



Energetyczne właściwości kompostu

Energetic properties of compost

Ondřej ZAJONC¹⁾, Helena RACLAVSKÁ²⁾, Dagmar JUCHELKOVÁ³⁾,
Martina VOLFOVÁ⁴⁾

¹⁾ Ing.; ENET, VSB – Technical University Ostrava; 17.listopadu 15 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; e-mail: ondrej.zajonc@vsb.cz,

²⁾ Prof. Ing., CSc.; Institute of Geological Engineering, Faculty of Mining and Geology, VŠB – Technical University Ostrava; 17.listopadu 15 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; e-mail: helena.raclavska@vsb.cz, tel.: (+420) 597 324 365

³⁾ Prof. Ing., Ph.D.; ENET, VSB – Technical University Ostrava; 17.listopadu 15 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; e-mail: dagmar.juchelkova@vsb.cz,

⁴⁾ Ing.; Institute of Geological Engineering, Faculty of Mining and Geology, VŠB – Technical University Ostrava; 17.listopadu 15 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; e-mail: martina.volfova@vsb.cz, tel.: (+420) 597 329 319

Streszczenie

Komposty, które nie mogą być często użyte w rolnictwie, kształtowaniu krajobrazu czy rekultywacji gleby z powodów prawnych, mogą być stosowane w przypadku wytwarzania energii. Całkowita wartość opałowa kompostu osiąga 12 MJ/kg i jest to wywołane występowaniem większości składników w materiałach wejściowych. Zawartość części lotnych (55%) jest około 10% mniejsza niż w przypadku innych rodzajów biomasy. Ilość czystego koks węgla wynosi 10%. W przygotowywaniu paliwa dochodzi do utraty węgla w procesie kompostowania. Aby temu zapobiec, można dodać składnika bogatego w celulozę jak na przykład zużyte kartony. Organicznie związane alkalia uwalniają się podczas kompostowania i przechodzą do fazy wodnej. Zawartość Na_2O i K_2O w suchej materii kompostowej zmniejszyła się o 20%, a zawartość chloru spadła o 30%. Redukcja w składzie alkaliów przyczynia się do niskiego wskaźnika alkaliów w kompoście (0.11–0.12), który nie powinien być przyczyną problemów z odżulaniem się bądź zanieczyszczaniem (wartość wskaźnika alkaliów > 0.17). Kompostowanie skutkuje redukcją całkowitej zawartości elementów niebezpiecznych (Hg – 20% i 10% w przypadku Cd, Zn, Ni) w suchej materii kompostowej.

Słowa kluczowe: kompost, właściwości energetyczne, stałe paliwo wtórne

Wprowadzenie

Produkcowanie kompostu z biodegradowalnych odpadów komunalnych często powoduje trudności związane z aspektami prawnymi. Kompost nie może bowiem być używany do dalszego stosowania w przypadku rolnictwa, kształtowania terenu czy rekultywacji (Rozporządzenie 341/2008 na temat operowania odpadami biodegradowalnymi). Komposty nie są ograniczone limitami zawartości niebezpiecznych składników czy PAHs (policyklic aromatic hydrocarbons – wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) w suchej materii i często nie stosują się do wskaźnika C/N. Ścisłe limity ograniczają natomiast istniejące metody zastosowania kompostu i tworzą potrzebę

Summary

Composts, which cannot often be used in agriculture, landscaping or land reclamation for legislative reasons, may be used for power-generation purposes. The gross calorific value of aged compost reaches 12 MJ/kg and it is conditioned by the abundance of majority components in the input materials. The content of volatile combustible (55%) is by about 10% lower than in other biomass. The fixed carbon content reaches 10%. In preparing fuel the carbon loss during the composting process may be eliminated by means of adding another component high in cellulose, e.g. waste cardboard. During composting organically combined alkali liberate and transfer into the water phase. The content of Na_2O and K_2O in the compost dry matter decreased by 20% and the chlorine content dropped by 30%. A reduction in alkali content contributes to a low alkali index of the compost (0.11–0.12), which shall not manifest problems with slagging or fouling (alkali index value > 0.17). Composting resulted in a reduction of the total content of certain risk elements (Hg – 20%, and 10% in Cd, Zn, Ni) in the compost dry matter.

Keywords: compost, energetics properties, solid recovery fuel

Introduction

Producing compost from biodegradable municipal waste often causes difficulties as according to the valid legislation the compost cannot be used for further applications in agriculture, landscaping or land reclamation (Regulation 341/2008 on details on handling biodegradable waste). Composts do not meet limit values of risk elements or PAHs in the dry matter, and frequently they do not comply with the C/N ratio either. The strict limits restrict the existing methods of compost application and produce a need to search for options of “other applications”. A suitable option can be compost application as a renew-

szukania opcji innych zastosowań. Odpowiednim wyborem może być użycie kompostu jako odnawialnego, niskotemperaturowego źródła ciepła.

Na wartość energii z kompostu ma wpływ proces kompostowania, kiedy podczas rozkładu substancji organicznych do CO₂ bądź CH₄ następuje również redukcja zachodząca w TOC w suchej materii oraz wzrost ilości popiołu czego skutkiem jest zmniejszenie całkowitej wartości opałowej. Biorąc pod uwagę dane literaturowe, spadek zawartości całkowitego węgla organicznego podczas kompostowania waha się od 20 do 60% w zależności od charakteru materiału wyjściowego (Iannotti i inni, 1994; Francou i inni, 2005; Rekha i inni, 2005; Raclavská i inni 2011). Raclavská i inni (2011) stwierdzili spadek całkowitej wartości opałowej 26% materiału początkowego z 16 034 do 11 911 podczas kompostowania. Kompost spełnia regulację 13/2009 dotyczącą wymagań dla jakości paliwa dla stacjonarnych źródeł z punktu widzenia ochrony powietrza, która ustala limit dla całkowitej wartości opałowej równy 10 MJ/kg w stanie suchym.

Aby oszacować efektywne użytkowanie energii, istotne jest być świadomym kluczowych parametrów: zawartość wilgoci i popiołu, zawartość części lotnych i czystego węgla, kompozycja podstawowych składników (C, H, N, S, O), wartość opałowa, niebezpieczne składniki i zawartość alkaliów i chloru ze względu na problemy z osadem podczas procesu spalania. Celem referatu jest rozważenie możliwego odzyskania i zanieczyszczenia w wykorzystaniu energii z kompostów.

Metody

Kompost został uzyskany z Kompostarna Bruzovice, obsługiwanego przez spółkę Rydecka, który znajduje się u podnóża gór Moravskoslezské Beskydy w Republice Czeskiej. W tym zakładzie przemysłowym kompost jest produkowany w halach rolniczych w napowietrzonych i odwodnionych zwałach (dobre warunki tlenowe). Kompostowanie trwało 14 dni. Kompost został przygotowany przez zmieszanie 5% trocin, 60% trawy, 20% końskiego nawozu, 10% pasty ziemniaczanej, 5% warzyw. Aby zwiększyć parametry energetyczne kompostu dodano zużyte tektury, które mogły zmniejszyć zawartość wody i popiołu w biopaliwie.

Analiza fazy mineralogicznej kompostu i popiołu lotnego została wykonana na w pełni zautomatyzowanym dyfraktometrze URD-6/ID 3003 (Rich. Seifert-FPM, SRN) przy następujących warunkach: promieniowanie CoK α , napięcie 40 kV, natężenie prądu 35 mA, stopniowanie 0.05° 2 θ , czas na stopień równy 3 s i cyfrowe przetwarzanie sygnału wyjściowego. Dla określenia ilościowego dodano zważoną

able, low temperature heat source.

The energy value of compost is influenced by the own composting process, when during the decomposition of organics to CO₂ or CH₄ there is also a reduction in the TOC in the dry matter, an increase in ash and thus a decrease in the gross calorific value. According to the literature, the loss in total organic carbon during composting ranges from 20 to 60% in dependence on the character of the input material (Iannotti et al., 1994, Francou et al., 2005, Rekha P., et al. 2005, Raclavská et al. 2011). Raclavská et al. (2011) reports a decrease in the gross calorific value during composting of 26% (i.e. from the input material values of 16,034 to 11,911 kJ/kg of dry matter. Despite the fact the compost complies with Regulation 13/2009 on determining the requirements for fuel quality for stationary sources from the point of view of air protection, which sets a limit for fuel gross calorific value as 10 MJ/kg when dry.

To evaluate an effective energy utilization it is vital to be aware of the key parameters: moisture content, ash content, volatile combustible, fixed carbon, basic element composition (C,H,N,S,O), gross calorific value, risk elements and the content of alkali and chlorine due to the problems with sediment during the combustion process. The objective of the paper is to consider possible slagging and fouling in the energy utilization of composts.

Methods

The compost was drawn from Kompostárna Bruzovice, operated by Frýdecká skládka, a.s., which is situated in the foothills of the Moravskoslezské Beskydy Mountains, Czech Republic. In this plant, the compost is classically produced in an agricultural hall, in aerated and drained heaps frequently turned over for good aerobic conditions. Composting lasted for 14 weeks. The compost was prepared by mixing 5% of sawdust + 60% of grass + 20% of horse manure + 10% of potato paste + 5% of vegetables. To improve the energy parameters of the compost, an addition of waste cardboard was observed, which would decrease the water content and ash in the biofuel.

The mineralogical phase analysis of the compost and fly ash was executed on the URD-6/ID 3003 fully automatic diffractometer (Rich. Seifert-FPM, SRN) under the following conditions: radiation CoK α , voltage 40 kV, current 35 mA, stepping mode with 0.05° 2 θ step, time on step 3 s and digital processing of the output data. For the quantitative determination, a weighed amount of the inner stan-

ilość składnika (10% wagowych ZnO). Próbki zostały ujednorodnione przy pomocy mikronizacji i zmierzone w szklanej kuwecie. Prawnie zastrzeżony program, RayfleX (RayfleX ScanX i RayfleX Analyze, wersja 2.289), został użyty w celu pomiarów i szacowań. Aby przeprowadzić analizę ilościową użyto programu RayfleX Autoquan w wersji 2.6. Jest to komercyjna, zmodyfikowana wersja programu BGMN.

Stężenia najważniejszych składników w kompoście oraz popiół lotny zostały określone dzięki spektrometrii fluorescencyjnej X na próbkach proszkowych (pastylkach). Zastosowano analizę fluorescencyjną rentgenowską z dyspersją energii (SPECTRO X-LAB). Niebezpieczne składniki w kompoście zbadano w odniesieniu do normy CEN EN 13657: Charakteryzacja trawienia odpadów dla późniejszego oznaczenia rozpuszczalnych w wodzie królewskiej składników oraz według normy EN ISO 11885:1998: Jakość wody – Oznaczenie 33 składników poprzez atomową spektrometrię emisyjną ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej.

Podstawowe parametry wytwarzania energii z kompostu

Skamieniałe paliwa (węgiel antracytowy i bituminowi) zawiera ponad 53% czystego koksu i 30–37% materii lotnej. Lignit ma najniższe stężenie czystego koksu (5–40%), a materia lotna stanowi od 27 do 40%. Różne paliwa biomasowe składają się w 12–18% z czystego koksu i 65–85% materii lotnej (Bridgeman T.C. i inni 2010). Podobne zawartości jak paliwo biomasowe są wyrażane przez składniki zastosowane w produkcji kompostu (Tabela. 1). Podczas kompostowania zawartość części lotnych zmniejszyła się o około 30%, a co więcej, nastąpił wzrost w mieszance popiołowej. Strata energii podczas kompostowania została spowodowana przez poszczególne większościowe elementy w materiale wejściowym zastosowanym do produkcji kompostu i zdolność jego biodegradacji. Najwyższą wartość opałową zawierającą się w granicach 25–26 MJ/kg ma lignina, celuloza i hemiceluloza posiada wartość opałową w zakresie 16–18 MJ/kg (Weber H.K. 2007). Podczas rozkładu węglowodanów powstają kwasy humusowe o tej samej wartości opałowej co celuloza i hemiceluloza (Raclavska H. i inni 2011).

Problematycznym parametrem w przypadku wykorzystania wytwarzania energii jest wigoć. Głównym problemem przy stosowaniu kompostu jest niska energetyczność paliwa przy wysokiej zawartości wilgoci, która może wahać się wokół 50% już na samym końcu procesu utrwalań w zależności od warunków przechowywania. Aby wyeliminować ten problem przygotowano biopaliwo zawierające kom-

post was added (10 wt% of ZnO). The samples were homogenised by means of micronisation and measured in a glass cuvette. A proprietary software program, RayfleX (RayfleX ScanX and RayfleX Analyze, version 2.289), was used both for measurement and evaluation. For a semiquantitative analysis, we used the program RayfleX Autoquan version 2.6. It is a commercial, modified version of the BGMN program.

The concentrations of majority elements in compost and in fly ash were determined by means of X-ray fluorescence spectrometry on powder samples (pellets). An energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer (SPECTRO X-LAB) was used. Risk elements in compost were determined according to CEN EN 13657: Characterization of waste digestion for subsequent determination of aqua regia soluble portion of elements and EN ISO 11885:1998 Water quality – Determination of 33 elements by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy.

Basic energy-generation parameters of compost

Fossil fuels (anthracitic and bituminous coal) contain over 53% of fixed carbon and 30–37% of volatile matter. Lignite has the lowest content of fixed carbon (5–40%) and the volatile matter content ranges from 27 to 40%. Various biomass fuels comprise of 12–18% of fixed carbon and 65–85% of volatile matters (Bridgeman T.C. et al. 2010). Similar contents as fuel from biomass are manifested by components applied in the compost production (Table 1). During composting the volatile matter content decreased by about 30% and moreover, there was an increase in ash materials. The loss of energy during the composting process is influenced by the representation of the individual majority components in the input material for compost production and the capacity of its biodegradation. The highest gross calorific value between 25–26 MJ/kg has lignine, cellulose and hemicellulose have a gross calorific value in the range 16–18 MJ/kg (Weber H.K., 2007). During decomposition of carbohydrates humic acids are produced with the same gross calorific value as the initial compounds of cellulose and hemicellulose (Raclavská H. et al. 2011).

A problem parameter as for the energy-generation utilization of compost is the moisture. The major problem in compost application as low-energy fuel is its high moisture content, which can still fluctuate around 50% at the end of the ageing process in dependence on the storing conditions. To eliminate the problem we prepared biofuel, which contained compost and waste paper. It was cardboard, to be more

Tabela 1
Początkowa i końcowa analiza biomasy na początku i na końcu procesu kompostowania oraz i inne rodzaje biomasy

Table 1
Proximate and ultimate analysis of biomass at the beginning and end of composting and other biomass

| | Jednostka Unit | Tektura Cardboard | Papier gazetowy Newsprint | Papier błyszczący Glossy paper | Papier biurowy Office paper | Kompost Compost | |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------|
| | | | | | | początkowy input | końcowy output |
| Zawartość wilgoci Moisture content | % | 7,34 | 6,74 | 2,37 | 5,07 | 65 | 42 |
| Popiół Ash | % | 9,37 | 12,33 | 26,55 | 12,15 | 10,59 | 35,53 |
| Materiał palny Combustible | % | 90,63 | 87,67 | 73,45 | 87,95 | 89,41 | 64,47 |
| Części lotne Volatile matter | % | 82,1 | 76,9 | 66,7 | 79,4 | 83,64 | 54,59 |
| Węgiel stały Fixed carbon | % | 8,53 | 10,77 | 6,75 | 8,55 | 5,77 | 9,88 |
| GCV | GJ/kg | 14,202 | 13,574 | 9,29 | 12,054 | 16,03 | 11,91 |
| GCV * | GJ/kg | 14,5 | 14,9 | | 13,8 | | |
| C | % | 40,43 | 39,72 | 29,67 | 32,36 | 39,44 | 28,98 |
| H | % | 7,29 | 6,58 | 4,63 | 4,77 | 6,92 | 5,13 |
| N | % | 1,85 | 1,26 | 1,17 | 1,61 | 2,99 | 2,36 |
| S | % | 0,14 | 0,001 | 0,001 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| O | % | 50,41 | 37,02 | 36,93 | 49,01 | 34,39 | 17 |

* – Bridgeman T.C. et al. (2010)

post i odpady tekturowe. Odpady te odznaczały się najwyższą całkowitą wartością opałową (GCV), najwyższą zawartością węgla i celulozy oraz najniższym składem materii nieorganicznej. Sporządzono dwa rodzaje peletów ze zmiażdżonego kompostu i tektury (prasa brykietująca JGE 120 Pest Control Vlcnov, Republika Czeska) w celu zbadania zachowania się kompostu podczas produkcji energii. Pierwsze paliwo zawierało 65% kompostu, 30% tektury i 5% wapienia dolomitycznego. Drugie z kolei składało się w 55% z kompostu, 40% tektury, 4% wapienia dolomitycznego i 1% skrobi. Pelety zostały poddane spalaniu w VSB – TU Ostrawa w urządzeniu o mocy 50 kW pracującym w łączonym trybie zgazowania i spalania unoszących się gazów. Analiza popiołu lotnego zamieszczona została w Tabeli 2.

Skład chemiczny popiołu i występowanie faz mineralnych w paliwie ma decydujący wpływ na zachowanie się paliwa podczas produkcji energii. Ze spalania kartonów uzyskuje się stosunkowo mało popiołu (10.5%) i duże zawartości CaO i Na₂O. Zasobność w CaO jest związana z zastosowaniem kamienia wapiennego jako wypełniacza w produkcji tektury. Zwiększona zawartość sodu związana jest z użyciem NaOH lub boraksu będących dodatkami (Przetwarzanie tektury falistej, 2010).

specific, which manifested the highest gross calorific value (GCV), the highest content of carbon and cellulose, and the lowest content of inorganic matter. To test the real behaviour of compost in an energy-producing facility, two types of pellets were made from crushed compost and cardboard (a briquetting press to produce pellets JGE 120 Pest Control Vlcnov, the Czech Republic). The first fuel contained 65% of compost + 30% of cardboard + 5% of dolomitic limestone. The second fuel comprised 55% of compost + 40% of cardboard + 4% of dolomitic limestone + 1% of starch. The pellets were combusted in a model facility at VŠB – TU Ostrava with outoput 50 kW working at the combined principle gassification with following the combustion of rising gasses. The fly ash analyses results from pellet combustion are stated in Table 2.

The chemical composition of the ash material and the occurrence of the major mineral phases in the fuel have a decisive influence on the behaviour of the fuel in an energy-generation facility. Combustion of cardboard produces a relatively low amount of ash (10.5%) with high contents of CaO and Na₂O. The abundance of CaO is related to the application of limestone as filler in cardboard production. An increased content of sodium is connected with used NaOH or borax as an additive (Processing of corrugated cardboard. 2010).

Tabela 2
Analiza chemiczna popiołu lotnego ze spalania peletów
z kompostu i kartonów

Table 2
Chemical analysis of fly ash from combustion of pellets
from compost and cardboard

| | Popiół lotny Fly ash | | | Kompost Compost | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| | 65% kompost compost | + 30% tektura cardboard | 55% kompost compost | + 40% tektura cardboard | Tektura Cardboard | początkowy input | końcowy output |
| SiO ₂ | 30,38 | | 32,30 | | 0,60 | 22,03 | 30,81 |
| TiO ₂ | 0,14 | | 0,18 | | 0,006 | 0,13 | 0,18 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,79 | | 1,82 | | 0,19 | 1,10 | 1,37 |
| Al ₂ O ₃ | 2,87 | | 3,51 | | 0,06 | 1,68 | 2,63 |
| MnO | 0,08 | | 0,09 | | 0,007 | 0,05 | 0,06 |
| MgO | 7,74 | | 10,02 | | 0,96 | 0,83 | 0,94 |
| CaO | 21,83 | | 23,78 | | 64,85 | 2,41 | 3,68 |
| Na ₂ O | 1,20 | | 1,22 | | 6,84 | 1,02 | 0,78 |
| K ₂ O | 2,59 | | 2,69 | | 0,01 | 2,78 | 2,27 |
| P ₂ O ₅ | 1,96 | | 1,97 | | 0,18 | 1,69 | 2,09 |
| SO ₃ | 0,56 | | 0,39 | | 0,17 | 0,81 | 1,11 |
| Σ | 71,96 | | 78,77 | | 73,88 | 35,53 | 48,36 |
| Popiół w paliwie Ash in fuel | 25,90 | | 23,63 | | 9,37 | 10,59 | 35,53 |
| GCV (GJ/kg) | 12,00 | | 12,34 | | 14,20 | 16,03 | 11,91 |
| R _{b/a} | 0,99 | | 1,04 | | 86,12 | | |
| Wskaźnik alkaliczny Alkaline index | 0,12 | | 0,11 | | 0,09 | | |

Popiół w kompoście

Podczas procesu kompostowania obserwuje się zmniejszenie i konwersję substancji organicznych oraz wzrost ilości składników nieorganicznych. Tabela 3 zestawia główne fazy mineralne reprezentowane w materiale wejściowym i przetworzonym kompoście. Z wyjątkiem minerału sylwinu, obecne fazy mineralne wchodziły w skład gleby i wnikały do kompostu podczas zbioru i przeładunku trawy. W przetworzonym kompoście zawartość fazy mineralnej wzrosła o 2,27–2,76 razy. Ponieważ sylwin został uwolniony do fazy wodnej podczas procesu kompostowania, brakuje go w przetworzonym kompoście.

Wiadomo z obserwacji materiału wyjściowego i przetworzonego kompostu obfitych w ważne składniki (Wykres 1), że podczas kompostowania nastąpił spadek ilości alkaliów (Na, K) i Mg. Te elementy wraz z chlorem zostały uwolnione ze struktur organicznych do fazy wodnej. Najistotniejszym jest uwolnienie chlorków i substancji rozpuszczonych do fazy wodnej występujące pomiędzy drugim i trzecim tygodniem. W tym okresie do wody przedostały się następujące ilości składników: substancje rozpuszczone – 185 g/kg (włączając w to rozpuszczoną materię organiczną – DOC), chlorki – 14.6 g/kg kompostu i fosforany – 1.5 g/kg.

Ash material in compost

During the composting process there is a decrease and conversion of organic substances and an increase in the inorganic components. Table 3 states the major mineral phases represented in the input material for composting and in the aged compost. Except for sylvite mineral, the present mineral phases make part of the soils and penetrated the compost during harvest and handling of grass. In the aged compost the mineral phase content increases from 2.27 to 2.76 times. Sylvite is missing in the aged compost, as it liberated into the water phase during the process of composting.

It is apparent from the observation of the majority components abundant in the input material and in the aged compost (Fig.1) that during composting there was a fall in alkalis (Na, K) and Mg. These elements along with chlorine released from the organics structure into the water phase. The most substantial release of chlorides and solutes into the water phase occurred between the 2nd and 3rd weeks. In this period the following released into the water phase: solutes – 185 g/kg (including dissolved organic matter – DOC), chlorides – 14.6 g/kg of compost and phosphates – 1.5 g/kg.

Tabela 3
Skład mineralogiczny – na początku i na końcu procesu kompostowania

Table 3
Mineralogical composition – start and end of composting

| Fazy mineralogiczne Mineralogical phases | Przed kopostowaniem Input for composting | Po kompostowaniu Output - compost |
|--|--|--------------------------------------|
| | (% ± odchylenie standardowe) (% ± standard deviation) | |
| Amorficzna Amorphous | 86,00 ± 1,35 | 64,47 ± 7,43 |
| Plagioklaz – albit [Na (AlSi ₃ O ₈)] Plagioclase – albite [Na (AlSi ₃ O ₈)] | 1,77 ± 0,85 | 4,89 ± 3,59 |
| Plagioklaz – anortyt [CaAl ₂ Si ₂ O ₈] Plagioclase – anortite [CaAl ₂ Si ₂ O ₈] | 1,02 ± 0,54 | 2,44 ± 0,41 |
| Muskowit KAl ₂ (OH·F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀ Muscovite [KAl ₂ (OH·F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀] | 0,54 ± 0,21 | 1,27 ± 0,52 |
| Kalcyt (CaCO ₃) Calcite (CaCO ₃) | 1,14 ± 0,34 | 2,59 ± 0,76 |
| Kwarc (SiO ₂) Quartz (SiO ₂) | 9,31 ± 0,75 | 24,34 ± 7,96 |
| Szłwit (KCl) Sylvite (KCl) | 0,22 ± 0,14 | |
| Yawartość popiołu – 550°C Ash content – 550°C | 10,59 | 35,53 |

Zachowanie się składników niebezpiecznych w procesie kompostowania jest wywoływane różnymi procesami. Zawartość tych składników w kompoście przetworzonym spowodowane jest przez właściwości substratów wejściowych jak również przez procesy konwersji organicznej podczas kompostowania, które znacząco wpływają na formę w jakiej występują składniki i ich dostępność biologiczną (Ingelmo F. i inni, 2011). Hsu i inni (2001) stwierdzili, że zawartość elementów niebezpiecznych w czasie kompostowania wzrasta 2.7 razy. Podobny wzrost w przypadku zawartości Cd i Pb został opisany w publikacji autorstwa Cai Q.Y. i inni, 2007, a przyrost zawartości Cu i Zn jest niższy, tj od 1.1 do 1.3 razy. Nomeda S. i inni (2008) odkryli wyższe stężenia Cu i Zn w kompoście przetworzonym. Odwrotne wyniki – spadek zawartości Cu, Zn i Pb w przetworzonym kompoście zostały opisane przez He M.M. i innych (2009).

Ponad 70% całkowitej zawartości Cu jest związane przez organiczny składnik, podczas gdy Zn jest przeważnie związany przez formę jonową lub tlenek-wodorotlenek Fe-Mn gdzie wykazuje on niewielką ruchliwość. Różnorodność zawartości składników niebezpiecznych jest związana z procesem humifikacji, ze wzrostem zdolności wymiany jonowej (Iqbal M.K. i inni, 2010) i zmienności w rozkładzie elementu w fazie wodnej, fazie wymiany i składnika organicznego. Najintensywniejsze uwolnienie elementów niebezpiecznych występuje podczas pierwszych 49 dni (Hsu i inni 2001).

The behaviour of risk elements during composting is influenced by various processes. The content of risk elements in the aged compost is affected by the characteristics of the input substrates as well as by the organics conversion processes during composting, which significantly influence the form of element occurrence and their bioavailability (Ingelmo F. et al. 2011). Hsu et al. (2001) state that the content of risk elements during the composting process rose 2.7 times. A similar increase in Cd and Pb contents in the compost is reported by (Cai Q.Y. et al. 2007) and in Cu and Zn the content increase is lower, i.e. from 1.1 to 1.3 times. Also, Nomeda S. et al. (2008) identified higher contents of Cu and Zn in the aged compost. Contrary results – a decrease in the content of Cu, Zn and Pb in the aged compost was reported by He M.M. et al. (2009).

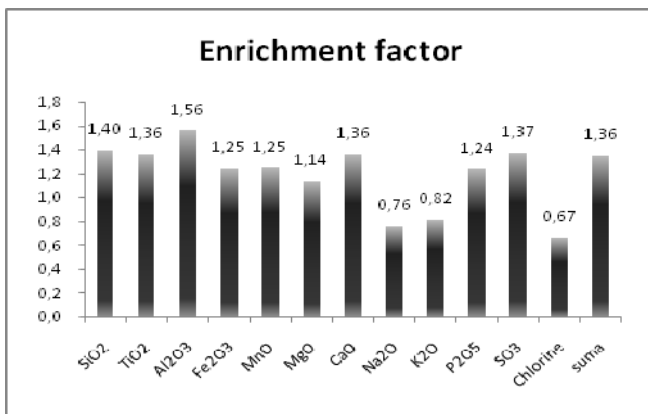
Over 70% of the total Cu content is bound onto the organic constituent, while Zn is predominantly bound in an ion-exchange form or onto Fe-Mn oxide-hydroxide, where it may manifest substantial mobility. A variation in the risk element content is connected with the humification process, an increase in the cation exchange capacity (Iqbal M.K. et al. 2010) and a variation in the element distribution among the water-soluble phase, exchange phase and the organic constituent. The most intense release of risk elements occurs during the first 49 days (Hsu et al. 2001).

W procesie kompostowania osadu ściekowego składniki o najwyższej ruchliwości to Ni > Cd >> Cr > Cu >> Pb (Sprynskyy M i inni, 2007). Wyniki opublikowane przez Liu Y. i innych (2007) wskazują na większą ruchliwość Zn i Pb, a zwiększona ruchliwość u Cu i Ni nie została ustalona. W odniesieniu do Nomedo S. i innych (2008), ruchliwość składnika jest określona na podstawie ekstrakcji sekwencyjnej Tessiera przetworzonego kompostu w kolejności: Mn > Zn > Pb > Cu. Ołów jest najsilniej ograniczonym składnikiem, natomiast Ni najsłabiej, przy czym Zn, Cu i Cd wykazują pośrednie właściwości sorpcyjne (Smith S.R. 2009). Ingelmo i inni (2011) stwierdzili, że podczas kompostowania wyższe stężenie Zn, Cu, Ni i Cd znajdują się w fazie zmobilizowanej. Zachowanie się Zn wywołane jest obecnością kwasów fulwowych, podczas gdy na zachowanie się Cu, Ni i Cd ma wpływ obecność kwasów huminowych. Tandy S. (2009) badał efekty dodania odpadów celulozowych (papier wyprodukowany z makulatury) na ruchliwość składników niebezpiecznych podczas kompostowania biomasy. Dodanie odpadów biomasowych spowodowało zmniejszenie ruchliwości w przypadku Ni i jej delikatny wzrost u Cu i Zn.

W przypadku podobnych mechanizmów funkcjonujących w składnikach niebezpiecznych jak również w przypadku większości składników, ich zawartość mogłaby się zwiększyć o 1,34 razy. Rysunek 1 pokazuje Czynniki Wzbogacający (EF) jako stosunek zawartości składnika w przetworzonym kompoście i materiale wejściowym. Największe wzbogacenie wśród pierwiastków szkodliwych przejawia Cr, Pb i As, ale żaden z pierwiastków nie wykazuje wartości opisanych wcześniej przez Hsu i innych (2001). Można się spodziewać, że pierwiastki muszą być związane w organicznej części składowej, a podczas kompostowania są wiązane adsorpcyjnie na nowopowstałych substancjach – huminach i kwasach humusowych. Podczas badania mode-

Among the elements with the highest mobility during sewage sludge composting Sprynskyy M. et al. (2007) range Ni > Cd >> Cr > Cu >> Pb. Other results were published by Liu Y. et al. (2007) who report higher mobility of Zn and Pb, and in Cu and Ni increased mobility was not established. According to Nomedo S. et al. (2008) the element mobility determined on the basis of Tessier sequence extraction in the aged compost is lined up as follows: Mn > Zn > Pb > Cu. Lead is the most strongly bound element and Ni the weakest, with Zn, Cu and Cd showing intermediate sorption characteristics (Smith S.R. 2009). Ingelmo F. et al. (2011) state that during the composting process there are higher contents of Zn, Cu, Ni and Cd in the mobilized phase. The behaviour of Zn is affected by the abundance of fulvo acids, while the behaviour of Cu, Ni and Cd is influenced by the presence of humines. Tandy S. (2009) dealt with the effects of added waste cellulose (recycled paper) on the mobility of risk elements during composting of biomass. Adding waste biomass the mobility of Ni decreased and the mobility of Cu and Zn slightly increased.

In case similar mechanisms functioned in risk elements as in the case of the majority components, their content would have to increase by about 1.34 times. Figure 1 displays an Enrichment Factor (EF) as the element content ratio in the aged compost and the input material. Among the risk elements, the highest enrichment is manifested in Cr, Pb and As, but none of the elements show values reported by Hsu et al. (2001). It may be expected that the elements must have been bonded onto the organic constituent and during composting they are adsorption-bonded onto newly arising organic substances – humines, humic acids. During a model test the Cu content remained



Rys. 1
Współczynnik wzbogacenia kompostu z Buzowic

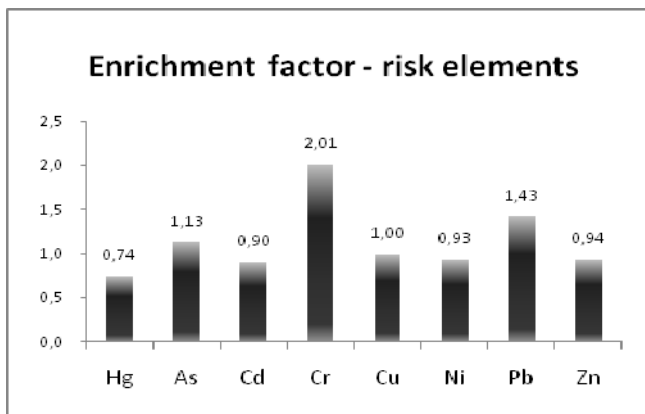


Fig. 1
Enrichment factor for compost from Bruzovice

lowego zawartość Cu nie zmieniała się, co przeczy publikacji mówiącej o najmniejszej ruchliwości. Okazuje się, że Cu ma największe powinowactwo do substancji organicznych. Musi (Cu) formować rozpuszczalne kompleksy z nierozpuszczonym węglem organicznym (DOC) podczas kompostowania, aby w ten sposób być częściowo wyplukany do fazy wodnej. Inne pierwiastki jak Ni, Zn i Cd wykazały podobną ruchliwość. W czasie kompostowania uwolniły się one ze składnika organicznego i przeszły do fazy wodnej, co odpowiada wynikom uzyskanym przez Ingelmo F. i innych (2011). Rtęć charakteryzowała się największą ruchliwością, która wyzwalała się podczas rozpadu substancji organicznych i prawdopodobnie nie wiązał się na nowopowstałych związkach organicznych.

Otrzymane wyniki oznaczają, że zawartość szkodliwych pierwiastków w kompoście jest związana z ich istnieniem w materiale wejściowym oraz zależy ona od procesów rozpadu składników organicznych i możliwości pierwiastków do tworzenia kompleksów z rozpuszczonych substancji organicznych (DOC) lub ich adsorpcji. Tabela 4 podaje roczne średnie zawartości pierwiastków szkodliwych i organicznych mikrozanieczyszczeń w kompoście produkowanym w kompostowni w Brudzowicach oraz ilości szkodliwych pierwiastków w węglu kamiennym z kopalni Ostrawa-Karwina Coal Basin (Dopita M. i inni 1997) i z węgla brunatnego z Sokolova (Pegrimek R. i inni 1998). Tabela zestawia również wartości graniczne dla zawartości pierwiastków szkodliwych i organicznych mikrozanieczyszczeń w odniesieniu do Rozporządzenia

constant, which contradicts other published information on its lowest mobility. Cu manifests the highest affinity to organics. It must have formed soluble complexes with dissolved organic carbon (DOC) during composting and thus partially leached into the water phase. Other elements Ni, Zn and Cd showed a similar mobility. During composting they released from the organic constituent and passed into the water phase, which corresponds to the results reported by Ingelmo F. et al. (2011). Mercury was the most mobile, which releases during the decomposition of organic substances and does not probably combine onto the newly arising organics.

The stated results imply that the content of risk elements in the compost is connected with their contents in the input materials as well as it is also influenced by the decomposition processes of the organic constituent and the capacity of the elements to form complexes with dissolved organics substances (DOC) or their adsorption. Table 4 gives annual mean contents of risk elements and organic micropollutants in the compost produced in the composting plant in Brudzovice and the risk element contents in black coal from the Ostrava-Karviná Coal Basin (Dopita M. et al. 1997) and from Sokolov brown coal (Pegrimek R. et al. 1998). The table also states limit values for the contents of risk elements and organic micropollutants according to Regulation 341/2008 Coll. To apply composts in plantation of

Tabela 4
Zawartość pierwiastków niebezpiecznych w kompoście i w paliwie kopalnym (węgiel, Czechy)

Table 4
Content of risk elements in composts and fossil fuels (coal, Czech Republic)

| | As | Cd | Cr | Cu | Hg | Ni | Pb | Zn | PAHs | PCB |
|---|--------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|---------|-----------|----------------------------|-------|
| | (mg/kg d.m.) | | | | | | | | | |
| Kompostowanie pilotujące Pilot composting | 1.83 | 0.584 | 43.2 | 30.4 | 1.83 | 7.42 | 14.4 | 105 | 8.1 | 0.041 |
| Rok 2008 Year 2008 | 0.96 | 0.262 | 15.5 | 46.3 | 0.96 | 10.42 | 12.6 | 141 | 12.4 | 0.021 |
| Rok 2009 Year 2009 | 1.59 | 0.401 | 20.1 | 40.6 | 1.59 | 10.72 | 7.3 | 473 | 16.2 | 0.017 |
| Rok 2010 Year 2010 | 2.88 | 0.975 | 24.2 | 49.9 | 2.88 | 11.25 | 16.4 | 185 | 13 | 0.035 |
| Ograniczenie dla klasy I Limit class I. | 10 | 2 | 100 | 170 | 1.0 | 65 | 200 | 500 | 3 | 0.02 |
| Ograniczenie dla klasy II Limit class II. | 20 | 3 | 250 | 400 | 1.5 | 100 | 300 | 1200 | 6 | 0.2 |
| Ograniczenie dla klasy III Limit class III. | 30 | 4 | 300 | 500 | 2.0 | 120 | 400 | 1500 | bez ograniczeń no limit | |
| Węgiel kamienny – OKR Black coal – OKR | < 1.08 | 1.19±0.94 | 11.9±9.7 | 35.5±7.1 | 0.029±0.097 | 28.2±16.1 | 28±12.8 | 21.6±14.1 | | |
| Węgiel brunatny – Sokolów Brown coal – Sokolov | 17.2 | 0.3 | 42 | 111 | 1.7 | 34.9 | 6.1 | 30.3 | | |

341/2008. Rtęć jest pierwiastkiem, który ogranicza zastosowanie kompostów w plantacjach zieleni stosowanych w sporcie, obszarach mieszkalnych (klasa I), parkach i parkach leśnych w strefach przemysłowych (klasa II), a nawet w przypadku gospodarki odpadami (klasa III), mimo jej redukcji o ponad 20% podczas kompostowania. Zawartości PAHs i PCBs nie są ograniczone w przypadku stosowania kompostu do rekultywacji odpadów.

Rysunek 2 przedstawia porównanie zawartości pierwiastków szkodliwych w paliwach kopalnych i kompoście. Okazuje się, że kompost zawiera pięć razy więcej Zn niż paliwa kopalne. Cynk nie jest kontrolowany pod względem jego emisji na podstawie Regulacji 205/2009 dotyczącej określania emisji ze źródeł stacjonarnych i realizacji innych założeń opisujących ochronę powietrza. Zawartości rtęci w kompoście są porównywalne z węglem brunatnym.

Zagrożenia związane z zanieczyszczeniem i tworzeniem się żużla podczas spalania kompostu

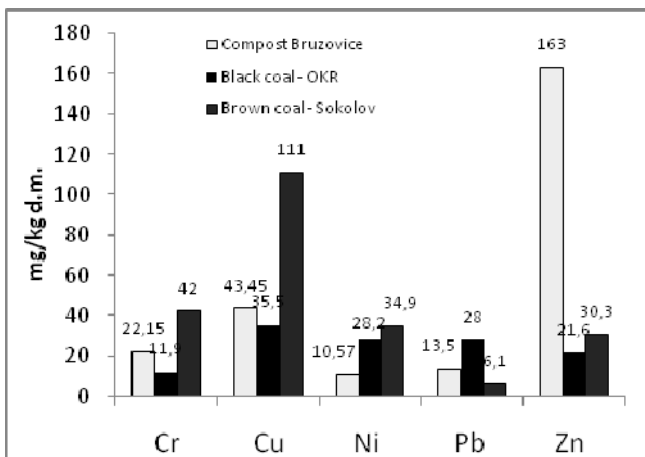
Podczas spalania biomasy istnieje problem związany z zanieczyszczeniem i tworzeniem się żużla. W przypadku wysokoalkalicznych paliw pochodzących z wielu rodzajów biomasy zachodzi w piecu ulatnianie się metali alkalicznych prowadzące do zanieczyszczenia gdy gazy zaczynają się ochładzać w części konwekcyjnej kotła (Bridgeman T.M. i inni 2010). Zanieczyszczenie jest związane z warstwą popiołu na wnętrzach pieca i innych powierzchniach, które wystawione są na wpływ promieniowania cieplnego. Osady i żużel obniżają przepływ powietrza do powierzchni wymiany i skracają żywot-

greenery in sports and recreation premises, including facilities in residential zones (class I) as well as for municipal greenery, parks and forest parks in the industrial zones (class II.) even in the waste disposal site remediation applications (class III) the limiting element is mercury, despite its reductions by over 20% during composting. The contents of PAHs and PCBs are not limited in compost application in waste disposal site remediation.

Figure 2 shows a comparison of the risk element contents in the fossil fuels and compost. Composts manifest as much as five-times higher contents of Zn than fossil fuels. Zinc is not monitored in the emissions by course of Regulation 205/2009 Coll. on the determination of emissions from stationary sources and on the execution of certain other legal provisions on air protection. The contents of Hg in the compost are comparable with its content in brown coal.

The risk of fouling and slagging during combustion of compost

During biomass combustion there is a problem with fouling and slagging. For high alkali fuels from many types of biomass, volatilization of the alkali metals occurs in the furnace, leading to fouling as the gases start to cool in the convective section of the boiler (Bridgeman T.B. et al. 2010). Fouling is connected with a layer of ash, which deposits on the heat-exchange surfaces. Slagging is connected with the deposition of fly ash on the furnace sides or other surfaces, which are exposed to radiation heat. Sediments and slag decrease the transfer of heat on the exchange surfaces and cut back the lifespan of



Rys. 2
Zawartość pierwiastków niebezpiecznych w węglu kamiennym (OKR), węglu brunatnym (Sokolów) i kompoście (Buzowice)

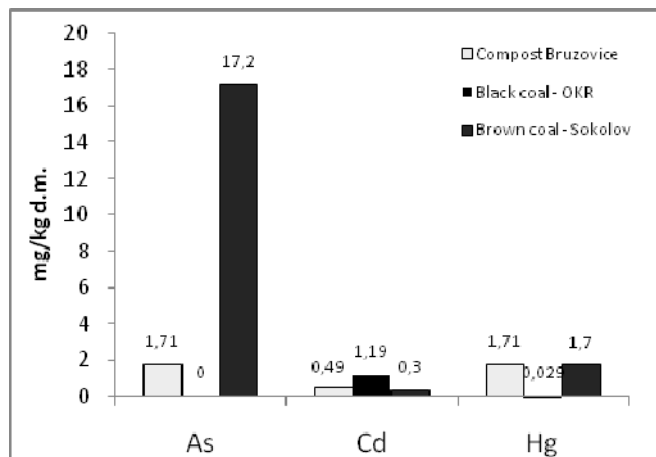


Fig. 2
Content of risk elements in black coal (OKR), brown coal (Sokolov) and compost Bruzovice

ność instalacji. Głównym źródłem problemów związanych z tworzeniem osadów jest zagęszczenie nieorganicznego składnika w paliwie, które powoduje ich osadzanie w szerokim zakresie temperatur. Wiadomo, że pierwiastki metali alkalicznych mają kluczowe znaczenie w tworzeniu zanieczyszczeń (Baxter 1998). Pierwiastki te są obecne w biomacie pod postacią części organicznych lub soli i z tego powodu są łatwo uwalniane do fazy gazowej podczas spalania (Nielsen i inni 2000). Tworzone krzemiany alkaliczne o niskiej temperaturze topnienia (poniżej 700°C). Posiadają klejące powierzchnie i powodują zwiększone osadzanie się cząsteczek. Wysoka zawartość metali alkalicznych i Si w biomacie może powodować szybsze zanieczyszczenie niż podczas spalania węgla. Chlor odgrywa tutaj decydującą rolę w formowaniu krzemianów alkalicznych. Zwiększa on ruchliwość metali alkalicznych, które uwalniają się do fazy gazowej w postaci chlorków i wodorotlenków. Zawartość chloru znacząco określa ilość alkaliów, które parują bardziej podczas spalania niż w przypadku własnego stężenia alkaliów w paliwie. W większości przypadków chlor jest głównym mechanizmem transportowym alkaliów. Problemy korozyjne podczas uzyskiwania energii związane są z zasobnością paliwa w Cl, S, Si i pierwiastki alkaliczne pochodzące z gleby (Baxter 1998, 1993).

Aby zidentyfikować tendencję do zanieczyszczenia używa się tak zwanego wskaźnika alkalicznego (AI):

$$AI = (1/GCV) \cdot F_{popiołu} \cdot (F_{K_2O} + F_{Na_2O})$$

gdzie:

- GCV (Całkowita wartość opałowa – GJ/kg),
- $F_{popiołu}$ – ułamki masowe popiołu w paliwie (sucha materia),
- F_{K_2O} , F_{Na_2O} – ułamek masowy K_2O i Na_2O w popiele lotnym.

Wskaźnik alkaliczny o wartości powyżej 0,17 kg alkaliów na GJ zanieczyszczeń nie jest możliwy. Pewną wartością jest 0,34 kg alkaliów/GJ (Bridgeman T.C. i inni 2010). Wskaźnik alkaliczny został obliczony dla peletów prodowanych z różnych proporcji kompostu i tektury (Tabela 2) i rysunek 3. Wskaźnik obu paliw jest niższy niż 0.17 w związku z czym zanieczyszczenie jest niemożliwe.

Z wyjątkiem wskaźnika alkalicznego, także stosunek zasada/kwas ($R_{b/a}$) jest wskazówką dotyczącą skłonności do tworzenia żużla z stałego popiołu paliwowego. Odkąd może on być wskaźnikiem tendencji popiołu do tworzenia mieszaniny eutektycznej o niskiej temperaturze topnienia, odtąd staje się lepki w niższej temperaturze (Bridgeman T.C. i inni 2010).

$$R_{b/a} = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$$

the facility. The main source of problems with the formation of sediments is the abundance of the inorganic constituent in the fuel, which causes their deposition in a wide-temperature range. It is known that alkali metal elements have a key significance at the formation of fouling (Baxter 1998). The alkali metal elements are present in the biomass as organics parts or salts, and thus they are very easily liberated into the gas phase during combustion (Nielsen et al. 2000). They form alkali silicates with a low melting point (below 700°C). They have sticky surfaces and they cause an increased deposition of particles. A high content of alkali metals and Si in the biomass may cause faster fouling than during coal combustion. Chlorine plays a decisive role in the formation of alkali silicates. It raises the mobility of alkali metals, which liberate into the gas phase in the form of chlorides and hydroxides. The content of chlorine decisively determines the amount of alkalis, which evaporate more during combustion than the own concentration of alkalis in the fuel. In the majority of cases chlorine is the major transport mechanism of alkalis. Corrosion problems in energy-generation facilities are related to the abundance of Cl, S, Si and alkali soil elements (Baxter 1998, 1993).

To identify the fouling tendency the so-called alkali index (AI) is used:

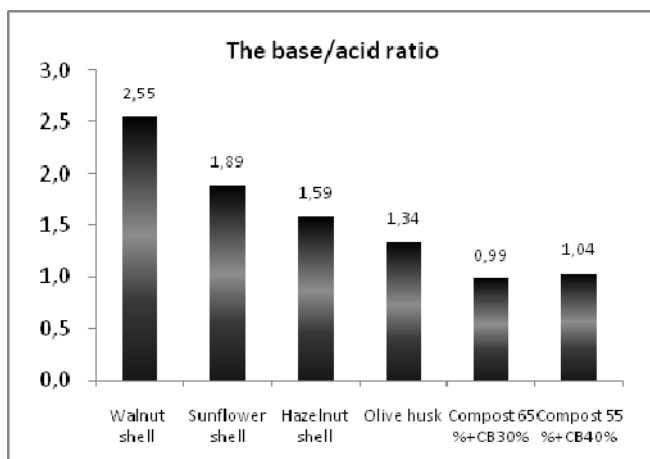
$$AI = (1/GCV) \cdot F_{ash} \cdot (F_{K_2O} + F_{Na_2O})$$

where:

- GCV (Gross calorific value – GJ/kg),
- F_{ash} – mass fractions of ash in the fuel (dry matter),
- F_{K_2O} , F_{Na_2O} – mass fractions of K_2O , Na_2O in fly ash.

In case the alkali index value is > 0.17 kg of alkalis/GJ fouling is not probable. Over 0.34 kg of alkalis/GJ it is certain (Bridgeman T.C. et al. 2010). The alkali index was calculated for pellets produced from various proportions of compost and cardboard (Table 2) and Figure 3. The alkali index of both the fuels is lower than 0.17, and thus fouling is improbable.

Except for the alkali index, also the base/acid ratio ($R_{b/a}$) is a guide to slagging propensity of a solid fuel ash. Since it can be an indicator of the tendency of the ash to form a low melting point eutectic and hence become sticky at lower temperature (Bridgeman T.C. et al. 2010).



Rys. 3
Stosunek zasada/kwas i indeks zasadowy dla różnych paliw biomasowych (Bridgeman T.C. et al 2010) i dla paliwa z kompostu i kartonów (CB)

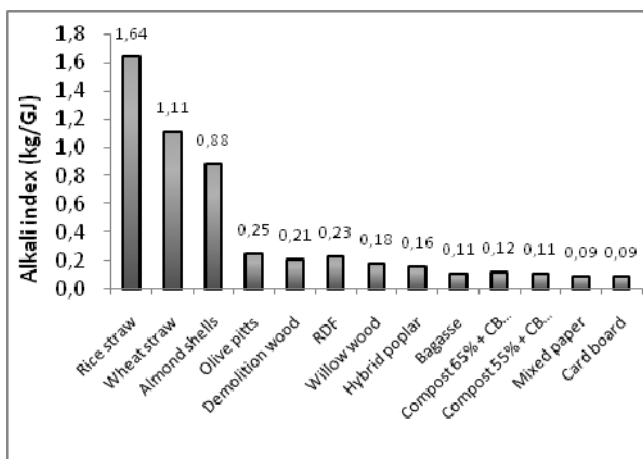


Fig. 3
The base/acid ratio and alkali index for various biomass fuel (Bridgeman T.C. et al 2010) and fuel from compost and cardboard (CB)

Wskaźnik zasada/kwas większy niż 0,5 wskazuje na zwiększony potencjał do osadzania. Stosunki zasada/kwas podano w Tabeli 2 i rysunku 3. W porównaniu z innymi biomasami, wartość wskaźnika jest niższa, ale nadal wyższa od 0,5.

Wnioski

Według rozporządzenia 341/2008 kompost nie może być stosowany w rolnictwie czy rekultywacji gleby jeśli nie przestrzega limitów zawartości Hg i PAHs, ale może być użyty w celach wytwarzania energii. Mimo faktu, że podczas kompostowania zawartość węgla zmniejsza się, a popiołu rośnie, wartość opałowa przetworzonego kompostu jest większa niż ograniczenia nałożone przez Regulację 13/2009 dotyczącą wymagań jakościowych dla źródeł stacjonarnych z punktu widzenia ochrony powietrza. Podczas kompostowania, alkalia i chlorki związane w substancjach organicznych uwalniane są do fazy wodnej, co powoduje redukcję zawartości alkaliów w materii suchej. Ma to pozytywny wpływ na wskaźnik alkaliczny równy 0,12 kg alkaliów/GJ, który jest znacząco niższy w innych typach paliwa na bazie biomasy i niższy od krytycznej wartości 0,17. Proces kompostowania pozytywnie wpływa również na redukcję pierwiastków szkodliwych zawartych w przetworzonym kompoście. Najbardziej znacząca redukcja jest widoczna w zawartości Hg, co ma pozytywny wpływ na emisję.

Podziękowanie

ENET CZ.1.05/2.1.00/03.0069 and the SGS Project of Utilization of compost thermal properties SV777112

Base/acid ratio greater than 0.5 is taken to indicate an increased potential for deposition. The results of base/acid ratio are given in Table 2 and Figure 3. Compared with other biomass, the index value is the lowest, but greater than 0.5.

Conclusion

By course of Regulation 341/2008 Coll. compost cannot be applied in agriculture or land reclamation as it does not comply with the limits of Hg and PAHs contents, but it may be used for energy-generation purposes. Despite the fact during composting the carbon content decreases and ash rises in the compost, the gross calorific value of the aged compost is greater than the limit requirement according to Regulation 13/2009 on determining the requirements for fuel quality for stationary sources from the point of view of air protection. During the composting process, alkalis and chlorides bonded in organics release into the water phase, which causes a reduction in the alkali content in the dry matter. This has a positive influence on the alkali index of composts 0.12 kg alkalis/GJ, which is significantly lower than in other types of fuel on the base of biomass and lower than the critical value of 0.17. The process of composting has a positive impact also on the reduction in the risk element content in the aged compost. The most significant reduction is apparent in the Hg content, which has a positive impact on emissions too.

Acknowledgements

ENET CZ.1.05/2.1.00/03.0069 and the SGS Project of Utilization of compost thermal properties SV777112

Literatura – References

1. Baxter L.L. (1998): *Influence of ash deposit chemism and structure on physical and transport properties. Fuel Processing Technology.* 56. 81-88.
2. Bridgeman T.G., Jones J.M., Williams A. (2010): *Overview of solid fuels. Characteristics and origin. In. Handbook of Combustion. Vol.14. Solid Fuels. Edited by Lackner M., Winter F., Agarwal A.K. Wiley-VCH Verlag GmbH. Weinheim.*1-30.
3. Cai Q.Y., Mo C.H., Wu Qi.T., Zeng Q.Y., Katsoyiannis A. (2007): *Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. Journal of Hazardous Materials.* V.147. 1063-1072.
4. Iannotti D.A., Grebus M.E., Toth B.L., Madden L.V., Hoitink H.A.J. (1994): *Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. J. Environ. Qual.* V.152. 272-282.
5. Ingelmo F., Molina M.J., Soriano D.M., Gallardo A., Lapeña L. (2011): *Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost. Journal of Environmental Management. Article in Press.*
6. Iqbal K.M., Shafiq T., Hussain A., Ahmed K. (2010): *Effect of enrichment on chemical properties of MSW compost. Bioresource Technology.* V.101. 5969-5977.
7. Dopita M. (1997): *Geology of the Czech part of Upper Silesian Basin. MŽP ČR. Praha.* 1-278 (in Czech).
8. Francou C., Poitrenaud M., Houot S. (2005): *Stabilization of organic matter during composting influence of the process and of the composted wastes. Compost Sci. Util.* V.13. 72-83.
9. He M.M., Tian G.M., Liang X.Q. (2009): *Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge. Journal of Hazardous Materials.* V.163. 671-677.
10. Hsu J.H., Shang-Lien Lo S.L. (2001): *Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. Environmental Pollution.* V.114. 119-127.
11. Liu Y., Ma L., Li Y., Zheng L. (2007): *Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge. Chemosphere.* V.67. 1025-1032.
12. Nielsen H.P., Frandsen F.J., Dam-Johansen K., Baxter L.L. (2000): *The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. Progress in Energy and Combustion Science.* 26. 283-298.
13. Nomeda S., Valdas P., Shen-Yi Chen S.Y., Lin J.G. (2008): *Variations of metal distribution in sewage sludge composting. Waste Management.* V.28. 1637-1644.
14. Pěgřimek R., Valašek V. (1998): *Analytical support for clean coal technology. Acta Montanistica Slovaca.* V.3. 215-225 (in Czech).
15. Raclavská H., Juchelková D., Škrobánková H., Wiltowski J., Campen A. (2011): *Conditions for energy generation as an alternative approach to compost utilization. Environmental Technology.* V.32. No.4. 407-417.
16. Rehka P., Raj D.S., Aparna C., Bindu Hima V., Anjaneyulu Y. (2005): *Bioremediation of contaminated lake sediments and evaluation of maturity indices as indicator of compost stability. Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2(2). 251-262.
17. Smith S.R. (2009): *A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. Environment International.* V.35. 142-156.
18. Sprynsky M., Kosobucki P., Kowalkowski T., Buszewski B. (2007): *Influence of clinoptilolite rock on chemical speciation of selected heavy metals in sewage sludge. Journal of Hazardous Materials.* V.149. 310-316.
19. Tandy S., Healey J.R., Nason M.A., Williamson J.C., Jones D.L. (2009): *Heavy metal fractionation during the co-composting of biosolids, deinking paper fibre and green waste. Bioresource Technology.* V.100. 4220-4226.