

Wioletta Toman

Absolwentka WSZOP studiów II stopnia na kierunku
Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

Parametry palności i wybuchowości pyłów biomasy stosowanej w elektrowniach ciepłych

Flammability parameters and dust explosion biomass used in
thermal power generation

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań parametrów palności i wybuchowości pyłów biomasy stosowanych w energetyce ciepłej oraz wpływ biomasy na zmianę parametrów mieszanek węgla z biomasą. Szczególną uwagę zwraca się na wynikające stąd zagrożenia wybuchowe w elektrowniach. Materiał porównawczy stanowią wyniki badań własnych oraz udostępniona baza danych Kopalni Doświadczalnej „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa z lat 2009 – 2012.

Słowa kluczowe: *biomasa, odnawialne źródła energii, parametry palności i wybuchowości pyłów*

Abstract

The article presents the results of flammability parameters and dust explosion biomass used in thermal power generation and the impact of biomass to change the parameters of mixtures of coal and biomass. Particular attention is paid to the consequent risks of explosive in power industry. The materials to compare are the results of research and shared database from Experimental Mine "Barbara" Central Mining Institute of the years 2009 -2012.

Keywords: *biomass, renewable energy, flammability and explosion dust characteristics*

Wprowadzenie

Stosowanie biomasy jako paliwa w energetyce ciepłej może powodować zagrożenia pożarowe i wybuchowe wynikające z dużej podatności rozdrobnionej biomasy na zapłon. Współspalanie biomasy z węglem przyczyniło się w o ostatnim czasie do dwóch poważnych wybuchów, stąd problem nabiera aktualności.

Artykuł przedstawia różnice pomiędzy parametrami palności i wybuchowości węgla energetycznego jako paliwa stosowanego konwencjonalnie w energetyce oraz tymi parametrami samej biomasy a także jej mieszanek z węglem energetycznym.

Większość pyłów przemysłowych przy odpowiednim rozdrobieniu i koncentracji w powietrzu oraz odpowiednim źródle zapłonu może tworzyć atmosfery wybuchowe. Dotyczy to również pyłów biomasy. Biomasa dostarczana do elektrowni w postaci brykiety czy peletu sama w sobie zawiera spore ilości pyłu, a przemieszczając się liniami nawęglania ulega dalszemu rozdrobieniu. W ten sposób powstawać mogą obłoki i osady pyłu. Jeżeli dojdzie do zainicjowania zapłonu takiej mieszanki, wówczas ma miejsce wybuch, któremu towarzyszy fala ciśnienia oraz przemieszczający się za nią front płomienia. Przepływ gazów za falą ciśnienia unosi pyły osiadłe, powodując przenoszenie wybuchu na znaczne odległości. Zażalenie przedstawionej sytuacji może powodować ofiary w ludziach oraz prowadzić do poważnych zniszczeń zakładu.

Biomasa w energetyce

Obowiązujące w Polsce uregulowania prawne obligują nasz kraj do uwzględnienia w polityce energetycznej państwa regulacji w zakresie stosowania energii odnawialnej. Dyrektywa 2009/28/WE Parlamentu i Rady Europejskiej z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych [1], określa m.in. cel, którym jest osiągnięcie przez Unię Europejską 20 procentowego udziału energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii (OZE) w całkowitym bilansie energetycznym do roku 2020.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii [2], zalicza do OZE energię elektryczną pochodzącą w szczególności:

- z elektrowni wodnych i wiatrowych,
- ze źródeł wytwarzających energię z biomasy i biogazu,
- ze słonecznych ogniw fotowoltaicznych.

Szacuje się, że w 2010 roku 51% energii wyprodukowanej w Polsce z OZE pochodziło ze współspalania biomasy [3], co pozwala zaklasyfikować biomasę do głównego źródła energii odnawialnej w naszym kraju.

Rozporządzenie [2] definiuje biomasę jako „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, oraz ziarna zbóż niespełniające wymagań jakościowych...”.

Niniejsza praca rozpatruje parametry palności i wybuchowości następujących rodzajów biomas:

- drewna oraz odpadów z przemysłu drzewnego,
- słomy oraz innych pozostałości roślinnych po produkcji rolnej,
- niepełnowartościowych produktów roślinnych oraz niepełnowartościowych ziaren zbóż,
- odpadów powstających w procesie produkcji rolno-spożywczej takich jak.: wytloki, pestki, łupiny czy otręby.

Charakterystyka parametrów zapalności i wybuchowości pyłów

Zapoznanie się z parametrami zapalności i wybuchowości pyłów pozwala na ocenę zagrożenia związanego z wybuchem pyłów oraz określenie możliwości zastosowania odpowiednich sposobów zapobiegania przed wybuchem lub pożarem w ciągach instalacji, w których występują pyły palne. Prowadzi to do sprecyzowania wymagań dotyczących stosowania urządzeń i systemów ochronnych.

Najbardziej reprezentatywną próbą pyłu do badań jest materiał pobrany z instalacji bądź pył osiadły, pod warunkiem, że możliwe będzie jego efektywne rozpylenie w urządzeniach badawczych. Przed przystąpieniem do badań, konieczne jest odpowiednie przygotowanie próby, polegające na oznaczeniu zawartości wilgoci oraz, jeżeli zachodzi taka konieczność - na rozdrobnieniu materiału.

Zawartość wilgoci w pyle poniżej 10% pozwala na przystąpienie do badań mających na celu oznaczenie wskaźników charakteryzujących przebieg wybuchu, czyli:

- maksymalnego ciśnienia wybuchu,
- maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu, oraz
- wskaźnika wybuchowości.

Maksymalne ciśnienie wybuchu P_{max} [bar] oznacza maksymalne ciśnienie występujące w zamkniętym naczyniu podczas wybuchu atmosfery wybuchowej, oznaczone w określonych warunkach badania. Wartość maksymalnego ciśnienia wybuchu uzależniona jest od ciśnienia początkowego [4].

Maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ [bar/s] oznacza maksymalną wartość przyrostu ciśnienia w jednostce czasu w trakcie wybuchów wszystkich atmosfer wybuchowych w zakresie wybuchowości substancji palnej w zamkniętym naczyniu, oznaczone w określonych warunkach badania [5]. Parametr

ten jest miarą gwałtowności wybuchu i stanowi podstawę do określenia skuteczności działania systemów ochrony przed wybuchem. Wartość maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ zależy, zgodnie z tzw. „prawem objętościowym” od objętości V , w której rozwija się wybuch, czyli:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \frac{K_{st,max}}{\sqrt[3]{V}} \quad (1)$$

Wartość $(dp/dt)_{max}$ zależy również od ciśnienia początkowego, od energii źródła zapłonu oraz stopnia turbulencji obłoku pyłu. Z tego względu sposób jej wyznaczenia musi być ściśle znormalizowany.

Wartość maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wyznaczona w objętości 1 m^3 nazywa się **wskaźnikiem wybuchowości** $K_{st,max}$ i stanowi podstawę międzynarodowej klasyfikacji wybuchowości pyłów. W odniesieniu do otrzymanej wartości $K_{st,max}$ przyjęto podział pyłów wybuchowych na następujące klasy:

Tabela 1. Podział pyłów wybuchowych na klasy [8]

Table 1. Distribution of explosive dusts into classes [8]

Klasa zagrożenia	$K_{st,max}$ [m·bar/s]
St 1	< 200
St 2	200 - 300
St 3	> 300

Zgodnie z tabelą, im wyższa jest klasa zagrożenia, tym większe niebezpieczeństwo stwarzają mieszaniny pyłu z powietrzem.

Norma [4] dopuszcza oznaczenie wskaźników wybuchowości w komorze sferycznej 20 dm^3 dających wyniki porównywalne z wynikami uzyskiwanymi w komorze 1 m^3 . Badanie to polega na przeprowadzeniu serii prób zainicjowania wybuchu mieszanki pyłowo-powietrznej. W ten sposób wyznaczona zostaje charakterystyka wybuchowości badanego pyłu rozumiana, jako zależność:

- przyrostu ciśnienia (P_{max}) uzyskanego podczas wybuchu w zamkniętej objętości od koncentracji pyłu, oraz
- szybkości narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$, uzyskanego podczas wybuchu w zamkniętej objętości od koncentracji pyłu.

Dla określenia parametrów dotyczących zapalności badanych substancji należy przeanalizować ich podatność na zapłon, czyli zdolność do zapoczątkowania reakcji. Norma PN-EN 50281-2-1 określa dwie metody badawcze służące do oznaczania

minimalnych temperatur zapłonu pyłu w celu doboru urządzeń elektrycznych do stosowania w obecności pyłów palnych. Metody obejmują:

- oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu na ogrzewanej powierzchni,
- oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu w nagrzanym piecu.

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu T_{5mm} [°C] oznacza najniższą temperaturę gorącej powierzchni, w której dochodzi do zapłonu znajdującej się na tej powierzchni warstwy pyłu osiadłego o określonej grubości. Norma [6] zaleca wykonanie oznaczeń dla warstwy pyłu o grubości 5 mm. Próby pyłu przeznaczone do oznaczenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu, powinny być jednorodne i reprezentatywne dla badanego materiału lub technologii. Przyjmuje się, iż pył powinien być przesiany przez sito o średnicy oczek 200 μm . W przypadku, gdy pomiary dotyczą pyłu pochodzącego z określonego układu przemysłowego, próbka pyłu powinna być reprezentatywna dla technologii, przy czym nie powinna zawierać ziaren o średnicy powyżej 500 μm [8].

Badanie minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu przeprowadza się na urządzeniu, zgodnym z normą [6]. Główną część urządzenia stanowi metalowa płyta grzewcza, na której umieszcza się obręcz, wypełnianą badanym pyłem.

Za maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni, na której pył może tworzyć warstwy nie większe niż 5 mm przyjmuje się temperaturę o 75K niższą od temperatury zapłonu warstwy ustalonej dla badanego pyłu. Jeżeli w rozpatrywanych warunkach przemysłowych spodziewa się występowanie warstw pyłu osiadłego o innych grubościach, konieczne jest wykonanie dodatkowych oznaczeń określonych w normie [6].

Wyniki oznaczeń niezbędne są przy doborze urządzeń przemysłowych, które mają pracować w warunkach sprzyjających gromadzeniu się pyłu na ich powierzchni.

Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu T_d [°C] oznacza najniższą temperaturę gorącej wewnętrznej ścianki pieca, w której dochodzi do zapłonu obłoku pyłu w powietrzu zawartym wewnątrz pieca. Do oznaczania minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu stosuje się pionowy piec rurowy o konstrukcji zgodnej z normą [6] znany, jako piec Godberta-Greenwalda. Próby pyłu przeznaczone do przeprowadzenia oznaczeń minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu powinny być jednorodne i reprezentatywne dla badanego materiału lub technologii. Badania wykonuje się do temperatury 1000°C. Jako minimalną temperaturę zapłonu przyjmuje się najniższą temperaturę pieca, w której uzyskano zapłon, pomniejszoną o 20K w temperaturze pieca powyżej 300°C, i o 10K w temperaturze równej 300°C lub niższej.

W celu określenia podatności mieszaniny pyłowo-powietrznej na zapłon spowodowany iskrą generowaną elektrycznie wykonuje się oznaczenia minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu. Wartość minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu decyduje między innymi o konieczności (lub o braku konieczności) stosowania tzw. profilaktyki

antyelektrostatycznej, ze względu na możliwość zapaleń od iskier elektryczności statycznej.

Minimalna energia zapłonu obłoku pyłu MIE [mJ] oznacza najmniejszą energię elektryczną nagromadzoną w kondensatorze, która w trakcie jego rozładowania jest wystarczająca do spowodowania zapłonu najbardziej zapalnej mieszaniny określonego pyłu w określonych warunkach badania [7].

Do oznaczania minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu stosuje się urządzenie zgodne z normą [7], którego główny trzon stanowi naczynie pomiarowe, czyli tzw. rura Hartmanna o objętości $1,2 \text{ dm}^3$ wraz z pneumatycznym układem rozpraszania pyłu o nadciśnieniu do 7 bar oraz odpowiednio dobrany obwód generowania iskry (kondensator). Próby pyłu, przeznaczone do wykonania oznaczeń powinny być reprezentatywne dla danego materiału o średnicy ziaren nie większej niż $63 \mu\text{m}$.

Minimalna energia zapłonu (MIE) znajduje się pomiędzy najwyższą energią (E_1), dla której nie dochodzi do zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej w kolejnych 10 próbach, a najniższą energią (E_2), dla której dochodzi do zapłonu w jednej z 10 kolejnych prób.

$$E_1 < MIE < E_2 \quad (2)$$

Analiza parametrów palności i wybuchowości

Właściwości wybuchowe i zapalne pyłów biomas oraz pyłów węglowych stosowanych w elektrowniach wykazują znaczne zróżnicowanie. Właściwości te zależą od rodzaju i pochodzenia danego paliwa, stopnia jego rozdrobnienia oraz zawartości wilgoci. W przypadku mieszanek biomasy z węglem, wpływ na parametry wybuchowości i zapalności zależą również od proporcji procentowej zawartości składników.

W niniejszej pracy analizą parametrów zapalności i wybuchowości objęto mieszanek węgla energetycznych z biomasą o nieokreślonym składzie procentowym (5 prób), oraz mieszanek tworzone w laboratorium, o zawartości biomasy w węglu odpowiednio: 10, 15 i 30% (17 prób). W przypadku biomas analizie poddano 104 rodzaje biopaliw stałych stosowanych w elektrowniach, w tym m.in.: brykiety słomy, trociny, łupiny orzecha, łuski owsa, słonecznika, pelety drzewne, słomiane, pestki winogron, oliwek, wiśni, ziarna owsa, zrębki drewna, i wiele innych. Oznaczenia parametrów palności i wybuchowości węgla, dotyczą wyłącznie węgla energetycznych stosowanych „na bieżąco” w przemyśle energetycznym (10 prób). Cechą charakterystyczną analizowanych węgla jest zawartość części lotnych ok. 30% oraz zawartość popiołu ok. 10%.

Tabela 2. Zakresy parametrów palności i wybuchowości ujętych w pracy pyłów

Table 2. The dust parameters ranges of flammability and explosiveness

Parametr	Pyły biomasy	Mieszanki węgla z biomasą	Pyły węglowe energetyczne
Maksymalne ciśnienie wybuchu P_{max} , [bar]	4,4 – 8,9	5,5 – 8,4	5,6 – 7,4
Maksymalny przyrost ciśnienia w czasie $(dp/dt)_{max}$, [bar/s]	17 - 348	157 - 388	121 - 320
Wskaźnik wybuchowości $K_{st,max}$ [$m \cdot bar/s$]	5 – 128	43 – 105	28 - 87
Temperatura zapłonu obłoku pyłu T_d , [°C]	360 - 900	450 - 740	420 – 750
Temperatura zapłonu warstwy pyłu T_{5mm} , [°C]	220 - 400 > 400	260 - 400 > 400	300 – 400 > 400
Minimalna energia zapłonu obłoku pyłu MIE , [mJ]	$MIE < 3$ $3 < MIE < 1000$ $MIE > 1000$	$30 < MIE < 1000$ $MIE > 1000$	$MIE > 1000$

Maksymalne ciśnienie wybuchu wszystkich analizowanych pyłów obejmuje zakres od 4,4 bar do 8,9 bar. W tym zakresie mieszczą się wszystkie badane pyły biomas przedstawione w opracowaniu. Szeroki rozrzut wyników charakterystyczny jest dla biomas również w przypadku parametru określającego maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu oraz wskaźnika wybuchowości.

Analizując wartość wskaźnika wybuchowości $K_{st,max}$ można zauważyć, iż pyły biomas, mieszanin biomas z węglem oraz samych węgla należą do klasy wybuchowości St1. Kopalnia Doświadczalna „Barbara” wprowadziła dodatkową klasyfikację dla pyłów węglowych, obejmującą podział na [9]:

- pyły słabo wybuchowe z $K_{st,max} \leq 70 m \cdot bar/s$,
- pyły średnio wybuchowe z $K_{st,max}$ od 71 do 110 $m \cdot bar/s$,
- pyły silnie wybuchowe z $K_{st,max} > 110 m \cdot bar/s$.

Klasyfikacja ta pełni wyłącznie rolę poglądową. Dokonując jej porównania z oznaczeniami ujętymi w tabeli 2 dostrzec można, iż wśród pyłów biomas występują pyły silnie wybuchowe.

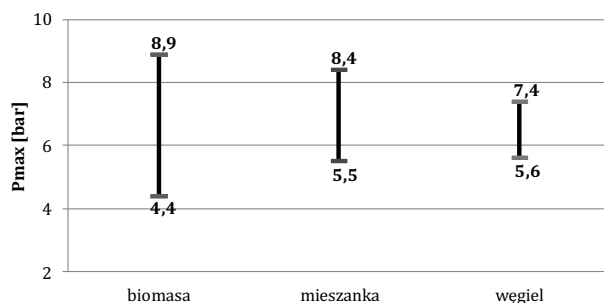
Obłoki pyłu biomas zapalają się w zakresie temperatur od 360°C (pył drzewny) do 900°C (pelet z orzecha masłosza). Przedziały palności obłoków pyłu zawężają się do zakresu 450°C–740°C w przypadku mieszanek biomas z węglami energetycznymi, natomiast najmniejsza rozpiętość temperatur charakterystyczna jest dla pyłów węglowych.

Biomasy wykazują również znacznie większą podatność na zapalenie się warstwy pyłu osiadłego w porównaniu z analizowanymi w opracowaniu pyłami mieszanek

i węgla energetycznych. Najniższa temperatura powodująca zapalenie się pięciomilimetrowej warstwy pyłu oznaczona została dla brykiety słomy i wynosi 220°C.

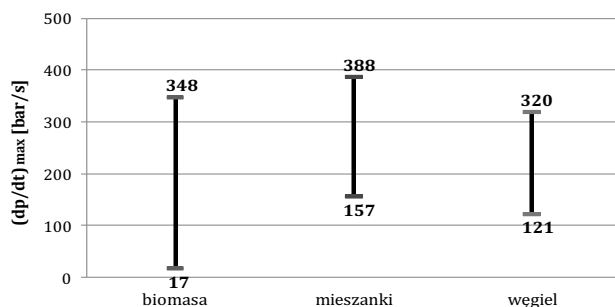
Minimalna energia zapłonu obłoku pyłu (*MIE*) jest parametrem, który w największym stopniu obrazuje zagrożenie związane z pyłami biomas. Okazuje się, że niektóre biomasy są bardzo podatne na zapłon od niewielkich inicjałów nawet poniżej 3 mJ. Niebezpieczeństwo takie stwarzają np. trociny czy brykiety drewna.

Poniżej przedstawiono szczegółową charakterystykę rozkładu parametrów palności i wybuchowości poszczególnych paliw. Określenie „mieszanka” na wykresach oznacza mieszanekę biomas z węglem energetycznym o różnym składzie procentowym, natomiast „węgiel” odnosi się do węgla energetycznych.



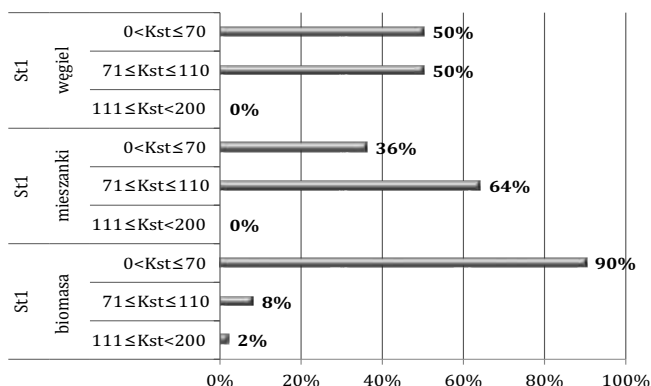
Rys. 1. Porównanie zakresów maksymalnego ciśnienia wybuchu pyłów biomas, mieszanek biomas z węglem energetycznym i węgla energetycznych

Fig. 1. Comparison of the ranges of the maximum explosion pressure of dust biomass, biomass mixtures with steam coal and steam coals themselves



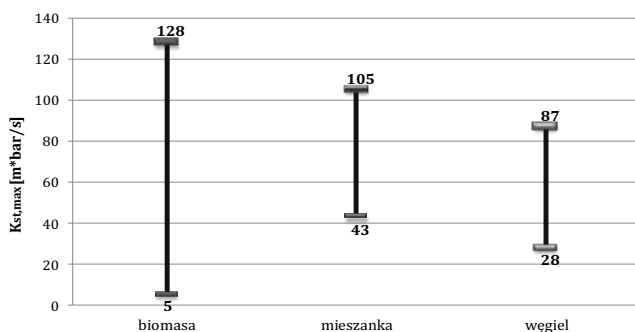
Rys. 2. Porównanie zakresów maksymalnej szybkości narastania ciśnienia biomas, mieszanek biomas z węglem energetycznym i węgla energetycznych

Fig. 2 Comparison of ranges of maximum rate of pressure rise biomasses, biomasses mixtures with steam coal and steam coal themselves



Rys. 3. Porównanie wskaźnika wybuchowości $K_{st,max}$ biomas, mieszanek biomas z węglem energetycznym i węgla energetycznych zgodnie z klasyfikacją KD „Barbara”

Fig. 3. Comparison of the index explosion $K_{st,max}$, of biomasses, biomasses mixtures with steam coal and steam coal themselves according to the classification KD “Barbara”



Rys. 4. Porównanie zakresów wskaźnika wybuchowości $K_{st,max}$ dla biomas, mieszanek biomas z węglem energetycznym i węgla energetycznych

Fig. 4. Comparison of the index explosion $K_{st,max}$, of biomasses, biomasses mixtures with steam coal and steam coal themselves

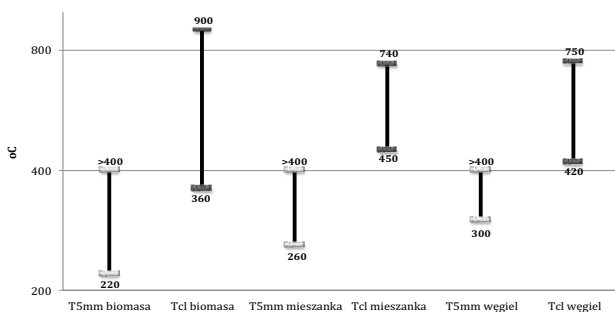
Spośród analizowanych pyłów, biomasy charakteryzuje największa rozpiętość maksymalnego ciśnienia wybuchu, maksymalnego przyrostu ciśnienia wybuchu oraz wskaźnika wybuchowości. Wynika to w dużej mierze ze znacznej różnorodności pyłów biomas poddanych analizie. Największą dynamiką wybuchu charakteryzuje się w badanym zestawieniu pył drzewny ($K_{st,max}$ 128 m³·bar/s), natomiast najmniejszą – łupiny orzecha ($K_{st,max}$ 5 m³·bar/s).

Zróźnicowanie wybuchowości biomas wynika ponadto z własności fizyko-chemicznych tego materiału. Pod względem dynamiki wybuchu biomasa różni się od paliw kopalnych m.in. zawartością części lotnych. Jest ich w przeciętnej biomasie około 75-85% suchej masy [10], podczas gdy w węglu kamiennym energetycznym około 30%. Udział części lotnych w biomasie zmienia się w zależności od gatunku rośliny,

rodzaju tkanki czy warunków wzrostu. Powoduje to duże zróżnicowanie wybuchowości nawet w obrębie tego samego gatunku. Przykładowo parametr $K_{st,max}$ dla jednego z analizowanych pyłów słomy wynosi 33 m³·bar/s, podczas gdy dla innego pyłu słomy wzrasta do 74 m³·bar/s. Świadczy to o dużej i nieprzewidywalnej zmienności dotyczącej wybuchowości pyłów biomas.

Wskaźnik wybuchowości obrazuje przebieg wybuchu, natomiast możliwość zainicjowania wybuchu uzależniona jest od:

- minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu,
- minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu, oraz
- minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu.



Rys. 5. Porównanie zakresów minimalnych temperatur zapłonu warstwy pyłu i minimalnych temperatur zapłonu obłoku pyłu

Fig. 5. Comparison of ranges of minimum ignition temperature of the dust layer and the minimum ignition temperature of dust cloud

Analizując parametry palności pyłów konieczne jest uwzględnienie specyficznych cech tego medium. W mieszaninie pyłowo-powietrznej ruch cząsteczek pyłu kontrolowany jest przez siły bezwładności. Pył może pozostać zawieszony w powietrzu tylko przez krótki czas. Najczęściej więc spotykaną formą występowania pyłu w elektrowniach są jego nagromadzenia czyli tzw. pył osiadły. Pył osiadły zalegać może w pomieszczeniach, na urządzeniach lub wewnątrz urządzeń, których temperatura jest wyższa od temperatury otoczenia. Wysoka temperatura powodować może zatlenie warstwy zalegającego pyłu. Konsekwencją zatlenia może być pożar, który z kolei prowadzić może do wybuchu pyłu [11]. Minimalna temperatura zapalenia warstwy pyłu ma więc podstawowe znaczenie dla określenia zagrożenia pożarem a dalszej konsekwencji wybuchem pyłu osiadłego.

Pył zalegający na różnych powierzchniach, a także tworzący się podczas „wędrowki” liniami technologicznymi elektrowni np. na przesypach, tworzy niebezpieczne obłoki pyłów. Zetknięcie takiego obłoku pyłu z potencjalnym efektywnym źródłem zapłonu (np. dla niektórych pyłów biomas wyładowania iskrowe) może być przyczyną zapalenia się obłoku pyłu, co może prowadzić do poważnych konsekwencji.

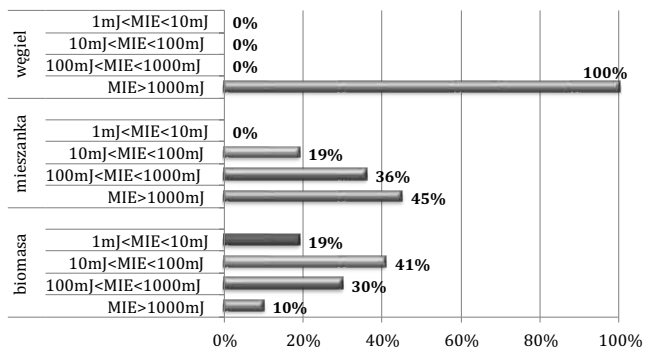
Maksymalną dopuszczalną temperaturę poziomych powierzchni urządzeń elektrycznych i nieelektrycznych, na których może osiadać warstwa pyłu, określa się uwzględniając grubość takiej warstwy. Maksymalna temperatura dla urządzeń pokrytych warstwą pyłu o grubości do 5 mm, nie powinna przekraczać wartości o 75K niższej od minimalnej temperatury zapłonu warstwy otrzymanej dla określonego pyłu. W związku z tym, wartość maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni dla pięciomilimetrowej warstwy pyłu najbardziej zapalnej z analizowanych biomas to 145°C (oznaczenie dla brykietu słomy). Jeżeli grubości warstw pyłu osiadłego przekraczają 5 mm, wówczas bezpieczne temperatury poziomych powierzchni należy dodatkowo obniżyć, w zależności od przewidywanej maksymalnej grubości warstwy. Dla pięciomilimetrowej warstwy pyłu węglowego bezpieczna temperatura nagrzanego powierzchni to minimum 225°C, w zależności od pochodzenia i rodzaju węgla.

Temperatura zapłonu warstwy pyłu większości biomas mieści się w zakresie od 300°C do 400°C. Tylko dla 6% badanych biomas nie udało się uzyskać zapłonu warstwy pyłu do 400°C. Podobnie przebiega rozkład temperatur dla mieszanek biomasy z węglem. Świadczy to o znikomym wpływie węgla znajdującego się w mieszance na wzrost bezpieczeństwa pożarowego.

Gorące powierzchnie urządzeń mogą stanowić źródło zapłonu pyłowych atmosfer wybuchowych. Uzyskana laboratoryjnie wartość minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu, określa maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni, która może mieć kontakt z takim obłokiem. Z kolei temperatura pionowych, nachylonych pod kątem większym niż 60° do poziomu, nagrzanego powierzchni, nie może przekraczać 2/3 wartości minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu. Maksymalne temperatury powierzchni pionowych mogące mieć kontakt z najbardziej zapalnym pyłem biomasy nie mogą zatem przekroczyć 240°C. W przypadku mieszanek węgla z biomasą temperatura ta nie może być większa niż 300°C.

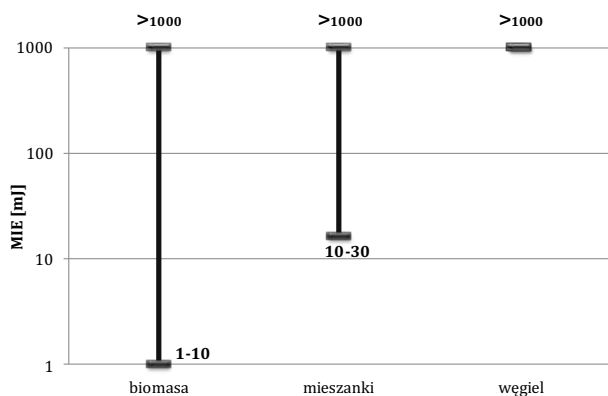
Minimalna energia zapłonu obłoku pyłu dla biomas ma bardzo zróżnicowane i znacznie niższe wartości niż dla pozostałych pyłów. Dla 19% pyłów biomas MIE jest mniejsza niż 10 mJ. Obłoki tych pyłów mogą być zapalone przez słabe źródła zapłonu, na przykład przez wyładowania elektrostatyczne. Tylko 10% pyłów biomas nie udało zapalić się w stosowanej aparaturze i jest wyższa od 1000 mJ.

Można zauważyć, iż dodanie biomasy do węgla zmniejsza minimalną energię zapłonu obłoku pyłu. Aż dla 55% przebadanych mieszanek biomasy z węglem wartość MIE jest mniejsza od 1000 mJ, podczas gdy parametr ten dla zbadanych pyłów węgla energetycznych charakteryzuje się energią zapłonu powyżej 1000 mJ.



Rys. 6. Porównanie minimalnej energii zapłonu obłoku pyłu dla biomas, mieszanek biomas z węglami energetycznymi i węgla energetycznych

Fig. 6. Comparison of minimum ignition energy of dust cloud for biomasses, biomass mixtures with steam coal and steam coals themselves



Rys. 7. Porównanie minimalnej energii zapłonu pyłu dla biomas, mieszanek biomas z węglami energetycznymi oraz węgla energetycznych

Fig. 7. Comparison of minimum ignition energy of dust for biomass, biomass mixtures with steam coal and steam coals themselves

W celu analizy wpływu procentowej zawartości biomas w węglu na parametry palności takiej mieszanki, w poniższej tabeli wykonano porównanie wartości T_{iD} , T_{5mm} oraz MIE.

Tabela 3. Porównanie wpływu zawartości biomasy w węglu na parametry palności [12]

Table 3. Compare the influence of biomass content in coal on the parameters of flammability [12]

	T_{cl} [°C]	T_{5mm} [°C]	MIE [mJ]
Węgiel	570	340	MIE > 1000
Mieszanka 90% węgla + 10% biomasy	540	290	300 < MIE < 600
Mieszanka 85% węgla + 15% biomasy	535	290	100 < MIE < 300
Mieszanka 70% węgla + 30% biomasy	475	290	30 < MIE < 100

Analizując powyższe zestawienie zauważamy, iż wartości minimalnych temperatur oraz minimalnych energii zapłonu obłoku pyłu obniżają się wraz ze wzrostem procentowej zawartości biomasy w węglu. Dodanie 30% biomasy do węgla znacznie obniża podatność takiej mieszanki na zapalenie się od energii rzędu $30 \div 100$ mJ. W tej samej mieszance temperatura zapłonu obłoku pyłu obniża się o 95K w porównaniu do samego węgla. Dodanie 10% biomasy do węgla obniża o 50K temperaturę zapalenia się warstwy takiej mieszanki pyłu. Temperatura warstwy pyłu nie ulega w powyższym zestawieniu dalszemu obniżeniu, nie oznacza to jednak że nie ulegnie spadkowi wraz z dodaniem kolejnych ilości biomasy do węgla.

Podsumowanie i wnioski

Analiza parametrów palności i wybuchowości pyłów biomasy stosowanych w energetyce ciepłej w porównaniu do węgla energetycznego oraz ich mieszanek prowadzi do następujących wniosków:

1. Wskaźniki charakteryzujące przebieg wybuchu cechuje znacznie większa różnorodność i zakres w przypadku biomasy niżeli węgla. Powoduje to problemy w doborze urządzeń ochronnych, których współczynniki zadziałania dostosować należy do szerokiego zakresu ciśnień.
2. W przypadku parametrów świadczących o zapalności badanych substancji, biomasa wykazuje niższe wartości, a co za tym idzie znacznie większą podatność do zapoczątkowania reakcji spalania niżeli węgiel energetyczny. Oznacza to, iż temperatury powierzchni stosowanych w obecności pyłów palnych urządzeń, nie mogą przekroczyć minimalnych temperatur zapłonu wyznaczonych dla warstwy i obłoku stosowanych pyłów. Szczególną uwagę zwrócić należy również na możliwe do wystąpienia źródła zapłonu, których energia nie może przekraczać minimalnej energii zapłonu uzyskanej dla badanych pyłów. W analizowanym zestawieniu minimalna energia zapłonu dla 19% pyłów biomasy mieści się w przedziale

$1\text{mJ} < \text{MIE} < 10\text{mJ}$, podczas gdy minimalna energia zapłonu dla węgli energetycznych przekracza zakres pomiarowy stosowanej aparatury badawczej wynoszący 1000 mJ.

3. Podsumowując wyniki badań, można stwierdzić, iż biomasa wykazuje znacznie większe zróżnicowanie zarówno parametrów palności jak i wybuchowości aniżeli węgiel energetyczny stosowany w przemyśle energetycznym. Nawet niewielka ilość biomasy domieszanej do węgla powoduje wzrost zagrożenia pod względem zapalenia czy wybuchu a parametry palności i wybuchowości mieszanek zbliżone są do wartości uzyskiwanych dla samej biomasy aniżeli do węgla energetycznego.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii (Dz U z 2012r. poz. 1229).
- [3] Tokarski S.: *Realizacja projektów biomasowych w Grupie Tauron Wytwarzanie drogą do ograniczenia emisji CO₂*, Magazyn Elektroenergetyka, luty 2013.
- [4] PN-EN 14034-1+A1:2011 *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłów – Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoku pyłu.*
- [5] PN-EN 14034-2+A1:2011 *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłów – Część 2: Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ obłoku pyłu.*
- [6] PN-EN 50281-2-1:2002 *Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 2-1 Metody badania – Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu.*
- [7] PN-EN 13821:2003 *Przestrzenie zagrożone wybuchem – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych.*
- [8] Dyduch Z.: *Opracowania własne*, Kopalnia Doświadczalna „Barbara”, Mikołów 2012.
- [9] Fibich A.: *Zagrożenia wybuchowe pyłów biomasy w obiektach energetycznych*, materiały konferencji „Nowoczesne Kotłownie”, Zawiercie 24-25 marca 2011 r.
- [10] Lebecki K.: *Właściwości palne stosowanych w energetyce pyłów pochodzących z biomasy*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach, nr 1(6)/2010.
- [11] Dyduch Z.: *Kilka zagadnień związanych z zagrożeniem wybuchem pyłu w instalacjach nawęglania i podawania biomasy*, Magazyn Ex, nr 3/2012.