJ/kg	20,34
hořlavina prchavá	V^{daf}	%	79,90

Tab. 3b Rozbory biopaliva (fermentát suchý)

popis veličiny	veličina	jednotka	zjištěná hodnota
voda původní veškerá	w_t^r	%	5,78
popel původní	A^r	%	12,66
popel bezvodý	A^d	%	13,44
výhřevnost původní	Q_i^r	MJ/kg	15,50
spalné teplo	Q_s^{daf}	MJ/kg	20,36
hořlavina prchavá	V^{daf}	%	80,30

Tab. 3c Rozbory biopaliva (granule)

popis veličiny	veličina	jednotka	zjištěná hodnota
voda původní veškerá	w_t^r	%	13,09
popel původní	A^r	%	15,94
popel bezvodý	A^d	%	18,34
výhřevnost původní	Q_i^r	MJ/kg	13,22
spalné teplo	Q_s^{daf}	MJ/kg	20,25
hořlavina prchavá	V^{daf}	%	79,40

3. Spalovací zařízení

Pro spalovací zkoušky bylo použito spalovací zařízení v kotelně Roztoky u Křivokláta, kde je instalován fluidní kotel fy LKH (LIBERECKÉ KOTLÁRNY - HÖLTER, s.r.o) o výkonu 2 MW. Dále jsou v provozu 2 roštové kotle Varimatik o výkonu 300 kW. Standardním palivem je pro fluidní kotel hnědouhelný prach (uhelný mul) ve směsi s aditivem.

3.1. Spalovací zařízení roštový kotel VARIMATIK

Kotel je řešen jako svařenec z ocelových plechů a trubek. Přenos tepla ze spalovaného paliva do teplotního média je realizován přes stěny spalovací komory a stěny spalínového výměníku. Palivo je spalováno na horní části válcového roštu. Do jeho vnitřní horní části je cíleně nasáván spalovací vzduch. Na rošt je přiváděno palivo skluzem z násypky paliva. Cyklicky je pak vynášeno do spalovacího prostoru, kde probíhá intenzivní hoření způsobené tahem spalínového ventilátoru. Vzniklé spaliny jsou vedeny podél stěn spalovacího prostoru do spalínového výměníku. Zde jsou vychlazené na teplotu cca 180 °C. Přes kouřovod jsou spaliny přiváděny na vstupní hrdlo ventilátoru. Tím jsou pak vháněny do komínového odtahu.

Teplotní médium je přes vstupní hrdlo umístěné v dolní části zadní stěny kotle, přiváděno do dvojitého pláště spalínového výměníku. Rozdílem měrné hmotnosti

ohřívaného média dochází k jeho proudění podél vnitřních stěn do horních partií kotle odkud je následně, přes výstupní hrdlo, vyvedeno z kotle do topného okruhu.

Na boku kotle je umístěna skříňka řídicí automatiky. Zapíná a vypíná chod spalínového ventilátoru a roštu kotle podle nastavené teploty topné vody. Řídicí automatika a nastavitelný kotlový termostat umožňují nastavení teploty výstupní vody z kotle v rozmezí hodnot 60-90 °C. Řídicí automatika umožňuje nastavení podávání optimálního množství paliva.

Tab. 4 Technické parametry roštového kotle Varimatik

PARAMETR	JEDNOTKA	HODNOTA
Jmenovitý výkon	kW	255
Maximální výkon	kW	290
Jmenovitý průtok vody	l / hod	12 900
Obsah vody v kotli	l	750
ROZMĚRY	mm	
výška s násypkou	2 385	
hloubka	2 570	
šířka kotlového tělesa	1 160	
poloha kouřovodu od osy	0	
PALIVO	Výhřevnost (MJ / kg)	
tříděné hnědé uhlí (ořech2)	18	

3.2. Spalovací zařízení fluidní kotel

Kotel je samonosná konstrukce s vertikálním uspořádáním teplosměnných ploch tvořených membránovými stěnami. Spalovací prostor tvoří dvě fluidní ohniště. Kotel je dvoutahový, 1. a 2. tah jsou odděleny membránovou stěnou.

Vychlazované ohniště je obezděno šamotovým zdivem. Oběh vody nucený, zajišťovaný oběhovým čerpadlem.

Tab. 5 Technické parametry fluidního kotle

Typ kotle	teplovodní, nízkotlaký, fluidní	FK1 - 2 MW
Výkon	jmenovitý	2 MW
	minimální	0,8 MW
	maximální	2,2 MW
Tlak vody	0,4 MPa	
Teplota výstupní vody	112°C	
Teplota vstupní vody	65 - 90°C	
Teplota ve fl. vrstvě	830 - 850 °C	
Přebytek vzduchu	1,2 - 1,4	
Tepelná účinnost	cca 84 %	
Účinnost odsíření spalín	při Ca/S = 1,5	cca 75 %
	při Ca/S = 2	vyšší než 75 %
Palivo - Hnědé uhlí	HP2 - aditivovaný	min. výhřevnost 7 MJ/kg
	zrnitost	0 - 20 mm
	voda, popel	bez omezení
Aditivum	vápenec, nebo dolomit	
Spotřeba vápence	na 1 kg síry (Ca/S - 2,5)	7,9 kg CaCO ₃ /1kg

4. Spalovací zkouška

Vlastní zkouška proběhla ve fluidním kotli s atmosférickou fluidní vrstvou a kvůli počátečním problémům s daným fluidním kotlem i v roštovém kotli Varimatik. Pro měření emisí bylo rozhodnuto spalování a měření emisí čistého biopaliva v granulovaném stavu, neboť nebyl problém s dopravními cestami. Před samostatnou spalovací zkouškou byla provedena nejprve zkouška průchodnosti cest ve fluidním kotli. Po vyčerpání zásobníku s hnědým uhlím byly nasypány granule biopaliva. Jelikož klesala teplota i výkon kotle, muselo se přidat na hodinovém množství paliva. Teplota postupně stoupla na 790 °C. Jelikož stále byla nízká teplota ve fluidní vrstvě (FV), došlo se na to, že po vypnutí ventilátorů se snížilo množství vzduchu, což zapříčinilo zvednutí teploty ve FV. Nyní byl fluidní kotel ve stabilizovaném stavu a mohla začít spalovací zkouška.

5. Výsledky měření emisí

Skrz počáteční technické problémy s fluidním kotlem byla nejprve provedena spalovací zkouška na roštovém kotli Varimatic. Při této zkoušce byly překročeny emise CO. Tyto spalovací zkoušky však nebyly směrodatné, nýbrž porovnávací.

Tab. 6 Výsledky měření emisí na roštovém kotli Varimatik

Roztoky Varimatik 15.3.2005	O ₂	CO	NO _x	SO ₂
	[%]	[mg·m _N ⁻³]	[mg·m _N ⁻³]	[mg·m _N ⁻³]
8:45÷9:15	15,53	1 235,28	398,83	1146,38
9:15÷9:45	13,84	826,47	387,89	948,78
9:45÷10:15	15,09	1 741,97	382,37	958,16
10:15÷10:45	12,79	297,48	390,69	927,97
10:45÷11:15	13,14	181,47	403,97	957,30
11:15÷11:45	13,84	224,88	377,56	987,98
11:45÷12:15	14,76	967,68	388,99	1015,33
12:15÷12:45	13,71	310,03	392,28	995,48
průměr za zkoušku	14,09	723,16	390,32	992,17

Výsledky jsou po přepočtu na 11% O₂

Jako výchozí výsledky měření emisí bylo rozhodnuto spalování a měření emisí čistého biopaliva v granulovaném stavu (Tab. 7), dle povolení ČIŽP na fluidním kotli. Výsledky emisí byly v podlimitním stavu.

Tab. 7 Výsledky měření emisí na fluidním kotli

Roztoky fluid.kotel 15.3.2005	O ₂	CO	NO _x	SO ₂
	[%]	[mg·m _N ⁻³]	[mg·m _N ⁻³]	[mg·m _N ⁻³]
16:30÷17:00	15,18	124,58	492,10	1 683,67
17:00÷17:30	15,85	73,49	584,98	1 208,83
17:30÷18:00	15,73	64,06	560,74	1 258,04
18:00÷18:30	15,55	61,54	538,59	1 352,88
18:30÷19:00	15,75	70,95	558,42	1 393,46
19:00÷19:30	16,52	73,59	625,67	1 139,13
19:30÷20:00	16,34	63,00	590,10	1 161,13
20:00÷20:30	15,83	59,73	567,60	1 210,70
20:30÷21:00	16,33	68,49	581,07	1 208,74
21:00÷21:30	16,19	69,30	653,44	1 016,35
21:30÷22:00	16,02	61,40	614,63	1 099,67
22:00÷22:30	16,44	58,61	596,77	1 165,88
průměr za zkoušku	15,98	70,73	580,34	1 241,54

Výsledky měření emisí biopaliva na fluidním kotli fy LKH prokázaly plnění emisních parametrů platných dle dle Nařízení vlády 352/2002 Sb. ze dne 3. července 2002 pro spalovací zařízení spalující dřevo nebo biomasu pro referenční obsah kyslíku $O_2 = 11 \%$.

6. Závěr

Uvedená komplexní spalovací zkouška biopaliva vyrobeného z komponent bioodpadů z údržby zeleně a kalů z čistírny komunálních odpadních vod je ukázkou možné proveditelnosti energetického využívání tohoto druhu biopaliva v provozních podmínkách pro střední energetické zdroje. Zkouška tudíž prokázala praktickou možnost spalování biopaliva vyrobeného fermentační technologií na fluidním kotli středního výkonu.

Literatura

1. Kovařík, R.: Příprava alternativního paliva pro fluidní kotel v Opavě, Odpady 21, 4. mezinárodní konference, Ostrava 2004, str.104-105, ISBN 80-239-2944-5.

Zdroj dat z provedených analýz:

Čech, B., Matoušek, J.: měření v Roztokách u Křivokláta, 15.3.2005, teplárna Roztoky.
Hůrka, M.: analýzy biopaliva pro spalovací zkoušku v Roztokách, 24.2.2005, Albrechtice u Českého Těšína.

OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE V ČESKÉ REPUBLICE

RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE CZECH REPUBLIC

Autor: Prof. Ing. Pavel Noskievič, CSc.¹

¹VŠB-TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum
17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba
pavel.noskievic@vsb.cz

Abstrakt: V roce 1999 zveřejnili autoři v časopisu Energie poměrně rozsáhlý článek, v němž upozorňovali na základě zahraničních zkušeností na nereálnost očekávaných příspěvků obnovitelných zdrojů do struktury spotřeby energie v České republice. Nyní je možné se k této problematice kvalifikovaně vrátit s poznatky z prostředí české energetiky.

Klíčová slova: obnovitelné zdroje energie, energetika

1. Úvod

Česká republika se zavázala zvýšit podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny na 8 % do roku 2010, a na 20 % do roku 2030.

Využívání obnovitelných zdrojů energie (OZE) je prioritou energetické koncepce EU, kde panuje oprávněná obava z rostoucí závislosti na dovozu energetických surovin. V roce 2030 by to mělo být 70 % a to již představuje vážné ohrožení bezpečnosti a spolehlivosti dodávek energie v Evropě. Dovozní závislost České republiky se v témže roce odhaduje na 60 %, ovšem již dnes je závislost na dovozu ropy, zemního plynu a jaderného paliva prakticky stoprocentní.

V roce 2010 je očekávána hrubá spotřeba elektrické energie v ČR na úrovni cca 7 GW_r. Závazek osmi procent znamená, že bude nutné vyrobit z obnovitelných zdrojů 560 MW_r elektřiny. Rovněž byl na základě analýzy potenciálu OZE kvantifikován jejich cílový podíl na tuzemské spotřebě primárních energetických zdrojů: 6,8 % v roce 2010.

Parlament České republiky přijal počátkem letošního roku Zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů a deklaroval, že tak činí v zájmu ochrany klimatu a životního prostředí. Účelem zákona je (podle § 1)

- podpora využití obnovitelných zdrojů energie
- zvyšování podílu OZE na spotřebě primárních energetických zdrojů
- šetrné využívání přírodních zdrojů pro trvale udržitelný rozvoj společnosti
- dosažení cíle 8 % elektřiny z OZE v roce 2010

Podle zákona jsou provozovatelé distribučních soustav povinni vykupovat veškerou elektřinu z obnovitelných zdrojů, které jsou podporovány každoročně stanovenou zvýhodněnou výkupní cenou, stanovenou Energetickým regulačním úřadem tak, aby garantovala patnáctiletou návratnost investic.

Pro rok 2005 byly cenovým rozhodnutím ERÚ stanoveny výkupní ceny elektřiny (orientačně) takto [Kč/MWh]:

malé vodní elektrárny	1600 – 2500
větrné elektrárny	2600 – 3020
spalování biomasy	2520
spalování bioplynu	2420
fotovoltaická elektřina	6040
kombinované spalování	500 – 900

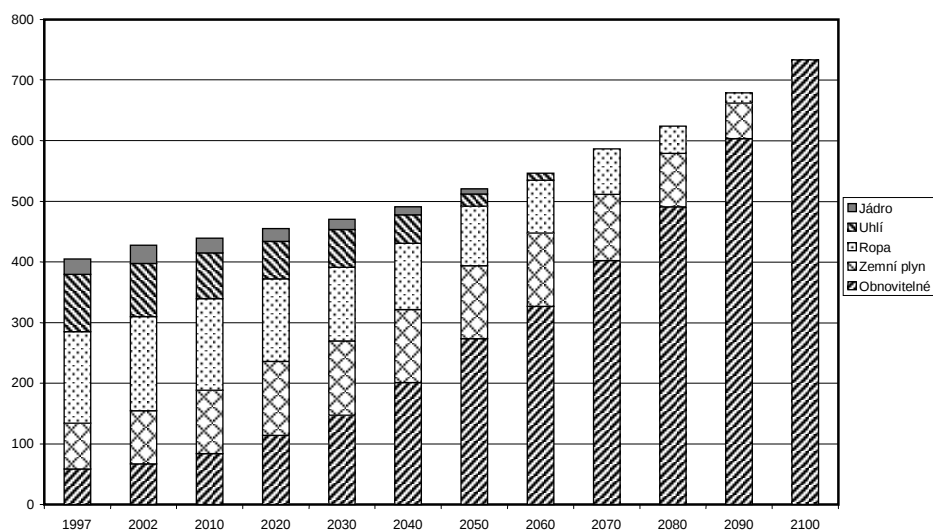
Státní dotace elektřiny z obnovitelných zdrojů, navíc s garancí patnáctiletého trvání, nepochybně posílí zájem investorů o výstavbu nových zdrojů. Prvořadou otázkou je, zda bude zvolená ekonomická motivace dostatečná pro dosažení vyhlášených cílů. V tomto případě nejde pouze o potřebnou výši investic, ale záleží také na reálných (a proměnlivých) přírodních podmínkách. Podle výpočtů pracovníků ERÚ bude při osmiprocentním podílu OZE a letošních garantovaných cenách potřebná celková roční dotace ve výši cca 8 mld. Kč. V této souvislosti se vnučuje zamyšlení nad tím, k jakému účelu by měly být použity státní dotace. Zda k zavedení nové, progresivní a efektivní technologie, nebo k dlouhodobé podpoře technologií příliš nákladných.

Problematika využívání OZE je poměrně nová, přinejmenším zamýšleným rozsahem a není možné jednoduše převzít poznatky a zkušenosti odjinud. Velmi dobré výsledky z kogenerace v severských zemích nelze zopakovat u nás, kde je průměrná roční teplota zhruba o 10 °C vyšší. Pozoruhodnou výrobu elektřiny z větru na západním pobřeží Evropy a Ameriky nemůžeme uplatnit ve střední Evropě, kde prostě tolik nefouká. Využívání obnovitelných zdrojů vyžaduje vždy respektování místních přírodních podmínek a přizpůsobení se jim.

2. Role obnovitelných zdrojů

Od obnovitelných zdrojů energie se očekává významný příspěvek do struktury celkové spotřeby primárních zdrojů (se zdůrazněním nevyčerpatelnosti) a snížené environmentální zátěže. V prvním případě je nutno se ptát, jak velký ten příspěvek může být a jaká bude cena za něj, ve druhém je zapotřebí ujasnit si negativní vlivy na životní prostředí a poté je kvantifikovat. Po desetiletích světové soutěže mezi dobrem a zlem přišla éra udržitelného rozvoje. Jednou z jejích hlavních kapitol je zajištění dostatku energie, samozřejmě „čisté“ a obnovitelné zdroje se nabízejí jako nejlepší řešení. Éra udržitelného rozvoje zatím netrvá dlouho, nachází se ve fázi počátečního nadšení. Proto jsou možnosti obnovitelných zdrojů často přeceňovány a to nejen laickou veřejností.

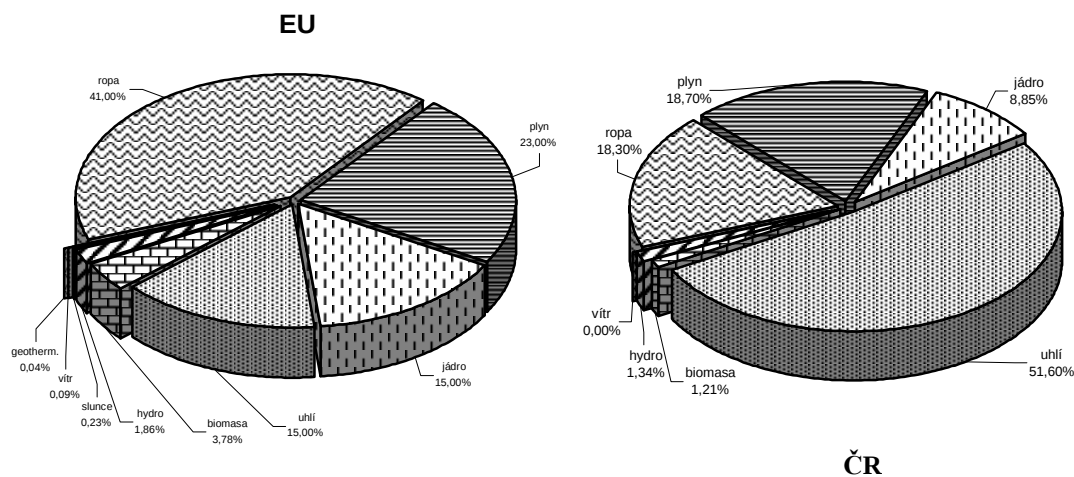
Krásnou a optimistickou vizí energeticky bezproblémové budoucnosti lidstva předkládá v [4] Howard Geller. Koncem tohoto století bude veškerá spotřeba energie kryta z obnovitelných zdrojů a předpovídaný vývoj uvádí graf na Obr. 1.



Obr. 1 Vývoj světové spotřeby

Tyto a mnoho dalších příkladů poskytují obnovitelným zdrojům energie medvědí službu. Slibují nesplnitelné a dříve nebo později se dostaví deziluze s nedobrymi následky. Role obnovitelných zdrojů nespočívá v záchraně lidstva, nýbrž v přispění jistým a mj. geograficky odlišným dílem ke krytí spotřeby energie. Základní myšlenkou vždy bude racionální a efektivní využívání všech dostupných zdrojů energie.

Současné postavení obnovitelných zdrojů ve struktuře spotřeby energie uvádí pro země Evropské unie a pro Českou republiku Obr. 2.



Obr. 2 Struktura primárních zdrojů [5, 1]

V zemích EU představuje ten kousek koláče zhruba 6 %, zatímco u nás doma pouze cca 2,6 %. To je dobrá zpráva, neboť říká, že je reálné současný stav zlepšit. Reálné je uvažovat o využívání energie slunce, vody, větru a biomasy a je zřejmé, že první tři zdroje vedou k produkci neskladovatelné elektřiny, zatímco třetí představuje palivo, které lze skladovat a využívat k výrobě elektřiny i tepla podle potřeby. Největší slabinou energetiky je minimální schopnost akumulace vyrobené energie.

3. Koeficient ročního využití

Při hodnocení efektivity každého energetického zdroje hraje významnou roli skutečnost, do jaké míry je v průběhu roku využíván jeho jmenovitý, instalovaný výkon. Vyjadřuje se koeficientem ročního využití instalovaného výkonu k_r , který lze jednoduše stanovit porovnáním skutečného množství vyrobené energie s teoretickým, maximálním množstvím, vyrobeným při celoročním provozu se jmenovitým výkonem. Lze jej vyjádřit

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot 8760}, \quad (1)$$

přičemž W_r vyjadřuje roční množství vyrobené energie (kWh/rok) a P_i je instalovaný výkon (kW). Se znalostí k_r můžeme odhadnout hodnotu průměrného ročního výkonu P_r

$$P_r = k_r \cdot P_i. \quad (2)$$

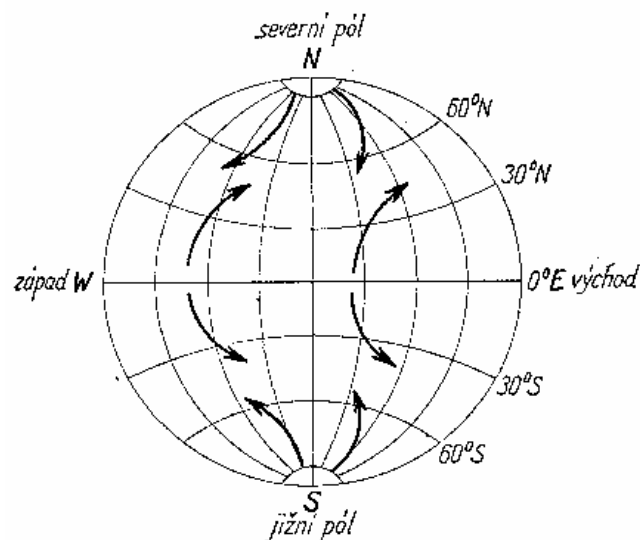
Například při rozhodování mezi uhlím a zemním plynem jako palivem pro elektrárenský blok favorizuje vysoké roční využití uhlí, neboť se v ekonomické kalkulaci dodatečně uplatní jeho nižší cena, kdežto opačný případ vede k zemnímu plynu díky výrazně nižším investičním nákladům.

V případě obnovitelných zdrojů slouží empirická znalost koeficientu ročního využití k přibližnému určení roční produkce pro konkrétní instalovaný výkon. Disponibilita slunce a větru má náhodný charakter, což samo o sobě představuje značný technický problém a ze samotné podstaty plyne, že koeficient ročního využití nemůže být příliš vysoký. Tuto problematiku lze nejlépe vysvětlit na příkladu větrných elektráren.

4. Větrné elektrárny

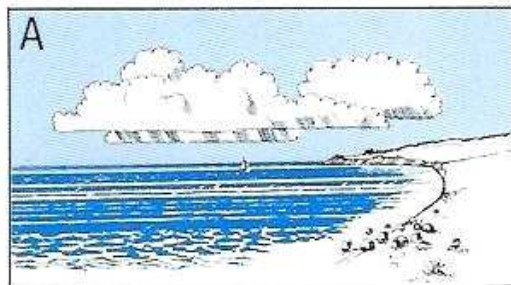
Větrná energetika se v posledních letech rozvíjí v Evropě velice dynamicky. V roce 2002 byl celkový instalovaný výkon větrných elektráren v Německu zhruba 12 000 MW, ve Španělsku více než 5000 MW, v Dánsku téměř 3000 MW a v Evropě celkem 23 832 MW [6, 7]. Jsou to fascinující čísla, která svádí k následování i v České republice. Jenže to tak jednoduché není.

Zeměkoule je slunečním zářením ohřívána nerovnoměrně. Největší teplota je na rovníku a směrem k pólům klesá. Teplotní rozdíly a jim odpovídající rozdíly hustoty vzduchu narušují rovnováhu, hydrostatické tlaky se vyrovnávají prouděním a vzniká vítr. Při zemi proudí od pólů k rovníku, kde se otáčí vzhůru a v horních vrstvách proudí zpět k pólům. Díky zemské rotaci se v přízemní vrstvě stáčí jak ukazuje obr. 3, a proto na pevnině převládají západní větry a nejvhodnější lokality pro umístění větrných elektráren se nacházejí vždy na západním pobřeží kontinentů.

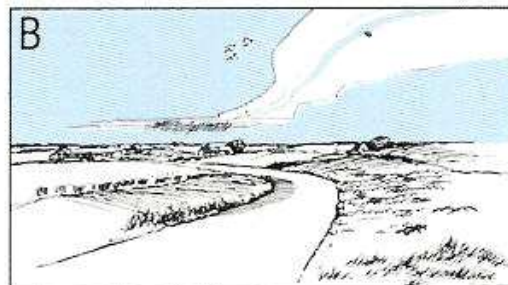


Obr. 3 Stáčení větru vlivem zemské rotace [8]

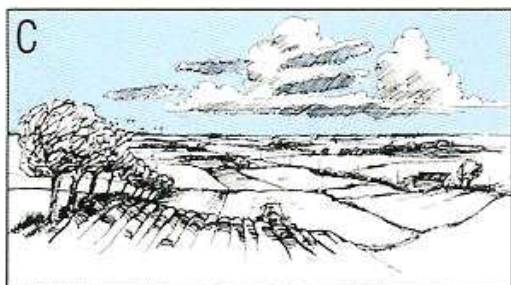
Proto jsou nejlepší podmínky pro využívání energie větru na západním pobřeží kontinentu, kde jsou větry stálé a silné. Dále do vnitrozemí síla větru slábne, jeho směr se mění podle terénu a jeho využitelný potenciál klesá. Dánské zkušenosti vedly k vytvoření čtyř kategorií krajiny s rozdílným energetickým potenciálem, jak ukazuje Obr. 4.



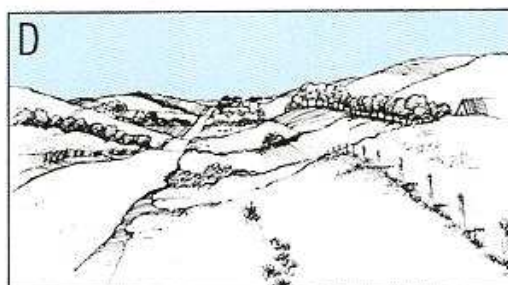
A: Otevřené moře, ploché pobřeží. Rychlost větru je neomezena. Energetický potenciál: 100%



B: Plochá krajina bez lesů a jiných překážek. Rychlost větru je mírně snížena. Energetický potenciál: 70%



C: Plochá a mírně kopcovitá krajina s vegetací, farmami a osídlením. Energetický potenciál: 50%



D: Kopcovitý terén s lesy a jinou vegetací, hustě osídlený. Energetický potenciál: 30%

Obr. 4 Větrný potenciál krajiny [9]

Česká krajina patří převážně do kategorie D a možnosti využití energie větrné tedy nebudou příliš slibné. Samozřejmě existují vhodnější lokality, zejména na hřebenech Krušných hor. Tam také míří dosud největší projekt, který má za 13,3 mld. Kč vybudovat větrnou farmu s téměř 200 větrnými motory o celkovém instalovaném výkonu 325 MW. Investory této gigantické akce jsou společnosti Proventi a Virtual Utility, které očekávají koeficient ročního využití kolem 0,32. Zda se toto velmi optimistické očekávání potvrdí se ukáže po létech, nebo také vůbec ne. Environmentalisté jsou proti výstavbě. Zkušenosti z provozu demonstrační větrné elektrárny EWT 315 v Krušných horách potvrzují roční využití cca 0,11 a podle údajů IEA bylo v roce 2000 dosaženo průměrných hodnot v Dánsku 0,18 a v Německu 17,5 %.

V nedávno vydané publikace [10], věnované možnostem uplatnění OZE v České republice, je odhadnut realizovatelný větrný potenciál takto: „Na území České republiky je pravděpodobný počet velkých větrných elektráren 900 – 1100, pravděpodobný instalovaný celkový výkon 570 – 680 MW a očekávaná roční výroba 1250 – 1550 GWh.“ Tyto údaje ukazují, že odhad vychází z předpokládaného ročního využití $k_r = 25 - 26 \%$, což je podstatně víc než v přímořských zemích a proto velmi nepravděpodobné.

5. Vodní elektrárny

Nejvýznamnějším zdrojem energie z obnovitelných zdrojů jsou dnes vodní elektrárny. Největší výkon je soustředěn na vltavské kaskádě s celkovým instalovaným výkonem 706 MW. V průměrném vodním roce činí produkce těchto velkých vodních elektráren 156,4 MW_r, což představuje roční využití instalovaného výkonu cca $k_r = 0,22$. Významnou produkci 47 MW_r poskytují přečerpávací vodní elektrárny, jedná se však o akumulaci energie a zahrnovat je do kategorie vodních elektráren není opodstatněné.

Jiná situace je v oblasti instalovaných výkonů pod 10 MW, tzv. malých vodních elektráren (MVE). Je instalováno celkem 1350 jednotek a jejich produkce činí zhruba 77 MW_r. V [10] je uveden přehled 119 zřejmě největších MVE s celkovým instalovaným výkonem 90 MW a roční produkcí 35 MW_r, čemuž odpovídá $k_r = 0,39$. Možné zvýšení produkce je limitováno odhadovaným využitelným hydroenergetickým potenciálem cca 170 MW_r. Podle některých prognóz by se měla výroba elektřiny z MVE zvýšit do roku 2010 na 130 MW_r. Při $k_r = 0,39$ by to vyžadovalo zvýšit instalovaný výkon na 340 MW a protože již lze uvažovat pouze s využitím malých vodních toků, kde průměrný instalovaný výkon nepřevyší 200 kW, jednalo by se nejméně o 800 nových jednotek.

Malé možnosti nabízí jezy, které dosud nejsou k výrobě elektřiny využívány a sem pravděpodobně patří i dva, v současné době hodně diskutované, nové jezy na Labi. Na jeho dolním toku každý jez se vzdutím 2 m představuje roční produkci 6 000 MWh (tj. 0,7 MW_r) s minimálními náklady na strojní vybavení.

Současný podíl vodních elektráren na celkové spotřebě elektřiny v České republice představuje necelá 3,5 %. V uplynulém roce z důvodu extrémně suchého roku a oprav souvisejících s likvidací povodní v roce 2002 klesl tento podíl na 2,0 %.

6. Solární energie

Přímá transformace slunečního záření na jinou, účelně využitelnou formu energie se jeví jako přirozené a jednoduché řešení. Termální a fotovoltaické systémy jsou

k dispozici, a tak musíme pouze vzít na vědomí, že naše země nepatří k extrémně prosluněným a že nejvíce slunečního záření je k dispozici v létě, kdy je potřeba tepla minimální a den nejdelší. Necháme stranou solární ohřev vody, který má převážně individuální význam, byť v kvalitním provedení pozoruhodný a zaměříme se na fotovoltaiku.

Na VŠB-Technické univerzitě v Ostravě je provozována dosud největší fotovoltaická elektrárna v České republice. Je zde nainstalováno 200 m² solárních panelů s optimální orientací a celkovým jmenovitým výkonem 20 kW. Je zajištěno kvalitní vybavení regulační a měřicí technikou, odborně zdatný personál včetně ostrahy celého systému a celkové náklady dosáhly částky 8,5 mil. Kč. V roce 2003 systém vyprodukoval do sítě 20 MWh.

Průměrný roční výkon představuje 2,28 kW a tomu odpovídá roční využití instalovaného výkonu $k_r = 0,114$, průměrný roční jednotkový výkon, byl 11,4 W/m². Při předpokládané životnosti elektrárny 20 let a odhadu celkových nákladů na 10 mil. Kč bude výrobní cena elektřiny 25 Kč/kWh.

7. Energie z biomasy

Zatímco v případě energetického využívání slunce a větru hraje významnou roli počasí a nutnost vyráběnou elektřinu okamžitě spotřebovat, což klade zvýšené nároky na regulaci sítě, disponuje bioenergetika snadnou a přirozenou možností akumulace energie skladováním paliva. Závislost na počasí a klimatických podmínkách existuje také, je však méně výrazná a projevuje se například kolísáním hektarových výnosů v případě pěstovaných energetických plodin. Jak již bylo řečeno, nepatří Česká republika k zemím s vysokým potenciálem vodní, větrné, ani slunečné energie. Lépe je tomu v případě biomasy.

Pro energetické využívání biomasy je k dispozici několik technických řešení, k dispozici je dřevo, pěstované energetické plodiny a nepochybně sem patří také komunální odpady. Pěstování energetických plodin představuje nový trend, umožňující využít ladem ležící zemědělskou půdu a nabízející nové zemědělské aktivity s využitím stávajících zařízení a technologií.

Nejjednodušším řešením je využití biopaliva pro vytápění. Zde lze zaznamenat pozoruhodný rozvoj. Roste zájem o individuální vytápění, budují se systémy centrálního zásobování teplem. Pozoruhodný je na příklad dlouhodobý zájem o krbová kamna pro individuální vytápění. Tři největší domácí výrobci produkují ročně zhruba 73 tisíc kamen, z 21 toho tisíc se prodá na českém trhu. Při průměrném jmenovitém výkonu 7 kW to ročně představuje nově instalovaný tepelný výkon cca 150 MW. Projevuje se rostoucí zájem o vytápění biomasou, individuální i menší systémy centrálního zásobování teplem.

Náročnějším cílem je výroba kapalných a plyných paliv. V obou případech brání podstatnějšímu rozvoji ekonomická bariéra, což je dočasné, neboť rozšiřování produkce snižuje náklady a na druhé straně má růst ceny energie charakter přírodního zákona. Pravděpodobně racionálnější bude získávat z biomasy kapalná paliva (metylester řepkového oleje, etanol), neboť se jedná o náhradu ropných produktů a k dispozici jsou ověřené a zvládnuté technologie. Směrnice EU v březnu 2003 ukládá členským zemím učinit taková opatření, aby byl podíl biopaliv na motorových palivech 2% v roce 2005 s dalším růstem o 0,75% ročně. V roce 2010 by to mělo být 5,75%. Podle propočtů by mělo být v České republice přidáváno do benzinů a nafty 3,5 mil. hektolitrů etanolu v roce 2006. Takový program si vyžádá téměř milion tun obilí a

zhruba čtvrt milionu hektarů orné půdy. Hovoří se v této souvislosti o výstavbě šesti lihovarů.

Zplyňování biomasy je teprve v začátcích a to navzdory historické zkušenosti s automobily, jezdícími na dřevoplyn během druhé světové války. Změnily se technické a environmentální požadavky a tak se dnes můžeme setkat nanejvýš s více, či méně úspěšnými pilotními projekty. Lokální význam mají systémy, využívající procesu anaerobního kvašení, což neznamená, že v jednotlivých případech nejde o ekonomicky zajímavé řešení, zejména díky státní podpoře výroby zelené elektřiny.

Zplyňování biomasy vede k výrobě energoplynu a jeho použití ve spalovacích motorech, turbínách a palivových člancích, vesměs v kogeneraci a nebude vždy snadné nalézt vhodné uplatnění pro vyráběné teplo. Cesta k nalezení spolehlivého a efektivního řešení bude ještě dlouhá.

Podle údajů Českého statistického úřadu se ročně nabízí k dispozici $13,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dřevní hmoty, cca $2 \cdot 10^6 \text{ t}$ slámy, $1,1 \cdot 10^6 \text{ t}$ řepkové slámy a odhaduje se až $40 \cdot 10^6 \text{ t}$ energetického šťovíku a dalších energetických plodin. Odhadnout energetickou hodnotu takového množství biopaliv je obtížné, orientačně lze hovořit o přibližně 10^5 TJ ročně. Současný stav technologií pro výrobu elektřiny z biomasy charakterizuje Tab. 1.

Tab. 1 Přehled technologií spalování a zplyňování biomasy pro výrobu elektřiny [11]

Technologie	Účinnost	Výkon	Stav vývoje
Parní stroj	10 – 12 %	200-2000 kW	konečné využití
Parní turbína	15 – 40 %	0,5-240 MW	konečné využití
Organický Rankinův cyklus	10 – 12 %	300-1500 kW	připraveno ke komerce
Spalovací motor	27 – 31 %	100-2000 kW	demonstrační jednotky
IGCC	40– 55 %	> 10 MW	demonstrační jednotky
Šroubový parní stroj	10 – 12 %	20-1000 kW	demonstrační jednotky
Stirlingův motor	18 – 22 %	0,5-100 kW	demonstrační jednotky
Mikroturbína	15 – 25 %	5-100 kW	výzkum a vývoj
Palivový článek	25 – 40 %	20-2000kW	výzkum a vývoj

Rozvoj technologií pro výrobu elektřiny je dosud v počátcích. Jediný spolehlivě zvládnutý systém „spalování + parní cyklus“ není schopen, díky omezení teploty přehřáté páry, dosáhnout v případě malých výkonů vyšší účinnosti, než cca 20 %. Zpracované studie dokládají pro výkony 1 – 2 MWe měrnou investiční náročnost cca 40 – 50 tis. Kč/kW a při výkupní ceně elektřiny 2,50 Kč/kWh návratnost do 5 – 6 let. Mají-li být jako palivo použity pěstované energetické plodiny (energetický šťovík), je nutno počítat s 0,6 – 1,0 ha zemědělské půdy na jeden instalovaný kWe. Přesto si takové systémy zaslouží pozornost a státní podporu, neboť nejenže přispívají svým dílem ke krytí spotřeby elektřiny, ale také pomáhají řešit vážné sociální problémy venkova.

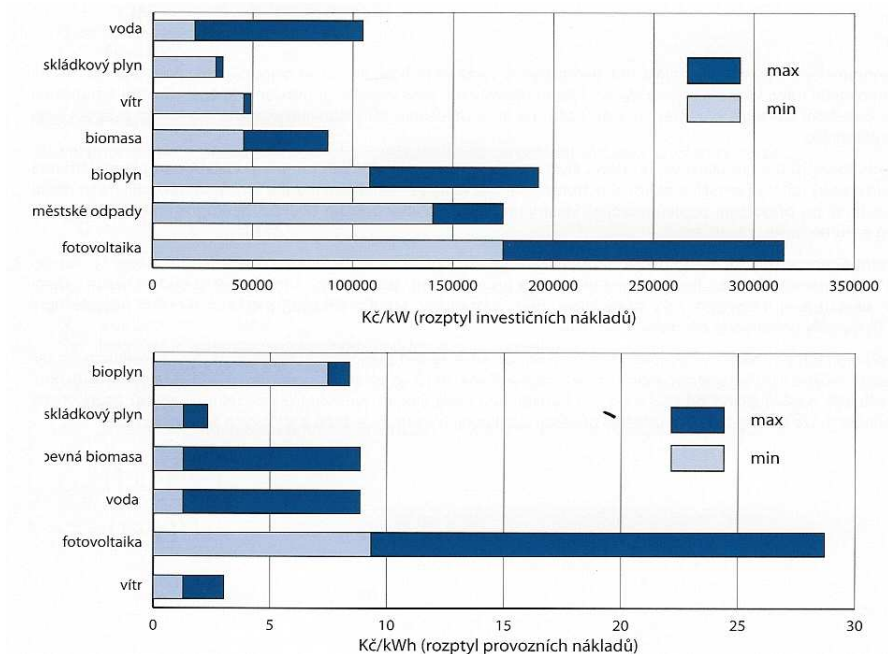
Dosažení 8% podílu obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny bude vyžadovat zásadní posílení role biomasy. Při instalaci 800 MW ve větrných elektrárnách a plném využívání vodních elektráren zbývá ještě zhruba 200MW_r, které bude muset zajistit bioenergetika. To je produkce srovnatelná se všemi hydroelektrárnami v ČR. V roce 2004 vyrobily české energetické závody 14,24 MW_r elektřiny z biomasy

spoluspalováním v uhelných fluidních kotlech. Toto množství představuje 0,22 % celkové výroby elektřiny v České republice.

Klíčovým problémem dalšího rozvoje je dosud nedostatečná a neúčinná podpora decentralizace energetických zdrojů. Vytvořit energetický systém, v němž budou velké zdroje, zabezpečující stabilitu sítě, vhodně doplňovány menšími decentralizovanými, které dokáží lépe využít lokálních podmínek a vytvoří nové pracovní příležitosti, není snadné, zato je nezbytné. Jen tak lze efektivně podpořit rozvoj obnovitelných zdrojů energie.

8. Náklady na výrobu elektřiny z OZE

Podle zkušeností ze zemí EU (2000) byly v [10] zpracovány grafy, vymezující rozsah investičních a provozních nákladů pro výrobu elektřiny z vybraných OZE. Rozsah údajů je natolik široký, že zahrnuje i podmínky v České republice.



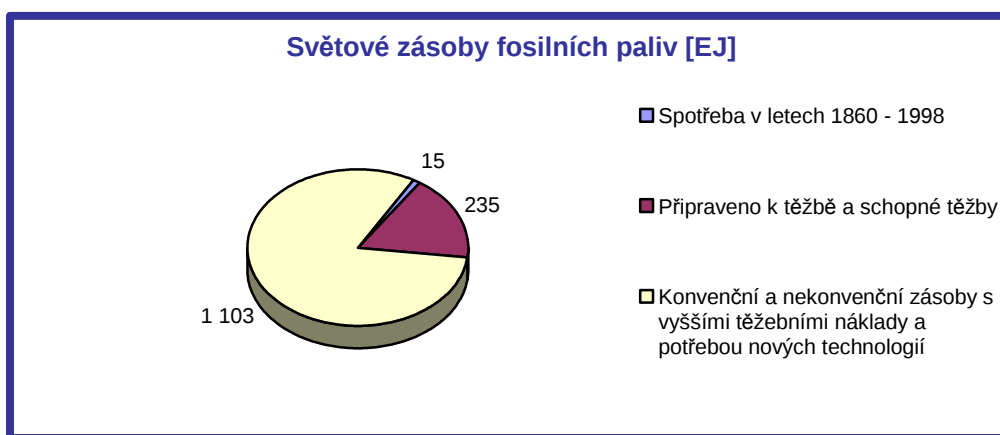
Obr. 5 Investiční a provozní náklady OZE v Evropě

9. Závěr

Budoucí vývoj energetické situace v České republice jistě nebude jednoduchý. Již dnes zde existuje téměř naprostá závislost na dovozu ropy, zemního plynu a jaderného paliva, jediným domácím palivem je uhlí a pouze omezené množství nabízí obnovitelné zdroje. Jejich rozvoj je v současnosti v centru pozornosti politiků a veřejnosti a nemělo by se zapomínat, že je zapotřebí rozvíjet všechny dostupné zdroje energie a neupřednostňovat přitom žádný z nich. O tom, že se tak často neděje, svědčí návrh koncepce české energetiky z dílny MŽP [2], kde je růst podílu OZE na spotřebě primárních zdrojů navrhován takto: 6 % v roce 2010, 20 % v roce 2030 a více než 50 % v roce 2050. Tento trend růstu není příliš originální, neboť dosti věrně kopíruje scénář světové spotřeby H. Gellera [Obr. 1].

Nedostatkem koncepčních variant, byť ne zásadním, je naprosté opomíjení role odpadů, zejména komunálních a živnostenských. Jejich energetické využívání je dobře zvládnuté a může pozoruhodně přispět do bilance spotřeby primárních energetických zdrojů. Zvláště když Evropská komise plánuje postupnou totální likvidaci skládek.

Úvahy a scénáře budoucího vývoje energetiky ovlivňují informace o vyčerpání zdrojů fosilních paliv (mimo uhlí) ještě v průběhu tohoto století. Environmentální argumentace obecně srovnatelnou váhu mít nemůže, neboť vždy lze nalézt technické řešení a problémy se nakonec soustředí do oblasti ekonomiky. Hrozící nedostatek tradičních fosilních paliv však nemusí být až tak alarmující. Z historických zásob veškerých fosilních paliv bylo dosud podle informací z [11] spotřebováno pouze 1,1 %, jedna pětina zbývajících zásob je připravená a schopná těžby a zbývajících část bude vyžadovat zdokonalení technologií a zvýšené těžební náklady.



Obr. 6 Globální zásoby fosilních paliv [12]

Energetickou budoucnost proto není nutné dramatizovat, spíše je zapotřebí racionálně a pragmaticky situaci analyzovat a rozhodnout se pro všestranně nejvhodnější řešení. V něm pak nesmí chybět motivace k hospodárnému využívání energie a k jejím úsporám.

Tato publikace vznikla v souvislosti s činností doktorského centra „Energie z biomasy“, projektu GAČR 101/04/H064.

Literatura

1. MPO ČR : Návrh státní energetické koncepce do roku 2030. Červen 2003.
2. MŽP ČR : Scénář MŽP pro aktualizaci státní energetické koncepce ČR. 2003.
3. „Program snižování emisí a imisí znečišťujících látek do ovzduší Moravskoslezského kraje“, DHV c.r. spol. s r.o. Praha
4. GELLER HOWARD : Energy Revolution, Policies for a Sustainable Future. Island Press, 2003. ISBN 1-55963-964-4.
5. European Commission : European BioEnergy Projects 1999-2002. Directorate-General for Research. Brussels, 2003.

6. NATH Ch., RICHTER B. : Nutzung der Windenergie im Überblick. VGB Powertech, Vol. 83/2003.
7. GIPE P. : The BTM wind report. Renewable Energy World. July – August 2003, Vol. 6, No. 4.
8. KAŠPAR F. : Větrné motory, ESČ, Praha, 1948
9. Nordjyllandsvaerket Windmills. (Firemní literatura).
10. Kolektiv autorů : Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. ČEZ, Praha, 2003
11. HUGUES J. : Wood-fuelled cogeneration, technologies and trends worldwide. Cogeneration & on-site Power Production. July – August 2003.
12. BRADLEY R. L. : Climate Alarmism Reconsidered. IEA, The Institut of Economic Affairs, London, 2003.
13. NOSKIEVIČ P., KAMINSKÝ J.: Reálné možnosti obnovitelných zdrojů v České republice. „Energie kolem nás“, 2/2004, str 38-44
14. NOSKIEVIČ P., KAMINSKÝ J.: Přínos obnovitelných zdrojů k výrobě elektrické energie v ČR. Sborník semináře „Efektivní energetika“, VŠB-TU Ostrava – VEC, 2005. ISBN 80-248-0793-9

S u m m a r y

Referring to information from abroad, the authors published in 1999 an extensive report on potential significance of renewable energy resources concerning the energy mix in the Czech Republic. Six years later, they reviewed the subject by confronting it with the actuality of the Czech scene. It has been demonstrated that an overvaluation of the role of renewable resources still insists as they play a major role in the energy general concept of the Government. In view of the fact that there have been no dramatic signs for depletion of fossil fuels on any greater scale, there is no need for dramatic scenarios of future development. What is needed is a rational, pragmatic solution.

BIOMASA JAKO ZDROJ ENERGIE

BIOMASS AS AN RESOURCE OF ENERGY

Doc.Dr.Ing. Tadeáš Ochodek¹

¹VŠB-TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum

17. listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba

tadeas.ochodek@vsb.cz

Abstrakt: Problematika energetického využití biomasy je dnes velmi živě diskutována. K nalezení reálného pohledu a kvantifikace ekonomických, sociálních a ekologických přínosů jejího energetického využití bude třeba delšího období. Příspěvek si klade za cíl provést obecnou charakteristiku biomasy včetně uvedení dostupných údajů o bilanci její zdrojů.

Klíčová slova: obnovitelné zdroje, emise CO₂, účinnost, ekonomika

1. Úvod

Nepochybně nejvýznamnější událostí české energetiky v poslední době bylo schválení státní energetické koncepce do roku 2030. Česká republika se v ní zavázala zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie (OZE) na výrobě elektřiny na 8 % do roku 2010 a na 15 % ÷ 16 % do roku 2030. Bylo nutné také připravit návrh zákona o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Po dlouhém projednávání a mnoha úpravách byl zákon schválen v březnu letošního roku. Jeho přínosem je zejména charakteristika dlouhodobých podmínek pro výkup energie z obnovitelných zdrojů, což umožní realizovat investiční záměry v oblasti využívání OZE.

V evropském měřítku byl dosaženo pozoruhodných výsledků při využívání energie větru, bohužel podmínky v ČR jsou málo vhodné, potenciál vodní energetiky je z podstatné části využit a tak zůstává jedinou příležitostí biomasa v širokém spektru nabídek od dřeva, přes spalitelné odpady až po pěstování energetických plodin. Zde je třeba připomenout, že již klasickým a široce užívaným řešením je výroba paliv pro spalovací motory (etanol, bionafta), která mohou být snadno využita při výrobě elektřiny a tepla. Jde o spolehlivě ověřené technologie, jejichž zásadní slabinou je vysoká cena konečného produktu. Očekávaný růst ceny energie tento nedostatek spolehlivě odstraní.

Jestliže uvažujeme o energetickém využívání biomasy, máme nejčastěji na mysli výrobu elektřiny a nebo tepla, přičemž současná výroba (a spotřeba) tepla a elektřiny je řešením ideálním, neboť poskytuje možnost maximálního využití energie paliva, biomasy.

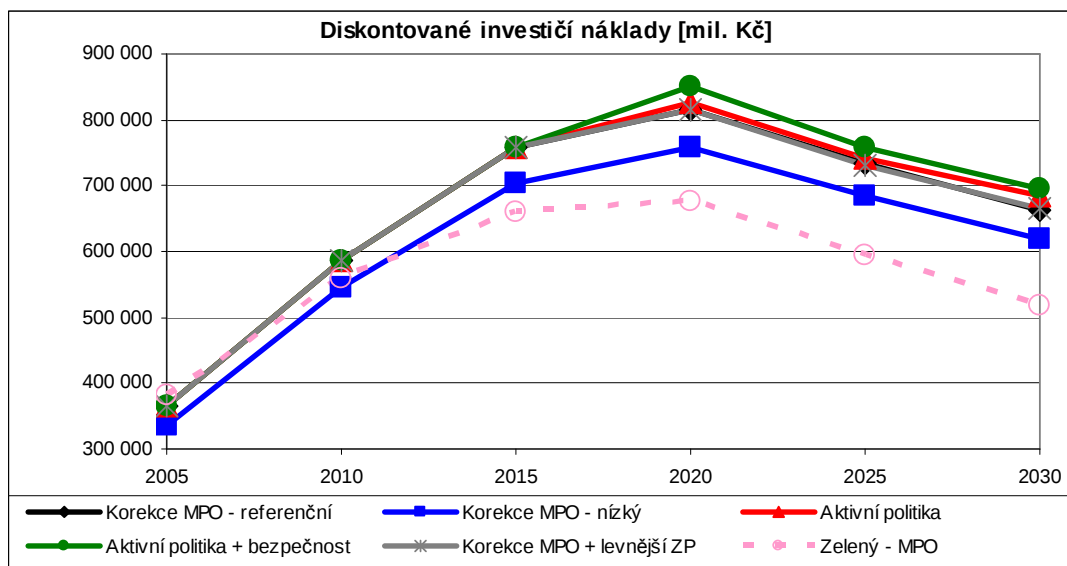
Velmi citlivou oblastí je v současné době zemědělství. Racionalizace zemědělské výroby vede k nárůstu nevyužívaných zemědělských ploch, k úbytku pracovních příležitostí a k zostřování sociálních problémů na venkově. Komplexně pojatá bioenergetika, postavená na pěstování energetických plodin, nabízí možnost přispět k řešení hned dvou citlivých témat z oblastí energetiky a zemědělství.

V roce 2010 je očekávána hrubá spotřeba elektrické energie v ČR na úrovni cca 7 GW_r. Závazek osmi procent znamená, že bude nutné vyrobit z obnovitelných zdrojů 560 MW_r elektřiny.

Uvedená čísla dokládají složitost situace, kdy na jedné straně stojí svaté nadšení a na druhé realizmus. Nepochybně je zapotřebí mít vize, chceme-li něčeho podstatného dosáhnout. Ty vize však musí stát pevně na zemi, musí být realizovatelné.

To, že zvyšování podílu výroby energie z OZE bude také mimořádně investičně náročné, ukazují průběhy diskontovaných investičních nákladů obr. 1. Ke schválení byly v roce 2004 vládě ČR předloženy dva návrhy státní energetické koncepce. První návrh předkládalo Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO) a druhý návrh předkládalo Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Na svém zasedání v březnu roku 2003 schválila vláda návrh Státní energetické koncepce předložený MPO. Analýzu obou scénářů jsem provedl ve své habilitační práci [11]. Zde bych provedl pouze srovnání investiční náročnosti obou scénářů. Z porovnání jednotlivých průběhů diskontovaných investičních scénářů 6 je zřejmé, že preferovaný scénář Ministerstva životního prostředí (MŽP), scénář označený jako aktivní politika, je mimořádně investičně náročný. V roce 2020, kdy dochází u všech scénářů k investiční špičce, jsou investiční náklady scénáře MŽP ve srovnání se scénářem Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO), scénář označený jako zelený-MPO, o 20 % ÷ 25 %, vyšší, t.j. investiční náklady jsou vyšší o cca 160 mld. Kč. Hlavní příčinou rozdílu v investičních nákladech jsou vyšší měrné investiční náklady na decentralizované zdroje u scénáře MŽP oproti scénáři MPO a přísnější požadavky na ochranu životního prostředí. Zde je nutno podotknout, že plnění environmentálních požadavků je nezbytností, cílem však je vysoká efektivita. Pořadí kritérií je následující:

1. ekonomika,
2. ochrana životního prostředí,
3. spolehlivost dodávky.



OBR. 1 SROVNÁNÍ DISKONTOVANÝCH INVESTIČNÍCH NÁKLADŮ JEDNOTLIVÝCH SCÉNÁŘŮ

Strmý nárůst investičních nákladů musí ve svých důsledcích znamenat rovněž strmý nárůst ceny energie. Z okolních států je tento strmý nárůst ceny elektřiny nejvíce patrný u Německa. Státem podporovaná intenzivní výstavba větrných elektráren (na konci roku 2003 byl instalovaný výkon větrných elektráren v Německu 14 tis. MW) ve svých důsledcích nutí výrobce energie držet v pohotovosti cca 60 % tohoto výkonu ve zdrojích spalujících fosilní paliva. V opačném případě by mohlo dojít při absenci větru - 100 -

k narušení spolehlivosti el. sítě. Cena tzv. “silové” elektřiny“ (cena elektřiny u výrobce), která tvoří cca 35 % ceny elektřiny odebírané koncovým zákazníkem, vzrostla v roce 2004 o 30 % a pro letošní rok je ohlášeno další zvýšení této ceny minimálně o 20 %.

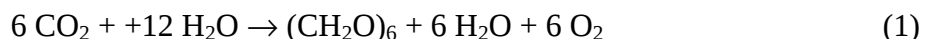
Ve státní energetické koncepci je v podmínkách ČR hlavní podíl budoucího nárůstu energie z OZE přisuzován využití biomasy (cca 70 % nárůstu).

2. Vznik biomasy, druhy a vlastnosti biomasy, bilance zdrojů biomasy.

Při studiu literatury je možno narazit na mnoho definici biomasy. Velmi inspirativní definici vyslovil nositel Nobelovy ceny za fyziku v roce 1965 pan Richard P. Feynman.

Citát: Stromy vznikly převážně ze vzduchu. Když je spálíme vrátí se zpátky do vzduchu, přičemž se uvolní sálavé teplo, což je sálavé teplo Slunce, kterého bylo třeba, aby se vzduch přeměnil v dřevo stromů; trocha popela je pozůstatek té části stromů, která neměla původ ve vzduchu ale v zemi (Richard P. Feynman, Kniha: Radost z poznání, přednáška „Co jsou přírodní jevy“, str. 246).

Biomasa vzniká vlivem fotosyntézy, která je nejstarší biochemickou reakcí naší planety. Při fotosyntéze vzniká z oxidu uhličitého a vody za spolupůsobení enzymů, chlorofylu a světelné energie velké množství organických látek. Při fotochemických reakcích se redukuje oxid uhličitý na cukry a voda se oxiduje za vzniku molekulového kyslíku. I když je mechanismus fotosyntézy složitější, je možné tuto biochemickou reakci za účasti světelné energie a chlorofylu schématicky znázornit následovně:



Za biomasu je ve smyslu nařízení vlády ČR č. 352/2002 Sb. považován rostlinný materiál, který lze použít jako palivo pro účely využití jeho energetického obsahu, pokud pochází ze zemědělství, lesnictví, nebo z potravinářského průmyslu, z výroby surové buničiny a z výroby papíru z buničiny, ze zpracování korku, ze zpracování dřeva s výjimkou dřevního odpadu, který obsahuje halogenované organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, a dřevní odpad pocházející ze stavebnictví. Pro rostlinnou biomasu se používá často pojem fytomasa.

Zákon o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie uvádí následující definici biomasy: Za biomasu se považuje biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětví, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a rovněž biologicky rozložitelná část vytríděného průmyslového a komunálního odpadu.

Zatímco v případě energetického využívání slunce a větru hraje významnou roli počasí a nutnost vyráběnou elektřinu okamžitě spotřebovat, což klade zvýšené nároky na regulaci sítě, disponuje bioenergetika snadnou a přirozenou možností akumulace energie skladováním paliva. Závislost na počasí a klimatických podmínkách existuje také, je však méně výrazná a projevuje se například kolísáním hektarových výnosů v případě pěstovaných energetických plodin.

2.1. Druhy a vlastností biomasy

Nejčastěji energeticky využívanou biomasou jsou vedlejší produkty ze zemědělské výroby z lesnictví, z lesní těžby a ze zpracování dřeva. Obnovitelnou energii je možno získat i z komunálních bioodpadů, zejména z odpadů z parků a zahrad, kuchyňských odpadů, separovaných domovních odpadů a z odpadů dřevěných odpadů. V současné době se pro energetické využití stále více uplatňuje travní fytomasa vznikající při údržbě krajiny. S ohledem na omezené možnosti využívání výše uvedených druhů

biomasy se připravuje cílené pěstování energetických rostlin na půdě nepotřebné k produkci potravin. Energetické rostliny jsou jednak energetické byliny, případně energetické trávy a rychle rostoucí dřeviny. Výčet jednoletých, dvouletých a víceletých plodin, které lze pěstovat na půdě uváděné do klidu (např. pro energetické využití) je uveden v [9].

Biopaliva se připravují jako pevná, kapalná a plynná:

- a) Pevná biopaliva na bázi dřevní biomasy
 - dřevní štěpka (včetně zelené štěpky),
 - piliny,
 - polínkové dřevo,
 - brikety,
 - pelety a granule,
 - dřevěné uhlí,
 - produkty částečné pyrolýzy.
- b) Pevná paliva na bázi energetických bylin a stébelnin
 - řezanka,
 - balíky nízkotlaké a vysokotlaké standardní a obří,
 - brikety,
 - pelety a granule.
- c) Kapalná biopaliva
 - extrahované rostlinné oleje,
 - bionafta (esterifikované oleje),
 - bioetanol,
 - produkty rychlé pyrolýzy.
- d) Plynná paliva
 - bioplyn,
 - skládkový plyn,
 - kalový plyn,
 - biovodík,
 - generátorový plyn (např. dřevoplyn).

Pro úplnost je nutno ještě uvést odpady, které připouští Zákon o podpoře výroby elektřiny z biomasy k začlenění jako biomasa (biologicky rozložitelná část vytríděného průmyslového a komunálního odpadu).

Vlastností biomasy

Složení biomasy je víceméně konstantní (s výjimkou odpadů), s výjimkou obsahu vody a byť popelovina obsahuje rovněž nejrozličnější látky, je její podíl velice malý (cca 1 % v původním palivu).

Při bilancích spalovacího procesu, jimiž se stanoví množství spalovacího vzduchu, množství a složení vzniklých spalín, případně teoretická spalovací teplota, se vychází ze složení paliva. To je možné vyjádřit hrubým rozbořem, při němž se stanoví obsah hořlaviny h , vody (W) a popeloviny (A) a platí

$$h + W + A = 1$$

Při známém elementárním složení hořlaviny lze pak vyjádřit složení paliva

$$C + H + O + N + W + A = 1$$

Jednotlivé značky vyjadřují hmotový podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, vody a popeloviny v palivu (neuvažuje se zde s přítomností síry) a je nutno upozornit, že při zadaném složení hořlaviny

$$C^h + H^h + O^h + N^h = 1$$

nebo sušiny (což je palivo teoreticky neobsahující žádnou vodu)

$$C^d + H^d + O^d + N^d + A^d = 1$$

se obsah jednotlivé složky v různých vzorcích paliva liší. Většina spalovacích výpočtů se provádí ze složení paliva.

Přepočty jsou snadné, je-li na příklad znám obsah uhlíku v hořlavině a je znám obsah vody a popeloviny v palivu, pak je

$$C = C^h \cdot (1 - W - A).$$

Energetická hodnota paliva se vyjadřuje výhřevností, která udává množství energie(tepla), které se získá dokonalým spálením jeho hmotnostní nebo objemové jednotky. Spalováním uvolněné teplo je obsaženo ve spalínách jako fyzické teplo spalín. Protože však spaliny vždy obsahují vodní páru, vzniklou spálením vodíku hořlaviny a odpařením vody z paliva, obsahují navíc výparné teplo, spotřebované k odpaření vody. Toto teplo je možné kondenzací uvolnit a tak zvýšit energetický zisk. Laboratorně se určuje výhřevnost paliva v kalorimetru. Jednotkové množství paliva se spálí, vzniklé spaliny se ochladí na původní teplotu okolí, takže vodní pára zkondenzuje a získané množství tepla představuje spalné teplo Q_n . V reálných podmínkách kotlů a jiných průmyslových ohnišť naopak odcházejí spaliny do komína s teplotou vyšší než je rosný bod, ke kondenzaci vodní páry nedochází a maximálně možný energetický zisk je označován jako výhřevnost Q_i . Je třeba doplnit, že tento maximálně možný zisk je chápán jako ochlazení spalín na původní teplotu (jako při určení spalného tepla), při čemž ale nedojde ke kondenzaci vodní páry. Spalné teplo je tedy o výparné teplo příslušného množství vody větší než výhřevnost. Za podmínek normálního stavu je výparné teplo vody 2453,5 kJ.kg⁻¹, takže platí

$$Q_n = Q_i + (W + 9 H) \cdot 2453,5 \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]}$$

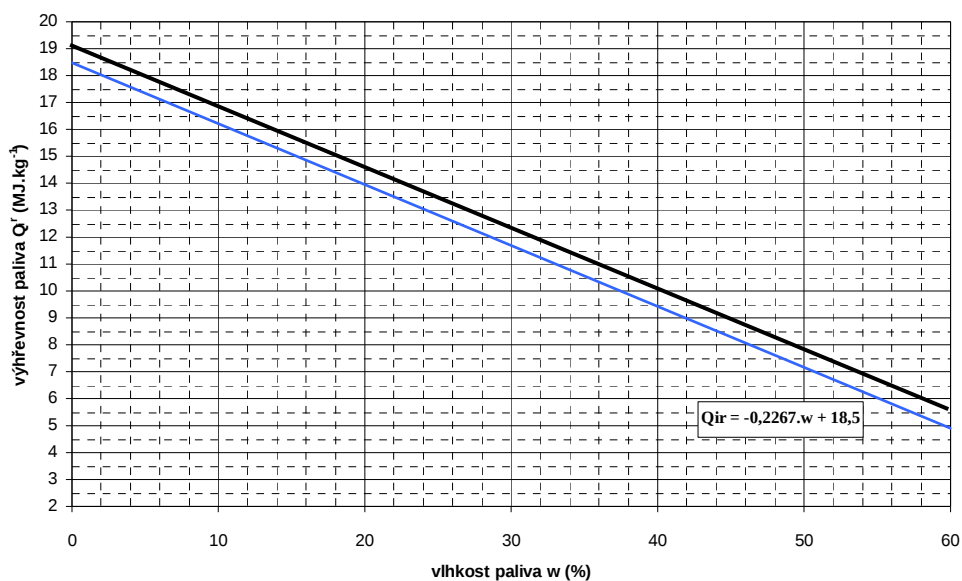
První člen závorky vyjadřuje množství vody z paliva, druhý množství vody vzniklé spálením vodíku. Oba tyto členy je nutno vyjádřit v rozměru kg vody na 1 kg paliva.

Původní palivo	Po vysušení
0,01 kg popeloviny	0,02 kg popeloviny
0,5 kg vody	0,2 kg vody
0,49 kg hořlaviny	0,78 kg hořlaviny
Celkem 1 kg	Celkem 1 kg

OBR. 2 SLOŽENÍ BIOMASY PŘED A PO VYSUŠENÍ

Hořlavina představuje aktivní složku, neboť je nositelem chemicky vázané energie a je tvořena zejména uhlíkem a vodíkem. Z praktických důvodů se do hořlaviny zahrnuje také dusík a kyslík. Popelovina a voda jsou složky pasivní, nejsou nositeli energie, naopak energetickou hodnotu paliva snižují. Na rozdíl od popeloviny, kterou nelze jednoduchým způsobem ovlivnit, obsah vody lze poměrně snadno snížit sušením. Vysušení biomasy má za následek zvýšení její výhřevnosti, což názorně ukazuje obr. 2 a obr. 3. Zvýšení obsahu hořlaviny vysušením paliva zvýší ve stejném poměru jeho výhřevnost. Palivo s nižším obsahem vody a vyšší výhřevností se lépe spaluje, což má malý význam ekonomický, ale velký význam ekologický (při spalování vzniká méně škodlivin).

Významným parametrem všech tuhých paliv je obsah prchavé hořlaviny (V^{daf}). Tímto názvem jsou označovány hořlavé plyny, které se z paliva uvolňují při jeho zahřátí. Čím více prchavé hořlaviny palivo obsahuje, tím snáze se zapaluje, protože od hořících plynů se odplyněný tuhý zbytek (dřevěné uhlí) zapálí celkem spolehlivě. Obsah prchavé hořlaviny v různých druzích biomasy se pohybuje v rozmezí 70 % ÷ 80 % [5].



OBR. 3 VLIV VLHKOSTI BIOMASY NA JEJÍ VÝHŘEVNOST

Průměrné hodnoty prvkového složení biomasy uvádí tab. 1. Pro názornost je zde uveden rovněž prvkový rozbor energetické plodiny šťovíku Uteuša, který je v současné době nejvíce experimentálně pěstovanou plodinou. Již z několika rozborů těchto plodin je však zřejmé, že jejich složení může být odlišné od standardní dřevní biomasy. Zvýšený obsah chlóru a síry palivu může být příčinou zvýšené tvorby škodlivin. Tuto problematiku bude ještě nutno detailně posoudit při praktických zkouškách při uplatnění různých druhů spalovacích zařízení.

TAB. 1 PRŮMĚRNÉ PRVKOVÉ SLOŽENÍ HOŘLAVINY A VÝHŘEVNOST

Složka hořlaviny [%]	Druh dřevní hmoty			Průměrné složení	Šťovík Uteuša (Rumex)
	Jehličnaté dřevo	Listnaté dřevo	Kůra		
Uhlík	51,0	50,0	51,4	50,8	49,40
Vodík	6,2	6,15	6,1	6,15	5,97
Kyslík	42,2	42,3	42,2	42,55	43,89
Dusík	0,6	0,6	0,3	0,5	0,52
Síra	-	-	-	-	0,22
Chlór v sušině	0,03	0,04			0,11
Popel [%]					
v sušině	1,0	1,0	2,3	1,4	7,29
v palivu	0,7	0,7	0,3	0,9	6,83
Voda [%]					
v palivu	30,0	30,0	35,0	32,0	8,83
Výhřevnost [MJ.kg⁻¹]					
hořlaviny	18,4	18,4	18,4	18,4	18,10
paliva	12,0	12,0	10,8	11,6	15,40

2.2. Bilance zdrojů biomasy

Rozdílnost údajů o množství biomasy, která je dnes k dispozici, ale také zcela odlišná bilance možných zdrojů pro budoucí období, vzbuzuje pochybnosti o serióznosti podkladů, které byly použity pro stanovení cílů v nárůstu podílů obnovitelných zdrojů v celkové spotřebě primárních energetických zdrojů a v nárůstu jejich podílu při výrobě elektřiny předložených v Státní energetické koncepci do roku 2030. Zatímco v [7] je uváděn využitelný potenciál biomasy v roce 2010 ve výši 61,7 PJ, v [3] je počítáno s 146,4 PJ. V roce 2003 bylo energeticky využito 16,4396 PJ energie z biomasy (dle ČSÚ), dle podkladů zahrnujících lokální vytápění dřevem a dřevním odpadem je to 18,614 PJ [3].

Značné rozdíly v představách o potenciálu biomasy pro její energetické využití svědčí o nedostatečných podkladech pro vytvoření seriózní bilance všech její zdrojů. Český statistický úřad ve svém sčítání nezahrnuje využití biopaliv fyzickými osobami, které nepodnikají nebo provozují menší živnosti. Na druhé straně chybí legislativa, která jasně bude definovat co je považováno za biopalivo a za bioenergii. Z tabulek je zřejmé, že k naplnění indikativního cíle Státní energetické koncepce v podílu obnovitelných zdrojích na spotřebě primárních energetických zdrojů a v podílu

elektriny, by např. v roce 2010 znamenalo, že v nejbližším období dojde v oblasti výroby biopaliv k revoluci, kterou si však z technického ale ani z ekonomického hlediska nikdo neumí představit.

TAB. 2 VYUŽITÍ BIOPALIV V ČESKÉ REPUBLICE V ROCE 2003 A PŘEDPOKLAD V ROCE 2010 [3]

Druh biopaliva	2003 [PJ]	2010 [PJ]
dřevo a dřevní odpad dle ČSÚ	0,297	33,1
dřevo a dřevní odpad (lokální vytápění)	6,760	
sláma obilnin a olejin	2,046	15,7
energetické rostliny		63,0
motorová biopaliva	4,420	9,2
bioplyn	1,421	21,0
alternativní paliva	3,670	4,4
celkem	18,614	146,4

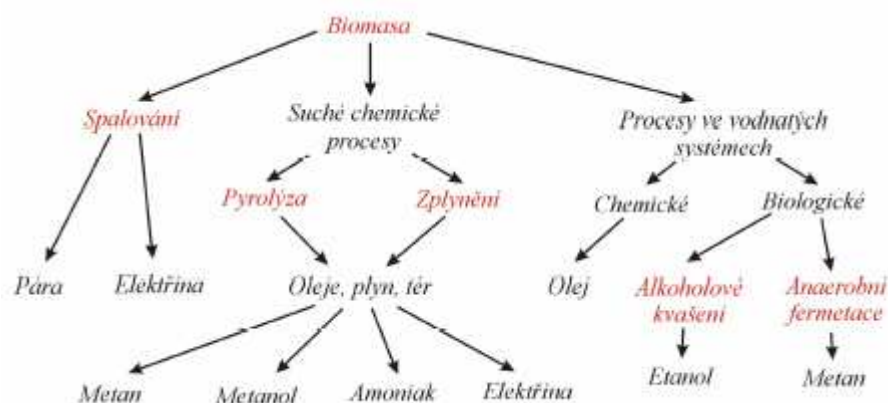
Dle údajů v tab. 2 je například zřejmé, že v roce 2010 by mělo být vyrobeno 63 PJ energie z plantáží energetických rostlin. To odpovídá cca 450 000 ha půdy nepotřebné pro pěstování potravin (plánovaný průměrný výnos je 10 t.ha-1, průměrná výhřevnost 14 GJ.t-1). V současné době existuje cca 1 tisíc ha plantáží energetických rostlin a cca 100 ha rychle rostoucích dřevin (RRD) [3]. Přičemž dle údajů [7] rozloha půdy nepotřebné k potravinářským nebo krmivářským účelům v České republice představuje v současnosti už 465 000 ha orné půdy a 523 000 ha luk a pastvin. Za nedostatečného legislativního zázemí s dlouhodobou garancí stabilních podmínek pro vytvoření konkurenčního prostředí při výrobě biopaliv nelze očekávat podstatný nárůst produkce biopaliv.

2.3. Úprava paliva před jeho využitím

Pro zlepšení průběhu biomasy je nutná její úprava. Nejčastěji se jedná o úpravu velikosti (granulometrii), vlhkosti, atp. Často jsou používány metody briketování nebo peletování. Pro vyšší stupeň využití biomasy se připravují směsi paliv, čímž lze umožnit využití i méně hodnotných druhů biomasy. V případě dřevních odpadů se jedná o odpad kusový, těžební zbytky a kůru, které se drtí, sekají, rozmělnují, třídí, případně suší. K úpravě velikosti slouží štěpovačky, drtiče a jiné rozmělnovače, jejichž úkolem je velikostně upravit částice dřevního odpadu tak, aby byly vhodné pro další využití. Dalším zdrojem upraveného paliva je odpad z výroby, piliny, hobliny, kusový odpad vhodný pro štěpkování, brusný prach apod. Speciální zacházení potřebují zvláštní druhy biomasy jako jsou např. sláma, kaly, popř. tříděný komunální odpad. Pro dosažení uspokojivých spalovacích a emisních charakteristik je nutno biomasu vysušit na vlhkost 15 % ÷ 20 %.

3. Technologie pro energetické využití biomasy

Možnosti procesní přeměny biomasy popisuje obr. 4. Jestliže uvažujeme o energetickém využívání biomasy, máme nejčastěji na mysli výrobu elektřiny nebo tepla, přičemž současná výroba (a spotřeba) tepla a elektřiny je řešením ideálním, neboť poskytuje možnost maximálního využití energie paliva, biomasy [5].

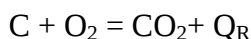


OBR. 4 MOŽNÉ PROCESNÍ PŘEMĚNY BIOMASY

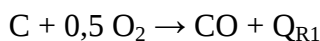
Zde se uplatňuje zejména spalování a zplyňování. Podstatou energetického využívání biomasy je vždy spalovací proces, při němž vznikají oxidací hořlavých složek paliva vzdušným kyslíkem produkty reakce.

Tyto produkty jsou vždy v plynné fázi a mohou být pouze nositeli fyzického tepla, které je ve spalovacím zařízení předáváno pracovní látce k využití, nebo mohou obsahovat navíc i chemickou energii obsaženou v hořlavých plynech s následným spalováním v jiném zařízení. První případ představuje dokonalé spalování, kdy hořlavé složky paliva zreagují na konečný produkt, ve druhém případě se jedná v první fázi o nedokonalé spalování se vznikem energeticky vydatného plynného meziproduktu, který je dokonale spálen ve druhé fázi. V běžné terminologii hovoříme o spalování a zplyňování.

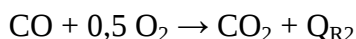
Mechanismus reakce lze ukázat na příkladu spalování uhlíku. Za přítomnosti dostatečného množství kyslíku shoří uhlík podle rovnice



za vzniku oxidu uhličitého, přičemž se uvolní reakční teplo Q_R . Ve skutečnosti probíhá tato reakce ve dvou fázích. První z nich je heterogenní reakce zplyňování uhlíku



po ní následuje homogenní reakce spalování oxidu uhelnatého, kdy vzniká konečný produkt.



Při každé z těchto reakcí se uvolňuje příslušné reakční teplo, přičemž podle Hessova zákona platí, že

$$Q_R = Q_{R1} + Q_{R2}$$

Zplyňovací reakce uhlíku je heterogenní, tzn. že spolu reagují látky v různé fázi, v tomto případě pevné a plynné. Tento fakt je významný z hlediska průběhu spalovacího procesu a možnosti jeho řízení.

Jde o to, že k reakci mezi pevnou a plynnou fází, nebo jednoduše mezi tuhým palivem a vzdušným kyslíkem, může dojít pouze na povrchu pevné fáze. Při dostatečně vysoké spalovací teplotě je pak rychlost reakce dána rychlostí přívodu kyslíku k hořícímu povrchu paliva. Při následné homogenní reakci, kdy jsou oba reagenty v plynné fázi, je promísení obou složek podstatně snazší.

Literatura

1. FLEISCHHANS, J. *Roční využití zdrojů el. energie v ČR v roce 2003*. Odborný časopis Energie kolem nás č. 2/2004, str.30, ISSN 1214-5998
2. GELLER HOWARD. *Energy Revolution, Police for a Sustainable Future*, Island Press, 2003. ISBN 1-55963-964-4.
3. <http://www.biom.cz>
4. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World energy outlook 2000*. Paris, 2000, ISBN 92-64-18513-3.
5. JUCHELKOVÁ, D., KOPPE, K. *Využívání biomasy*. Monografie. ISBN 80-7329-035-9.
6. KLASS, L., D. *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals.*, Academic Press, San Diego 1998, ISBN 0-12410950-0.
7. KOLEKTIV AUTORŮ. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. ČEZ 2003.
8. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR . *Státní energetické koncepce do roku 2030*, březen 2004.
9. NAŘÍZENÍ VLÁDY č. 86/2001 Sb. kterým se stanoví podmínky pro poskytování finanční podpory za uvádění půdy do klidu a finanční kompenzační podpory za uvádění půdy do klidu.
10. NOSKIEVIČ, P., Kaminský, J. *Reálné možnosti obnovitelných zdrojů v ČR.*, Odborný časopis Energie kolem nás č. 2/2004, str.38-44, ISSN 1214-5998.
11. OCHODEK, T. *Spalování uhlí v ohništích malých výkonů*. Habilitační práce, Fakulta strojní a VEC VŠB-TU Ostrava, 2004.

NÁVRH EXPERIMENTU PRO SPALOVÁNÍ ENERGOPLYNU

DESIGN OF THE EXPERIMENT FOR COMBUSTION OF THE BIOGAS

Autor: Ing. Lukáš Pravda

VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav – Odbor Energetického inženýrství
Technická 2896/2, 616 69 Brno
praluk@email.cz

Abstrakt: Článek se zabývá problematikou energoplynu z alternativních paliv, především pak návrhem experimentu pro využití energoplynu jeho spalováním ve spalovací komoře navržené na EÚ – OEI na FSI VUT v Brně. Je zde naznačena výroba energoplynu, definice a jeho možnosti energetické využití. Experiment pro spalování energoplynu je ve fázi návrhu a výroby, proto zde nebylo možné uvést konkrétní naměřené výsledky. Vlastní měření je naplánováno na jaro a léto roku 2005.

Klíčová slova: energoplyn, generátorový plyn, zplyňování, spalování, biomasa

1. Úvod

K tvorbě energoplynu (někdy též tzv. generátorového plynu) dochází při zplyňování za přítomnosti zplyňovacího media (vzduch, kyslík O_2 , vodní pára, kombinace předchozích) a vhodně zvolených reakčních podmínek. Energetický obsah produkovaného energoplynu z biomasy může být různý. Při zplyňování vzduchem je průměrná výhřevnost energoplynu běžně 4 – 6 MJ/m³, dáno přítomností vysokého obsahu vzdušného dusíku při procesu zplyňování – nízkovýhřevný plyn, při zplyňování kyslíkem lze dosáhnout průměrně výhřevnosti 14 – 18 MJ/m³ – středně výhřevný plyn.

Produkovaný energoplyn je úspěšně využíván jako náhradní palivo (např. jako náhrada ZP) v různých technologických procesech (cementárny, vápenky, různé pece) a šetří tak zde základní palivo. Výzkumně se ve světě zkouší využití také v teplárnách s plynovým cyklem, kde plyn slouží k pohonu tepelného motoru – spalovací turbíny nebo spalovacího motoru. Ekonomický a ekologický efekt takovéto technologie je potom nejvyšší a představuje v globálním pohledu největší úspory primárních paliv.

2. Výroba energieplynu a jeho definice

Tepelným působením na biopalivo dochází při teplotách cca do 500 – 600 °C k postupnému uvolňování plynných látek. Tento jev, známý jako pyrolýza, je využíván při zplyňování biopaliv za účelem získat energeticky využitelný plyn. Odplyněný zbytek je dřevěné uhlí – polokoks. Ve druhé fázi, při vlastním zplyňování dochází k reakci polokoksu s produkty pyrolýzy a se vzduchem. Dochází k tepelné rovnováze mezi reakcemi, které spotřebovávají teplo a k reakci teplo produkující. Stav, kdy tato tepla jsou v rovnovážné bilanci a kdy se teplota v reaktoru nemění se nazývá autotermický. Cílem vedení zplyňovacího procesu je dosažení tohoto autotermického stavu. Produktem zplyňování je potom tedy surový energoplyn obsahující hlavně CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , N_2 a vodní páru H_2O , je-li použit vzduch jako zplyňovací činidlo (médium).

Vedle těchto složek jsou v něm ale také obsaženy i další vesměs nežádoucí složky, kterými jsou prach, dehty, alkálie, sloučeniny síry a dusíku, chlorovodík a fluorovodík aj. Energoplyn je tedy možné definovat jako směs výše uvedených složek, je bezbarvý, hořlavý, nízkokalorický plyn, o málo lehčí než vzduch, zapáchající po dehtu, který je v něm ve stopovém množství obsažen. Ve směsi se vzduchem je výbušný (pokud dojde k iniciaci) v rozmezí 19,27 – 49,95 %_{obj.}. Je jedovatý v důsledku obsahu oxidu uhelnatého.

Řada látek obsažených v energoplynu je nežádoucích, ať už z důvodu způsobování abraze, koroze, tvorby usazenin, degradačních chemických reakcí (např. katalyzátory, mazací kapaliny, apod.) nebo z důvodu ekologické zátěže (např. emise CO, NO_x vznikající spalováním plynu). U některých složek je proto nutné, před jejich použitím v konečném uživatelském zařízení, snížení jejich koncentrace nebo takřka úplné jejich odstranění.

3. Využití energoplynu pro energetické účely

Před využitím energoplynu v energetických zařízeních je zapotřebí ho ve většině případů upravit - vyčistit od nežádoucích látek, případně snížit jeho teplotu na požadovanou hodnotu. Úroveň čištění je dána především technickými požadavky následné technologie jeho využití a nutností splnit emisní limity na výstupu z této technologie. Vyčištěný energoplyn může být tedy přímo spalován v hořácích (cementárny, vápenky, cihelny), přičemž se získá pouze teplo. Energeticky daleko účinnější variantou jeho využití je jeho spalování ve vznětovém či zážehovém motoru nebo plynové turbíně pohánějící generátor, který vyrábí el. energii. Navíc se získává odpadní teplo, které je možné dále využít. Např. účinnost těchto procesů (vyrobená el. energie k energetickému obsahu v palivu) je u zařízení s el. výkonem 20 MW_e přibližně 23% pro spalování, 27% při využití zplyňování spolu se vznětovým motorem a přes 35% při využití zplyňování spolu se spalováním generátorového plynu v plynové turbíně [1].

4. Návrh experimentu pro spalování energoplynu

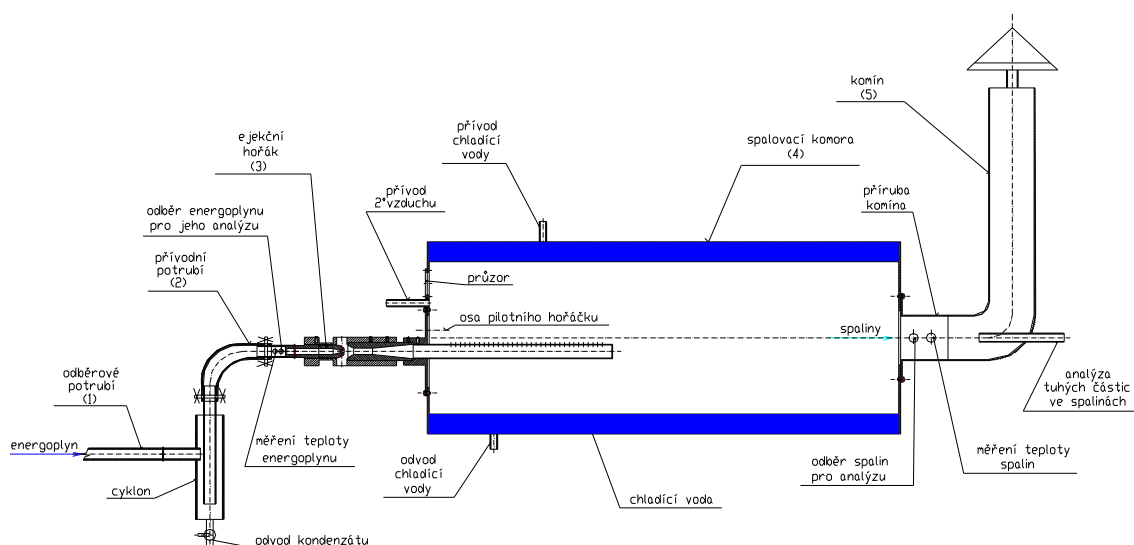
Uvažovaný experiment je zaměřen na docílení úspěšného spalování energoplynu vzniklého zplyňováním alternativních paliv (především biomasy) na experimentálním fluidním atmosférickém generátoru Biofluid 100, nacházejícího se v těžkých laboratořích EÚ – OEI na VUT FSI v Brně. Energoplyn bude spalován ve spalovací komoře za tím účelem navržené a přímo připojené k experimentálnímu zplyňovacímu zařízení.

Cílem je optimální spálení bioplynu v experimentální spalovací komoře, tj. dokonalé spálení při dodržení emisních charakteristik (NO_x, SO₂, CO, CO₂, O₂, tuhé látky, HCl, HF, PCB, PCDD/F, PAH) a dosažení tak úspěšného využití energoplynu produkovaného z alternativních paliv (především biomasy) na experimentálním zplyňovacím zařízení Biofluid 100, v podobě jeho přímého spalování v navržené spalovací komoře a dosažení přípustných, již výše uvedených emisních charakteristik na výstupu ze spalovací komory. Takto získaná data mohou sloužit jako podklad pro využití energoplynu v průmyslové praxi.

4.1. Popis experimentu

- Energoplyn z alternativních paliv (biomasy) bude odebírán z odběrového místa zplyňovacího generátoru (očekávaná teplota 250 – 300°C) a veden

experimentální tratí, která je již zrealizována a nachází se v laboratořích OEI – viz. obr. 1.

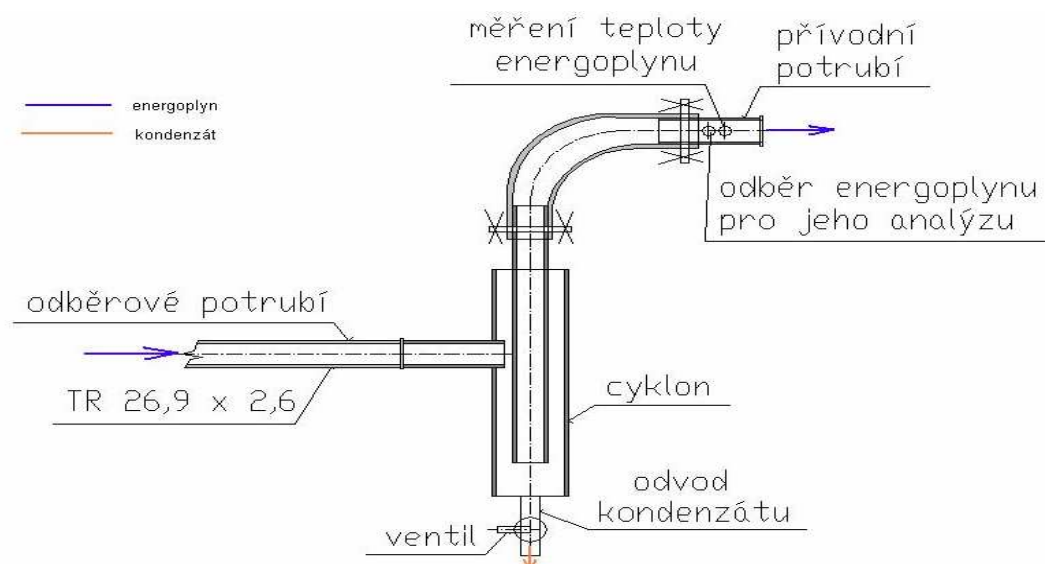


Obr. 1 Schéma experimentální tratě

Energoplyn bude postupně procházet přes:

- (1) odběrové potrubí – nerez ocel: - pomocí odběrového potrubí je produkovaný energoplyn přiváděn ze zplyňovacího zařízení do přívodního potrubí (2). V místě odběrového místa je předpokládaná teplota energoplynu 250 – 300°C.
- (2) přívodní potrubí – nerez ocel: - sestává se z trubek a cyklonu pro odloučení kondenzátu z energoplynu. Přivádí energoplyn do plynového hořáku. Na jeho konci (těsně před plynovým hořákem) budou dvě odběrová místa – pro analýzu složení energoplynu a pro měření teploty energoplynu na vstupu do plynového hořáku.
- (3) plynový hořák – byl zvolen plynový atmosférický ejekční hořák, který ale po prvních experimentech bylo zapotřebí modifikovat. Zejména zajistit jeho stabilní polohu pro konstantní přívod primárního vzduchu po obvodu hořáku.
- (4) spalovací komora – jedná se o válcovou vodou chlazenou spalovací komoru navrženou spolu s plynovým ejekčním hořákem na OEI. Komora je vybavena přívodem sekundárního vzduchu pro process spalování, průzorem, umožňující pozorování plamene při spalování, pilotním hořákem na ZP pro zapálení směsi paliva a vzduchu v hořáku a přívodem a odvodem vody pro chlazení spalovací komory.
- (5) komín - slouží k analýze spalin a jejich rozptýlení do okolí. Na vstupu spalin do komína jsou umístěny 3 odběrová místa pro analýzu spalin. Jedno odběrové místo slouží pro měření teploty spalin vystupujících ze spalovací komory (resp. na vstupu do komína), další dvě odběrová místa slouží pro analýzu složení složek spalin – obsahy CO, CO₂, O₂, NO_x, SO₂, tuhého úletu, HCl, HF, PCB, PCDD/F, PAH. Výška komína je 6 m.

Před výstupem energoplynu z přívodního potrubí, viz. obr. 2, do plynového ejekčního hořáku, bude měřena jeho teplota a prováděn jeho odběr pro analýzu složení.



Obr. 2 Detail přívodního potrubí energoplynu

Teplota bude měřena digitálním teploměrem COMMETER C 0321. Přístroj je určen pro měření dvou teplot pomocí připojitelných termočlánekových sond typu K (Ni Cr – Ni) v rozmezí teplot $-200 \div +1300^{\circ}\text{C}$ s možností přímého zobrazení rozdílu obou teplot. Naměřené hodnoty jsou zobrazovány na dvouřádkovém LCD displeji a mohou být ukládány do paměti. Z paměti je lze vyvolat na displeji nebo stáhnout do počítače.

Rozbor složení energoplynu se provede jeho odběrem do „MYŠI“ (skleněná nebo nerezová válcová nádoba na obou stranách opatřena uzávěry), viz. obr. 3 a následnou analýzou na „light gas“ chromatografu firmy Perkin - Elmer. Pohled na chromatografické pracoviště je na obr. 4.



Obr. 3 Nádobka pro odběr energoplynu,
tzv. „MYŠ“



Obr. 4 Pohled na chromatografické
pracoviště

Chromatografické zařízení pracuje zcela automaticky. Vyžaduje pouze přivedení analyzovaného plynu. Vlastní analýza probíhá cca 14 minut a poskytuje úplný

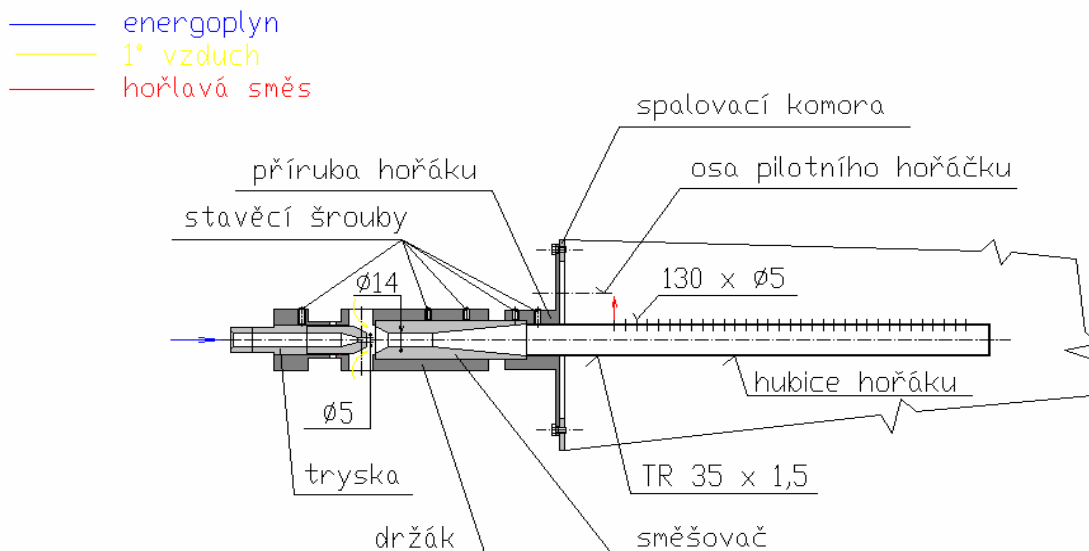
chromatografický záznam. Jako nosný plyn je používána směs He + 8 % H₂. Měřitelné koncentrace jednotlivých látek, které můžeme získat analýzou provedenou na chromatografu jsou v tab. 1. Pracovní cyklus chromatografu je řízen přes připojený počítač, který slouží k ovládání chromatografu, sběru dat a následnému vyhodnocování získaných údajů.

Tab. 1 Měřitelné koncentrace látek na chromatografu fy Perkin - Elmer

Složka plynu	Min. (%)	Max. (%)
Kyslík O ₂	0,01	100
Dusík N ₂	0,01	100
Metan CH ₄	0,01	100
Sirovodík H ₂ S	0,02	100
Oxid uhelnatý CO	0,01	100
Oxid uhličitý CO ₂	0,01	100
Ethylen C ₂ H ₄	0,01	100
Ethan C ₂ H ₆	0,01	100
Acetylen C ₂ H ₂	0,01	100
Vodík H ₂	0,01	100

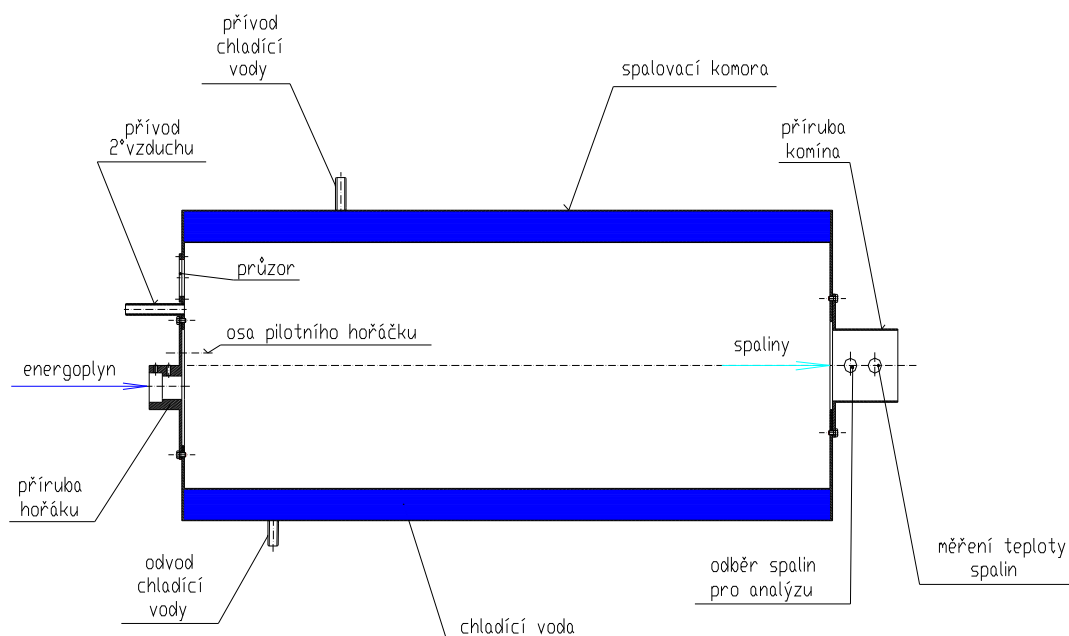
Vlastní spalovací proces proběhne prostřednictvím plynového atmosférického ejekčního hořáku ve spalovací komoře.

Plynový ejekční hořák byl zvolen s ohledem na specifické vlastnosti energoplynu (zejména jeho silné znečištění dehtovitými látkami a tuhým úletem), nerovnoměrný průběh zplyňovacího procesu a předpokladu autoregulačního provozu, jednoduché konstrukce a snadné výroby. Vlastní ejekční hořák se sestává z: trysky, směšovače a hubice hořáku – viz. obr. 5.



Obr. 5 Detail ejekčního hořáku

Po spálení energoplynu ve spalovací komoře, viz. obr. 6, jsou spaliny vedeny do komína.



Obr. 6 Detail spalovací komory

V místě vstupu spalin do komína bude měřena jejich teplota a analyzováno jejich složení.

Teplota bude měřena stejně jako v případě energoplynu pomocí digitálního teploměru COMMETER C 0321.

Analýza složení spalin z hlediska CO , NO_x , SO_2 , CO_2 a O_2 bude prováděna kontinuálně na měřicích přístrojích ULTRAMAT 21/ O_2 a ULTRAMAT 22. Přístroj ULTRAMAT 21/ O_2 analyzuje spaliny z hlediska obsahu O_2 (0 – 10%/25%) a CO (0 – 5000 ppm) nebo CO_2 . Přístroj ULTRAMAT 22 potom z hlediska obsahu SO_2 (0 – 5000 mg/m_n^3) a NO_x (0 – 1500 mg/m_n^3) nebo NO . Přístroje jsou propojeny s počítačem, kde jsou naměřené hodnoty zobrazovány a ukládány.

Analýza obsahu tuhých částic bude prováděna měřicím přístrojem TESO, kdy se tuhé částice obsažené ve spalinách zachycují na filtr v tomto přístroji. Na základě rozdílu hmotnosti filtru po a před měřením se provede vyhodnocení obsahu tuhých částic ve spalinách.

Analýza ostatních emisních charakteristik (HCl , HF , PCB , PCDD/F , PAH) bude provedena externí firmou.

Z komína jsou následně spaliny rozptýleny do ovzduší.

Naměřené a zpracované výsledky experimentálních měření budou porovnány z teoretickými výsledky a emisními limity pro spalování plyných paliv.

5. Závěr

Energoplyn lze využít jako náhradu fosilních paliv ve výrobních procesech (např. náhrada ZP v cementářských pecích, ve vápenkách, v cihelnách), a v energetice, kde nachází velmi široké uplatnění. V případě energetických zařízení může například sloužit jako předtopeniště ke klasickým kotlům na fosilní paliva, nebo jako generátor plynu určeného k náhradě fosilních plyných paliv v kogenerační výrobě elektrické energie a tepla. Energoplyn, jako náhrada ZP, lze použít pro vznětové i zážehové motory, pro spalování turbíny (po patřičných úpravách) i jako topný plyn.

Literatura

1. Bridgwater, A. V.: The Technical and Economical Feasibility of Biomass. Gasification for Power Generation, Fuel, Vol. 74, No.5, pp. 631 – 653, 1995
2. Pravda, L.: Využití Energoplynu z Alternativních Paliv ve Spalovací Komoře. Písemné pojednání ke státní doktorské zkoušce. VUT Brno, 2004, 57 str.

WSPÓŁSPALANIE MĄCZKI ZWIERZĘCEJ W KOTŁACH PYŁOWYCH

COFIRING OF MEAT AND BONE MEAL IN PF BOILERS

Autor: Prof. dr hab. inż. Marek Pronobis ¹

¹Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach
pronobis@kotly.ise.polsl.gliwice.pl

Abstrakt: W referacie przedstawiono problemy związane ze współspalaniem mączki zwierzęcej (meat and bone meal - MBM) z węglem kamiennym w energetycznych kotłach pyłowych. Przedstawiono podstawowe właściwości MBM oraz dokonano przeglądu zrealizowanych rozwiązań. Oceniono wpływ współspalania mączki na eksploatację kotła oraz możliwość utylizacji odpadów paleniskowych.

Słowa kluczowe: kotły, spalanie, biomasa, MBM

1. Uwagi ogólne

Zakaz karmienia zwierząt mączką kostną, będący rezultatem pojawienia się zagrożenia BSE, spowodował konieczność utylizacji znacznych jej ilości, przy czym z uwagi na konieczność likwidacji zagrożenia epidemiologicznego, zasadnicze znaczenie ma tu utylizacja termiczna. Z oczywistych względów nie wchodzi tu w grę nie tylko składowanie, lecz także biologiczne metody utylizacji (kompostowanie, produkcja biogazu), ponieważ nie zapewniają likwidacji prionów.

Decyzją Komisji Unii Europejskiej zdefiniowano pojęcie tzw. materiałów wysokiego ryzyka (specified risk materials - SRM) tzn. substancji o podwyższonym ryzyku z uwagi na zagrożenie BSE [1]. Należą do nich np. mózgi, rdzenie kręgowe i inne organy o wysokiej koncentracji prionów oraz zwierzęta, u których stwierdzono BSE. Substancje te wymagają specjalnych technologii utylizacji.

Badania [2] wykazują szczególną odporność prionów, które zachowują zdolność zakażenia nawet po 15 minutach pobytu w temperaturze 600 °C. Jednym z możliwych tłumaczeń tego zjawiska jest istnienie pewnego nieorganicznego „szablonu molekularnego” (molecular template), który jest w stanie wywołać odtworzenie w niższych temperaturach struktur prionowych. Dlatego spośród technologii termicznych korzystniejsze są procesy wysokotemperaturowe i zachodzące przy nadmiarze tlenu, co ogranicza możliwe rozwiązania do następujących technologii:

- spalarnie odpadów komunalnych
- spalarnie odpadów niebezpiecznych
- spalarnie osadów ściekowych
- kotły na paliwo stałe
- piece cementownicze.

Z uwagi na stosunkowo krótki okres obowiązywania zakazu karmienia zwierząt mączką kostną wymienione metody jej utylizacji znajdują się ciągle w fazie początkowej. Dotychczasowe badania wykazały, że najmniejszym ograniczeniom technicznym podlega utylizacja w spalarniach odpadów komunalnych i niebezpiecznych, w spalarniach osadów ściekowych a także w kotłach na paliwo stałe. Wykorzystanie pieców cementowniczych zapewnia wprowadzić prawidłowy stopień

przetworzenia substancji organicznej, jednak ilość spalanej mączki kostnej jest ograniczona przez dopuszczalny udział związków fosforu w cemencie. Spalanie odpadów niebezpiecznych, ze względu za stosowane skomplikowane technologie, narzucają natomiast bardzo wysokie koszty utylizacji.

Nawet w warunkach niemieckich łączna wydajność wymienionych urządzeń do spalania paliw odpadowych nie pokrywa zapotrzebowania. Stąd dąży się do zwiększenia udziału mączki spalanej razem z węglem w kotłach energetycznych - pyłowych i fluidalnych.

W Polsce, z uwagi na praktyczny brak instalacji do spalania odpadów komunalnych, utylizacja poprzez współspalanie w energetyce staje się jeszcze bardziej atrakcyjna. Zarówno jednak w krajach UE, jak i w Polsce odpowiednie technologie znajdują się dopiero w fazie powstawania i dla ich dopracowania konieczne są szerokie badania z uwzględnieniem dostępnych lokalnie technik kotłowych.

2. Charakterystyka mączki kostnej

Występują różne postacie mączki zwierzęcej, o silnie różniącym się składzie. W tabl. 2.1 podano przykładowe zestawienie, z którego wynika, że zarówno wartość opałowa jak i inne, istotne z punktu widzenia współspalania, parametry mogą ulegać daleko idącym zmianom.

Popiół powstały ze spalania mączek różnych gatunków może mieć rozmaity skład, jednak we wszystkich przypadkach zauważa się duże udziały fosforu i wapnia. Udziały tych pierwiastków są znacznie wyższe niż w krajowych węglach energetycznych, nawet tych, których popiół charakteryzuje się stosunkowo dużą skłonnością do żuźlowania - tabl. 2.2.

Podwyższona zawartość azotu i siarki wiąże się z udziałem białek w mączce. Elementarny skład chemiczny białek jest bowiem następujący: C = 50 ÷ 55 %, H = 6,5 ÷ 7,2 %, O = 20,0 ÷ 23,7 %, N = 15,2 ÷ 19,2 %, S = 0,3 ÷ 2,4 %.

Tabl. 2.1 Charakterystyka różnych rodzajów mączki zwierzęcej (stan roboczy)

Wielkość	Jedn.	PL [4, 5]	PL [6]	DE [3]	IE [3]	PT [3]
Wartość opałowa	MJ/kg	17,6	16,79	18,0	15,7	17,8
Zawartość wody	%	4,3	4,4	4,6	18,9	2,2
Zawartość popiołu	%	20,8	25,14	22,0	29,4	23,6
Białko ogólne	%	53,6	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Tłuszcz	%	20,5	17,8÷19,17	b.d.	b.d.	b.d.
NaCl	%	0,5	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
C	%	b.d. ^{*)}	39,3	40,83	37,2	47,3
H	%	b.d.	5,8	5,86	7,7	6,9
N	%	b.d.	6,6	7,65	5,8	10,6
S	%	1,0	0,41	0,62	0,5	0,4
Cl	%	0,8	b.d.	0,5	0,5	0,5
P	%	7,0	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Ca	%	10,0	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.

^{*)} brak danych

Mączka zwierzęca może posiadać różną granulację, ponieważ przy jej wytwarzaniu stosowane są rozmaite technologie: np. mączka spalana w El. Timelkam [8] jest znacznie grubsza od spalanej w Centrum Elektrociepłowni Zakładów Azotowych w

Tarnowie Mościcach SA (CE ZA) [6] - tabl. 2.3. Możliwe są także dostawy produktu przed zmieleniem - są to wówczas kawałki o rozmiarach sięgających 50 mm, natomiast praktycznie zupełnie brak w nim pyłu. Produkt w tej formie może mieć czasem korzystniejszą cenę, ponieważ odpadają koszty przemiału w zakładzie przeróbczym. Istnieje również możliwość wytwarzania z mączki granulatu.

Tabl. 2.2 Skład chemiczny popiołu z mączki kostnej PL [5] i próbki DE [3] oraz węgla górnośląskich o mniejszej (NŻ) i większej (Ż) skłonności do żużlowania

Składnik	Mączka [5]	Mączka [3]	Węgiel Ż	Węgiel NŻ
Fe ₂ O ₃ [%]	0,85	0,45	12,20	7,63
CaO [%]	18,81	43,9	15,05	3,71
MgO [%]	0,27	3,01	4,91	3,24
Na ₂ O [%]	2,94	8,52	0,97	0,90
K ₂ O [%]	1,12	1,36	2,58	2,03
P ₂ O ₅ [%]	70,05	37,7	0,07	0,09
SiO ₂ [%]	5,96	5,96	53,73	57,44
Al ₂ O ₃ [%]	0,00	0,19	10,22	23,44
TiO ₂ [%]	0,00	0,00	0,27	1,53

Tabl. 2.3 Analizy sitowe mączki mięsno kostnej [6 i 8]

Fracja, [mm]	Udział masowy frakcji [%] wg [6]	Udział masowy frakcji [%] wg [8]
>5	0,09	ok. 0,0
3,15 ÷ 5	5,16	0,2
2 ÷ 3,15	9,65	7,6
1,0 ÷ 2	11,66	62,7
0,5 ÷ 1	22,04	12,60
0,2 ÷ 0,5	43,75	16,90
<0,2	7,75	ok. 0,0

3. Przegląd zrealizowanych rozwiązań współspalania mączki kostnej z węglem kamiennym w kotłach pyłowych

Krajowych doświadczeń ze spalania MBM w kotłach pyłowych nie ma. Także w krajach Europy Zachodniej jest to sytuacja spotykana rzadko i w większości przypadków szczegółowych opisów brak. Paliwa tego rodzaju w kraju są spalane w dużych ilościach jedynie w kotle OPF 230 CE ZA [7]. W ramach prób, pewne ilości MBM spalano w niektórych kotłach fluidalnych np. w El. Jaworzno II. Nieliczne szczegółowe opisy technologii podano w [8] dla kotłów austriackich oraz w [9] dla niemieckich.

3.1 Elektrownia St. Andrä (Austria) [8]

Kocioł ten jest znany z tego, że posiada pod lejem żużlowym ruszty do spalania biomasy drzewnej [10]. Palenisko pyłowe ma układ tangencjalny z trzema poziomami palników pyłowych. Spaliny są oczyszczane w instalacji półsuchego odsiarczania, za którą znajduje się odpylacz tkaninowy. Mączka dostarczana samochodami jest wprowadzana pneumatycznie do istniejących zbiorników sorbentu (2x50 t) do

odsiarczania. Wyziwcy z silosów są odprowadzane do układu spalania. Mączka jest z silosu wyprowadzana poprzez dozownik celkowy, który jest jednak źródłem problemów ze względu na zatykanie się i dalej transportowana do palników przewodami.

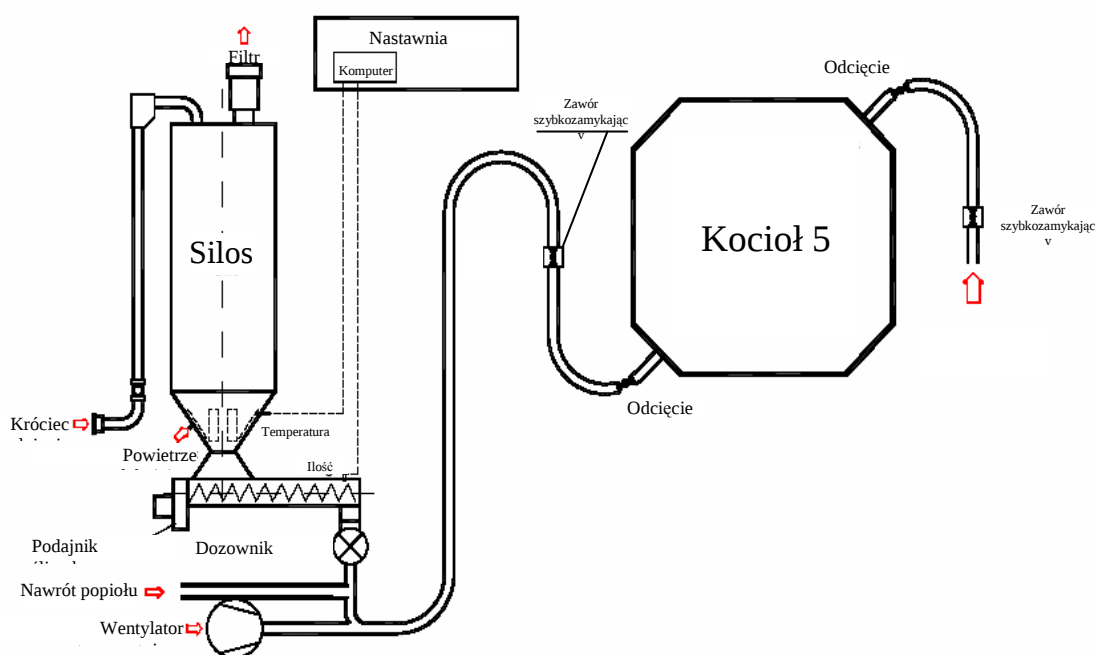
Mączka nie podlega mieleniu, lecz jest wprowadzana bezpośrednio do komory paleniskowej poprzez dodatkowy poziom palników. Popiół nie jest wykorzystywany w budownictwie, stąd podwyższona zawartość fosforu nie jest problemem.

3.2 Elektrownia Timelkam II (Austria) [8]

Timelkam II jest siłownią upustowo-kondensacyjną o mocy elektrycznej 66 MW pracującą w skojarzeniu (20 MW). Kocioł może być opalany węglem kamiennym, ciężkim lub lekkim olejem bądź gazem ziemnym. Posiada palenisko tangencjalne z pięcioma poziomami palników i dyszami OFA. Spaliny są oczyszczane w instalacji półsuchego odsiarczania, za którą znajduje się odpylacz tkaninowy.

Mączka dostarczana samochodami jest wprowadzana pneumatycznie do zbiorników ($2 \times 50 \text{ m}^3$) sorbentu, które jednak w przypadku mączki o podwyższonej zawartości tłuszczu mają tendencję do zawieszania się. Wyziwcy z silosów są filtrowane i odprowadzane do otoczenia. Mączka jest z silosu wyprowadzana poprzez podajnik ślimakowy i dozownik celkowy, który jest jednak źródłem problemów ze względu na zatykanie się. Dla szybkiego diagnozowania zablokowania przepływu mierzona jest temperatura i ciśnienie za wentylatorem transportującym mączkę do palników.

Mieszanina mączki z popiołem jest wdmuchiwana przez dwa palniki usytuowane po przekątnej. Palnikami tymi zastąpiono istniejące wcześniej palniki na olej ciężki - rys. 3.1. Pozostałe palniki olejowe wykorzystano do spalania tłuszczu zwierzęcego.



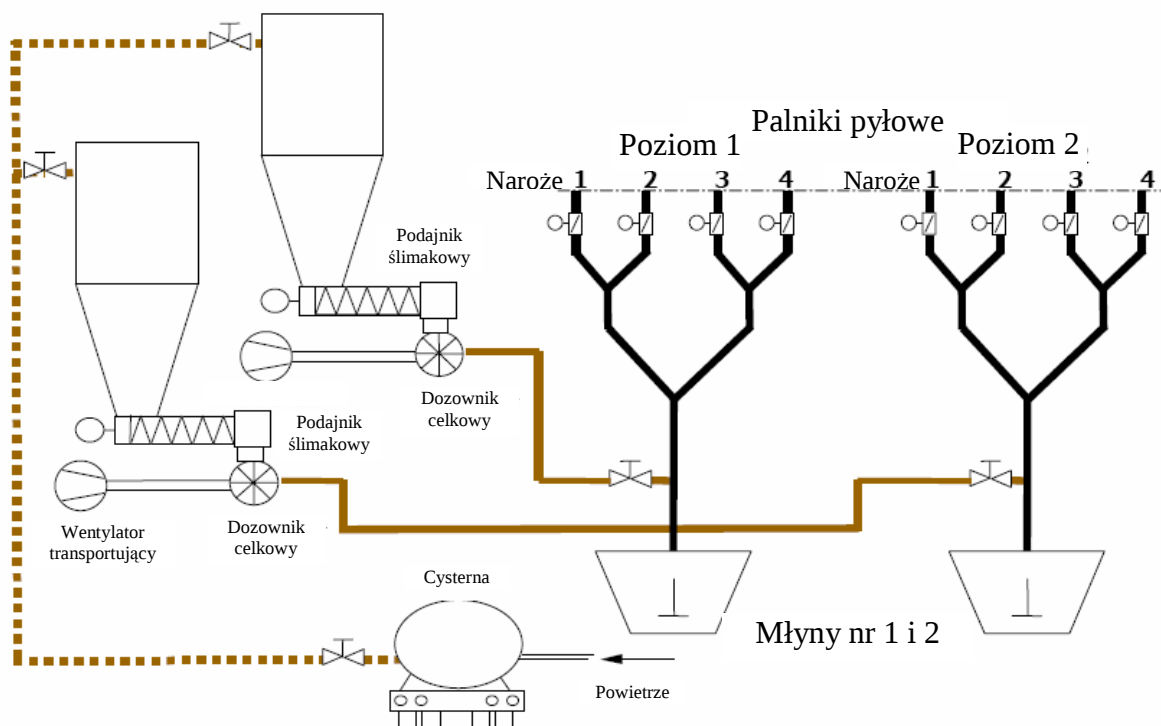
Rys. 3.1 Schemat układu doprowadzenia mączki kostnej do kotła w El. Timelkam [8]

Wg informacji uzyskanej w Elektrowni niedopał podczas współspalania jest nieznacznie wyższy, niż podczas spalania samego węgla. Dla uniknięcia problemów popiół z mokrego odżuźlacza jest nawracany w zamkniętym obiegu do kotła.

3.3 Elektrownie Riedersbach 1 i 2 (Austria) [8]

Riedersbach 1 jest elektrownią upustowo-kondensacyjną o mocy elektrycznej 50 MW pracującą w skojarzeniu (10 MW). Kocioł może być opalany węglem kamiennym i ciężkim olejem. Spaliny są oczyszczane w elektrofiltrze i instalacji mokrego odsiarczania.

Riedersbach 2 jest elektrownią upustowo-kondensacyjną o mocy elektrycznej 170 MW pracującą w skojarzeniu (17 MW).



Rys. 3.2 Schemat układu doprowadzenia mączki kostnej do kotła w El. Riedersbach 2 [8]

Kocioł może być opalany węglem kamiennym i ciężkim olejem. Posiada palenisko tangencjalne z pięcioma poziomami palników i dyszami OFA. Spaliny są oczyszczane w elektrofiltrze i instalacji mokrego odsiarczania. Emisja NO_x jest obniżana za pomocą instalacji niekatalitycznej pracującej na moczniku i umieszczonego na końcu kotła katalizatora. Oba kotły mają palenisko tangencjalne.

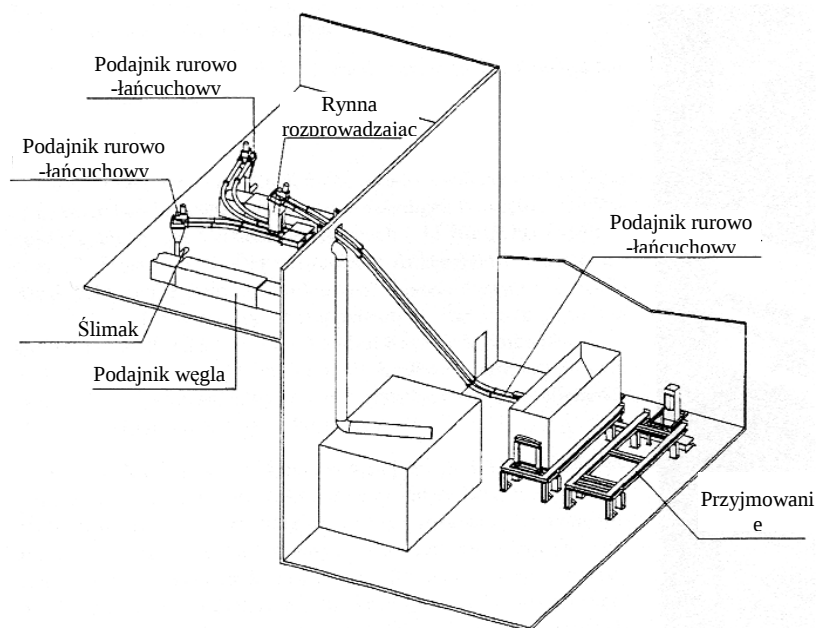
W odróżnieniu od opisanych poprzednio w El. Riedersbach 1 i 2 stosuje się wprowadzenie mączki do paleniska przez palniki węglowe. Mączka jest wdmuchiwana do pyłoprzewodów za młynami - rys. 3.2, na dwóch górnych poziomach palników.

3.4 Elektrownia Mark-E w Werdohl-Elverlingsen (Niemcy) [9]

Są tu 2 bloki energetyczne: E3 o mocy 186 MW i E4 - 301 MW. Wyposażone są w kotły na węgiel kamienny, z ciekłym odprowadzeniem żużla. Jak dotąd współspalanie MBM odbywa się w kotle E4, wyposażonym w instalację doprowadzającą mączkę do dwóch przebudowanych palników pyłowych (spośród istniejących 12). Mączka jest do kotła transportowana pneumatycznie, co jednak stwarza ciągłe problemy.

3.5 Elektrownia swb Synor w Bremie (Niemcy) [9]

Są tu 3 bloki energetyczne o mocy od 100 do 300 MW, wyposażone w kotły granulacyjne, spośród których Hafen 6 został jako pierwszy wytypowany do spalania MBM. Dla doprowadzania mączki opracowano koncepcję gwarantującą ścisłe oddzielenie MBM od atmosfery zewnętrznej - rys. 3.3. Kontenery zostały wyposażone w wykładzinę z nierdzewnej stali dla zmniejszenia adhezji i ułatwienia czyszczenia. Wykładziny tworzą wewnątrz podłużny lej zsypany, z którego MBM zsuwa się do wzdłużnego transportera ślimakowego. Dalej mączka jest transportowana podajnikiem rurowo-łańcuchowym na poziom podajników węgla, do których jest wprowadzana. MBM sypie się luźno na niezmielony węgiel, razem z którym podąża do młyna.



Rys. 3.3 Schemat doprowadzenia mączki kostnej do układu paleniskowego kotła Hafen 6 [9]

Próbna eksploatacja takiego systemu wykazała, że główne problemy wynikają ze składu popiołu MBM, który zwiększył skłonność komory do zużłowania. Obecnie w bloku 6 w instalację do podawania mączki wyposażono dwa z pięciu młynów o wydajności 20 t/h. Do każdego doprowadza się ok. 5,3 t/h MBM, co w skali kotła daje ok. 15 % udziału masowego mączki w paliwie. Przy większym udziale MBM występowały problemy przemiałowe.

4. Ocena wpływu współspalania mączki zwierzęcej na pracę kotła

4.1 Wpływ własności fizykochemicznych mączki na układ młynowo-paleniskowy

Dotychczasowe próby [8, 9], dokonywane w kotłach ze stałym i ciekłym odprowadzeniem żużla, polegały albo na wprowadzaniu mączki za młynem albo na jej zmieszaniu z węglem przed młynem i mieleniu powstałej mieszaniny. Wybór najlepszej technologii zależy w tym przypadku zarówno od konstrukcji kotła i jego urządzeń pomocniczych jak i od charakterystyki biopaliwa.

Bardzo istotne jest zbadanie skłonności pyłów węglowo-kostnych do wybuchu. Należałoby zarówno określić bezpieczne proporcje obu składników mieszaniny, jak i maksymalne dopuszczalne temperatury w pyłoprzewodach.

W przypadku współmielenia MBM z węglem konieczne jest przeprowadzenie odpowiednich prób. Rozważenia wymaga także kwestia takiego prowadzenia podajników węgla, aby gazy wydzielane przez mączkę kostną nie wydzielały się do otoczenia (układ podciśnieniowy).

4.2 Zmiana charakterystyki popiołu i żużla na skutek współspalania mączki zwierzęcej z węglem oraz jej wpływ na możliwość ich gospodarczego wykorzystania

Odmienny skład popiołu z mączki niż z węgla (tabl. 2.2 i 4.1) wpływa na skład popiołu pojawiającego się w kotle podczas współspalania. Wysokie zawartości fosforu, wapnia i niekiedy sodu w mączce wpływają na skład popiołu i żużla i mogą oddziaływać na ich dalszą przydatność. Wpływ zmian składu chemicznego na skutek współspalania mączki z węglem jest uzależniony od sposobu utylizacji popiołu.

Jeżeli popiół jest składowany, to wzrost udziału rozpuszczalnych związków sodu (np. Na_3PO_4) może stwarzać pewne problemy na składowiskach.

Ważna jest także ocena wpływu na środowisko tej części popiołu lotnego, która nie ulega wychwyceniu w odpylaczach (np. wpływ związków fosforu na wzrost roślin).

W przypadku dodawania popiołu do materiałów budowlanych konieczne jest spełnienie odpowiednich norm w tym zakresie. Np. udział P i Cl stanowi poważne ograniczenie przy dodawaniu popiołu lotnego do betonów. Wg [8] zawartość chlorków dla takich zastosowań nie może przekraczać 0,1 %. W każdym przypadku potrzebne jest odpowiednie indywidualne dopuszczenie.

Istnieje możliwość wykorzystania popiołu lotnego wzbogaconego związkami fosforu jako dodatku do nawozów. Taki sposób utylizacji jest np. stosowany w El. Timelkam [8]. Najkorzystniejsze dla takiego sposobu wykorzystania popiołu byłoby spalanie lub zgazowanie w urządzeniu zewnętrznym z wprowadzeniem do kotła gazowych produktów takiego procesu. Powstały popiół nie mieszałby się wówczas z popiołem z węgla.

Dla oceny zmiany składu popiołu powstającego podczas współspalania mączki zwierzęcej z węglem, w stosunku do uzyskiwanego przy spalaniu samego węgla, wykonano przedstawione niżej obliczenia.

Tabl. 4.1 Skład popiołu z mączki kostnej, z typowego węgla górnośląskiego oraz popiołu ze współspalania (udział cieplny mączki $Z_D = 10$ i 20 %)

Składnik	Mączka [5]	Węgiel	Popiół sumaryczny $Z_D=10$ %	Popiół sumaryczny $Z_D=20$ %
Fe_2O_3 [%]	0,85	6,8	6,24	5,66
CaO [%]	18,81	2,45	4,00	5,57
MgO [%]	0,27	2,06	1,89	1,72
Na_2O [%]	2,94	0,7	0,91	1,13
K_2O [%]	1,12	2,97	2,79	2,62
P_2O_5 [%]	70,05	0,09	6,73	13,44
SiO_2 [%]	5,96	53,91	49,36	44,76
Al_2O_3 [%]	0,00	29,67	26,86	24,01
TiO_2 [%]	0,00	1,35	1,22	1,09
M [%]			9,48	19,08

Oparto się na charakterystykach popiołu z typowego węgla górnośląskiego oraz na charakterystyce popiołu z mączki wg [5] podanej w tabl. 2.2. Wyniki obliczeń, w postaci składu tlenkowego popiołu powstałego przy współspalaniu mączki o udziale cieplnym $Z_D = 10$ i 20 %, podano w tabl. 4.1.

Uzyskane rezultaty wskazują na znaczny wzrost zawartości fosforu i wapnia a także, w mniejszym stopniu, sodu w popiele lotnym, przy obniżeniu udziałów pozostałych składników.

Często popiół lotny jest wykorzystywany do produkcji cementu. Dla oceny w tym względzie oparto się na normie europejskiej [11]. Na podstawie danych zamieszczonych w tabl. 4.1 nie można ocenić zawartości wolnego i reaktywnego CaO w popiele. Podane w tablicy udziały CaO wynikają bowiem jedynie z formalnego przeliczenia związków wapnia na tlenek. Jednak ponad dwukrotny wzrost udziału CaO przy współspalaniu wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań podczas prób współspalania. Podobnego sprawdzenia wymaga też zawartość sodu.

Na uwagę zasługuje również zmniejszenie zawartości SiO_2 w popiele. W związku z tym będzie wymagało sprawdzenia spełnienia podanego w [11] warunku $\text{SiO}_2 \text{ reaktywne} \geq 25$ %.

W [11] występuje zapis, że maksymalny udział popiołu ze współspalania (M) nie może przekraczać 10 % zgodnie z obliczeniami wg formuły:

$$M = 100 \frac{K_1 A_1}{K_c A_c + K_1 A_1} \quad (4.1)$$

gdzie: M - udział masowy popiołu ze współspalania w popiele całkowitym, %,
 A_1 - udział masowy popiołu w mączce, %,
 A_c - udział masowy popiołu w węglu, %
 K_1, K_c - udział odpowiednio mączki i węgla podczas współspalania.

Muszą przy tym być spełnione warunki:

$$K_c + K_1 = 1 \text{ oraz } K_c \geq 0,80 \quad (4.2)$$

co ogranicza udział cieplny MBM dla charakterystyki podanej w [5] (tabl. 2.1) do ok. 17 %.

W dolnym wierszu tabl. 4.1 podano wyliczone dla przyjętych warunków wartości M . Ze względu na relatywnie duży udział popiołu w mączce wspomniany warunek ($M \leq 10$ %) ogranicza udział MBM możliwego do spalania w kotle, z którego popiół jest wykorzystywany do produkcji betonu, do ok. 10 %.

Norma [11] zawiera w rozdz. 4.2 „Wymagania chemiczne” liczne warunki, z których część jest opatrzona klauzulą „Fly ash obtained from combustion of pulverized coal only is deemed to satisfy this requirement.” która wzięta dosłownie uniemożliwiałaby w ogóle wykorzystanie popiołu ze współspalania do produkcji cementu. Na obecnym etapie należałoby przyjąć, że dla współspalania potrzebne są indywidualne badania, których wynik decydowałby o dopuszczeniu popiołu lotnego do produkcji cementu.

Istotne znaczenie ma obecność fosforu w popiele ze współspalania MBM. Istnieją doniesienia [12], że ze wzrostem zawartości związków fosforu powyżej 1 % (udział masowy P_2O_5) wydłuża się czas wiązania cementu portlandzkiego oraz spada jego wytrzymałość na skutek zahamowania podczas przemian fazowych klinkieru konwersji C_2S do C_3S . Inni autorzy sugerują natomiast, że jeżeli fosfor występuje w postaci związanego z klinkierem apatytu ($\text{Ca}_5[\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}, \text{CO}_3](\text{PO}_4)_3$), to zjawisko takie się nie pojawia. Niekorzystny wpływ na właściwości cementu ma też podwyższenie udziału

wolnego CaO, także obecnego w mączce. Opisane problemy powodują, że cementownie ograniczają udział P_2O_5 w klinkierze do $0,4 \div 0,5 \%$, co wg dotychczasowych doświadczeń jest wartością bezpieczną [12].

Podczas prób współspalania konieczne jest sprawdzenie, czy substancje organiczne nie pojawiają się w mokrym odżuźlaczu. Gdyby taka sytuacja (niedopuszczalna z uwagi na problemy higieniczne) miała miejsce, trzeba się zastanowić nad nawracaniem żuźla z odżuźlacza do młynów.

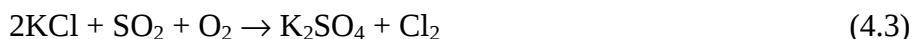
4.3 Ocena zagrożeń związanych ze zjawiskami żuźlowania paleniska

Brak jest szczegółowych danych na temat wpływu składu części mineralnej paliwa węglowo-kostnego na pracę kotła i paleniska. Częściową informację na ten temat można znaleźć w pracy [13], z której wynika, że podczas współspalania mączki z węglem trzeba się liczyć z silnym wzrostem skłonności do żuźlowania. Istotne znaczenie mają tu przekształcenia fosforu zawartego w biopaliwie.

W badaniach [5] udział fosforu w mączce po wyprażeniu był 4,71 razy większy niż w produkcie wyjściowym. Mniej więcej taki sam stosunek (4,76) miała masa robocza i pozostałość po prażeniu. Wynika z tego, że fosfor praktycznie nie przechodzi do spalin w postaci gazowej i jest trwale związany w popiele jako tlenek lub w inny sposób (np. jako apatyt). Jeżeli znaczący udział w popiele lotnym będzie miał pięciotlenek fosforu, trzeba się obawiać obniżenia temperatur topnienia (dla P_2O_5 temperatura ta wynosi 569°C [14]). Liczne publikacje np. [7 ÷ 9, 13, 14] potwierdzają występowanie większej skłonności popiołu o podwyższonej zawartości P_2O_5 do żuźlowania. Dla właściwej oceny tego wpływu konieczne są jednak badania na rzeczywistym obiekcie, tym bardziej, że nie wiadomo, czy w warunkach komory paleniskowej kotła popiół z obu paliw ulega homogenizacji (co obniżałoby wysoką skłonność do żuźlowania popiołu z MBM), czy też porusza się niezależnymi strugami (co lokalną skłonność do żuźlowania może zwiększyć).

4.4 Ocena zagrożeń związanych z tworzeniem się osadów popiołowych na powierzchniach konwekcyjnych

Wyróżniającą cechą popiołu z mączki kostnej jest bardzo wysoki udział fosforu i wapnia a także wyższy niż w węglu udział sodu. Taka charakterystyka powoduje, że popiół lotny ma wysoką skłonność do tworzenia osadów na powierzchniach konwekcyjnych kotła [15]. W obszarze powierzchni półpromieniowanych trzeba się liczyć z intensywniejszym niż dla węgla powstawaniem osadów spieczonych. Szczegółowych danych na temat wpływu składu części mineralnej paliwa węglowo-kostnego na zanieczyszczenia i korozję powierzchni ogrzewalnych dotąd brak. Jednak należy się obawiać, że zwiększone zawartości chloru w mączce mogą powodować wysokotemperaturową korozję przegrzewaczy. Zagadnieniu temu poświęcono w ostatnich latach wiele prac badawczych, w związku z coraz powszechniejszym spalaniem zawierającej chlor słomy. Przeważającym składnikiem powstającego popiołu są związki potasu, a wśród nich chlorek, który w obecności SO_2 może w pobliżu powierzchni rury wydzielać gazowy chlor, na skutek reakcji



Efekt tego może być dwojaki: powstały gazowy chlor jest silnym czynnikiem korozyjnym, natomiast zwarta warstwa K_2SO_4 stanowi dla rury ochronę. Pojawił się więc pogląd, że aktywność chloru jest neutralizowana przez związki siarki zawartej w paliwie, co może być uzasadnione w przypadkach, kiedy korozję powodują osady

chlorków (np. w przegrzewaczach). Za niebezpieczny uważa się wówczas stan, kiedy w paliwie stosunek S^r/Cl^r spada poniżej $2 \div 4$ w zależności od charakterystyki popiołu z węgla. Stan taki jest możliwy, ponieważ niektóre krajowe węgle mają zawartości chloru przekraczające 0,5 %, a mączka krajowa zawiera stosunkowo dużo chloru. Stąd podczas współspalania zachodzi konieczność okresowego badania ubytków korozyjnych, a w przypadku stwierdzenia nadmiernej szybkości korozji należy odpowiednio dobierać skład węgla i mączki, a także ich wzajemne proporcje. Problem ten analizowano w pracy [16], gdzie stwierdzono, że udział MBM przekraczający 30 % może przy współspalaniu z polskim węglem energetycznym prowadzić do korozji przegrzewaczy.

Dla kotłów, w których prowadzi się zdmuchiwanie popiołu, istotne znaczenie ma wpływ współspalania na szybkość narastania osadów, która bezpośrednio warunkuje częstotliwość załączania zdmuchiвачy. Wielkość tę wg [17] opisuje wzór

$$\tau_{\infty} = 9,01 \cdot \sigma_2^{-1,723} w_s^{0,744} \left(\frac{R_{0,03}}{24,5} \right)^{0,319} \left(\frac{T_s^{sr}}{373} \right)^{0,249} \quad [h] \quad (4.4)$$

gdzie:

$\sigma_2 = s_2 / D$ - względna podziałka wzdłużna rur (D - średnica rur), m,

$R_{0,03}$ - udział ziaren popiołu lotnego o średnicy większej od 30 μm , %,

T_s^{sr} - średnia temperatura spalin w obrębie pęczka, K,

w_s - prędkość spalin w przekroju swobodnym, m/s.

Spośród wielkości występujących w (4.4) współspalanie może zmienić w bardziej istotny sposób jedynie wartość $R_{0,03}$, ze względu na możliwość pojawienia się w spalinach drobnego popiołu ze spalania mączki. Na obecnym etapie wiedzy określenie zależności między granulacją mączki i powstałego z niej w warunkach kotła pyłowego popiołu jest niemożliwe. Uniemożliwia to więc ocenę zmian częstotliwości zdmuchiwania, aczkolwiek należy się raczej liczyć z koniecznością jej zwiększenia.

4.5 Identyfikacja zagrożeń korozyjnych i erozyjnych

Dotychczasowe próby spalania mączki w kotłach pyłowych i pyłowo-fluidalnych dowodzą, że proces współspalania z węglem nie stwarza większych problemów. W dłuższych okresach czasu mogą się jednak pojawić pewne zjawiska negatywne. Zwiększone (w stosunku do występujących w węglu) zawartości S i Cl w mączce mogą nasilać korozję ekranów we wszystkich miejscach, gdzie atmosfera ma charakter redukcyjny.

Duże szybkości korozji wiążą się z występowaniem ciekłych składników na powierzchni rur. Stąd pojawienie się żużlowania (lub jego intensyfikacja w stosunku do stanu istniejącego przed współspalaniem MBM) niesie z sobą ryzyko uszkodzeń ekranów.

Wpływ współspalania mączki kostnej na korozję przegrzewaczy opisano w poprzednim punkcie.

4.6 Wpływ współspalania mączki zwierzęcej na skuteczność urządzeń oczyszczania spalin

W przypadku mączki o zawartości siarki niższej niż S^r dla węgla sprawność odpylania może się w pewnym stopniu obniżyć. Pewne pogorszenie skuteczności odpylania może też nastąpić w wyniku zwiększenia strumienia i temperatury spalin wylotowych podczas współspalania.

W literaturze informacje na ten temat są skąpe. W [18, 19] podano, że El. Timelkam i Riedersbach, mimo współspalania MBM, nie wystąpiły trudności z dotrzymaniem norm emisji pyłu. Dowodziłoby to, że wymienione wyżej zjawiska nie pogarszają jakości odpylania w stopniu istotnym. W instalacjach mokrego odpopielania istnieje trudne do określenia niebezpieczeństwo korozji na skutek rozpuszczenia P_2O_5 w wodzie z utworzeniem kwasu ortofosforowego.

W literaturze brak jest szczegółowych informacji na ten temat. Jedynie w [3] stwierdzono, że wysokie udziały fosforu, wapnia i sodu w mączce mogą oddziaływać na jakość gipsu z instalacji mokrego odsiarczania. Wpływ ten nie musi jednak być istotny, ponieważ np. w El. Riedersbach [8], mimo współspalania mączki, gips nadal spełnia wymagania budowlane.

W [19] wykazano, że współspalanie mączki zwierzęcej nie powoduje przekroczenia dopuszczalnych koncentracji szkodliwych składników w ściekach z mokrej IOS.

Związana z właściwościami popiołu z mączki zwiększona skłonność do tworzenia osadów popiołowych na powierzchniach konwekcyjnych (punkt 4.4) może spowodować większe zanieczyszczenie REGAVO.

Literatura

1. Entscheidung der Kommission vom 29. Juni 2000 zur Regelung der Verwendung von bestimmtem Tiermaterial angesichts des Risikos der Übertragung von TSE-Erregern und zur Änderung der Entscheidung 94/474/EG, Dokument 300D0418, (http://europa.eu.int/eur-lex/de/lif/dat/2000/de_300D0418.html)
2. Brown, Rau, Johnson, Bacote, Gibbs, Gajdusek (1999) „New studies on the heat resistance of hamster-adapted scrapie agent: threshold survival after ashing at 600 degrees C suggests an inorganic template or replication“ Proc Nat Acad Sci USA, 97, 3418-3421 (<http://www.pnas.org/cgi/content/full/97/7/3418>)
3. Nottrodt A., Chibiorz J.: Technische Anforderungen und allgemeine Empfehlungen für die Entsorgung von Tiermehl und Tierfett in Verbrennungsanlagen. Hamburg, Berlin 2001.
4. Wynik badania chemicznego mączek utylizacyjnych nr WIW.ZHW.P 4041 MCHŻ/ŻŻ 9-10/2001.
5. Badania dotyczące utylizacji mączki kostnej. Jednostka ratownictwa Chemicznego Sp. z o.o.
6. Badania nad otrzymaniem paliwa płynnego z udziałem mączki kostnej. Praca IChPW Zabrze, 2004.
7. Pronobis M., Gańczarczyk A., Wasa K.: The Boiler OPF 230 in Thermal - Electric Centre of Zakłady Azotowe w Tarnowie Mościcach SA - Modernizations and Operating Experiences. Conf. Days of Combustion 2004. Brno.
8. Grech H., Angerer T., Scheibengraf M.: Bestandsaufnahme der thermischen Entsorgung von verarbeiteten tierischen Proteinen in Österreich. Umweltbundesamt GmbH, BE-192. Wien, August 2001.
9. Paul. S., Kruse I.: Mitverbrennung von Substitutbrennstoffen und Tiermehl in Kohlekraftwerken. VGB PowerTech 9/2002, s. 47-52.
10. Mory A., Tauschitz J.: Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken. VGB Kraftwerkstechnik 1/1999.
11. Norma europejska: Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specification and conformity criteria. CEN/TC 104 - prEN 450-1.

12. Braun H.: Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie - vom Altreifen bis zum Tiermehl. Lafarge Centre Technique Europe Centrale GmbH A - 1060 Wien.
13. Pronobis M.: Wpływ współpalania biomasy na zużycie paliwa paleniska kotła. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002.
14. Gerhardt Th., Rebmann M., Spliethoff H., Hein K.R.G.: Untersuchungen zur Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlenstaubfeuerungen. VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), H. 5.
15. Pronobis M.: Wpływ paliw dodatkowych na zanieczyszczenie i sprawność kotła. Materiały IX Konferencji Kotłowej'02. Pol. Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Prace Naukowe, Monografie, Konferencje z. 10. Gliwice 2002.
16. Aho M., Ferrer E.: Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass. Fuel 84 (2005) 201–212.
17. Kalisz S., Pronobis M.: Investigations on fouling rate in convective bundles of coal fired boilers in relation to optimisation of sootblower operation. Fuel, Volume 84, Issues 7-8, May 2005, Pages 927-937.
18. Umwelterklärung 2001 für das Kraftwerk Timelkam (Internet).
19. Umwelterklärung 2001 für das Kraftwerk Riedersbach (Internet).

MOŽNOSTI VYUŽITÍ BIOMASY PŘI VÝROBĚ SMĚSNÝCH BRIKET

THE POSSIBILITIES OF USING BIOMASS TO PREPARE MIXED BRIQUETTES

Autoři: Ing. Silvie Riedlová¹, Ing. Iva Pečtová¹, Ing. Pavel Sedláček²,
Prof. Ing. Peter Fečko CSc.¹

¹VŠB TU Ostrava,
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava Poruba
peter.fecko@vsb.cz

²VÚHU, a.s.,
Budovatelů 2830, 434 37 Most
sedlacek@vuhu.cz

Abstrakt: Cílem tohoto příspěvku je ověření možností použití vysokosírného uhlí a biomasy jako složky do směsných briket, určených pro spalování ve zdrojích malých výkonů. V rámci prací bylo připraveno několik vzorků, které se lišily poměrným zastoupením biomasy a uhlí. V rámci spalovacích zkoušek byly měřeny emise oxidů síry a porovnány s emisemi síry při spalování běžných tříděných uhelných druhů. Cílem prací bylo prokázat možnost použití takto připraveného paliva pro spalování v roštových kotlích malých výkonů.

Klíčová slova: biomasa, brikety, energetický št'ovík, spalování

1. Úvod

V současné době se světová spotřeba energie neustále zvyšuje. Energetická náročnost veškerých odvětví hospodářství narůstá a zatěžuje emisemi životní prostředí. Při výrobě energie se na celkovém množství podílí až z 84 % fosilní paliva (uhlí, plyn, ropa).

Novými trendy ve výrobě paliv pro uhelné kotle o malých tepelných výkonech, na kterých jsou spalovány tříděné druhy a které jsou často největšími lokálními producenty nežádoucích emisí, by se měla stát vhodná kombinace hnědého uhlí a biomasy. Zpracováním vhodného odsiřovacího aditiva do připravené směsi, a jejím přetvořením do tvaru briket vhodných rozměrů, se získá nový typ aditivovaného hnědouhelného paliva, které je možno za optimálních podmínek spalovat v určitých spalovacích zařízeních za dodržení platných emisních limitů (zejména SO₂).

Biomasa, neboli rostliny, které se pěstují pro jiné účely než získání potravin a krmiv, jsou nazývány technické plodiny. Pro technické plodiny, které se pěstují za účelem získání energie, se vžil název energetické plodiny. Výsledným produktem energetických plodin jsou biopaliva (fytopaliva), která mohou být tuhá (brikety), tekutá (rostlinné oleje, bionafta) nebo i plynná (bioplyn). Z hlediska energetické bilance představují tuhá fytopaliva nejvyšší energetickou účinnost využití biomasy. Technologie výroby směsných paliv byla již v minulosti ověřena a pro výrobu byla použita technologie briketování na prstencovém lisu s plochou maticí.

2. Shrnutí provedených zkoušek

Z provedených zkoušek vyplývá, že je možné připravit brikety s určitým podílem biomasy. Cílem prací bylo prokázat, zda je možné připravit palivo takových parametrů, aby mohlo konkurovat tříděným druhům uhlí, mohlo být spalováno na spotřebiči, který je běžně určen pro spalování tříděných druhů a dosáhlo se vyššího stupně odsíření, než v případě použití aditivovaných tříděných druhů. Spalovací zkoušky proběhly ve Výzkumném Energetickém centru při Vysoké škole báňské v Ostravě.

Pro ověření vlastností briket při spalování bylo rozhodnuto připravit brikety ze dvou druhů vstupního uhlí, jednak z mletého hruboprachu Hp1 a dále z mletého ořechu o2.

Z obou druhů uhlí byly připraveny brikety na bázi:

1. uhlí a vápenného hydrátu,
2. uhlí, vápenného hydrátu a vápenec,
3. uhlí, biomasy-obilné slámy a vápenného hydrátu,
4. uhlí, biomasy-energetického šťovíku a vápenného hydrátu.

Ze zmíněných dvou typů biomasy (slámy a šťovíku) byly úspěšně vyrobeny brikety s 10% přídavkem biomasy a ze dvou typů mosteckého mletého uhlí.

U vstupního uhlí byl odebrán vzorek pro stanovení celkové vody. Podobně byl zjištěn obsah celkové vody u vzorků obou druhů biomasy. Obsah vody v uhlí a biomase je nutný pro výpočet množství přidávané vody k zajištění vlhkosti. Celkem bylo tedy připraveno osm vzorků paliva dle receptur, uvedených v následující tab. 1. U takto vyrobených briket bylo provedeno stanovení základního technologického rozboru.

Tab.1 Receptury briket

Označení	Druh uhlí	Uhlí díly	Váp. hydrát	Vápenec	Sláma	Šťovík
Brikety 1	hruboprach	100	6	0	0	0
Brikety 2	hruboprach	100	6	4	0	0
Brikety 3	hruboprach	100	6	0	10	0
Brikety 4	hruboprach	100	6	0	0	10
Brikety 5	Ořech 2	100	6	0	0	0
Brikety 6	Ořech 2	100	6	4	0	0
Brikety 7	Ořech 2	100	6	0	10	0
Brikety 8	Ořech 2	100	6	0	0	10

Tab.2 Základní technologický rozbor vyrobených briket

označení vzorku	W ^a %	W _t ^r %	A ^r %	A ^d %	Q _s ^d MJ/kg	Q _s ^{daf} MJ/kg	Q _i ^r MJ/kg	Q _i ^d MJ/kg	Q _i ^{daf} MJ/kg	S ^d %	H ^{daf} %
čisté uhlí	6,94	17,02	4,21	5,07	31,04	32,7	24,34	29,86	31,45	1,28	5,71
Brikety 1	8,05	18,85	12,4	15,29	25,97	30,66	19,78	24,96	29,46	1,52	5,3
Brikety 2	7,51	19,86	14,3	17,89	24,67	30,04	18,51	23,71	28,88	1,48	5,3
Brikety 3	7,62	21,67	12,14	15,5	24,97	29,56	18,16	23,87	28,25	1,54	6,0
Brikety 4	6,93	18,07	11,65	14,22	25,37	29,57	19,47	24,32	28,35	1,39	5,6
Brikety 5	6,43	19,21	9,32	11,54	27,93	31,57	21,19	26,82	30,32	1,05	5,7
Brikety 6	6,39	17,7	10,83	13,16	26,96	31,05	20,84	25,86	29,78	1,03	5,8
Brikety 7	6,18	15,69	9,4	11,15	27,09	30,49	21,48	25,94	29,19	1,03	6
Brikety 8	6,18	16,27	1,78	2,13	27,21	27,8	21,45	26,1	26,67	0,92	5,2

V průběhu spalovací zkoušky byla pozorována (u všech vzorků briket) tvorba spečenců ve spalovací retortě, což bylo doprovázeno snížením obsahu O₂ ve spalínách

(zvýšení tlakové ztráty vrstvy paliva) a následně zvýšením tvorby CO jako složky nedokonalého spalování. Při spalování vzorku č. 7, kdy byla jako biomasa použita obilná sláma došlo k vytvoření spečence, jak je patrné na obrázku č.1.

Tab.3 Účinnost odsíření u jednotlivých vzorků

Palivo	SO ₂ [mg.m ⁻³]	účinnost odsíření[%]
Brikety 1	2867	-
Brikety 2	2389	-
Brikety 3	2387	-
Brikety 4	2446	-
čisté uhlí	2368	-
Brikety 5	1544	34,8
Brikety 6	1354	42,8
Brikety 7	1736	26,7
Brikety 8	1482	37,4



Obr. 1 Problémy se spékáním popela při spalování briket s příměsí slámy

3. Ověření použití vysokosirných druhů uhlí a vyššího poměrného zastoupení biomasy

Cílem prováděného výzkumu bylo především ověřit možnost použití biomasy, konkrétně její přiměřené množství pro dosažení snížení emisí oxidů síry při spalování. Z úvodních výsledků vyplývá, že toto palivo je možné připravit. Cílem dalšího postupu prací bylo zvýšit obsah biomasy v palivu a použít více sirné uhlí. Celkem bylo připraveno 17 vzorků s různými obsahy biomasy a uhelné složky, které se lišily především vstupní vlhkostí a přídavným pojivem. Při přípravě těchto vzorků byly použity různé typy pojiv na bázi škrobů, styrenů a jiných přírodních látek. Důvod

rozmanitosti pojivových přísad spočíval v ověření optimalizace procesu lisování, resp. snížení energetických nároků s cílem zachování optimálních výstupních parametrů. Tyto vlivy byly sledovány, nejsou však předmětem tohoto příspěvku. Na základě těchto výsledků bylo připraveno palivo dle receptury uvedené v tabulce č.4

Tab. 4 Složení briket pro spalovací zkoušky

Vzorek č.1	
Složka	[% hm.]
Hnědé uhlí	45,05
Energetický šťovík	45,05
Vápenný hydrát	2,70
Voda + pojivo	17,27

Pro potřeby zkoušek bylo vybráno hnědé uhlí z produkce Mostecké uhelné společnosti, právní nástupce, a.s., jehož rozbor je uveden v následující tabulce č.5.

Tab.5 Základní technologický rozbor uhlí

označení vzorku	W ^a	W _t ^r	A ^r	A ^d	Q _s ^d	Q _s ^{daf}	Q _i ^r	Q _i ^d	Q _i ^{daf}	S ^d	S ^r	H ^{daf}
	%	%	%	%	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	%	%	%
uhlí	10,13	18,80	3,98	4,90	30,50	32,07	23,11	29,04	30,54	1,87	1,52	7,03

Na základě všech dostupných a zpracovaných údajů bylo přistoupeno k ověření výroby nového typu ekologického paliva spalovacími zkouškami.

Pro přípravu směsných briket bylo jako vstupní uhlí použito uhlí s vysokým obsahem síry, jehož výsledky základního technologického rozboru jsou uvedeny v tabulce č. 5. Uhlí bylo odebráno na úpravně uhlí Komořany před výrobou tříděných druhů (tj. ořech, kostka). V tabulce č. 6 je uveden základní technologický rozbor šťovíku.

Tab.6 Technologický rozbor šťovíku

Sample	Basic analysis							Elementery analysis					
	W ^a	A ^d	Q _s ^d	Q _s ^{daf}	Q _i ^d	Q _i ^{daf}	S ^d	C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	O ^{daf}	S ^{daf}	CO ₂ ^a
	%	%	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg	%	%	%	%	%	%	%
	8,83	7,29	17,98	19,40	16,79	18,10	0,21	49,40	5,97	0,52	43,89	0,22	<0,01

V průběhu spalovací zkoušky nebyl zjištěn závažnější problém se spalováním paliva. Z tabulky č.7 je patrné, že při spalování samotného uhlí se emise SO₂ pohybovaly kolem 3.500 mg.m⁻³. V případě spalování vzorku č.1 dosahovaly emise SO₂ cca 1.328 mg.m⁻³, což odpovídá odsíření 62,4 %. U tohoto vzorku byla naměřena vysoká koncentrace emitovaného CO, která je však v souladu s poznatky o spalování biomasy, konkrétně šťovíku.

Tab. 7 Základní technologické rozborů vyrobených briket

palivo	CO [mg.m ⁻³ _n]	CO ₂ [g.m ⁻³ _n]	SO ₂ [mg.m ⁻³ _n]	NO _x [mg.m ⁻³ _n]	účinnost odsíření [%]
hnědé uhlí	1 186	251	3 531	432	-
brikety vz.č.1	5 318	263	1 328	313	62,4



Obr. 2 Násypka kotle Viadrus se vzorkem č.1

4. Závěr

Výsledky experimentálních prací prokázaly, že je možné vyrobit ekologické palivo na bázi vysokosírných hnědých uhlí a biomasy, při jehož spalování jsou dodrženy emisní limity, dané platnou legislativou, především pro oxidy síry.

V průběhu řešení byly ověřeny možnosti použití tříděných druhů pro výrobu nového ekologického paliva. Jako nevhodnější technologie pro možnou výrobu byla ověřena briketace na prstencovém lisu s plochými matricemi. Dále byla vytipována, laboratorně i provozně ověřena surovinová základna přídatných složek do nového typu ekologického paliva, kterými byly různé typy biomas a aditivační přísady. V průběhu prací byl kladen důraz na minimalizaci nákladů za současného dosažení nejvyšších užitečných vlastností nově vyvíjených typů paliv. Při provozních spalovacích zkouškách bylo dosaženo stupně odsíření přesahujícího hodnotu 60 %. Za hlavní přínosy tohoto řešení je možno považovat využití těžko odbytelných jemnozrnných frakcí uhlí, vznikajících při úpravě kvalitních druhů hnědých uhlí, využití obnovitelných zdrojů energie na bázi biomasy a využití nových typů výrobků na stávajících moderních typech spalovacích zařízení, bez nutnosti jejich konstrukčních úprav.

Práce vznikla za finanční podpory GAČR č. 101/03/H064.

Literatura

1. SEDLÁČEK, P., FEČKO, P., VALEŠ, J., ČABLÍK, V. Ověření vhodnosti mletého hruboprachu a ořechu 2 pro výrobu ekologických pelet, Sborník.: *Technika ochrany prostředí*, Častá Papiernička, Slovensko, 24-25.6.2003, s.53-59, ISBN80-227-1989-X.
2. SEDLÁČEK, P., FEČKO, P., VALEŠ, J., ČABLÍK, V. Ekologické pelety z hnědého uhlí a biomasy, Sborník.: *Recyklace odpadů VII*, VŠB-TU Ostrava, 10.10.2003, s.45-48, ISBN 80-248-0245-7.
3. SEDLÁČEK, P., MAČEK, S., ŠAFÁŘOVÁ, M., KUSÝ, J. Využití pyrolýzy odpadů pro zvýšení užitečných vlastností paliv ČR, Sborník *Mezinárodní konference Recyklace odpadů VIII*, s. 345-350, ISBN 80-248-0560-X.
4. SEDLÁČEK P., VALEŠ J., MAČEK, S. Výroba nového typu paliva z uhelné hmoty a odpadních produktů vzniklých při zpracování autovraků, Publikace.: *Zpravodaj Hnědé Uhlí 3/2004*, s.17-20, ISSN 1213-1660
5. SEDLÁČEK P., VALEŠ J., ZÁVADA J., RIEDLOVÁ S. Production of a new type of fuel from coal mass and waste products from wreck car disposal. Sborník: *8th Conference on Environment and Mineral Processing VŠB-TU Ostrava*, 24.-26.6.2004, Ostrava, 2004, s.441-446, ISBN 80-248-0559-6.
6. SEDLÁČEK, P. Výroba ekologického paliva na bázi uhelné hmoty, biomasy a odpadních látek: *disertační práce*. VŠB TU Ostrava, 2005. 116 s.

WYKORZYSTANIE BIOMASY W PROCESIE SPALANIA W KOTLE FLUIDALNYM

BARK COMBUSTION IN FLUIDIZED BED BOILER

Robert Sekret, Ph.D.

Czestochowa University of Technology
Dabrowskiego 69, 42-200 Czestochowa, Poland
rsekret@is.pcz.czest.pl

Abstrakt: Development of fluidized bed combustion technology seems to be a very good perspective to utilisation of low quality fuel such as biomass. Its use is especially interesting for reduction of CO₂ and SO₂ emissions. In 1997 OKF-40 BFB boiler in Ostoleka Heat and Power Plant was put in operation. This unit was designed to burn wet bark containing 55-60 % water. Depending on the contains moisture in fuel maximum steam flow is 11-13 kg/s. It is solution to problem of utilisation of the bark present production and the disposal of existing bark's storage in INTERCEL S.A., which is situated near The Power Plant. Use the bark as fuel along with fluidized bed technology will bring the ecological effects as: the following: SO₂ reduction - to 280 000 kg/y, NO_x reduction - to 100 000 kg/y, CO₂ reduction - to 46 000 000 kg/y and reduction of used hard coal reduction - to 23 000 000 kg/y.

Klíčová slova: biomasa, fluidalne spalanie, modernizacja

1. Wstęp

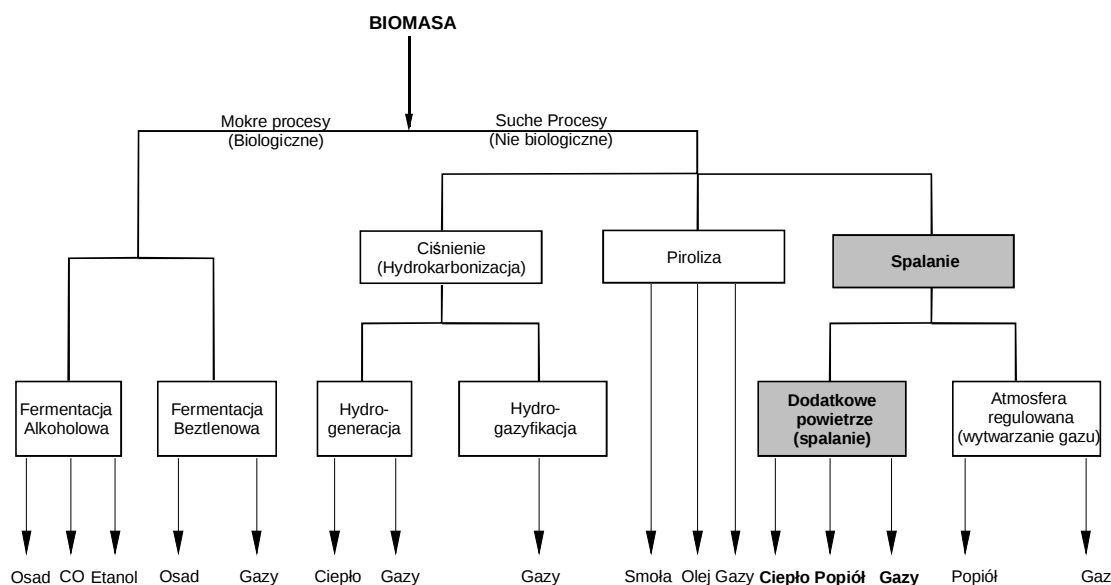
Wykorzystanie biomasy jako paliwa w procesach wytwarzania energii jest dostrzegane w wielu krajach. Biomasa po węglu i ropie naftowej jest największym pierwotnym źródłem energii na świecie. Można do niej zaliczyć między innymi: drzewo i odpady drzewne, słomę czy wyłoki z trzciny cukrowej. Jednakże występowanie biomasy ma charakter regionalny i w wielu wypadkach jej potencjalne użycie jest ograniczone względami ekonomicznymi.

W naszym regionie jednym z podstawowych składników biomasy jest drewno i jego odpady. Można je podzielić na trzy kategorie:

- leśne odpady drzewne,
- odpady drzewne z zakładów przemysłowych,
- miejskie odpady drzewne.

Należy również oczekiwać dalszego wzrostu znaczenia drewna w przypadku zwiększenia jego pozyskania ze specjalnych plantacji energetycznych na nieużytkach. Ze względu na stosunkowo niską zawartość siarki w odpadach drzewnych (maksymalnie do 0.1 %), podczas ich spalania emisja SO₂ jest znacznie mniejsza niż ze spalania węgla. Biomasę charakteryzuje ponadto zerowy bilans emisji dwutlenku węgla, który jest związany z zamknięciem obiegu C-CO₂-C. Jak wskazują przeprowadzone analizy [1], wprowadzenie procesów oddzielania i oczyszczania spalin z CO₂ do obecnie rozwijanych systemów wytwarzania energii wiąże się niestety ze spadkiem sprawności oraz ze wzrostem kosztów wytwarzania energii. Ponadto metody te na dzień dzisiejszy nie posiadają wystarczającego potencjału do zastosowania w przemyśle.

Skale problemu może również spotęgować wprowadzenie podatku węglowego. Dlatego też rozwój technologii spalania biopaliwa jest znakomitą perspektywą, szczególnie w odniesieniu do redukcji emisji CO₂. Oprócz aspektów środowiskowych na atrakcyjność biopaliwa może również wpłynąć niska cena w porównaniu do paliw kopalnych, jednakże pod warunkiem traktowania tego paliwa jako materiał odpadowy. Do wytwarzania energii poprzez użycie biomasy można wykorzystać szereg procesów. Jak widać z przedstawionego na rysunku 1 schematu można do nich zaliczyć spalanie oraz termiczną czy biochemiczną użycie. Wybór najbardziej odpowiedniej technologii zależy głównie od rodzaju biomasy, która ma być wykorzystana w danym procesie, dostępności technologii oraz względów ekonomicznych.



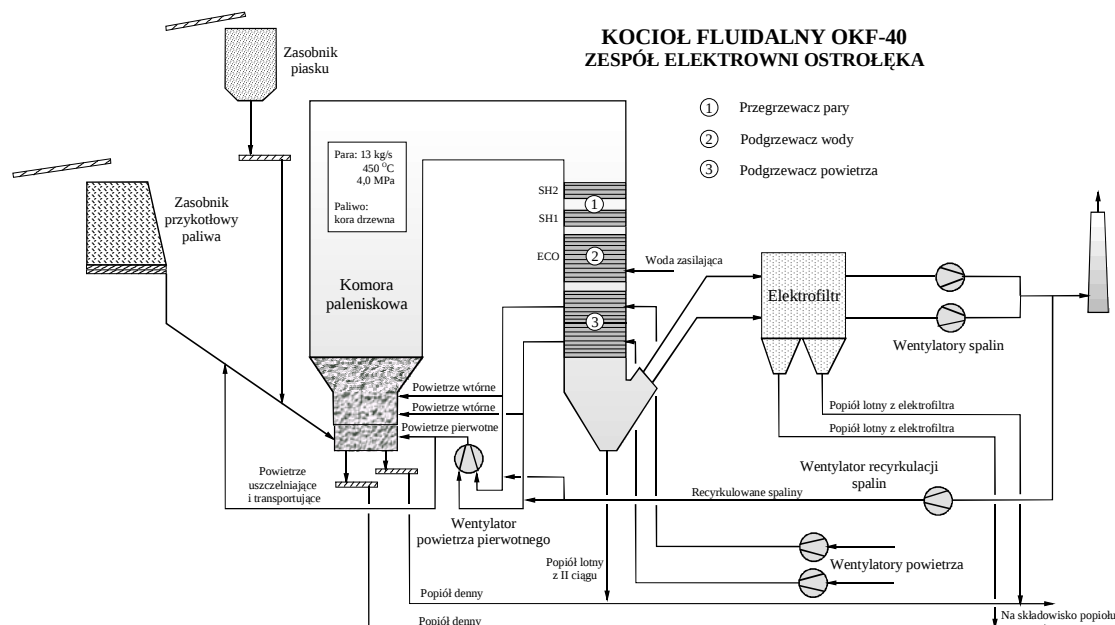
Rys.1. Podział procesów użycia biomasy [2].

Warunkiem korzystnego spalania biomasy jest właściwa konstrukcja komory paleniskowej i odpowiednio prowadzony proces spalania. Na dzień dzisiejszy jedną z najbardziej odpowiednich technologii użycia tego biopaliwa jest spalanie w warstwie fluidalnej. Zaletą jej są: wysoka dyspozycyjność, szeroki zakres obciążeń, możliwość spalania paliw niskojakościowych o wysokiej zawartości wilgoci i wysokiej zawartości części lotnych, wysoka sprawność procesu spalania, niski poziom emisji NO_x. Warstwa fluidalna daje również możliwość jednoczesnego spalania różnych typów paliw. Przykładem tego jest współspalanie biomasy z węglem lub innymi paliwami odpadowymi (torf, słoma czy osady ściekowe). Dlatego też w wielu krajach biomasa jest wykorzystywana jako alternatywne i odnawialne źródło energii. Do krajów tych należą między innymi [1]: USA 4%, Finlandia 15%, czy Szwecja 25%. Kotły z pęcherzykową warstwą fluidalną (BFB) zaczęto wykorzystywać do wytwarzania energii poprzez spalanie biomasy już dwadzieścia lat temu. Wczesne urządzenia tego typu były raczej małe i posiadały wydajność pary od 10 do 20 kg/s. Z biegiem lat rozmiary kotłów wzrosły znacząco. Ich obecna wydajność pary wynosi ponad 100 kg/s. Praca starszych kotłów fluidalnych spalających biomasę była oceniana na niskim poziomie ze względu na erozję powierzchni wymiany ciepła. Nowoczesne kotły nie posiadają tego typu problemów i mają wiele zalet w stosunku do tradycyjnego spalania biomasy w kotłach rusztowych. Atrakcyjną pod względem ekonomicznym możliwością powstawania nowych kotłów BFB jest modernizacja istniejących kotłów rusztowych czy pyłowych. Pierwszy kocioł fluidalny w Polsce, spalający biomasę na skalę przemysłową,

został oddany do eksploatacji w 1997 roku w Elektrociepłowni „Ostrołęka A”. Powstał on w wyniku modernizacji kotła pyłowego typu OP-100. Kocioł OKF-40 został przystosowany do spalania kory drzewnej. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiona jego charakterystyka techniczna oraz efekty techniczne i ekologiczne jakie zostały uzyskane podczas jego eksploatacji.

2. Opis kotła OKF-40

Układ technologiczny kotła OKF-40 został przedstawiony na rysunku 2, natomiast dane techniczne zostały zawarte w tabeli 1.



Rys.2. Układ technologiczny kotła fluidalnego OKF-40.

Tabela 1. Dane techniczne kotła OKF-40.

Parametr	Jedn.	Wielkość
Ciśnienie robocze	MPa	4,0
Ciśnienie ruchowe	MPa	3,8
Temperatura pary przegrzanej	°C	450
Temperatura wody zasilającej	°C	147
Normalna wydajność kotła	t/h	36
Maksymalna trwała wydajność kotła	t/h	47
Minimalna trwała wydajność kotła	t/h	22
Powierzchnia ogrzewalna kotła	m ²	721
Powierzchnia ogrzewalna podgrzewacza wody	m ²	477
Powierzchnia ogrzewalna przegrzewacza pary	m ²	515
Powierzchnia ogrzewalna podgrzewacza powietrza systemu Ljungstoem	m ²	2 x 2500
Wymiary bloku kotłowego	m	11 x 8 x 19,5
Część dolna komory paleniskowej		
• Głębokość paleniska	mm	6050
• Szerokość paleniska	mm	6500
• Szerokość dna dyszowego	mm	6100
• Głębokość dna dyszowego	mm	4190
• Ilość dysz wylotowych	sztuk	1261
• Ilość odprowadzeń popiołu	sztuk	2

Kocioł ten wytwarza parę o wydajność 13 kg/s, temperaturze 450 °C i ciśnieniu 4.0 MPa. Ciepło jest przejmowane od spalin w chłodzonej wodą komorze paleniskowej. Za paleniskiem spaliny są schładzane w ciągu konwekcyjnym, w którym umieszczone są: przegrzewacz pary, podgrzewacz wody i obrotowy podgrzewacz powietrza. Następnie spaliny są odpylane w elektrofiltrze i usuwane za pomocą wentylatorów wyciągowych do komina. Palenisko fluidalne z warstwą pęcherzykową (BFB), produkcji Foster Wheeler, składa się ze stalowej konstrukcji wyłożonej materiałem ogniotrwałym, stanowiącej dolną część komory spalania. Powietrze pierwotne służące do fluidyzacji warstwy jest dostarczane za pomocą systemu dysz usytuowanych w dnie paleniska. Fluidyzacja jest osiągana poprzez przedmuchiwanie powietrza przez materiał warstwy leżący na ruszcie. Założona prędkość fluidyzacji na poziomie 1.0 - 1.5 m/s utrzymuje materiał warstwy w komorze paleniskowej, eliminując jego unoszenie wraz ze spalinami do ciągu konwekcyjnego. Wysokość warstwy bez fluidyzacji wynosi około 0.5 m., natomiast podczas pracy przy pełnym obciążeniu kotła ma wysokość 1.2 m. Część powietrza fluidyzacyjnego jest kierowana do punktu zasilania w paliwo w celu wytworzenia odcinającej kurtyny powietrznej, chłodzenia i transportu paliwa. Właściwy przebieg procesu spalania zapewnia powietrze wtórne, dostarczane systemem króćców umieszczonych w ścianach bocznych komory spalania. Daje to możliwość dodatkowego „dopalania” paliwa oraz zmniejszenia ilości powstających w komorze tlenków azotu. Z linii powietrza wtórnego pobierane jest ponadto powietrze zasilające olejowy palnik rozruchowy. Materiał warstwy stanowi piasek i popiół pochodzący z zawartości spalanej kory. Jednak zasadniczą część stanowi piasek, którego wielkość cząstek powinna mieścić się w granicach: 100 % < 1,2 mm; 80 % < 0,8 mm. Paliwo jest dostarczane ze składowiska do niewielkiego zasobnika buforowego, zlokalizowanego przy bocznej ścianie kotła. Zbiornik ma pojemność 14 m³ i zapewnia pracę kotła przez 15-30 minut. Na wlocie do paleniska jest zamontowana obrotowa zasuwą zabezpieczająca przed przepływem wstecznym spalin. Paliwo dostając się do kanału zsypowego miesza się z powietrzem i wpada do komory paleniskowej. Również poprzez ten sam kanał zasypowy paliwo podawany jest piasek uzupełniający materiał złoża. Jako paliwo pomocnicze i rozpałkowe dla palnika rozruchowego, wykorzystano olej opałowy, a inicjujące zapłon palnika - gaz propan. Popiół z kotła usuwany jest zarówno jako popiół lotny i popiół denny. Ze względu na dużą lotność popiołu zawartego w paliwie jest on wynoszony z komory paleniskowej wraz ze spalinami. Odbierany jest z leji zsypowych elektrofiltra i ciągu konwekcyjnego kotła. Zawiera on prawie 100 % popiołu zawartego w paliwie. W celu usunięcia z warstwy gruboziarnistych części niepalnych takich jak: kamień i metale oraz innych zanieczyszczeń, okresowo również odprowadzany jest popiół denny. Jest on usuwany przez dwa spusty znajdujące się w dnie dyszowym. Poniżej spustów znajdują się dwa chłodzone wodą wygarniacze ślimakowe.

3. Paliwo

Paliwem podstawowym kotła OKF-40 jest kora drzewna. Jest one dostarczane z Zakładu Celulozowo-Papierniczego INTERCELL SA, który położony jest w pobliżu Elektrociepłowni. Jest to dość ważny element, gdyż ze względu na małą gęstość usypową odpadów drzewnych opłacalność ich transportu jest ściśle związana z odległością od miejsca powstawania. W tabeli 2 została przedstawiona analiza biopaliwa spalanego w kotle fluidalnym oraz niektóre własności węgla energetycznego spalanego w Elektrociepłowni. Jak widać kora drzewna w stosunku do węgla jest paliwem o ponad pięciokrotnie mniejszej zawartości popiołu. Ilość siarki jest aż

dziewięć razy mniejsza. Jest to bardzo ważna cecha biomasy, gdyż w bardzo znacząco rozwiązuje problem odsiarczania spalin. Ważnym elementem jest niezmiennosc sortymentowa paliwa, gdyż znaczne wahania stopnia rozdrobnienia paliwa mogą być przyczyną problemów związanych z podawaniem kory drzewnej do kotła. Na ocenę biomasy jako paliwa wpływa w istotny sposób również wilgotność, która powinna mieścić się w przypadku kotła OKF-40 w przedziale od 55 do 60 %, przy średniej jej zawartości na poziomie 58 %. Zawartość wilgoci bowiem bezpośrednio wpływa na regulację procesu spalania i mocy kotła.

Tabela 2. Własności kory drzewnej i węgla kamiennego - stan suchy [3].

Zawartość w paliwie			Kora drzewna	Węgiel energetyczny
Węgiel	C	%	46,81	-
Wodór	H	%	5,73	-
Tlen	O	%	42,61	-
Azot	N	%	0,29	0 - 2
Siarka	S	%	0,10	0,9
Popiół		%	4,46	25
Wartość opałowa		MJ/kg	17,4	20,5
Granulacja		mm	100% < 40,0 mm	-

Tabela 3. Analiza popiołu powstałego z kory drzewnej i węgla kamiennego.

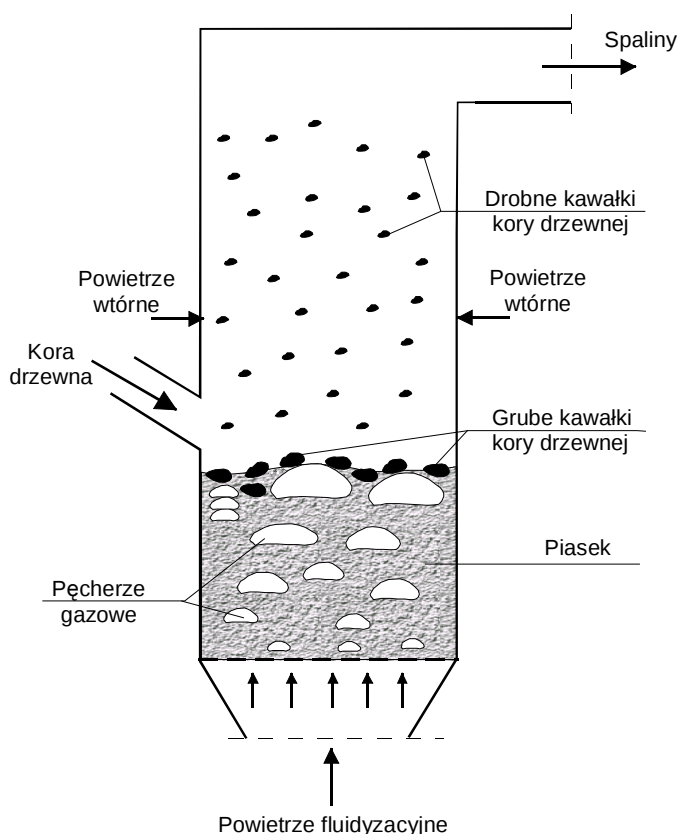
Zawartość w popiele [%]	Kora drzewna	Węgiel kamienny
SiO ₂	22,3	40-55
Al ₂ O ₃	5,6	13-30
TiO ₂	0,27	0,6-1,9
P ₂ O ₅	3,34	0,2-0,8
SO ₃	3,93	0,5-6
CaO	40,8	2-12
MgO	4,36	1,5-8
Na ₂ O	2,15	0,3-0,7
K ₂ O	4,16	1,7-3,8

Wybór technologii spalania i związane z tym warunki termiczne oraz skład popiołu zawartego w paliwie prowadzi do zróżnicowania zawartości niektórych związków chemicznych w popiele. Masa odpadów paleniskowych zależy głównie od masy spalane go paliwa, rodzaju paliwa, a przede wszystkim od zawartości w nim popiołu i siarki. Typowy skład popiołu przedstawiono w tabeli 3. Zawiera ona analizę popiołu powstałego ze spalania kory drzewnej w kotle OKF-40 oraz z węgla energetycznego z kotła pyłowego. Głównymi związkami w popiele z kory drzewnej są CaO i SiO₂, których udział wynosi ponad 60 %. Zawartość pozostałych tlenków jest znacznie mniejsza. Natomiast w popiele powstałym ze spalania węgla kamiennego podstawowymi związkami są glinokrzemiany Al₂O₃ i SiO₂, które razem stanowią od 60 do 80 % masy popiołu. Znaczne ilości występują również CaO, Fe₂O₃, MgO oraz SO₃.

4. Proces spalania

Proces spalania cząstek kory drzewnej schematycznie pokazano na rysunku 3. Jak widać spalanie odbywa się ponad powierzchnią warstwy. Jest to spowodowane dużą różnicą gęstości paliwa (600-800 kg/m³) i materiału warstwy (2500 kg/m³). Dlatego też części drobniejsze kory drzewnej spalają się wzdłuż wysokości komory paleniskowej

nad warstwą, natomiast cząstki cięższe spalają się w obrębie górnej części warstwy. Dla odpowiedniego prowadzenia procesu spalania temperatura warstwy powinna być utrzymywana w granicach $750 \div 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 4 zostały przedstawione parametry spalania kotła OKF-40. Jak widać kocioł ten został zaprojektowany do spalania kory drzewnej, której wilgotność nie przekracza 60 %. Zależnie od wilgotności paliwa maksymalna wydajność kotła waha się w zakresie od 11 do 13 kg/s przy utrzymanej sprawności obliczeniowej na poziomie 84 %. Główne trudności jakie występują przy spalaniu biomasy są związane jednak z ich stosunkowo wysoką zawartością wilgoci. W przypadku spalania paliwa o wilgotności powyżej 60 % temperatura warstwy spada poniżej założonego minimalnego poziomu $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$. W takiej sytuacji niezbędne jest podanie paliwa wspomagającego. Podtrzymanie procesu spalania wykonywane jest wówczas przez załączenie palnika olejowego. Jednym z rozwiązań poprawy tej sytuacji jest również podniesienie temperatury powietrza podawanego do komory paleniskowej. Jest to realizowane poprzez podgrzewanie powietrza w dwóch regeneracyjnych podgrzewaczach powietrza typu Ljungstrom. Z drugiej strony podając paliwo o znacznie niższej zawartości wilgoci temperatura warstwy będzie rosła powyżej $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$. W takim przypadku od 5 do 10 % nominalnego przepływu spalin jest recyrkulowanych z ujęcia za elektrofiltrem i mieszanie z powietrzem pierwotnym podawanym do fluidyzacji. Będzie to powodować obniżanie przepływu tlenu do warstwy i spowalnianie procesu spalania. W wyniku tak przeprowadzonej regulacji jest osiągane obniżenie temperatury w komorze paleniskowej.



Rys.3. Proces spalania cząstek kory drzewnej w pęcherzykowej warstwie fluidalnej.

Tabela 4. Parametry spalania.

Parametr	Jednostka	Wilgotność kory [%]		
		55	58	60
Produkcja pary	kg/s	13,0	12,0	11,0
Zużycie paliwa	kg/s	6,4	6,5	6,5
Ilość powietrza do spalania	Nm ³ /s	16,2	15,3	14,6
Ilość spalin	Nm ³	22,3	21,7	21,0
Zawartość O ₂ (w suchych spalinach)	%	4,9	4,9	4,9
Zawartość CO ₂ (w suchych spalinach)	%	15,8	15,8	15,8
Zawartość popiołu w spalinach	g/Nm ³	6,2	6,0	6,2
Sprawność obliczeniowa	%	84,7	84,3	83,7

5. Emisja zanieczyszczeń

Ograniczanie emisji NO_x w kotle fluidalnym OKF-40 jest realizowane poprzez utrzymanie niskiej temperatury spalania (750-900 °C) oraz rozdział powietrza na pierwotne i wtórne. Realizuje się w ten sposób dwuetapowy proces spalania składający się z gazyfikacji i utleniania cząstek paliwa w komorze paleniskowej. Gwarantowana emisja NO_x wynosi 230 g/GJ. W tabeli 5 zostały zawarte wielkości emisji otrzymane podczas pomiarów gwarancyjnych [4]. W trakcie przeprowadzonych badań wielkość emisji NO_x w zależności od obciążenia kotła wyniosła od 90 do 119 g/GJ. Jak widać wartości te są znacznie niższe od wielkości gwarantowanej. Jest to spowodowane stosunkowo niską temperaturą (765-833 °C) panującą podczas spalania biomasy o wysokiej zawartości wilgoci. Znaczącym czynnikiem wpływającym na wielkość emisji NO_x ma również ilość azotu w paliwie. Nie mniej jednak stosowanie paliwa gwarantowanego nie będzie powodować wzrostu emisji tego gazu powyżej wartości gwarantowanej. Również niewielka zawartość siarki w korze drzewnej jest efektem bardzo niskiej emisji SO₂, która wynosi od 75 do 128 g/GJ. Długi czas przebywania cząstek paliwa w komorze paleniskowej oraz dobre wymieszanie paliwa wtórnego z lotnymi produktami zgazowania powoduje niską emisję CO, na poziomie 10-350 g/GJ oraz niską stratę niecałkowitego spalania. Emisję pyłów redukuje elektrofiltr, dając stężenie zapylenia spalin wylotowych na poziomie 8-12 mg/Nm³.

Tabela 5. Emisje kotła OKF-40.

Związek	Wielkość emisji	
	[g/GJ]	[ppm]
NO _x *	90-119 (230 **)	32-73
SO ₂	75-128	30-56
CO	10-350	6-309
Pył	8-12 (250 **) [mg/Nm ³]	

* w przeliczeniu na NO₂,

** wartość gwarantowana.

6. Efekty techniczne i ekonomiczne

Modernizacja kotła OP-100 na kocioł fluidalny OKF-40 umożliwiła uruchomienie kotła wyłączanego z ruchu przez Urząd Dozoru Technicznego. W tabeli 6 przedstawione zostały parametry kotła przed i po modernizacji. W wyniku przeprowadzonej modernizacji wydajność pary została obniżona o ponad 50 %, przy zachowaniu jej temperatury i ciśnienia na tym samym poziomie. W skutek zmiany paliwa zmniejszyła się ilość usuwanego popiołu. Ponadto inwestycja ta przyczyniła się do:

- wzrostu sprawności spalania o 5-7 %,
- możliwości prowadzenia elastycznej pracy kotła pod względem dostosowania jego obciążenia do aktualnego zapotrzebowania,
- możliwości spalania paliw niskojakościowych o zawartości wilgoci do 60%,
- utylizacji z bieżącej produkcji kory drzewnej i likwidacja istniejącego jej składowiska,
- obniżenia kosztów utrzymania kotła.

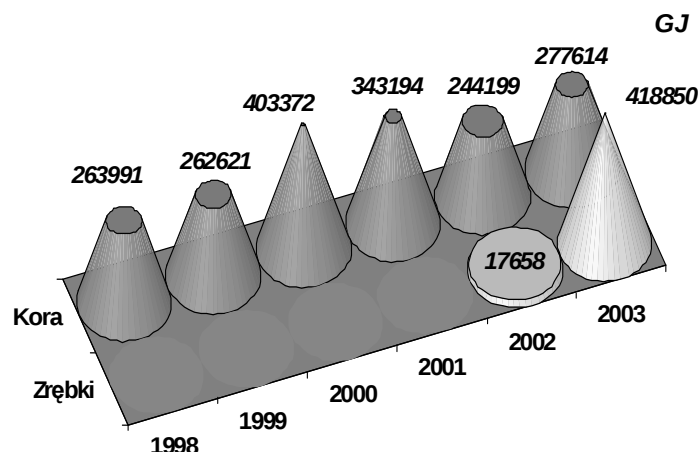
Kocioł OKF-40 umożliwia również czyste spalanie, które koresponduje z wymaganiami ochrony środowiska. Jego eksploatacja przyczyni się do obniżenia [3]:

- emisji SO₂ o 280 t/a,
- emisji NO_x o 100 t/a,
- emisji CO₂ z paliw kopalnych o 46 000 t/a,
- zużycia węgla kamiennego o 23 000 t/a.

Tabela 6. Parametry techniczne kotła przed i po modernizacji [3].

Parametr techniczny	Jednostka miary	Wartość	
		Poprzednia	Aktualna
Wydajność	t/h	100	43
Ciśnienie pary	MPa	4.0	4.0
Temperatura pary	° C	450	450
Temperatura wody zasilającej	° C	147	147
Moc cieplna obliczeniowa	MJ/s	76.5	37
Sprawność termiczna obliczeniowa	%	75 - 78	80 - 85
Wartość opałowa paliwa suchego	MJ/kg	21.6	17.4
Zużycie paliwa	t/h	6.05	21.85
Ilość usuwanego popiołu	t/h	1.2 - 1.5	0.05 - 0.1

Na rysunku 4 przedstawiono ilość ciepła wytworzoną w wyniku eksploatacji kotła OKF-40. Należy zauważyć, że od 2002 roku dzięki elastyczności paliwowej technologii fluidalnej [5-9] poza korą drzewną spalane są również zrębki. Drzewne.



Rys.4. Wykorzystanie biopaliw spalanych w kotle OKF-40 w latach 1998-2003 - .

7. Podsumowanie

Zastosowanie kotłów fluidalnych do spalania biomasy jest rozwiązaniem korzystnym pod względem ekonomicznym i środowiskowym. Przy zaostrzających się normach dopuszczalnych emisji zanieczyszczeń do atmosfery alternatywą dla istniejących kotłów rusztowych czy pyłowych może być modernizacja na kocioł fluidalny. Daje to możliwość bardziej efektywnego spalania biomasy będącej paliwem odpadowym.

Literatura

1. W.NOWAK, W.MUSKAŁA, R.SEKRET, A.SZYMANEK: *Analiza procesów ograniczenia i zagospodarowania CO₂ w elektrowniach węglowych*. III Krajowa Konferencja Energetyczna, Poznań -Kiekrz, s.111-118. (1997)
2. W.NOWAK, A.J.WANDRASZ: *Wykorzystanie biomasy jako alternatywnego źródła energii w piecu typu Gasifier-Combustor*. I Międzynarodowa Konferencja Paliwa z Odpadów'97, Ustroń, s. 219-226. (1997)
3. J.J. SULBIŃSKI, J. PALASEK: *Przystosowanie kotła OP-100 do opalania biopaliwem*. Branżowy Magazyn Przemysłowy-biuletyn Informacyjno-Reklamowy, Nr 13, s. 9-10. (1997)
4. Sprawozdanie z rozszerzonych pomiarów gwarancyjnych kotła fluidalnego OKF-40 w Elektrociepłowni Ostrołęka „A”, ENERGOPOMIAR Gliwice. (1997)
5. W. NOWAK, R. SEKRET. *Bark Combustion in a 40 MW_t Bubbling Fluidized Bed Boiler*. The 7th Polish-Danish Workshop on Biomass for Energy, Starbienino, Poland, 7-10 December, 2000.
6. W. NOWAK, R.SEKRET. *Fluidized bed combustion of cellulose industry wastes*. Paliwa z Odpadów tom. III, 2001.
7. W. NOWAK, R. SEKRET. *Wykorzystanie biomasy w procesie fluidalnego spalania węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 8, 2001.
8. W. NOWAK, R. SEKRET. *Emisje zanieczyszczeń gazowych w procesie fluidalnego spalania węgla brunatnego i biomasy*. Gospodarka Paliwami i Energią, nr 2, 2002.
9. R. SEKRET, W. NOWAK. *Impact of biomass on: CO, SO₂, NO_x emissions from CFB combustion of brown coal*. 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Estoril, Lisbon, Portugal, 02-05.04.2002.

POUŽITÍ DSC PRO MĚŘENÍ TEPELNÝCH TOKŮ PŘI PYROLÝZE ODPADNÍ BIOMASY

USING OF DSC FOR HEAT FLOWS MEASUREMENT DURING WASTE BIOMASS PYROLYSIS

Autoři: Ing. Marek Staf, Prof. Ing. Petr Buryan, DrSc.

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
Technická 5, 166 28, Praha 6 - Dejvice
marek.staf@vscht.cz

Abstrakt: Článek popisuje možnosti nasazení metody diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) jako prostředku umožňujícího kvantifikaci termických efektů podílejících se na procesu pyrolýzy odpadní biomasy. V příspěvku jsou formou tabulek a grafů shrnuty výsledky experimentů prováděných na vybrané skupině odpadních materiálů. Na základě naměřených hodnot byly učiněny některé závěry týkající se závislosti tepelné výměny na použitých podmínkách pyrolýzy.

Klíčová slova: biomasa, odpad, entalpie, diferenční skenovací kalorimetrie, tepelný tok

1. Hlavní cíl výzkumu

Stěžejním cílem zde popisovaných experimentů bylo kvantitativní zhodnocení příjmu a výdeje tepelné energie v průběhu pyrolýzy vybrané skupiny tuhých odpadů spadajících do skupiny odpadní biomasy. K tomuto účelu byla zvolena metoda diferenční skenovací kalorimetrie využívající přístroj DSC 131 firmy Setaram. Otázka entalpické bilance je řešena v rámci komplexního projektu zabývajícího se termickou konverzí odpadní biomasy na kapalná a plynná paliva za použití metody pomalé pyrolýzy za definovaných podmínek. Projekt má připravit podklady potřebné pro konstrukci nových provozních pyrolýzních jednotek, které budou sloužit k energetickému zužitkování vhodných odpadních materiálů.

2. Možnosti termoanalytických metod při výzkumu pyrolýzy

Různé techniky termické analýzy patří k základním laboratorním postupům umožňujícím přesně sledovat a zaznamenávat chování rozličných tuhých materiálů při ohřevu, a to jak za statických (izotermních), tak i za dynamických podmínek (užití teplotního programu). Z tohoto důvodu bývají metody TA velmi často nasazovány při výzkumu termického rozkladu odpadů. Za použití termogravimetrické analýzy (zkráceně TG či TGA) byl modelován např. průběh pyrolýzy předsušeného zeleninového odpadu z prodejen potravin. Testy probíhaly v inertní atmosféře v teplotním rozmezí 250 – 650 °C. Naměřené údaje byly porovnávány s přesně definovanými lignocelulozovými materiály, které plnily funkci standardů. Hlavním cílem experimentů bylo stanovení kinetiky pyrolýzního děje[4]. Jiná výzkumná práce se zaměřila na široké spektrum vzorků odpadní biomasy, na kterých byly prováděny pyrolýzní testy za použití metodiky TA. Rozklad biomasy byl konfrontován s termolýzou odpadních polymerů[5].

Podobně sloužila technika termogravimetrie ve spojení s FTIR k výzkumu pyrolýzy odpadů z výroby palmového oleje. Cílem tohoto výzkumu bylo jednak popsat průběh pyrolýzy uvedené odpadní suroviny a především posoudit možnosti její konverze na energeticky využitelný pyrolýzní plyn. Testován byl odpad o výhřevnosti 20 MJ/kg, obsahující 50 % hm. C, 7 % H a velmi malý podíl popela. Použitím metody TG bylo prokázáno, že testovaný odpad je velmi snadno rozložitelný, a to již při nízkých teplotách a malé ohřevové rychlosti. Oblast maximálního úbytku hmotnosti vzorků byla stanovena na 220 – 340 °C[7]. K podobným výsledkům vedl i výzkum prováděný na Delft University of Technology (Nizozemsko) zaměřený na použití metodiky TG při posuzování možností pyrolytického přepracování tuhých odpadů na ušlechtlejší formy paliv. Byly testovány jednak separované materiály, ale též jejich směsi[2].

Výzkumné pracoviště na University of Maryland Department of Mechanical Engineering (USA) použilo techniku TG a diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) pro výzkum pyrolýzy polymerních odpadů, jako prostředek při vývoji nových průmyslově použitelných tepelně-destrukčních zařízení. Výzkum se zaměřil na individuální testování vybraných majoritních složek vyskytujících se v tuhých odpadech. Byl zkoumán termický rozklad polyethylenu, polypropylenu, polystyrenu, polyvinylchloridu a celulózy za řízených chemických a teplotních podmínek[3]. Poněkud netypická je aplikace metod termické analýzy při studiu jiných způsobů nakládání s odpady, než je přímo jejich pyrolýza. Za zmínku stojí výzkum kinetiky termického rozkladu tuhého komunálního odpadu při jejich kompostování. Výzkum byl prováděn v Instituto de Quimica, Unesp-Araraquara-Sao Paulo (Brazílie). Při výzkumu sloužily metody TG, DTG a DSC k popisu kinetiky a termodynamického chování odpadní suroviny při termické degradaci. Jako vzorek sloužil odpad kompostovaný po dobu 132 dnů ve třech základních typech kompostérů. Takto připravené vzorky byly poté pyrolýzovány v inertní atmosféře za neizotermních podmínek[1].

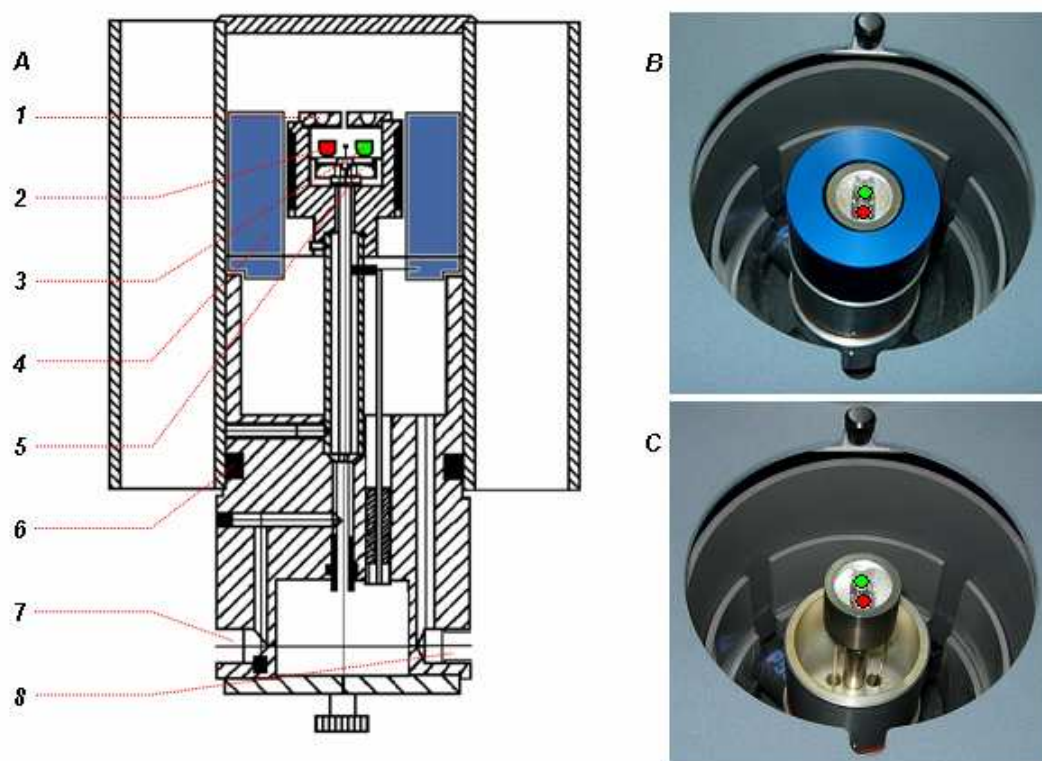
Z uvedeného je zřejmé, že termoanalytické metody reprezentují velmi účinný nástroj pro výzkum zaměřený na termický rozklad širokého spektra tuhých odpadních materiálů. Ze závěrů citovaných vědeckých prací též vyplývá, že zejména techniky TG ve spojení s dalšími analytickými zařízeními (FTIR, MS) se spolu s DSC stávají základními metodami sloužícími k popisu termického chování odpadů a poskytují důležité informace nezbytné pro vývoj nových průmyslových pyrolýzních systémů.

3. Experimentální část

Jako analytický přístroj byl zvolen typ DSC 131 francouzské firmy Setaram. DSC je analytická technika, při níž je kvantitativně měřen tepelný tok dodávaný nebo odebíraný vzorku, jako funkce teploty nebo času, přičemž vše probíhá v řízené atmosféře. V praxi je měřen tepelný tok mezi kelímkem obsahujícím vzorek a kelímkem referenčním, který je buď prázdný nebo obsahuje materiál, který lze v daném teplotním rozsahu považovat za inertní. U přístroje DSC 131 je prakticky veškeré ovládání, sběr dat a jejich vyhodnocení realizováno prostřednictvím softwaru, který dodává výrobce spolu s analyzátozem.

Základem DSC zařízení je miniaturní pec s velmi přesným regulátorem ohřevu a ventilátorem, který slouží naopak při chlazení vzorku na laboratorní teplotu. Prakticky všechny teplotní programy, při kterých se měří, využívají v různé míře řízený ohřev i chlazení vzorku. Je-li nutné měřit při velmi nízkých teplotách, lze alternativně použít místo ventilátoru buď externí chladicí jednotku, která umožňuje dosáhnout teplotu -70 °C, nebo kapalný dusík pro extrémně nízké teploty. Ve vyhřívaném prostoru pece je umístěna měřicí sonda, která nese oba pracovní kelímky. Z důvodu požadovaného

získávání kvantitativních dat je však celý systém měřicí sondy konstruován pro mnohem přesnější měření tepelných toků. Náčrt bloku pece DSC kalorimetru je uveden na obr. 1.



Obr. 1 Mikropícka DSC kalorimetru: A – pícka s konvektorem v řezu, 1 – víčko pracovního prostoru pícky, 2 – kelímek se vzorkem, 3 – srovnávací kelímek, 4 – hliníkový výměník homogenizující teplotní pole, 5 – stříbrná podložka sondy, 6 – těsnící o-kroužek konvektoru, 7 – vstup pracovního plynu, 8 – výstup pracovního plynu; B – otevřená pícka s kelímky v kontejneru s nasazeným homogenizérem; C – otevřená pícka s kelímky v kontejneru s odstraněným homogenizérem

Pec se sondou je v přístroji uložena v plastovém válcovém kontejneru, do něhož se shora zasouvá buď kovový konvektor pro práci s ventilátorem při chlazení na laboratorní teplotu, nebo chladicí hlava externího modulu, případně nádoba s kapalným chladivem. Maximální provozní teplota analyzátoru je závislá na použitém pracovním plynu. Pyrolýzní experimenty byly realizovány v atmosféře dusíku, s jehož použitím umožňoval přístroj pracovat až do teploty 700 °C. Naproti tomu helium, které bývá rovněž často používáno při pyrolýzních zkouškách, by destabilizovalo z důvodu své nízké hustoty homogenitu teplotního a umožňovalo by pracovat pouze do teploty 300 °C, která pro pyrolýzu není dostatečná. Podstava sondy zprostředkovávající sdílení tepla s kelímky je spojena se silným stříbrným plátem, který zaručuje velmi dobrou tepelnou vodivost. Prostor pícky s kelímky je při měření zakryt ve středu perforovaným duralovým víčkem. Perforace umožňuje volný únik případných plynů vznikajících při ohřevu vzorku. Přes pícku lze nasunout hliníkový výměník, který při použití chlazení ventilátorem intenzifikuje výměnu tepla mezi pecí a chladícím vzduchem.

4. Průběh experimentů a jejich výsledky

Vzorkovou základnu tvořila následující skupina 11 vybraných materiálů:

- 1) odpad ze zpracování amarantu – zbytky celých nadzemních částí rostliny, které vznikly po vymláčení zrna,
- 2) kakaové slupky – odpad ze zpracování kakaových bobů při výrobě kakaového prášku a čokolády,
- 3) ječné plevy vzniklé jako odpad při pneumatickém sušení ječmene,
- 4) kukuřičné plevy vznikající obdobným způsobem jako v případě ječných plev,
- 5) borové piliny produkované při zpracování hoblovaných hranolů a desek při výrobě nábytku,
- 6) bukové piliny stejného původu jako borové,
- 7) kokosové vlákno – odpad ze zpracování kokosových rohoží při výrobě výplní autosedaček,
- 8) předsušený čistírenský kal z Ústřední čistírny odpadních vod v Praze,
- 9) energetický šťovík (odrůda Uteuša) – mleté a předsušené nadzemní části rostlin,
- 10) rákos z problematických rozsáhlých porostů na vlhkých loukách Jižního Slovenska,
- 11) arašídové slupky – odpad z výroby pražených, loupaných a solených arašídů.

Před zahájením vlastních pyrolýzních testů byla provedena základní technická analýza, jejíž výsledky jsou shrnuty v tab. 1. Byly stanoveny obsahy vody, popela a prchavé hořlaviny v analytickém vzorku. Fixní hořlavina stanovována nebyla, neboť ji lze vyjádřit dopočtem do 100 %. K určení uvedených parametrů byla použita metoda TG, jejíž výsledky byly ověřeny normalizovanými zkouškami založenými na sušení a žíhání navážek analytických vzorků v muflové peci.

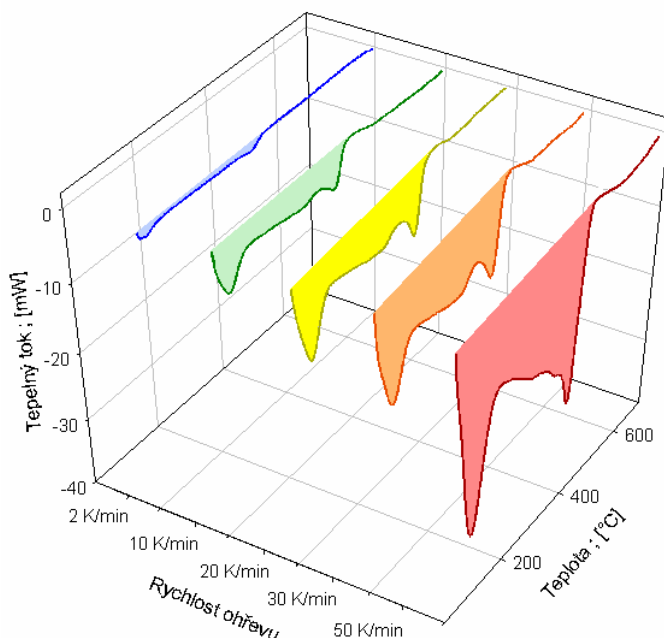
Tab. 1 Základní technické parametry testovaných vzorků

Vzorek	Voda ; [% hm.]	Popel ; [% hm]	Prchavá hořlavina ; [%hm.]
Amarant	7,0	9,9	65,8
Borové piliny	8,1	0,4	82,1
Bukové piliny	8,0	1,2	82,3
Ječné plevy	8,3	6,9	71,4
Kakaové slupky	5,8	5,8	70,2
Kal ČOV	7,1	38	46,9
Kokosové vlákno	7,5	1,1	70,9
Kukuřičné plevy	9,6	1,6	74,6
Šťovík	6,3	3,8	69,6
Rákos	5,8	4,7	76,7
Arašídové slupky	6,4	7,1	76,4

Testy na DSC probíhaly neizotermně s 5 rychlostmi ohřevu vzorků, tedy konkrétně 2, 10, 20, 30 a 50 K/min. S ohledem na konstrukční mez používaného kalorimetru byla testována pyrolýza v teplotním rozsahu 20 – 700 °C v inertní atmosféře tvořené dusíkem. Konečná teplota 700 °C byla považována za dostačující, protože, z dříve provedených TG analýz i retortových zkoušek bylo známo, že tato teplota zaručuje

konverzi materiálu v průměru převyšující 65 %[6]. Jak bylo doloženo měřeními TG-DTA, vyšší konverze by bylo dosahováno až při velmi vysokých (a ekonomicky tudíž méně výhodných) teplotách a navíc děje probíhající nad touto mezí se obvykle nevyznačují výraznými entalpickými toky způsobenými rozkladným procesem.

Jako výstup z prováděných analýz byl získán soubor DSC křivek, jejichž ukázka je uvedena na obr. 2. Kvantifikace naměřených dat proběhla pomocí numerické integrace

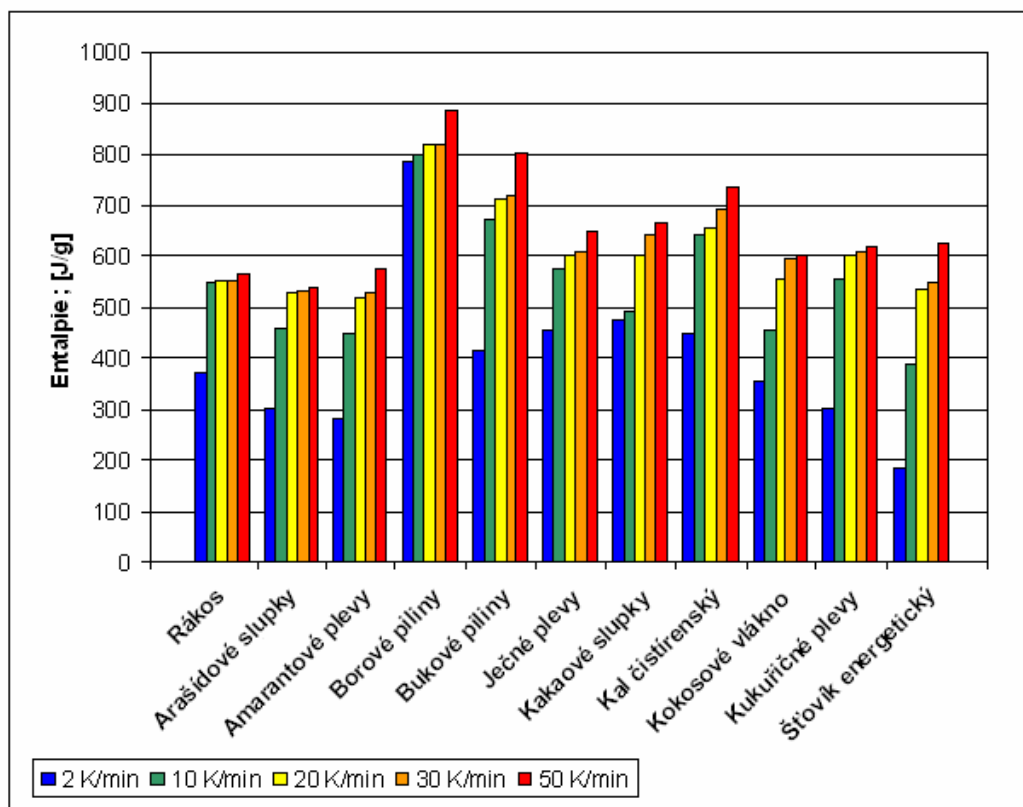


křivek tepelného toku podle času a následného přepočítání tepla na jednotkovou navážku příslušného vzorku. Celý uvedený matematický proces byl realizován vyhodnocovacím softwarem Setsoft 2000. Získané hodnoty umožňující vzájemné porovnání tepla dodaného jednotlivým vzorkům za různých rychlostí ohřevu jsou shrnuty v tab. 2 a graficky znázorněny na obr.3.

Obr. 2 Křivky DSC s naznačenou integrovanou plochou u vzorku bukových pilin (pozn. plocha na obr. je pouze orientační, neboť integrace proběhla podle časové osy a na obr. je osa teplotní; nicméně tvar křivky i integrované plochy je totožný)

Tab. 2 Teplo dodané testovaným materiálům při různých rychlostech ohřevu

Rychlost ohřevu:	Entalpie [J.g ⁻¹]				
	2 K.min ⁻¹	10 K.min ⁻¹	20 K.min ⁻¹	30 K.min ⁻¹	50 K.min ⁻¹
Amarant	283	449	519	526	575
Borové piliny	785	797	816	819	884
Bukové piliny	413	673	713	717	804
Ječné plevy	454	575	602	609	647
Kakaové slupky	476	491	603	642	664
Kal ČOV	448	643	657	690	734
Kokosové vlákno	355	454	555	595	602



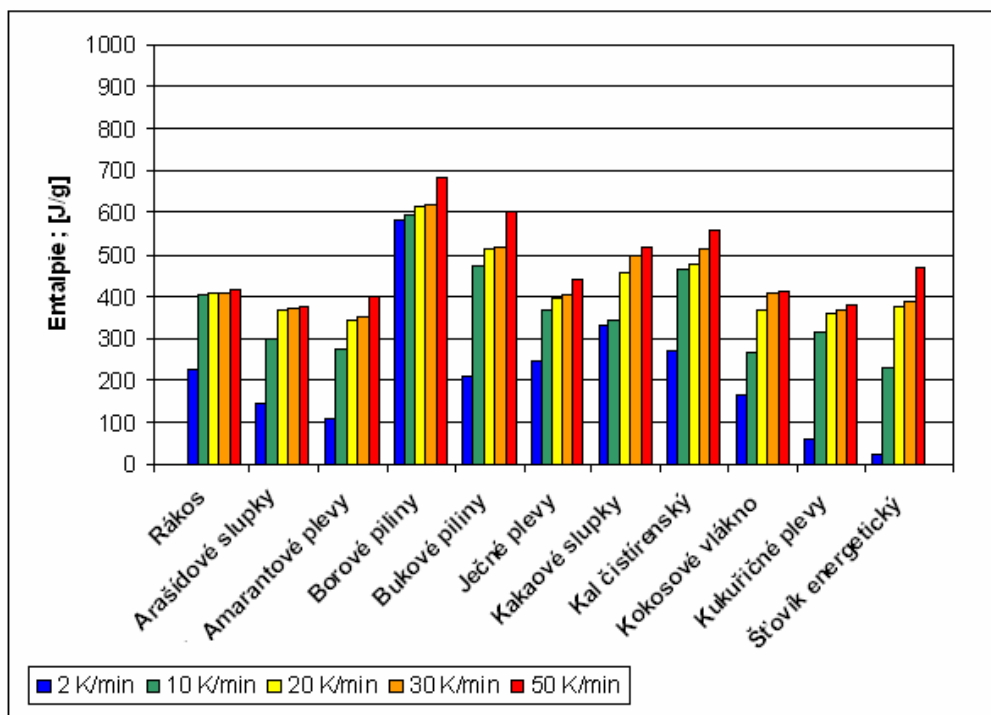
Kukuřičné plevy	302	555	599	609	618
Šťovík	182	388	534	547	626
Rákos	371	549	552	553	562
Arašídové slupky	302	459	530	533	537

Obr. 3 Teplo dodané vzorkům při pyrolýze různými rychlostmi ohřevu vypočtené dle křivek DSC

Velmi významným faktorem podílejícím se na energetické bilanci pyrolýzního děje je vlhkost obsažená ve zpracovávaných materiálech, která vlivem své velké výparné entalpie silně zvyšuje endotermní zabarvení celého pyrolýzního procesu. Představu o tom, do jaké míry ovlivňuje přítomnost vody entalpickou bilanci pyrolýzy si lze učinit na základě obr. 2, na kterém oblasti sušení materiálu odpovídá výrazný endotermní pík na samotném začátku všech křivek. Aby bylo možné vzorky posoudit nezávisle na obsahu vlhkosti, shrnuje tab. 3 a obr. 4 údaje o teple dodaném sušině.

Tab. 3 Teplo dodané sušině testovaných materiálů při různých rychlostech ohřevu

Rychlost ohřevu:	Entalpie [J.g ⁻¹]				
	2 K.min ⁻¹	10 K.min ⁻¹	20 K.min ⁻¹	30 K.min ⁻¹	50 K.min ⁻¹
Amarant	108	274	344	351	400
Borové piliny	583	595	614	617	682
Bukové piliny	213	473	513	517	604
Ječné plevy	247	368	395	402	440
Kakaové slupky	331	346	458	497	519
Kal ČOV	271	466	480	513	557



Kokosové vlákno	168	267	368	408	415
Kukuřičné plevy	62	315	359	369	378
Šťovík	25	231	377	390	469
Rákos	226	404	407	408	417
Arašídové slupky	142	299	370	373	377

Obr. 4 Teplo dodané sušině vzorků při pyrolýze různými rychlostmi ohřevu vypočtené dle křivek DSC

5. Shrnutí poznatků a vyvozené závěry

Z porovnání křivek DSC zahrnujícími ohřev pouze do teploty 700 °C s křivkami DTA získanými ohřevem vzorků v jiné aparatuře až do teploty 1000 °C bylo ověřeno, že většina chemických pochodů ve vzorcích spojených s výměnou tepla probíhá při teplotách nižších, než je výše uvedená konstrukční mez DSC. K dalším dějům spojeným s tepelnou výměnou dochází, jak bylo zjištěno měřeními DTA, až při teplotách výrazně převyšujících 1000 °C a tedy spadajících do oblasti, která již není považována za reálně použitelnou pro praktické využití pyrolýzy zkoumaných tuhých odpadů. Z uvedeného tedy vyplývá, že údaje DSC získané při ohřevu vzorků v teplotním rozsahu 20 – 700 °C jsou dostatečně reprezentativní pro zhodnocení pyrolýzy daných materiálů z hlediska tepelné výměny.

Z vyhodnocených výsledků kalorimetrických měření lze vyvodit následující závěry:

- 1) V testované skupině původních neupravených vzorků se hodnota dodaného tepla při všech použitých rychlostech ohřevu pohybovala v rozmezí 182 – 884 kJ.kg⁻¹, což v průměru činí 533 kJ.kg⁻¹. V případě hodnot získaných pro sušinu toto rozmezí činí 25 – 682 kJ.kg⁻¹, tedy v průměru 354 kJ.kg⁻¹.
- 2) U všech vzorků biomasy byl zjištěn postupný růst hodnoty tepla dodaného vzorku spolu s rostoucí rychlostí ohřevu. Pro porovnání byly učiněny pokusy s ohřevem kontrolní skupiny polymerů (PET, PP, PE), přičemž bylo ověřeno, že tyto vzorky při žádném z provedených měření nevykazovaly zmíněný trend

nárůstu dodané energie. Např. zjištěné teplo dodané vzorku PET činilo vždy $943 \pm 1 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Provedením srovnávacích zkoušek s použitím polymerů byla vyvrácena možnost, že se jedná o náhodný jev. Dále bylo zjištěno, že k největší změně dodaného tepla dochází obvykle mezi rychlostmi 2 a 10 K.min^{-1} . Tato skutečnost koresponduje se změnami průběhu křivek TG naměřenými na jiné aparatuře. Byla tedy ověřena přímá souvislost mezi rychlostí ohřevu a povahou probíhajících dějů.

- 3) Při porovnání údajů naměřených při různých rychlostech ohřevu bylo ověřeno, že při extrémně pomalém ohřevu rychlostí 2 K/min je vzorkům biomasy při rozkladu dodáno energie v průměru o 259 kJ.kg^{-1} méně, což představuje o 40 % méně tepla než při nejrychlejším zkoušeném ohřevu (50 K/min). V případě sušiny tento rozdíl dosahoval v průměru 56 %. V této souvislosti je ale třeba zmínit, že v reálném zařízení se zatím nepředpokládá, že by volba takto pomalé rychlosti ohřevu vedla k energetickým úsporám. Toto tvrzení vyplývá ze skutečnosti, že při velmi pomalém ohřevu bude třeba vyhřívat zařízení po dobu úměrně delší než by tomu bylo při vyšší zvolené rychlosti ohřevu.
- 4) Z testovaných vzorků biomasy byl vyhodnocen jako nejsnáze rozložitelný vzorek šťovíku Uteuša s průměrnou hodnotou entalpické výměny $455,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (resp. $295,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$ v případě sušiny). U tohoto vzorku byl zároveň zaznamenán největší rozdíl mezi entalpiemi stanovenými při nejpomalejším a nejrychlejším ohřevu. Tento rozdíl činil 444 kJ.kg^{-1} , což reprezentuje 71 % v případě původního vzorku a až 95 % v případě sušiny.
- 5) Naproti tomu jako nejobtížněji rozložitelný vzorek byl vyhodnocen vzorek borových pilin s průměrnou hodnotou entalpické výměny $820,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (sušina $617,7 \text{ kJ.kg}^{-1}$). U tohoto vzorku byl zároveň zaznamenán nejmenší rozdíl mezi entalpiemi stanovenými při nejpomalejším a nejrychlejším ohřevu. Tento rozdíl činil 99 kJ.kg^{-1} , což představuje pouze 11 % (sušina 15 %).

Literatura

1. Crespi M. S.; Silva A. R.; Ribeiro C. A.; Oliveira S. C.; Santiago-Silva M. R.: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*; (2003), 72(3), 1049-1056.
2. HEIKKINEN J. M.; HORDIJK J. C.; DE JONG W.; SPLIETHOFF H.: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*; (2004), 71(2), 883-900.
3. JINNO D.; GUPTA A.; YOSHIKAWA K.: *Environmental Engineering Science*; (2004), 21(1), 65-72.
4. RAY R.; BHATTACHARYA P.; CHOWDHURY R.: *Canadian Journal of Chemical Engineering*; (2004), 82(3), 566-579.
5. STAF M., EDEROVÁ J., BURYAN P., SCHAUHUBEROVÁ M.: Aplikace metod termické analýzy ve výzkumu pyrolýzy biomasy. *Energie z biomasy III., sborník z konference*, Brno 2004, str.29 – 35, ISBN 80-214-2805-8.
6. STAF M.; SKOBLJA S.; BURYAN P.: Pyrolýza odpadní biomasy. *Energie z biomasy, sborník z konference*, Brno 2003, str. 99-105.
7. Yang H.; Yan R.; Chin T.; Liang D. T.; Chen H.; Zheng Ch.: *Energy and Fuels*; (2004), 18(6), 1814-1821.

Poděkování: Za finanční podporu poskytnutou při řešení tohoto projektu Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy v rámci MSM 604 613 7304 a GACR 104/05/0664

MĚŘENÍ TEPELNÉHO TOKU VYZÁŘENÉHO PROSKLENÝMI DVÍŘKY KRBVÝCH KAMEN

MEASURING OF RADIANT FLUX ON LOCAL WOOD STOVES

Autor: Ing. Stanislav Vaněk

Výzkumné energetické centrum VŠB-TU
17.listopadu 15/2172, 708 33, Ostrava-Poruba
Stanislav.Vaněk.st@vsb.cz

Abstrakt: : Příspěvek se zabývá měřením vyzářeného tepla prosklenými dvířky krbových kamen. Kromě velikosti vyzařovaného výkonu při běžném provozu je uvedena také závislost vyzářeného výkonu na výkonu kamen, respektive na teplotě v ohništi. Pomocí této závislosti je sestaven empirický vztah umožňující určit vyzářený výkon různých typů krbových kamen

Klíčová slova: záření, krbová kamna, tepelný tok, energetická bilance

1. Úvod

Celkové teplo vyzářené prosklenými dvířky krbových kamen se bude skládat ze součtu těchto záření: záření skla, záření plamene a záření zahřátého šamotu, který je po stranách ohniště.

$$Q_C = Q_{\text{šamotu}} + Q_{\text{plamene}} + Q_{\text{skla}} \quad (1)$$

Pro výpočet záření skla by se dal teoreticky použít vztah pro sdílení tepla zářením mezi dvěma rovnoběžnými neohraničenými plochami. Tento případ nastává v případě, že je před dvířky kamen umístěna absorpční plocha. Potom se dá pro výpočet použít vztah:

$$\Phi_{12} = S \cdot C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

kde: Φ_{12} - zářivý tepelný tok [W]
 S - povrch absorpční plochy a skleněné výplně dvířek
 C_{12} - součinitel vzájemného vyzařování obou ploch
 T_1 - teplota skla
 T_2 - teplota povrchu absorpční plochy

Pro skutečný stav, kdy jsou kamna umístěna v místnosti, by se dal pro výpočet záření skla použít vztah pro sdílení tepla v uzavřených soustavách. Předpokládáme, že velikost povrchu 1 tj. skla je podstatně menší než velikost povrchu 2 tj. okolních stěn a platí-li, že $\varepsilon_2 = 1$ rovnice se zjednoduší na tvar:

$$\Phi_{12} = \varepsilon_1 \cdot S_1 \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

kde: S_1 - povrch skleněné výplně dvířek
 C_o - součinitel vyzařování dokonale černého tělesa
 ε_1 - emisivita skla
 T_1 - teplota skla
 T_2 - teplota povrchu absorpční plochy

Použití těchto vzorců je ovšem zatíženo určitou chybou způsobenou několika činiteli. Ve skutečnosti neplatí, že plochy jsou neohraničené. Teplota povrchu skla T_2 se bude poměrně rychle měnit v závislosti na čase a na poloze (těžko se dá předpokládat, že ke které stěně se plamen v daném čase přiblíží). Další nepřesnosti se dopouštíme při výpočtu součinitele vzájemného vyzařování obou ploch C_{12} , který je rovněž závislý na teplotě.

Pro výpočet přenosu tepla zářením plamene v ohništích je nutné určit poměrnou zářivost (pohltivost) plamene. Tato je závislá na řadě faktorů jako jsou vlastnosti paliva, tvar ohniště atd. Poměrná zářivost plamene v ohništi není stálá hodnota, mění se stupněm vyhořívání paliva. V pásmu hoření dosahuje hodnot 0,85 - 0,95. V oblasti vyhořívání pak rychle klesá, a to tím více, čím má spalované palivo větší obsah prchavých látek. Dá se určit pro tzv. nesvítivou část plamene obsahující převážně plyny H_2O a CO_2 a pro svítivou část tvořenou tuhými částicemi.

Při průchodu sálavého paprsku s určitou vlnovou délkou λ vrstvou plynů l jeho energie v důsledku pohlcování klesá a to exponenciálně. Poměrná zářivost nesvítivé části plamene se určí dle Kirchhoffova zákona [1].

$$\varepsilon_{NS} = 1 - e^{-S_{NS}} \quad (4)$$

kde: S_{NS} je optická tloušťka tříatomových plynů

Spalovací proces v krbových kamnech probíhá s periodickým příívodem paliva. Z čehož vyplývá, že se v průběhu spalovací zkoušky bude měnit celá řada činitelů jako je obsah prchavých látek a s tím související velikost plamene, koncentrace CO_2 , H_2O , teplota plamene atd. Což znamená, že by se pro výpočet záření musela stanovit určitá zjednodušení, která by ovšem celý výpočet znepřesnila.

Z těchto důvodů je snaha určit velikost zářivého tepelného toku měřením.

2. Způsob měření vyzářené energie

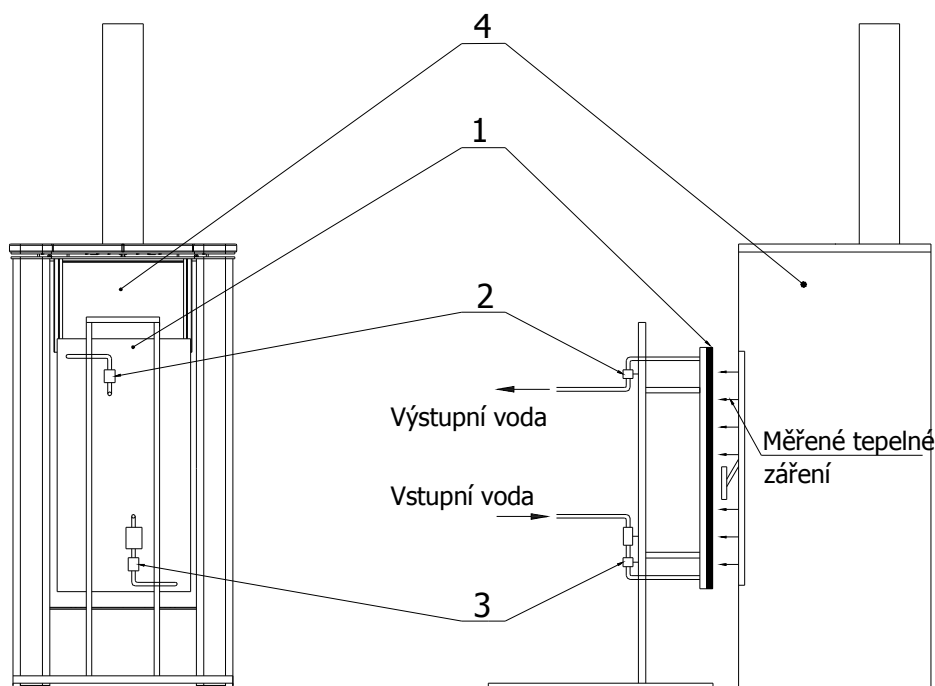
Princip měření je založen na zachycení zářivého tepelného toku a převedení této energie na lépe měřitelnou formu energie. Technické řešení pak spočívá v zachycení tepelného toku na absorpční ploše měřicího modulu. Ta je konstruována podobně jako výměník a předává zachycený tepelný tok ve formě tepla vodě proudící uvnitř absorpční

plochy. Množství energie, kterou získá voda, téměř odpovídá vyzářenému teplu a dá se jednoduše vypočítat pomocí následujícího vztahu.

$$Q = c \cdot \dot{m} \cdot (t_2 - t_1) \quad (5)$$

kde: Q - tepelné energie [kJ]
 c - měrná tepelná kapacita vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 $(t_2 - t_1)$ – rozdíl teplot vstupní a výstupní vody [$^{\circ}\text{C}$]
 $\dot{m}$ - hmotnostní průtok vody [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

Teploty t_1 a t_2 jsou měřeny pomocí odporových teplotních čidel umístěných v teplotních jímkách na vstupu a výstupu z absorpční plochy. Dále je měřen hmotnostní průtok vody na výstupu z absorpční plochy. Schématicky je na Obr. č. 1 . nakresleno zařízení společně s měřeními kamny ve stejné poloze jako při měření.



Obr. č. 1 Schéma zařízení umístěného před kamny

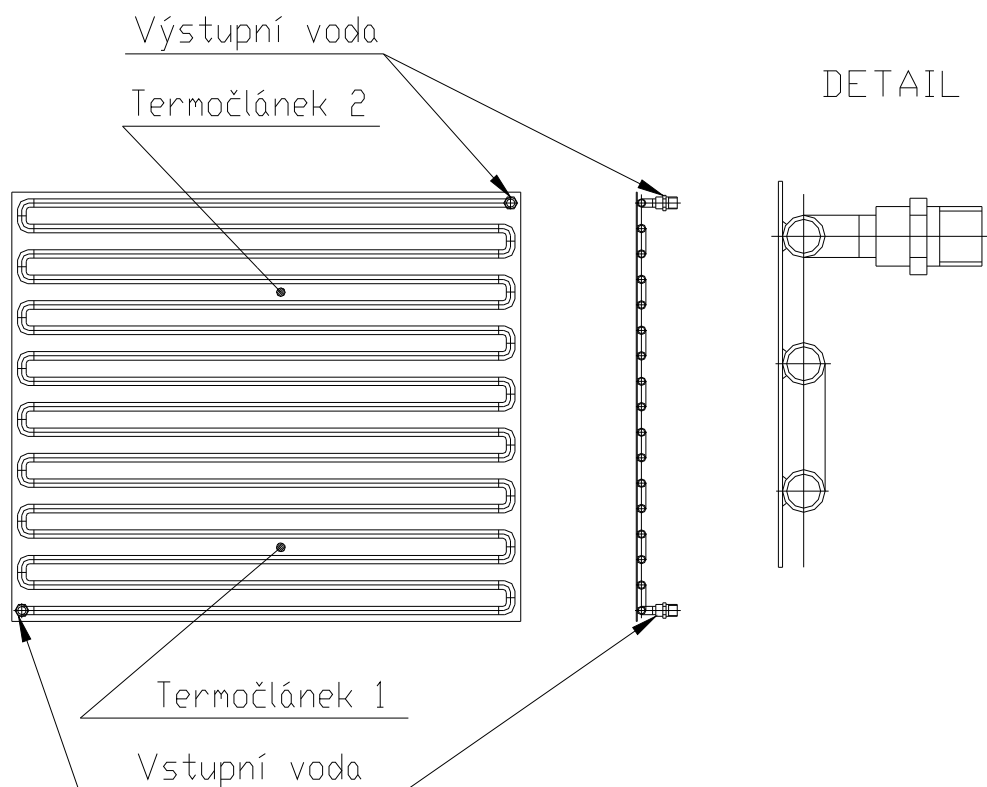
- 1 – absorpční plocha
- 2 – termočlánek určený pro měření teploty výstupní vody
- 3 - termočlánek určený pro měření teploty vstupní vody
- 4 – měřené kamna

3. Konstrukce absorpční plochy

Absorpční plocha je vyrobena z měděného plechu, na který jsou ze zadní části přiletovány trubky, jimiž protéká voda Obr. č. 2. Dále je absorpční plocha ze zadní části tepelně zaizolována, aby nedocházelo k ovlivňování měřených veličin okolním prostředím. Trubky jsou k měděnému plechu přiletovány po celé délce, aby byl zaručen dostatečný přestup tepla z ozařovaného povrchu do protékající vody. Přední část

absorpční plochy je natřena matnou černou barvou, pro lepší zachycení vyzářené energie.

Vzhledem k tomu, že množství vyzářené energie je závislé nejenom na teplotě povrchu tělesa, které toto teplo vyzařuje, ale také na teplotě povrchu tělesa, které toto teplo přijímá, je třeba udržovat teplotu absorpční plochy aspoň přibližně stejnou jako je teplota okolí kamen. Proto jsou na absorpční plochu přidělány termočlánky, kterými je kontrolována teplota této plochy.



Obr. č. 2 Absorpční plocha pohled zezadu

Takto vyrobená absorpční plocha je přidělána ke stojanu, pomocí kterého je možno nastavit její výšku do požadované polohy

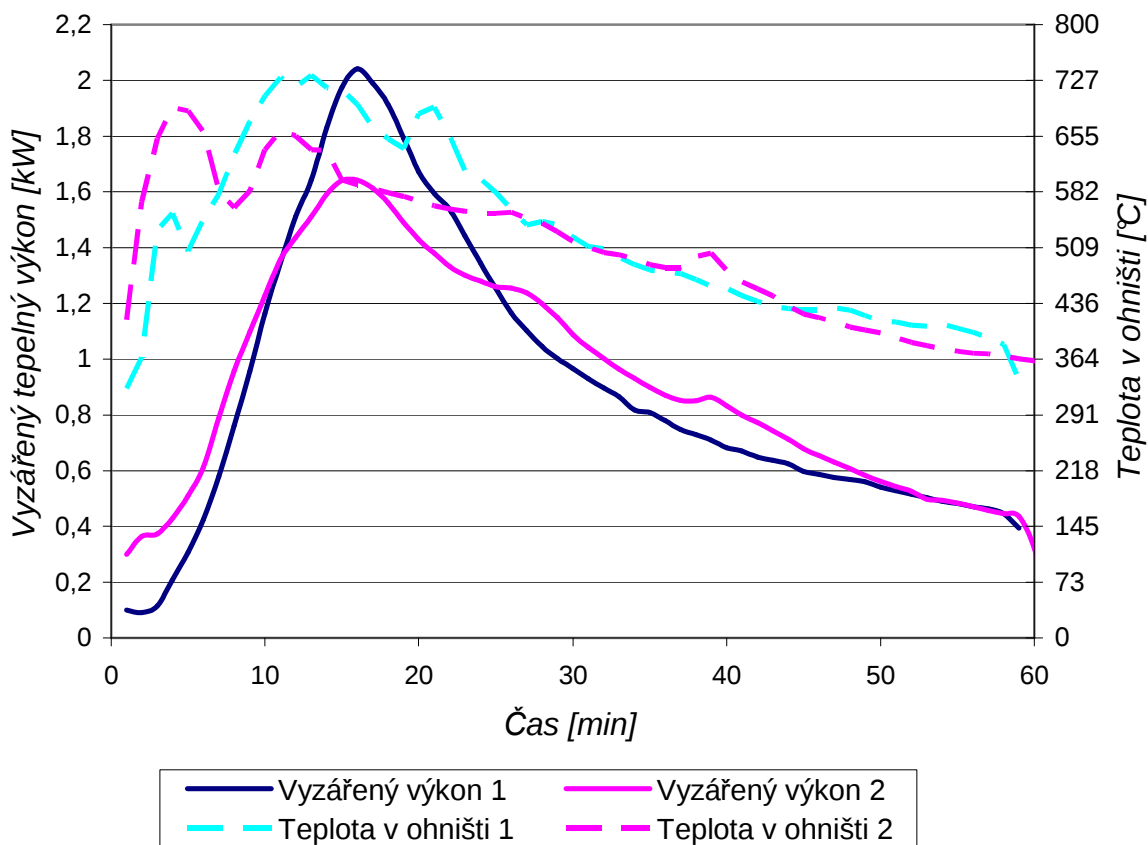
4. Výsledky měření

V průběhu řešení grantu byla provedena celá řada měření s absorpční plochou a bez ní. Některé zkoušky spočívající na jiné metodě měření vyzářeného tepla sloužily k ověření dosažených výsledků. Prvních spalovacích zkouškách s absorpční plochou sloužily kromě měření vyzářené energie také k úpravě metodiky měření.

Další spalovací zkoušky byly již prováděny podle upravené metodiky. Úpravy se týkaly především vzdálenosti absorpční plochy od skla a měření teploty v ohništi. Teplota v ohništi při prvních zkouškách měřena nebyla.

Zkouška	Teplota spalin průměrná	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Vyzářený výkon dvířky	Výkon kamen	Podíl vyzářeného výkonu na výkonu kamen
	[°C]	[°C]	[%]	[-]	[%]	[W]	[kW]	[%]
1	290	523	0,51	2,37	72,5	901	8,2	11,0
2	289	507	0,59	2,52	73,2	908	8,3	11,0

Tab. č. 1 Výsledky měření provedených podle upravené metodiky



Graf č. 1 Průběh vyzářeného výkonu a teploty v ohništi během zkoušky

Tepelný výkon vyzářený prosklenými dvířky však nepředstavuje celkový tepelný výkon odváděný dvířky do okolí. Další část výkonu se předává okolnímu vzduchu konvekcí, tj. přímým ohřevem vzduchu nacházejícího se v těsné blízkosti skla.

5. Měření vyzářené energie zacloněním plochy dvířek

Tato měření sloužila k ověření výsledků vyzářeného výkonu pomocí metody založené na jiném principu měření.

Princip této metody spočívá v zadržení vyzařované energie uvnitř ohniště, což se projeví zvýšením teploty v ohništi. Z nárůstu teploty v ohništi oproti běžnému stavu je možno vypočítat množství energie, která se nevyžářila.

5.1. Průběh měření

Zadržení vyzařované energie z ohniště v praxi znamenalo vložit po přiložení paliva před dvířka do ohniště šamotovou desku. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledků musela se šamotová deska před vložením do kamen nahřát.

Hodnoty zjištěné při zkouškách bez šamotové desky jsou uvedeny v Tab. č. 2. Údaje ze zkoušky se šamotovou deskou uvádí Tab. č. 3. Rozdíl v tepelné energii se šamotovou deskou a bez ní představuje energii běžně vyzařovanou dvířky do okolí. Spolu s vyzařovaným výkonem je velikost této energie uvedena v Tab. č. 4.

Zkouška	Teplota spalin průměrná	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Průměrné O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Ztráta citelným teplem spalin	Poměrná ztráta cit. tep spalin
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[-]	[%]	[kJ/kg]	[%]
1	299,02	493,88	0,57	11,99	2,33	71,94	3857,69	23,07
2	292,55	522,74	0,86	11,56	2,23	71,77	3525,62	21,09
3	294,90	516,08	0,81	11,58	2,23	71,93	3556,14	21,27
Průměr	295,49	510,90	0,75	11,71	2,26	71,88	3646,48	21,81

Tab. č. 2 Hodnoty ze zkoušky bez šamotové desky

Zkouška	Teplota spalin průměrná	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Průměrné O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Ztráta citelným teplem spalin	Poměrná ztráta cit. tep spalin
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[-]	[%]	[kJ/kg]	[%]
1	321,08	597,20	0,63	11,46	2,20	71,28	3898,61	23,32
2	316,39	602,81	1,32	11,20	2,14	68,26	3573,43	21,37
3	323,94	619,95	0,95	10,93	2,09	70,28	3667,33	21,93
Průměr	320,47	606,65	0,97	11,20	2,14	69,94	3713,12	22,21

Tab. č. 3 Hodnoty ze zkoušky se šamotovou deskou

Zkouška	Tepelná energie spalin v ohništi se šamotovou deskou před dvířky	Tepelná energie spalin v ohništi bez šamotvé desky	Rozdíl	Rozdíl	Tepelný výkon
	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/h]	[kW]
1	8586,03	7372,49	1213,54	2985,32	0,83
2	8450,73	7511,02	939,70	2311,67	0,64
3	8509,69	7422,92	1086,77	2673,45	0,74
Průměr	8515,48	7435,48	1080,01	2656,81	0,74

Tab. č. 4 Tepelný výkon nevyzařený prosklenými dvířky při použití šamotové desky

Touto metodou zjištěný průměrný tepelný výkon vyzářený prosklenými dvířky činí 0,74 kW. Výkon naměřený pomocí absorpční plochy činil u prvních zkoušek 0,58 kW, u dalších, které jsou přesnější pak 0,9 kW. Když však porovnáme výsledek 1 zkoušky se šamotovou deskou 0,84 kW a s absorpční plochou 0,9 kW zjistíme, že výsledky se příliš neliší.

Rozdíl v dosažených výsledcích mohl být způsoben hned několika faktory. Nejpravděpodobnějšími se zdají tyto dva:

- 1) Šamotová deska mění parametry ohniště a tím se samozřejmě ovlivňuje spalovací proces, což má vliv na vyzařovanou energii.
- 2) Ne vždy se u krbových kamen podaří dvě spalovací zkoušky, u nichž by bylo dosaženo naprosto stejných parametrů spalování.

Obě metody dospěly řádově ke stejnému výsledku což je podstatné.

Kromě vlastního měření vyzárené energie byla při všech zkouškách také sledována koncentrace jednotlivých složek spalín. To z důvodu ověření, zdali je nějaká přímá závislost mezi plochu skla a koncentrací CO. Nabízela se možnost sledovat tuto závislost při zkouškách se šamotovou deskou, kdy byla plocha skla v podstatě nulová.

Při těchto zkouškách se předpokládalo, že vlivem zvýšené teploty v ohništi dojde k lepšímu vyhoření CO což by se mělo projevit snížením jeho koncentrace ve spalínách. Ve skutečnosti se však koncentrace CO zvýšila viz Tab. č. 2 a Tab. č. 3. To bylo pravděpodobně způsobeno změnou parametrů ohniště. Šamotová deska vložená před dvířka totiž změnila objem ohniště, čímž se snížila doba setrvání spalín v ohništi.

To vedlo k myšlence jak zabránit vyzařování přes sklo dvířek a přitom nezměnit parametry ohniště. Nabízela se možnost použít hliníkovou fólii přilepenou na vnitřní stranu skla. Ta měla záření vycházející z ohniště odrazit zpět. Předpoklad byl takový, že při tomto pokusu dojde opět k výraznému zvýšení teploty v ohništi, podle čehož by se dal vypočítat výkon, který se nevyžárl. Spalovací zkoušky provedené s hliníkovou fólií však ukázaly, že nedošlo k nijak výraznému zvýšení teploty v ohništi viz Tab. č. 5 pro porovnání zkoušky bez hliníkové fólie Tab. č. 6 popř. zkoušky bez šamotové desky Tab. č. 2.

Zkouška	Teplota spalín průměrná	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Průměrné O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Vyzářený výkon
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[-]	[%]	[kW]
1	299	512	0,37	12,94	2,60	70,0	0,27
2	298	514	0,53	12,86	2,58	69,8	0,33
3	300	534	0,24	12,29	2,41	72,9	0,36

Tab. č. 5 Zkoušky s hliníkovou fólií přilepenou na sklo

Zkouška	Teplota spalín průměrná	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Průměrné O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Vyzářený výkon
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[-]	[%]	[kW]
1	290	523	0,51	12,1	2,37	72,5	0,90
2	289	507	0,59	12,7	2,52	73,2	0,91

Tab. č. 6 Zkouška bez hliníkové fólie na skle

Nárůst teploty v ohništi patrně nenastal proto, že hliníková fólie příliš záření neodrazila. Navíc hliníková fólie není dobrým tepelným izolantem, takže se teplo vedením přeneslo na sklo, což zvýšilo přestup tepla ze skla do okolního vzduchu konvekcí.

Při zkouškách s hliníkovou fólií sice došlo podle uvedených tabulek k určitému poklesu koncentrace CO. Je však otázkou, zdali je tento pokles způsoben hliníkovou

fólií. Řada provedených zkoušek na krbových kamnech totiž dokazuje že podobných výsledků bylo dosaženo i bez hliníkové fólie.

6. Empirický vztah pro výpočet vyzářeného výkonu různých kamen.

Pro stanovení tohoto vztahu měla být původně provedena série zkoušek na různých typech kamen. Po zvážení jakým způsobem by tyto zkoušky byly vyhodnocovány, převládá názor, že rozhodujícím parametrem ovlivňujícím záření bude u všech kamen především teplota v ohništi. Což vedlo k tomu, že pro určení empirického vztahu byly provedeny spalovací zkoušky na jedné kamnech přičemž se měnil příkon respektive výkon kamen a tím pádem i teplota v ohništi.

Výkon kamen byl měněn v následujícím pořadí

1 zkouška – 70% - 5,6 kW

3 zkouška – 130% - 10,4 kW

2 zkouška – 100% - 8 kW

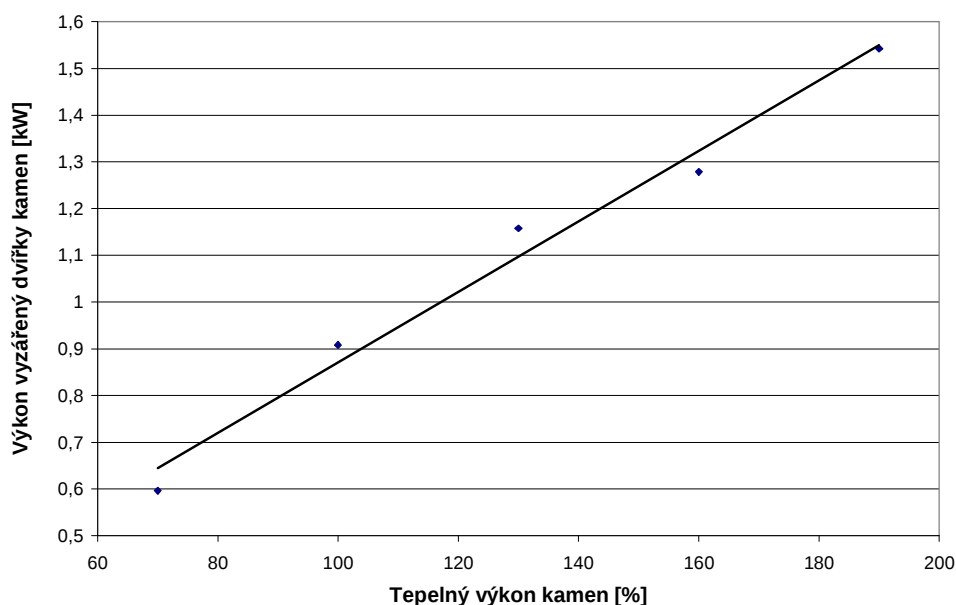
4 zkouška – 160% - 12,8 kW

5 zkouška – 190% - 15,2 kW

Zkouška	Teplota spalin v komině	Teplota v ohništi průměrná	CO přepočteno na 13% O ₂	Průměrné O ₂	Přebytek vzduchu	Účinnost kamen	Výkon vyzářený dvířky	Vyzářený výkon	Povrchová teplota kamen
	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[-]	[%]	[W]	[kW/m ²]	[°C]
Výkon 70 %	249	472	0,25	15,4	3,7	67,7	596	3,41	144
Výkon 100 %	212	507	0,22	12,7	2,5	73,2	908	5,19	161
Výkon 130 %	336	526	0,41	12,6	2,5	68,9	1158	6,62	168
Výkon 160 %	385	611	0,40	13,1	2,6	61,3	1279	7,31	194
Výkon 190 %	419	620	0,65	11,9	2,3	60,8	1542	8,82	203

Tab. č. 7 Výsledky zkoušek s různými příkony kamen

Předposlední sloupec v tabulce nazvaný jako vyzářené teplo představuje množství tepla vyzářeného dvířky po přepočtu na 1 m² plochy skla.



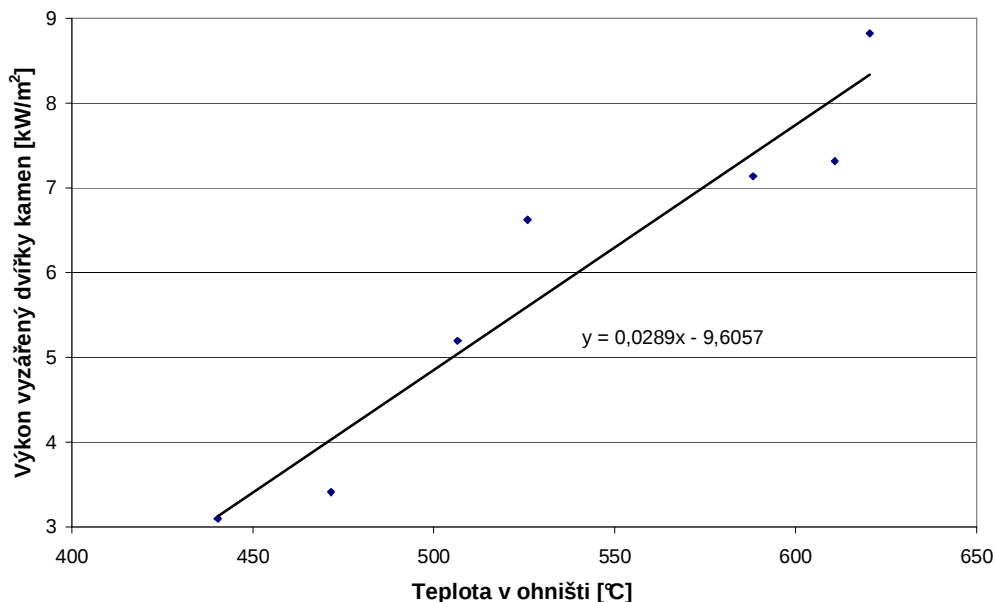
Graf č. 2 Závislost vyzářeného výkonu dvířky na provozním výkonu kamen

Pro stanovení empirického vztahu, který by umožňoval vypočítat vyzářený výkon, je důležitý Graf č. 3. Uvádí totiž velikost vyzářeného výkonu dvířky kamen

přepočteného na 1 m² plochy skla v závislosti na teplotě v ohništi. Vztah pro výpočet vyzářeného výkonu určený z grafu:

$$Q = 0,0289 \cdot t - 9,6057 \quad [\text{kW} / \text{m}^2] \quad (6)$$

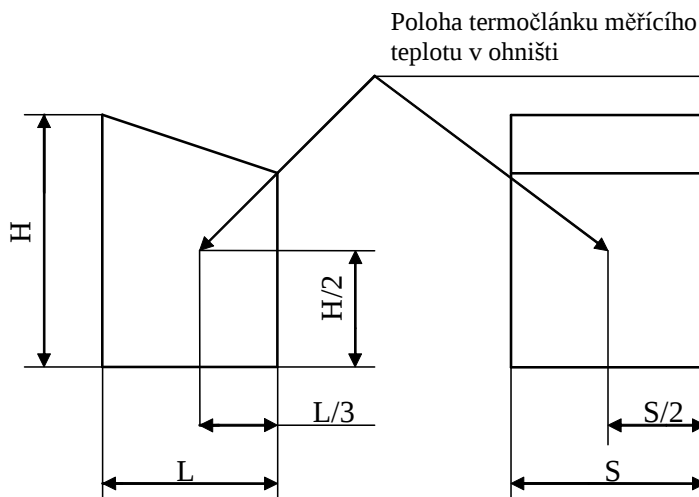
kde Q - vyzářený výkon z 1m² skla [kW/m²]
 t - teplota v ohništi [°C]



Graf č. 3 Závislost vyzářeného výkonu dvířky na teplotě v ohništi

Je třeba podotknout, že podle odvozeného vztahu pro výpočet vyzářeného výkonu je sice možno vypočítat tento výkon i pro jiné typy kamen, ale je třeba počítat s tím, že u jiných typů kamen nebude tato hodnota úplně přesná. Nepřesnost bude tím větší, čím větší bude rozdíl ve tvaru posuzovaných kamen a experimentálních krbových kamen. V praxi se však dá říct, že u většiny běžných kamen jsou si ohniště celkem podobná, takže chyba ve výsledku nebude nijak výrazná.

Pro zjištění správného výsledku je však podstatné měřit teplotu v ohništi ve stejném místě, jako byla měřena při spalovacích zkouškách.



Obr. č. 3 Poloha termočláunku při měření teploty v ohništi

7. Dosažené výsledky:

Průměrná hodnota vyzářeného tepelného výkonu prosklenými dvířky experimentálních krbových kamen se pohybuje kolem 0,9 kW tj. 5,2 kW na 1m² plochy skla. Maximální naměřená hodnota tohoto výkonu pak dosahuje pro tato kamna hodnot kolem 2 kW a to v úseku zkoušky, kdy je hoření nejintenzivnější. Tyto výsledky však platí v případě, že přikládáme stejně jako při spalovacích zkouškách tj. jednou za hodinu předepsanou dávku paliva.

Dále byl stanoven empirický vztah, pomocí kterého je možno stanovit množství vyzářeného výkonu prosklenými dvířky kamen Q na základě změřené teploty v ohništi t .

$$Q = 0,0289 \cdot t - 9,6057 \quad [kW / m^2]$$

Pomocí tohoto vztahu vypočítáme vyzářený tepelný výkon 1m² skla dvířek a ten pak vynásobíme skutečnou plochou dvířek. Vztah je použitelný pro různé typy krbových kamen a krbových vložek. Přesnost výpočtu je závislá na odlišnosti mezi ohništěm kamen experimentálních a kamen u nichž výkon počítáme. Čím větší jsou mezi jednotlivými ohništi rozdíly, tím větší může být nepřesnost. U běžných typů kamen se však tvary ohniště příliš neliší.

8. Závěr:

Mezi jednotlivými výsledky spalovacích zkoušek jsou vždy určité rozdíly. Tyto rozdíly jsou způsobené například nehomogenitou paliva, nestejnými rozměry paliva, způsoby přikládání, tahovými poměry v komíně apod. To způsobuje, že i mezi výsledky vyzářeného tepelného výkonu jsou jisté rozdíly. Ze zkušeností vyplývá, že rozptyl mezi výsledky činí přibližně 10 %. To je také důvod, proč bylo při měření a výpočtech vyzářeného tepla přijato několik zjednodušení týkajících se zákonů záření. Je totiž zbytečné snažit se při jedné zkoušce stanovit tento výkon s přesností na několik desetinných míst, když bude při jiné zkoušce výsledek jiný. Toto zjednodušení si samozřejmě nemůžeme tak úplně dovolit v případě, že měříme koncentrace jednotlivých složek spalín předepsaných normou.

Procentuální podíl tepla vyzářeného prosklenou částí dvířek tvoří 11% z celkového výkonu kamen. Plocha skla činní 10,5 % z celkové teplosměnné plochy kamen. To by znamenalo, že se sklem předá stejné množství tepla jako zbytkem kamen. Což ovšem není pravda, protože k teplu vyzářenému sklem musíme ještě připočítat teplo předané konvekcí mezi sklem a okolím. Výsledkem tedy je, že skleněnou výplň dvířek se po přepočtu na jednotku plochy do okolí předá nejvíce tepla. Z toho plyne, že kamna s větší plochou dvířek předají do okolí více tepla i bez dalších přídavných teplosměnných ploch. Je však otázkou, zdali příliš velká plocha kamen nezpůsobí příliš velké ochlazení plamene což by mohlo způsobit zvýšení koncentrace CO ve spalínách. Tento problém byl také ověřován. Zatím však provedené zkoušky nedávají jednoznačné výsledky.

Literatura

1. KOLAT P. *Přenos tepla a hmoty*. VŠB TU, Ostrava, 1986, str. 199 až 218

EMISNÍ KONCENTRACE PŘI SPALOVÁNÍ PEVNÝCH BIOPALIV NA BÁZI ŠŤOVÍKU

EXHAUST-EMISSION LEVELS ALONG COMBUSTION OF SOLID BIOFUELS BASED ON SORREL

Autor: Ing. Ondřej Vazda¹, Ing. Martin Polák¹

¹Česká zemědělská universita v Praze, Technická fakulta
Kamýčká 129, 165 21, Praha 6 - Suchbátka
karel@tf.czu.cz, vazda@tf.czu.cz

Abstrakt: V tomto příspěvku jsou hodnocena biopaliva vyrobená na bázi šťovíku, a to z hlediska tvorby emisí CO a NO_x. Jedná se o paliva ve formě pelet, slisovaná z čistého šťovíku a jeho kombinací s dalšími biopalivy v různých poměrech. Měření probíhala na dvou standardních zařízeních - teplovodních kotlích Viadrus U22 a Verner A25 o shodném výkonu 25 kW.

Klíčová slova: pevná biopaliva, teplovodní kotel, spalování, emisní koncentrace.

1. Úvod

Na Českou republiku je ze strany Evropské Unie kladen požadavek pokrýt do roku 2010 z obnovitelných zdrojů 6 až 8 % celkové energetické spotřeby, přičemž v současné době jsou to zhruba 2 %. V českých podmínkách je prostor především pro energii z biomasy, která může pomoci vyřešit problém zemědělské půdy ležící ladem a zároveň přispět k vytvoření nových pracovních míst. Abychom mohli zvýšit využívání biomasy pro výrobu energie v odpovídající míře, je nezbytné zajistit jednak dostatečné a stabilní množství surovin pro výrobu biopaliv, ale také získat zkušenosti s jednotlivými variantami energetického využití.

Tento článek se zabývá problematikou spalování energetických plodin, které jsou v současné době testovány. Problémem při spalování nových energetických plodin je jednak jejich výhřevnost a popelnatost, ale s ohledem na životní prostředí je to zejména tvorba emisí. Tyto emise jsou závislé především na technologii spalování. Mezi problematické složky patří oxid uhelnatý, oxidy dusíku, oxidy síry a sloučeniny obsahující chlór.

Měření popsané v tomto článku má za úkol ověřit možnost využití biopaliv na bázi krmného šťovíku (Rumex OK2) ve standardních spalovacích zařízeních malých výkonů. Cílem je stanovit spalovací charakteristiky vybraného paliva spalovaného za různých podmínek a výsledkem je zjištění emisních parametrů v závislosti na typu spalování a určení nejvhodnější technologie pro dané palivo. Zkoušky byly prováděny na dvou spalovacích zařízeních, kotli Viadrus U22 a Verner A25 o shodném výkonu 25 kW.

2. Materiál a metody

2.1. Popis spalovacích zařízení

Kotel Viadrus U22 je konstruován jako teplovodní kotel vybavený hořákem pro spalování pelet. Hořák je litinový se spodním přívodem paliva a rozvodem spalovacího vzduchu tělesem hořáku. Ventilátor spalovacího vzduchu je umístěn na vstupu do kotle, jedná se tedy o systém přetlakový. Spalování probíhá pod keramickou vyzdívkou, jež slouží jako stabilizátor hoření. Detail hořáku je na obr. 1.



Obr. 1 Spalovací komora kotle Viadrus U22

Kotel Verner A25 je konstruován rovněž jako teplovodní. Spalovací komora má ploché dno se šesti pohyblivými roštnicemi, které v cyklech vynášejí vyhořelé palivo do popelníku. Přívod paliva je zadní stěnou komory pomocí šnekového dopravníku. Spalovací vzduch je přiváděn boční vyzdívkou komory. Tento systém je rovněž přetlakový. Detail je na obr. 2.



Obr. 2 Spalovací komora kotle Verner A25

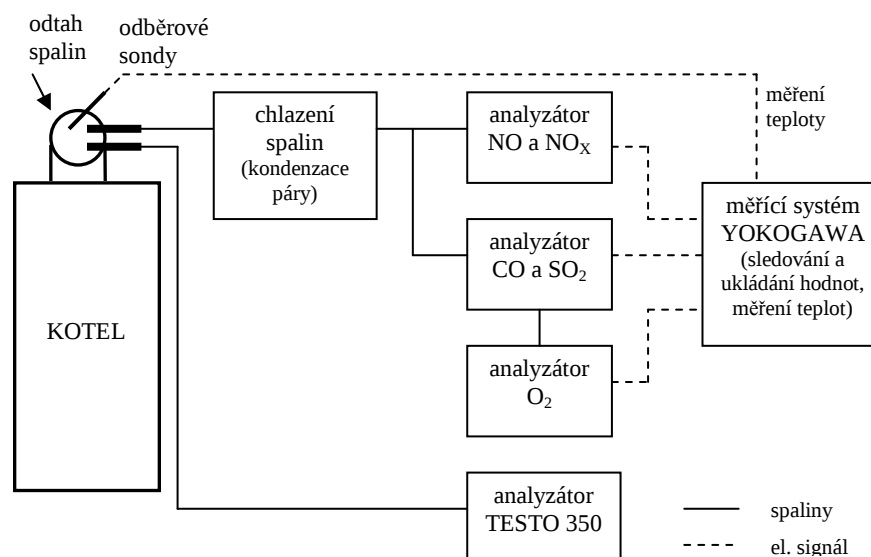
2.2. Metodika měření

Spalovací zkoušky paliv probíhaly na výše uvedených zařízeních po nastavení provozních parametrů na optimum.

U obou kotlů bylo možno regulovat délku příkládacího cyklu. U kotle Viadrus se posléze jako nejvhodnější ukázalo nastavení 10 s příkládání, 35 s prodleva. U kotle Verner nejlépe vyhovovala kombinace 3 s příkládání, 10 s prodleva. U tohoto kotle lze také nastavit prodlevu mezi roštováním. V našem byla nastavena prodleva 10 minut.

Oba kotle jsou rovněž vybaveny regulovatelnou přívěrou na vstupu do ventilátoru spalovacího vzduchu.

Odběr spalin pro analýzu probíhal pomocí odběrové sondy a nasávacího čerpadla. Ze spalin je nejprve kondenzací odstraněna veškerá vlhkost a poté jsou vedeny k analyzátorům. Záznam z analyzátorů je přes sběrnici dat ukládán do paměti přístroje. Schéma měřicího okruhu je uvedeno na obr. 3.



Obr. 3 Schéma zapojení měřicích přístrojů

2.3. Palivo

Testovaným palivem byly pelety o průměru 8, případně 10 mm, vyrobené z energetického šťovíku Uetuša a jeho kombinací s dalšími biopalivy - chrasticí, křídlatkou, slámou, konopím a dřevem. Podíl šťovíku v jednotlivých palivech je v rozmezí 50 až 100 %.

Jako referenční palivo slouží pelety o průměru 8 mm, slisované z pilin měkkého dřeva - pilařského odpadu.

Byla testována následující paliva:

kotel Viadrus U22

- šťovík,
- šťovík + dřevo (1:1),
- šťovík + kůra (1:1) a (3:1),
- šťovík + obilná sláma (1:1) a (3:1),
- šťovík + chrastice (1:1) a (3:1),
- šťovík + křídlatka (3:2),
- šťovík + řepková sláma (3:1);

kotel Verner A25

- šťovík,
- šťovík + chrastice (1:1),
- šťovík + konopí (1:1),
- šťovík + dřevo (3:1);

2.4. Emisní limity

Směrnice MŽP č. 13/2002 (Ekologicky šetrný výrobek)

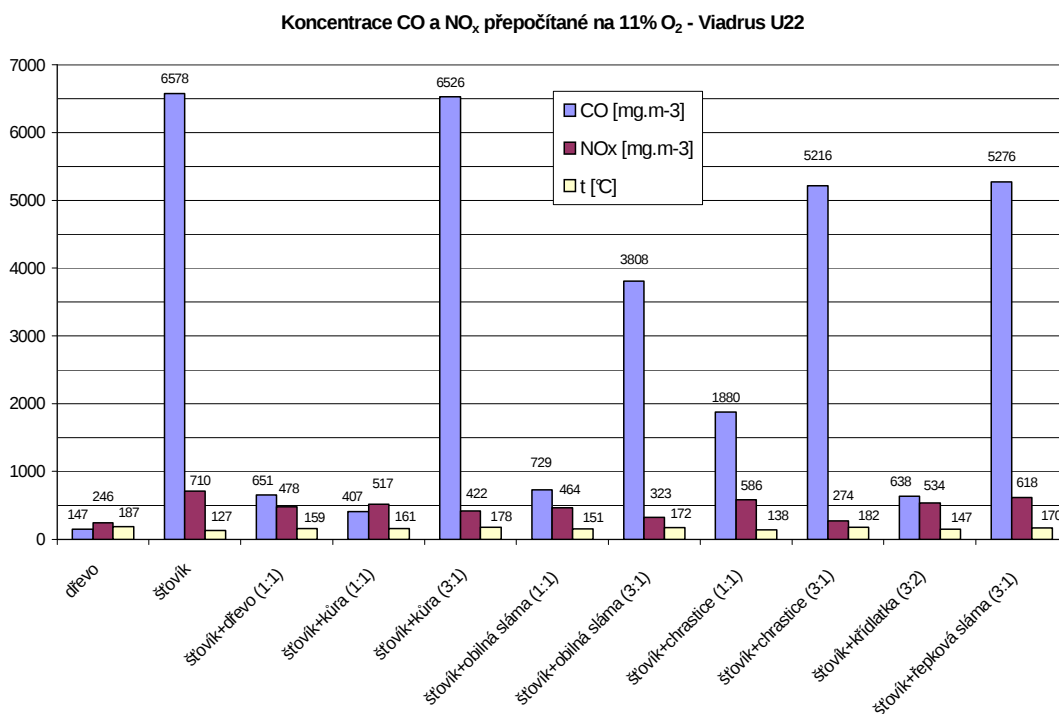
Výkon do 200kW, přepočítáno na 11% O₂

CO - 2000 mg.m⁻³

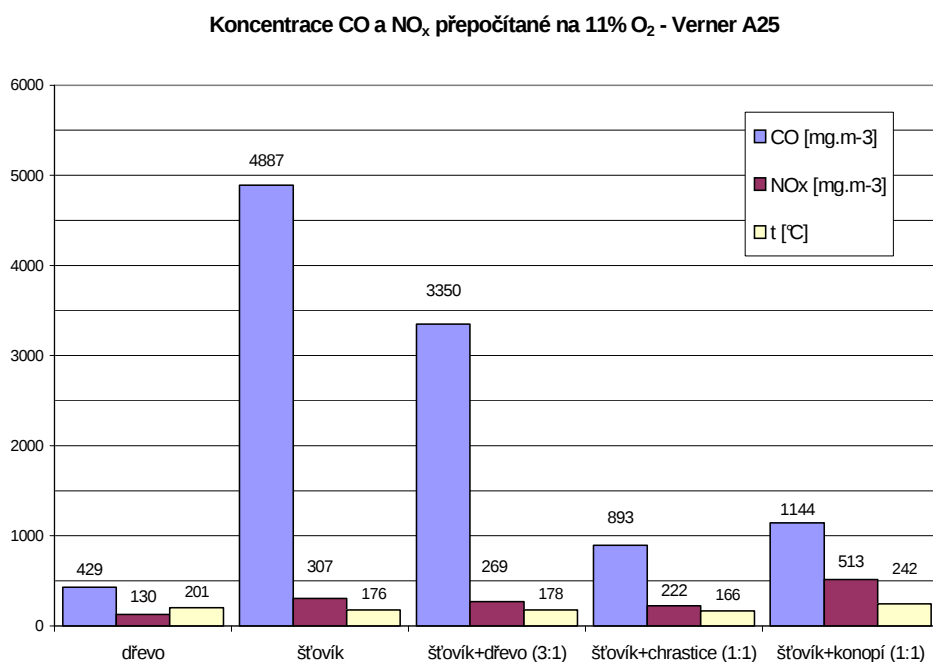
NO_x - 250 mg.m⁻³

3. Výsledky a diskuse

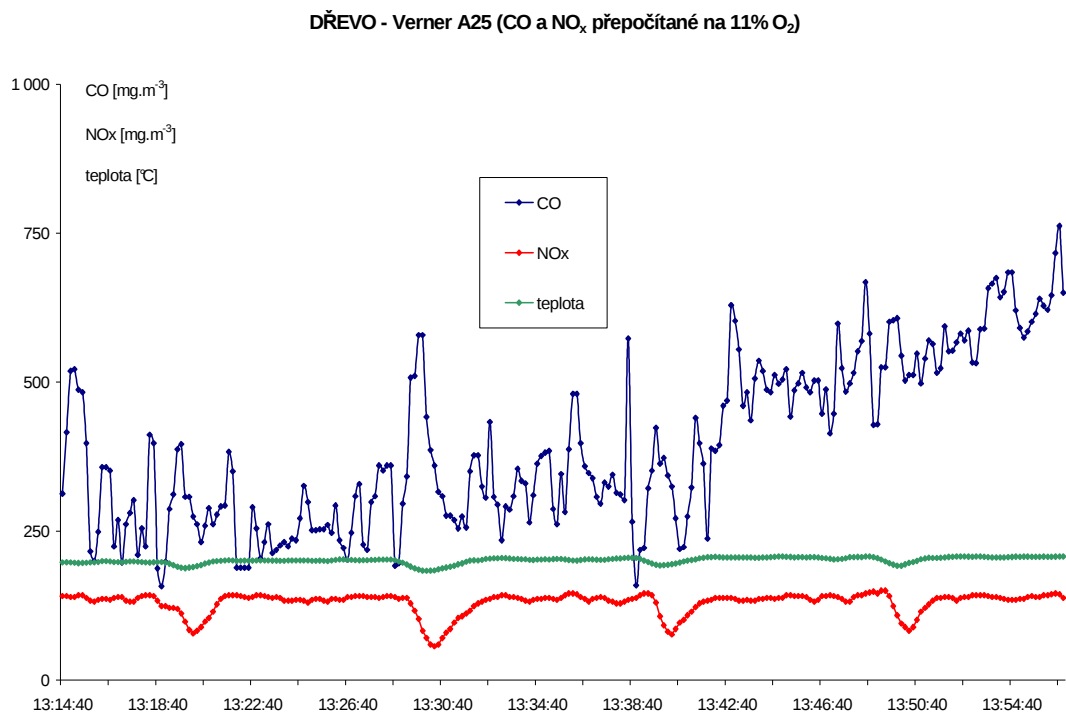
V následujících grafech, obr. 4 a 5, jsou porovnány průměrné koncentrace oxidu uhelnatého, oxidů dusíku a teploty spalin pro jednotlivé kotle a různé druhy paliv. Dále je uveden příklad časové závislosti tvorby CO a NO_x a průběh teplot na kotli Verner A25 u dřeva (obr. 6) a čistého šťovíku (obr. 7), pro znázornění rozdílu mezi palivem s nejlepšími a nejhoršími výsledky.



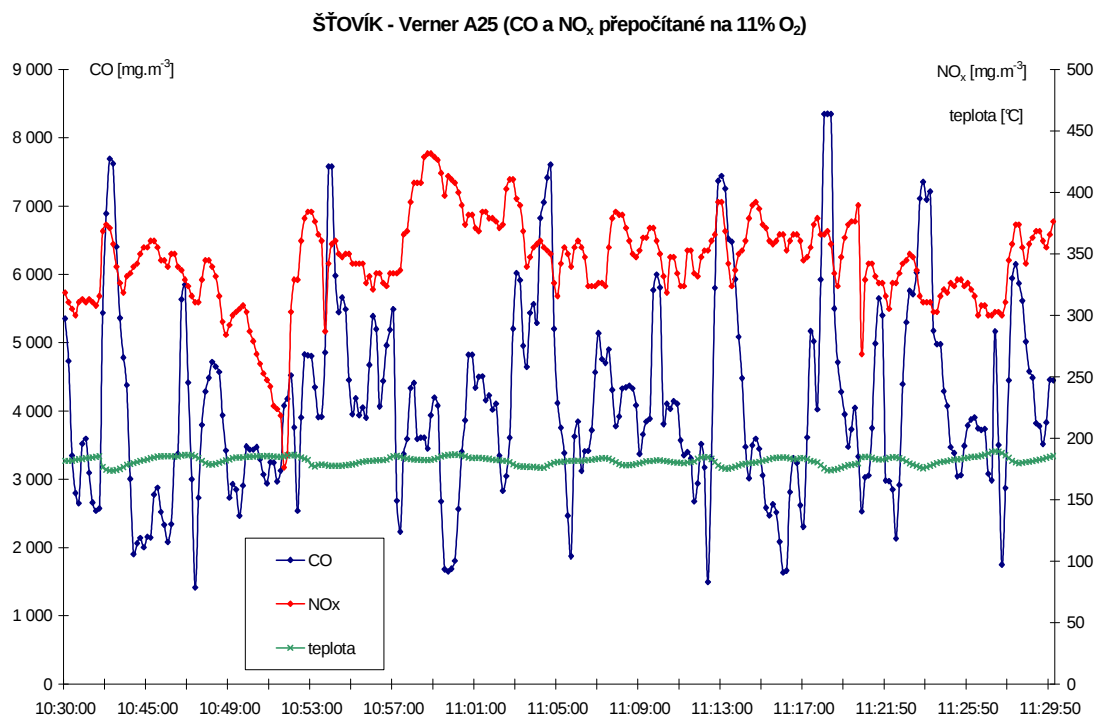
Obr. 4 Průměrné koncentrace a teploty spalin - Viadrus U22



Obr. 5 Průměrné koncentrace a teploty spalin – Verner A25



Obr. 6 Průběh tvorby CO a NO_x pro DŘEVO – Verner A25



Obr. 7 Průběh tvorby CO a NO_x pro ŠŤOVÍK – Verner A25

Budeme-li hodnotit šťovík co se týká emisních koncentrací, průměrná hodnota $6\,587\text{ mg.m}^{-3}$ u kotle Viadrus a $4\,887\text{ mg.m}^{-3}$ u kotle Verner je nejvyšší ze všech testovaných paliv a mnohonásobně převyšuje limit, stanovený pro udělení značky *Ekologicky šetrný výrobek*. Z grafu na obr. 7 je dále patrné, že průběh spalovacího procesu je nestabilní neboť dochází k velkým výkyvům ve tvorbě CO i NO_x. Tato nestabilita částečně souvisí s chováním popela. Zejména při delším provozu a vyšším výkonu vznikají problémy s jeho odstraňováním z roštu spalovací komory. Tvoří se spečené kusy a postupně dochází k zaplnění spalovací komory. To brání potřebnému promíchání spalovacího vzduchu s uvolněnou prchavou hořlavinou a vzniká chemický nedopal, který se projevuje právě jako oxid uhelnatý ve spalínách. Popel se však podobně chová i u většiny dalších biopaliv a nelze tedy tvrdit, že je hlavní příčinou vysokých emisí.

Co se týká ostatních paliv, u všech s podílem šťovíku v poměru 3:1 jsou koncentrace CO rovněž velmi vysoké. Paliva s podílem šťovíku 1:1 jsou na tom již podstatně lépe. Kromě kombinace s chřasticí byly u všech zjištěny koncentrace CO do 1000 mg.m^{-3} . Nejlépe je to vidět u paliva vyrobeného ze šťovíku a kůry, kde při poměru 3:1 byla na kotli Viadrus zjištěna koncentrace CO $6\,526\text{ mg.m}^{-3}$ a při poměru 1:1 klesla na 407 mg.m^{-3} . To představuje proti čistému šťovíku snížení 16krát. Podobné je to i u dalších paliv, např. u směsi s obilnou slámou nebo chřasticí. V těchto případech již není rozdíl tak výrazný, nicméně stále značný. Zajímavá kombinace je směs šťovíku a křídlatky, kde i přes nadpoloviční podíl šťovíku byly naměřeny příznivé hodnoty. U křídlatky však existuje zcela jiný problém, spočívající v tom, že je považována za rostlinu invazní a její pěstování není podporováno. Vzhledem k naměřeným údajům můžeme tedy tvrdit, že u kombinovaných paliv s polovičním podílem šťovíku dochází k výraznému zlepšení emisních parametrů.

Dřevo pochopitelně vykazuje nejlepší výsledky na obou kotlích, a to jak z hlediska emisních parametrů tak z hlediska tvorby popela. Z uvedené časové závislosti pro kotel Verner vidíme, že koncentrace CO se pohybují v rozmezí $200\text{ až }700\text{ mg.m}^{-3}$, což jsou hodnoty řádově nižší. Na průběhu tvorby NO_x pak můžeme vyzorovat jeho těsnou závislost na teplotě spalin, přičemž 4 viditelné propady jsou způsobeny roštováním, jehož cyklus byl nastaven na 10 min. U šťovíku není tato perioda díky nestabilnímu hoření vůbec patrná. Dřevo splňuje požadavky na udělení známky *Ekologicky šetrný výrobek* bez větších problémů na obou spalovacích zařízeních. Popel nepředstavuje u dřeva problém, jelikož obsah v palivu je menší než 1 % a nedochází k jeho spékání.

4. Závěr

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že čistý šťovík nelze doporučit jako palivo pro výše uvedená spalovací zařízení. Důvodem je zejména výrazné překročení emisních limitů oxidu uhelnatého, ale také problémy spojené s vlastnostmi popela, zejména jeho spékáním. Ani při opakovaných pokusech s různým nastavením spalovacího zařízení nebylo dosaženo podstatného zlepšení těchto parametrů.

Kombinací šťovíku s jinými biopalivy je však možné dosáhnout parametrů výrazně lepších, ovšem za podmínky, že podíl šťovíku nebude vyšší než 50 %. Zatím ale ani tato kombinovaná biopaliva nesplňují požadavky pro získání značky *Ekologicky šetrný výrobek*. Předmětem dalšího výzkumu může být testování paliv s podílem šťovíku menším než 50 %, případně úpravy spalovacích zařízení, které zajistí kvalitnější promíchání prchavé hořlaviny se spalovacím vzduchem.

Literatura

1. HUTLA, P., KÁRA, J., STRAŠIL, Z. *Technologické systémy pro využití biopaliv z energetických plodin*. Periodická zpráva řešení projektu NAZV QD 1209. VÚZT, Praha, 2002.
2. PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. *Biomasa – obnovitelný zdroj energie*. 1. vyd. FCC Public, Praha, 2004. 284 str. ISBN 80-86534-06-5
3. POLÁŠEK P., JEDLIČKA M.: Spalování fytoenergetických rostlin v kotli Viadrus Herkules ECO, *Energie z biomasy 2003*, VUT Brno, 2003. Sborník přednášek ze semináře.
4. RYBÍN, M. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. 2. vyd. SNTL, Praha, 1985. 420 str. ISBN 04-227-85
5. VAZDA, O., JEDLIČKA, M., POLÁK, M.: Spalování kompozitních biopaliv, *Energie z biomasy III*, VUT Brno, 2004. Sborník přednášek ze semináře. ISBN 80-214-2805-8.

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MZE 0002703101 *Výzkum nových poznatků vědního oboru zemědělské technologie a technika a aplikace inovací oboru do zemědělství České republiky*.

ANAEROBNÍ DIGESCE ZVOLENÝCH SUBSTRÁTŮ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

ANAEROBE VERGÄRUNG VON GEWÄLTEN SUBSTRATEN IN DEN LABORBEDINGUNGEN

Autor: Ing. Michal Žídek

Vysoká škola báňská – Technická univerzita
17. listopadu 15, 708 33, Ostrava - Poruba
michal.zidek@seznam.cz

Abstrakt: Příspěvek je zaměřen na anaerobní digesci v laboratorních podmínkách. Úvod článku je zaměřen na teorii procesů anaerobní digesce. Dále se článek zabývá problematikou kofermentace s její následnou aplikací v laboratorním fermentoru a na konkrétních kosubstrátech. Na závěr článku je zmíněna úloha dezintegrace vstupního substrátu v anaerobních procesech.

Klíčová slova: anaerobní digesce, kofermentace, substrát, bioplyn, dezintegrace.

1. Obecný úvod

Rozvoj BP (bioplynových stanic) je žádoucí s ohledem na závazek ČR dosáhnout většího podílu obnovitelných energií z celkové energetické spotřeby. I když není reálné, že by BS markantně tento podíl zvýšily, přesto existují důvody proč tyto energetická zařízení provozovat. Tyto důvody se týkají hlavně snižování emisí skleníkových plynů, které vznikají na otevřených zemědělských nebo komunálních skládkách. Jsou to prvky jako CH_4 a CO_2 . Dalšími důvody jsou ekologická likvidace různých odpadních látek vznikajících, jak v průmyslu, tak v domácnostech (např. složky komunálního odpadu, kuchyňské zbytky, zbytky z jatek, atd...).

Obecně je vznik bioplynu (anaerobní fermentace) z organických materiálů souborem na sebe navazujících procesů, při nichž směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Na tomto rozkladu se podílí několik základních skupin anaerobních mikroorganismů, kde produkt jedné skupiny se stává substrátem skupiny druhé a proto výpadek jedné ze skupin má za následek narušení celého systému. Konečnými produkty jsou pak vzniklá biomasa, plyny (CH_4 , CO_2 , H_2 , N_2 , H_2S) a nerozložitelný zbytek organické hmoty, který je z hlediska hygienického a senzorického stabilizován.

Samotný proces probíhá ve čtyřech základních fázích:

- hydrolyzní fáze
- acitogenní fáze
- acetogenní fáze
- metanogenní fáze

Poslední fáze je z hlediska tvorby bioplynu nejdůležitější, protože obsažené metanogenní mikroorganismy mají specifické požadavky na substrát i životní podmínky a jsou často limitujícím faktorem procesu.

Každý anaerobní proces je limitován určitými faktory, které je nutné dodržet, abychom zaručili kvalitu jeho průběhu. Tyto faktory jsou následující:

- *teplota procesu* – je závislá na kultuře mikroorganismů, které jsou pro konkrétní proces využívány. V našem případě se pohybujeme v oblastech mezofilních teplot (tj. 35°C)
- *pH* – hodnota pH je pro průběh velice důležitým faktorem. Rozmezí pH, ve kterém jsou mikroorganismy schopny růst, je v neutrální oblasti okolo 6,5-7,5.
- *přítomnost živin* – potřebný poměr živin se udává jako CHSK:N:P v rozmezí od 300:6,7:1. Vedle těchto prvků jsou neméně důležité také stopová množství některých prvků, která nám mohou zvyšovat metanogenní aktivitu např. Na, K, Ca, Se, Ni, Co, atd.
- *přítomnost toxických a inhibujících látek* – nejčastěji vyskytující se látky, které svými inhibičními účinky mohou ovlivnit nebo zcela zastavit proces jsou amoniak a mastné kyseliny, jejichž tvorba je závislá na pH procesu.

Základním substrátem každého procesu jsou zvířecí exkrementy (např. prasečí kejda), které obsahují dostatečné množství bakterií potřebných k najezení procesu. Úkolem našeho výzkumu je tyto základní substráty kombinovat s dostupnými tzv. kosubstráty. Tento proces je pak nazýván kofermentací.

2. Co je kofermentace a její využití

Kofermentace je technologie umožňující fermentovat při anaerobní digesti např. zvířecí fekálie společně s dalšími bioodpady ze zemědělské, komunální či průmyslové sféry. Ze zemědělství jde především o travní fytomasu, která počínaje r.2001 musí být z dotačně udržované zatrávněné půdy odstraňována. Tato fytomasa může být též senážována a skladována pro bioplynování v zimním období.

Analogické problémy s travní fytomasou vznikají i v komunální oblasti při údržbě veřejné zeleně, kde v ČR odpadá ročně cca 200 000 t trávy. Na zemědělských bioplynových stanicích (na základě zkušeností z NSR) je účelné kofermentovat kuchyňský odpad z jídelen a restaurací včetně olejů po smažení a obsahu kuchyňských lapolů. Z průmyslových bioodpadů jsou vhodné pro kofermentaci především odpady z potravinářského průmyslu. V případě separovaně sbíraného komunálního bioodpadu, je možno jako způsob jeho zpracování využít také kofermentaci na zemědělských bioplynových stanicích. Ceny za zpracování komunálních a průmyslových bioodpadů se vlivem účinnosti nové legislativy odpadů začnou zvyšovat a mohou tak zabezpečit ekonomickou efektivnost bioplynových stanic a prosperitu jejich provozovatelů.

3. Kofermentace na laboratorním zařízení

Základní složkou komplexního výzkumu jsou zkoušky na laboratorním fermentoru DCU 300 (viz. obr.1, 2). Fermentační nádoba je ze skla o objemu 10 l. Uprostřed je umístěno míchadlo, které zajišťuje dobré promísení směsi po celém jejím objemu. Ohřev směsi zajišťuje topná vložka z vnější strany nádoby. Součástí fermentoru je řídicí jednotka regulující nastavené hodnoty procesu.

Výstupem každého procesu jsou informace o:

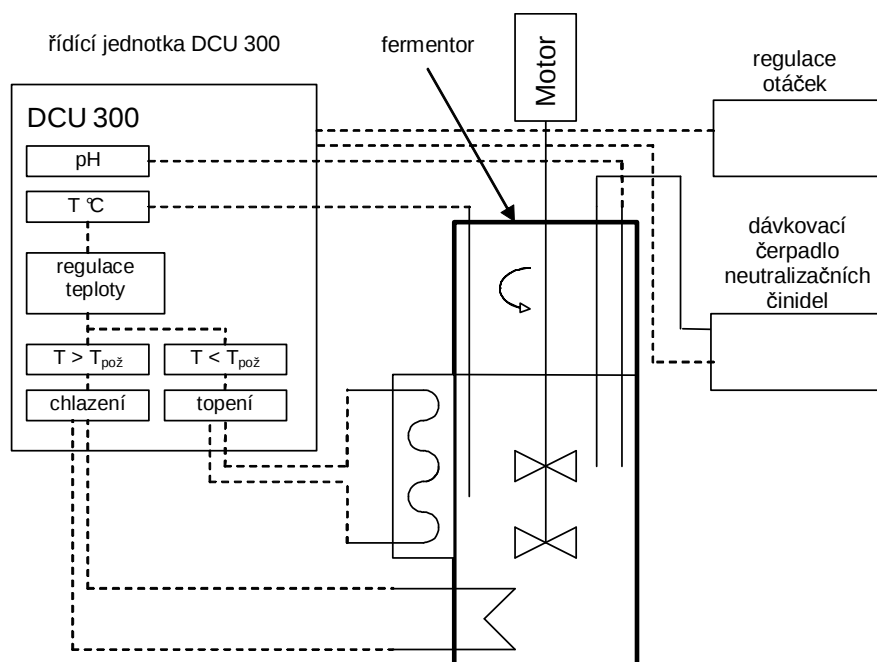
- chemickém složení substrátů (N, P, CHSK, rozpuštěné a nerozpuštěné látky)
- obsahu sušiny, obsahu organické sušiny v sušině, obsahu ligninu

- analýzy výstupního bioplynu (C_xH_y , CO_2 , H_2 , H_2S)
- výtěžnosti bioplynu
- chování substrátu v průběhu procesu
- mikroskopické analýzy

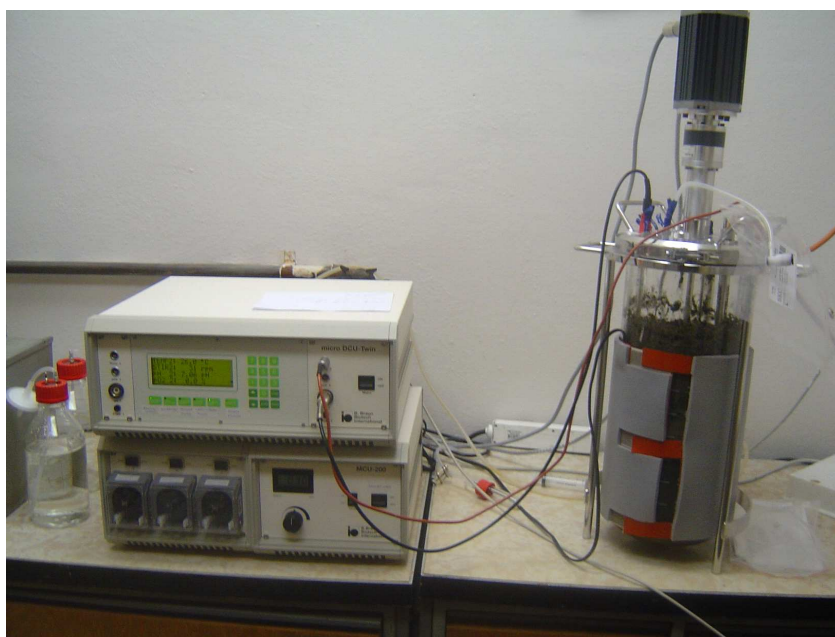
Neměnné hodnoty procesu:

Teplota = 35 ± 1 °C

Otáčky = 10 ± 1 ot/min⁻¹



Obr.1 Schéma zapojení laboratorního fermentoru DCU 300



Obr.2 Celkový pohled na laboratorní zařízení pro fermentaci DCU 300

4. Fermentační zkoušky:

Při každém nově započatém procesu potřebujeme znát obsah sušiny substrátu a ko-substrátu, abychom mohli stanovit jejich vzájemný poměr. V zásadě je za směrodatnou hodnotu brán obsah sušiny celkové směsi mezi 10-12% (v praxi musí být zaručena čerpatelnost, což znamená u některých látek obsah sušiny max. 20%).

V našem případě se neřídíme čerpatelností materiálu, protože použitá metoda, není založena na kontinuálním plněním materiálu do fermentoru, nýbrž je jen jednou do procesu přivedena a po uplynutí doby zdržení je z procesu vynesena tzv. batch systém.

Tab.1 použité substráty pro fermentaci

číslo zk.	použitý kosubstrát	základní substrát	poměr zákl.substrát/kosubstrát [hm. %]
0.	travní seč	prasečí kejda	Každá směs byla v takovém poměru, aby výsledný obsah sušiny byl 10-12%
1.	vápněný kal z výroby celulózy		
2.	nevápněný kal z výroby celulózy		
3.	sláma pšeničná		
4.	nevápněný kal z výroby celulózy + bioenzymy	-	
5.	bambus	prasečí kejda	

Tab.2 obsahy sušiny a organické sušiny zvolených substrátů (viz.[2])

měřené veličiny v surovém vzorku	sušina [%]	sušina [%] (z literatury) ¹	organický podíl v sušině [%]	organický podíl [%] (z literatury) ¹
prasečí kejda	4,5	2,5-9	74,5	74,5
travní seč	35	26-82	84,93	84,93
nevápněný kal z výroby celulózy	78,04	-	85,88	85,88
sláma pšeničná	96,07	85-93	80,68	80,68
bambus	94,52	89-95	97,26	97,26

Jako příklad jsem vybral zkoušku 2, při které byl kofermentován nevápněný kal z výroby celulózy společně s prasečí kejdou

trvání zkoušky : 20 dní

Tab.3 náplň reaktoru

	jednotka	hodnota	v hm.%
hmotnost celkem	[g]	8128	-
prasečí kejda	[g]	4128	51
H ₂ O	[g]	2000	25
kosubstrát	[g]	2000	25

Tab.4 Rozbor tekuté fáze z reaktoru

stanovovaná veličina	jedn.	reaktor před	reaktor po ukončení procesu
R.L. 105°C	[mg/l]	13 150	12 000
R.L. 550°C	[mg/l]	7 446,1	5 233
N.L.	[mg/l]	560	200
NH ₄	[mg/l]	360,48	481,13
NO ₂	[mg/l]	-	-
NO ₃	[mg/l]	58,28	42,43
PO ₄	[mg/l]	9012	8 028,76
CHSK Cr	[mg/l]	2 662,55	2 460,78

N.L.- nerozpuštěné látky, R.L.- rozpuštěné l., CHSK Cr- chem. spotřeba O₂ (stanovení dichromanem)

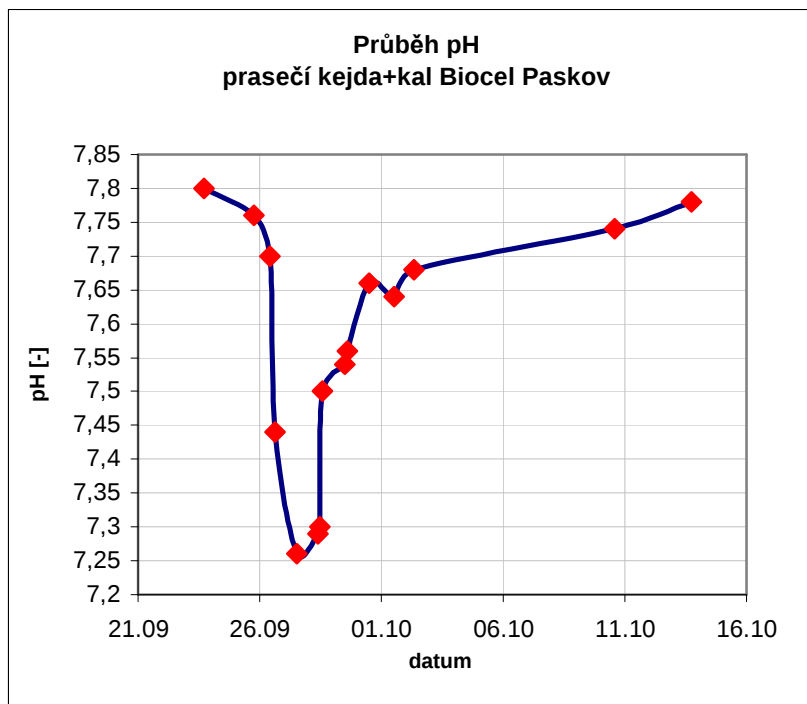
Stabilita procesu

V zásadě může být řečeno, že se substráty chovaly ve fermentačním procesu velmi stabilně. V průběhu procesu nedocházelo k pění nebo k tvorbě plovoucí usazeniny. pH kolísalo mezi hodnotami 7,2-7,8 (viz. graf č.1).

Specifická produkce plynu

V zásadě můžeme k bioplynovým výnosům říci následující:

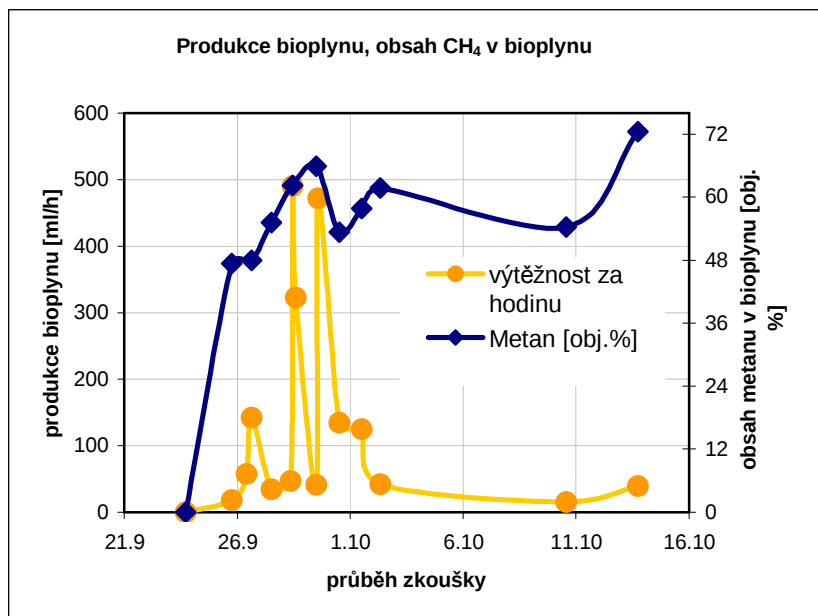
- Dosáhli jsme průměrné výtěžnosti kolem 43,5ml/hod. z celkovou výtěžností 21000ml plynu.
- Produkce značně kolísala viz graf č.2. Příčinou byly 2 poškozené odběrové vaky.



Graf 1 průběh pH (kejda + kal z výroby celulózy)

Kvalita plynu

Kvalita plynu může být označena za uspokojivou. V průměru jsme dosáhli více než 55-60 % metanu/m³bioplynu(graf č.2). Amoniak ani H₂S nebyly stanovovány.Oxid uhličitý stál v přímém poměru k obsahu metanu. Ostatní uhlovodíky, které byly stanoveny, se pohybovaly pod limitními hodnotami. Také H₂ jako jeden z nejdůležitějších indikátorů procesu se pohyboval pod hranicí 0,05%.



Graf č.2 produkce a obsah metanu v bioplynu

5. Dezintegrace na modelovém zařízení

Součástí komplexního výzkumu na naší katedře je dezintegrace vstupní hmoty na modelovém zařízení dezintegrátoru.



Obr.3 detail nožů



Obr.4 model dezintegrátoru

Dezintegrace je důležitým prvkem na vstupu do vlastního fermentačního procesu. Kofermentát by měl být co možná nejvíce rozdrcen, abychom zvětšili reakční povrch pro bakterie. Tím zajistíme vyšší rychlost rozkladu kosubstrátu. V praxi drcení materiálu znamená spotřebu vlastní vyrobené energie. Je proto účelem zajistit dezintegraci kofermentátu tak, aby byla dosažena požadovaná granulometrie v závislosti na minimálně stanoveném příkonu dezintegrátoru a času.

V současné době jsme provedli testy s noži, které byly vyrobeny speciálně pro účely rozměňování trávy.

Literatura

1. STRAKA F. a kol. autorů: *Bioplyn*, GAS s.r.o., Říčany 2003, ISBN 80-7328-029-9
2. BASERGA U., EGGER K., WELLINGER A.: *Biogas aus Festmist*, FAT Bericht Nr.451-1994
3. BASERGA U.: *Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, FAT Bericht Nr.546-2000
4. SBORNÍK KONFERENCE: *Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR po vstupu do EU*, Třeboň 2004, ISBN: 80-239-3713-8

Autor :	Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek	
Vysokoškolský ústav :	Výzkumné energetické centrum	740
Název :	Možnosti energetického využití biomasy, sborník	
Místo, rok vydání :	VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005	
Počet stran :	175	
Vydala :	VŠB-Technická univerzita Ostrava	
Tisk :	Ediční středisko VŠB-TU Ostrava	
Náklad :	55 ks	
Neprodejné		

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 80-248-0834-X