

BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA BIOMASY W ENERGETYCE

mł. bryg. dr inż. Szymon Ptak



19 – 20 czerwca 2023 r.

Uwaga

- Z prezentacji przekazanej organizatorom usunięto materiały, które nie mogą być upubliczniane, ze względu na fakt, że
 - Nie są jeszcze opublikowane LUB
 - Stanowią dowody w postępowaniach sądowych LUB
 - Autor prezentacji nie ma zgody na ich rozpowszechnianie.
- Kompletna prezentacja będzie przedstawiona podczas konferencji.

Dane kontaktowe

Zakład Elektroenergetyki / Katedra Techniki Pożarniczej

tel. 22 56 17 699

email: sptak@sgsp.edu.pl

Koncepcja prezentacji

- Zdarzenia pożarowe i wybuchowe związane z węglem i biomasą
- Charakterystyka biomasy jako paliwa w kontekście węgla
- Spalania i współspalanie biomasy z węglem
- Składowanie biomasy
- Wyniki badań

Tytułem wstępu...

**BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA
BIOMASY W ENERGETYCE**

PSE



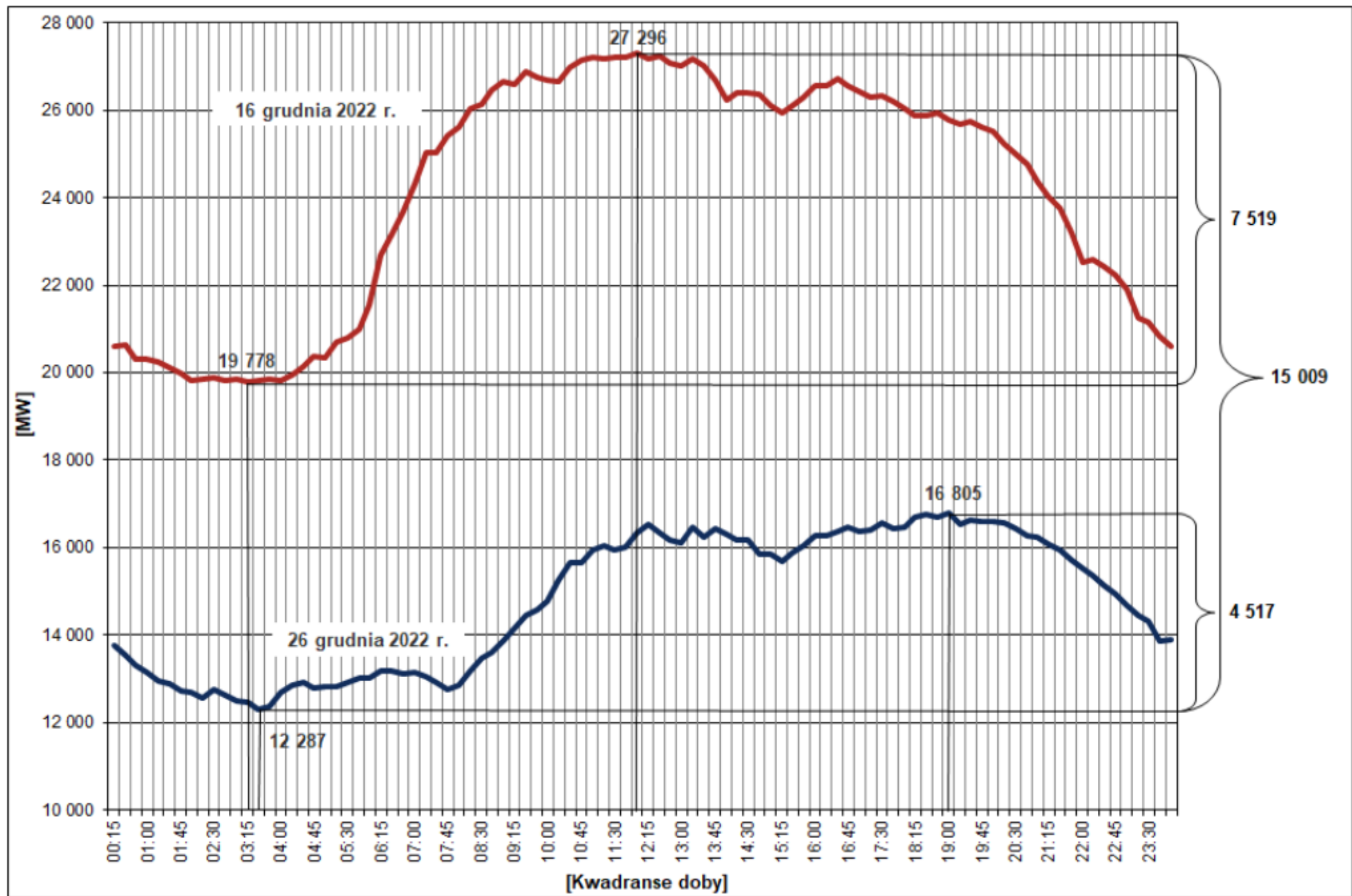
10-05-2023 12:16:00

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	20 544
GENERACJA [MW]	21 988
el. ciepne	15 919
el. wodne	152
el. wiatrowe	5 916
el. fotowoltaiczne	1
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	1 340 EKSPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,010

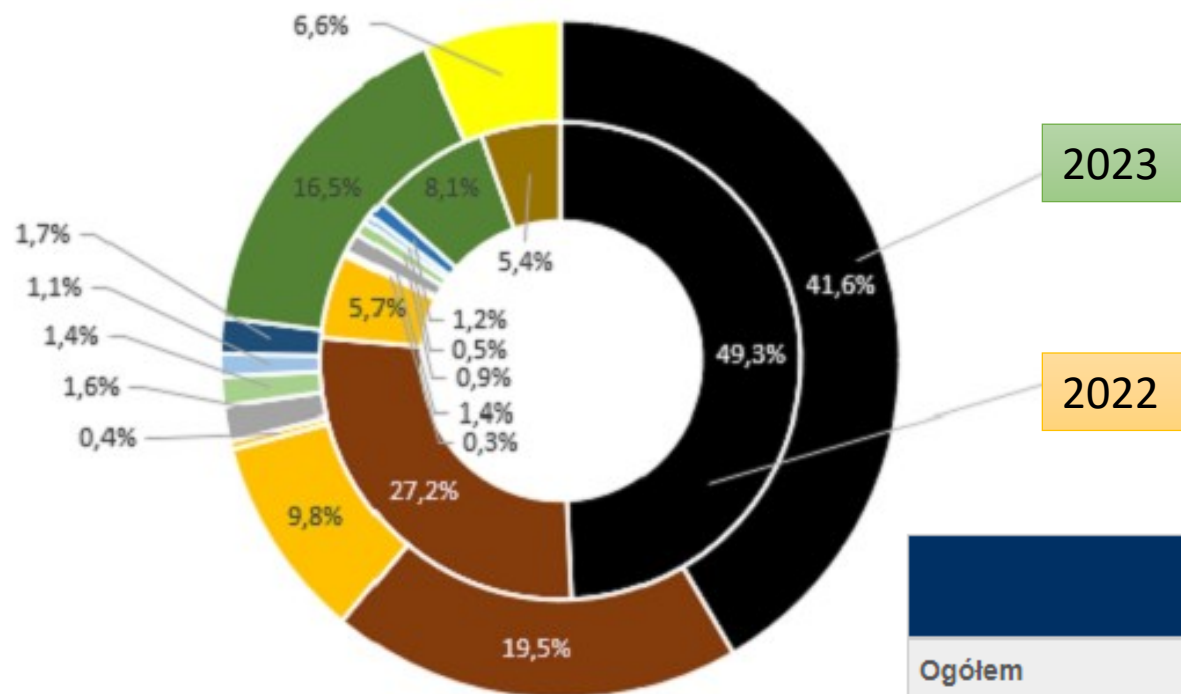
2022

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	19 962
GENERACJA [MW]	22 331
el. ciepne	8 746
el. wodne	258
el. wiatrowe	5 537
el. fotowoltaiczne	7 790
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	2 369 EKSPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	49,991

2023



Struktura produkcji energii elektrycznej marzec 2022/marzec 2023

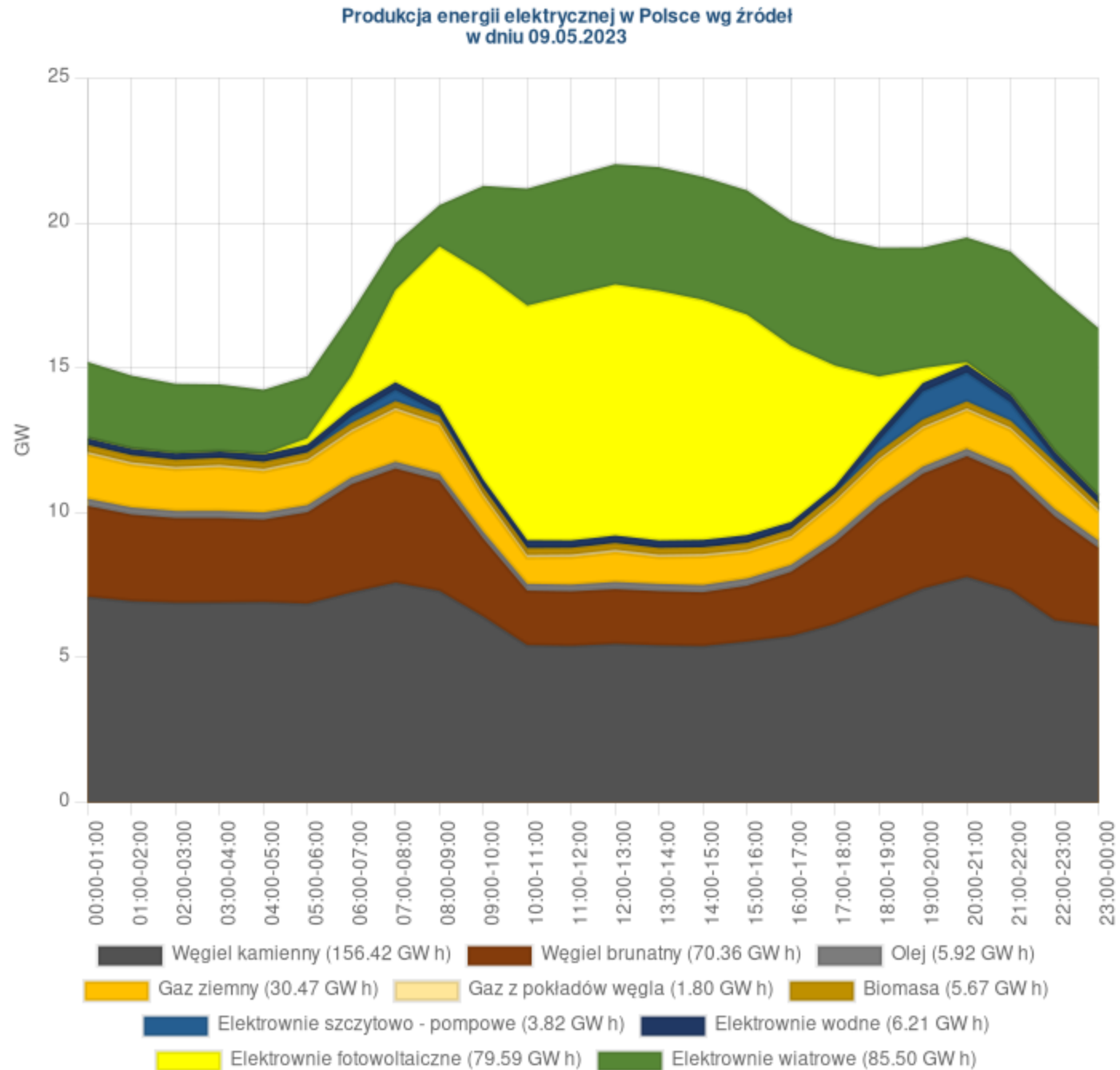


- Węgiel kamienny
- Węgiel Brunatny
- Gaz ziemny z odmetanowani kopalń
- Olej
- Elektrownie szczytowo-pom powe
- Elektrownie wodne
- Elektrownie fotowoltaiczne
- Gaz ziemny
- Biomasa
- Elektrownie wiatrowe



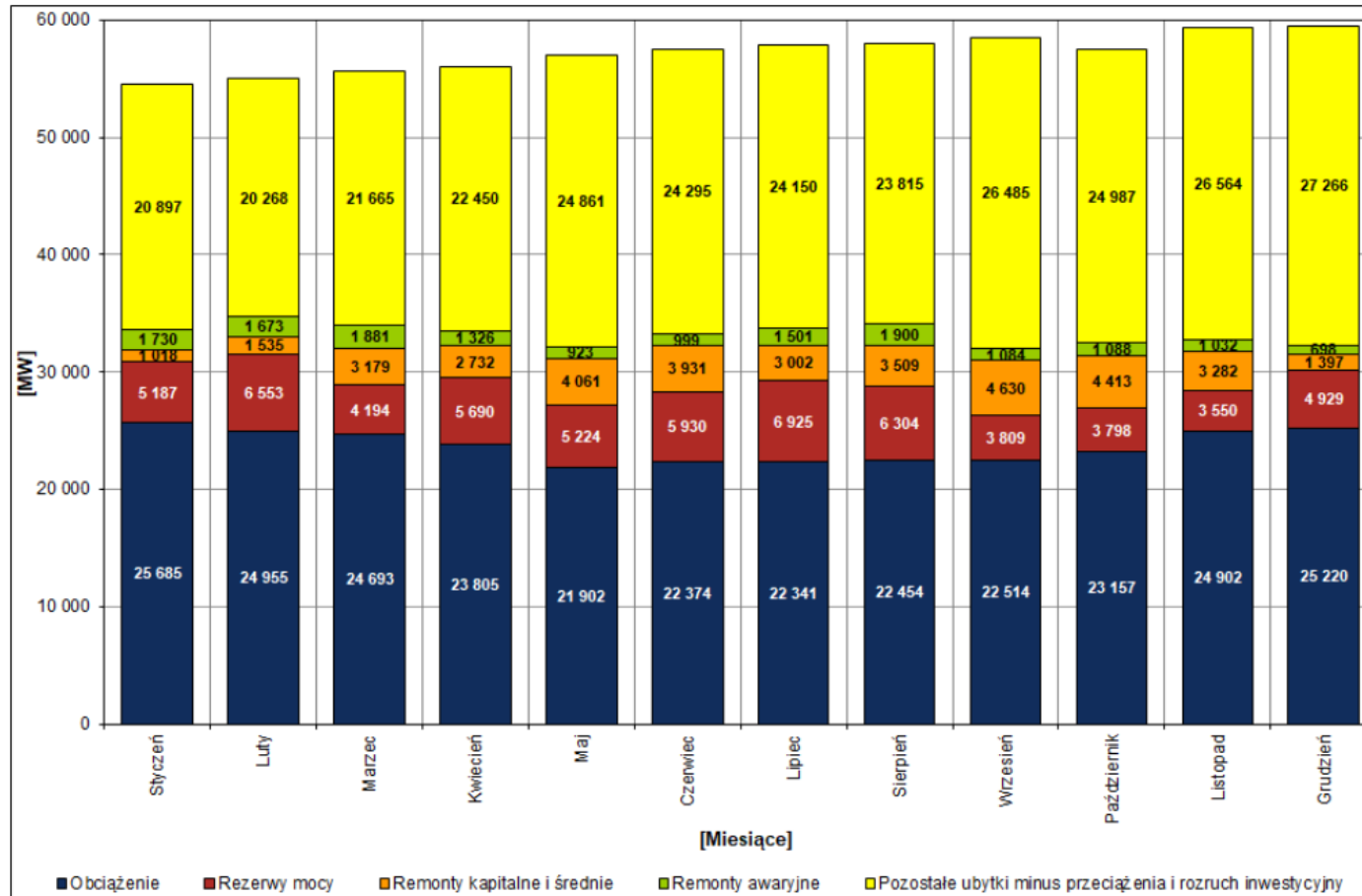
Jednostki: MW	31.12.2020 r.	31.12.2021 r.	31.12.2022 r.
Ogółem	49 238	53 656	60 446
Elektrownie zawodowe	36 364	38 570	38 867
Elektrownie zawodowe wodne	2 356	2 380	2 421
Elektrownie zawodowe ciepłne, w tym:	34 008	36 190	36 446
na węglu kamiennym	22 747	24 611	24 897
na węglu brunatnym	8 478	8 262	8 262
gazowe	2 782	3 317	3 288
Elektrownie wiatrowe i inne odnawialne	10 229	15 086	21 578
Elektrownie przemysłowe	2 645	---	---
JWCD	29 429	27 850	27 129
nJWCD	19 810	25 806	33 317

Co z tym OZE?



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych ENTSO-E

Moc osiągalna, remonty, rezerwy obciążenie



Biomasa jako paliwo

**BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA
BIOMASY W ENERGETYCE**

Biomasa – biopaliwo stałe

- **Biomasa leśna**

- Pellet,
- zrębki,
- trociny,
- wióry,
- brykiety,
- pyły itd.

- **Biomasa rolna**

- słoma,
- wytloki,
- kolby,
- łuski,
- makuchy,
- sieczka itd..

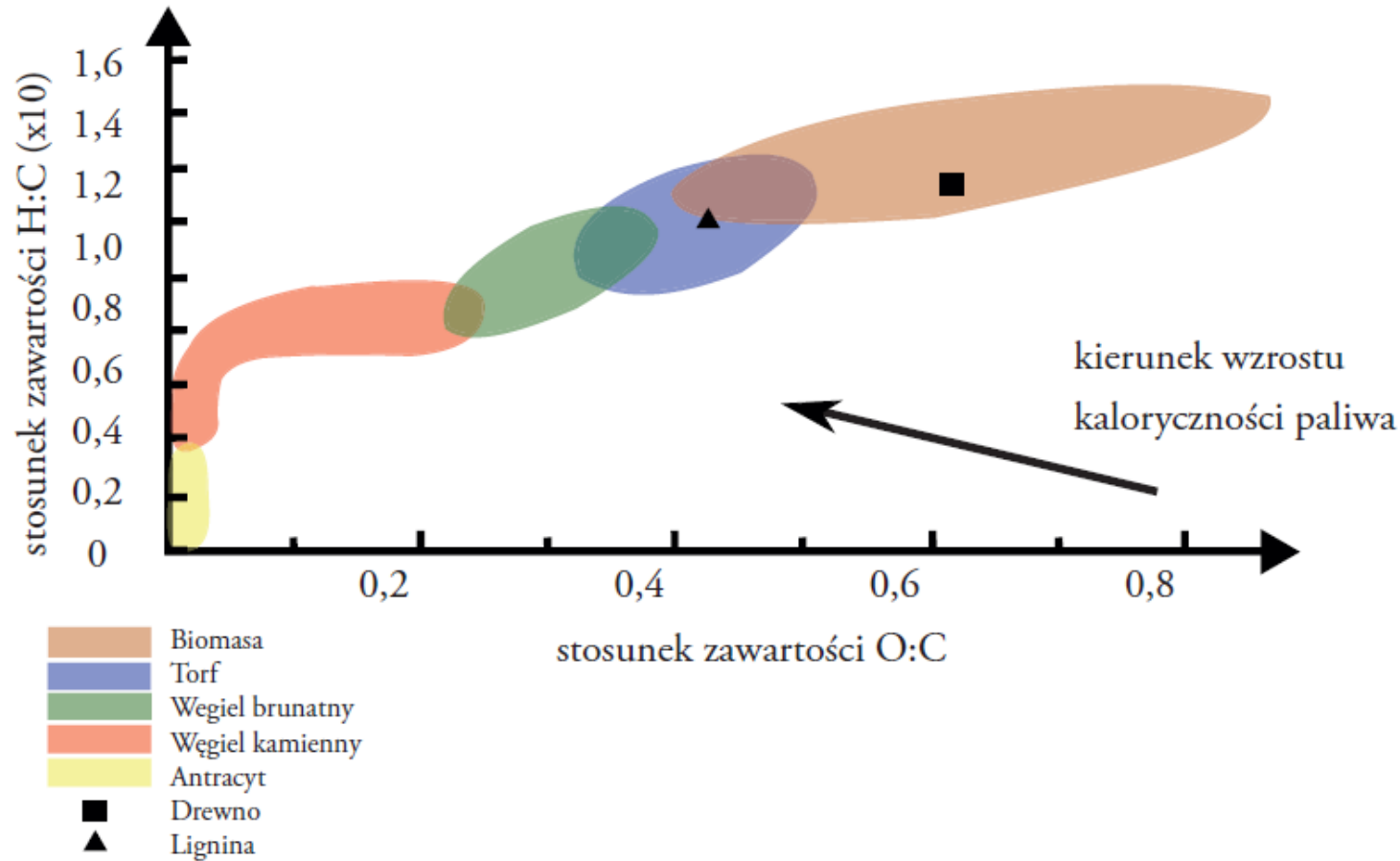
- **Resztki hodowlane**

- obornik,
- treści żołądkowe i poubojowe,
- rogi,
- skóry itd.

- **Odpady przemysłowe**

- podkłady,
- szalunki,
- palety,
- spożywcze,
- gastronomiczne itd.

Paliwa stałe stosowane w energetyce

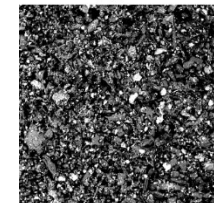


- „Młodsze” a „starsze” węgle

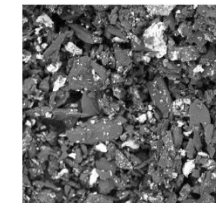
Charakterystyka biomasy

Nazwa próbki	Pył węglowy KDB ²²	Pellet siano/słoma	Odpad z blanszowania orzechów ziemnych	Lupina orzecha włoskiego	Pellet słonecznikowy	Pellet drzewny
Parametr						
Zawartość wilgoci przemijającej [%wag.]	4,3	5,1	4,4	5,4	5,5	5,4
Kształt ziaren pyłu (opis jakościowy)	Wielosściennie, także płatkowe	Głównie włókniste i płatkowe, także nieregularne	Kuliste, połączone lepiszczem organicznym, nieregularne, płatkowe konglomeraty	Globularne	Głównie włókniste i płatkowe, także nieregularne	Głównie płatkowe
Gęstość nasypowa [kg·dm ⁻³]	0,404	0,440	0,380	0,739	0,491	0,333
Gęstość nasypowa mieszaniny biomasy i węgla (50/50 wagowo) [kg·dm ⁻³]	-	0,412	0,392	0,539	0,462	0,345
Gęstość nasypowa na potrzeby badania MEZ [kg·dm ⁻³]	-	0,388	0,380	0,571	0,445	0,222

Rodzaj próbki: węgiel KDB (< 200 μm)



Powiększenie: 570x
Szerokość zdjęcia: 468 μm

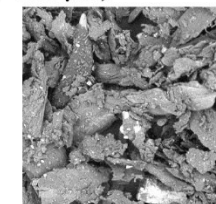


Powiększenie: 1850x
Szerokość zdjęcia: 145 μm

Rodzaj próbki: pył z pelletu siano/słoma (< 500 μm)

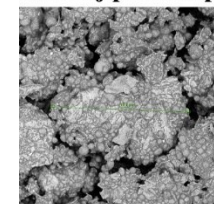


Powiększenie: 360x
Szerokość zdjęcia: 755 μm

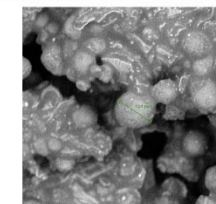


Powiększenie: 2250x
Szerokość zdjęcia: 119 μm

Rodzaj próbki: pył z odpadu z blanszowania orzechów ziemnych (< 500 μm)

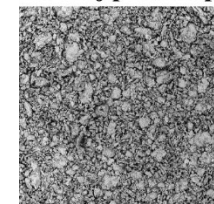


Powiększenie: 1000x
Szerokość zdjęcia: 268 μm



Powiększenie: 4000x
Szerokość zdjęcia: 67,1 μm

Rodzaj próbki: pył z lupin orzechów włoskich (< 500 μm)

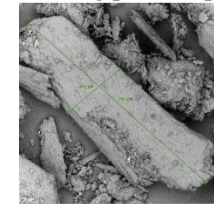


Powiększenie: 470x
Szerokość zdjęcia: 575 μm

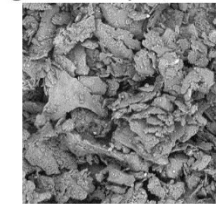


Powiększenie: 1650x
Szerokość zdjęcia: 165 μm

Rodzaj próbki: pył z pelletu słonecznikowego (< 500 μm)



Powiększenie: 340x
Szerokość zdjęcia: 793 μm

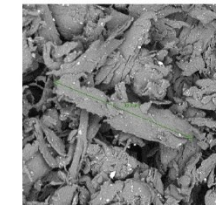


Powiększenie: 3400x
Szerokość zdjęcia: 78,2 μm

Rodzaj próbki: pył z pelletu drzewnego (< 500 μm)

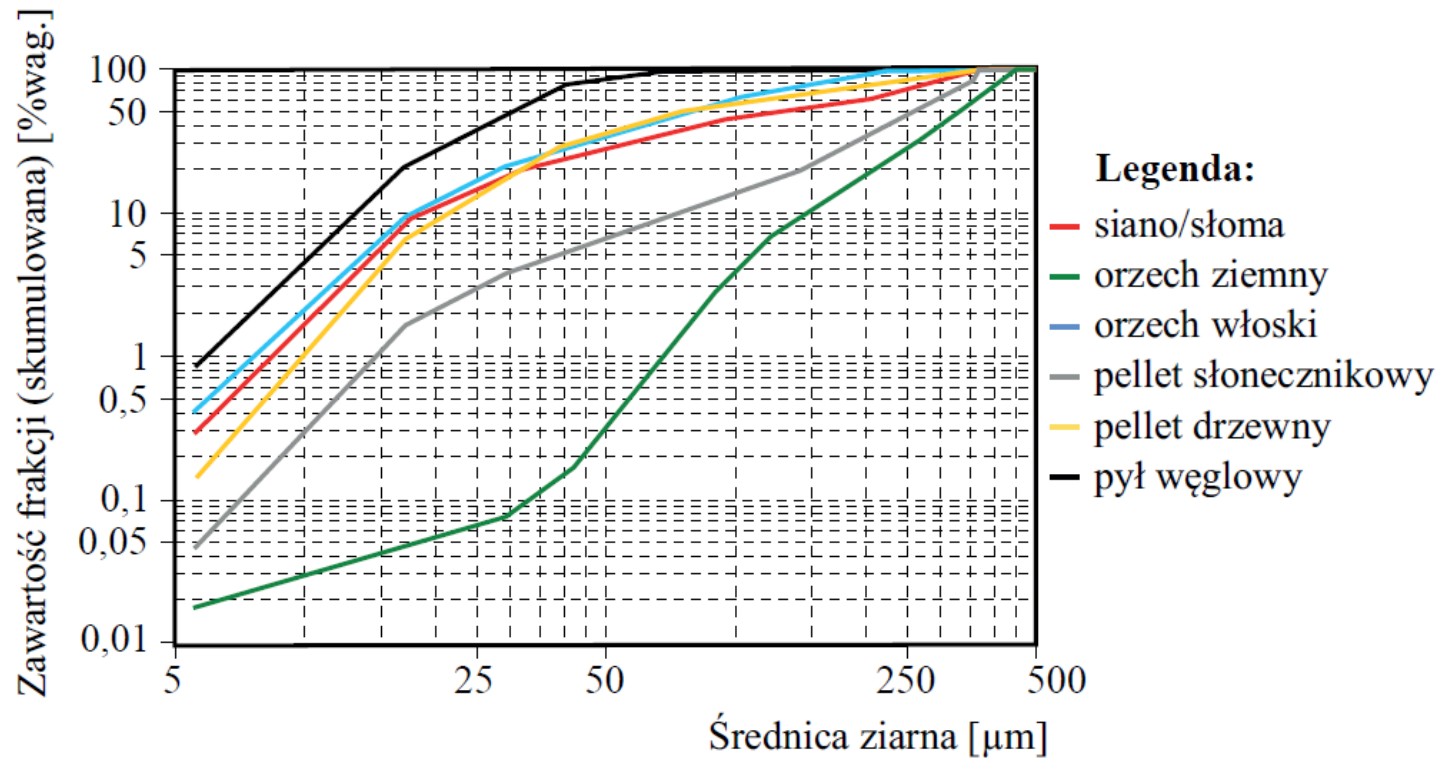


Powiększenie: 320x
Szerokość zdjęcia: 846 μm



Powiększenie: 2050x
Szerokość zdjęcia: 131 μm

Rozkład granulometryczny



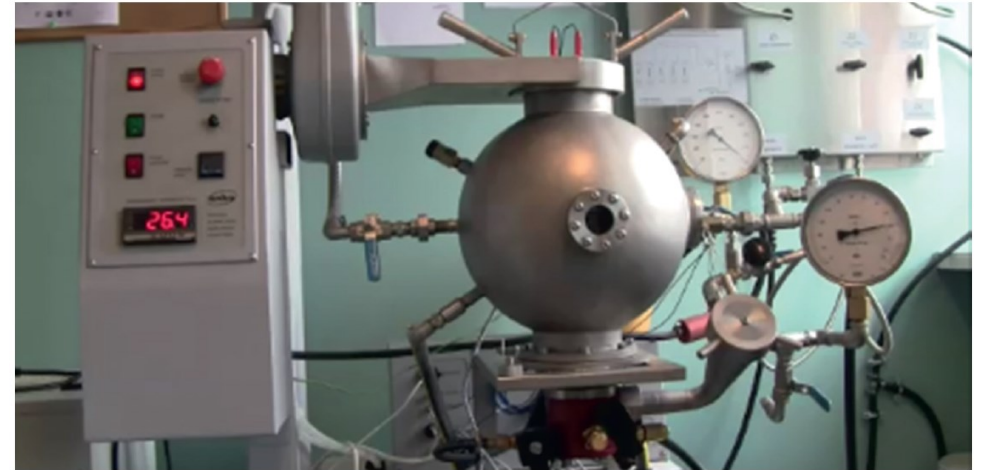
- Jednakowe metody rozdrabniania
- Wpływ na pracę kotłów pyłowych
- Skłonność do „oblepiania”

Parametry palności i wybuchowości

**BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA
BIOMASY W ENERGETYCE**

Ciśnienie wybuchu

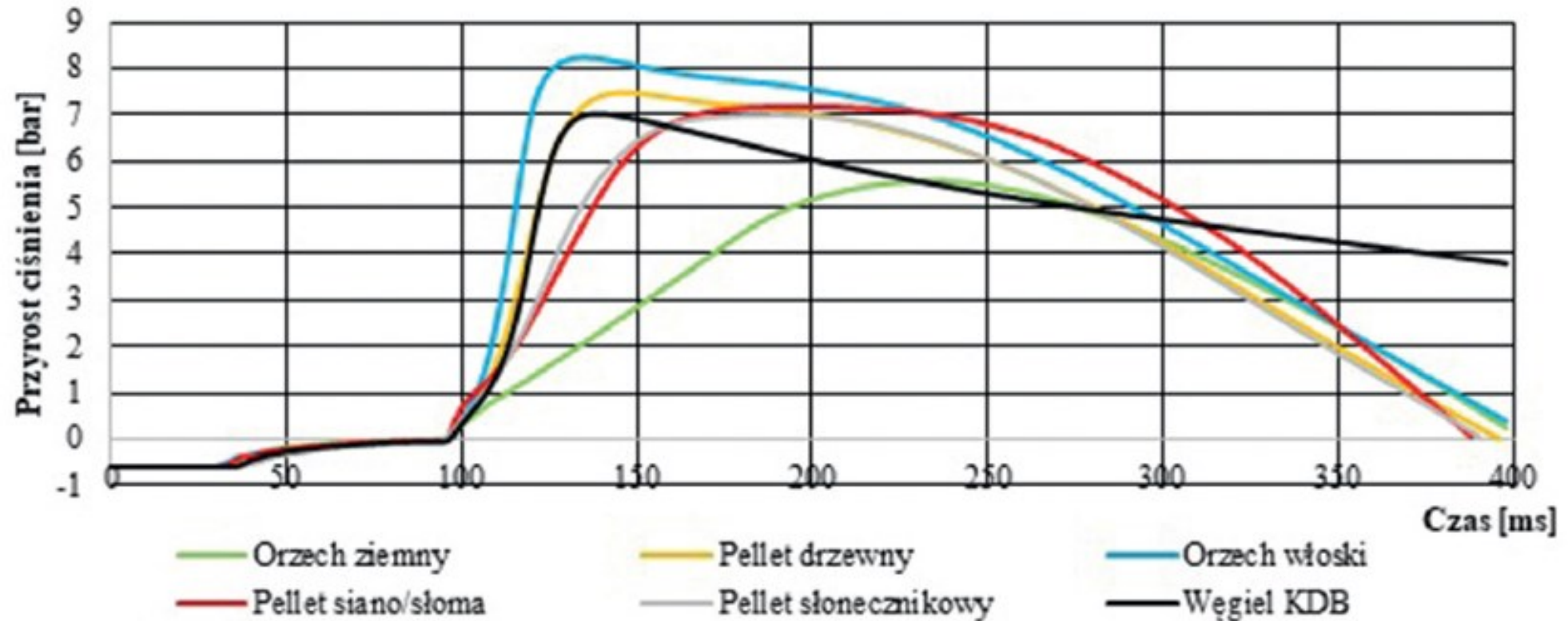
- Metoda badawcza
- Stosowana powszechnie do oznaczania parametrów wybuchowości pyłów w przemyśle (na potrzeby DZPW)
- Parametry, które można wyznaczyć:
 - p_{max}
 - $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$
 - DGW
 - (LOI) – **nie badano**



Wyniki

Badany pył	Maksymalne ciśnienie wybuchu [bar]	Maksymalna szybkość narastania ciśnienia [$\text{bar}\cdot\text{s}^{-1}$]	Dolna granica wybuchowości [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
Pył węglowy KDB*	7,44	282,99	60
Pellet siano/słoma (100%)	7,47	207,22	500
Pellet siano/słoma (50%) / węgiel KDB (50%)	8,75	302,48	250
Odpad z blanszowania orzechów ziemnych (100%)	5,59	71,53	>1500 ²⁹
Odpad z blanszowania orzechów ziemnych (50%) / węgiel KDB (50%)	6,47	177,73	500
Łupina orzecha włoskiego (100%)	8,75	353,08	1000
Łupina orzecha włoskiego (50%) / węgiel KDB (50%)	8,55	410,72	250
Pellet słonecznikowy (100%)	7,25	157,94	>1500
Pellet słonecznikowy (50%) / węgiel KDB (50%)	8,37	301,38	250
Pellet drzewny (100%)	7,83	274,33	125
Pellet drzewny (50%) / węgiel KDB (50%)	7,66	331,07	60

Wyjaśnienie efektu – przebieg ciśnienia wybuchu

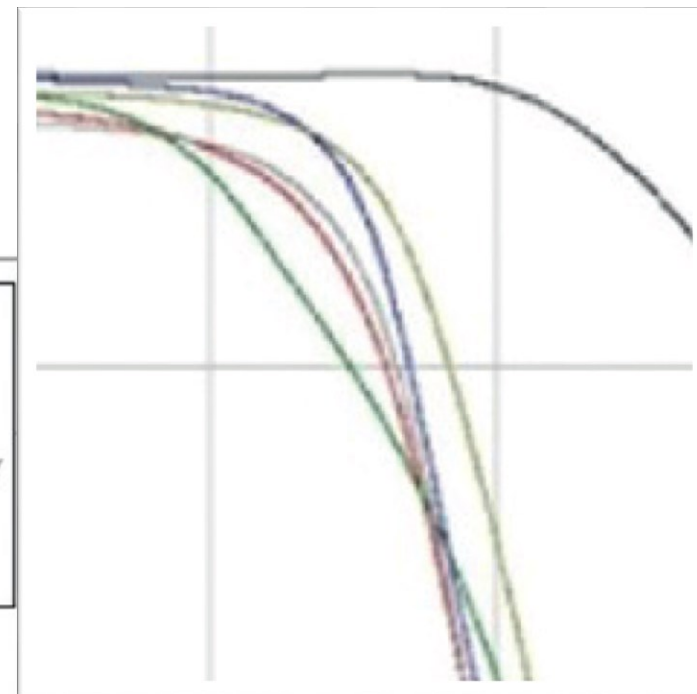
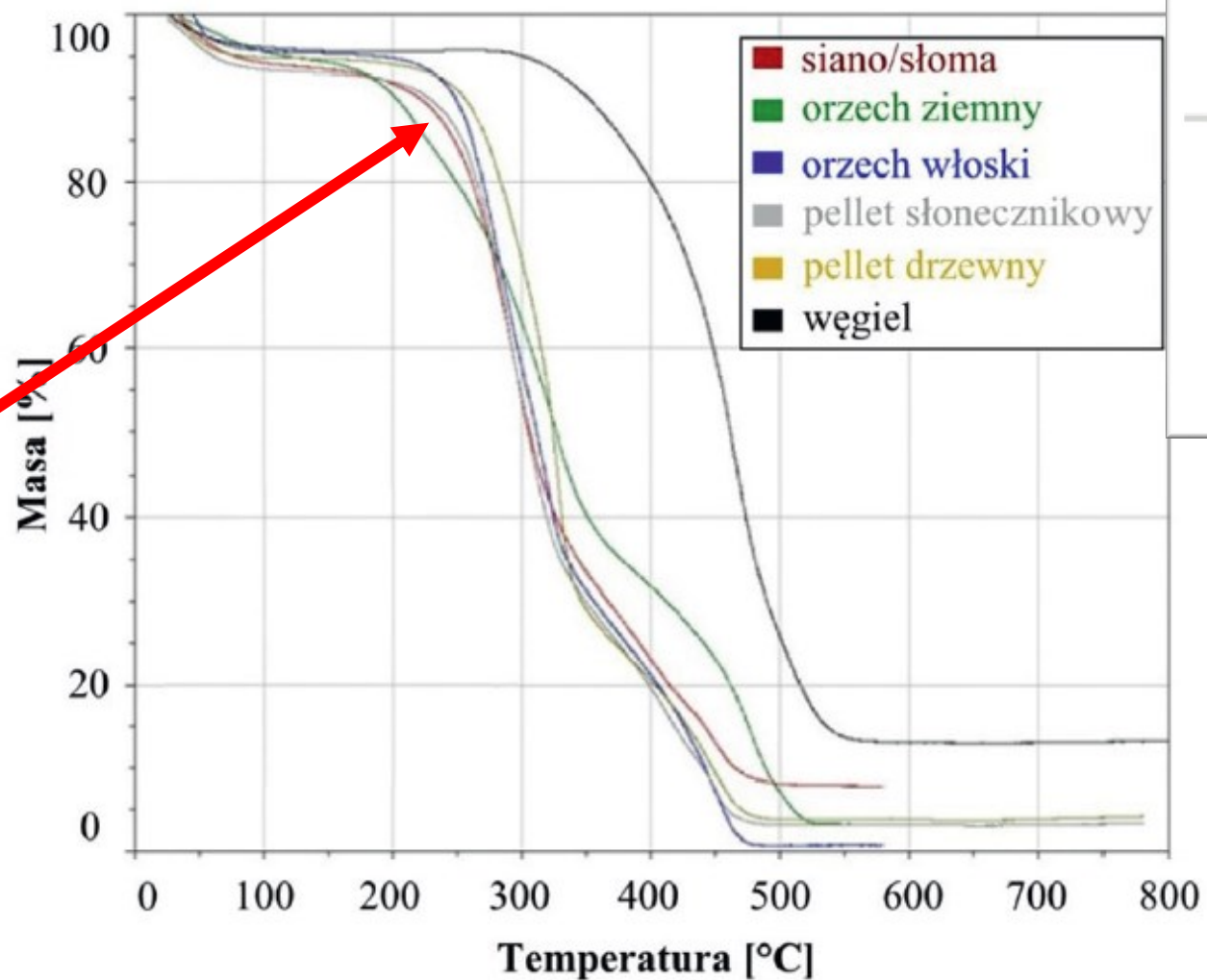


Analiza termograwimetryczna (TGA)

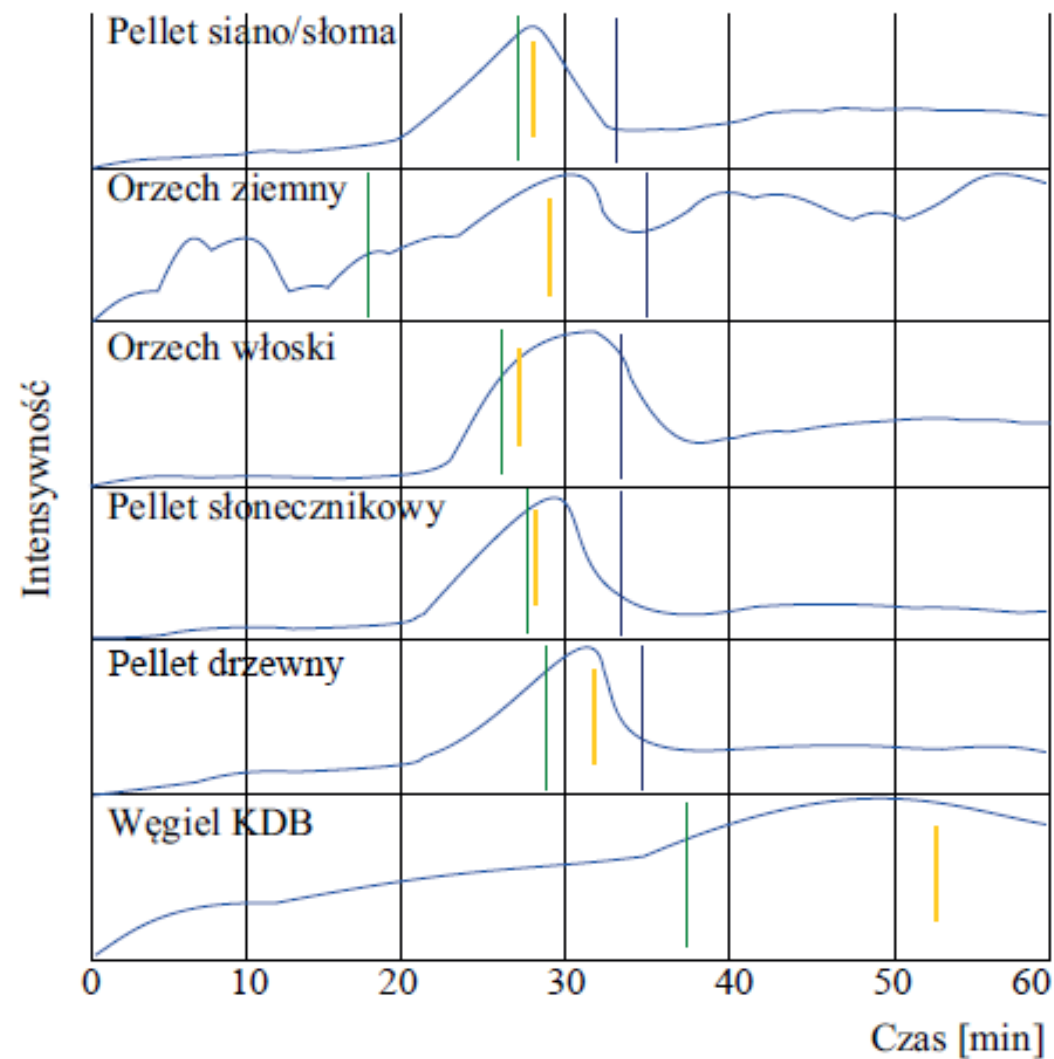
- Metoda badawcza
- Dlaczego badanie jest istotne?
- Rozkład termiczny vs. piroliza



Wyjaśnienie efektu – krzywe TGA



Wyjaśnienie efektu – wykresy G-S



Szczegółowe wyniki TGA

Nazwa próbki/ parametr	Pellet siano/słoma	Odpad z blanszowania orzechów ziemnych	Łupina orzecha wło- skiego	Pellet słonecznikowy	Pellet drzewny	Pył węglowy KDB
Badanie w atmosferze utleniającej						
Temperatura początku rozkładu termicznego [°C] ³³	251	183	252	244	247	407
Temperatura maksi- mum piku I [°C]	292 (7,7%· min ⁻¹)	217 (2,2%· min ⁻¹)	282 (7,4%· min ⁻¹)	288 (8,3%· min ⁻¹)	287 (5,5%· min ⁻¹)	463 (8,7%· min ⁻¹)
Temperatura maksi- mum piku II [°C]	403 (2,2%· min ⁻¹)	323 (5,3%· min ⁻¹)	321 (8,3%· min ⁻¹)	416 (2,5%· min ⁻¹)	328 (15,1%· min ⁻¹)	508 (3,6%· min ⁻¹)
Temperatura maksi- mum piku III [°C]	449 (2,8%· min ⁻¹)	476 (4,1%· min ⁻¹)	455 (3,7%· min ⁻¹)	452 (3,7%· min ⁻¹)	449 (2,8%· min ⁻¹)	-
Temperatura maksi- mum piku IV [°C]	-	500 (2,3%· min ⁻¹)	-	-	-	-
Temperatura ubytku 50% masy [°C]	310	327	314	305	323	461
Pozostałość (popiół) [%]	9,31	3,26	1,09	5,43	1,79	14,69

Skład elementarny biomasy

Nazwa próbki	C [%wag.]	H [%wag.]	N [%wag.]	O [%wag.] ⁴¹	S [%wag.]	Cl [%wag.]
Pył z pelletu siano/słoma	41,8	5,74	1,07	50,77	0,46	0,16
Pył z odpadu z blanszowania orzechów ziemnych	53,55	8,19	3,84	34,05	0,37	-
Pył z łupin orzecha włoskiego	47,27	5,94	-	46,79	-	-
Pył z pelletu słonecznikowego	47,62	6,15	0,66	45,37	0,2	-
Pył z pelletu drzewnego	45,26	6,2	0,4	48,14	-	-
Pył węglowy KDB	58,21	3,65	1,2	34,816	1,72	-

Ciepło spalania

Rodzaj materiału	Wartość średnia [MJ·kg ⁻¹]	Masa równoważna [kg] ³¹
Pył z pelletu siano/słoma (<500 μm)	16,078	1518
Pył z odpadu z blanszowania orzechów ziemnych (<500 μm)	22,477	1086
Pył z łupin orzecha włoskiego (<500 μm)	17,531	1392
Pył z pelletu słonecznikowego (<500 μm)	16,488	1480
Pył z pelletu drzewnego (<500 μm)	14,642	1667
Pył węglowy KDB	24,412	1000

Minimalna energia zapłonu



Rodzaj materiału	Statystycznie prawdopodobna wartość MEZ [mJ]	Prawdopodobieństwo zapłonu ³²
Pył z pelletu siano/słoma (<200 μm)	400	80%
Pył z odpadu z blanszowania orzechów ziemnych (<500 μm)	780	40%
Pył z łupin orzecha włoskiego (<200 μm)	21	40%
Pył z pelletu słonecznikowego (<200 μm)	740	20%
Pył z pelletu drzewnego (<200 μm)	23	20%
Pył węgla kamiennego KDB	>1 J	-

Samonagrzewanie

**BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA
BIOMASY W ENERGETYCE**

Warstwy w pryzmie biomasy (samonagrzewanie)

(podział umowny)

- Warstwa 1 – zewnętrzna, narażona na oddziaływanie atmosferyczne, największe wahania temperatury i wilgotności
- Warstwa 2 – warstwa pośrednia, o najmniejszej grubości, oddziałują na nią: a) nacisk warstwy 1 oraz wzrost ciśnienia w warstwie 3
- Warstwa 3 – Warstwa o najbardziej ograniczonej wymianie ciepła z otoczeniem, często nazywana warstwą izolowaną. W tej warstwie nieprzerwanie trwają procesy samonagrzewania

Samonagrzewanie biologiczne

- Dlaczego nie przenosi się mokrego siana?
- Grzyby, pleśń, bakterie mają sprzyjające warunki do rozwoju w głębi pryzmy biomasy.
- = spadek wartości opałowej biomasy
- = wydzielanie ciepła
- = zmiana koloru biomasy
- Przesypywanie / przegarnianie biomasy może obniżać temperaturę

Przebieg samonagrzewania (uproszczony)

- Rozkład związków organicznych (lignina, celuloza, hemiceluloza):



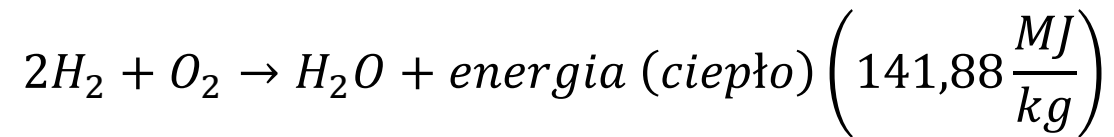
- Fermentacja metanowa:



- Drobnoustroje mezofilne (30-45°C)
- Drobnoustroje termofilne (do 85°C)
- Później – egzotermiczne reakcje chemiczne

Przebieg samonagrzewania (uproszczony)

- Drobnoustroje doprowadzają do powstawania tlenu i wodoru, który w chłodniejszych partiach przyzmy ponownie się wiążą z wydzieleniem energii:



- Uwolniona siarka reaguje z tlenem z wydzieleniem energii:



- Powyżej 100°C: odparowanie wody, powolny rozkład termiczny
- Powyżej 150°C: sucha destylacja drewna (gazy palne, tlen, ciepło, ciśnienie)
- Powyżej 170°C: zmiana koloru biomasy drzewnej (gazy palne, CO₂)

Przebieg samonagrzewania (uproszczony)

- Powyżej 250°C: czasowy zapłon gazów palnych (do czasu wyczerpania tlenu), tworzenie się węgla piroforycznego.
- Powyżej 150°C: sucha destylacja drewna (gazy palne, tlen, ciepło, ciśnienie)
- Pomędzy 200-350°C: procesy tlewne drewna. Wypalanie się kanałów ku górze, po osiągnięciu powierzchni, wobec dostępności tlenu: pożar płomieniowy
- Bezpieczny czas składowania można wyznaczyć dla danego materiału według procedury normowej PN-EN 15188:2021 Oznaczanie skłonności nagromadzeń **pyłu** do samozapalenia.

Pożar w miejscowości Sławoszewek (pow. koniński)

- Marzec 2022



Pożar w miejscowości Pożar (pow. myszkowski)

- Sierpień 2013



Pożar składowiska biomasy w miejscowości Sarbia (powiat czarnkowsko-trzcianecki)

- Czerwiec 2021
- Pożar podczas przegarniania
- Spalona została koparko-ładowarka
- Hałda zrębki



R Plevin Recycling, Yorkshire, WB

- Kwiecień 2014
- Pożar składowiska biomasy, odpady drzewne oczyszczane przed przekazaniem do spalania w elektrowni pod Sheffield
- Pożar trwał 13 dni
- Udział 45 strażaków
- Koszt akcji: £500 000



R Plevin Recycling, Yorkshire, WB



- W 2020 roku zakończył się proces sądowy
- Firmie nakazano pokrycie kosztów utylizacji (w czasie pożaru wody gaśnicze doprowadziły do zamknięcia oczyszczalni) i części działań gaśniczych: £230 000
- Powód: nieprawidłowości względem przepisów środowiskowych

Port of Tyne, South Shields, WB

- Pożar pelletu drzewnego w przenośniku
- Październik 2013



Składowanie i transport biomasy

**BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA
BIOMASY W ENERGETYCE**

Plac składowy biomasy

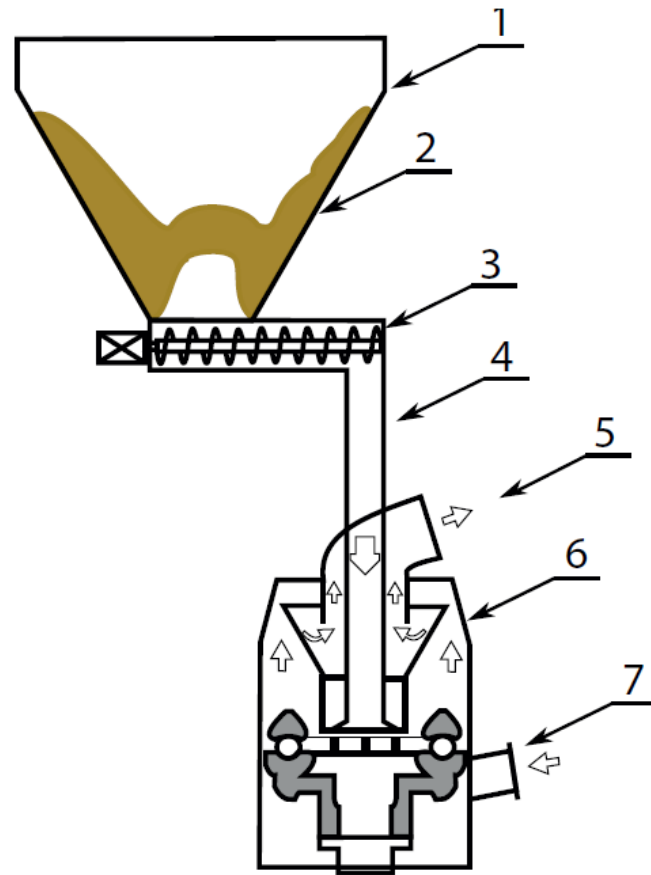
**MATERIAŁ USUNIĘTY
Z PREZENTACJI
ROZPOWSZECHNIANEJ WŚRÓD
UCZESTNIKÓW KONFERENCJI**

Przesypywanie / transport do kotła

- Tłąca się biomasa ma większą tendencję do zbrylania się
- Błędem jest kierowanie jej na galerię nawęglania w przypadku wykrycia gazów tlewnych
- Problemy detekcji gazów tlewnych w galerii nawęglania
- Pożar pelletu w EC Siekierki (kwiecień 2020), następnie pożar przenośnika

Powstawanie nawisów

Zjawisko dotyczy zarówno biomasy jak i „młodych” węgli!



- 1) zasobnik przykottowy,
- 2) powstały nawis,
- 3) podajnik ślimakowy,
- 4) przesyp grawitacyjny,
- 5) wylot przygotowanego paliwa do paleniska,
- 6) młyn,
- 7) wlot gorącego powietrza.

Przykład pomiarów biomasy na placu składowym

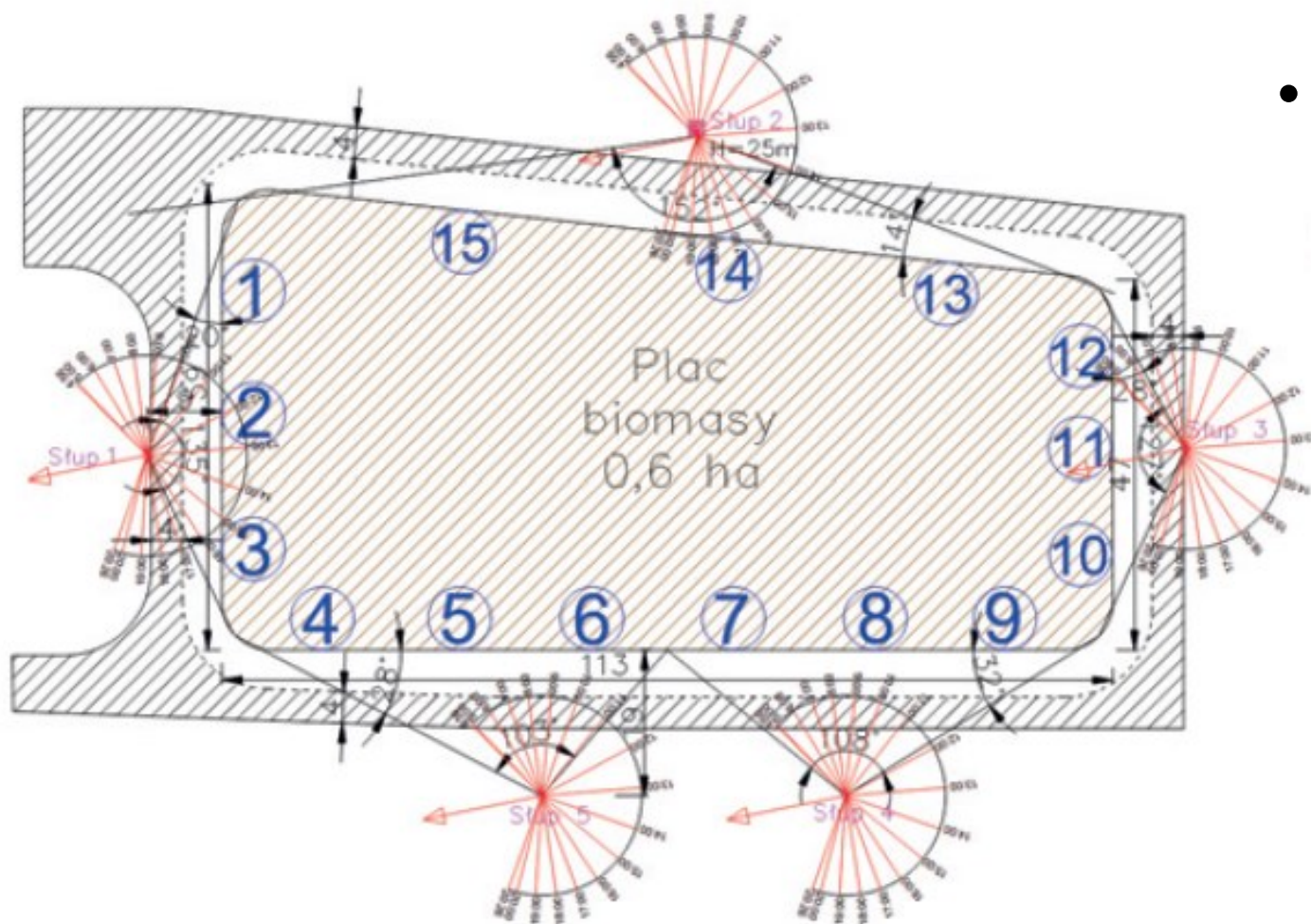
Założenia:

- Plac objęty jest systemem monitoringu temperatury (kamery IR)
- Algorytm dokonuje zmiany pozycji kamer i rejestruje maksymalną temperaturę w danym kadrze.

Przykładowe warunki składowania

- Plac składowy o powierzchni 6000 m²
- Maksymalna wysokość składowania: 8 m
- Często wykorzystywany rodzaj biomasy to biomasa leśna

Koncepcja systemu monitoringu

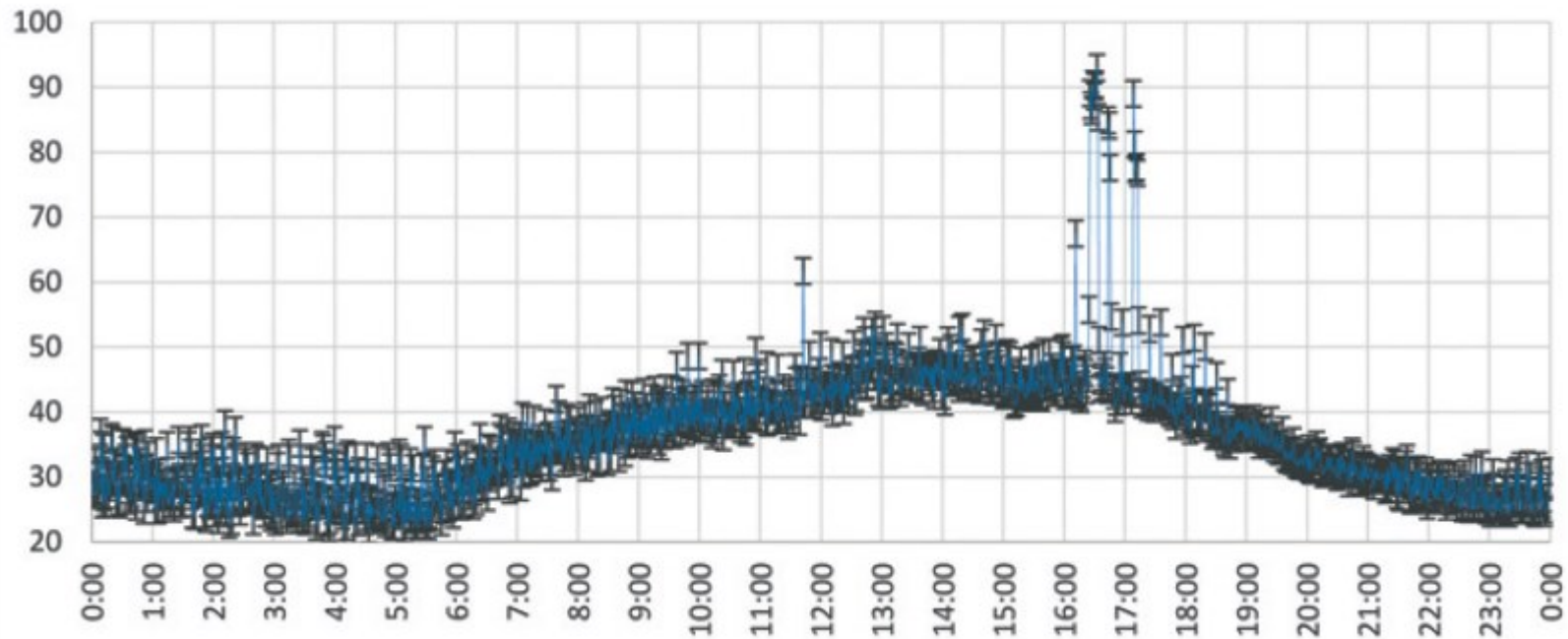


• Założenia:

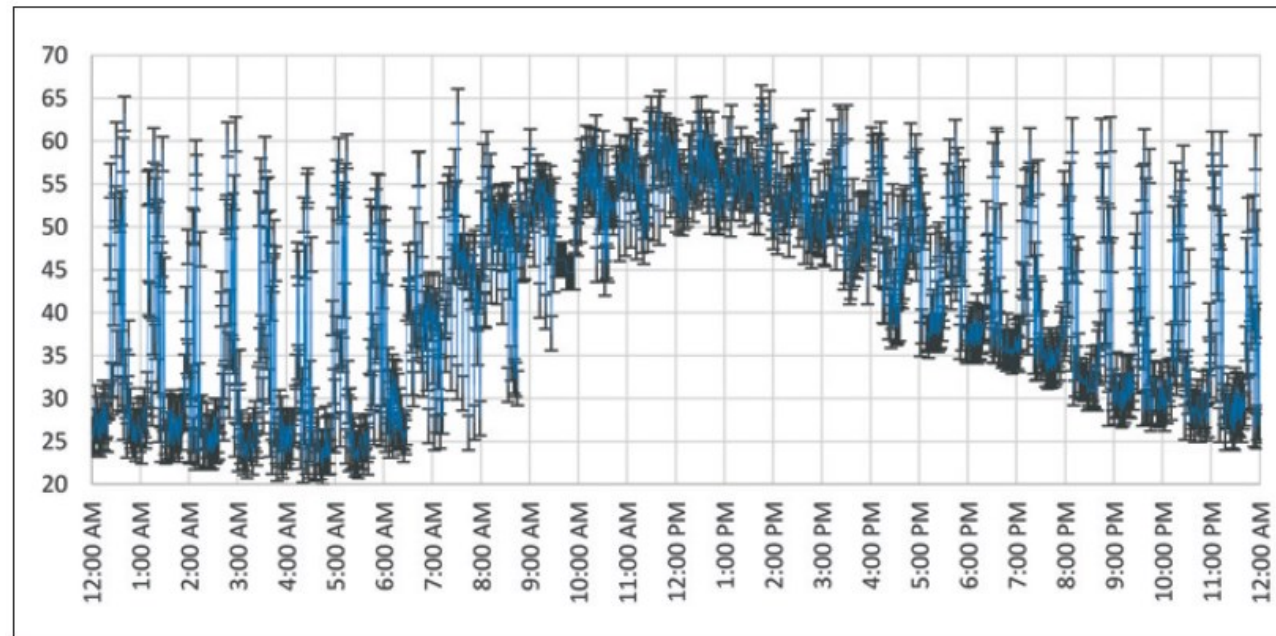
- Gęstość nasypowa: 600 kg/m^3
- Dla średniej wysokości pryzmy równej 5 m:
 - $V = 6000 \text{ m}^2 \cdot 5 \text{ m} \cdot 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 18\,000 \text{ t}$
 - Wartość opałow: 12 kJ/kg
 - Energia (ciepło) do uzyskania: 216 GJ

Średnie zużycie energii (na 1 odbiorcę)

- W województwie śląskim, w 2021 roku, średnio na 1 odbiorcę roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wyniosło ok. 850 kWh (3,06 GJ)
- 216 GJ (z poprzedniego slajdu) wystarczyłoby na zasilenie >70 odbiorców przez rok
- Obliczenia uproszczone – zakładają uzyskanie 100% energii zawartej w paliwie



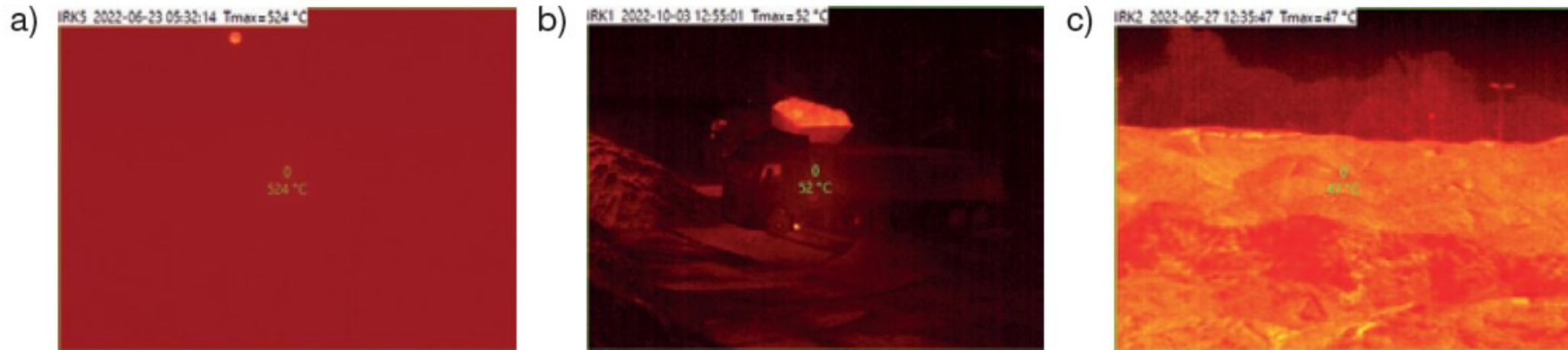
Przykłady
rejestrowanych
temperatur
(dane poddane
filtracji)



Dlaczego potrzebna była filtracja?

**MATERIAŁ USUNIĘTY
Z PREZENTACJI
ROZPOWSZECHNIANEJ WŚRÓD
UCZESTNIKÓW KONFERENCJI**

Co „widzi” kamera?



Rys. 2. Przykładowe zrzuty ekranu z systemu monitoringu termowizyjnego

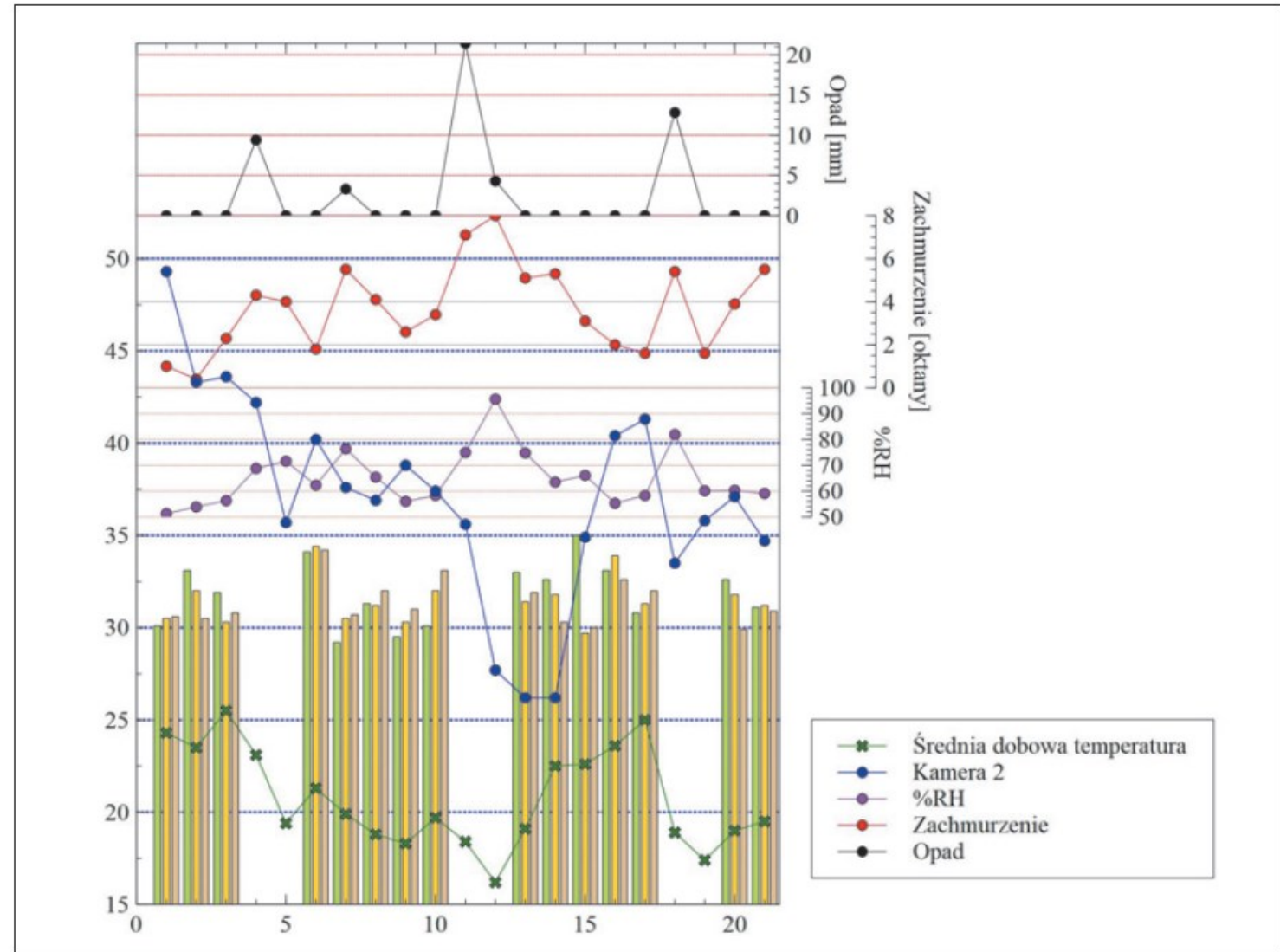
- a) oddziaływanie Słońca na obiektyw kamery, b) kadr zarejestrowany podczas przesypywania biomasy ($T_{max} = 52^{\circ}\text{C}$),
c) wynik monitorowania temperatury składowiska ($T_{max} = 47^{\circ}\text{C}$)

Czy system monitoringu powierzchniowego jest skuteczny?

- Mierzona jest temperatura powierzchni biomasy
- Składowisko ma wysokość kilku metrów
- Pomiar głębokiej temperatury porównanie
- Jak działają procesy samonagrzewania?
- Czy rozpoczynające się procesy tlenne będą zarejestrowane?
- Czy istnieje potencjał rozwoju systemu?

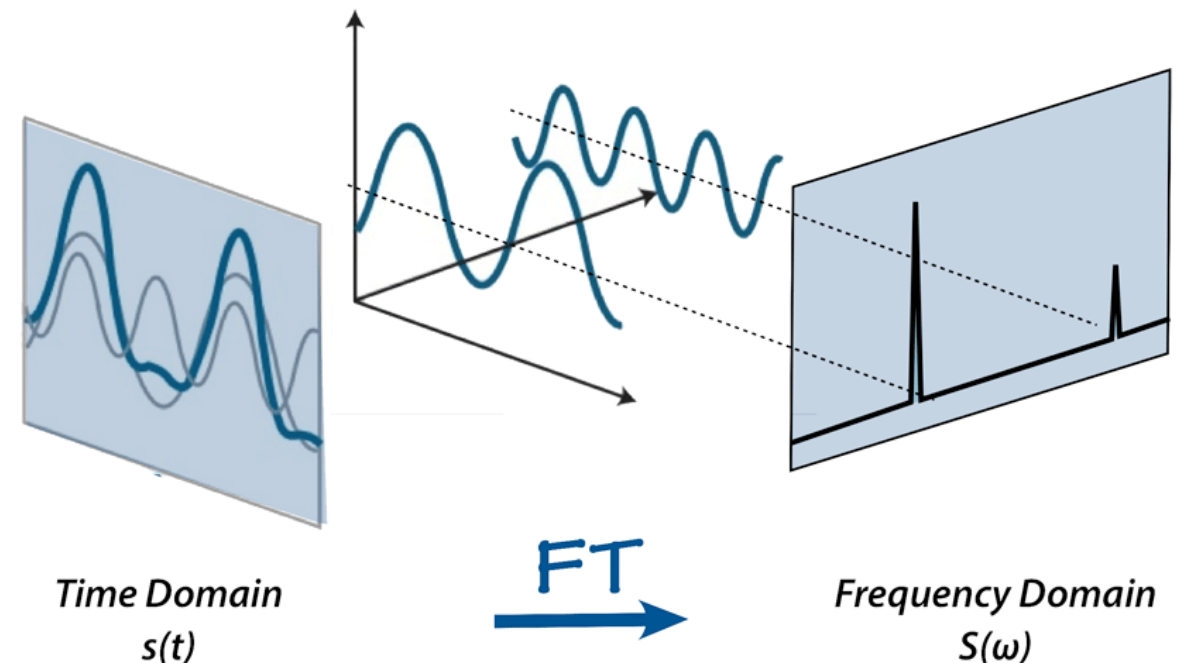
Pomiary

- Równoległe do pracy kamer prowadzono pomiary przez 15 dni roboczych (20 lipca – 9 sierpnia 2022)
- Związek opadów z temperaturą biomasy?
- Związek temperatury otoczenia na temp. biomasy?

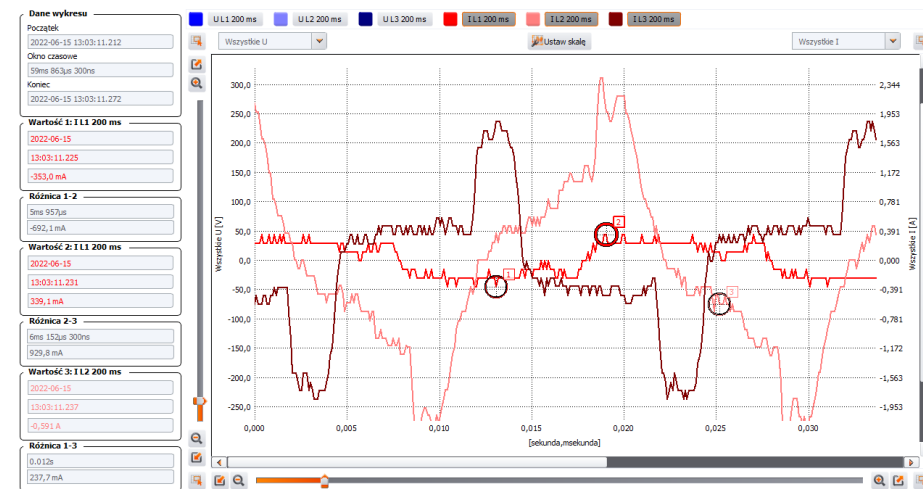
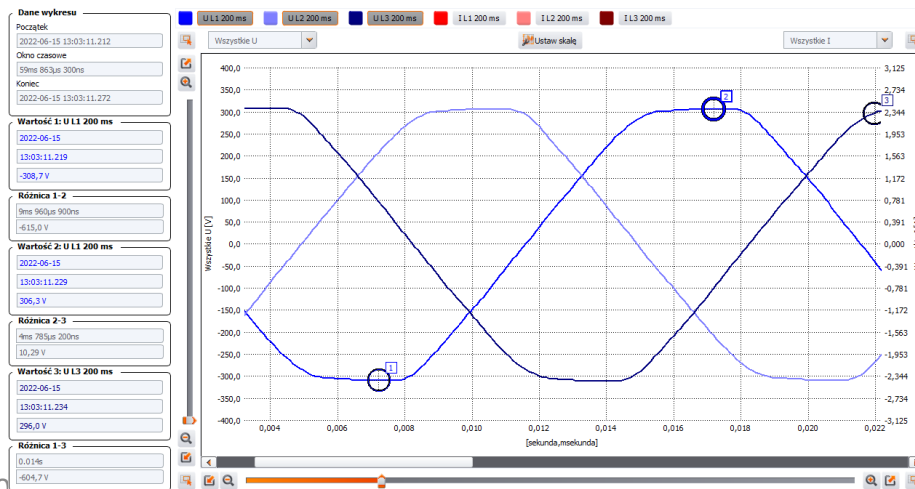
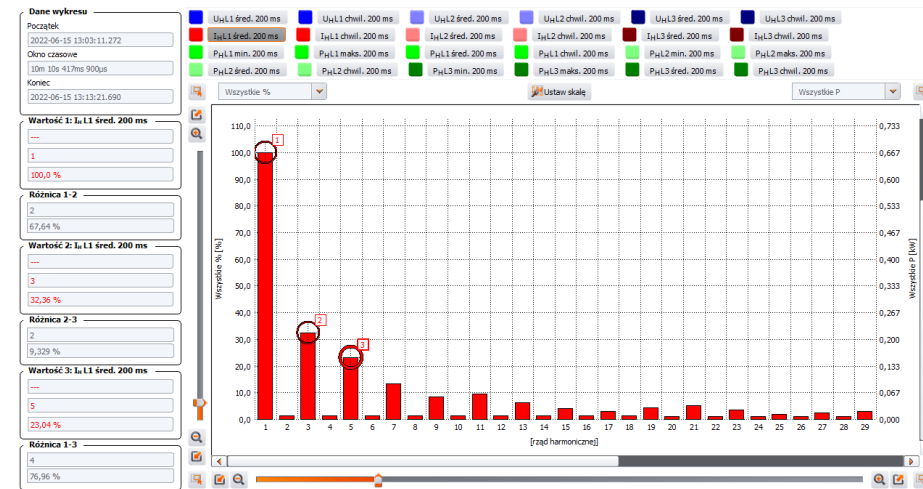
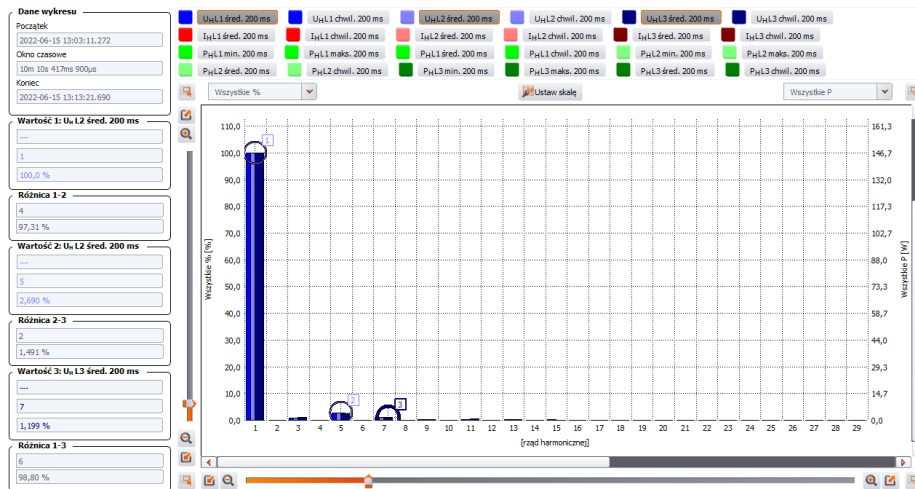


Analiza FFT

- Czym jest transformacja Fouriera?
- Wynik pozwala określić składową stałą sygnału
- Wynik pozwala określić amplitudy poszczególnych składowych harmonicznym sygnału
- Zastosowanie w energetyce?



Wyższe harmoniczne, wsp. THD - przykład



Jakość energii elektrycznej

Harmoniczne nieparzyste nie będące krotnością 3		Harmoniczne nieparzyste będące krotnością 3		Harmoniczne parzyste	
rzęd h	wartość względna napięcia harmonicznej U_h [%]	rzęd h	wartość względna napięcia harmonicznej U_h [%]	rzęd h	wartość względna harmonicznej U_h [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Nie podano wartości harmoniczných o rzędach większych niż 25., ponieważ są one zwykle małe i w dużym stopniu niemożliwe do przewidzenia ze względu na efekty rezonansowe.

- Dz.U. 2023 poz. 819 Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego
- PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych

Nałożenie danych meteo na wyniki pomiarów temperatury biomasy

- Najbardziej oczywiste wnioski:
 - Ruch kamery
 - Trend dobowy
 - Trend 12-godzinny – dzień / noc
- Jakie korzyści może przynieść analiza długofalowa? Jak to wpływa na wykrywanie pożaru?

Częstotliwość, Hz	Okres, min	Okres, h	Wartość amplitudy, °C	Wartość względna amplitudy
0	∞	∞	36,9	1
0,00037	45	0,75	18,9	0,51
0,0000231	720	12	2,36	0,064
0,0000116	1440	24	7,36	0,20

Podsumowanie

- Biomasę cechuje zdecydowanie odmienny od węgla skład pierwiastkowy, co przekłada się na wartości parametrów palności i wybuchowości
- Część parametrów decyduje o zwiększeniu zagrożenia pożarem / wybuchem.
- Istnieje ryzyko powstania nawisu (zbrylania się) biomasy w zasobnikach, przez co powietrze z młyna może cofnąć się do zasobnika, wytworzyć atmosferę wybuchową.
- „Młode” węgle importowane w ostatnich latach do Polski mają wiele cech wspólnych z biomasą (wpływ na proces spalania, zagrożenia)

Materiały audio/wideo

BEZPIECZEŃSTWO SPALANIA BIOMASY W ENERGETYCE

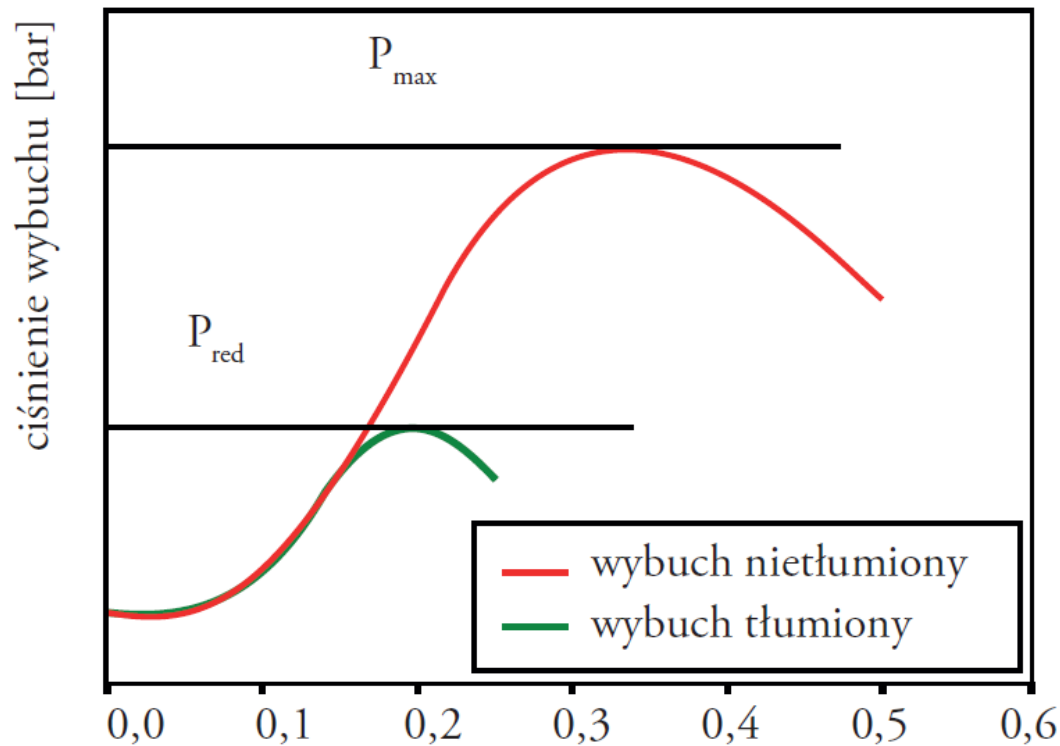
Pył węglowy – wybuch z odciążaniem

**MATERIAŁ USUNIĘTY
Z PREZENTACJI
ROZPOWSZECHNIANEJ WŚRÓD
UCZESTNIKÓW KONFERENCJI**

Pył drzewny – wybuch z tłumieniem

**MATERIAŁ USUNIĘTY
Z PREZENTACJI
ROZPOWSZECHNIANEJ WŚRÓD
UCZESTNIKÓW KONFERENCJI**

Zredukowane ciśnienie wybuchu



- Jakie wartości ciśnień widoczne były na filmach?
- Jakie wartości p_{max} uzyskano w warunkach badania dla biomasy / węgla?

Dziękuję za uwagę