

Monika CZOP, Ewelina KŁAPCIA

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: Monika.Czop@polsl.pl, ewelina.klapcia@onet.pl

Termiczne przekształcanie jako sposób zagospodarowania podłoża pieczarkowego po zakończonym cyklu produkcyjnym

Polska jest liderem w europejskiej produkcji pieczarek i jako jedyny kraj w Europie odnotowuje systematyczną tendencję wzrostową w ich uprawie. Z naszego kraju w 2014 roku pochodziło 335 tys. Mg pieczarek, czyli około 25% całkowitej produkcji Unii Europejskiej. Wzrostowa tendencja w uprawie pieczarek prowadzi do wytworzenia dużej ilości zużytego podłoża, które po zakończonym cyklu produkcyjnym stanowi odpad do zagospodarowania. Energetyczny kierunek wykorzystania podłoża po uprawie pieczarek pojawił się jako odpowiedź na całoroczną produkcję i problem z zagospodarowaniem pozostałości po jej zakończeniu w okresie jesienno-zimowym. W artykule scharakteryzowano właściwości energetyczne referencyjnego węgla kamiennego i podłoża. Na podstawie uzyskanych danych przeprowadzono obliczenia emisji gazowo-pyłowych z procesu spalania i współspalania podłoża oraz węgla kamiennego z zastosowaniem Chemical Equilibrium Program (GASEQ), a także metody wskaźników emisji EMEP.

Słowa kluczowe: podłoże po uprawie pieczarki, odpad, biomasa

Wprowadzenie

W ostatnich latach branża pieczarkarska odnotowuje szybki rozwój. Największymi światowymi wytwórcami pieczarek są Chiny, których zbiory na przestrzeni lat 2009-2013 utrzymywały się na poziomie ok. 70% światowej produkcji. W tym samym okresie Stany Zjednoczone odnotowały produkcję pieczarek na poziomie ok. 8% i tym samym uplasowały się na drugim miejscu (tab. 1).

Tabela 1. Światowa produkcja pieczarek (Mg) w latach 2009-2013

Table 1. Global champignon mushroom production (Mg) in 2009-2013

	2009	2010	2011	2012	2013
Świat	6 500 000	7 011 422	7 700 000	7 772 149	9 926 966
Chiny	4 672 776	4 833 725	5 100 000	5 150 000	7 076 842
Stany Zjednoczone	371 844	359 469	390 902	388 450	406 198
Unia Europejska	1 009 900	1 002 000	1 026 200	1 090 700	1 105 400
Pozostałe	445 480	816 228	1 182 898	1 142 999	1 338 526

Zbiory grzybów jadalnych w Unii Europejskiej w 2013 roku wyniosły ok. 11% światowej produkcji, w Polsce i Holandii produkcja pieczarek wyniosła ok. 2,7% (tab. 2), natomiast w Hiszpanii, Francji oraz Niemczech kolejno 1%, 1,1% oraz 0,7% [1-4].

Tabela 2. Europejska produkcja pieczarek w latach 2009-2013

Table 2. European champignon mushroom production in 2009-2013

	2009	2010	2011	2012	2013
	Mg				
Unia Europejska	1 009 900	1 002 000	1 087 726	1 090 700	1 105 400
Polska	220 000	235 000	250 000	262 000	267 000
Holandia	230 000	266 000	300 000	250 000	270 000
Hiszpania	131 000	133 000	267 030	98 000	100 000
Francja	113 850	119 346	208 696	108 000	106 000
Niemcy	52 200	60 000	62 000	61 000	65 000
Pozostałe	262 850	188 654	–	311 700	297 400

Wraz ze wzrostem konsumpcji oraz całorocznym zapotrzebowaniem rynku na pieczarki pojawił się problem z zagospodarowaniem coraz większych ilości zużytego podłoża po ich uprawie. Odpad ten powstaje po ok. 6-8 tygodniach i nie może być ponownie wykorzystany w tym samym celu. Dlatego producenci pieczarek zmuszeni są do jego bezpiecznego zagospodarowania we własnym zakresie.

Brak ustawowego obowiązku ewidencjonowania wytwarzanego podłoża powoduje, że ilości te mogą być jedynie oszacowane na podstawie dostępnych danych, z których wnioskuje się, że z 1 kg zebranych pieczarek powstaje ok. 5 kg zużytego podłoża [4]. Wytwórcy pieczarek szacują, że z 1 hali o powierzchni 300 m² powstaje około 35 do 37 Mg biomasy poprodukcyjnej.

Zużyte podłoże po uprawie pieczarek może być wykorzystywane w recyklingu organicznym lub bezpośrednio do rekultywacji terenów zdegradowanych [4]. Kompost do nawożenia gleb ciężkich może być stosowany jedynie jesienią, przed sadzeniem lub siewem roślin, a w przypadku gleb lżejszych - wiosną [5]. W okresie od listopada do marca, kiedy gleba może być zamrznięta i niezdolna do przyjęcia składników organicznych, należy rozpatrzyć inne niż magazynowanie metody zagospodarowania podłoża po uprawie pieczarek.

Jedną z bezpiecznych i uzasadnionych ekonomicznie metod zagospodarowania podłoża w tym okresie może być jego termiczna degradacja. Należy pamiętać, że metoda termiczna nie powinna wywołać negatywnego efektu ekologicznego, a także pogarszać właściwości wsadu do procesu spalania.

1. Aspekty prawne

Zużyte podłoże po uprawie pieczarek zgodnie z obowiązującym w Polsce prawodawstwem jest zaliczane do odpadów o kodzie 02 01 99. Kod ten określa grupę

odpadów pochodzących z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności jako „inne niewymienione odpady” [6].

Argumentem przemawiającym za wykorzystaniem podłoża po uprawie pieczarek do celów energetycznych są regulacje zawarte w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach. Kryteria dopuszczające do składowania odpady o kodach 19 08 05, 19 08 12, 19 08 14, 19 12 12 oraz z grupy 20 na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne zaczęły obowiązywać od 1 stycznia 2016 r. (tab. 3) [7].

Tabela 3. Kryteria dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne [8]

Table 3. Criteria for allowing waste to be stored in landfills of wastes other than hazardous [8]

Parametr	Jednostka	Wartość graniczna
Ogólny węgiel organiczny (TOC)	% s.m.	5
Strata przy prażeniu (LOI)	% s.m.	8
Ciepło spalania (W_g)	MJ/kg s.m.	max 6

Zużyte podłoże po uprawie pieczarek jest odpadem, który można potraktować jako biomasę zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniającą i w następstwie uchylającą dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. Według wymienionej dyrektywy „biomasę oznacza ulegająca biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegająca biodegradacji część odpadów przemysłowych i miejskich” [9].

W przypadku nieustalenia powyższych kryteriów przy odpadzie na poziomie wspólnoty Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (DzU L 312 z 22.11.2008 r., s. 3) umożliwia państwom członkowskim podjęcie decyzji, kiedy bioodpady przestają być odpadami na podstawie odpowiednich kryteriów [10, 11]. Argumentem przemawiającym za wykorzystaniem podłoża po uprawie pieczarek do celów energetycznych są regulacje zawarte w Ustawie z dnia 20 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii.

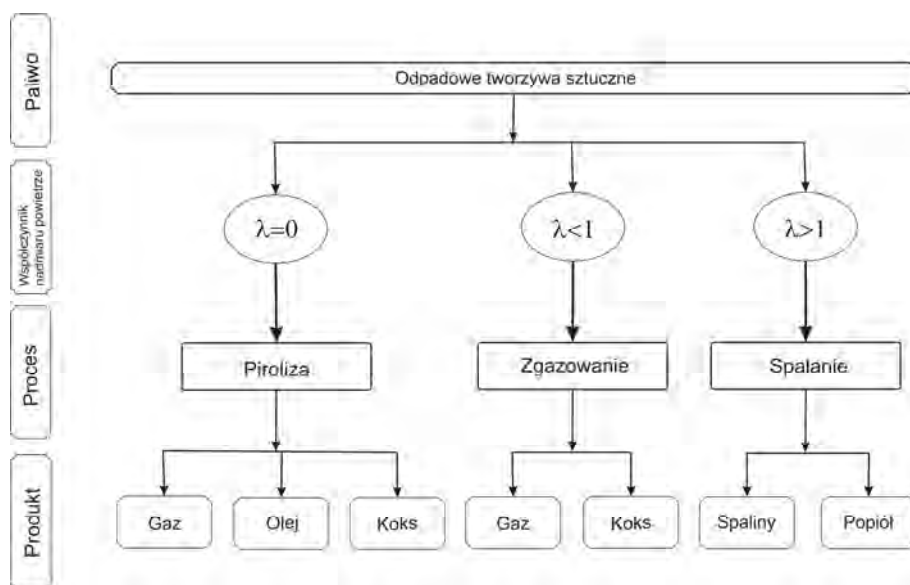
2. Kierunki energetycznego wykorzystania odpadów

Od kiedy państwa członkowskie Unii Europejskiej zostały zobowiązane do zwiększenia udziału źródeł odnawialnych w całkowitej ilości wytwarzanej energii, pozyskiwanie energii z odpadów cieszy się dużym zainteresowaniem. Może to

przynosić pozytywne efekty zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne, gdyż dzięki wykorzystaniu biomasy do pozyskiwania energii można osiągnąć redukcję gazów cieplarnianych, a także spełnić warunek, że do 2020 roku udział energii odnawialnej w całkowitej energii zużywanej powinien utrzymywać się na poziomie 20% [9].

Zastosowanie odnawialnych źródeł energii ma również znaczenie dla zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego oraz niezależności energetycznej państwa [12]. Za energetycznym kierunkiem wykorzystania biomasy (np. podłoża po produkcji pieczarek) przemawia również fakt, że istnieją różne programy wsparcia finansowego dla producentów, odpowiednie regulacje prawne, a także ceny energii elektrycznej i ciepła.

Biomasa można przetworzyć na różne rodzaje paliwa: stałe, ciekłe oraz gazowe. Biomasa w fazie stałej nadaje się do pirolizy, spalania lub zgazowania, z którego powstaje mieszanina tlenku i ditlenku węgla, metanu, a także wodoru. Gaz ten może być przetwarzany. Można również z niego wyprodukować metanol czy paliwo silnikowe [12]. Podstawowe kierunki energetycznego wykorzystania biomasy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Możliwości energetycznego wykorzystania biomasy

Fig. 1. Possibilities of energetic use of biomass

Zużyte podłoże po uprawie pieczarek może być wykorzystywane w procesach współspalania z węglem kamiennym jako biomasa. Producenci pieczarek mogą korzystać z tej możliwości na potrzeby własne w okresie, kiedy podłoże nie może być wykorzystywane do celów rolniczych, tj. od listopada do marca. Dzięki takiemu rozwiązaniu producenci pieczarek mogą ograniczyć strumień dozowanego węgla do paleniska i, co najważniejsze, rozwiązać problem z zagospodarowaniem powstającego odpadu.

Energia pozyskiwana w procesie współspalania biomasy z paliwem konwencjonalnym może być realizowana jako współspalanie bezpośrednie, pośrednie czy też współspalanie w układzie równoległym [13].

Można byłoby rozważać wykorzystanie tego typu odpadu w energetyce zawodowej do procesu współspalania, ale może być to trudne do zrealizowania, gdyż energetyka wymaga gwarancji stabilnego (10-15 lat) strumienia biomasy, czego pieczarkarnie nie mogą zapewnić, gdyż strumień odpadu jest uzależniony od rynkowego zapotrzebowania na grzyby jadalne.

Celem badań było określenie możliwości zagospodarowania na drodze termicznego przekształcania podłoża w procesie jego bezpośredniego współspalania z referencyjnym węglem kamiennym.

3. Metodyka prowadzenia badań

Do zrealizowania celu badań wybrano świeże podłoże, zebrane tuż po zakończonym cyklu produkcyjnym. Zgodnie z prawodawstwem polskim, podłoże po zakończonym cyklu produkcyjnym staje się odpadem (02 01 99).

3.1. Oznaczenie właściwości paliwowych

Zakres badań obejmował następujące oznaczenia: wilgotność całkowita (W_c), części palne i lotne (V), zawartość popiołu (A), ciepło spalania (W_g), obliczenie wartości opałowej (W_d), skład pierwiastkowy (C, H, S, N, Cl, O). Badania właściwości paliwowych przeprowadzono zgodnie z normami, przedstawionymi w tabeli 4.

Tabela 4. Normy, według których oznaczono właściwości paliwowe świeżego podłoża po produkcji pieczarek

Table 4. Standards which were the basis for determination of fuelling properties of fresh substrate after production of champignon mushroom

Właściwości paliwowe	Jednostka	Symbol	Norma
Oznaczenie wilgotności całkowitej	%	W_c	PN-Z-15008-02:1993P
Oznaczenie ciepła spalania i obliczanie wartości opałowej	kJ/kg	W_g, W_d	PN-Z-15008-04:1993P
Oznaczenie zawartości popiołu	%	A	PN-EN 15403:2011E
Oznaczenie zawartości części lotnych	%	V_1	PN-EN 15402:2011E
Oznaczenie zawartości węgla i wodoru		C, H	PN-Z-15008-05:1993P
Oznaczenie zawartości azotu metodą Kjeldahla	%	N	PN-G-04523:1992P
Oznaczenie siarki całkowitej metodą Eschki	%	S	PN-ISO 334:1997P
Oznaczenie zawartości chloru z zastosowaniem mieszaniny Eschki	%	Cl	PN-ISO 587:2000P

Określone właściwości paliwowe podłoża po uprawie pieczarek stanowiły podstawę do wyznaczenia wskaźników emisji gazowych powstających w procesie bezpośredniego współspalania.

3.2. Obliczanie emisji gazów odlotowych

Do obliczenia wielkości emisji gazów odlotowych z procesu współspalania węgla kamiennego z biomasą zastosowano Chemical Equilibrium Program (GASEQ) oraz metodę wskaźników emisji (EPA).

Wskaźniki emisji wyrażone na jednostkę energii (kg/MJ) obliczono według wzoru:

$$e_i = \frac{M_i}{W_d} \cdot n_i'', \text{ kg/MJ} \quad (1)$$

lub

$$e_i = \frac{W_{ei}}{W_d}, \text{ kg/MJ} \quad (2)$$

gdzie:

M_i - masa cząsteczkowa danego zanieczyszczenia, kg/kmol,

n_i - ilość „i” zanieczyszczenia powstała ze spalania jednostki paliwa, kmol/j.pal,

W_d - wartość opałowa paliwa, MJ/kg,

W_{ei} - wskaźnik emisji dla zanieczyszczenia „i”, kg/Mg.

Dla osiągnięcia celu pracy analizie poddano możliwość współspalania mieszanek zużytego podłoża po uprawie pieczarek z węglem kamiennym o różnym udziale procentowym substratów.

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- sprawność kotła ($\eta = 80\%$),
- max moc kotła ($M = 300 \text{ kW}$),
- współczynnik nadmiaru powietrza ($\lambda = 1,5$),
- zawartość tlenu w spalinach powyżej 6%.

Ilość spalanego paliwa (Z_p) obliczono na podstawie wzoru:

$$Z_p = \frac{3600 \cdot M}{\eta \cdot W_d}, \text{ kg/h} \quad (3)$$

gdzie:

M - nominalna moc kotła, kW,

η - sprawność kotła, %,

W_d - wartość opałowa paliwa, kJ/kg.

Wielkość emisji poszczególnych zanieczyszczeń do powietrza wyznaczono na podstawie wzoru:

$$E_i = Z_p \cdot W_{ei}, \text{ kg/h} \quad (4)$$

gdzie:

Z_p - wielkość zużycia paliwa, kg/h,

W_{ei} - wskaźnik unosu dla zanieczyszczenia „i”, kg/Mg.

Emisja równoważna, zwana zastępczą, jest wielkością ogólnej emisji zanieczyszczeń pochodzących z określonego lub ocenianego źródła przeliczoną na emisję ditlenku siarki. Oblicza się ją poprzez zsumowanie rzeczywistych emisji poszczególnych rodzajów zanieczyszczeń, emitowanych z danego źródła emisji i pomnożonych przez ich współczynniki toksyczności, zgodnie ze wzorem:

$$E_r = \sum E_t \cdot K_t, \text{ kg/h} \quad (5)$$

gdzie:

E_r - emisja równoważna źródeł emisji, kg/h,

E_t - redukcja emisji danego zanieczyszczenia, kg/h,

t - liczba różnych zanieczyszczeń emitowanych ze źródła emisji,

K_t - współczynnik toksyczności zanieczyszczenia.

Współczynnik toksyczności zanieczyszczenia (K_t) wyraża stosunek dopuszczalnej średniorocznej wartości stężenia ditlenku siarki do dopuszczalnej średniorocznej wartości danego zanieczyszczenia. Współczynnik toksyczności (tab. 5) określono w oparciu o obowiązujące Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 roku w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu (DzU 2010, Nr 16, poz. 87), można go wyrazić wzorem:

$$K_t = \frac{e_{\text{SO}_2}}{e_t} \quad (6)$$

gdzie:

e_{SO_2} - dopuszczalna wartość stężenia ditlenku siarki (w $\mu\text{g}/\text{m}^3$) w odniesieniu do roku kalendarzowego [14],

e_t - dopuszczalne wartości stężeń danych zanieczyszczeń (w $\mu\text{g}/\text{m}^3$) w odniesieniu do roku kalendarzowego [14].

Tabela 5. Współczynniki toksyczności zanieczyszczeń [14]

Table 5. Toxicity factors for pollutants [14]

Zanieczyszczenie gazowe	e_t $\mu\text{g}/\text{m}^3$	K_t
CO ₂	nieokreślone	nieokreślone
CO	nieokreślone	nieokreślone
SO ₂	20	1,0
HCl	25	0,8
NO _x (dla ditlenku azotu)	40	0,5
PM ₁₀ (pył zawieszony ogółem)	40	0,5

4. Wyniki badań

4.1. Właściwości paliwowe badanego podłoża

Wyniki badań podłoża po uprawie pieczarek zrealizowane zgodnie z przyjętą metodyką zostały zestawione w tabeli 6. Przedstawione wyniki są średnią arytmetyczną. W tabeli 6 podano również właściwości paliwowe referencyjnego węgla kamiennego. Wyniki te zostały porównane ze sobą w celu sprawdzenia możliwości współspalania badanego materiału.

Tabela 6. **Podstawowe właściwości paliwowe podłoża i referencyjnego węgla kamiennego [opracowanie własne]**

Table 6. **Basic fuel properties of substrate and hard coal as reference [own study]**

Parametr	Jednostka	Podłoże	Węgiel kamienny [18]
Wilgotność całkowita	%	68,70	19,3
Gęstość nasypowa, stan roboczy	kg/m ³	196,50	1200,0
Zawartość części lotnych, stan suchy	%	53,97	30,6
Zawartość części palnych, stan suchy	%	64,30	80,6
Zawartość popiołu, stan suchy	%	35,70	19,4
Zawartość części palnych, stan surowy	%	20,13	65,1
Zawartość popiołu, stan surowy	%	11,18	16,7
Ciepło spalania, stan suchy	MJ/kg	12,98	25,19
Wartość opałowa, stan suchy	MJ/kg	10,17	24,26
Ciepło spalania, stan surowy	MJ/kg	4,06	20,30
Wartość opałowa, stan surowy	MJ/kg	2,03	19,10

Zawartość wilgoci jest podstawowym parametrem służącym określeniu jakości paliwa. W przypadku paliw stałych wilgoć może stanowić problemy przy transporcie, składowaniu oraz wykorzystaniu energetycznym materiałów. Wysoka zawartość wilgoci istotnie wpływa na jakość rozdrabniania paliwa oraz obniża ciepło spalania, a tym samym wartość opałową, ponieważ w tym przypadku część ciepła jest tracona na ogrzanie i odparowanie wody [12]. Wilgotność całkowita w przypadku podłoża po uprawie pieczarek wynosi ok. 68,7%, a w przypadku węgla kamiennego wilgotność ta jest prawie trzykrotnie niższa. Wysoka wilgotność podłoża powoduje niską wartość opałową (w stanie roboczym), kształtującą się na poziomie 2,03 MJ/kg. Wartość ta jest ponad dziewięciokrotnie mniejsza od wartości opałowej referencyjnego węgla kamiennego, która wynosi 19,10 MJ/kg.

Gęstość nasypowa biomasy jest prawie sześciokrotnie mniejsza od gęstości węgla kamiennego, którego gęstość nasypowa wynosi ok. 1200 kg/m³. Niska gęstość nasypowa może powodować problemy z transportem materiału oraz konieczność wykorzystania dużych powierzchni do magazynowania. Zbyt niska gęstość nasypowa może powodować problemy z dozowaniem paliwa do paleniska, dlatego też należy stosować procesy zmieniające strukturę materiału [12].

Podczas podgrzewania paliwa stałego (np. biomasy) wydzielają się w wyniku jego termicznego rozkładu tzw. części lotne. Na podstawie porównania zawartości części lotnych w podłożu oraz w paliwie konwencjonalnym zauważono, że odpad charakteryzuje się wysoką zawartością części lotnych, na poziomie 53,9%. W czasie spalania części lotnych wydziela się duża ilość energii cieplnej doprowadzonej z paliwem, dlatego stosuje się specjalne konstrukcje komór spalania, w których powietrze do procesu spalania doprowadzane jest ponad złożę paliwa [12].

Efektywność spalania jest określana również poprzez zawartość części palnych oraz popiołu. W każdym paliwie wyróżnia się część palną oraz część stanowiącą balast, który tworzą popiół i wilgoć [16]. Zawartość części palnych w stanie suchym w węglu kamiennym, wynosząca ok. 80%, jest wyższa od ich zawartości w podłożu, która wynosi ok. 64%. Popioły pochodzące ze spalania biomasy posiadają niższą temperaturę mięknięcia, co powoduje zwiększenie szybkości powstawania osadów na powierzchniach ogrzewalnych [12]. Ilość popiołu w badanej biomase kształtuje się na poziomie ok. 36% i jest większa od zawartości popiołu w węglu kamiennym w stanie suchym, która wynosi 19,4%, natomiast w stanie roboczym zawartość popiołu w przypadku obu paliw jest do siebie zbliżona.

Tabela 7. Skład pierwiastkowy węgla kamiennego i podłoża po produkcji pieczarek [opracowanie własne]

Table 7. Elemental composition of hard coal and substrate for the mushroom production [own study]

	Skład pierwiastkowy, %					
	C	H	N	S	Cl	O
	Stan analityczny					
Referencyjny węgiel kamienny	64,56	4,22	0,60	1,51	0,02	9,72
Podłoże po uprawie pieczarek	31,41	4,86	6,00	2,99	0,1	18,94
	Stan roboczy					
Referencyjny węgiel kamienny	52,09	3,42	0,48	1,22	0,00	7,84
Podłoże po uprawie pieczarek	9,83	1,52	0,94	1,88	0,03	5,93

Po porównaniu zawartości składników palnych w podłożu po uprawie pieczarek oraz w węglu kamiennym w stanie suchym zauważono, że podłoże wykazuje większą zawartość tlenu, siarki, chloru i azotu niż w węglu kamiennym (tab. 7).

Przeprowadzone badania wykazały, że zawartość siarki w podłożu kształtuje się na poziomie 2,99%, jest wyższa od zawartości S w węglu kamiennym, w którym zawartość ta wynosi 1,51%.

Zawartość chloru w podłożu nie przekracza 0,1%, w węglu kamiennym jest śladowa. Niska zawartość chloru w paliwie przeznaczonym do spalania jest pożądana ze względu na jego potencjalną korozyjność.

Zawartość węgla i wodoru w paliwie istotnie wpływa na właściwości energetyczne ze względu na to, że od tych parametrów zależy na przykład wartość

opałowa. Zawartość węgla w węglu kamiennym jest dwukrotnie większa od jego zawartości w podłożu, a zawartość wodoru jest porównywalna.

Tabela 8. Zawartość podstawowych pierwiastków w badanych mieszankach paliwowych [opracowanie własne]

Table 8. Content of basic elements in tested combustible mixtures [own study]

Skład mieszanki, %		Skład pierwiastkowy, %					
Podłoże po uprawie pieczarek	Referencyjny węgiel kamienny	C	H	N	S	Cl	O
2,5	97,5	50,79	3,37	0,49	1,24	0,00	7,79
5,0	95,0	49,49	3,33	0,50	1,25	0,00	7,74
7,5	92,5	48,18	3,28	0,51	1,27	0,00	7,70
10,0	90,0	46,88	3,23	0,53	1,29	0,00	7,65

Zawartość azotu w analizowanej biomase jest prawie dziesięciokrotnie większa niż w przypadku węgla kamiennego, a zawartość tlenu w biomase jest prawie dwukrotnie większa niż w węglu kamiennym.

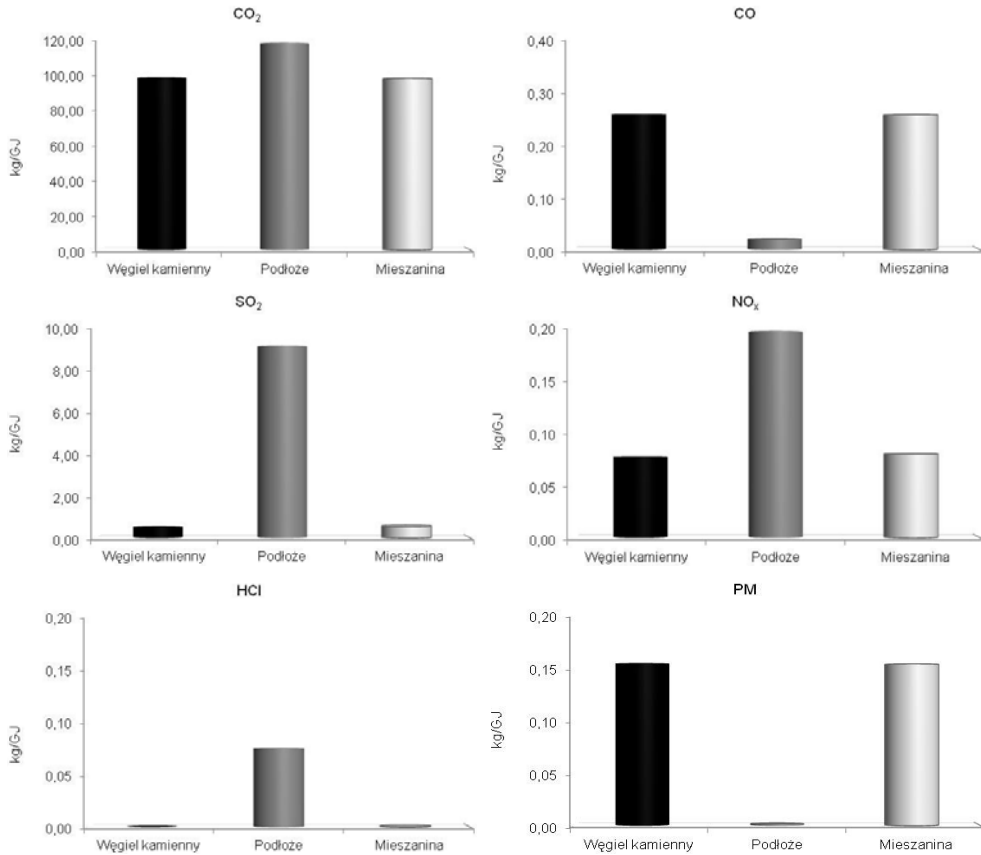
4.2. Emisja gazów odlotowych

Ubočnym skutkiem każdego procesu termicznego jest emisja zanieczyszczeń do powietrza. Wyliczoną emisję z współspalania mieszanki podłoża po produkcji pieczarek o udziale 5% z węglem kamiennym o udziale 95% wyrażono w kg/GJ i zaprezentowano na rysunku 2.

Do najbardziej toksycznych gazów odlotowych należą tlenki azotu, gdyż przyczyniają się do powstawania kwaśnych deszczów oraz uczestniczą w tworzeniu smogu. Emisja tlenków azotu dla podłoża po produkcji pieczarek wyniosła 0,53 kg/GJ, w przypadku spalania referencyjnego węgla kamiennego poziom emisji tych gazów wyniósł 0,08 kg/GJ, natomiast rozpatrując proces bezpośredniego współspalania węgla z podłożem, emisja tlenków azotu utrzymuje się na poziomie 0,08 kg/GJ, jak dla paliwa konwencjonalnego.

Produkcja energii z biomasy, którą jest podłoże po produkcji pieczarek, wiąże się z emisją CO₂ na poziomie 177,55 kg/GJ, natomiast spalanie równoważnej energetycznie ilości węgla kamiennego powoduje emisję na poziomie 100 kg/GJ. Pomimo że rzeczywista emisja CO₂ podczas spalania podłoża jest wyższa niż dla węgla, to nie jest ona wliczana do bilansu gazów cieplarnianych ze względu na fakt, że rośliny w trakcie wegetacji wiążą ten gaz z atmosfery. Zamyka to obieg CO₂ w środowisku przyrodniczym, co daje nam obniżenie emisji CO₂ do poziomu 99,44 kg/GJ, jest to emisja mniejsza o 0,5% w porównaniu do spalania węgla kamiennego.

Emisja tlenu węgla w czasie spalania podłoża kształtuje się na poziomie 0,02 kg/GJ, natomiast ze spalania referencyjnego węgla jest to poziom rzędu 0,26 kg/GJ. W procesie bezpośredniego spalania węgla i biomasy otrzymuje się emisję na poziomie 0,26 kg/GJ.



Rys. 2. Zestawienie wskaźników emisji gazów odlotowych dla biomasy, węgla kamiennego i mieszanek paliwowych [opracowanie własne]

Fig. 2. List of waste gas emission rates for biomass, hard coal and combustible mixtures [own study]

Szacowana emisja pyłu zawieszonego ogółem w trakcie spalania podłoża wyniosła 0,001 kg/GJ, prawie 160-krotnie większą ilość tego zanieczyszczenia powoduje spalanie węgla, natomiast w procesie współspalania węgla z biomasą poziom emisji pyłu jest na poziomie 0,16 kg/GJ.

Emisja SO₂ przy uzyskaniu jednostki energii z podłoża po produkcji pieczarek jest wyższa od emisji węglowej o ok. 95%, podczas gdy dla mieszaniny tylko o 9%. Stwierdzono ponadto, że zawartość siarki w procesie współspalania biomasy i węgla kamiennego do SO₂ rośnie ze wzrostem udziału okrywy w mieszance paliwowej.

W tabeli 10 przedstawiono szacunkowe obliczenia emisji dla stanu obecnego i projektowanego. Podano również redukcję ilości emitowanych zanieczyszczeń w jednostkach wagowych po wprowadzeniu procesu bezpośredniego współspalania węgla kamiennego z podłożem na terenie pieczarkarni.

Tabela 9. **Wielkości emisji gazów odlotowych dla kotła o mocy nominalnej 300 kW i sprawności 80% [opracowanie własne]**

Table 9. **Emission of waste gases for boiler of 300 kW nominal power and 80% efficiency [own study]**

Skład mieszanki, %		Wskaźniki emisji gazów odlotowych, kg/h						
Podłoże po uprawie pieczarek	Węgiel kamienny	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x	HCl	H ₂ O	PM
0	100	135,00	0,35	0,68	0,11	0,00	35,37	0,21
100	0	239,70	0,03	12,50	0,71	0,10	547,76	0,00
2,5	97,5	134,63	0,35	0,71	0,11	0,000	36,76	0,21
5,0	95,0	134,25	0,35	0,74	0,11	0,001	38,22	0,21
7,5	92,5	133,84	0,35	0,78	0,11	0,001	39,75	0,21
10,0	90,0	133,42	0,35	0,82	0,11	0,001	41,35	0,21

Tabela 10. **Zestawienie wyników obliczeń emisji zanieczyszczeń w stanie pierwotnym (spalanie węgla) i docelowym (spalanie mieszanki) [opracowanie własne]**

Table 10. **List of results for the calculation of pollution emission in original (hard coal) and target (mixture) combustion [own study]**

Substancje gazowe	Emisja w stanie pierwotnym kg/h	Emisja w stanie docelowym kg/h	Efekt ekologiczny kg/h	Współczynnik toksyczności	Emisja równoważna kg/h
CO ₂	135,00	134,25	0,75	90,87	–
CO	0,35	0,35	0,00	0,22	–
SO ₂	0,68	0,74	–0,07	–7,96	1,00
HCl	0,00	0,00	0,00	–0,07	0,80
NO _x	0,11	0,11	0,00	–0,41	0,50
PM	0,21	0,21	0,00	0,14	0,50

Obecnie na terenie pieczarkarni zainstalowany jest kocioł przystosowany do spalania paliw konwencjonalnych i odnawialnych pochodzenia roślinnego. Zainstalowany kocioł jest źródłem ciepła dla budynków hodowlanych i socjalnych. Parametry techniczne kotła zostały określone dla paliw o wilgotności do 30% i wartości opałowej 11,51 MJ/kg.

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń wysunięto następujące wnioski:

- Energetyczne wykorzystanie podłoża po uprawie pieczarek nie spowoduje znacznego wzrostu emisji zanieczyszczeń do atmosfery, a nawet w przypadku niektórych zanieczyszczeń przyczyni się do ich zmniejszenia.

- Wykorzystanie podłoża do celów energetycznych rozwiąże problemy z jego zagospodarowaniem „u źródła”, co jednocześnie może spowodować redukcję zużycia węgla.
- Wilgotność mieszanki paliwowej w postaci podłoża oraz węgla kamiennego nie będzie negatywnie oddziaływała na proces spalania, gdyż wartość ta nie przekracza 30%, co spełnia wymagania dla prawidłowego przebiegu procesu spalania w obecnie funkcjonującej instalacji na terenie pieczarkarni.
- Obliczono, że wprowadzenie 5% wsadu podłoża, które posiada niższą wartość opałową, nie spowoduje diametralnych zmian wartości opałowej wsadu paliwowego w porównaniu z paliwem pierwotnym.
- Mimo że podłoże wykazuje większą zawartość siarki, chloru i azotu w porównaniu z węglem kamiennym, dozowanie do kotła mieszanki w postaci 5% okrywy i 95% węgla kamiennego nie spowoduje dużych zmian w ilości pierwiastków, w porównaniu z wsadem paliwowym, w którym znajduje się sam węgiel, jednak dodanie podłoża do wsadu paliwowego spowoduje zwiększenie rocznej emisji SO₂ i NO_x. Zmiany te są jednak na tyle małe, że podłoże może być z powodzeniem dozowane do kotła.
- Współspalanie podłoża z węglem kamiennym może być praktycznie bezinwestycyjne i efektywnie realizowane w instalacji obecnie istniejącej na terenie pieczarkarni. Od strony organizacji procesu współspalania zabieg ten jest możliwy do przeprowadzenia od razu. Podsumowując, współspalanie podłoża z węglem pozwala na rozwiązanie problemu jego zagospodarowania w okresie jesienno-zimowym, a jednocześnie przyczynia się do obniżenia zużycia węgla i redukcji emisji CO₂, CO oraz pyłu zawieszonego ogółem.

Literatura

- [1] Production and Marketing of Mushrooms: Global and National Scenario [online: http://www.researchgate.net/publication/235951347_Production_and_Marketing_of_Mushrooms_Global_and_National_Scenario], 10.10.2015.
- [2] Olewnicki D., Jabłońska L., Długookresowa analiza rozwoju sektora pieczarkarskiego w Polsce, Roczniki Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich 2012, 99(4), 127-132.
- [3] Produkcja pieczarek w UE. Polska liderem [online: <http://www.gospodarz.pl/aktualnosci/grzyby/unijna-produkcja-pieczarek.html>], 10.08.2015.
- [4] Czop M., Kłapcia E., Ocena przydatności podłoża po uprawie pieczarek pod kątem recyklingu organicznego, Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska 2015, 17(4), 139-150.
- [5] Wiśniewska-Kadzaján B., Ocena przydatności podłoża po uprawie pieczarki do nawożenia roślin, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych 2012, 54, 165-176.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów, DzU 2014, poz. 1923.
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, DzU 2015, poz. 1277.
- [8] Commission of European Communities, Council Directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.

- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- [10] Informacja o braku konieczności ewidencjonowania podłoża popieczarkowego, <http://www.sejm.gov.pl/sejm7.nsf/Interpelacja?Tresc.xsp?key=1DA71D94>, 03.03.2015.
- [11] Informacje o konieczności rozdzielania podłoża od okrywy [online: www.afirma.com.pl], 03.03.2015.
- [12] Głodek E., Spalanie i współspalanie biomasy. Przewodnik, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Opole 2010.
- [13] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M., Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową, *Energetyka* 2006, 3, 207-220.
- [14] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 roku w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, *DzU* 2010, Nr 16, poz. 87.
- [15] Kłapcia E., Badanie podstawowych właściwości fizykochemicznych zużytego podłoża po uprawie pieczarek pod kątem ich zagospodarowania, Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2015.
- [16] Informacje o częściach palnych oraz niepalnych [online: http://lmal.zut.edu.pl/fileadmin/Wyklady_i_cwiczenia/termodynamika-oc/Tresc_wykladow/12spalanie/Spalanie.pdf], 18.11.2015.
- [17] Bątołek-Giesia N., Jagustyn B., Zawartość chloru w biomase stałej stosowanej do celów energetycznych, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2009, 40, 396-401.
- [18] Parametry referencyjnego węgla kamiennego, Materiały udostępnione przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze 2014.

Thermal Processing as a Way of Management of Mushroom Substrate after Completion of Production Cycle

Poland is a leader in the European production of champignon mushroom and is the only country in Europe, which notes a systematic increase in the mushroom cultivation. In 2014 335 kt champignon mushroom came from our country. This constitutes approximately 25% of total production in the European Union. An increase in the production of champignon mushrooms causes generation of large amount of used substrate, which after termination of the production cycle becomes a waste which needs to be managed. An issue of the use of the substrate for the production of champignon mushrooms as an energy carrier in the energetic area was raised as a response to the whole year production and a problem with the management of the residues after termination of production in the autumn-winter period. The article determines energy properties of the base and hard coal as a reference. On the basis of the obtained data it was possible to calculate emissions of gas and particular matter resulting from the combustion process and co-combustion of substrate and hard coal according to the Chemical Equilibrium Program (GASEQ) and methods of pollutant emissions evaluation of EMEP guidebook.

Keywords: spent mushroom substrate, waste biomass