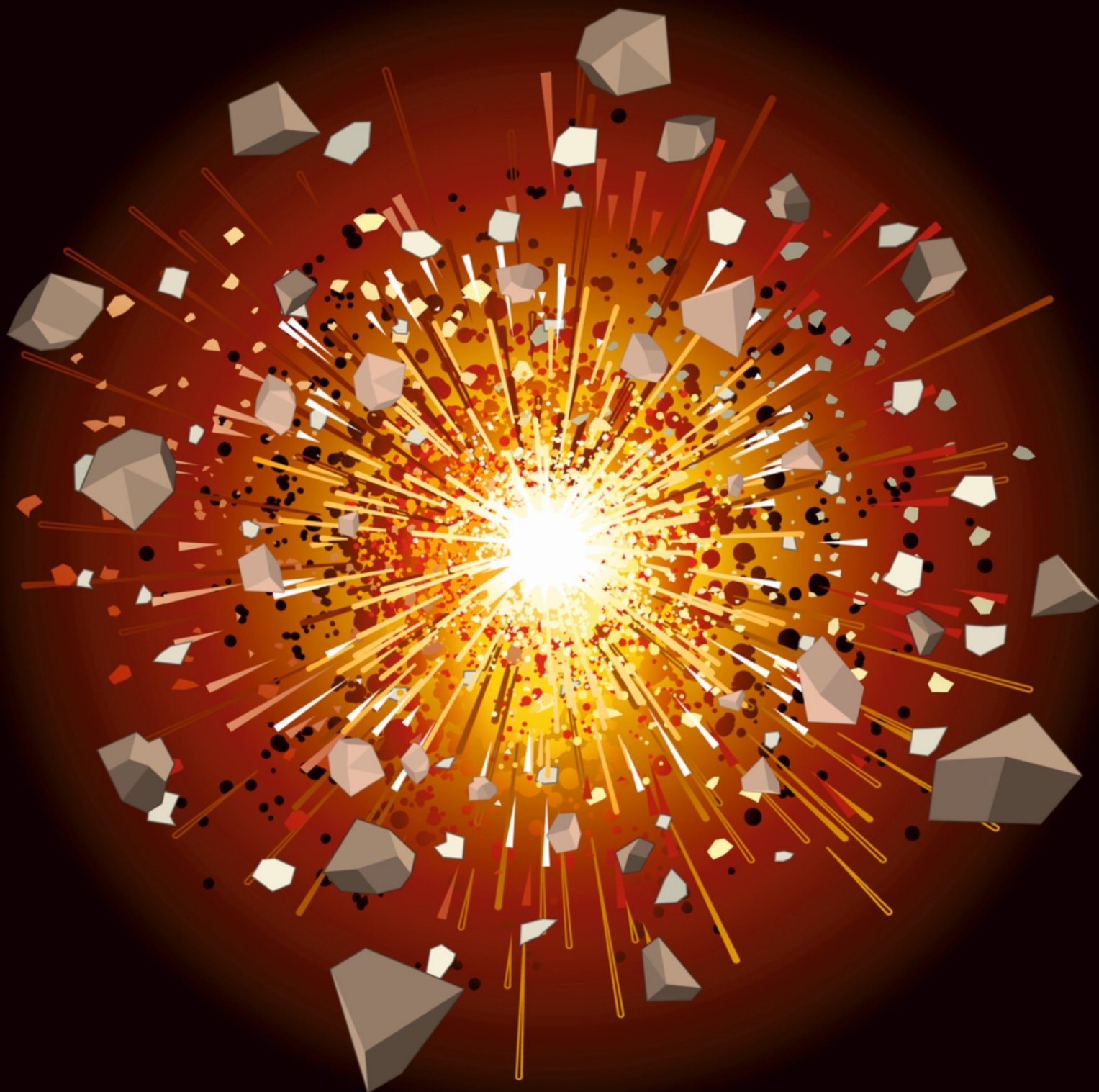


Jan Przybysz  
Maciej Celiński



# Palność i wybuchowość pyłu drewna

*Materiały informacyjne*

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Projekt nr II.PB.07

*pt. Rozpoznanie zagrożenia związanego z możliwością wystąpienia pożaru i wybuchu pyłu drewna powstającego w trakcie jego przetwarzania*

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy: mgr inż. Jan Przybysz, dr inż. Maciej Celiński

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Zdjęcie na okładce: PixelArt/Bigstockphoto

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Warszawa 2022

**CIOP**  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (48-22) 623 46 50, fax (48-22) 623 36 93, [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl)

## **Wstęp**

W Polsce przetwarzane jest rocznie ok. 20 mln m<sup>3</sup> drewna. Tak duże ilości przetwarzanego materiału powodują powstawanie ogromnych ilości pyłów i wiórów. Pyły drewna to produkt uboczny obróbki i przerobu drewna oraz płyt drewnopochodnych stwarzający zagrożenie dla pracowników. Jest to czynnik występujący głównie w tartakach, zakładach produkcji płyt i sklejek, stolarki budowlanej, mebli i innych wyrobów stolarskich. Do najbardziej pyłotwórczych procesów w przemyśle przetwórstwa drewna należą: cięcie, frezowanie, struganie, wiercenie, toczenie i szlifowanie. Stężenie pyłu drewna na stanowisku pracy zależy od różnych parametrów, m.in. od: rodzaju prowadzonej obróbki, parametrów maszyn i narzędzi (częstotliwość obrotowa, liczba krawędzi skrawających itp.), wilgotności drewna (im bardziej suche, tym większe pylenie). Pył drewna powstaje w największym stopniu podczas obróbki mechanicznej tzw. drewna powietrzno-suchego, tj. o zawartości wilgoci 15 – 20 %. Szczególnie dużą emisję pyłów drewna odnotowano podczas zautomatyzowanych procesów obróbki drewna. Rozmiary cząstek wchodzących w skład pyłów drewna zależą od rodzaju drewna i sposobu jego obróbki. Najczęściej są to cząstki o średnicy 10 ÷ 30 µm. Cząstki bardzo drobne, o średnicy poniżej 5 µm mogą być emitowane podczas szlifowania powierzchni gładkich drewnianych. Magazynowanie, jak i transport pyłu drewna przyczynia się do powstania atmosfery wybuchowej wewnątrz instalacji stwarzając ryzyko wybuchu. Natomiast nieodpowiednie składowanie dużych ilości pyłów lub trocin może doprowadzić do ich samozapłonu. W celu podejmowania odpowiednich działań prewencyjnych, minimalizujących lub wręcz eliminujących narażenie zawodowe na pyły (w tym pyły drewna), konieczne jest jednak posiadanie właściwej wiedzy na temat m.in. tego, w jaki sposób przebiegają ich procesy spalania, jaka jest minimalna energia wymagana do zapłonu, czy – w jaki sposób przebiegają procesy dymotwórcze.

## **Proces spalania drewna**

Gdy drewno jest stopniowo ogrzewane, zaczynają się pojawiać zmiany w jego strukturze. Dochodzi do termicznego rozkładu ligniny, celulozy i hemicelulozy z wytworzeniem mieszaniny gazów lotnych, smoły (lewoglukoza) i zwęgliny. Najwyższą stabilnością termiczną spośród trzech głównych składników drewna cechuje się lignina (temperatura rozkładu > 250 °C). W swoim artykule Yang z zespołem stwierdzili, że tak wysoka stabilność musi wynikać z jej struktury sieciowej oraz dużej masy cząsteczkowej [1]. Temperaturo rozkładu poszczególnych składników drewna zostały przedstawione w tabeli 1.

**Tabela 1. Temperatury rozkładu składników drewna [2]**

Związek chemiczny	Temperatura rozkładu (zakres w °C)
celuloza	175-350
hemiceluloza	180-350
lignina	250-500

W trakcie spalania drewna powstają dwa rodzaje produktów: gazowe i stałe pozostające w strukturze zwęgliny. W wyniku reakcji pirolitycznych zachodzących w drewnie celuloza ulega odwodnieniu, a następnie w wyniku reakcji sieciujących ze zdepolimeryzowanym lewoglukozaem powoduje powstanie struktur aromatycznych bogatych w węgiel. Powolny, wysokotemperaturowy proces utleniania tych struktur nazywa się żarzeniem. Zgodnie z badaniami Browne'a niektóre z powstających w zwęglinie wiązań są w stanie wytrzymać temperaturę nawet 3000 °C [3].

Tworzenie się zwęgliny ma znaczący wpływ na rozkład materiału. Jej powstawanie w dużych ilościach powoduje znacznie spowolnienie procesu spalania. Tworząca się warstwa zwęglenia działa bowiem jak warstwa izolacyjna zwiększająca odporność termiczną materiału znajdującego się pod nią, zmniejsza także transport gazów wydzielających się z degradującego materiału oraz zapobiega napływaniu bogatego w tlen powietrza. Struktura zwęgliny jest bardzo zróżnicowana w zależności od gatunku drewna i szybkości ogrzewania, a na jej stabilność i integralność wpływa wiele właściwości samego drewna, w tym gęstość, ciągliwość, odporność na utlenianie, właściwości termoizolacyjne i przepuszczalność. Produkcja zwęgliny w dużym stopniu zależy od tempa i długości ogrzewania: gwałtowny wzrost temperatury daje mniejszą wydajność niż jej stopniowy wzrost, ponieważ produkcja zwęgliny jest ściśle powiązana z niskotemperaturowym procesem odwadniania. Przybliżony wykaz procesów zachodzących w trakcie spalania drewna w zależności od oddziałującej temperatury przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2. Reakcje zachodzące w trakcie spalania drewna w zależności od temperatury [4]**

Zakres temperaturowy	Reakcje chemiczne
> 100 °C	odparowanie niezwiązanej chemicznej wody
160 – 200 °C	początek rozkładu termicznego (głównie procesy uwolnienia związanej wody)
200 – 225 °C	powolna piroliza (uwalnianie niepalnych gazów np. CO, CO <sub>2</sub> )

Zakres temperaturowy	Reakcje chemiczne
225 – 275 °C	główna faza rozkładu pirolitycznego (pękanie wiązań węgiel-węgiel)
280 – 500 °C	produkcja palnych gazów (metan, etan etc.) powstawania widzialnych cząstek dymu, wytworzenie zwęgliny
> 500 °C	wydzielanie palnych produktów gazowych jest zakończone, zwęglina przechodzi w proces wysokotemperaturowego dopalania (żarzenia), wydzielanie niepalnych gazów (CO, CO <sub>2</sub> )

Mniej dymu powstaje w wyniku spalania drewna, niż w przypadku tworzyw sztucznych. W dobrze wentylowanych warunkach, drewno może produkować 25-100 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> dymu, podczas gdy materiały z tworzyw sztucznych mogą generować 100-1000 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> [5]. Produkcja dymu zależy od rodzaju spalanego materiału, dostępu tlenu oraz rodzaj spalania (np. palenie płomieniowe lub żarzenie). Dym wydobywający się podczas pożaru stwarza poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa osób przebywających w budynkach: nie tylko zmniejsza widoczność, ale także zmniejsza prawdopodobieństwo ucieczki z płonącego budynku, a generowane gazy mogą mieć działanie drażniące i duszące. Podstawowymi produktami spalania drewna są tlenek węgla, ditlenek węgla i woda. Jednakże cyjanowodor i halogenki wodoru mogą być uwalniane, jeżeli w strukturze drewna obecne są heteroatomy, takie jak azot lub związki z grupy halogenów [6], [7].

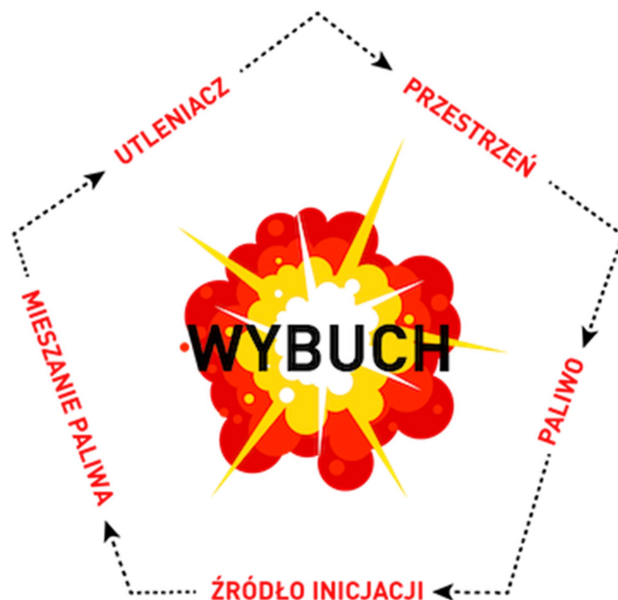
### Palność i wybuchowość pyłu drewna

Pył drewna składa się z drobnych cząstek drewna powstających podczas jego obróbki. Uważa się, że narażenie na nadmierną jego ilość wpływa drażniąco na oczy, nos i gardło, a także upośledza funkcje płuc. Pył drewna uważany jest także za czynnik rakotwórczy dla człowieka. Inne skutki zdrowotne obejmują zapalenie skóry i/lub skutki dla dróg oddechowych, takie jak astma. Do tego dochodzą jeszcze relacje alergiczne mogące objawić się u bardziej wrażliwych osób przy długotrwałym kontakcie z pyłem drewna.

Każdego roku pomieszczenia i zakłady przetwórstwa drewna ulegają poważnym awariom w wyniku pożaru lub wybuchu pyłu drzewnego. Pył drewna jest materiałem łatwopalnym. Pożary w zakładach produkcyjnych takich jak tartaki czy stolarnie mogą być wywołane m.in. przez zły stan techniczny urządzeń grzewczych, przegrzane silniki elektryczne, iskry elektryczne i palące się cząstki pyłu. Dostosowanie zakładów przetwórstwa drewna do minimalnych wymogów dotyczących bhp, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej określa rozporządzenie ministra gospodarki z dnia 8 lipca 2010 roku [8]. Wybuch pyłu drewna w zakładach przetwórstwa drewna w Polsce jest realnym zagrożeniem, a często bagatelizowanym przez właścicieli zakładów, w których może wystąpić pyłowa atmosfera wybuchowa. Inspektorzy pracy stwierdzili

naruszenia przepisów BHP w 94 % kontrolowanych zakładach jak wynika ze sprawozdania z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2020 roku [9].

Pył drewna jest również uważany za wybuchowy, szczególnie w przypadku wytworzenia obłoku pyłu. Jednak, aby do niego doszło, muszą zostać spełnione odpowiednie warunki, które są prezentowane na tzw. pięciokącie wybuchu przedstawionym na rysunku 1.



Rysunek 1 Pięciokąt wybuchu [www.rsbp.cz/pl]

Zainicjowanie procesu spalania wewnątrz mieszaniny pyłowo-powietrznej prowadzi do rozprzestrzenienia się tego procesu na całą niespaloną objętość. Szybkość rozprzestrzeniania się płomienia będzie różna w zależności od rodzaju drewna, wielkości cząstek zawieszonych w powietrzu, wilgotności, temperatury oraz szeregu innych czynników. Większość źródeł wskazuje, że zdolny do wybuchu jest pył, którego cząstki są mniejsze niż 500  $\mu\text{m}$ . Jednak mniejsze cząstki stwarzają większe zagrożenie, ponieważ prędkość deflagracji wzrasta wraz z zmniejszeniem się rozmiaru cząstek [10]. Małe cząstki łatwiej rozpraszają się i dłużej pozostają w zawieszeniu. Ponadto są one ogrzewane do punktu parowania lotnych substancji palnych lub pirolizy przez mniejszą energię. Są zatem łatwiejsze do zapalenia, a propagacja płomienia jest szybsza. Należy więc zapewnić, aby pył drewna nie wydostawał się z systemów zbierania i nie mógł się gromadzić w pomieszczeniach roboczych. Jeśli dojdzie do nagromadzenia się pyłu to każdy pierwotny wybuch, może spowodować powstanie mieszanin pyłowo-powietrznych w hali produkcyjnej. Cząstki palące się pochodzące z wybuchu pierwotnego mogą być przyczyną zapłonu takiej nowopowstałej chmury pyłu, prowadząc do zapoczątkowania serii wybuchów wtórnych, których skutki są bardziej destrukcyjne niż w przypadku wybuchu pierwotnego [11].

## Właściwości palne i charakterystyki wybuchu pyłu drewna

W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, w ramach V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju przeprowadzono badania i analizy właściwości palnych oraz charakterystyk wybuchu zalegających pyłów drewna pochodzących z przetwórstwa drewna. W badaniach wykorzystano gatunki drewna twardego (buk, dąb, brzoza), drewna miękkiego (sosna, świerk, olcha) oraz ich mieszaniny. Dodatkowo badania charakterystyk wykonano dla pyłów w dwóch zakresach wielkości cząstek (20 – 70  $\mu\text{m}$  i 71 – 125  $\mu\text{m}$ ).

## Wyniki badań parametrów charakteryzujących palność materiałów

Wynikiem przeprowadzonych pomiarów było uzyskanie wartości wyznaczonych wielkości charakteryzujących zachowanie się materiałów pod wpływem intensywnego promieniowania cieplnego, a mianowicie:

- czasu do zapłonu – *TTI* (s),
- średniej szybkości wydzielania ciepła – *HRR* ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ),
- maksymalnej szybkości wydzielania ciepła – *pHRR* ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ),
- czasu do uzyskania maksymalnej szybkości wydzielania ciepła – *t-pHRR* (s),
- całkowitego wydzielonego ciepła – *THR* ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),
- całkowitej ilości wydzielonego dymu – *TSR* ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ),
- efektywnego ciepła spalania – *EHC* ( $\text{MJ}/\text{kg}$ ).

Średnie wartości wyznaczonych parametrów kalorymetrycznych opisujących zachowanie pyłów drewna pod wpływem oddziaływania strumienia ciepła o gęstości ( $35 \text{ kW}/\text{m}^2$ ) zostały zestawione w tabeli 3.

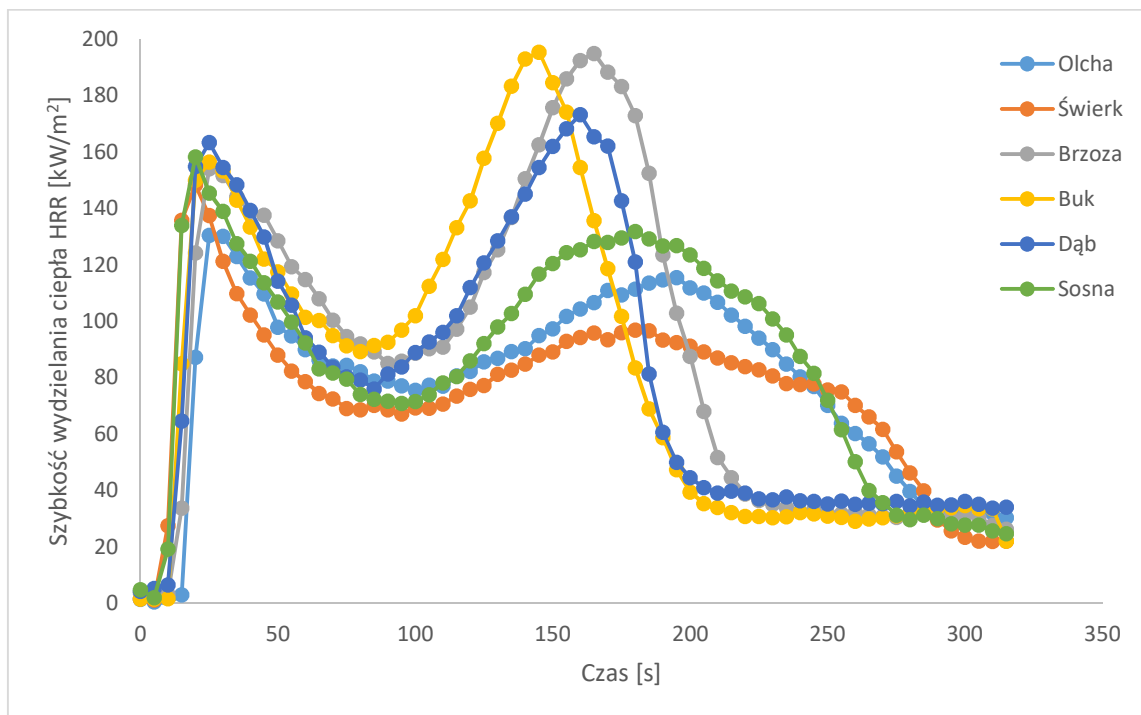
**Tabela 3. Zestawienie parametrów kalorymetrycznych badanych pyłów drewna**

Nazwa próbki	<i>TTI</i>	<i>HRR</i>	<i>pHRR</i>	<i>t-pHRR</i>	<i>THR</i>	<i>TSR</i>	<i>EHC</i>
	s	$\text{kW}/\text{m}^2$	$\text{kW}/\text{m}^2$	s	$\text{MJ}/\text{m}^2$	$\text{m}^2/\text{m}^2$	$\text{MJ}/\text{kg}$
Brzoza	16	91,4	195	165	28,3	138	14,2
Buk	13	89,0	195	145	26,4	146	13,4
Dąb	14	84,7	173	160	26,0	114	13,4



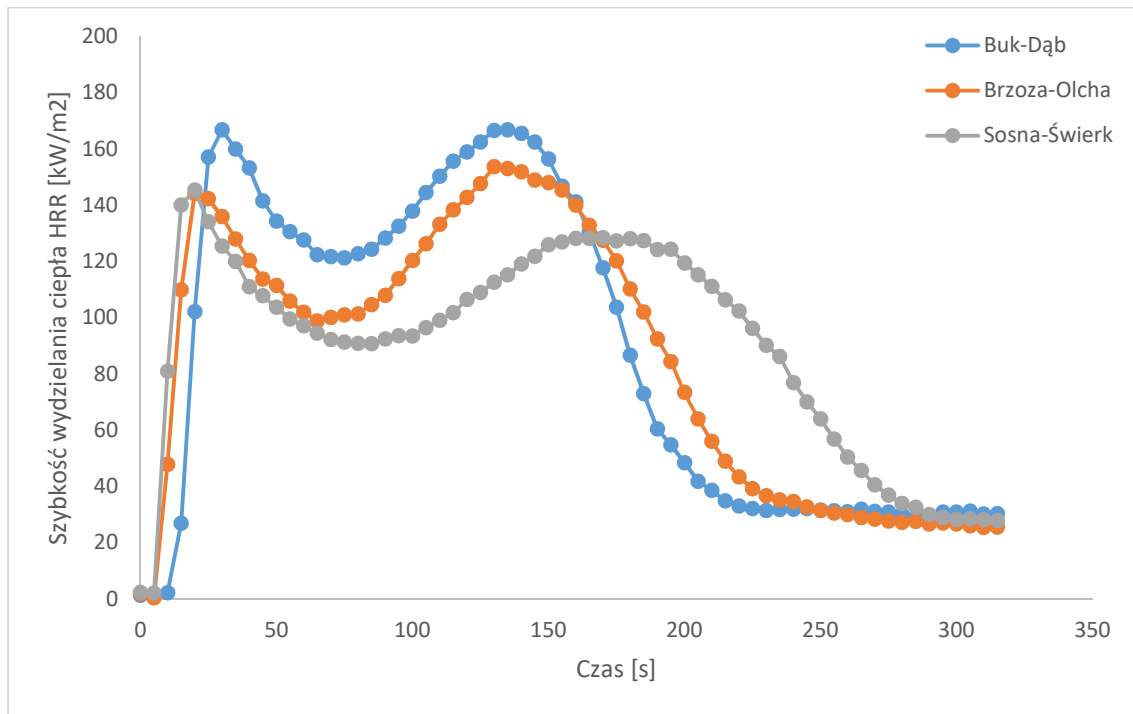
Nazwa próbki	$TTI$ s	$HRR$ kW/m <sup>2</sup>	$pHRR$ kW/m <sup>2</sup>	$t-pHRR$ s	$THR$ MJ/m <sup>2</sup>	$TSR$ m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	$EHC$ MJ/kg
Sosna	8	73,4	157	20	28,7	266,9	15,0
Świerk	10	63,1	151	18	25,9	48,9	13,3
Olcha	18	71,3	133	25	27,0	58,8	14,6
Buk-Dąb	17	91,0	155,4	133	27,5	433,5	14,2
Brzoza-Olcha	11	81,1	155,4	133	28,3	336,2	15,6
Sosna-Świerk	9	81,3	145,9	18	30,0	383,1	15,1

Graficzna prezentacja przebiegu procesu spalania różnych gatunków drzew, w postaci wykresu zależności szybkości wydzielania ciepła, została przedstawiona na rysunkach 2a i 2b.



Rysunek 2a. Wykres szybkość i wydzielania ciepła w czasie dla pyłów drewna





Rysunek 2b. Wykres szybkość i wydzielenia ciepła w czasie dla pyłów drewna

## Wyniki badań charakterystyk wybuchu

Wynikiem przeprowadzonych pomiarów było uzyskanie charakterystyk wybuchu pyłów drzew twardych. W trakcie badań oznaczono następujące parametry:

- maksymalne ciśnienie wybuchu –  $P_{max}$  (bar),
- indeks deflagacyjny –  $K_{St}$  (bar·m/s),
- dolna granica wybuchowości pyłu – DGW ( $g/m^3$ ).

Na podstawie uzyskanych wyników przydzielono poszczególne pyły do klas wybuchowości według wytycznych OSHA (ang. Occupational Safety and Health Administration) i zestawiono je w tabeli 4.

**Tabela 4. Charakterystyki wybuchu poszczególnych pyłów w dwóch zakresach wielkości ziarna**

Nazwa próbki	$P_{max}$	<i>Stężenie</i>	$K_{St}$	<i>Klasa St</i>	$DGW$
	bar	g/m <sup>3</sup>	bar · m/s	-	g/m <sup>3</sup>
<b>20 - 71 μm</b>					
Brzoza	8,2	500	226	ST 2	40
Buk	7,9	500	208	ST 2	40
Dąb	7,9	500	253	ST 2	40
Sosna	7,5	1000	194	ST 1	50
Świerk	7,5	500	212	ST 2	50
Olcha	7,5	500	175	ST 1	40
Buk-Dąb	7,5	750	229	ST2	30
Brzoza-Olcha	7,6	500	199	ST1	30
Sosna-Świerk	7,2	1000	206	ST2	30
<b>71 - 125 μm</b>					
Brzoza	7,5	750	134	ST 1	40
Buk	7,6	750	111	ST 1	40
Dąb	7,2	500	68	ST 1	30
Sosna	7,7	1000	180	ST 1	50
Świerk	7,7	500	188	ST 1	60
Olcha	6,7	1250	101	ST 1	60
Buk-Dąb	7,0	1000	74	ST1	60
Brzoza-Olcha	7,2	750	150	ST1	30
Sosna-Świerk	7,1	1000	70	ST1	120

## Podsumowanie wyników

Badania przeprowadzone na kalorymetrze stożkowym wskazują na wpływ rodzaju drewna na właściwości palne. Pyły drewna miękkiego ulegają wcześniejszemu zapłonowi w porównaniu do pyłów drewna twardego. Wartości szybkości wydzielania ciepła uzyskano wyższe dla pyłów drewna twardego i w przeciwieństwie do pyłów drewna miękkiego maksymalna wartość tego parametru uzyskana jest po 2-3 minutach od rozpoczęcia zapłonu. Warto zauważyć, że wartości parametrów takich jak całkowitego wydzielonego ciepła (THR), czasu zapłonu (TTI) czy szybkości wydzielania ciepła (HRR) w czasie zbadanych na kalorymetrze stożkowym dla mieszanki pyłu drewna twardego i miękkiego wykazują uśrednione wartości pomiędzy wartościami uzyskanymi dla poszczególnych typów drewna. Jednak część wartości dla próbki brzoza-olcha uzyskała wyższe wartości m.in. efektywnego ciepła spalania (EHC). Jest to spowodowane prawdopodobnie wydzielaniem ciepła przez dłuższy czas palenia w porównaniu do pyłu drewna twardego oraz średnio wyższych wartości szybkości wydzielania ciepła niż dla pyłów drewna miękkiego.

Charakterystyki wybuchu nie wykazują takich zmian w przypadku zmiany rodzaju drewna. Parametry te silnie są skorelowane z rozmiarem cząstek pyłu. Widoczna jest szczególnie duża różnica pomiędzy wartościami indeksu deflagacyjnego. Dla pyłów w zakresie wielkości cząstek pomiędzy 20-71  $\mu\text{m}$  większość pyłów wykazuje klasę wybuchowości St 2, lub wartości indeksu deflagacyjnego są zbliżone do wartości 200  $\text{bar}\cdot\text{m/s}$ , czyli wartości granicznej przypisującej pył do klasy wybuchowości pyłu St 2. Dla pyłów z zakresu wielkości cząstek 71-125  $\mu\text{m}$  wartości indeksu deflagacyjnego są nawet kilka razy niższe. Warto podkreślić szeroki zakres stężeń, dla których uzyskiwane są wartości ciśnienia maksymalnego. Większość pyłów uzyskała wartości zbliżone do  $p_{\text{max}}$  dla zakresu stężeń 500-1000  $\text{g/m}^3$ . Wartości dolnej granicy wybuchowości pyłów uzyskano dla stężeń w przedziale 30-120  $\text{g/m}^3$ , jednak DGW w przedziale wielkości cząstek 20-70  $\mu\text{m}$  zawarła się w przedziale 30-50  $\mu\text{m}$ . Wartości tego parametru pokazują ponownie zależność, że im wielkość cząstek pyłu drewna jest mniejsza, tym zagrożenie wybuchem jest większe. Szczególnie warto zwracać uwagę na ten fakt podczas zmiany technologii obróbki drewna, podczas której powstają mniejsze cząstki drewna. Podsumowując, właściwości palne silnie zależą od gatunku drewna i jego składu, natomiast największy wpływ na charakterystyki wybuchu dla pyłów drewna ma wielkość cząstek pyłu.

## Bibliografia

- [1] Yang H., Yan R., Chen H., Zheng C., Lee DH., Liang DT.: "In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: Hemicellulose, cellulose and lignin," *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 1, pp. 388–393, Jan. 2006, doi: 10.1021/ef0580117.
- [2] Kim H. S., Kim S., Kim H. J., Yang H. S.: "Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content," *Thermochim. Acta*, vol. 451, no. 1–2, pp. 181–188, 2006, doi: 10.1016/j.tca.2006.09.013.
- [3] Browne F. L.: *Theories of the combustion of wood and its control - a survey of the literature, FPL report number 2136*. 1958.
- [4] Lowden L., Hull T.: "Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction," *Fire Sci. Rev.*, vol. 2, no. 1, p. 4, 2013, doi: 10.1186/2193-0414-2-4.
- [5] Östman B. et al.: *Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications Final report for Vinnova-Tekes project InnoFireWood*. 2006.
- [6] Karpovič Z., Šukys R., Gudelis R.: "Toxicity research of smouldering and flaming pine timber treated with fire retardant solutions," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 600–608, 2012, doi: 10.3846/13923730.2012.709195.
- [7] Eriksson O., a I Goring D., Lindgren BO., Forest S.: "Wood Science and Technology," *Wood Sci. Technol.*, vol. 279, pp. 267–279, 1980.
- [8] Dziennik Ustaw Nr 138, *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań, dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej*, 2010,.  
<https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20101380931/O/D20100931.pdf>
- [9] Państwowa Inspekcja Pracy, "Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2020 roku," p. 307, 2021, [Online]. Available: <https://www.pip.gov.pl/pl/o-urzedzie/sprawozdania-z-dzialalnosci/128604,sprawozdanie-z-dzialalnosci-panstwowej-inspekcji-pracy-2020.html>
- [10] Fanebust IM., Fernandez-Anez N.: "Influence of particle size and moisture content of wood particulates on deflagration hazard," 2019.
- [11] Kaczmarek P.: "Obróka drewna - pomiary czynników szkodliwych część 1," *ATEST - Ochr. Pr.*, vol. 1, no. 73726, 2013.