

## ROZPRAWA DOKTORSKA

### **Badania procesu spalania i współspalania paliw biomasowych oraz paliw alternatywnych w warstwie fluidalnej w różnych warunkach procesowych**

*Research on the combustion process and co-combustion  
of biomass fuels and alternative fuels in a fluidized bed  
in different process conditions*

mgr inż. Konrad Kaczyński

Promotor pracy: dr hab. inż. Piotr Pełka, prof. PCz

Częstochowa, 2023

### *Podziękowania*

*Prezentowana rozprawa doktorska przygotowana została pod opieką promotorską Pana dr. hab. inż. Piotra Pełki, prof. PCz, któremu dziękuję za okazaną pomoc, cenne uwagi i sugestie, które wpłynęły na ostateczny kształt tej pracy, jak również za zaangażowanie i życzliwość okazane mi podczas kilkuletniej opieki naukowej w trakcie studiów inżynierskich, magisterskich i doktoranckich.*

*Pragnę podziękować też wszystkim pracownikom oraz doktorantom Katedry Maszyn Ciepłych za życzliwość oraz wszelką pomoc.*

*Dziękuję mojej Żonie za ciągłe motywowanie mnie i wsparcie.*

# 1 SPIS TREŚCI

---

Wykaz skrótów	5
2 Wprowadzenie	7
2.1 Globalne trendy energetyczne	7
2.1.1 Energia z biomasy	10
2.1.2 Energia z odpadów	11
3 Przegląd literatury	14
3.1 Odzysk energii z odpadów	14
3.1.1 Terminologia	14
3.1.2 Normalizacja paliw alternatywnych - SRF	16
3.1.3 Klasyfikacja paliwa alternatywnego według CEMBUREAU	18
3.2 Charakterystyka biomasy	18
3.2.1 Zastosowanie biomasy	22
3.3 Charakterystyka paliw alternatywnych	23
3.3.1 Zastosowanie paliw alternatywnych	28
3.3.2 Modyfikowane paliwa alternatywne	29
3.4 Aspekty techniczne, środowiskowe i gospodarcze spalania oraz współspalania biomasy i paliw alternatywnych	31
3.5 Technologia fluidalnego spalania	33
4 Tezy pracy	40
5 Cel i zakres pracy	42
6 Badania wstępne	43
6.1 Metodyka badań	43
6.2 Materiał badawczy	45
6.2.1 Analiza techniczna i elementarna paliw biomasowych	48
6.2.2 Analiza techniczna i elementarna paliw RDF	50
7 Badania eksperymentalne procesu spalania paliw biomasowych oraz paliw RDF w warstwie fluidalnej w różnych warunkach procesowych	52
7.1 Metodyka badawcza	52
7.1.1 Stanowisko eksperymentalne	53
7.1.2 Opracowanie wyników badań	62
7.2 Wyniki badań spalania wybranych paliw biomasowych	69
7.2.1 Analiza popiołu badanych paliw biomasowych	91

7.3	Wyniki badań spalania peletów RDF	92
7.4	Porównanie procesu spalania paliw biomasowych oraz RDF	106
7.5	Badania eksperymentalne spalania mieszanego paliwa wtórnego wytwarzanego z paliwa biomasowego oraz RDF	114
7.5.1	Metodyka badawcza	115
7.5.2	Wyniki badań eksperymentalnych	117
8	Porównanie procesu spalania biomasy i RDF z procesem spalania węgla brunatnego i kamiennego	121
9	Wnioski końcowe	137
	Wykaz tabel	139
	Wykaz ilustracji	140
	Literatura	147
	Summary	162
	Streszczenie	165

## WYKAZ SKRÓTÓW

---

ASTM - American Society for Testing and Materials (Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów)

ASU - Air Separation Unit (jednostka separacji powietrza)

BFB - Bubbling Fluidized Bed (pęcherzowa warstwa fluidalna)

BRAM - Brennstoff aus Müll (paliwo z odpadów)

C&I - Commercial and Industrial Waste (odpady handlowe i przemysłowe)

CCS - Carbon Capture and Storage (technologia wychwytywania i składowania dwutlenku węgla)

CDR - Combustibili Derivato di Rifiutti (paliwo pochodzące z odpadów)

CDW - Construction and Demolition Waste (odpady budowlane i rozbiórkowe)

CEMBUREAU - The European Cement Association (Europejskie Stowarzyszenie Producentów Cementu)

CEN - Comité Européen De Normalisation (Europejski Komitet Normalizacyjny)

CFB - Circulating Fluidized Bed (cyrkulacyjna warstwa fluidalna)

Covid-19 - Coronavirus Disease 2019 (choroba zakaźna układu oddechowego wywołana zakażeniem wirusem SARS-CoV-2 (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2))

CSS - Combustibili Solido Secondario (wtórne paliwo stałe)

CTR - Coal Gasification Tar Residue (pozostałość smoły węglowej po zgazowaniu)

Dz.U. - Dziennik Ustaw

EBS - Ersatzbrennstoffe (paliwo zastępcze)

EN – Europäische Norm (norma europejska)

GOZ – Gospodarka Obiegu Zamkniętego

LDPE - Low-Density Polyethylene (polietylen o małej gęstości)

MBT - The Mechanical-Biological Treatment (mechaniczno-biologiczna przeróbka odpadów)

MC - Moisture Content (zawartość wilgoci)

MSW –Municipal Solid Waste (komunalne odpady stałe)

NCV - Net Calorific Value (wartość opałowa)

NIR - Near InfraRed (technologie bliskiej podczerwieni)

ONZ - Organizacja Narodów Zjednoczonych

PA - Polyamide (poliamid)

PAKOM – Paliwo Komunalne

PCDD/F - Polichlorinated Dibenzo-P-Dioxins and Dibenzofurans (polichlorowane dibenzo-p-dioksyny i dibenzofurany)

PE – Polyethylene (polietylen)

PET - Poly(Ethylene Terephthalate) (poli(tereftalan etylenu, poliester)

PF - Pulverised Fuel (spalanie pyłowe)

PKB - Produkt Krajowy Brutto

PN-EN - Polska Norma Wprowadzająca Normę Europejską

PTE - Potentially Toxic Elements (PTP - Potencjalnie Toksyczne Pierwiastki)

PVC - Poly(Vinyl Chloride) (poli(chlorek winylu)

RDF - Refuse Derived Fuel (paliwa z odpadów)

RFG - Recirculated Flue Gas (recyrkulacja spalin)

SBS - Sekundärbrennstoffe (paliwo wtórne)

SCR - Selective Catalytic Reduction (selektywna redukcja katalityczna)

SRF - Solid Recovered Fuels (stałe paliwo wtórne)

UE - Unia Europejska

WWA - Wielopierścieniowe Węglowodory Aromatyczne

## 2 WPROWADZENIE

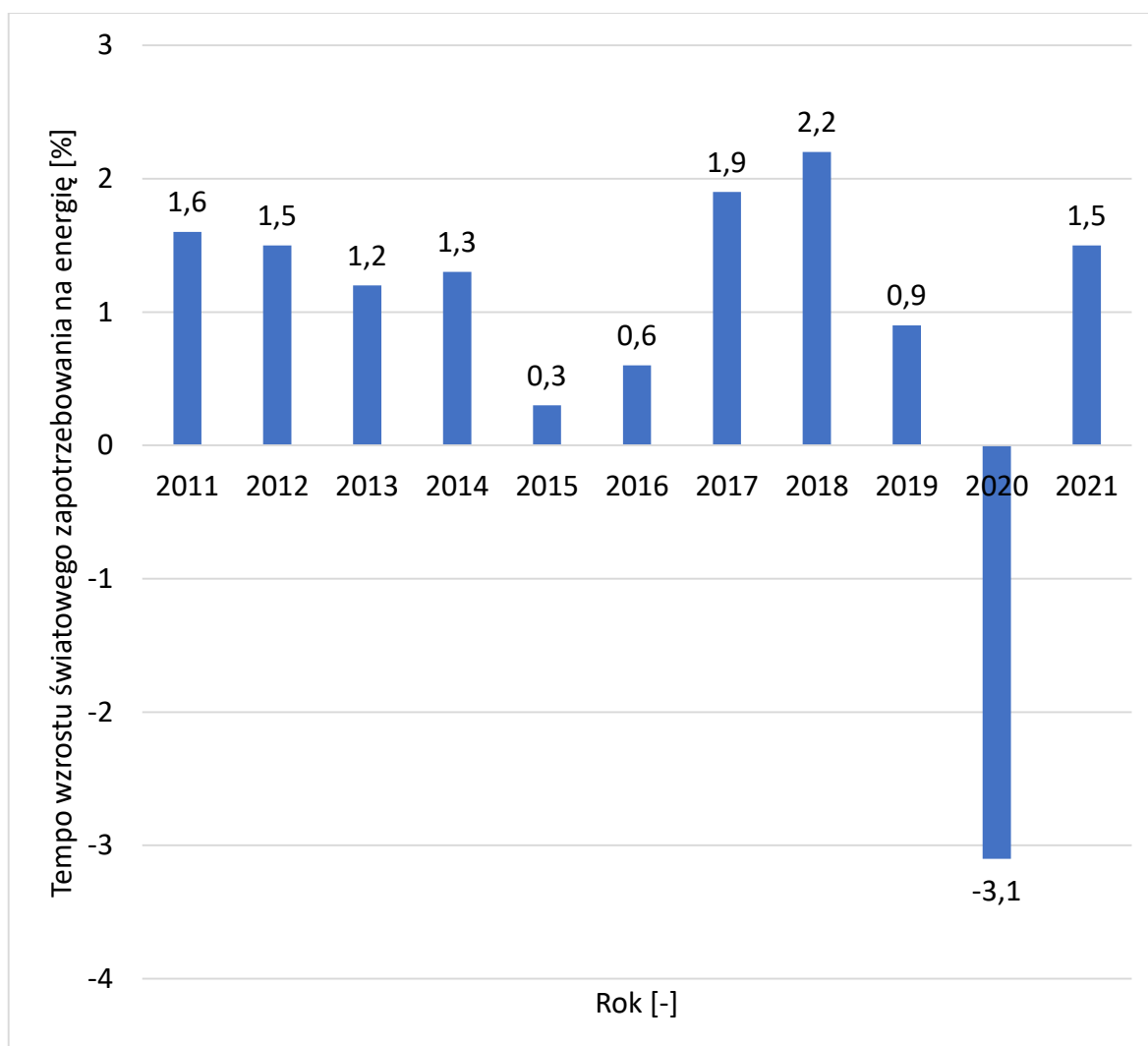
---

Ze względu na wciąż rosnącą populację ludności, która w 2022 r. (8 mld) podwoiła się w porównaniu z 1974 r. oraz przewidywanym jej dalszym wzrostem do 9 mld w 2042 r. [1] nieuniknione jest zwiększenie zapotrzebowania na energię, niezbędną do podtrzymania rozwoju społecznego i gospodarczego świata. W miarę rozwoju społeczeństw obserwuje się również rosnący konsumpcjonizm, który przyczynia się do zwiększania ilości odpadów przemysłowych i komunalnych. Kluczowym rozwiązaniem w celu pokrycia narastających potrzeb energetycznych przy jednoczesnym oszczędzaniu wyczerpujących się złóż paliw pierwotnych, łagodzeniu problemów związanych ze zmianami klimatu oraz rosnącym zanieczyszczeniem środowiska jest zwiększenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych oraz wykorzystanie potencjału energetycznego materiałów odpadowych.

### 2.1 GLOBALNE TRENDY ENERGETYCZNE

Według raportu [2] globalne zapotrzebowanie na energię w 2019 roku wzrosło o 0,9% w porównaniu z rokiem 2018. Zanotowany wzrost stanowił blisko 40% tempa wzrostu obserwowanego w roku 2018 r. - rys. 1, gdzie tempo wzrostu było niemal dwukrotnie szybsze niż średnie tempo wzrostu od 2010 r. i wynosiło 2,3% [3]. Przyczyn spowolnienia upatrywano w wolniejszym wzroście gospodarczym (globalny wzrost PKB spadł z 3,6% w 2018 r. do 2,9% w 2019 r.) oraz warunkach pogodowych, znacząco łagodniejsza zima i lato w niektórych częściach świata (USA i Chiny), niż w roku 2018.

Ze względu na pandemię Covid-19, w pierwszym kwartale 2020 r. nastąpiło nieoczekiwane i drastyczne ograniczenie globalnej aktywności gospodarczej i mobilności. Globalne zapotrzebowanie na energię w 2020 r. spadło o 4%, co stanowiło największy spadek od II wojny światowej i największy bezwzględny spadek w historii [4]. Dane z pierwszego kwartału oraz prognozy na 2021 r. wskazywały, że wraz ze zniesieniem ograniczeń Covid-19 i ożywieniem gospodarek popyt na energię wzrośnie o 4,6%, zwiększając globalne zużycie energii w 2021 r. o 0,5% powyżej poziomów sprzed Covid-19 [5].

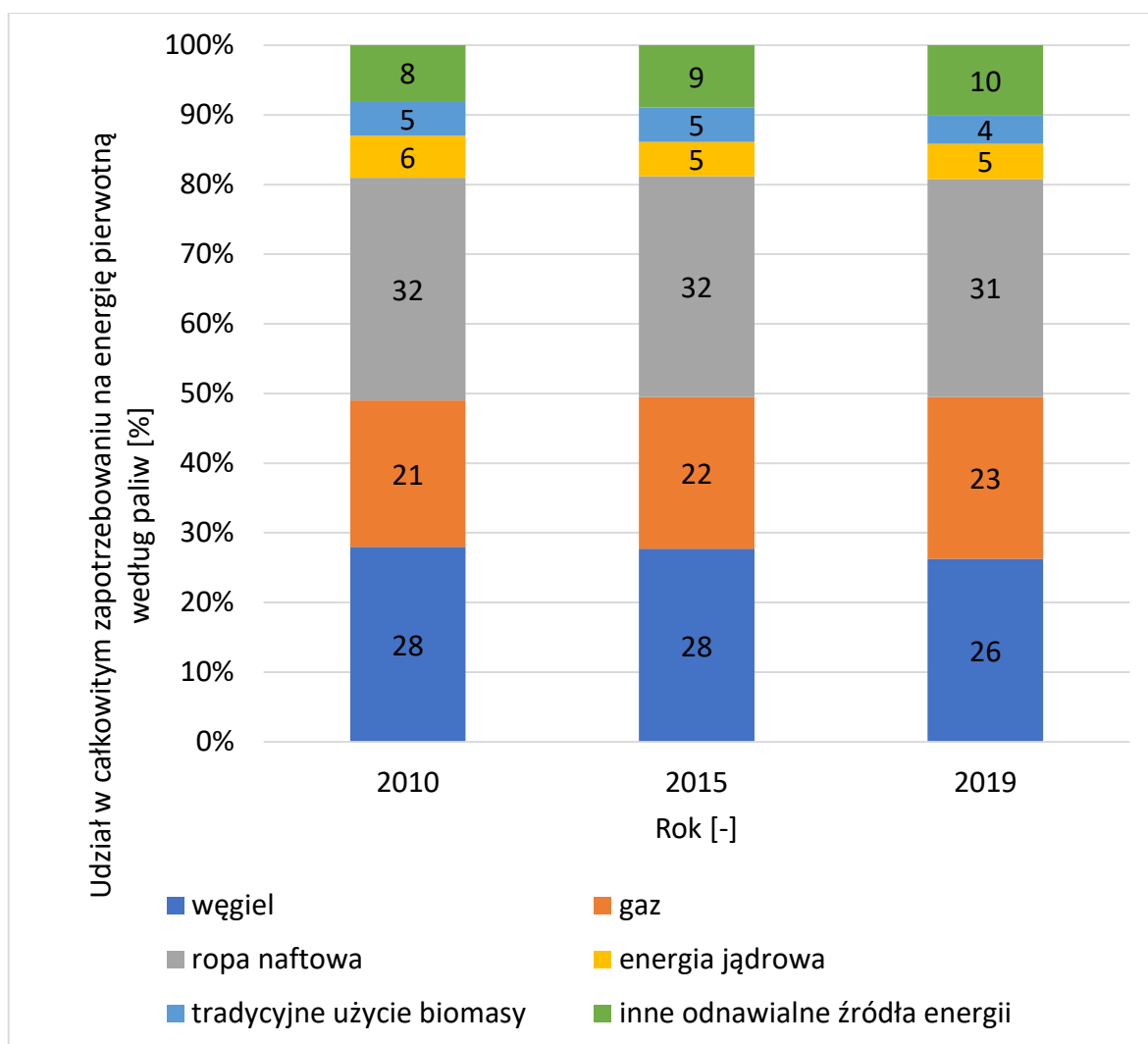


Rys. 1. Tempo wzrostu światowego zapotrzebowania na energię w latach 2011-2021 [2,4,5]

Nadal zdecydowanie największa część energii dostarczana jest z paliw kopalnych (ok. 80% [2,6]) – rys. 2. W porównaniu z rokiem 2018, w 2019 popyt na węgiel spadł o 1,7%, ponieważ produkcja energii elektrycznej w elektrowniach węglowych odnotowała największy spadek w historii, jednakże w przypadku innych źródeł energii niewiele się zmieniło. Zarówno odnawialne źródła energii jak i gaz ziemny zyskały udział w rynku, przy czym udział odnawialnych źródeł energii wyniósł 14%.

Spadek popytu na energię w 2020 roku wywołany pandemią Covid-19 nie dotknął jednakowo wszystkich paliw. Ze względu na ograniczenia w mobilności, popyt na ropę spadł o prawie 9%. Zapotrzebowanie na węgiel spadło o 4% a na gaz o 2%. Źródła odnawialne okazały się w dużej mierze odporne na pandemię. Zużycie energii ze źródeł odnawialnych wzrosło o 3% w 2020 r., głównie ze względu na wzrost produkcji energii elektrycznej z fotowoltaiki i wiatru o 330 TWh [4,5].





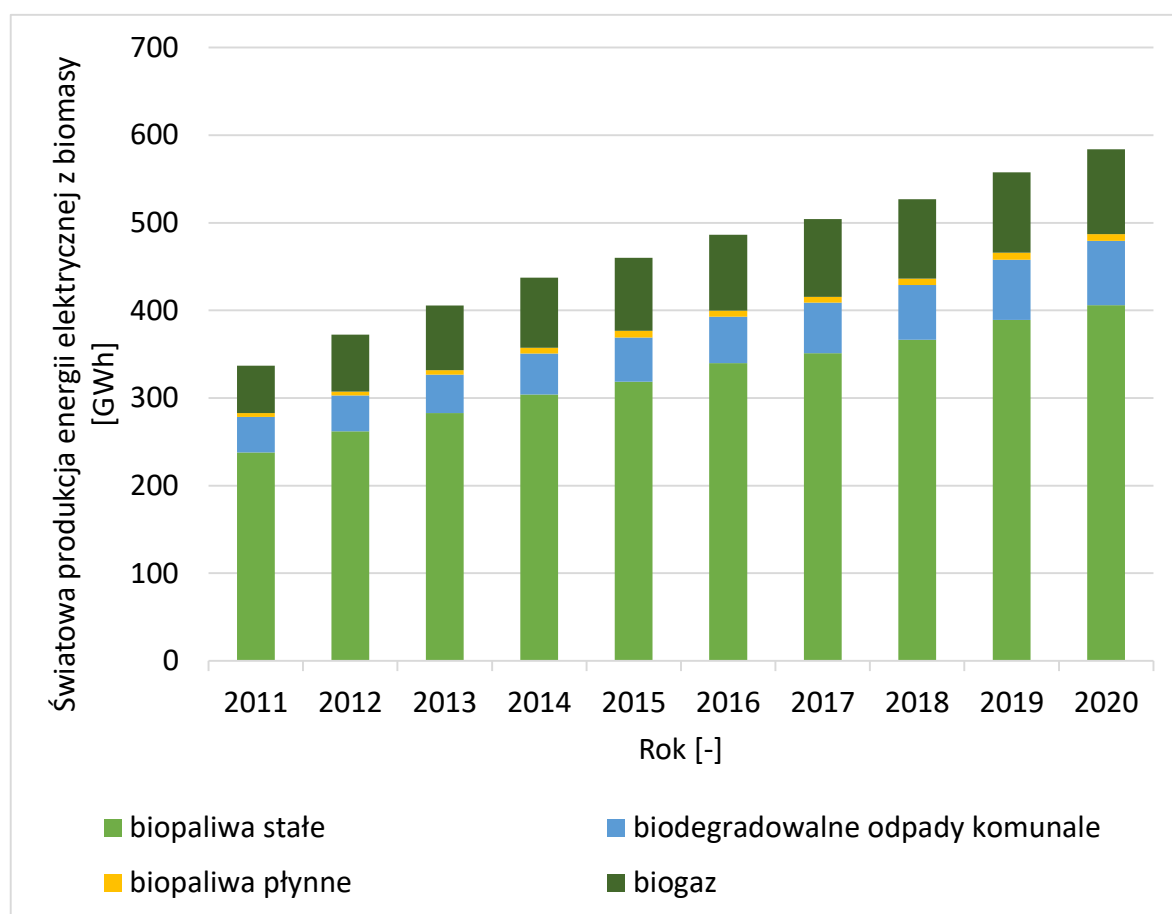
Rys. 2. Udział w całkowitym zapotrzebowaniu na energię pierwotną według paliw, 2010- 2019 [2]

Rynki i polityka energetyczna uległy zmianie w wyniku rosyjskiej inwazji na Ukrainę w roku 2022. Wzrost cen energii na rynku był obserwowany przed rosyjską inwazją na Ukrainę, od drugiej połowy 2021 roku, ale działania Rosji spowodowały dodatkowy wzrost cen paliw i wzbudziły obawy o bezpieczeństwo podaży energii. Sytuację dodatkowo pogorszyła decyzja Rosji o zawieszeniu dostaw gazu do niektórych państw członkowskich Unii Europejskiej (UE). Obecnie świat znajduje się w trakcie pierwszego globalnego kryzysu energetycznego. Ostatnie wydarzenia uwypukliły koszty, jakie ponosi światowa gospodarka, w związku ze scentralizowanym systemem energetycznym, w dużym stopniu uzależnionym od paliw kopalnych. Nieunikniona staje się zatem globalna transformacja systemu energetycznego. Dzisiejsze wysokie ceny energii podkreślają korzyści płynące z większej efektywności energetycznej, a trwałe rozwiązania obecnego kryzysu polegają na zmniejszeniu zapotrzebowania na paliwa kopalne poprzez większe

wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, których znaczenie w transformacji świata zostało już wielokrotnie podkreślone m.in. poprzez Porozumienie Paryskie z 2015 r. [7], stanowiące pierwsze na świecie porozumienie, wiążący traktat, którego celem jest ograniczenie zmian klimatu oraz cele ONZ w zakresie zrównoważonego rozwoju energii, cel 7: „Affordable and clean energy” oraz cel 13: „Climate action”. Obok odnawialnych źródeł energii pojawia się możliwość wdrożenia w światowym sektorze energetycznym na wielokrotnie większą skalę innych paliw alternatywnych jak paliwa z odpadów.

### 2.1.1 Energia z biomasy

Ze względu na szeroką dostępność biomasy na całym świecie, jej wykorzystanie do produkcji energii elektrycznej systematycznie rośnie – rys. 3 [9].



Rys. 3. Światowa produkcja energii elektrycznej z biomasy w latach 2011-2020 [9]

Biomasa jest określana jako paliwo neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla, ponieważ nie ma dodatku netto dwutlenku węgla w atmosferze w przeciwieństwie do paliw kopalnych [10]. Dotychczas na cele energetyczne wykorzystywana była głównie biomasa pochodzenia leśnego (pozostałości po wycince i obróbce drewna do 27% masy

drewna) [11,12]. Jednakże wraz z rosnącym popytem rozwinął się rynek biomasy nieдрzewnej – pochodzącej m.in. z upraw rolniczych, plantacji roślin energetycznych a także odpadów z produkcji żywności. W energetyce najczęściej stosowana jest biomasa przetworzona: w postaci zrębków, trocin, peletów i brykietów. Pozwala to na wyeliminowanie niektórych wad surowca m.in. niską gęstość nasypową i wynikającą z tego niską gęstość objętościową energii i niejednorodną strukturę paliw pierwotnych.

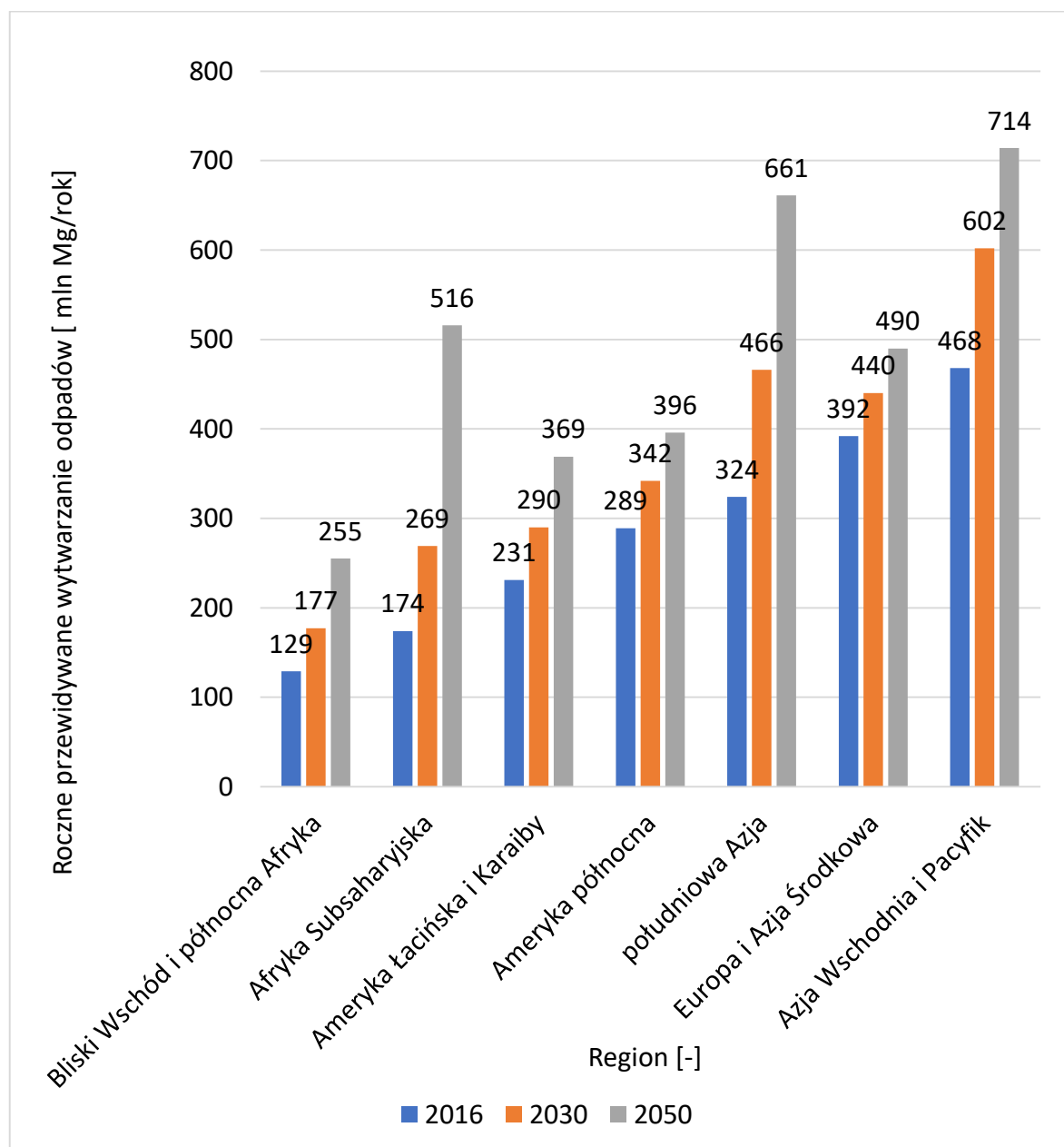
### 2.1.2 Energia z odpadów

Odzysk energii z komunalnych zasobów stałych został uznany w najnowszej strategii Unii Europejskiej [13]. Można wskazać istotny z punktu widzenia kształtowania gospodarki odpadami Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europy, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów „Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program zero odpadów dla Europy” z dnia 2.12.2015 r. [14], przewidujący od 2025 r. zakaz składowania odpadów nadających się do recyklingu, a także od 2050 r. całkowity zakaz składowania odpadów. Planowane działania pokazują nowe trendy, kładące nacisk na zapobieganie powstawaniu odpadów oraz ich ciągłe przetwarzanie, zarówno poprzez odzysk materiałowy jak i energetyczny.

Różne społeczeństwa borykały się z problemem gospodarki odpadami od dawna. Utylizacja odpadów stała się wyzwaniem już po rewolucji agrarnej i przejściu na osiadły tryb życia. Początkowo jednak produkowane odpady miały głównie charakter organiczny, szybko ulegały rozkładowi wpisując się w cykl przyrody. Pomimo niedogodności składowania ich w bezpośrednim otoczeniu człowieka nie stanowiły one znaczącego zagrożenia dla stabilności ekologicznej. Wszystko zmieniło się wraz z nastaniem rewolucji przemysłowej w XIX wieku. Gwałtowny rozwój, zwiększona produkcja oraz postęp technologiczny zaczęły generować coraz więcej problematycznych, szkodliwych odpadów. Odpady będące ubocznymi produktami procesów wytwarzania tzw. odpady poprodukcyjne, są generowane często w dużych ilościach przez większość branż i przedsiębiorstw. Obok odpadów poprodukcyjnych równie ważnym problemem są odpady komunalne. Powstają one w gospodarstwach domowych i miejscach pracy. Są nieoderwalną częścią wielu usług, takich jak gastronomia czy transport.

Według raportu [15] świat generuje rocznie 2,01 mld ton stałych odpadów komunalnych, z czego co najmniej 33% nie jest zagospodarowywane w sposób bezpieczny dla środowiska. Na całym świecie ilość odpadów wytwarzanych na osobę dziennie wynosi

średnio 0,74 kg, ale waha się w bardzo szerokim zakresie, od 0,11 do 4,54 kg. Kraje wysokorozwinięte, choć stanowią zaledwie 16% światowej populacji, wytwarzają blisko 34%, czyli 683 mln ton rocznie, światowych odpadów. Według prognoz globalna produkcja odpadów w 2050 r. wzrośnie do 3,40 mld ton. W tym samym okresie czasu przewiduje się wzrost liczby ludności przekraczającej 9 mld [1], co wskazuje na istnienie korelacji między wytwarzaniem odpadów a rozwojem społeczeństw. Rys. 4 przedstawia prognozowane wytwarzanie odpadów na świecie według regionów [15].



Rys. 4. Prognozowane wytwarzanie odpadów na świecie [15]

W krajach wysokorozwiniętych wytwarzanie odpadów wzrośnie o 19% w 2050 roku. Natomiast w krajach średnio i słabo rozwiniętych przewidywany wzrost wytwarzania odpadów wynosi 40%.

Wykorzystanie paliw alternatywnych staje się obecnie jednym z najważniejszych celów służących rozwiązaniu problemów związanym z bezpieczeństwem energetycznym oraz szeroko rozumianą gospodarką odpadami [16].

## 3 PRZEGLĄD LITERATURY

---

### 3.1 ODZYSK ENERGII Z ODPADÓW

Zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju oraz prawodawstwem unijnym [14,17] działania człowieka powinny być ukierunkowane na zapobieganie i minimalizację ilości wytwarzanych odpadów, a także konwersję wytworzonych odpadów do postaci najmniej uciążliwej dla środowiska naturalnego. Zgodnie z tą ideą znaczna część odpadów zawierająca organiczne substancje palne może być przekształcana termicznie w celu odzysku energii z użyciem odpowiednich instalacji przemysłowych, ograniczających wpływ produktów spalania na środowisko naturalne.

Należy jednocześnie pamiętać, że zastosowanie tego typu paliwa (zamiennika paliw naturalnych, tj. węgla, oleju czy gazu ziemnego) w procesie spalania i współspalania z innymi paliwami wymaga często odpowiedniej obróbki odpadów, aby posiadały jednorodny skład o określonych właściwościach fizykochemicznych. W ten sposób wyselekcjonowane odpady komunalne oraz wybrane odpady przemysłowe przerabiane są na paliwo alternatywne.

#### 3.1.1 Terminologia

MSW (Municipal Solid Waste) oznaczają niepodlegające recyklingowi frakcje komunalnych odpadów stałych [16].

Paliwa wytwarzane z odpadów RDF (Refuse Derived Fuel) w Stanach Zjednoczonych opisane zostały przez normy Amerykańskiego Stowarzyszenia Badań i Materiałów ASTM (American Society for Testing and Materials) z lat 80-tych XX [18], które początkowo zapewniały ich wysoką jakość. Obecnie oznacza niestandardyzowane paliwo niskiej jakości, które zazwyczaj zawiera mieszane nieprzetworzone palne składniki MSW. W Europie RDF jest często sprzedawany, jako paliwo pochodzące wyłącznie z zakładów przetwarzających odpady.

W krajach Unii Europejskiej przed wprowadzeniem Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy [19], brakowało sprecyzowanej definicji rozróżniającej odpady i pozostałości po różnorodnych metodach przetwarzania odpadów, jak również nazw dla produktów stworzonych w ten sposób. W krajach Europy Zachodniej, takich

jak Niemcy i Włochy funkcjonowały różne nazwy paliw produkowanych z odpadów, które zaczęto stosować zamiennie: w Niemczech SBS (Sekundärbrennstoffe – paliwo wtórne), EBS (Ersatzbrennstoffe – paliwo zastępcze) lub BRAM (Brennstoff aus Müll – paliwo z odpadów) lub we Włoszech – CDR (Combustibili Derivato di Rifiutti - paliwo pochodzące z odpadów) i CSS (Combustibili Solido Secondario – wtórne paliwo stałe), w tym RDF (Refuse Derived Fuel), które obecnie jest powszechnie używane [20]. Zgodnie z dokumentem Komisji Europejskiej z 2003 r. pt. „Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives” [21], zdefiniowano je jako odpady, które zostały przetworzone w celu spełnienia wymagań przemysłu głównie w zakresie wysokiej wartości opałowej. Pojęcie RDF zawiera m.in.: wybrane frakcje odpadów komunalnych, odpady przemysłowe i handlowe, osady ściekowe, przemysłowe odpady niebezpieczne i biomasę.

W polskim prawodawstwie paliwo alternatywne, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 27.09.2001 r. w sprawie katalogu odpadów [22], stanowiły odpady sklasyfikowane w grupie 19 12 10 - Odpady palne (paliwo alternatywne). Paliwo alternatywne definiowano jako: „Odpady palne, rozdrobnione, o jednorodnym stopniu wymieszania, powstałe w wyniku zmieszania odpadów innych niż niebezpieczne, z udziałem lub bez udziału paliwa stałego, ciekłego lub biomasy, które w wyniku przekształcenia termicznego nie powodują przekroczenia standardów emisyjnych z instalacji współpalania odpadów określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 4.08.2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji” [23]. Powyższą definicję zawierało rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej w sprawie rodzajów odpadów innych niż niebezpieczne oraz rodzajów instalacji i urządzeń, dopuszczonych do ich termicznego przekształcania [24], które obowiązywało do 27.12.2005 r. Obecnie termin paliwa alternatywne nie jest definiowany prawnie, a obowiązujące akty prawne nie zawierają definicji tego odpadu. Nieformalnie oznacza przekształcone odpady, które mogą zastąpić paliwo konwencjonalne. W literaturze możemy znaleźć użycie różnych określeń opisujących paliwa z odpadów, takie jak „paliwa alternatywne”, „substytut paliwa”, „paliwo formowane” lub PAKOM (Paliwo Komunalne) [25,26].

Od 1 stycznia 2016 r. zaczęły obowiązywać przepisy Rozporządzenia Ministra Gospodarki z 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach [27]. Wysokokaloryczne odpady (powyżej 6 MJ/kg) o kodach 19 08 05, 19 08 12, 19 08 14 i 19 12 12 oraz z grupy 20, których nie wolno składować, zostały

wymienione w załączniku nr 4 do ww. rozporządzenia (Dz.U. 2015 r. poz. 1277). Rozporządzenie Ministra Klimatu w sprawie katalogu odpadów z dnia 2 stycznia 2020 r. określa katalog odpadów z podziałem na grupy, podgrupy i rodzaje ze wskazaniem odpadów niebezpiecznych [28]. W grupie 19: „odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów, z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych – 19” znajdują się odpady palne (paliwo alternatywne) o kodzie: 19 12 10. Przepisy krajowe nie ustanawiają dla paliw alternatywnych wymagań jakościowych, ani szczególnych wymagań produkcyjnych.

### 3.1.2 Normalizacja paliw alternatywnych - SRF

Komisja Europejska udzieliła w dniu 26.08.2002 r. Europejskiemu Komitetowi Normalizacyjnemu CEN (Comité Européen De Normalisation) mandatu (M/325) na opracowanie norm regulujących jakość i stosowanie paliw alternatywnych. Komitet techniczny CEN/TC 343 „Solid Recovered Fuels (SRF)” opracował serię norm, a zwłaszcza ogólną normę EN 15359 [29]. Norma EN 15359 określa szczegółowe specyfikacje jakościowe wymagane dla paliw SRF i zapewnia szybki system (klasyfikację) do scharakteryzowania paliwa SRF w oparciu o kombinację trzech kluczowych właściwości, wybranych w celu zapewnienia jakości paliwa, przy jednoczesnej minimalizacji złożoności klasyfikacji [30]. Kluczowe właściwości klasyfikacji technicznej to: (1) wartość opałowa NCV (Net Calorific Value), (2) całkowita zawartość Cl oraz (3) zawartość rtęci (Hg). Służą one, odpowiednio, jako wskaźniki efektywności ekonomicznej, technicznej i środowiskowej związanej ze stosowaniem paliw SRF – tab.1 [25]. NCV opisuje ilość ciepła lub energii wytworzonej podczas całkowitego spalania paliw SRF. Zawartość Cl jest miarą potencjalnego wpływu korozji, zużłowania i zarastania kotłów, podczas gdy zawartość Hg (jedno z najbardziej znaczących zanieczyszczeń środowiska na świecie ze względu na jego średnio- i długoterminowy wpływ na zdrowie [31]) jest miarą potencjalnej toksyczności uwalnianej do środowiska, ponieważ jego wysoka lotność sprawia, że najtrudniej jest go wychwycić w systemach kontroli zanieczyszczenia powietrza przetwarzających spaliny po spalaniu.

Każda właściwość SRF jest zatem podzielona na pięć klas. Klasa 1 wykazuje najbardziej pożądane cechy SRF. Jakość paliwa SRF spada wraz ze wzrostem liczby klas [32]. Połączenie numeru klasy każdej właściwości tworzy kod klasy SRF. Istnieje zatem teoretycznie 125 kombinacji kodów klas SRF [33]. Ocena jakości paliw SRF jako



współpaliwa w elektrowniach węglowych jest generalnie ograniczona do klas 1 i 2 każdego z trzech parametrów klasyfikacyjnych [34].

Tab. 1. Klasyfikacja SRF na podstawie jego trzech kluczowych parametrów [29]

Wskaźnik	Parametr	Jednostka (miara statystyczna)	Klasa				
			1	2	3	4	5
Gospodarczy	Wartość opałowa netto (NCV) (w stanie roboczym)	MJ/kg (średnia)	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Techniczny	Zawartość chloru (na sucho)	%, w stanie suchym	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Środowiskowy	Rtęć (w stanie roboczym)	mg/MJ (mediana)	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50
		mg/MJ (80. percentyl)	≤0,04	≤0,06	≤0,16	≤0,30	≤1,00

Klasyfikacja prowadzona jest na podstawie pomiarów z okresu 12 miesięcy dla tego samego rodzaju paliwa. Roczna produkcja dzielona jest na 10 części, która nie jest większa niż 1500 Mg (zapewnione minimum 10 zbiorów testowych). Dla każdej części wykonuje się przynajmniej jeden pomiar parametru charakterystycznego klasyfikacji NCV, Cl, Hg.

Zgodnie z normami EN-15359: 2005 i PN-EN 15357: 2015, pod pojęciem stałych paliw wtórnych SRF (Solid Recovered Fuels) rozumie się paliwo stałe o znormalizowanych cechach jakościowych, nie powstające z odpadów niebezpiecznych [30]. Może być wytwarzany w wyniku zaawansowanego przetwarzania palnych frakcji materiałów innych niż niebezpieczne odzyskanych z komunalnych odpadów stałych MSW, odpadów handlowych i przemysłowych C&I (Commercial and Industrial Waste) oraz odpadów budowlanych i rozbiórkowych CDW (Construction and Demolition Waste) takich jak papier, tektura, drewno, tekstylia i tworzywa sztuczne. Przetwarzanie odbywa się wyłącznie w zakładach obróbki mechanicznej lub instalacjach mechaniczno-biologicznego

przetwarzania odpadów MBT (Mechanical and Biological Treatment). Dlatego paliwo SRF jest paliwem o zapewnionej jakości i nie należy go mylić z terminem RDF. Mimo, że początkowo (lata 80. XX wieku) jakość tego paliwa była ściśle kontrolowana w USA, obecnie oznacza niestandardyzowane paliwo niższej niż SRF jakości [35,36].

### 3.1.3 Klasyfikacja paliwa alternatywnego według CEMBUREAU

Na potrzeby przemysłu cementowego, Europejskie Stowarzyszenie Producentów Cementu CEMBUREAU (The European Cement Association) opracowało wytyczne, według których paliwa alternatywne podzielono na pięć klas [37]:

- klasa I – gazowe paliwa alternatywne (m.in. gaz koksowniczy, gaz pirolityczny, biogaz),
- klasa II – ciekłe paliwa alternatywne (m.in. oleje smarowe, tłuszcze roślinne, pozostałości z destylacji, zużyte oleje hydrauliczne),
- klasa III – paliwa alternatywne w postaci proszkowej, zgranulowanej lub pokruszonej (m.in. trociny, wióry, osady ściekowe, pozostałości rolnicze, rozdrobnione opony),
- klasa IV – pokruszone stałe paliwa alternatywne (m.in. rozdrobnione opony, odpady z gumy, tworzyw i drewna),
- klasa V – gabarytowe paliwa alternatywne (m.in. całe opony, bele z tworzywa sztucznego, odpady w workach, bębnach).

## 3.2 CHARAKTERYSTYKA BIOMASY

Według Art. 2. pkt 3 Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2022 poz. 1378 z późn. zm.) [38] za biomasę uznaje się „ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działań przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęgla, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów”. Natomiast Art. 2. pkt 3b wymienionej ustawy [38] (Dz.U. 2022 poz. 1378 z późn. zm.) definiuje biomasę pochodzenia rolniczego jako „biomasę

pochodzącą z upraw energetycznych, a także odpady lub pozostałości z produkcji rolnej oraz przemysłu przetwarzającego jej produkty”.

Składniki biomasy obejmują celulozę, hemicelulozę, ligninę, lipidy, białka, cukry proste, skrobię, wodę, węgiel, popiół i inne związki. Koncentracja każdego z nich różni się w zależności od gatunku, rodzaju rośliny tkanki, etapu i warunków wzrostu [39,40]. Ogólny skład biomasy pod względem węgla, wodoru i tlenu (C, H, i O) niewiele różni się między sobą w zależności od źródła biomasy. Typowe procenty wagowe dla C, H i O wynoszą odpowiednio 30 - 60%, 5 - 6% i 30 - 45%. [41,42]. Azot, siarka i chlor występują w ilościach zwykle mniejszych niż 1% suchej masy, ale w niektórych rodzajach biomasy nieдрzewnej mogą znacznie przekraczać tą wartość. Tab. 2 przedstawia wyniki analizy składu biomasy różnego pochodzenia.

Tab. 2. Wyniki analizy składu biomasy różnego pochodzenia [42]

Rodzaj biomasy	Paliwo	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]
Drzewna	Świerk	51,40	6,10	41,20	0,30	0,00	0,10
	Buk	49,50	6,20	41,20	0,40	-	-
	Trociny drzewne	46,90	5,20	37,80	0,10	0,04	-
Niedrzewna	Łupiny orzecha włoskiego	53,60	6,60	35,50	1,50	0,10	0,20
	Słonecznik	50,50	5,90	34,90	1,30	0,10	0,40
	Słoma pszeniczna	41,80	5,50	35,50	0,70	0,00	1,50

W porównaniu z węglem biomasa generalnie ma mniej węgla, glinu, żelaza, tytanu i siarki, więcej tlenu, krzemionki, chloru i potasu. Biomasa to paliwo, które może być importowane lub dostarczane lokalnie i może obejmować pozostałości lub strumienie odpadów z leśnictwa i obróbki drewna (np. trociny, zrębki drzewne) [11,12], rolnictwa (np. łuski kukurydzy, plewy pszenne). Odpady z przemysłu papierniczego, cukrowniczego, a także odpady z produkcji żywności np. łuski/łupiny (np. migdały, słonecznik, oliwki, orzechy włoskie, pestki palm, kakao). Ponadto dedykowane rośliny energetyczne, w tym

rośliny drzewiaste o szybkim tempie wzrostu, takie jak rośliny zielne, proso, które są roślinami rolniczymi i które można uprawiać wyłącznie w celu wykorzystania ich jako paliwa z biomasy [43]. Uprawy oleiste, cukrowe i skrobiowe są obecnie szeroko stosowane do produkcji płynnych paliw transportowych, a ich wykorzystanie w elektrowniach jest obecnie ekonomicznie nieuzasadnione.

Biomasa ma na ogół wysoką zawartość wilgoci MC (Moisture Content), nawet do 60- 65% i niską wartość opałową netto (NCV) 10-20 MJ/kg [44]. Jej wartość opałowa jest na ogół nieco ponad połowę mniejsza niż węgla. Również gęstość cząstek jest o około połowę mniejsza niż węgla, a gęstość nasypowa wynosi około jedną piątą gęstości węgla. Skutkuje to gęstością energii paliwa, mniej więcej jedną dziesiątą energii węgla, co oznacza, że znacznie więcej biomasy musi zostać spalane, aby skompensować równoważnik energii węgla. Biomase można przekształcić w postać stałą, płynną i gazową wykorzystując nowoczesne technologie. Staje się ona wówczas paliwem wydajnym i czystym dla wszystkich sektorów takich jak ciepła, energii elektrycznej i paliw transportowych [45]. Istnieją dwie drogi konwersji biomasy, a mianowicie biochemiczna i termochemiczna. Konwersja biochemiczna wykorzystuje enzymy, bakterie lub inne mikroorganizmy do przekształcenia biomasy w biopaliwa płynne. W procesach termochemicznych przekształca się w dowolną formę energii w obecności ciepła i kontrolowanego dostarczania tlenu. W porównaniu do konwersji biochemicznej, termochemiczna ma pewne zalety, takie jak wykorzystanie całej biomasy, szybsza kinetyka i elastyczność surowcowa [46]. Istnieją trzy główne procesy konwersji termochemicznej takie jak: bezpośrednie spalanie [47,48], zgazowanie [49], piroliza [50]. Z jednej strony wszechstronny charakter biomasy umożliwia jej wykorzystanie we wszystkich częściach świata [51], z drugiej strony ta różnorodność sprawia, że biomasa jest złożonym i trudnym paliwem. Zwłaszcza ze względu na wysoki procent alkaliów, głównie potasu i chloru, w niektórych rodzajach biomasy, które mogą generować problemy podczas spalania. Racjonalne wykorzystanie biomasy stałej pochodzenia nieleśnego wiąże się z koniecznością uprzedniego rozpoznania jej właściwości paliwowych. Wśród najistotniejszych składników biomasy znajdują się: chlor, potas, siarka, azot i krzem. Jednym z najistotniejszych pierwiastków wpływających na problemy podczas spalania biomasy jest chlor. W niektórych rodzajach biomasy występuje on w dużych ilościach np. w słomie i może wpływać na powstawanie zjawiska korozji. Wysoka zawartość chloru i alkaliów w niektórych paliwach z biomasy może powodować poważne

uszkodzenie jednostek spalania. Stężenie chloru często wpływa również na ilość alkaliów, głównie potasu, odparowując podczas spalania tak silnie, jak wynika to z wydzielania alkaliów z paliwa na powierzchni wymiany ciepła w kotłach, na których alkalia często tworzą siarczany. W przypadku braku chloru alkalia tak silnie nie osadzają się na powierzchniach wymiany ciepła w kotle i są usuwane z gazami spalinowymi. Paliwo z biomasy zawiera również w dużych ilościach krzem i potas. Wysoka procentowa zawartość krzemu wraz z potasem i chlorem odgrywa istotną rolę w silnym osadzaniu się popiołu na powierzchniach wymiany ciepła przy wysokich lub umiarkowanych temperaturach spalania. Głównymi źródłami tych problemów są:

(1) reakcja związków alkalicznych z krzemionką z wytworzeniem krzemianów metali alkalicznych, które topią się lub mięknią w niskiej temperaturze (temperatury mogą być niższe niż 700°C, w zależności od składu biomasy),

(2) reakcja syntezy związków alkalicznych z siarką. Podczas, której tworzą się siarczany alkaliczne na powierzchniach wymiany ciepła komory spalania [8]. Związki alkaliczne odgrywają kluczową rolę w obu procesach, a potas jest dominującym źródłem alkaliów w większości paliw z biomasy [52,53].

Zawarte w popiele związki potasu łatwo osadzają się na powierzchniach wymiany ciepła, tworząc osady. Przykładowo na powierzchniach przegrzewaczy, tworzy się osad który w głównej mierze składa się z: CaO, CaSO<sub>4</sub> i K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i utwardza się pod wpływem temperatury >500°C, zwiększając opory przenikania ciepła. Związki chloru zawarte w biomase dodatkowo zwiększają zanieczyszczanie powierzchni wymiany ciepła i znacznie zwiększają ryzyko wysokotemperaturowej korozji w przegrzewaczu.

Paliwa z biomasy mogą również mieć różną zawartość popiołu, przy czym materiały rolnicze charakteryzują się wyższą zawartością popiołu niż materiały drzewne [43,52]. Główne pierwiastki tworzące popiół w biomase obejmują Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S i P. Tab. 3 prezentuje analizę popiołu niektórych wybranych paliw biomasowych oraz węgla [54].

*Tab. 3. Składniki popiołu niektórych paliw biomasowych i węgla kamiennego (% masowy popiołu) [54]*

Paliwo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
Pelet drzewny	4,3	1,3	1,5	5,9	8,5	55,9	0,6	16,8	0,1	3,9	1,3

Paliwo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
Łuska słonecznika	2,9	0,6	0,8	0,1	21,6	21,6	0,24	22,8	0,1	15,2	14,0
Słoma	53,1	3,6	1,2	-	3,0	17,7	4,5	30,0	-	4,1	-
Odpady szklarniowe	28,4	3,9	18,4	0,3	5,7	25,8	0,8	9,7	0,8	3,8	-
Węgiel	59,7	20,3	7,0	<0,01	1,9	1,8	1,0	2,3	0,9	0,1	1,3

Paliwa z biomasy mają mniej popiołu i bardzo niską lub prawie znikomą zawartość N i S w porównaniu z większością węgla [39], zmniejszając tym samym emisję SO<sub>2</sub> i NO do atmosfery.

### 3.2.1 Zastosowanie biomasy

Bezpośrednie spalanie drewna opałowego jest głównym źródłem energii wśród obszarów wiejskich krajów rozwijających się w Azji i Afryce. 2,5 mld światowej populacji wciąż polega na tym tradycyjnym wykorzystaniu drewna jako podstawowego źródła energii [3].

W krajach rozwiniętych bardziej popularne są zrębki ze względu na dostępność zautomatyzowanych systemów produkcji ciepła i energii. Kraje europejskie, takie jak Wielka Brytania, Holandia, Dania, Belgia i Niemcy są największymi konsumentami energii odnawialnej do ogrzewania domów, głównie z biomasy i odpadów w postaci peletów i brykietów [55]. Biomasa w postaci peletów jest obecnie powszechnie stosowana również do produkcji energii elektrycznej. Pelety z biomasy charakteryzują się wyższymi parametrami jakościowymi, ponadto z uwagi na regularny kształt oraz standardowy rozmiar umożliwiają kompaktowe przechowywanie, wygodną obsługę i automatyczne zasilanie w dużych jednostkach operacyjnych [56].

Istnieją instalacje do samodzielnego spalania biomasy oraz współspalania z innym paliwem np. węglem brunatnym lub kamiennym. Wśród korzyści wynikających z budowy samodzielnych instalacji na biomasę pod względem aspektów środowiskowych technicznych i ekonomicznych wymienia się wykorzystanie paliwa odnawialnego, przekierowanie materiału biodegradowalnego ze składowiska oraz ulgi podatkowe

i dotacje. Wadą samodzielnych instalacji do spalania biomasy są wysokie koszty kapitałowe oraz związane z nimi ryzyko inwestycyjne, bezpieczeństwo dostaw surowca, zmienność regulacji prawnych (zwłaszcza w zakresie stabilności dopłat) [43]. W niektórych częściach świata należy zwrócić również uwagę na aspekty sezonowości, które mogą wpływać na dostępność paliwa z biomasy, podczas gdy rozproszony charakter większości paliw z biomasy produkowanych w różnych regionach i ich oddalenie od istniejącej infrastruktury może jeszcze bardziej zwiększyć ryzyko inwestycji.

Popularnym rozwiązaniem cieszy się łączenie biomasy z innymi paliwami (np. węglem i paliwami odpadowymi) do produkcji energii w istniejących elektrowniach. Może ono częściowo złagodzić lub rozwiązać niektóre z tych technicznych, ekonomicznych i środowiskowych niepewności. Rodzaj biomasy wybranej do konkretnego zastosowania współspalania zależy od czynników technicznych i ekonomicznych, takich jak obróbka wstępna, skład, wartość opałowa, gęstość, porowatość, rozmiar, powierzchnia czynna i temperatura spiekania popiołu. Większość instalacji współspalania biomasy pracuje przy stosunku masowym biomasy do węgla mniejszym niż 10% w przeliczeniu na energię. Pomyślna eksploatacja tych instalacji sugeruje, że współspalanie przy tak niskich współczynnikach w większości przypadków nie stwarza większych problemów dla pracy kotła. Wyższe wskaźniki wymagają natomiast znacznie większej kontroli i odpowiednich rozwiązań technologicznych [57].

### 3.3 CHARAKTERYSTYKA PALIW ALTERNATYWNYCH

Komunalne odpady stałe MSW to niejednorodna mieszanka różnych składników tj. papier, tworzywa, tekstylia, które nie podlegają recyklingowi. Niektóre rodzaje papieru są bardzo trudne do recyklingu ze względu na zawarte w nich chemikalia, w tym papier wodoodporny, papier woskowany lub powlekany polietylenem (PE) oraz papier zawierający warstwy klejące [58]. Ich skład różni się w zależności od regionu. Różne parametry społeczno-ekonomiczne (populacja, styl życia, dochód na mieszkańca i wykształcenie) oraz warunki pogodowe wpływają na ilość i jakość generowanych odpadów. W Polsce głównymi odbiorcami wydzielonej frakcji palnej MSW w postaci strzępków o różnej wielkości cząstek są cementownie.

Obecnie stałe paliwa wtórne SRF i paliwo odpadowe RDF stanowią dwie główne drogi odzyskiwania zasobów energetycznych z niepodlegających recyklingowi frakcji

MSW. Określenia SRF i RDF są często używane zamiennie ze względu na ich podobny skład, oba powstają w wyniku zaawansowanego przetwarzania palnych frakcji materiałów innych niż niebezpieczne odzyskanych z MSW, C&I oraz CDW [59]. Jest to paliwo bardziej jednorodne, o wyższej wartości opałowej i gęstości energii w porównaniu z MSW. SRF definiowane jest jako paliwo zgodne z normami ustanowionymi przez CEN, podczas gdy producenci paliw RDF nie mają obowiązku przestrzegania procedur zarządzania jakością CEN, a zatem jego zawartość i jakość są bardziej zmienne i niewystarczająco weryfikowane [36]. Paliwa RDF i SRF jest zwykle produkowane z palnej frakcji MSW i sprzedawane w postaci bel, puchu, brykietów lub peletów. Podczas procesu brykietowania i peletyzowania surowiec poddawany jest działaniu dużego ciśnienia i czasami zachodzi w wysokiej temperaturze. Proces zagęszczania jest złożony i realizowany w różnych warunkach, zależnych od rodzaju materiału. Właściwości fizyczne i chemiczne surowca mają znaczący wpływ na jakość brykietu lub peletu. Gęstość jest ważnym parametrem przy produkcji i zależy od gęstości pierwotnych odpadów. Im wyższa gęstość, tym większa ilość energii zakumulowana w wyprodukowanym paliwie. Przed brykietowaniem i peletyzowaniem odpady komunalne są rozdrabniane, dodawane są środki wiążące oraz zmniejszana jest zawartość wilgoci. Rodzaj zagęszczanego materiału, jego wilgotność, wielkość frakcji, temperatura i ciśnienie procesu wpływają na efektywność procesów technologicznych i jakość produktów końcowych. Wielkość frakcji ma duży wpływ na proces zagęszczania. Im grubsza frakcja, tym więcej energii potrzebna do brykietowania i peletyzacji, a produkt ma mniejszą jednorodność. Rozdrobnienie surowca sprawia, że siły wiążące wewnątrz materiału zmniejszają się, wpływając na szybszy rozkład w procesie spalania [59].

Zawartość energii różni się w zależności od składu RDF i SRF i mieści się w przedziale 10–25 MJ/kg (w stanie roboczym), co czyni je atrakcyjnymi jako paliwa lub współpaliwa w wielu procesach przemysłowych, poprawiając zapłon, stabilność spalania i wypalanie się paliw niższej jakości, takich jak biomasa, torf lub węgle o niskiej jakości [60].

Najbardziej rozpowszechnionymi składnikami w paliwach SRF/RDF wytwarzanych z MSW są: papier/karton (40-50%), tworzywa sztuczne (25-35%), tekstylia (10-14%) i drewno (3-10%) [16]. Skład ten może różnić się w zależności od rodzaju wsadu, położenia geograficznego, sezonu, technologii przetwarzania – tab. 4 [16, 61-67].



Tab. 4. Typowy skład próbek stałych paliw alternatywnych SRF/ RDF produkowanych w celach handlowych z komunalnych odpadów stałych, na podstawie najbardziej rozpowszechnionych kategorii pozycji odpadów w różnych regionach świata [16, 61-67]

Składnik	Finlandia	Polska	Wielka Brytania	Łotwa	Austria	Włochy	Stany Zjednoczone USA	Grecja
Papier/karton [%]	30	11	10-40	19	11	30	79	46-82
Tworzywa sztuczne [%]	33	30	10-40	45	20	28	21	18-54
Tekstylia [%]	10	8	0-20	13	9	14	-	-
Drewno [%]	8	11	0-20	23	0-1	0-10	-	-
Miał* [%]	13	40	2-7	-	51	5	-	-
Inne [%]	6	-	2-40	-	8-9	13-23	-	-

„\*Miał” – materiał składający się z kilku innych o wielkości cząstek zwykle <15 mm, składający się z gleby, pyłu, fragmentów plastiku, szkła, metali żelaznych, organicznych, ługowych, żelaznych i innych, są zazwyczaj niechcianą frakcją odpadów, ponieważ zmniejszają zawartość opałową w ogólnym SRF/RDF ze względu na wysoką zawartość materiałów niepalnych/obojętnych; oraz dlatego, że koncentruje zanieczyszczenia, takie jak potencjalnie toksyczne pierwiastki (PTE) [68-69].

Należy mieć na uwadze, że wiele produktów odpadowych składa się z różnych składników o różnych właściwościach. Na przykład kartony po napojach składają się z papieru (ok. 75%), aluminium (ok. 5%) i polietylenu o małej gęstości (LDPE) (ok. 20%) [70]. Każda kategoria składników odpadów (tekstylna, drewno, papier lub tworzywa sztuczne), charakteryzuje się ogromną zmiennością na poziomie materiału lub związku chemicznego. Do produkcji wyrobów tekstylnych wykorzystuje się materiały naturalne, takie jak bawełna, wełna i jedwab, ale również materiały syntetyczne, takie jak poliester (PET), poliamid (PA) i włókna akrylowe, lub ich kombinacje w różnych proporcjach [71]. Włókna naturalne składają się głównie z celulozy, która jest naturalnym polimerem biomasy, natomiast włókna syntetyczne są wytwarzane głównie z polimerów opartych

na surowcach kopalnych [72]. Podobnie jest w przypadku odpadów papier/karton, ponieważ surowce używane do produkcji papieru można podzielić na dwie kategorie. Pierwszą z nich stanowią materiały drzewne, takie jak włókna drzew iglastych i liściastych. Drugą materiały nie drzewne, takie jak trawy, słomki zbożowe, łodygi kukurydzy, bambus i wytloki [73]. Ogólnie drewno liściaste i iglaste mają podobne właściwości termiczne, z tą różnicą, że drewno iglaste ma wyższą ognioodporność [74].

SRF/RDF zawiera znaczne ilości polimerów biomasowych tzw. biopolimerów: celulozy, hemicelulozy i ligniny. W tab. 5 zestawiono zawartości polimerów biomasowych w biomacie drzewnej i nie drzewnej oraz składników paliw SRF/RDF.

*Tab. 5 Typowe zakresy zawartości biopolimerów w biomacie drzewnej, nie drzewnej oraz składnikach paliw SRF/RDF [16,75]*

Rodzaj materiału	Materiał	Celuloza	Hemiceluloza	Lignina
		(%, w stanie roboczym)	(%, w stanie roboczym)	(%, w stanie roboczym)
Biomasa drzewna	buk	48 - 49	22 - 28	24
	dąb	45	20	25
	sosna	38 - 50	24 - 30	25 - 30
Biomasa nie drzewna	trzcina	42 - 50	20 - 23	22 - 25
	słoma ryżowa	28 - 36	23 - 28	12-16
	słoma pszeniczna	29-45	15-35	12-21
Składniki paliw SRF/RDF	papier/karton	49,2-76,7	6,6-19,1	1,5-20,2
	drewno	44,6-46,7	24,2-28,5	23,1-26,9
	tekstylna (naturalne włókna)	58,7-84,1	7,8-19,6	0,8-16,2

Typowa zawartość biopolimerów w paliwach SRF/RDF wynosi około 50–65%, w przeliczeniu na energię. Zatem paliwo z odpadów jest atrakcyjne jako paliwo alternatywne, będąc równocześnie częściowo odnawialnym i neutralnym pod względem emisji dwutlenku węgla. W paliwach RDF/SRF występuje wiele różnych polimerów z paliw kopalnych (tworzyw sztucznych), z których najbardziej rozpowszechnione są polietylen (PE), polipropylen (PP), polichlorek winylu (PVC) i politereftalan etylenu (PET), który

ze względu na przewagę jako surowiec do produkcji opakowań odpowiada, za 40–60% ogólnej produkcji odpadów z tworzyw sztucznych [76,77].

Jakość paliw SRF można poprawić, koncentrując tylko odpowiednie frakcje palne (takie jak tworzywa sztuczne, kompozyty opakowaniowe, tekstylia itp.) oraz usuwając zanieczyszczenia fizyczne (szkło, kamienie, metale żelazne i nieżelazne).

Materiały o wysokiej zawartości chloru i ołowiu są niepożądane [78], a ich usuwanie jest traktowane jako priorytet. W szczególności polichlorek winylu (PVC) jest powszechnie uznawany w przemyśle odpadowym jako skoncentrowane źródło chlorku związanego organicznie, które może być problematyczne w procesach obróbki termicznej ze względu na wytwarzanie HCl podczas spalania [79]. Efektywne selektywne zbieranie materiałów wykonanych z PVC: rury, arkusze, panele, płytki, zabawki, farby oraz innych zawierających chlorki, takich jak papier bielony i rozpuszczalniki przemysłowe (np. odtłuszczacze, roztwory czyszczące, rozcieńczalniki do farb, pestycydy, żywice i kleje) mogą zmniejszyć zawartość Cl w paliwach [80].

Znaczną ilość chlorków można znaleźć również w odpadach domowych w postaci nieorganicznych chlorków metali alkalicznych, np. NaCl, MgCl<sub>2</sub>, KCl i CaCl<sub>2</sub> [81,82]. Chociaż stężenie chlorków w tych strumieniach odpadów jest niższe niż w PVC, ogólny skład odpadów może oznaczać, że chlorek nieorganiczny może potencjalnie przyczyniać się do ogólnego ładunku chlorków - tj. może być więcej odpadów biologicznych niż PVC w mieszanym strumieniu odpadów [79].

Korzystne jest również oddzielne zbieranie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, termometrów, baterii, farb i metali galwanizowanych, co może zmniejszyć zawartość rtęci i kadmu w reszkowych odpadach MSW, C&I i CDW, poprawiając w ten sposób odpowiednią klasę SRF [80].

Istnieje jednak kompromis między zawartością biopolimerów a zawartością kopalnych polimerów, z których ta ostatnia zwiększa wartość opałową. W wielu badaniach odnotowano, że tworzywa sztuczne, a zwłaszcza PVC, często przyczyniają się do największej zawartości Cl w odpadach (ok. 70% Cl w MSW), ale również zapewniają wysoką wartość opałową paliwa [78]. Technologie bliskiej podczerwieni (NIR) (Near InfraRed) stosowane w MBT mogą potencjalnie wychwytywać tworzywa sztuczne o wysokiej zawartości Cl, takie jak PVC [79]. Jednak obecność czarnych tworzyw sztucznych, surowego drewna i tekstyliów może utrudniać skuteczność technologii NIR w efektywnym sortowaniu plastiku PVC, pozostawiając jego znaczną część w wytwarzanych paliwach SRF.

Dodatkowo właściwości, takie jak zawartość wilgoci (MC), frakcja lotna, wielkość cząstek, zawartość popiołu, metale ciężkie itp. są również ważne dla praktycznej oceny zachowania paliw SRF w instalacjach spalania [33]. Procesy stosowane w instalacjach MBT (tj. proces biologicznego suszenia), po którym następuje separacja mechaniczna mogą wpływać na MC, a tym samym na wartość opałową wytwarzanego paliwa SRF. Odpady ulegające biodegradacji, a zwłaszcza odpady żywnościowe, które są często obecne w MSW, również mogą zwiększyć zawartość wilgoci w SRF. Gdy zawartość odpadów żywnościowych w MSW wynosi około 50% lub więcej, wówczas proces biologicznego suszenia, po którym następuje separacja mechaniczna, jest uważany za najbardziej korzystny dla produkcji SRF, ponieważ pozwala zmniejszyć MC do około 15% [83].

Jeśli chodzi o klasyfikację wielkości cząstek, przesiewanie stosowane w instalacjach MBT sortuje odpady głównie według ich wielkości. Wielkość cząstek można dalej regulować poprzez dalsze rozdrabnianie odpadów (rozdrabnianie wtórne). Elektrownie najlepiej działają na paliwie SRF o wielkości cząstek 20 mm, podczas gdy cementownie mogą tolerować do 30 mm [28]. W oparciu o specyfikacje jakościowe SRF mogą mieć wielkość cząstek w zakresie od 5 mm do <300 mm, przy czym największe zastosowania to kotły do produkcji ciepła (tj. <10–200 mm w złożu fluidalnym, <300 mm przy spalaniu na ruszcie) i w piecach cementowych przy <120 mm [84].

### 3.3.1 Zastosowanie paliw alternatywnych

Istnieje wiele metod natychmiastowego radzenia sobie z MSW m.in. obróbka termochemiczna poprzez spalanie, łączona obróbka mechaniczno-biologiczna, biogazownie i składowanie. Wszystkie te metody mają swoje zalety i wady [85]. Zdolność mechanicznego i biologicznego przetwarzania odpadów w małym stopniu przyczynia się do zmniejszenia objętości MSW, jednakże podczas procesu biologicznego oczyszczania zawartość węgla organicznego w MSW może zostać zmniejszona, co wpływa na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych z kolejnego procesu (tj. składowania). Biogazownie prowadzą z kolei biochemiczny proces konwersji frakcji organicznej MSW do produkcji biogazu. Ta metoda jest odpowiednia tylko dla jednorodnych odpadów o wysokiej zawartości organicznej materii biodegradowalnej i wysokiej zawartości wilgoci. Natomiast składowanie MSW wiąże się z problemami środowiskowymi, głównie z emisjami odcieków i biogazu. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat znacząco wzrosło zainteresowanie termiczną konwersją paliw alternatywnych. Bezpośrednie spalanie

pozwała na szybkie zmniejszenie ilości MSW do 90% pierwotnej objętości i odzyskanie energii zakumulowanej w MSW. Ponadto przetworzenie MSW w paliwo RDF/SRF pozwala na poprawę jakości paliwa i lepszą kontrolę procesu spalania oraz ograniczenie emisji szkodliwych związków do atmosfery [86].

### 3.3.2 Modyfikowane paliwa alternatywne

Peletyzacja i brykietowanie są uważane za skuteczną metodę poprawy właściwości, magazynowania i transportu paliw odpadowych i biomasy. W celu większej poprawy właściwości paliw produkowanych z biomasy, autorzy prac [87, 88, 92-94] zaproponowali modyfikację peletów poprzez zastosowanie różnych dodatków zwiększających zawartość składników palnych. W pracy [87] przebadano właściwości mechaniczne oraz proces spalania peletów z biomasy, gdzie jako spoiwo wykorzystane zostały pozostałości smoły węglowej po zgazowaniu CTR (Coal Gasification Tar Residue). W badaniach analizowano pelety ze słomy pszenicznej, trocin, bambusa moso i węgla brunatnego XiMeng z wykorzystaniem jako spoiwa CTR. CTR to rodzaj toksycznych, niebezpiecznych przemysłowych odpadów stałych powstających w procesie zgazowania lub koksowania węgla, składających się z ciężkiego oleju smołowego, pyłu węglowego i innych cząstek stałych unoszonych w gazach wytwarzanych podczas pirolizy węgla. Według badań [88-91] CTR zawiera 2–6 pierścieni aromatycznych, z których część to rakotwórcze wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), a jego bezpośredni zrzut spowodowałby poważne zanieczyszczenie gleby, wód gruntowych i otaczającego powietrza. Dzięki stosunkowo dużej lepkości CTR w temperaturze pokojowej może być z powodzeniem stosowany jako spoiwo w określonych warunkach. W przypadku eksperymentu [87] proces peletyzacji zachodził w temperaturze pokojowej i ciśnieniu 100 MPa. Zwykle przy produkcji peletu z biomasy ciśnienie wynosi 70–250 MPa, a temperatura mieści się w zakresie 100–250°C i jest procesem energochłonnym. Dodatek specjalnych spoiw pozwala na poprawę trwałości mechanicznej peletów z biomasy produkowanej w warunkach temperatury otoczenia i niskiego ciśnienia, co znacznie redukuje zapotrzebowanie na energię do procesu peletyzacji. Ponadto CTR jest wtórnym źródłem energii o wysokiej wartości opałowej. Dodatek 35% CTR do peletów ze słomy pszenicznej, z trocin, bambusa moso spowodował wzrost wartości opałowej paliw odpowiednio o 25,96%, 22,76% i 20,62% dając 19,32, 21,35 i 21,00 MJ/kg. Podobnie w przypadku węgla brunatnego dodatek 35% CRT spowodował wzrost wartości opałowej

o 37,63%, z 13,52 MJ/kg bez CTR do 18,61 MJ/kg z 35% wag. CTR. Użycie CTR jako środka wiążącego może zwiększyć wytrzymałość peletu. Popiół pozostały po spaleniu CTR składał się głównie z kilku związków zawierających Si, Al, Fe, Ca, Mg, K i Na. Wśród tlenków, największą ilość stanowiły  $\text{SiO}_2$ , a następnie  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{CaO}$ , a wśród nich metale ciężkie: Zn, Pb, Cu, Ni. Zanieczyszczenia popiołem i metalami ciężkimi z CTR, powinny być ściśle kontrolowane podczas spalania w specjalnie dostosowanych instalacjach [87]. CTR było również badane jako spoiwo w produkcji brykietów [92].

Spoiwa, takie jak m.in. odpadowy olej roślinny, pakowy papier odpadowy były również badane w literaturze pod kątem ich wpływu na produkt i proces peletyzacji [93,94].

W pracy [93] zbadano właściwości peletów drzewnych z dodatkiem zużytego oleju roślinnego. Dodatek oleju wynosił 2,2 i 5,8% w przeliczeniu na suchą substancję stałą. Wyniki pokazały, że dodatek oleju znacznie zwiększył wartość energetyczną peletu drzewnego, z 19,69 do 20,05 i 20,64 MJ/kg przy 2,5 oraz 5,8% dodatku oleju. Jednakże wytrzymałość peletu została zmniejszona.

Badacze [94] analizowali wpływ odpadowego papieru pakowego na właściwości peletu z biomasy. Odpadowy papier pakowy, jako bioodpad nadający się do recyklingu, jest dostępny na całym świecie i charakteryzuje się wysoką zawartością substancji palnych oraz niską zawartością popiołu [95]. Może być stosowany jako opłaczalne spoiwo. W pracy badano właściwości peletów z trocin drzewnych oraz odpadowego papieru pakowego. Wartość opałowa mieszanek trocin z papierem pakowym rosła wraz ze zwiększającym się udziałem papieru pakowego. Dodatek papieru pakowego zmniejsza emisję półdymienia i zwiększa współczynnik wykorzystania energii paliw z biomasy. Zatem proces peletyzacji papieru pakowego z trocinami w stosunku masowym 1/3 poniżej 6 MPa to opłaczalny sposób na przygotowanie zrównoważonych i neutralnych pod względem  $\text{CO}_2$  biopaliw z trocin drzewnych oraz utylizację odpadów papierowych.

W pracy [96] zaproponowano tworzenie odpornych na wilgoć peletów drzewnych poprzez dodatek hydrofobowej powłoki, która również przyczynia się do wzrostu wartości opałowej peletów. Pelety zostały zanurzone w oleju parafinowym, oleju rycynowym, oleju mineralnym i oleju lnianym. Każdy olej nakładano dwiema metodami. Pojedyncze granulki zanurzano w  $100 \text{ cm}^3$  oleju w temperaturze pokojowej na 10 s. W celu oceny wpływu czasu na wchłanianie oleju w każdej z próbek oleju zanurzano pelety w odstępach czasu 1 s, 2 s, 3 s, 5 s i 10 s. Stwierdzono, że we wszystkich przypadkach czas nie wpływa

na wchłanianie oleju, a absorpcja oleju była zasadniczo stała w miarę zmieniania się czasu. W drugiej metodzie, zastosowanej również dla wszystkich olejów, 0,14kg peletów umieszczano w zlewce z olejem ( $5 \text{ cm}^3$ ), a następnie dodawano drugą część oleju ( $5 \text{ cm}^3$ ) i mieszano przez 300 s. We wszystkich przypadkach przyrost masy w wyniku absorpcji oleju był mniejszy, gdy przeprowadza się go mieszając porcję peletów niż w przypadku zanurzania pojedynczych peletów. Stwierdzono, że wytrzymałość granulek bez dodatku oleju spadła o około 94% po zanurzeniu w wodzie przez 60 s, podczas gdy po 1800 s we wszystkich przypadkach traktowanych olejem nie odnotowano żadnego znaczącego zmniejszenia wytrzymałości granulek. Stwierdzono również, że obróbka olejem zmniejsza tworzenie się drobnych cząstek unoszących się w powietrzu i zwiększa gęstość energetyczną peletów drzewnych, zwiększając ich ciepło spalania nawet o 1,2 MJ/kg.

W przemyśle stosowane są alternatywne rodzaje biomasy o ulepszonych właściwościach fizykochemicznych. Są to pelety kompozytowe z tworzyw sztucznych i włókien drzewnych. W pracy [97] przeprowadzono analizę termiczną, chemiczną i mechaniczną paliw kompozytowych. Włókna pochodzenia biologicznego zostały zmieszane z frakcją tworzywa sztucznego w postaci granulowanego paliwa stałego. Obecność tworzywa sztucznego wpłynęła na zmianę właściwości termicznych peletu poprzez zwiększenie wartości energetycznej przy jednoczesnej zmianie składu chemicznego gazów uwalnianych podczas termochemicznej konwersji biomasy.

### 3.4 ASPEKTY TECHNICZNE, ŚRODOWISKOWE I GOSPODARCZE SPALANIA ORAZ WSPÓŁSPALANIA BIOMASY I PALIW ALTERNATYWNYCH

Wykorzystanie paliw z biomasy i odpadów w procesach spalania i współspalania pozwala uzyskać zadowalające efekty energetyczne, stając się dobrym uzupełnieniem paliw kopalnych. Paliwa te charakteryzuje duża dostępność, umożliwiającą zapewnienie ciągłości dostaw, jak również możliwość ograniczenia emisji szkodliwych związków do atmosfery. Szczególnie istotny jest wpływ paliw biomasowych oraz odpadowych na zmniejszenie emisji  $\text{CO}_2$ . Spalanie biomasy skutkuje emisjami, które są uważane za neutralne pod względem  $\text{CO}_2$ . Podobnie w przypadku odpadów biodegradowalnych, ich konwersja termiczna może również kwalifikować się jako odzysk z odnawialnych źródeł energii.

Paliwa biomasowe oraz paliwa z odpadów charakteryzują zmienne, niestabilne w czasie właściwości fizykochemiczne, które mogą prowadzić do szeregu problemów technicznych związanych z osadzaniem się popiołu na powierzchniach wymiany ciepła oraz tworzeniem żużla w kotłach, a także korozją powierzchni wymiany ciepła. Może to skutkować spadkiem wydajności, nieplanowanymi przestojami, awariami sprzętu, zwiększeniem kosztów utrzymania. Ponadto mogą one wpływać na emisje  $\text{NO}_x$ .

Wpływ spalania biomasy i paliw alternatywnych na emisje gazów spalinowych i popiołu w dużej mierze zależy od zawartości metali alkalicznych (np. K, Na, Ca) oraz zawartości Cl, P, Al i Si w paliwach [98,99]. Pierwiastki te często występują w formach jonowych lub organicznych, które są bardziej lotne niż ich formy mineralne. W konsekwencji pierwiastki te łatwiej odparowują podczas spalania, wpływając na obniżenie się temperatury topnienia popiołu i potencjalnie prowadząc do zwiększonego osadzania się popiołu w kotle. Osadzanie się popiołu może nasilać korozję w rurach wymiennika ciepła, zmniejszając wydajność spalania. Prowadzi to do dalszych konsekwencji technicznych i ekonomicznych z powodu pogorszenia się procesu spalania i uszkodzenia elementów kotła, a następnie zwiększonych kosztów eksploatacji i konserwacji.

Metale alkaliczne mogą również powodować zatrucie katalizatorów na bazie wanadu stosowanych w układach selektywnej redukcji katalitycznej SCR (Selective Catalytic Reduction), stosowanych do redukcji emisji  $\text{NO}_x$ , powodując zwiększoną emisję  $\text{NO}_x$  do środowiska [100].

Wyższa zawartość chloru w paliwach alternatywnych i biomacie w porównaniu z węglem może prowadzić do szkodliwych skutków dla instalacji spalania oraz środowiska. Uwalnianie Cl zawartego w paliwach sprzyja parowaniu organicznych zasad zawartych w węglu, biomacie i paliwach odpadowych z wytworzeniem chlorków alkalicznych (np. NaCl i KCl). Chlorki alkaliczne mogą nasilać osadzanie się popiołu na powierzchniach grzewczych i wywoływać wysokotemperaturową korozję elementów konstrukcyjnych wyposażenia paleniskowego [99]. Im wyższy stosunek metali alkalicznych do chloru w paliwach, tym ten efekt jest wyraźniejszy [101].

Z uwagi na powyższe należy podkreślić, że podczas spalania i współspalania istotne są właściwości fizyczne i chemiczne mieszanek paliwowych, które wpływają na wydajność procesu oraz charakterystykę produktów ubocznych. Dobór odpowiedniej technologii procesu spalania do odpowiedniej mieszanki paliwowej uważa się za ważny warunek



efektywnego przebiegu procesu spalania/współspalania paliw biomasowych oraz alternatywnych.

### 3.5 TECHNOLOGIA FLUIDALNEGO SPALANIA

Spośród wszystkich dostępnych technologii spalania, spalanie w złożu fluidalnym jest często uważane za najlepszy wybór spalania i/lub współspalania biomasy, odpadów i innych paliw stałych niskiej jakości ze względu na elastyczność paliwową umożliwiającą spalanie paliw charakteryzujących się zróżnicowaną wielkością cząstek, gęstością, wartością opałową i składem chemicznym. Pozostałe cechy technologii fluidalnej to długi czas przebywania paliwa w złożu oraz jednolite temperatury spalania w całej objętości złoża [102-104]. Ze względu na niską temperaturę spalania w zakresie 800-900°C technologia zapewnia niskie emisje NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> [103,105]. W temperaturze 850°C występuje ponadto najniższe zużycie sorbentu w celu utrzymania pożądanego poziomu wiązania tlenków siarki powstających podczas procesu spalania paliw [106].

Kotły fluidalne mogą pracować w szerokim zakresie obciążeń termicznych i są w stanie kompensować wahania energii ze względu na zmianę parametrów materiału wejściowego. Wyróżnia się kotły z pęcherzową warstwą fluidalną BFB (Bubbling Fluidized Bed) i kotły z cyrkulacyjną warstwą fluidalną CFB (Circulating Fluidized Bed). Podstawowym elementem konstrukcyjnym kotła fluidalnego jest ruszt, poprzez który z odpowiednią prędkością podawany jest czynnik fluidyzujący złożo, najczęściej powietrze. Złożo kotła fluidalnego tworzy materiał inerty, który początkowo stanowi piasek kwarcowy oraz ziarna paliwa i sorbentu. W trakcie eksploatacji ziarna piasku zastępowane są powstającymi w trakcie spalania ziarnami popiołu.

W kotłach BFB pod wpływem powietrza przepływającego przez złożo pojawiają się charakterystyczne pęcherze gazowe. Pęcherzowa warstwa fluidyzacyjna charakteryzuje się ściśle określoną powierzchnią oraz objętością, którą tworzą pęcherze powstające z materiału sypkiego warstwy i powietrza. Prędkość przepływu powietrza przez reaktor wynosi od 1 do 3 m/s.

W przypadku kotłów CFB złożo nie ma ściśle określonej powierzchni. Wyższa niż w przypadku BFB prędkość gazu fluidyzacyjnego (>4,5 m/s) skutkuje powstaniem turbulentnej warstwy cząstek, wypełniających niemal całą objętość komory spalania. Przy

wysokich prędkościach cząstki wydmuchiwane są z paleniska, a następnie wychwytywane w układzie separacji i poddane recyrkulacji zewnętrznej.

Obie techniki spalania w złożu fluidalnym oprócz prędkości fluidyzacji różnią się obciążeniem termicznym, ilością zastosowanego sorbentu, wielkością cząstek wprowadzanego do komory spalania paliwa, stosunkiem Ca/S – tab. 6.

Technologia CFB pozwala na budowę kotłów energetycznych o znacznie wyższych mocach niż w przypadku BFB przede wszystkim ze względu na kłopotliwy system podawania paliwa oraz kontrolę temperatury w złożu [107]. Wzrost stosunku Ca/S wpływa na obniżenie sprawności kotła ze względu na endotermiczną reakcję kalcynacji w procesie odsiarczania. W przypadku, gdy Ca/S wynosi powyżej 3 wyraźnie zwiększa ilość powstających NO<sub>x</sub>, ponieważ nadmiar wolnego CaO wpływa katalitycznie na tworzenie się tlenków azotu [108].

Tab. 6. Porównanie technologii spalania CFB i BFB [107]

Parametr	Typ kotła	
	CFB	BFB
Obciążenie termiczne związane z powierzchnią q <sub>a</sub> [MV/m <sup>2</sup> ]	1,8-2,5	1,2-1,5
Obciążenie termiczne związane z objętością q <sub>v</sub> [MV/m <sup>3</sup> ]	0,2-0,4	0,1-0,2
Średnia wielkość cząstek paliwa [mm]	3-30	<25
Moc [MW <sub>th</sub> ]	>50	<50
Prędkość powietrza [m/s]	5-9	1-3
Powierzchnia złoża [-]	nieokreślona	ściśle określona
Ca/S (różnica między rosnącym ciepłem kalcynacji a ciepłem reakcji zasiarczania) [-]	1,5	2,5-3,5
Wpływ wysokości złoża na wiązanie SO <sub>2</sub> [-]	nie	tak

Bardzo ważną cechą kotłów fluidalnych jest możliwość stosunkowo łatwej realizacji dynamicznie rozwijającej się technologii oxy-combustion. Technologia ta idealnie wpisuje się w panujące trendy ze względu na kluczowe zalety tj.: podwyższoną konwersję energii, a także możliwości bezpośredniej sekwestracji dwutlenku węgla. Spalanie tlenowe jest

jedną z najbardziej rozwiniętych technologii wychwytywania i składowania dwutlenku węgla CCS (Carbon Capture and Storage) i jest uważane za technicznie wykonalne i ekonomicznie konkurencyjne dla przyszłych zastosowań komercyjnych [107, 109, 110]. Spalanie tlenowe oznacza spalanie paliwa w mieszaninie tlenu oraz zawracanych spalin - RFG (Recirculated Flue Gas). W przeciwieństwie do konwencjonalnych instalacji spalania, które wykorzystują powietrze jako utleniacz, instalacje w technologii spalania tlenowego wykorzystują jednostkę separacji powietrza ASU (Air Separation Unit) do wytworzenia prawie czystego strumienia tlenu. Strumień tlenu jest następnie łączony z RFG w celu wytworzenia gazu wzbogaconego w tlen jako utleniacza. Recykling spalin jest konieczny, aby złagodzić zbyt wysoką temperaturę płomienia, wynikającą ze spalania paliwa w atmosferze o podwyższonym stężeniu tlenu. Po usunięciu wody i innych zanieczyszczeń ze spalin otrzymuje się spaliny zawierające wysokie stężenie CO<sub>2</sub> (do 95%). Wówczas CO<sub>2</sub> w prosty sposób może zostać poddany sekwestracji [111]. Wykorzystanie spalania tlenowego w technologii fluidalnej przynosi wiele korzyści. Po pierwsze, trudność recyrkulacji spalin w celu kontroli temperatury w instalacjach ze spalaniem pyłowym PF (Pulverised Fuel) może zostać zmniejszona w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym (CFB) za pomocą recyrkulacji materiału złoża. Ciepło właściwe materiału warstwy jest znacznie wyższe niż ciepło odzyskanych spalin. Po drugie kocioł ze złożem fluidalnym w prostszy sposób można zmodernizować do spalania tlenowego, bez konieczności wymiany palników.

Ważną cechą technologii spalania fluidalnego jest zachodzące w komorze kotła rozdrabianie paliwa, które wpływa na sprawność spalania oraz poziom emisji zanieczyszczeń. Zwiększa się bowiem sprawność wiązania ditlenku siarki, chloro- i fluorowodoru przez sorbenty [112]. Badacze od dawna podejmują próby analizy i opisu mechanizmów prowadzących do redukcji rozmiaru ziaren węgla podczas procesu spalania w warstwie fluidalnej [113-118]. Miedzy innymi przeanalizowane zostało zagadnienie erozji ziaren węgla kamiennego spalanych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej [115]. Stwierdzono, że rola erozji w przyspieszaniu ubytku masy jest niewielka i silnie powiązana z procesem spalania. Największy udział w przyspieszaniu ubytku masy cząstek węgla ma charakterystyczny przepływ gazu w złożu fluidalnym, który intensyfikuje proces dyfuzji w obszarze reakcji.

Kompleksowa wiedza na temat pozyskiwania energii cieplnej ze spalania biomasy leśnej była gromadzona od dawna [119-124]. Wśród publikacji dotyczących biomasy

niedrzewnej można odnaleźć szereg badań dotyczących spalania peletów pozyskiwanych z roślin energetycznych w kotłach rusztowych [125-128]. W pracy [125] zbadano emisje  $\text{NO}_x$  podczas spalania peletów uzyskanych z trzech roślin energetycznych. Podczas eksperymentów [126] spalano zarówno pelety z roślin energetycznych (m.in. rośliny zielne i łodygi manioku) oraz pelet z biomasy leśnej (topoli) w celu wyjaśnienia roli głównych pierwiastków popiołotwórczych w przemianach, prowadzących do powstawania popiołów paleniskowych, osadów i emisji cząstek stałych (drobnych i gruboziarnistych frakcji popiołu). Badania eksperymentalne wykazały fundamentalne różnice w zachowaniu przemiany popiołu podczas spalania paliw bogatych w P (np. maniok) w porównaniu z paliwami bogatymi w Si (np. topola). W paliwach bogatych w P występuje znaczny stopień ulatniania się metali alkalicznych, co powoduje powstawanie większych ilości drobnych cząstek stałych (emisje wynosiły  $>800 \text{ mg/Nm}^3$  przy 10% obj.) w porównaniu z paliwami bogatymi w Si (emisje wynosiły ok 500 i 200  $\text{mg/Nm}^3$  przy 10% obj.). Jednak ze względu na skłonność do spiekania wszystkie badane paliwa można w badanych warunkach sklasyfikować jako paliwa niepowodujące znacznego żużlowania. Natomiast celem pracy [127] była ocena technologii spalania wielopaliwowego pod kątem wymaganych korekt parametrów spalania, ze względu na właściwości nowych gatunków roślin energetycznych. W wyniku badań ustalono: proporcję mieszanki paliwowej wsadu, współczynnik nadmiaru powietrza, rozdział powietrza pierwotnego/wtórnego i czas przebywania mieszanki paliwowej na ruszcie prowadzących do najwyższej wydajności spalania nowych paliw w badanym systemie. W pracy [128] określono ilościowe uwalnianie K, Cl, S i P podczas spalania dwóch gatunków roślin energetycznych i ich wpływ na zjawisko płynięcia popiołu. Zagadnienie spalania biomasy agro w złożu fluidalnym na małą skalę zostało omówione w pracy [129]. Przedstawiono w nim najważniejsze problemy dotyczące spalania biomasy, zwracając szczególną uwagę na występowanie związków metali alkalicznych.

Wpływ atmosfery utleniającej i stężenia  $\text{O}_2$  w układach ze złożem fluidalnym, w którym spalano różne rodzaje węgla, został w ostatnich latach dokładnie zbadany [130-133]. Potwierdzone zostały zalety oxy-spalania a mianowicie: podwyższona konwersja energii oraz możliwość sekwestracji dwutlenku węgla. Na ogół, wyniki doświadczalne wykazały [133], że emisja  $\text{NO}_x$  przy małym stężeniu  $\text{O}_2$  (25%) jest niższa niż podczas spalania w atmosferze powietrza. Emisje  $\text{NO}_x$  rosną jednak wraz ze wzrostem stężenia  $\text{O}_2$  ze względu na wzrost temperatury w komorze spalania, który podnosi stężenie rodników

O i OH i poprawia tworzenie NO. Drugim powodem była niższa prędkość gazu w pionie i dłuższy czas przebywania cząstek paliwa w komorze spalania, który może sprzyjać konwersji azotu z paliwa w prekursory NO<sub>x</sub>. W niektórych badaniach wskazano na przeciwną tendencję, czyli zmniejszenie NO<sub>x</sub> ze wzrostem stężenia O<sub>2</sub> w atmosferze utleniającej.

Jak dotąd niewielu badaczy analizowało spalanie tlenowe w reaktorach ze złożem fluidalnym opalanych paliwami w 100% z biomasy. Duan i in. [134] przeprowadził serię eksperymentów na trzech rodzajach paliw z biomasy, tj. łusce ryżowej, zrębkach drzewnych i suchej mące drzewnej. Paliwa spalano pojedynczo oraz współspalano z węglem w atmosferze powietrza i kilku atmosferach utleniających (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, gdzie zawartość utleniacza zmieniała się w zakresie 21-40%) w komorze spalania z cyrkulacyjną warstwą fluidalną o mocy 10 kW<sub>th</sub>. Celem pracy było zbadanie emisji zanieczyszczeń wynikających ze współspalania biomasy z węglem w warunkach spalania tlenowego. Wyniki pokazują, że spalanie biomasy powoduje wyższą emisję NO i wyższy współczynnik konwersji azotu w paliwie niż spalanie węgla bez dodatku biomasy ze względu na wyższą zawartość substancji lotnych w biomacie.

W pracy [135] analizowano spalanie paliw biomasowych różnego pochodzenia w komorze spalania z pęcherzową warstwą fluidalną o mocy 12 kW. Podczas eksperymentu badano wpływ atmosfery na profile emisji gazów i temperatury. Natomiast prace [136,137] w odróżnieniu od wyżej wspomnianych zostały poświęcone analizie spalania pojedynczego ziarna biomasy. W pracy [136] analizowano proces spalania sferycznych „brykietów” uzyskiwanych w procesie rozdrobnienia i sprasowania biomasy agro (słoma pszeniczna i wierzba energetyczna) oraz biomasy leśnej (sosna zwyczajna) w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej w temperaturze 850°C. Podczas eksperymentu mierzono temperatury powierzchni i środka peletów, czas zapłonu, czas spalania części lotnych oraz całkowity czas spalania próbki. Zmierzono również emisje zanieczyszczeń: NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, HCl, HF i HCN. W eksperymencie [136] sferyczne „brykiety” wytworzone z wierzby (*Salix viminalis*) były spalane w warstwie fluidalnej w temperaturze 850°C i różnych atmosferach: atmosferze powietrza oraz atmosferach utleniających: 21% O<sub>2</sub> + 79% CO<sub>2</sub>, 30% O<sub>2</sub> + 70% CO<sub>2</sub> i 40% O<sub>2</sub> + 60% CO<sub>2</sub>. Wyniki eksperymentu wskazują, że skład atmosfery utleniającej silnie wpływa na proces spalania paliw z biomasy. Zastąpienie N<sub>2</sub> w środowisku spalania przez CO<sub>2</sub> spowodowało niewielkie opóźnienie zapłonu i mniejszą

maksymalną utratę masy podczas spalania nieprzetworzonej biomasy. Zwiększenie ilości utleniacza powodowało skrócenie czasu spalania.

W przypadku paliw RDF w literaturze można odnaleźć szereg badań dokumentujących proces spalania i współspalania RDF w warstwie fluidalnej [138-142]. Lu iin. [138] badał współspalanie RDF z węglem za pomocą symulacji numerycznej w złożu z pęcherzową warstwą fluidalną (BFB). Wyniki pokazują, że zawartość mieszanki RDF można zwiększyć do 30% bez większych modyfikacji opalanego węglem reaktora BFB, a minimalną emisję CO stwierdzono przy proporcji mieszania 20%. Mieszanie RDF z węglem pomogło zmniejszyć emisję  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ . Oprócz typowych zanieczyszczeń stwierdzono, że współspalanie RDF i węgla może zmniejszyć emisje i toksyczność WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych) i PCDD/F (polichlorowanych dibenzo- p- dioksyn i dibenzofuranów) [139]. W pracy [140] zbadano współspalanie komunalnych odpadów stałych i skały płonnej węgla w komorze spalania z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym. Skała płonna węgla to głównie materiał kamienny wydobywany podczas eksploatacji złóż węgla kamiennego uznany za nieużyteczny z powodu zbyt małej zawartości węgla. Jest to czarna lub ciemnoszara substancja przypominająca z wyglądu węgiel lub żużel. Skała płonna węgla jest jednym z największych stałych odpadów przemysłowych, charakteryzuje się niską wartością opałową oraz niską zawartością substancji lotnych [143, 144]. Podczas eksperymentów analizowano m.in. wpływ stosunku mieszania RDF i skały płonnej węgla, temperatury złoża i stosunku nadmiaru powietrza. Wykazano, że emisja  $\text{NO}_x$  oraz HCl wzrasta wraz ze wzrostem udziału MSW w mieszance, a emisja  $\text{SO}_2$  maleje. Wraz ze wzrostem temperatury złoża emisja CO maleje, natomiast emisje  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_2$  wzrastają. W zakresie temperatur 850–950°C emisja HCl jest umiarkowanie stabilna. Wzrost współczynnika nadmiaru powietrza stopniowo zwiększa emisję  $\text{NO}_x$ , ale nie ma znaczącego wpływu na emisję  $\text{SO}_2$ . Emisja HCl początkowo rośnie, a następnie maleje wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza. Dla typowych warunków pracy CFB ze współczynnikiem nadmiaru powietrza 1,4, temperaturą złoża 900°C i udziałem MSW 10% w mieszance, pierwotne emisje CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  i HCl wynoszą odpowiednio 52, 181, 3373 i 58 mg/Nm<sup>3</sup>.

W pracy [141] analizowano elastyczność paliwową kotła CFB. W instalacji o mocy 1 MW<sub>th</sub> współspalano pelety ze słomy i paliwo odpadowe (RDF) razem z węglem brunatnym przy pełnym i częściowym obciążeniu. Wilgotność węgla brunatnego wynosiła około 51% i mieściła się w typowym zakresie dla niewysuszonego węgla brunatnego

niskiej jakości. Słoma pochodziła z różnych rodzajów zbóż (np. jęczmienia, pszenicy, żyta, owsa). Pelety ze słomy zawierały 11,4% wilgotności, nie były wstępnie suszone lub toryfikowane, a podczas procesu produkcyjnego nie dodano żadnych innych substancji. W badaniach wykorzystano RDF w postaci puchu, charakteryzujący się wysoką zawartością wilgoci – 43,1%. Gęstość nasypowa RDF wynosiła tylko 190 kg/m<sup>3</sup> a większość cząstek była płaska (np. folie, papier, tekstylia). Węgiel brunatny i pelety ze słomy współspalano przy udziale 7–23% słomy w mieszance wsadu. Węgiel brunatny i RDF były współspalane przy udziale 16–28% RDF w mieszance wsadu. Przeprowadzono testy długoterminowe trwające od kilku godzin do kilku dni, aby sprawdzić długofalowe skutki współspalania. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że współspalanie RDF i słomy z węglem nie ma ujemnego wpływu na stabilność hydrodynamiczną złoża, udowodniono elastyczność paliwową CFB w przypadku trzech paliw niskiej jakości, które w znacznym stopniu różnią się właściwościami chemicznymi i fizycznymi.

Praca [142] dotyczy kwestii eksploatacyjnych związanych ze współspalaniem paliwa odpadowego (RDF) w postaci peletów w kotle CFB. Głównymi parametrami eksploatacyjnymi, które były monitorowane podczas eksperymentu to temperatura i rozkład ciśnień w palenisku, które reprezentują stan fluidyzacji i samo spalanie paliwa. Monitorowano również skład gazów spalinowych. RDF pochodził z odpadów komunalnych, produkowany metodą bio-suszenia opracowaną przez Institut Teknologi PLN Jakarta (STT PLN). RDF wytwarzany tą metodą może osiągnąć kaloryczność około 13,69 MJ/kg, przy ponad 95% zawartości substancji organicznych. Analizowano trzy udziały RDF w mieszance paliwowej z węglem – 5, 10 i 15%. Pelety RDF zawierały mniej siarki w porównaniu z węglem, co skutkowało niższym poziomem emisji SO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>S. Zanotowano również obniżenie emisji NO<sub>x</sub> co może wpłynąć na redukcję emisji gazów cieplarnianych.

## 4 TEZY PRACY

---

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury należy stwierdzić, iż zagadnienia związane z termiczną konwersją paliw biomasowych [119-137], paliw z odpadów [138-142], a także modyfikowanych paliw alternatywnych [87-97] są podejmowane od dawna przez szerokie grono badaczy. Również obecnie, z uwagi na trendy panujące w światowej energetyce, polegające na zastąpieniu paliw kopalnych przez źródła odnawialne, paliwa biomasowe i alternatywne, stanowią one obiekt badań wielu ośrodków naukowych. Ponadto, produkcja i wykorzystanie alternatywnych źródeł energii wpisuje się w koncepcję Gospodarki Obiegu Zamkniętego GOZ, która jest obecnie rekomendowana przez Komisję Europejską. Koncepcja ta dotyczy minimalizowania ilości odpadów poprzez ponowne użycie, recykling, wdrożenie odzysku, w tym traktowanie odpadów jako potencjalnego źródła surowców wtórnych oraz odzysku energii [145].

Spalanie w złożu fluidalnym jest wiodącą technologią pozwalającą na wykorzystanie różnorodnych paliw [141]. Wśród zalet technologii spalania fluidalnego wymienić należy oprócz elastyczności paliwowej, doskonały transfer ciepła, wysoką sprawność spalania, niższe temperatury spalania i wynikające z nich niskie emisje  $\text{NO}_x$  oraz dobrą kontrolę emisji  $\text{SO}_2$  [106]. Kotły fluidalne pozwalają ponadto na realizację dynamicznie rozwijającej się technologii oxy-combustion, która idealnie wpisuje się w panujące trendy ze względu na kluczowe zalety podwyższoną konwersję energii, a także możliwości bezpośredniej sekwestracji dwutlenku węgla [109-111].

Ze względu na zmienne własności paliw biomasowych [39-52] oraz odpadowych [36,59-83] wynikające z niejednorodnego składu, ich racjonalne wykorzystanie wiąże się z koniecznością uprzedniego szczegółowego rozpoznania tych paliw pod kątem właściwości paliwowych oraz dostosowania instalacji i technologii spalania. Nieprawidłowa temperatura kotła, atmosfera utleniająca, a także obecność materiału inertnego mogą skutkować wystąpieniem niepożądanych zjawisk, takich jak:

- wzrost straty niecałkowitego spalania,
- gromadzenie się osadów na powierzchniach grzewczych kotłów,
- tworzenie się spieków niespalonego ziarna paliwa, co może

w konsekwencji prowadzić do zmiany warunków hydrodynamicznych warstwy fluidalnej zakłócając pracę reaktora z warstwą fluidalną, a w skrajnych przypadkach doprowadzić do defluidyzacji złoża.



W literaturze brakuje szczegółowych informacji dotyczących analizy spalania dostępnych na rynku paliw alternatywnych typu pelet, wytwarzanych z biomasy i odpadów (RDF) w warstwie fluidalnej. Szczególnie istotne jest określenie kinetyki spalania tych paliw dla różnych temperatur i różnej koncentracji O<sub>2</sub>.

Stan wiedzy i praktyczne potrzeby w omawianym zakresie pozwoliły na sformułowanie następujących tez rozprawy doktorskiej:

- paliwa biomasowe oraz RDF mogą być dobrym uzupełnieniem paliw stosowanych w kotłach fluidalnych,
- typ paliw biomasowych oraz skład RDF ma istotne znaczenie przy wyborze parametrów pracy kotła fluidalnego tj. temperatury, strumienia materiału inertnego oraz atmosfery utleniającej,
- właściwe przygotowanie paliw alternatywnych na etapie produkcji może poprawić proces ich spalania/współspalania oraz zwiększyć wykorzystanie paliw biomasowych typu agro.

## 5 CEL I ZAKRES PRACY

---

W celu potwierdzenia postawionych w pracy tez podjęto się szczegółowej analizy procesu spalania wybranych paliw alternatywnych w warunkach warstwy fluidalnej.

Realizacja założonego celu była możliwa dzięki przedstawionemu poniżej zakresowi prac.

1. Badania wstępne wybranych paliw alternatywnych. W ramach tego zadania opracowano metodykę badań eksperymentalnych tj.:
  - a. przygotowano materiał badawczy,
  - b. dobrano parametry warstwy fluidalnej w zakresie:
    - temperatury,
    - atmosfery utleniającej,
    - natężenia koncentracji materiału inertnego.
2. Badania eksperymentalne spalania wybranych paliw w różnych warunkach warstwy fluidalnej, przy zmiennej temperaturze, atmosferze utleniającej i koncentracji materiału inertnego.
3. Przygotowanie mieszanego paliwa wtórnego z biomasy i RDF oraz analiza jego procesu spalania w różnej koncentracji materiału inertnego.
4. Analiza porównawcza kinetyki spalania badanych paliw alternatywnych z paliwem węglowym.

## 6 BADANIA WSTĘPNE

---

Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych spalania paliw w różnych warunkach warstwy fluidalnej przeprowadzono szereg czynności zmierzających do określenia własności fizykochemicznych wybranych paliw alternatywnych.

Badania wstępne obejmowały analizę techniczną tj. oznaczenie zawartości części lotnych, wilgoci, popiołu, wartości opałowej oraz analizę elementarną paliw w zakresie oznaczenia zawartości pierwiastków N, C, H, S w badanych paliwach.

Wyznaczanie powyższych parametrów jakościowych paliw alternatywnych jest utrudnione ze względu na:

- zróżnicowany skład chemiczny i udział poszczególnych składników tworzących paliwo tj. drewno, papier, plastik, guma, tekstylia i inne,
- zróżnicowanie właściwości fizykochemicznych materiałów tworzących paliwo,
- trudności w przygotowaniu (rozdrobnieniu i homogenizacji) reprezentatywnej próbki badanego paliwa.

### 6.1 METODYKA BADAŃ

Pierwszym etapem analizy technicznej było wyznaczenie zawartości wilgoci paliw. Zawartość wilgoci została oznaczona dwiema metodami: metodą suszarkową (PN-80/G-04511. Paliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci) oraz metodą termogravimetryczną. Podczas wyznaczania wilgoci metodą suszarkową wykorzystano suszarkę elektryczną oraz wagę laboratoryjną o dokładności 0,001 g. W drugiej metodzie wykorzystano analizator termogravimetryczny TGM800 firmy LECO – rys. 5.



*Rys. 5. Termograwimetryczny analizator wilgoci LECO*

Kolejnym etapem analizy technicznej było wyznaczenie zawartości popiołu oraz zawartość części lotnych. Oznaczenie zawartości części lotnych przeprowadzono według normy PN-81/G-04516. Oznaczenie zawartości popiołu przeprowadzono metodą powolnego spopielania według normy PN-80/G-04512. Podczas analiz wykorzystano laboratoryjny piec muflowy, oraz wagę laboratoryjną o dokładności 0,001 g.

Ciepło spalania wybranych paliw zostało wyznaczone na półautomatycznym kalorymetrze LECO AC600 – rys. 6.



*Rys. 6. Półautomatyczny kalorymetr LECO AC600*

Końcowym etapem badań jakościowych była analiza elementarna paliw, która została przeprowadzona na analizatorze elementarnym CHNSO serii FlashSmart, firmy Thermo Scientific – rys. 7.



Rys. 7. Analizator elementarny CHNSO serii FlashSmart

Analizator elementarny FlashSmart wykorzystuje metodę dynamicznego spalania próbek w reaktorze wypełnionym złożem katalitycznym utleniająco-redukcyjnym, w wybranej temperaturze  $<1800^{\circ}\text{C}$ .

## 6.2 MATERIAŁ BADAWCZY

Materiał badawczy stanowiły dostępne na rynku paliwa typu pelet, wytwarzane z biomasy i odpadów (RDF).

Proces produkcji peletu obejmuje cztery podstawowe etapy:

- mielenie,
- suszenie/dowilżanie,
- granulowanie,
- chłodzenie.

Surowiec do produkcji peletu jest rozdrabniany do jednolitej frakcji przy użyciu dedykowanych młynów. Frakcja surowca nie może przekraczać średnicy otworów matrycy w granulatorze. Następnie surowiec jest suszony do odpowiedniej wilgotności (12-18%). Surowce o zawartości wilgoci poniżej 12% są trudne do granulowania. Zatem surowce, które są zbyt suche wymagają dowilżania. W granulatorze odpowiednio przygotowany materiał jest włączany za pomocą rolek prasujących, znajdujących się na matrycy, do otworów matrycy, pod wysokim ciśnieniem i w wysokiej temperaturze. Matryce dobierane są na podstawie testów, ponieważ skład poszczególnych mieszanek surowca może się znacząco różnić i wpływać na finalną wydajność oraz jakość granulatu. Najczęściej średnice matryc wynoszą 6, 8 i 16 mm. Dla sektora energetycznego zwykle

wybijerane są matryce o średnicy 6 i 8 mm a dla cementowni 16 mm. W końcowym efekcie powstaje granulat w kształcie walca o długości 1-3 cm i średnicy wynikającej z użytej matrycy. Proces produkcji peletu kończy się schłodzeniem powstałego paliwa.

Do badań eksperymentalnych wybrano pelety z biomasy różnego pochodzenia tj. leśną oraz agro, po dwa rodzaje dla każdego typu – rys.8:

1) biomasa leśna:

- a. pelety z trociny dębowej (średnica 6 mm),
- b. pelety z mieszanki trocin 30%buk/70%dąb (średnica 6 mm),

2) biomasa agro:

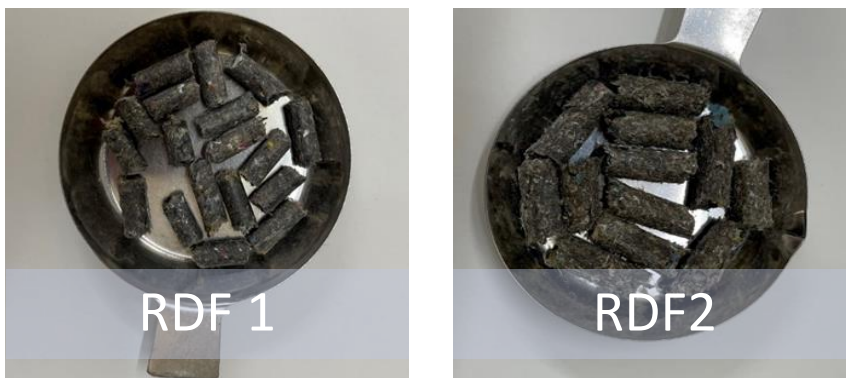
- a. pelety z łuski słonecznika (średnica 8 mm),
- b. pelety ze słomy (średnica 6 mm).



Rys. 8. Pelety z biomasy

W przypadku paliw z odpadów (RDF) do badań wybrano dwa paliwa – rys 9:

- RDF1 (średnica 6 mm),
- RDF2 (średnica 8 mm).



*Rys. 9. Pelety RDF 1 i RDF 2*

Paliwa z biomasy oprócz peletu z łuski słonecznika zostały zakupione na polskim rynku. Pelet z łuski słonecznika pochodził z Elektrowni Jaworzno III.

Pelety RDF zostały dostarczone przez polską firmę zajmującą się produkcją paliw tego typu. Ze względu na politykę firmy nie uzyskano zgody na publikację jej danych.

W celu przygotowania wymaganych w stosowanych normach tzw. próbek analitycznych, do analizy technicznej oraz elementarnej wszystkie pelety musiały być rozdrobnione w nożowym młynku. Widok przygotowanych próbek analitycznych paliwa RDF przedstawiono na rys. 10 i 11.



*Rys. 10. Pelety RDF1 o średnicy 6mm po zmieleniu*





Rys. 11. Pelety RDF2 o średnicy 8 mm po zmieleniu

Rozdrobnienie peletów do uziarnienia  $<1$  mm [146], pozwoliło ponadto na osiągnięcie właściwej homogenizacji materiału badawczego. Stwierdzono bardzo dobrą podatność na mielenie wszystkich paliw.

#### 6.2.1 Analiza techniczna i elementarna paliw biomasowych

Wyniki analizy technicznej paliw biomasowych przedstawiono w tab. 7. Na jej podstawie stwierdzono, iż sumaryczna zawartość części lotnych i wilgoci w biomasie w zależności od rodzaju paliwa wynosiła od 80,5 do 88,3%, a stała część palna od 7,3% do 12,3%. Najniższą zawartość popiołu miały pelety z biomasy leśnej (1,2-1,3%), pelet z łuski słonecznika 5,5%, pelet ze słomy 12,2%.

Otrzymane wyniki analizy technicznej wybranych paliw biomasowych porównano z danymi zamieszczonymi w literaturze [42]. Wyniki te były następujące:

- a. drewno dębowe:
  - zawartość popiołu: 0,5%,
  - zawartość części lotnych: 78,1%.
- b. łuska słonecznika:
  - zawartość popiołu: 4%,
  - zawartość części lotnych: 76,2%.

Porównanie uzyskanych w pracy wyników analizy technicznej z danymi przedstawionymi w [42] wskazuje, że badane pelety z biomasy charakteryzowały się parametrami typowymi dla wybranych paliw.



Tab. 7. Wyniki analizy technicznej paliw biomasowych

Pelety	Części lotne [%]	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Stałe części palne [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Trocina dębowa	79,6	8,7	1,2	10,5	18,2	16,5
30%buk /70%dąb	77,7	8,8	1,3	10,7	17,9	16,1
Łuska słonecznika	73,8	8,4	5,5	12,3	19,8	18,3
Słoma	71,8	8,7	12,2	7,3	16,2	14,7

Wyniki analizy elementarnej badanych peletów z biomasy zostały przedstawione w tab. 8-11. Porównując średnie wartości oznaczeń zawartości pierwiastków azotu, węgla, wodoru i siarki peletów z biomasy leśnej i agro z danymi literaturowymi [42] (tab. 2) stwierdzono, że uzyskane wyniki zawartości poszczególnych pierwiastków są zbliżone.

Tab. 8. Wyniki analizy elementarnej peletu z trociny dębowej

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	0,10	47,15	6,14	0,00
2	0,00	46,98	6,10	0,00
3	0,00	47,10	6,15	0,00
4	0,00	47,17	6,04	0,00
5	0,00	47,03	5,95	0,00
<b>Średnio</b>	<b>0,02</b>	<b>47,09</b>	<b>6,08</b>	<b>0,00</b>
Odchylenie standardowe	0,04	0,08	0,08	0,00

Tab. 9. Wyniki analizy elementarnej peletu z trociny 30%buk /70%dąb

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	0,02	47,14	6,18	0,00
2	0,00	47,12	6,12	0,00
3	0,00	46,88	6,09	0,00
4	0,04	47,01	5,94	0,00
5	0,00	47,13	6,01	0,00
<b>Średnio</b>	<b>0,01</b>	<b>47,06</b>	<b>6,07</b>	<b>0,00</b>
Odchylenie standardowe	0,02	0,11	0,09	0,00

Tab. 10. Wyniki analizy elementarnej peletu ze słomy

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	0,36	41,93	5,62	0,00
2	0,21	42,14	5,57	0,00
3	0,26	42,99	5,84	0,00
4	0,21	42,67	5,60	0,00
5	0,33	42,57	5,73	0,00
<b>Średnio</b>	<b>0,27</b>	<b>42,46</b>	<b>5,67</b>	<b>0,00</b>
Odchylenie standardowe	0,07	0,42	0,11	0,00

Tab. 11. Wyniki analizy elementarnej peletu z łuski słonecznika

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	0,66	48,13	6,01	0,00
2	0,63	47,82	6,02	0,00
3	0,74	48,11	6,10	0,00
4	0,72	48,00	6,15	0,00
5	0,66	45,75	5,76	0,00
<b>Średnio</b>	<b>0,68</b>	<b>47,56</b>	<b>6,01</b>	<b>0,00</b>
Odchylenie standardowe	0,05	1,02	0,15	0,00

W przypadku paliw z biomasy uzyskano bardzo wysoką powtarzalność wyników, a odchylenie standardowe w przypadku biomasy drzewnej wynosi 0-0,11%, natomiast biomasy agro 0-1,02%. Największą różnicę zaobserwowano dla węgla pierwiastkowego w pelecie z łuski słonecznika 1,02%.

#### 6.2.2 Analiza techniczna i elementarna paliw RDF

Wyniki analizy technicznej paliw RDF przedstawiono w tab. 12. Największą różnicę odnotowano w wilgotności wybranych paliw RDF. Pelet RDF2 charakteryzował się ponad 3,5 razy wyższą zawartością wilgoci niż pelety RDF1. Pozostałe parametry były do siebie zbliżone.

Podobnie jak w przypadku biomasy, otrzymane wyniki analizy technicznej paliw RDF porównano z dostępnymi danymi literaturowymi [147], zamieszczone wyniki analizy technicznej dla trzech próbek peletów RDF prezentują się następująco:

- zawartość wilgoci 8,8-14,3%,
- zawartość części lotnych 66,8-78,3%,
- zawartość stałych części palnych 8,4-9,5%,
- zawartość popiołu 8,3-20,5%.

Wyniki te wskazują, że paliwo typu RDF może charakteryzować się znaczną zmiennością składu. Porównując wyniki analizy technicznej badanych w pracy peletów RDF1 oraz RDF2 (tab. 12) z danymi literaturowymi [147] stwierdzono, iż zawartość poszczególnych składników paliwa w większości przypadków mieści się w zaczerpniętych z literatury zakresach. Największe rozbieżności występują w przypadku zawartości wilgoci oraz stałej części palnej.

Tab. 12. Wyniki analizy technicznej peletów RDF1 i RDF2

Pelety	Części lotne [%]	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Stałe części palne [%]	Ciepło spalania [MJ/kg]	Wartość opałowa [MJ/kg]
RDF1	76,9	2,1	13,8	7,3	22,5	21,0
RDF2	74,4	7,4	12,1	6,0	21,3	19,6

Wyniki analizy elementarnej paliw RDF1 i RDF2 zostały przedstawione w tab. 13 i 14. Zauważono, że skład elementarny paliw RDF jest bardzo zbliżony do przedstawionych w literaturze tego typu paliw. Przykładem może być np. paliwo RDF badane w pracy [141], które zawierało następujące zawartości pierwiastków C: 54,8%, H: 7,3%, N: 0,96%, i S: 0,29%.

Tab. 13. Wyniki analizy elementarnej peletów RDF 1

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	0,99	54,57	4,95	0,29
2	1,09	57,1	6,78	0,25
3	0,97	53,74	8,1	0,14
4	0,88	51,27	7,62	0,15
5	1,22	52,52	7,45	0,09
<b>Średnio</b>	<b>1,03</b>	<b>53,84</b>	<b>6,98</b>	<b>0,18</b>
Odchylenie standardowe	0,13	2,21	1,23	0,08

Tab. 14. Wyniki analizy elementarnej peletów RDF 2

Próbka	Azot, N [%]	Węgiel, C [%]	Wodór, H [%]	Siarka, S [%]
1	1,26	48,09	7,28	0,27
2	0,44	56,40	8,49	0,24
3	0,34	61,97	8,84	0,19
4	0,46	50,86	6,88	0,26
5	0,97	53,74	8,10	0,14
<b>Średnio</b>	<b>0,69</b>	<b>54,21</b>	<b>7,92</b>	<b>0,22</b>
Odchylenie standardowe	0,40	5,34	0,82	0,05

Porównując wyniki analizy elementarnej RDF do paliw biomasowych wyraźnie widoczna jest większa zmienność składu elementarnego. Odchylenia standardowe dla RDF1 wynosiły 0,08-2,21%, natomiast dla RDF2 0,05-5,34%. Przykładowo porównując skrajne wyniki zawartości azotu w RDF2, wynoszące dla próbki 1 - 1,26% oraz dla próbki 3 - 0,34%, uzyskano blisko czterokrotną różnicę.

## 7 BADANIA EKSPERYMENTALNE PROCESU SPALANIA PALIW BIOMASOWYCH ORAZ PALIW RDF W WARSTWIE FLUIDALNEJ W RÓŻNYCH WARUNKACH PROCESOWYCH

---

Spalanie paliw w atmosferze powietrza zachodzące w kotłach rusztowych i pyłowych zasadniczo różni się od procesu ich spalania w warstwie fluidalnej.

W przypadku kotłów rusztowych spalanie odbywa się na ruszcie, przez który doprowadzane jest niezbędne do spalania powietrze. Komora spalania podzielona jest na dwie części, pierwotną, w której następuje podgrzewanie, suszenie, a następnie zgazowanie paliwa przy niedoborze powietrza oraz wtórną, w której następuje dopalenie mieszanki gazowej z komory pierwotnej przy nadmiarze powietrza. Końcową fazą spalania jest dopalenie paliwa na powierzchni rusztu jako pozostałości po zgazowaniu, którego śladowe ilości znajdują się w warstwie popiołu.

Spalanie paliw w konwencjonalnych kotłach pyłowych jest technologią wymagającą mielenia surowca do rozmiarów pyłu, a następnie wdmuchiwanie go do komory paleniskowej i spalania w tzw. długim płomieniu. Spalanie to odbywa się w całej objętości komory paleniskowej.

Z kolei w palenisku ze złożem fluidalnym znajduje się ruszt, nad którym znajduje się warstwa ziarnistego materiału (piasek kwarcowy, paliwo, popiół, sorbent). Przepływające przez ruszt powietrze wywołuje zjawisko fluidyzacji, czyli zawieszenie materiału stałego w strumieniu przepływającego gazu fluidyzującego. Spalanie paliwa odbywa się w złożu.

Zgodnie z tematem pracy podjęto się kompleksowej analizy procesu spalania ziaren paliw biomasowych oraz paliw RDF w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego w różnych warunkach procesowych. W celu porównania wyników z procesem spalania paliw w atmosferze powietrza przeprowadzono również analizę procesu spalania paliw bez materiału inertnego w takich samych warunkach.

### 7.1 METODYKA BADAWCZA

Badania eksperymentalne procesu spalania paliw biomasowych oraz RDF w różnych warunkach warstwy fluidalnej zostały przeprowadzone dla 6 paliw, których charakterystyka została przedstawiona w poprzednim rozdziale.

Poszczególne ziarna do badań eksperymentalnych zostały wyselekcjonowane pod względem dwóch parametrów: masy oraz powierzchni zewnętrznej. Masa wyselekcjonowanych z ogółu materiału ziaren wynosiła każdorazowo  $0,7 \pm 0,1$ g.

Z uwagi na kształt badanych ziaren ustalono, że ziarna peletów będą wprowadzane do komory spalania w taki sposób, że podstawy walca będą równoległe do strugi materiału inertnego co zapewnia największą powierzchnię kontaktu ziarna z materiałem inertnym – rys. 15. Aby zapewnić zbliżoną powierzchnię kontaktu materiału inertnego z ziarnami o różnej średnicy dobrano ziarna o odpowiedniej długości, w przypadku ziaren o średnicy 6mm długość peletu wynosiła  $18 \pm 0,5$ mm, w przypadku ziaren o średnicy 8mm  $14 \pm 0,5$ mm.

### 7.1.1 Stanowisko eksperymentalne

Schemat stanowiska badawczego wykorzystywanego podczas badań eksperymentalnych procesu spalania paliw w warstwie fluidalnej został przedstawiony na rys. 12. Natomiast jego widok zamieszczono na rys. 13. Budowa stanowiska umożliwiała zamodelowanie warunków odpowiadających warunkom cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej oraz gwarantowała powtarzalność warunków pomiaru dla każdego spalanego ziarna paliwa stałego. Możliwa była rejestracja danych eksperymentalnych i wizualizacja badanego procesu (rys. 13). Stanowisko składało się z następujących głównych elementów: zasobnika materiału inertnego (1), rury opadowej (16) oraz komory paleniskowej (9). Podgrzewanie stanowiska do odpowiedniej temperatury odbywało się za pomocą 5 grzałek o łącznej mocy 20kW. Komora spalania zbudowana została z ceramiki odpornej na wysoką temperaturę. Na ściankach obmurza zabudowano grzałki elektryczne o mocy 4kW każda, wykonane z żaroodpornego drutu kantelowego. W przedniej części komory paleniskowej zamontowano szkło kwarcowe (rys. 13), które umożliwiała obserwację procesu spalania. W górnej części komory znajdował się otwór, poprzez który doprowadzano w obszar spalania piasek kwarcowy. W bocznej ścianie komory wykonane zostały dwa otwory umożliwiające wprowadzanie badanego pojedynczego ziarna paliwa za pomocą suportu oraz gazu tworzącego atmosferę spalania.

Komora paleniskowa podczas badań w atmosferze powietrza zasilana była powietrzem z wentylatora (7). Przy zastosowaniu falownika możliwa była płynna regulacja prędkości obrotowej wentylatora, co pozwalało na łatwą regulację natężenia strumienia powietrza. Doprowadzane powietrze było ogrzewane w sekcji grzewczej nagrzewnicy

powietrza (6). Natomiast w przypadku atmosfer utleniających innych niż powietrze, komora była zasilana z dwóch butli, w których znajdowały się O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>. Przy pomocy mieszalnika (2) wytwarzano pożądaną atmosferę spalania. Nastawy mieszalnika były kontrolowane przez analizator gazów OXYBABY marki WITT. Rotametr (5) służył do pomiaru strumienia objętości gazu. Pojedyncze ziarno paliwa stałego umieszczano na uchwycie szalki (10) wagi tensometrycznej (11).

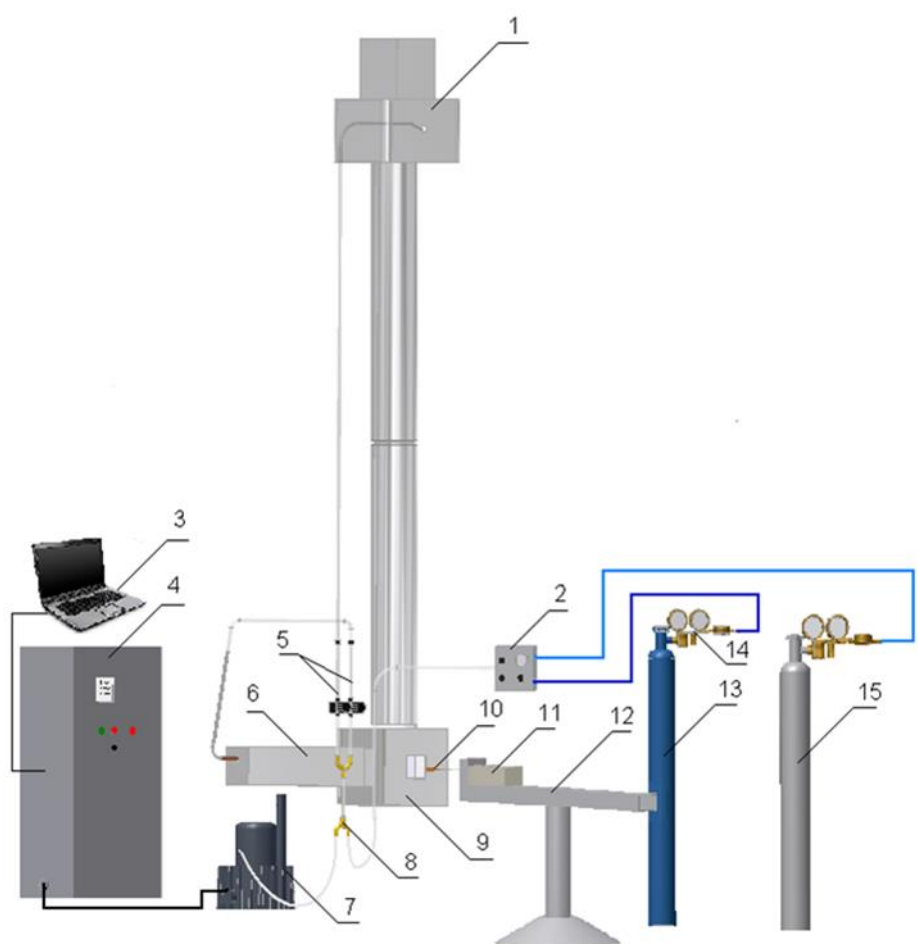
Układ pomiarowy wykorzystany w trakcie badań przedstawiono na rys. 14a i 14b. Do przemieszczania ziarna służył układ jezdny (12). Poprzez mostkowe przetworniki tensometryczne sygnał z wagi kierowany był do terminala wagowego „TW-2”. Zmiany sygnału wywoływane zmianą obciążenia przetworników tensometrycznych po wzmacnieniu, filtrowaniu i obróbce przez mikroprocesor wyświetlane były on-line na wyświetlaczu szafy w jednostkach masy – rys 15.

Regulacja temperatury we wszystkich sekcjach pomiarowych stanowiska (4) była możliwa dzięki rozdzielnicy elektrycznej z układem mikroprocesorowym firmy Vision. Pomiary temperatur odbywały się przy użyciu termopar PtRh10-Pt. Odpowiednio zaprogramowany układ gwarantował kontrolę parametrów pracy wentylatora oraz temperatur wszystkich sekcji grzewczych, rejestrację oraz archiwizację wartości masy ziarna, wykorzystano program: VisilLogic. Próbkowanie pomiarów masy spalanych ziaren paliw odbywało się z częstotliwością 0,5 Hz.

Podczas badań eksperymentalnych spalania ziaren paliw biomasowych i RDF wykorzystano piasek kwarcowy o uziarnieniu 0-0,63 μm. Piasek kwarcowy o tym uziarnieniu jest wykorzystywany w rzeczywistych kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną do formowania warstwy oraz jej uzupełniania.

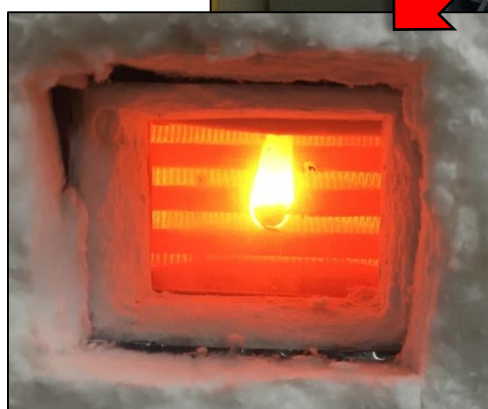
Przygotowany materiał inertyny wprowadzono do zasobnika, gdzie po zaprogramowaniu parametrów procesu (tj. pracy wentylatora oraz temperatury w odpowiednich sekcjach stanowiska) następowało jego wygrzewanie w zasobniku. Po osiągnięciu zadanej temperatury przez materiał inertyny przystępowano do wygrzewania pozostałych sekcji stanowiska: komory spalania, rury rozpędowej (16), która została wykonana ze szkła kwarcowego oraz nagrzewnicy powietrza. Pod zasobnikiem piasku umieszczono zawór syfonowy, który służył do regulacji strumienia masy materiału Gs. Gdy wartości temperatur osiągały zadane wartości, na uchwycie wagi tensometrycznej umieszczano wcześniej przygotowane pojedyncze ziarno paliwa. Następnie odkręcano zawór regulacyjny materiału inertynego, w celu doprowadzenia

materiału inertnego do komory paleniskowej. Gdy ustawiono wybrane natężenie strumienia materiału inertnego, za pomocą suportu wagi tensometrycznej ziarno paliwa było wprowadzone do komory spalania. Wówczas rozpoczynano rejestrację pomiaru za pomocą polecenia START wybieranego na ekranie szafy sterowniczej – rys. 15. Rejestrowana chwilowa wartość masy spalanego ziarna była wyświetlana na bieżąco na czytniku wagi tensometrycznej. Gdy wartość masy ziarna osiągała wartość zerową, bądź pozostawała na niezmiennym poziomie, pomiar zatrzymywano poprzez wybór polecenia STOP na ekranie szafy sterowniczej – rys. 15. W celu wyznaczenia średniego strumienia masy materiału inertnego  $G_s$  podczas pomiaru, każdorazowo po pomiarze mierzono masę wykorzystanego piasku, zgromadzonego w zbiorniku znajdującym się pod komorą paleniskową.



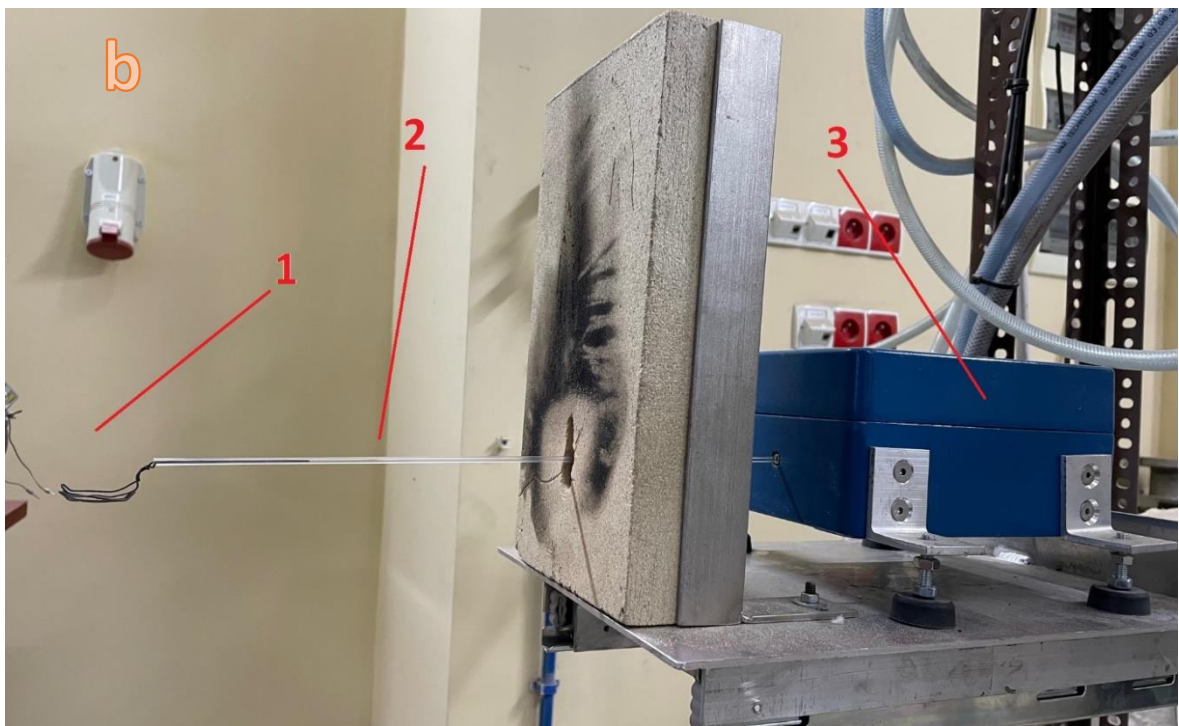
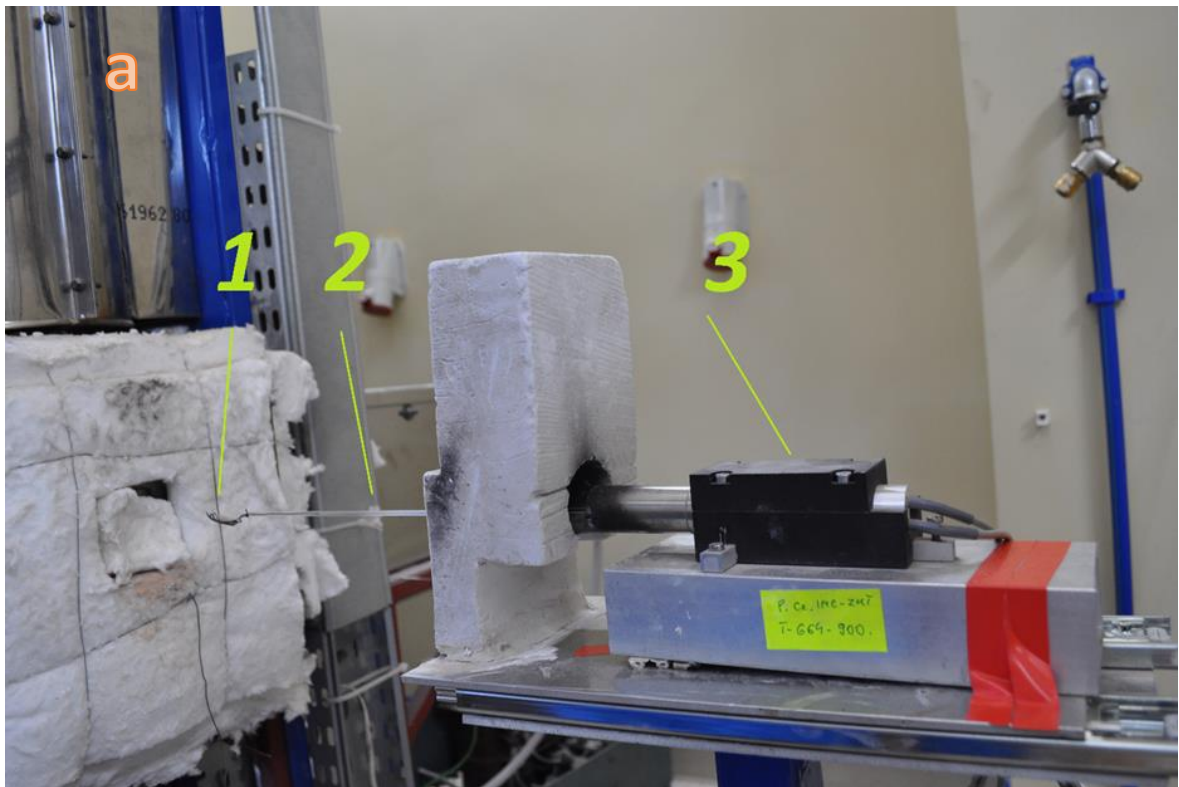
1 – pojemnik na piasek kwarcowy, 2 – mieszalnik, 3 – laptop, 4 – szafka sterująca, 5 – rotametry, 6 – nagrzewnica, 7 – wentylator, 8 – trójnik, 9 – komora spalania, 10 – koszyk na ziarno, 11 – waga tensometryczna, 12 – platforma wjazdowa, 13, 15 – butle z gazem technicznym, 14 – reduktor, 16 – rura opadowa

Rys. 12. Schemat stanowiska eksperymentalnego



*Rys. 13. Widok stanowiska eksperymentalnego oraz wnętrza komory spalania podczas eksperymentu*





Rys. 14. Układ pomiarowy ubytku masy próbki paliwa stałego. 1 – uchwyt na próbkę, 2 – ramię wagi tensometrycznej, 3 – waga tensometryczna



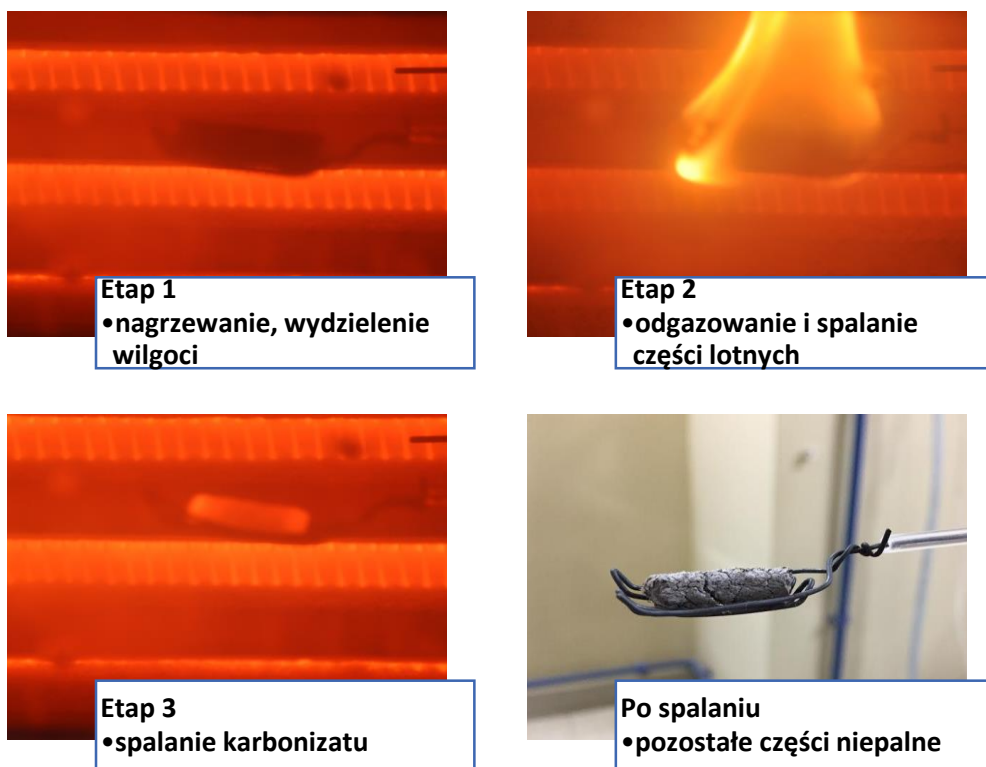
Rys. 15. Wyświetlacz szafy sterowniczej

W pierwszym etapie badań eksperymentalnych analizowano wpływ temperatury paleniska oraz materiału inertnego na szybkość ubytku masy badanych paliw.

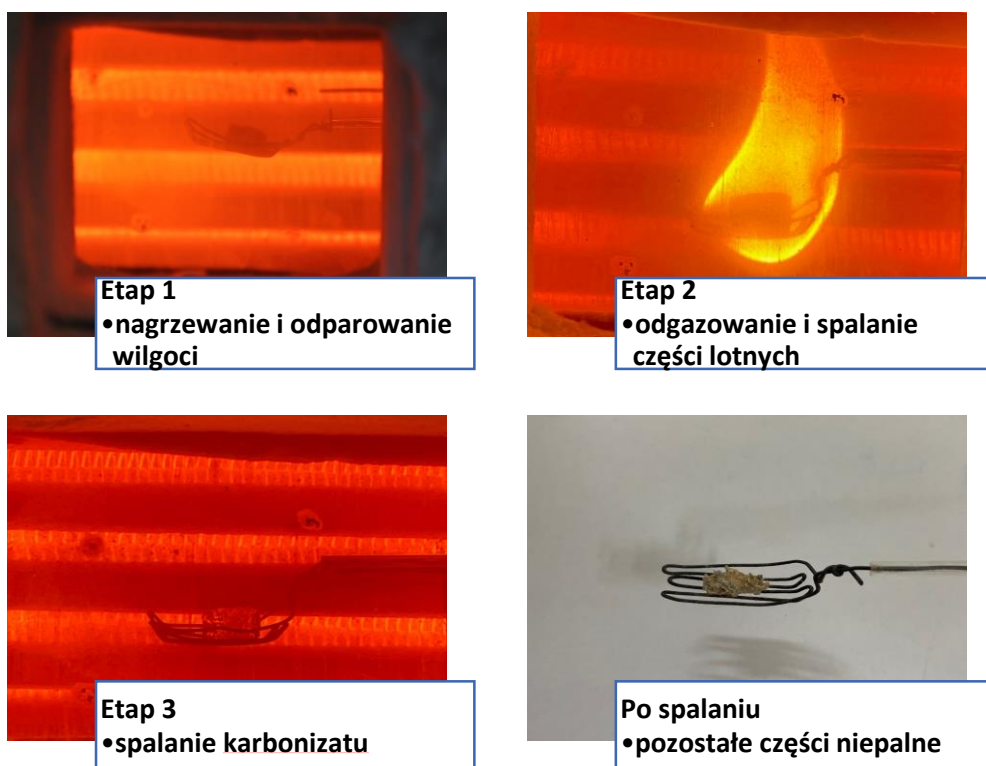
Początkowo ziarna wszystkich paliw spalano w atmosferze powietrza bez przepływu materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w trzech ustalonych w komorze paleniskowej temperaturach tj. 650, 750 oraz 850°C. Pozwoliło to na porównanie wyników przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  z wynikami ubytku masy ziaren paliw podczas ich spalania w strumieniu materiału inertnego  $G_s>0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Podczas badań eksperymentalnych, dzięki możliwości wizualizacji procesu spalania na stanowisku, wykonano fotografie w trakcie procesu spalania paliw biomasowych – rys. 16 oraz RDF – rys. 17 spalanych przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Spalanie paliwa jest bardzo złożonym, wieloetapowym procesem przemian fizykochemicznych. Każde paliwo podlegające spalaniu przechodzi przez szereg etapów. Poszczególne etapy spalania paliwa stałego tj. nagrzewanie ziarna, wydzielenie wilgoci, odgazowanie i spalanie części lotnych oraz zapłon i spalanie karbonizatu mogą występować kolejno po sobie lub wzajemnie się nakładać.



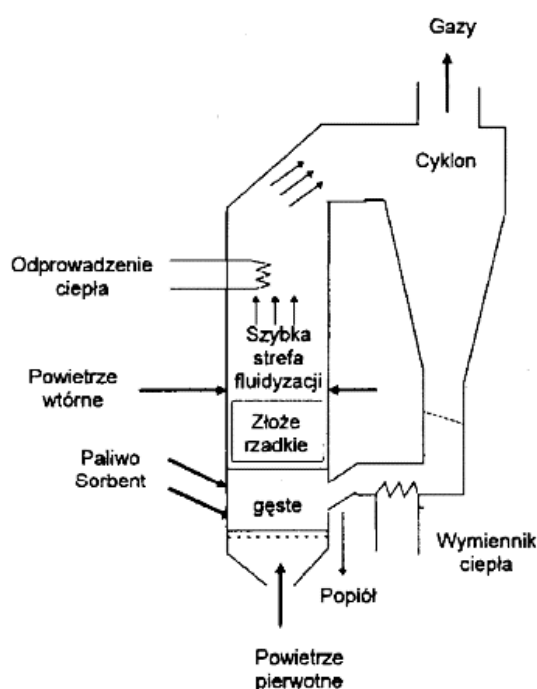
Rys. 16. Etapy spalania peletu z biomasy (pelet z trociny dębowej) bez materiału inertnego,  $G_s=0$



Rys. 17. Etapy spalania peletu RDF2 bez materiału inertnego,  $G_s=0$

Następnie dokonano pomiaru ubytku masy ziaren wszystkich paliw podczas spalania w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego przy  $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Przyjęty w badaniach zakres koncentracji materiału inertnego był charakterystyczny dla

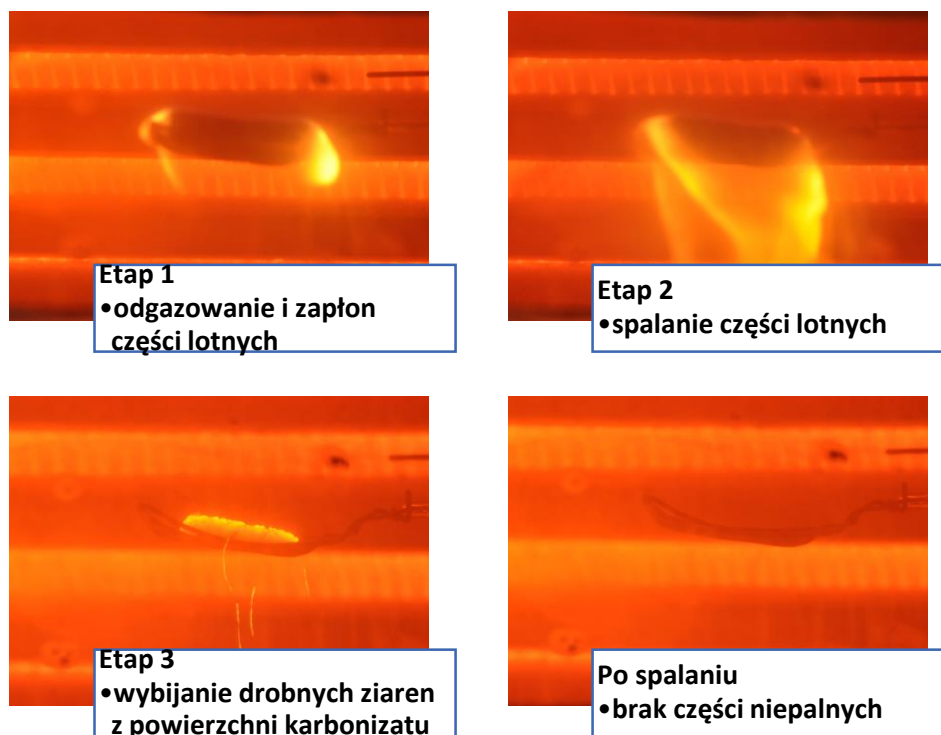
cyrkulacyjnego złoża fluidalnego, w strefie tzw. „szybkiej fluidyzacji” – rys. 18, która znajduje się w środkowej strefie paleniska, powyżej miejsca doprowadzenia powietrza wtórnego oraz w jego górnej części. W dolnej strefie kotła, nad rusztem występuje wysoka koncentracja materiału, która powoduje, że jej struktura jest zbliżona do gęstej warstwy pęcherzowej. Wraz z wysokością kotła maleje koncentracja materiału, zmieniając jego poprzeczny profil prędkości. W centralnej części przepływu występuje rozrzedzony przepływ warstwy w górę paleniska, a w wyniku wewnętrznej recyrkulacji w dół przy ściankach parownika. Znaczne ilości ziaren paliwa stałego spala się właśnie w tej strefie.



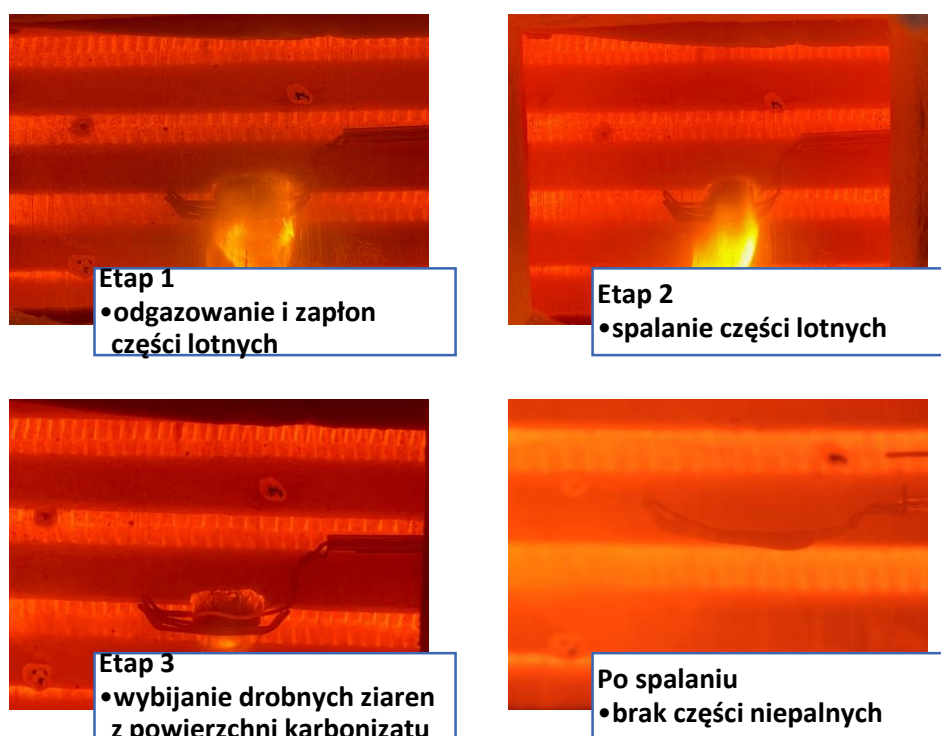
Rys. 18. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym, wraz z zaznaczonymi strefami spalania [148]

Spalanie przykładowego ziarna biomasy oraz RDF w warunkach dwufazowego przepływu z udziałem materiału inertywnego  $G_s > 0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  zamieszczono na rys. 19 i 20. Cechą charakterystyczną podczas spalania paliw stałych w reaktorze fluidalnym jest, iż ziarno paliwa nieustannie kontaktuje się z ziarnami materiału inertywnego. W porównaniu do fotografii przedstawiających spalanie w atmosferze powietrza (rys. 16 i 17) zauważamy, że ziarno zapala się niemal natychmiast po wprowadzeniu do komory spalania. Powodem, tego jest kontakt paliwa z rozgrzonym do temperatury  $850^\circ\text{C}$  materiałem inertywnym. Zmianie ulega również kształt i obszar płomienia, który wraz z przepływem dwufazowym jest kierowany poprzez konwekcję wymuszoną w dół komory. Po spaleniu się części lotnych, górna powierzchnia ziarna paliwa jest intensywnie rozbijana przez uderzające w nie ziarna materiału inertywnego. Efektem tego są drobne iskry

widoczne w etapie 3. Istotną różnicą dla obu przypadków jest brak popiołu po spalaniu ziarna przy  $G_s > 0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , który zostaje usunięty w wyniku oddziaływania materiału inertnego.



Rys. 19. Etapy spalania peletu z biomasy (na przykładzie peletu z trociny dębowej) w atmosferze powietrza w strudze materiału inertnego



Rys. 20. Etapy spalania peletu RDF2 w atmosferze powietrza w strudze materiału inertnego



Temperatura panująca w komorze kotła fluidalnego jest jednym z jego najważniejszych parametrów eksploatacyjnych. Średnia temperatura utrzymywana w reaktorze kotła fluidalnego podczas spalania wynosi 850°C [106]. Temperatura ta umożliwia optymalizowanie sprawności procesu odsiarczania oraz zapewnia niską emisję NO<sub>x</sub>. Istotnym czynnikiem wpływającym na temperaturę warstwy jest również temperatura mięknięcia popiołu. W zależności od warunków panujących w kotle oraz typu zastosowanego paliwa (przykładowo biomasa) może ona wynosić nawet 650°C. Reaktory fluidalne są również wykorzystywane do przetwarzania biomasy oraz paliw RDF w innych procesach m.in. szybkiej pirolizy i zgazowania. Proces szybkiej pirolizy biomasy odbywa się w temperaturze 450–550 °C [149], natomiast proces zgazowania wymaga wyższej temperatury >750 °C [150]. W przypadku paliw RDF oba procesy tj. piroliza oraz zgazowanie są prowadzone w tym samym zakresie temperatur 600-800°C. [151,152].

Ze względu na powyższe badania eksperymentalne procesu spalania paliw biomasowych i RDF prowadzono w trzech temperaturach tj.: 650, 750 oraz 850°C.

W drugim etapie badań eksperymentalnych analizowano wpływ udziału tlenu w mieszaninie z dwutlenkiem węgla podczas procesu spalania. Podobnie jak w etapie pierwszym początkowe badania prowadzono przy  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s, a następnie w strudze materiału inertnego modelującej warunki warstwy fluidalnej, przy  $G_s = 2,5$  oraz 5 kg/m<sup>2</sup>s. Badania procesu spalania prowadzono w jednej temperaturze wynoszącej 850°C i zmiennej koncentracji utleniacza O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>:

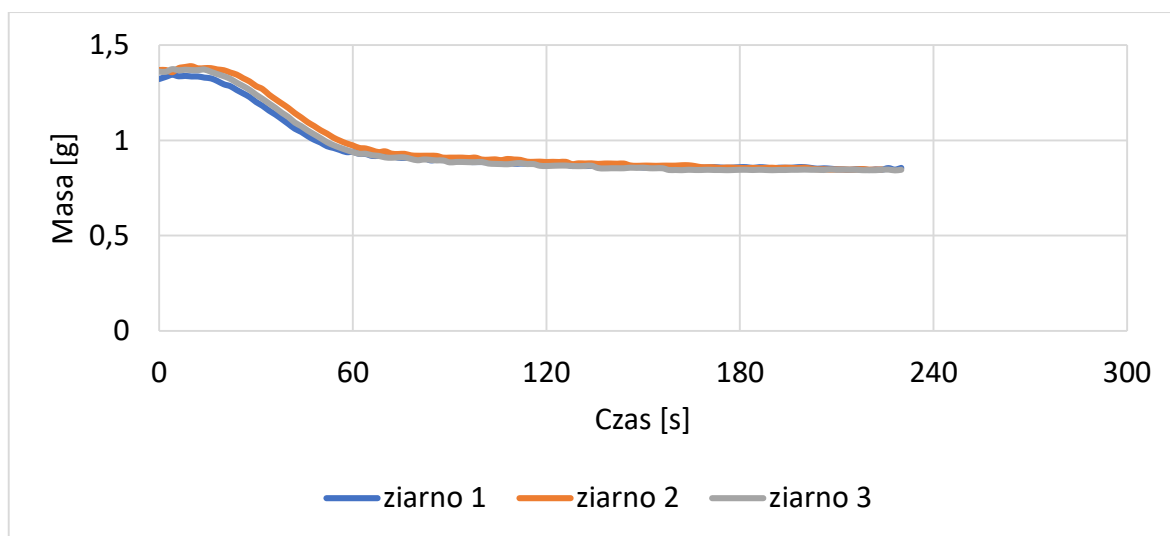
- 21%/79%,
- 25%/75%,
- 30%/70%.

#### 7.1.2 Opracowanie wyników badań

Jednym z trudniejszych wyzwań podczas badań eksperymentalnych było uzyskanie z zarejestrowanych chwilowych wartości masy, rzeczywistego przebiegu procesu spalania pojedynczego ziarna paliwa. Z tego powodu koniecznym było: wyodrębnienie z zarejestrowanego sygnału rzeczywistego czasu procesu, chwilowej masy ziarna bez masy uchwytu oraz masy wynikającej z siły oddziaływania materiału inertnego. Na tej podstawie możliwa była aproksymacja rzeczywistego przebiegu procesu spalania ziarna w analizowanych warunkach.

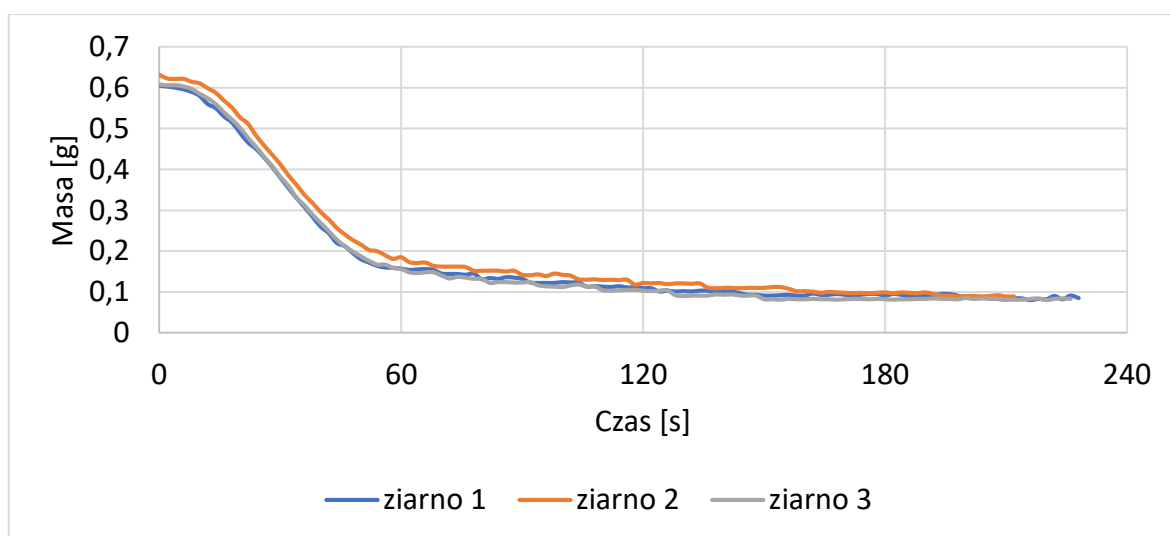
Metodyka uzyskiwania rzeczywistego przebiegu procesu spalania została przedstawiona na przykładzie pomiaru ubytku masy ziarna RDF1 podczas spalania w temperaturze 650°C przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  oraz w strumieniu materiału inertnego, przy  $G_s = 2,5$  oraz  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

W każdym analizowanym przypadku dokonano minimum trzykrotnego pomiaru ubytku masy ziarna paliwa. Rys. 21 przedstawia wyniki pomiaru masy ziarna paliwa podczas spalania, a uzyskane bezpośrednio z programu rejestrującego. Stanowią one sumę chwilowej masy ziarna oraz masy uchwytu.



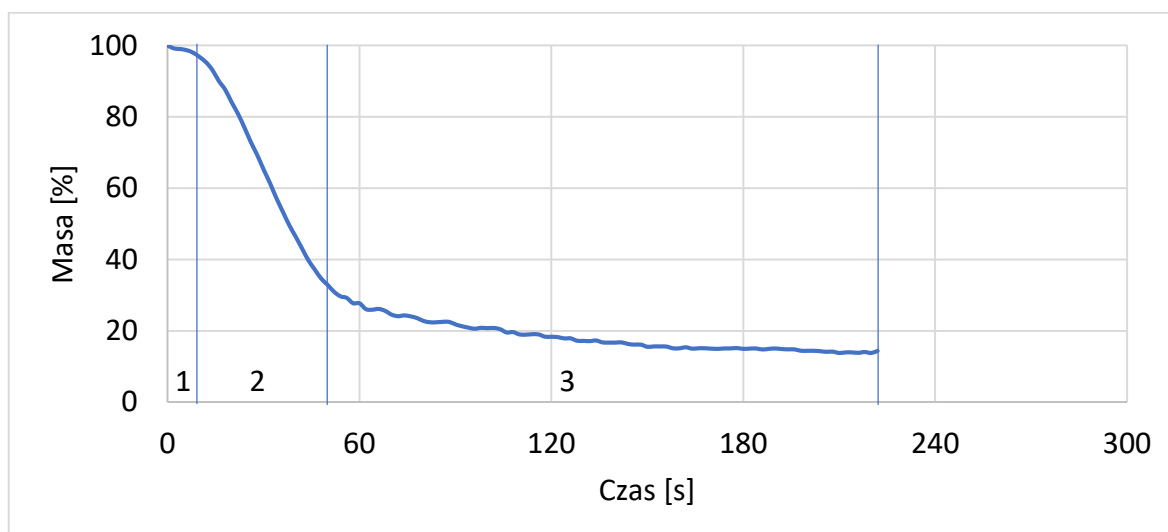
Rys. 21. Zarejestrowany przebieg ubytku masy podczas spalania RDF1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C

Kolejny rysunek przedstawia ten sam przebieg ubytku masy ziarna, ale po odjęciu masy uchwytu.



Rys. 22. Ubytek masy ziarna podczas spalania RDF 1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C

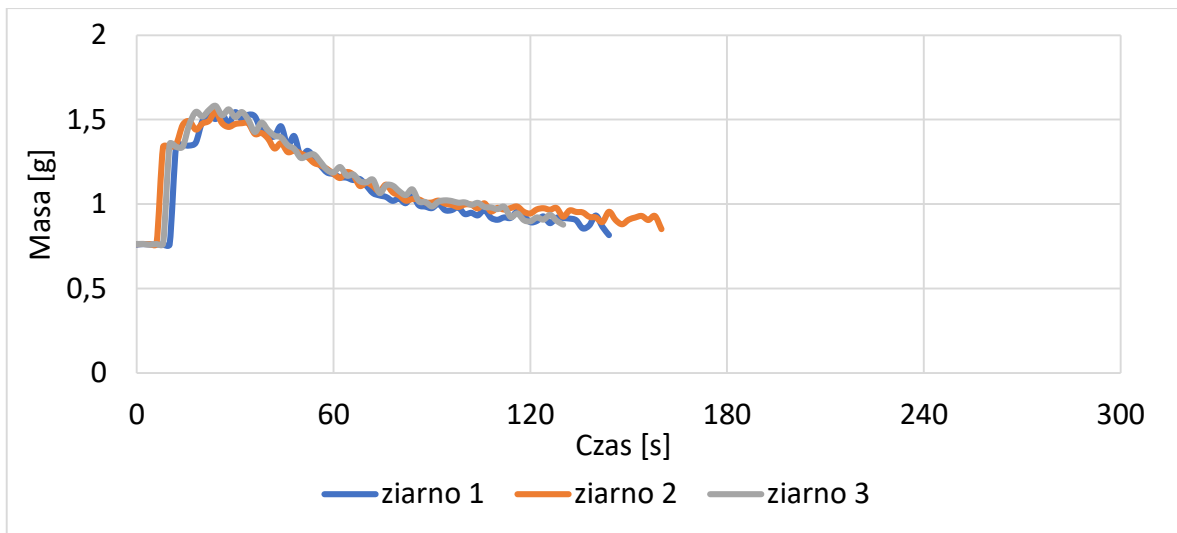
Końcową czynnością było otrzymanie średniego przebiegu ubytku masy spalanych ziaren peletu w tych samych warunkach – rys. 23. Na podstawie otrzymanego przebiegu możliwa jest analiza procesu średniego ubytku masy spalanego ziarna w czasie rzeczywistym oraz oszacowanie czasu poszczególnych etapów spalania. W początkowej fazie procesu spalania ma miejsce nagrzewanie ziarna i odparowanie wilgoci widoczne jako niewielki ubytek masy (1). Czas nagrzewania ziarna i odparowania wilgoci ziarna wynosi około 10 s tj. około 4,5% całkowitego czasu spalania ziarna. Następnym widocznym etapem jest zapłon i spalanie części lotnych (2), który charakteryzuje się gwałtownym ubytkiem masy. Ostatni etap to powolny proces ubytku masy karbonizatu (3). Zapłon i spalanie części lotnych trwa ok. 50 s (22,5% całkowitego czasu spalania ziarna). Wypalanie karbonizatu trwa najdłużej, ok. 160 s (73% całkowitego czasu spalania ziarna).



Rys. 23. Ubytek masy podczas spalania RDF 1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C, gdzie 1 – etap nagrzewania i odparowania wilgoci, 2 – zapłon i spalanie części lotnych, 3 – spalanie karbonizatu

Kolejny etap badań eksperymentalnych dotyczył spalania paliwa RDF1 w strumieniu materiału inertnego. Rys. 24 przedstawia zarejestrowane wyniki chwilowego ubytku masy podczas spalania ziaren RDF1.



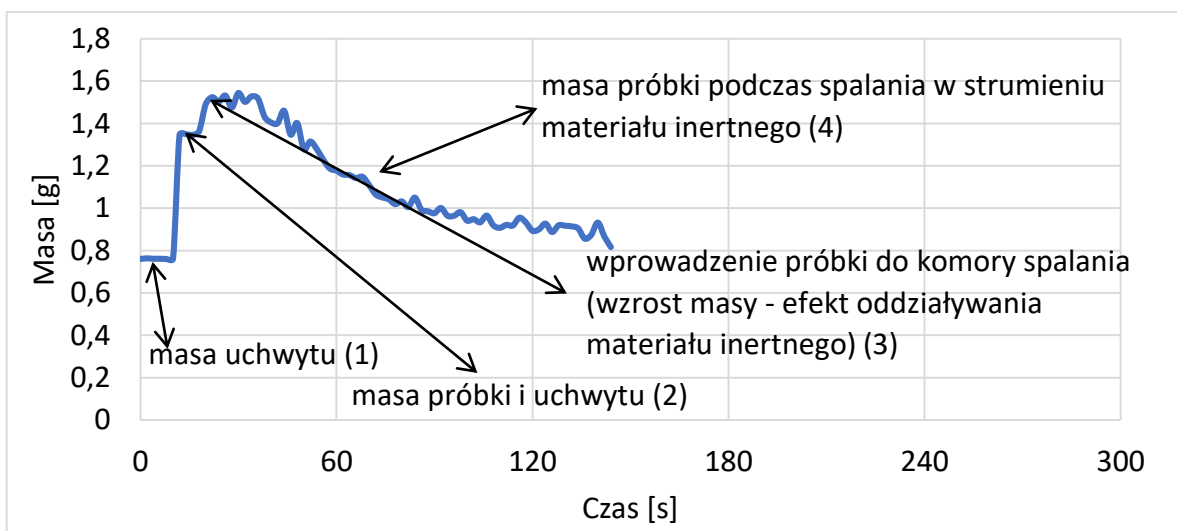


Rys. 24. Wyniki pomiarów ubytku masy peletów RDF1 spalanych w temperaturze 650°C i strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  uzyskane z programu rejestrującego, przed opracowaniem

W celu szczegółowej analizy otrzymanego przebiegu na rys. 25 przedstawiono pojedynczą krzywą obrazującą ubytek masy podczas spalania pojedynczego ziarna paliwa.

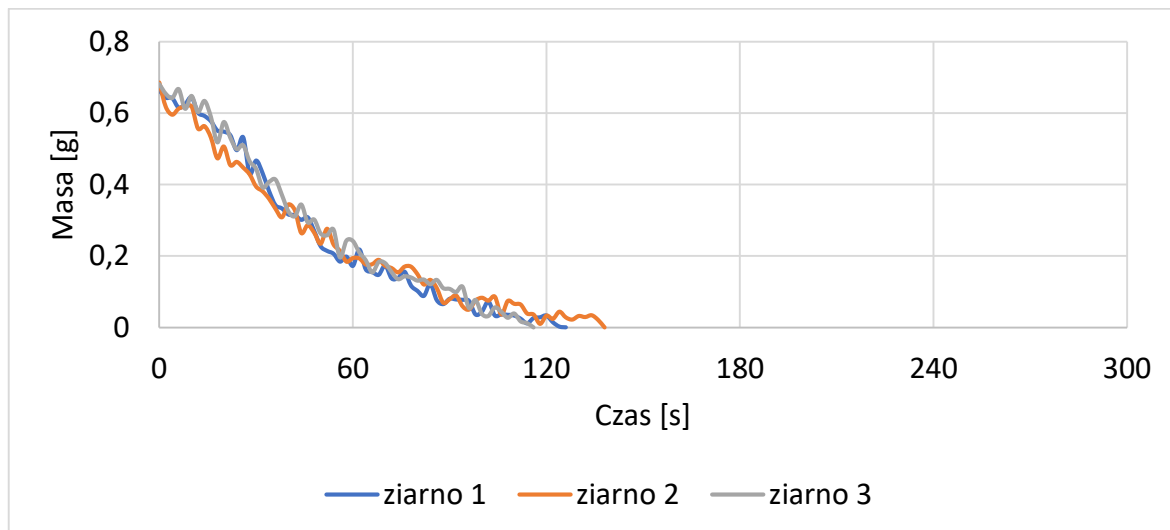
Gdzie:

- (1) masa uchwytu (0-12 s),
- (2) masa uchwytu i próbki paliwa (13-24 s),
- (3) wzrost masy po wprowadzeniu próbki do komory spalania - efekt oddziaływania materiału inertnego (około 24 s),
- (4) masa próbki podczas spalania w strumieniu materiału inertnego (24 -144 s).

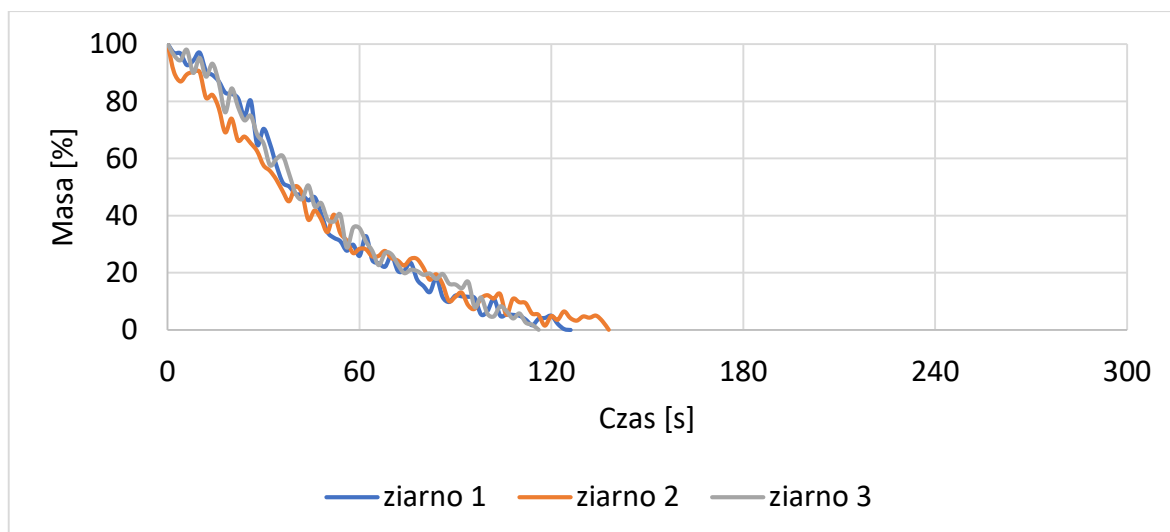


Rys. 25. Wynik pomiaru ubytku masy peletu 1 RDF1 spalanego w temperaturze 650°C i strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  uzyskany z programu rejestrującego, zawierający oznaczenie najważniejszych punktów krzywej

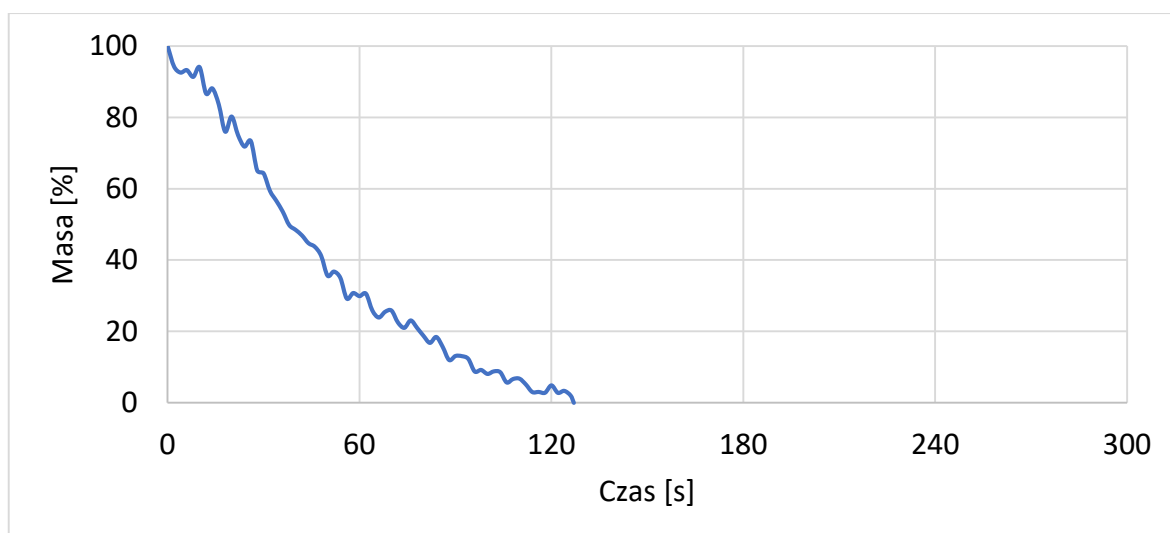
Przedstawione na wykresie rys. 26 krzywe opisują ubytek masy spalanych ziaren po odjęciu masy uchwytu, oraz masy oddziaływania materiału inertnego, a kolejne rys. 27 i 28 procentowy ubytek masy trzech ziaren RDF1 oraz średni procentowy ubytek uzyskany na ich podstawie.



Rys. 26. Ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $650^\circ\text{C}$

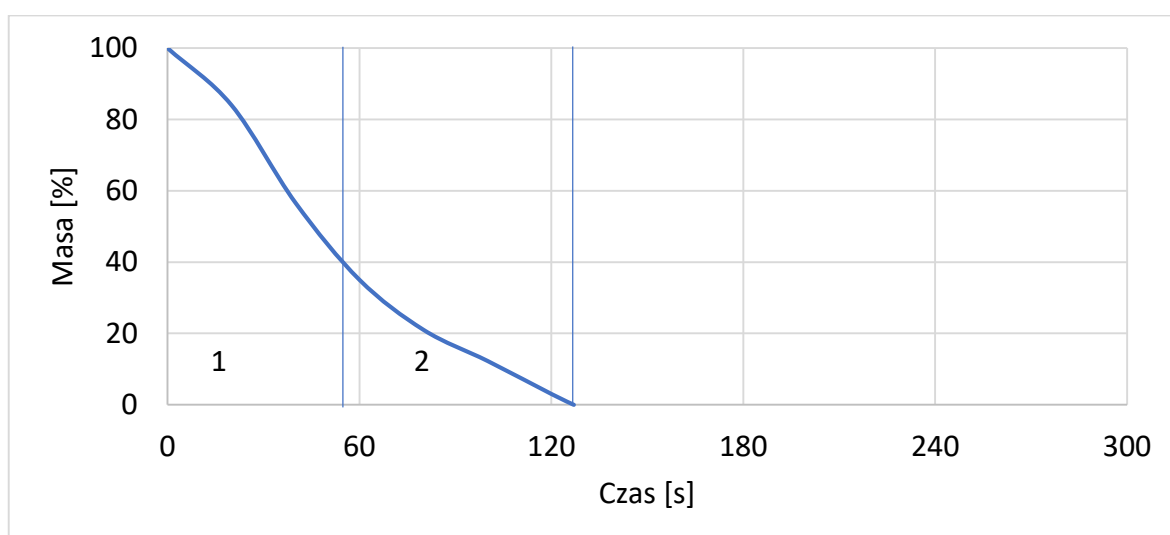


Rys. 27. Procentowy ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $650^\circ\text{C}$



Rys. 28. Średni procentowy ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $650^\circ\text{C}$

Ostatnim etapem analizy sygnału było uzyskanie ostatecznej aproksymacji rzeczywistego średniego przebiegu ubytku masy peletu RDF – rys. 29.

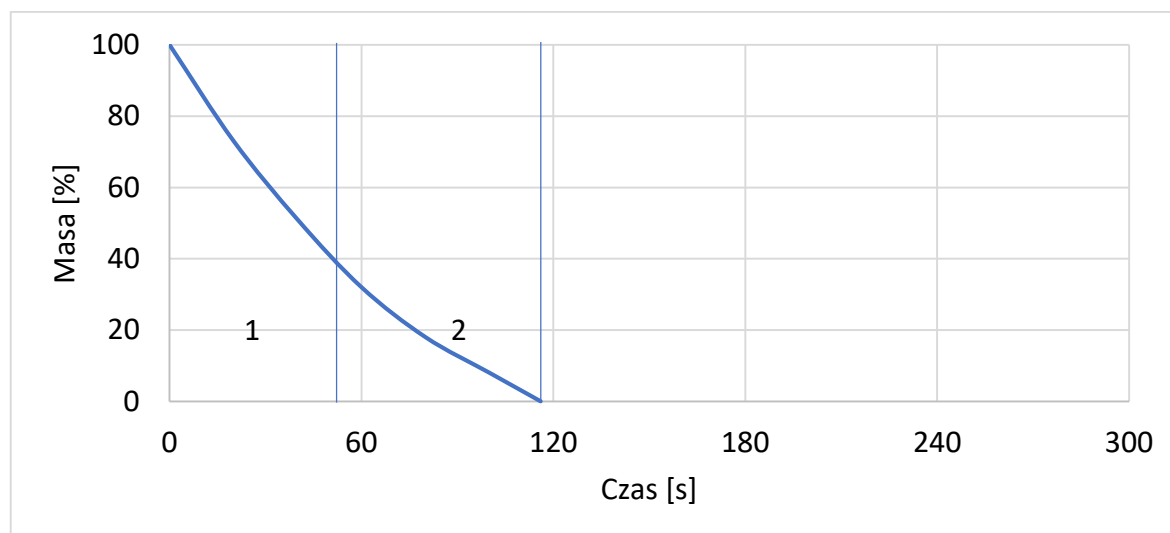


Rys. 29. Aproksymacja średniego procentowego ubytku masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $650^\circ\text{C}$ , gdzie 1 – nagrzewanie i odparowanie wilgoci oraz zapłon i spalanie części lotnych, 2 – spalanie karbonizatu.

Ubytek masy paliw spalanych w strudze materiału inertnego charakteryzuje się znacznie większą intensywnością w stosunku do spalania bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ). Niewidoczny jest etap nagrzewania ziarna i odparowania wilgoci (1). W wyniku kontaktu z rozgrzanym materiałem inertnym ziarno zapala się niemal natychmiast po wprowadzeniu do komory spalania. Zarejestrowana różnica ubytku masy między etapem wypalania części lotnych (1), a spalaniem karbonizatu (2) staje się mniej wyraźna. Czas etapu spalania części lotnych trwa ok. 55 s, co stanowi 43% całkowitego

czasu spalania ziarna, a etap spalania karbonizatu 72 s (57% całkowitego czasu spalania ziarna). Kolejną zaobserwowaną różnicą w stosunku do przypadku spalania przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (rys. 23) jest brak masy popiołu w końcowym etapie spalania. Krzywa obrazująca ubytek masy osiąga wartość zero na końcu procesu spalania. Fakt ten dowodzi, że struga materiału inertnego rozbija tworzącą się warstwę popiołu i usuwa ją z powierzchni ziarna. Brak popiołu na powierzchni ziarna dodatkowo ułatwia proces spalania. Dzięki temu więcej utleniacza dociera do ziarna paliwa, co powoduje dodatkowe przyspieszenie rejestrowanego w trakcie spalania karbonizatu ubytku masy ziarna.

Opracowanie wyników dla przypadku  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  przebiegało w sposób analogiczny jak w przypadku spalania peletów przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . W wyniku opracowania otrzymano rezultat aproksymacji średniego procentowego ubytku masy ziaren przedstawiony na rys. 30.



Rys. 30. Aproksymacja średniego procentowego ubytku masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $650^\circ\text{C}$ , gdzie 1 – nagrzewanie i odparowanie wilgoci oraz zapłon i spalanie części lotnych, 2 – spalanie karbonizatu

Na skutek zwiększenia strumienia materiału inertnego z  $G_s=2,5$  do  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  różnica między kątem nachylenia krzywej obrazującej etap wypalania się części lotnych i spalania karbonizatu staje się nieco mniej wyraźna głównie za sprawą skrócenia czasu spalania karbonizatu. Intensywność spalania części lotnych jest dla obu  $G_s$  ( $2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) bardzo podobna. Czas spalania części lotnych i karbonizatu przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  wynosi odpowiednio 52 i 61 s co stanowi odpowiednio 45 i 55% całkowitego czasu spalania ziarna.

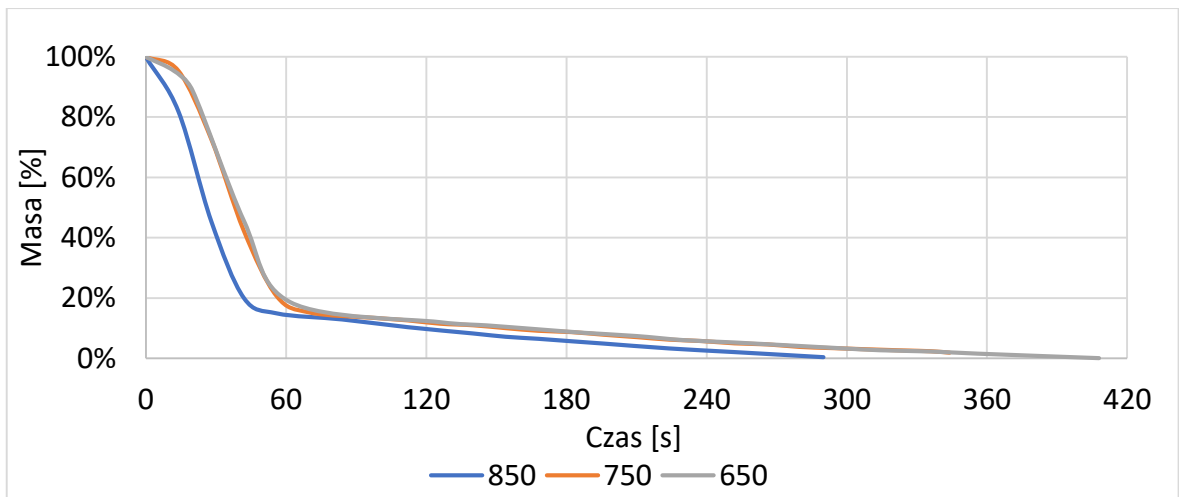
## 7.2 WYNIKI BADAŃ SPALANIA WYBRANYCH PALIW BIOMASOWYCH

Wykorzystanie biomasy jako odnawialnego źródła energii stale rośnie. Jak wspomniano w przeglądzie literatury rynek paliw systematycznie powiększa się. Coraz częściej obok odpadów drewnopochodnych wykorzystywane są odpady z upraw rolniczych oraz dedykowane plantacje roślin energetycznych. Różnorodność oferowanej dla energetyki biomasy wymaga dokładnego poznania jej właściwości oraz wpływu na kinetykę spalania oraz jego warunki w celu bezpiecznego i ekonomicznego wykorzystania wszystkich dostępnych zasobów.

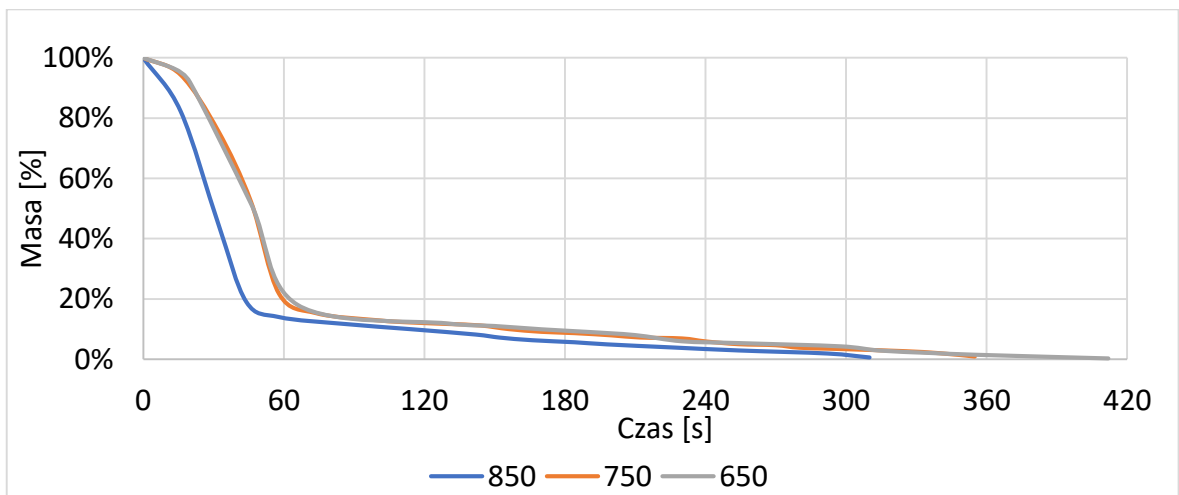
W pierwszym etapie badań eksperymentalnych przyjęte w pracy pelety z dwóch rodzajów biomasy tj.: leśnej i agro spalano w trzech temperaturach: 650, 750 oraz 850°C. Początkowo badania prowadzono bez oddziaływania materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) następnie w jego strudze, przy wybranych natężeniach strumienia masy ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ).

Rysunki 31-34 przedstawiają ubytek masy peletów odpowiednio dla peletu z trociny dębowej, mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb, z łuski słonecznika i słomy dla trzech analizowanych temperatur spalania. Jak oczekiwano, uzyskane wyniki wskazują, że obniżenie temperatury w komorze paleniskowej powoduje wydłużenie czasu spalania ziaren. Czas potrzebny na osiągnięcie temperatury zapłonu tzw. czas indukcji zapłonu zależy m.in. od temperatury komory paleniskowej. Im wyższa temperatura tym jest on krótszy [153]. W przypadku temperatury 850°C zapłon części lotnych następuje niemal natychmiast po umieszczeniu ziarna w komorze paleniskowej. Spalanie części lotnych w temperaturze 850°C przebiega intensywniej niż w niższych temperaturach (750 i 650°C). W 850°C trwa 40-50 s, a w pozostałych 60 s.

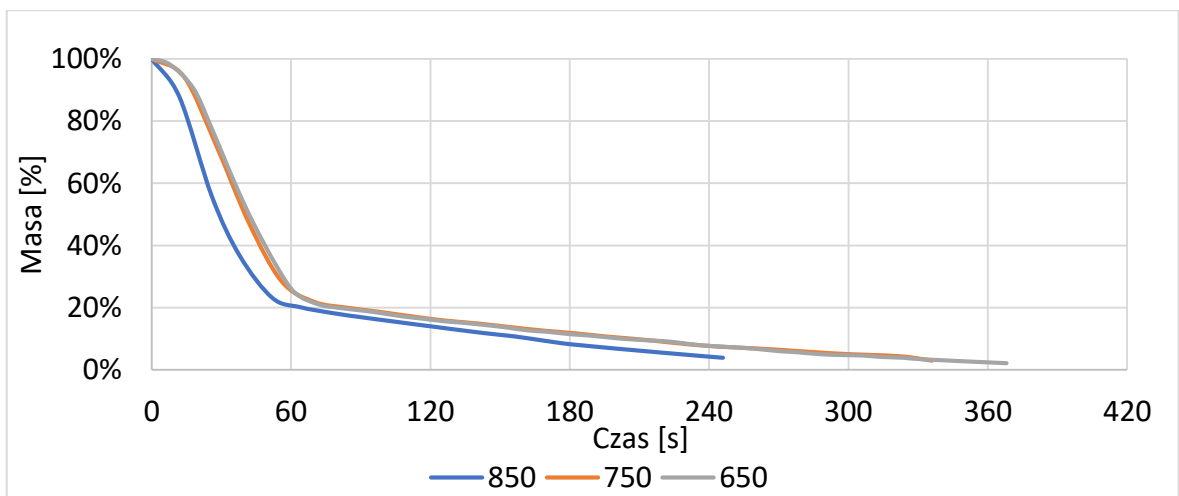
Średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego jest dłuższy niż biomasy agro w każdej temperaturze komory paleniskowej o 7-17%.



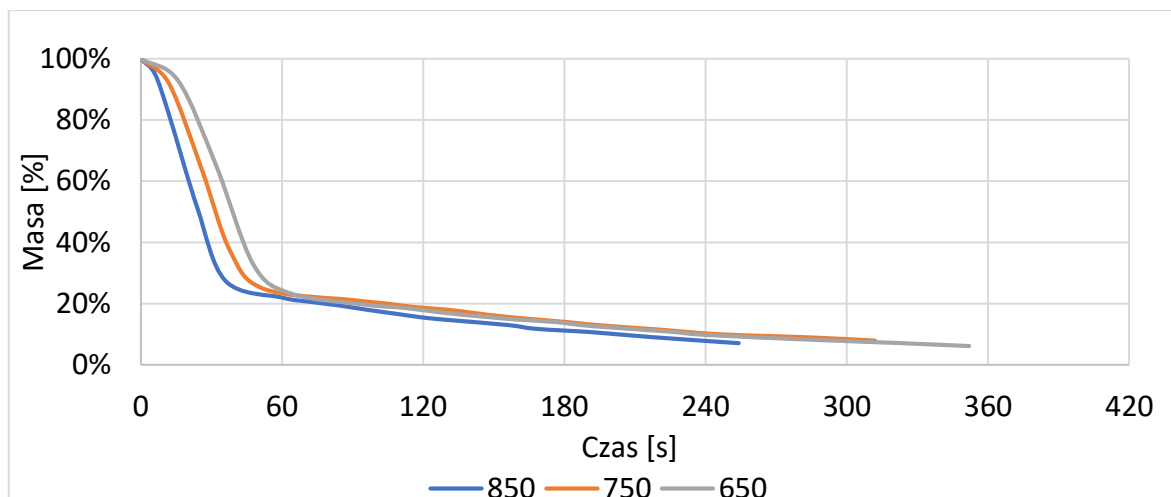
Rys. 31. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalane go w różnej temperaturze przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 32. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalane go w różnej temperaturze przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$



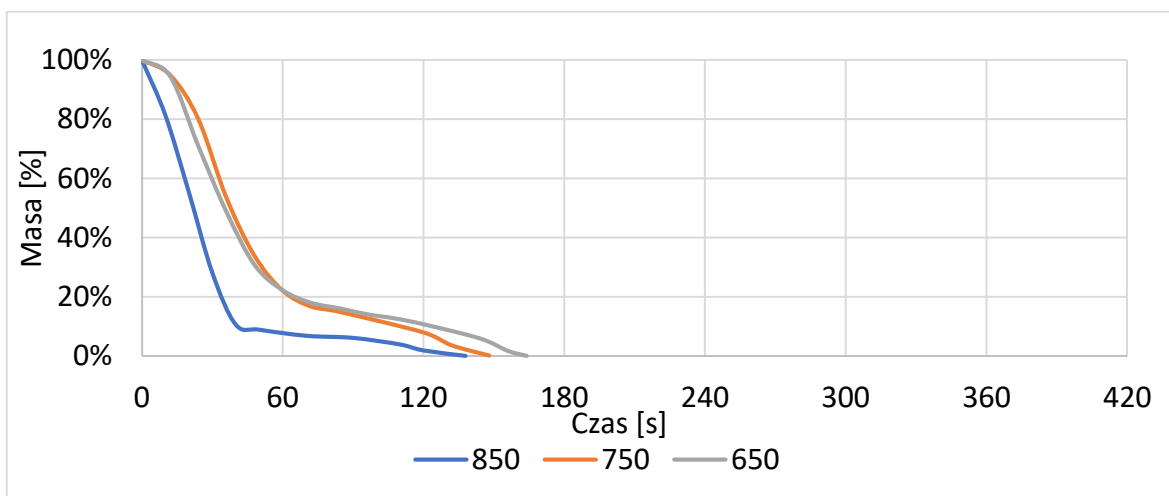
Rys. 33. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalane go w różnej temperaturze przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$



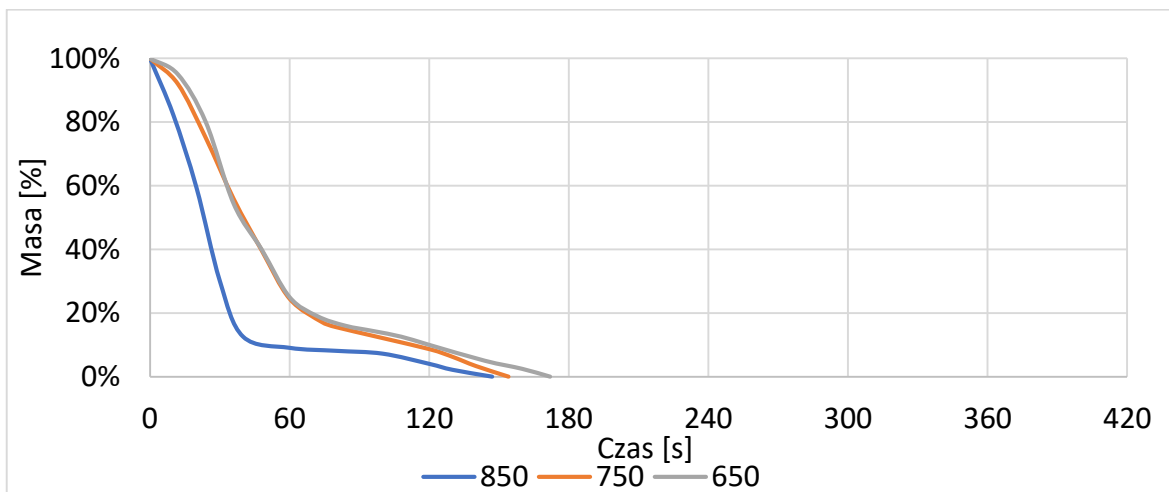
Rys. 34. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Następnie pelety z biomasy spalano w strudze materiału inertnego. Analizując ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej oraz mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanych w różnych temperaturach przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (rys. 35-36) wyraźnie widać, że obniżenie temperatury w komorze paleniskowej podobnie jak przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  powoduje wydłużenie czasu spalania ziaren. Inaczej jest w przypadku spalania peletu z łuski słonecznika (rys. 37). Najdłużej trwa spalanie w temperaturze 850°C. Zauważono, że w tej temperaturze występuje zjawisko mięknięcia popiołu przejawiające się oblepianiem ziarna słonecznika przez piasek kwarcowy. Na krzywej oznaczonej kolorem niebieskim (temperatura 850°C) od 48 s widoczny jest wyraźny przyrost masy. Piasek oblepia powierzchnię spalanego ziarna zwiększając jego całkowitą masę oraz utrudnia dopływ utleniacza do płonącej powierzchni ziarna. Na końcu krzywej ubytku masy można odczytać końcową masę utworzonego spieku, pokazanego na rys. 39. Podobnie jak dla przypadku peletu ze słonecznika, podczas spalania peletu ze słomy (rys. 38) w temperaturze 850°C czas spalania słomy był najdłuższy i wynosił 277 s. Powodem tego jest, iż słoma w temperaturze 850°C ulegała spiekaniu. Krzywa przedstawiająca jej ubytek masy, podobnie jak podczas spalania peletu z łuski słonecznika, pozwala na odczytanie masy końcowej wytworzonego spieku - rys. 40. Czas spalania w temperaturach 650 i 750°C był podobny i wynosił odpowiednio 216 i 212 s. W przeciwieństwie do spalania peletu przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego jest krótszy niż biomasy agro w każdej temperaturze komory paleniskowej. Największą różnicę zanotowano w przypadku temperatury 850°C, gdzie pelet z biomasy agro spala się blisko

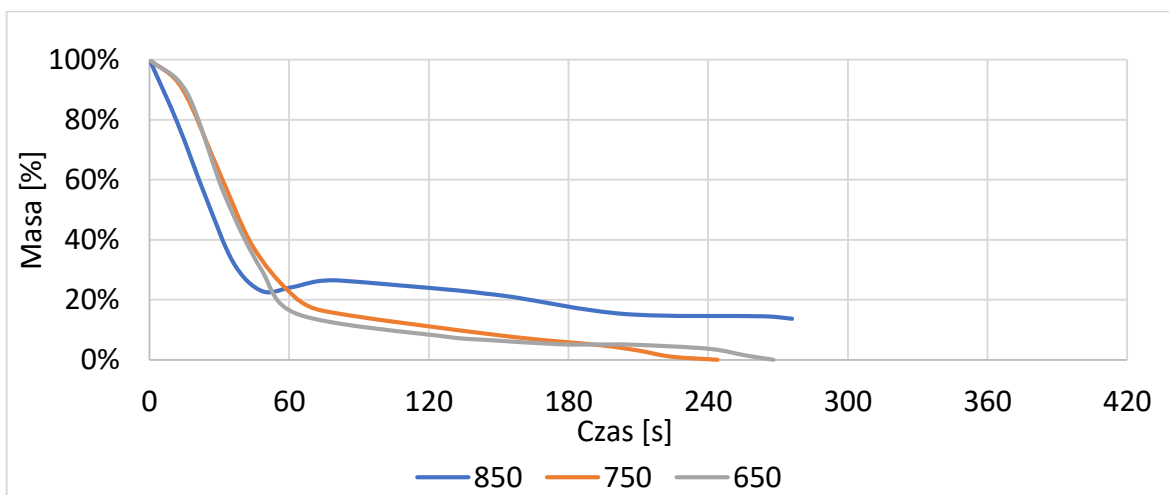
dwukrotnie dłużej niż pelet z biomasy leśnej. W pozostałych temperaturach różnica ta wynosi 44-50%.



Rys. 35. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$

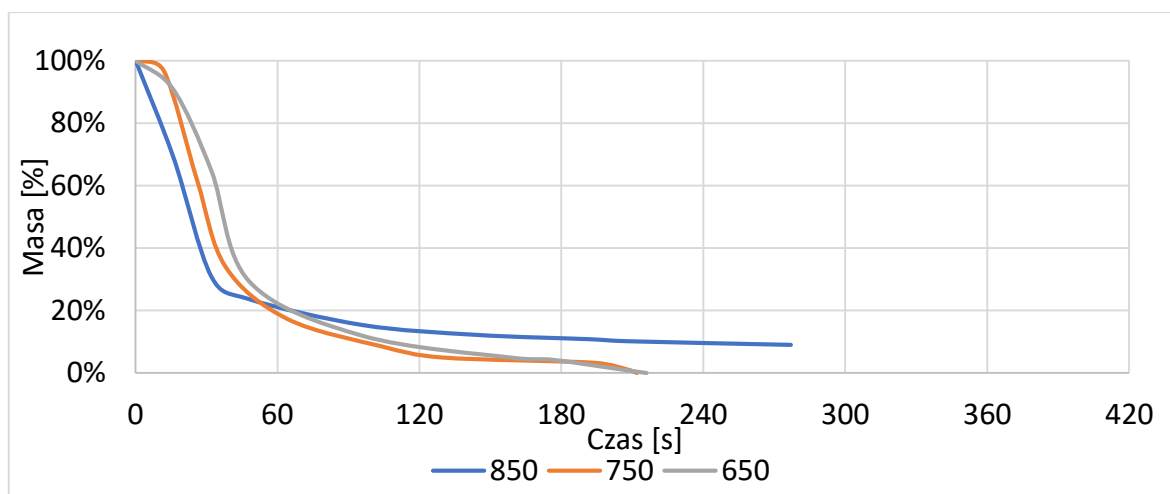


Rys. 36. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dqb spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=2,5\text{ kg/m}^2\text{s}$





Rys. 37. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 38. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 39. Pozostałość po spaleniu peletu z łuski słonecznika w temperaturze 850°C przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

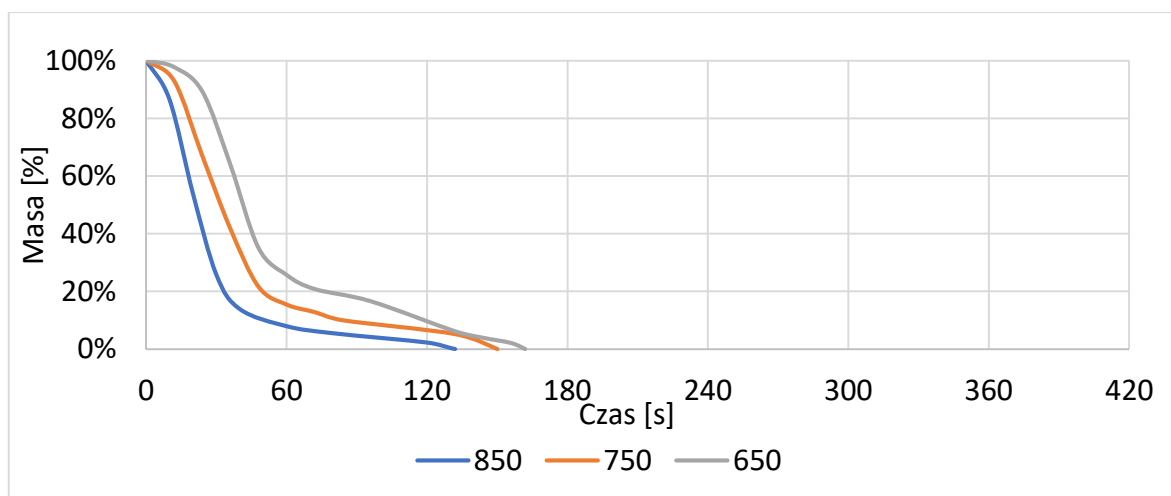


Rys. 40. Pozostałość po spaleniu peletu ze słomy w temperaturze 850°C przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

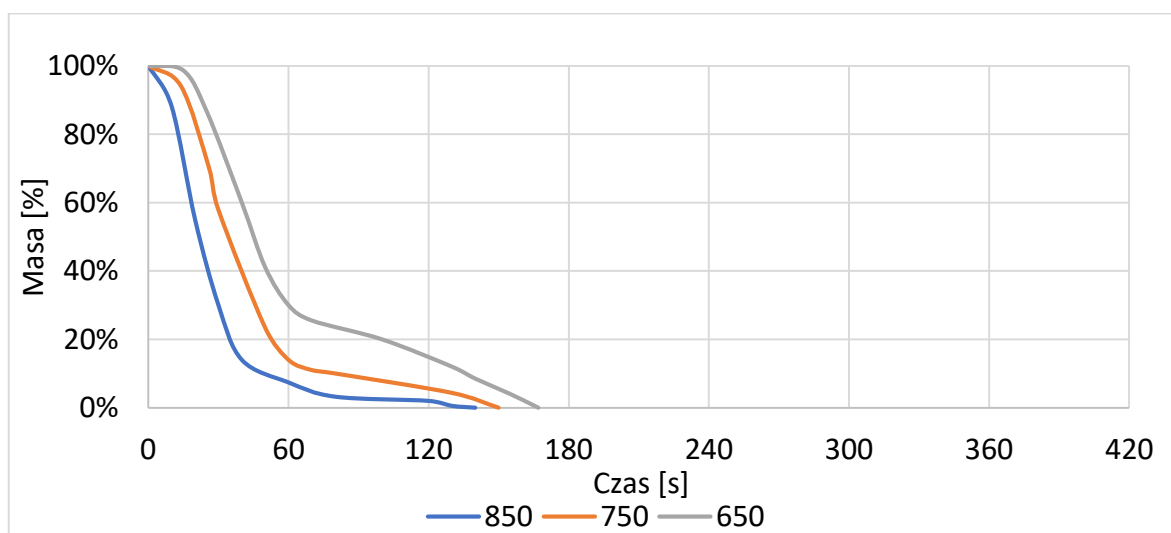
Analizując ubytek masy ziaren peletów z trociny dębowej oraz mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb w różnych temperaturach i zwiększonym do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  natężeniu strumienia materiału inertnego (rys. 41 i 42) widać, że obniżanie temperatury w komorze paleniskowej powoduje wydłużenie czasu spalania ziaren. Spalanie peletów z biomasy leśnej ma charakter podobny jak w przypadku  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Spalanie biomasy agro

ma ponownie odmienny charakter. W przypadku spalania peletu z łuski słonecznika oraz peletu ze słomy (rys. 43 i 44) najdłużej trwa spalanie w temperaturze 750°C. W obu przypadkach najkrótszy czas zanotowano w temperaturze 650°C, ponieważ w tej temperaturze nie następują procesy mięknięcia popiołu. Na rys. 43 można zauważyć przyrost masy próbki po 60 s, a także odczytać masę końcową utworzonego spieku (krzywa oznaczona kolorem niebieskim).

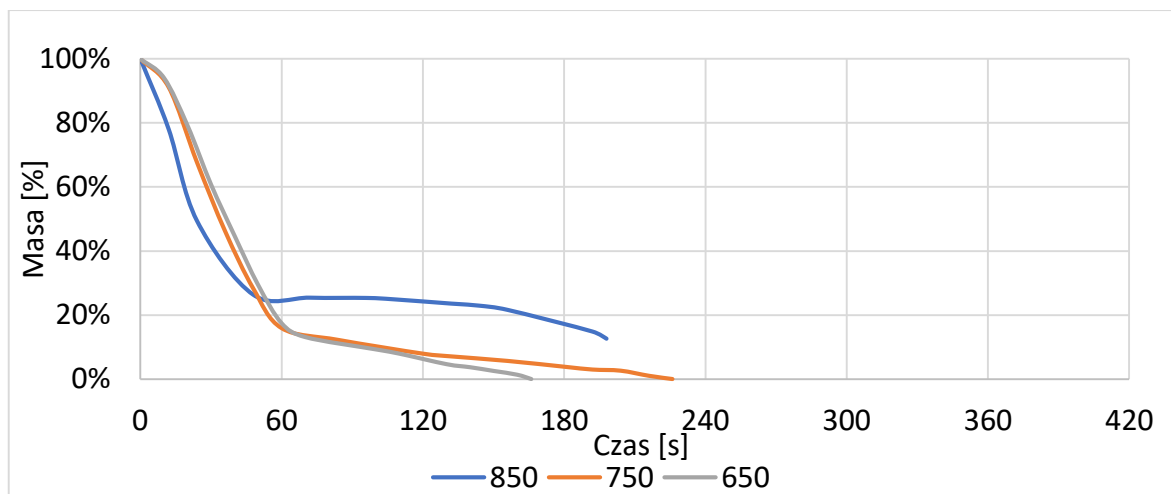
Podobnie jak podczas spalania ziaren peletu przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego był krótszy niż biomasy agro w temperaturach 850 i 750°C o 39-41%, natomiast w temperaturze 650°C ich czas spalania był bardzo zbliżony.



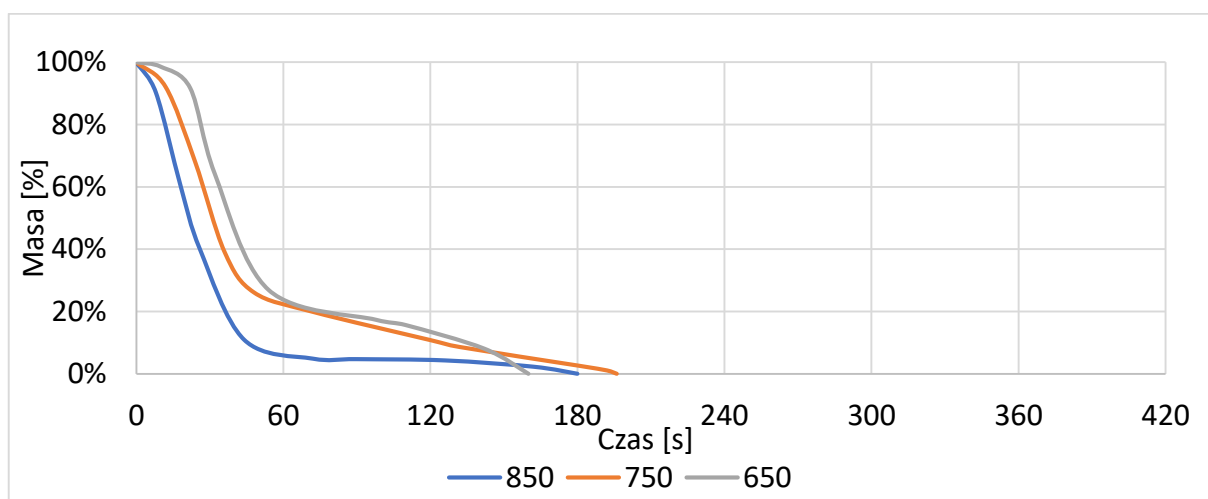
Rys. 41. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 42. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 43. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

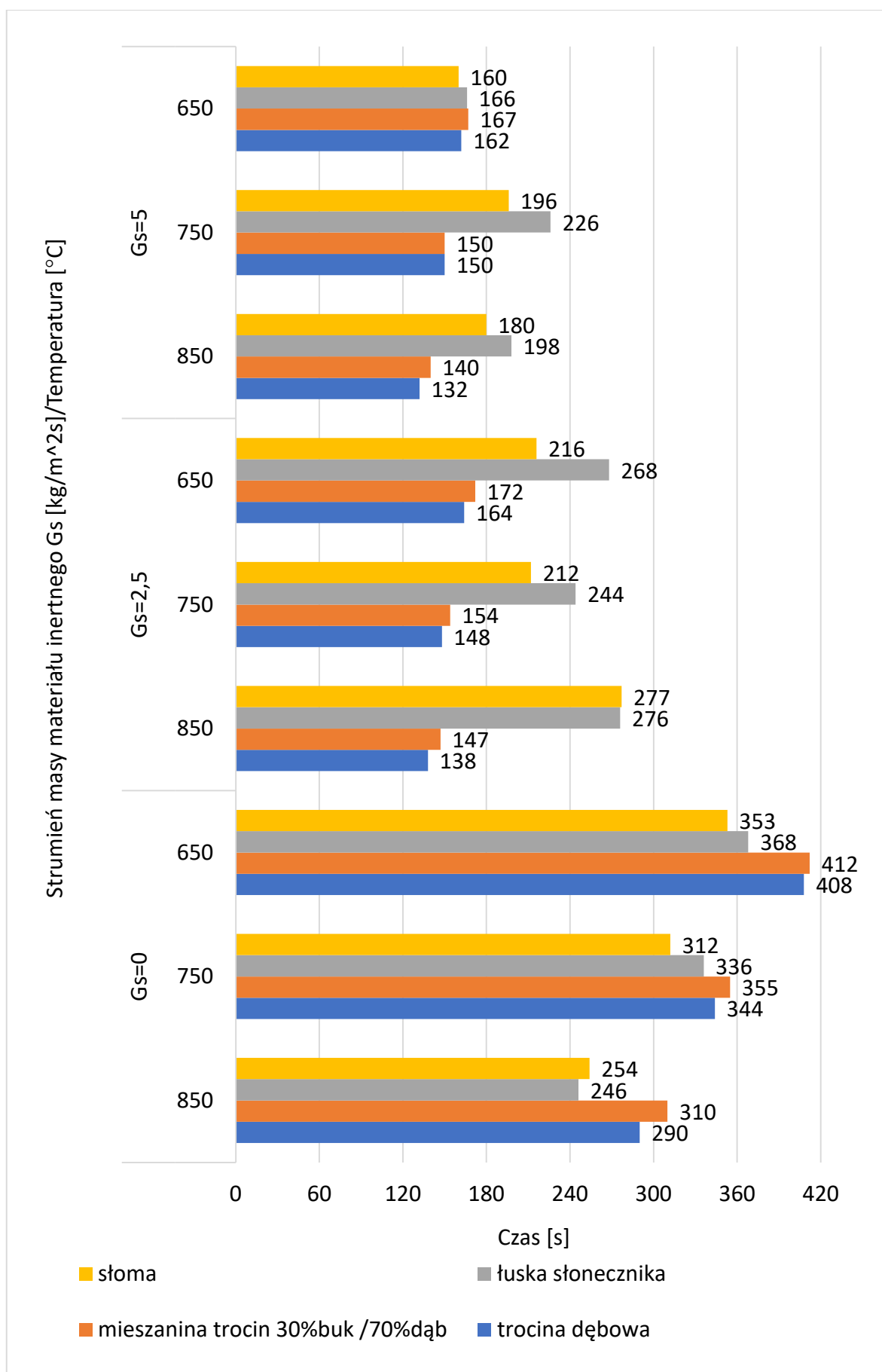


Rys. 44. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalane w różnej temperaturze przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

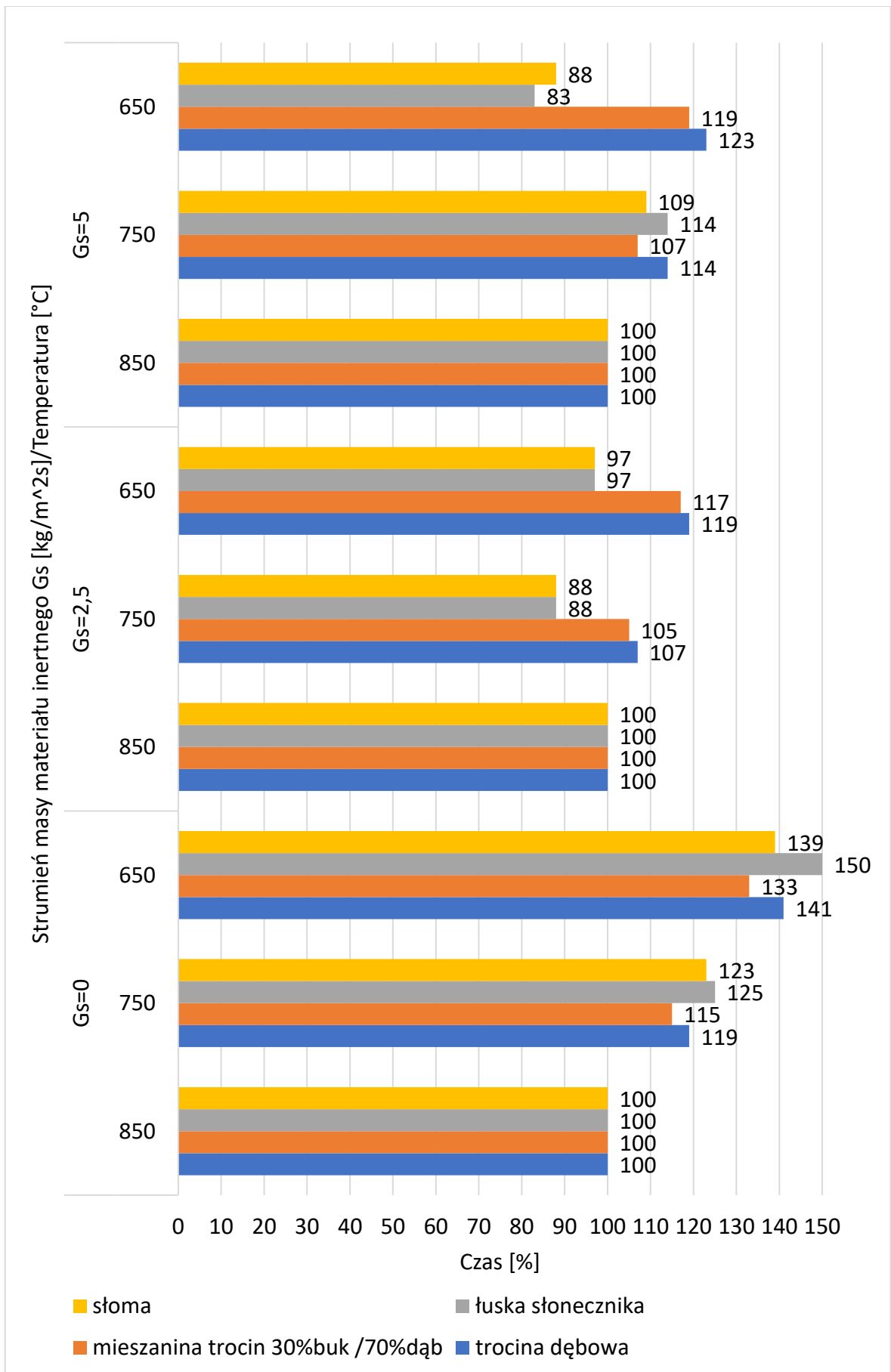
Porównanie czasu spalania wszystkich rodzajów peletów biomasy w różnych warunkach komory spalania zostało zamieszczone na rys. 45 i 46. Zmiana temperatury w komorze paleniskowej w zakresie 850 do 650°C przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , spowodowała wydłużenie czasu spalania wszystkich typów peletu o 15-25% na każde 100°C.

Podczas spalania peletów z biomasy w strudze materiału inertnego ujawnione zostały znaczne różnice w mechanizmie spalania biomasy leśnej i agro. Podczas spalania biomasy leśnej przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , zaobserwowano, że obniżenie temperatury w komorze paleniskowej powoduje wydłużenie czasu spalania o około 5-10%, podobnie jak w przypadku spalania bez materiału inertnego. Inaczej jest w przypadku spalania biomasy agro, gdzie czas spalania w temperaturze 850°C jest najdłuższy, ze względu na omówione wcześniej zjawisko mięknięcia popiołu. Po zwiększeniu wartości strumienia materiału

inertnego do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , w przypadku biomasy leśnej obniżenie temperatury w komorze paleniskowej, powoduje wydłużenie czasu spalania o około 7-14%. Natomiast w przypadku spalania biomasy agro, w tych warunkach najdłużej trwa spalanie w temperaturze  $750^\circ\text{C}$ . Podobnie jak przy spalaniu w  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w przypadku peletu z łuski słonecznika w temperaturze  $850^\circ\text{C}$  obserwowano tworzenie się spieku, który ulegał jednak częściowemu rozpadowi w wyniku mechanicznego oddziaływania materiału inertnego – rys. 47. Natomiast spiek powstały podczas spalania słomy ulegał całkowitemu rozpadowi.



Rys. 45. Czas spalania peletów z biomasy w różnych temperaturach oraz różnym strumieniu materiału inertnego

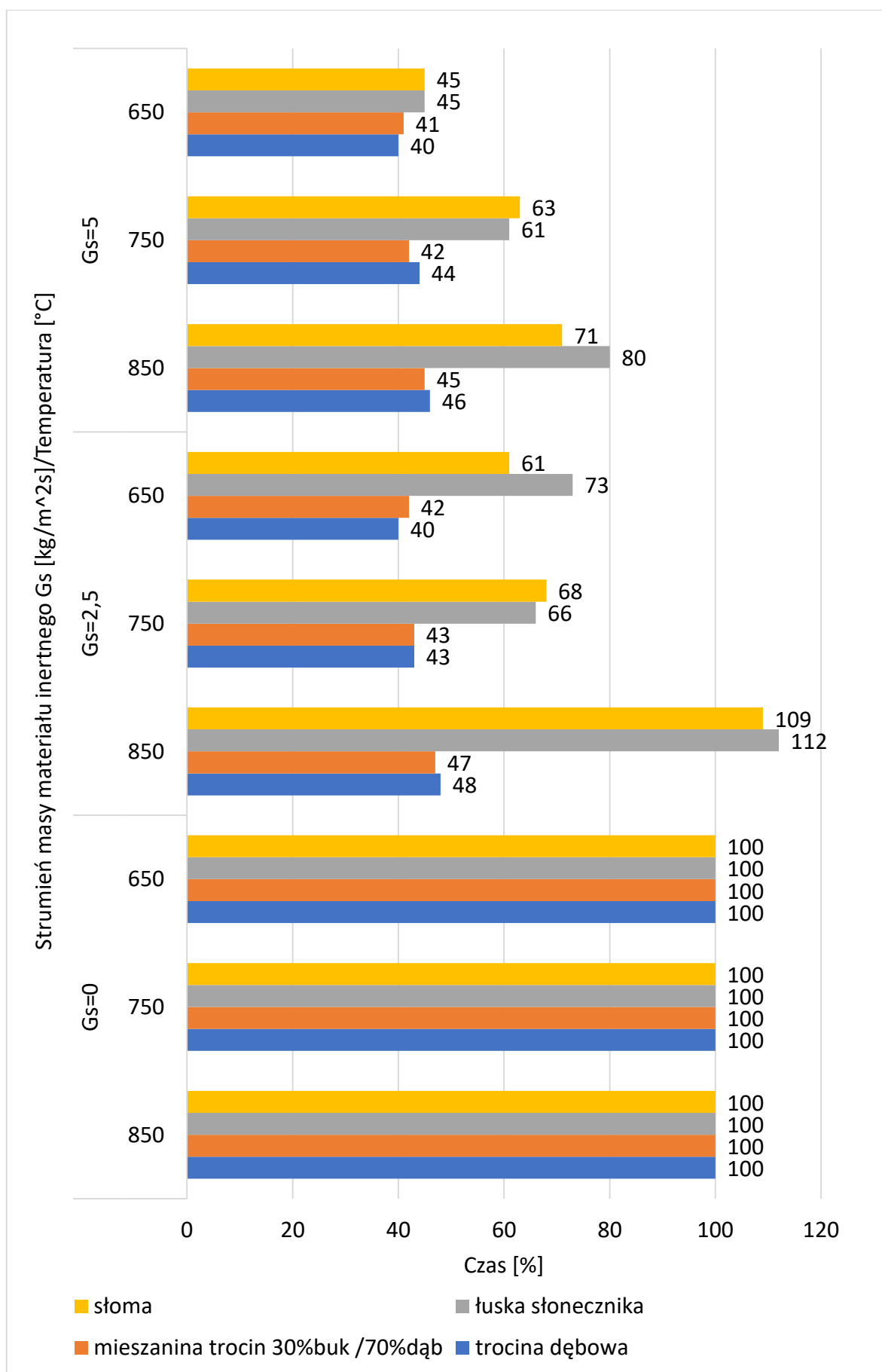


Rys. 46. Czas spalania peletów z biomasy przy obniżeniu temperatury komory spalania w stosunku do temperatury odniesienia (850°C)



*Rys. 47. Pozostałość po spalaniu peletu z łuski słonecznika w temperaturze 850°C przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$*

Porównanie czasu spalania peletów z biomasy w zależności od  $G_s$  w różnych temperaturach przedstawia rys. 48. Obecność materiału inertnego przyspiesza ubytek masy peletów z biomasy leśnej we wszystkich temperaturach w zakresie 50-60%. Natomiast zwiększenie  $G_s$  do  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  przyspiesza dalej proces ubytku masy badanych ziaren (szczególnie widoczne w 850°C), ale już tylko w niewielkim stopniu. W przypadku spalania peletu z łuski słonecznika czas spalania w strumieniu  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturach 650°C i 750°C skrócił się o ok 30%, a w przypadku temperatury 850°C czas spalania wydłużył się o 12% z powodu omówionego wcześniej zjawiska tworzenia spieku. Zwiększenie wartości strumienia materiału inertnego do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  spowodowało skrócenie czasu spalania we wszystkich temperaturach. W przypadku peletów ze słomy czas spalania w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturach 650°C i 750°C skrócił się o ok 20-30%, a w przypadku temperatury 850°C wydłużył się o 9%, podobnie jak w przypadku peletu słonecznika powodem było utworzenie się spieku. Zwiększenie  $G_s$  do  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  spowodowało skrócenie czasu spalania we wszystkich temperaturach.



Rys. 48. Czas spalania peletów z biomasy w zależności od wartości strumienia materiału Gs, podczas spalania w różnych temperaturach (Gs=0 poziom odniesienia)



W kolejnym etapie badań eksperymentalnych dotyczących paliw biomasowych analizowano wpływ atmosfery utleniającej na szybkość ubytku masy peletów. Badania prowadzono w stałej temperaturze 850°C oraz w następujących stężeniach mieszaniny gazów tlen/dwutlenek węgla: 21%/79%, 25%/75%, 30%/70%. Początkowo wszystkie rodzaje peletów spalono w wybranych atmosferach utleniających przy  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s, a następnie przy  $G_s=2,5$  i 5 kg/m<sup>2</sup>s.

Na rys. 49-52 przedstawiono ubytek masy peletów odpowiednio dla peletu z trociny dębowej, mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb, z łuski słonecznika i słomy dla analizowanych atmosfer utleniających przy  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach zmiana atmosfery spalania polegająca na zwiększaniu koncentracji utleniacza skracala czas całkowitego ubytku masy spalanych ziaren biomasy. Dostarczenie w obszar spalania większej ilości utleniacza powoduje przyspieszenie procesu spalania, a w konsekwencji wzrost temperatury na powierzchni ziarna. W związku z tym, przyspieszeniu ulega ubytek masy, w wyniku przyspieszenia reakcji chemicznych utleniania [154].

Wpływ temperatury na szybkość reakcji wyraża się wykładniczym wzrostem wartości stałej szybkości reakcji  $k_c$ . Tę zależność opisuje równanie Arrheniusa: [115]:

$$k_c = k_0 \exp(-E/RT_z) \quad (1)$$

Gdzie:

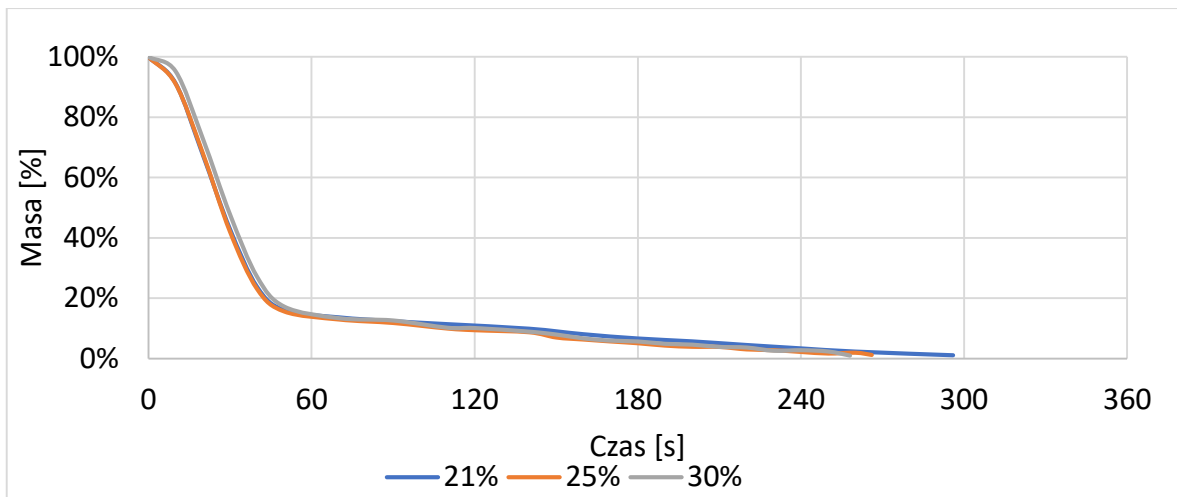
$k_0$  – współczynnik przedeksponentyjny, [m/s],

$E$  – energia aktywacji, [J/mol],

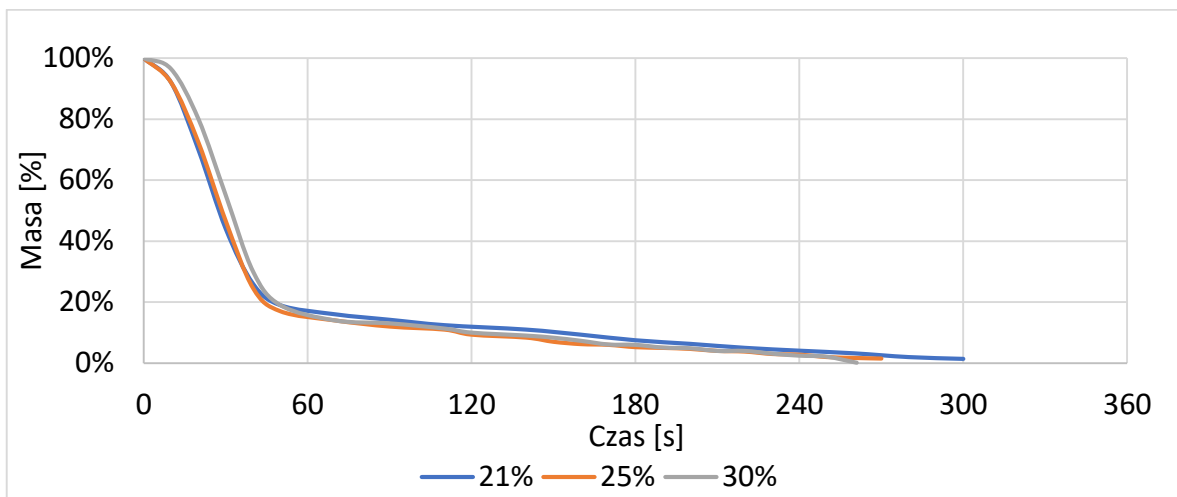
$R$  – uniwersalna stała gazowa, [J/ mol\*K]

$T_z$  – temperatura, [K].

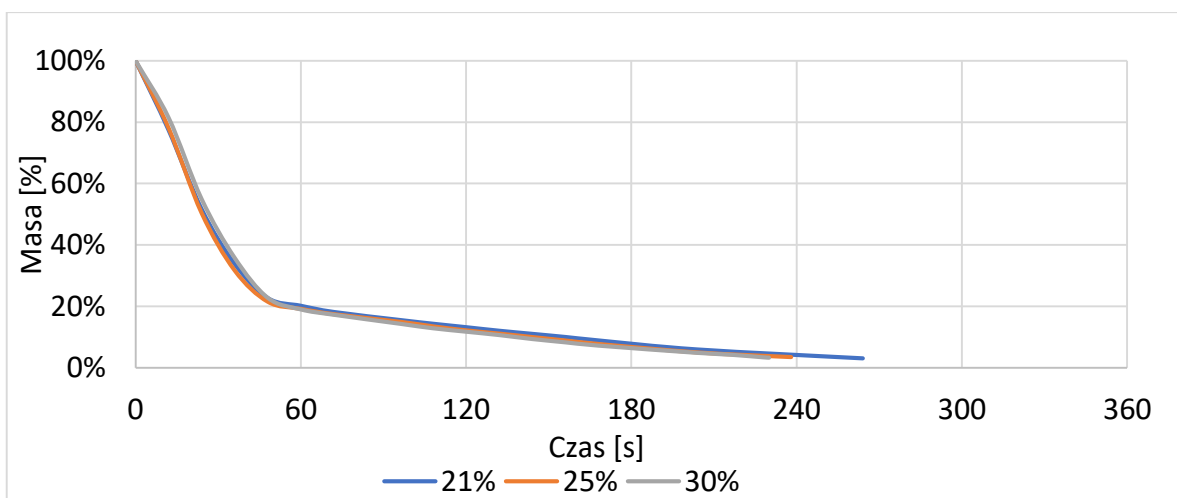
Podobnie jak w pierwszym etapie badań eksperymentalnych średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego był dłuższy niż biomasy agro w każdej atmosferze utleniającej o 10-17%.



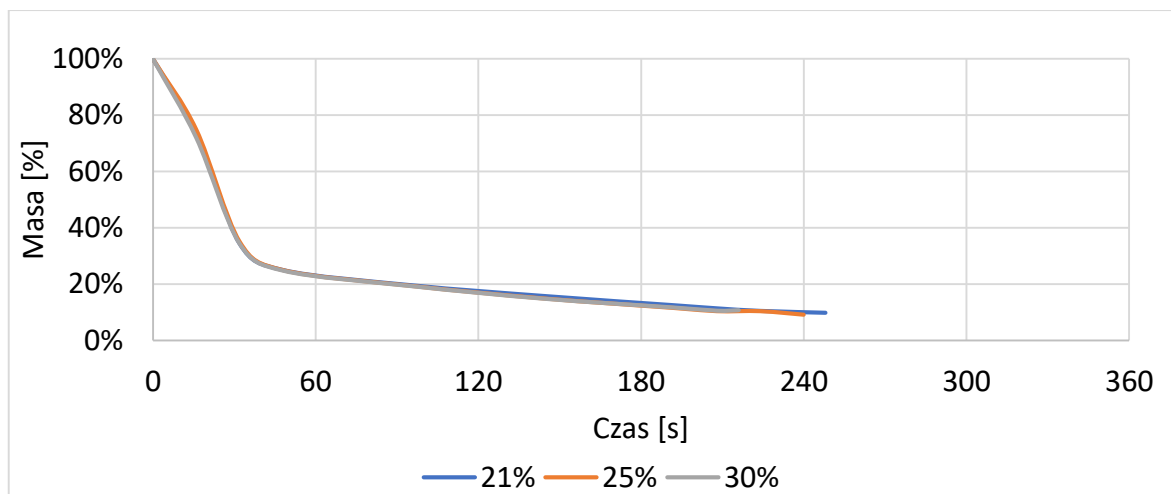
Rys. 49. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 50. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dqb spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

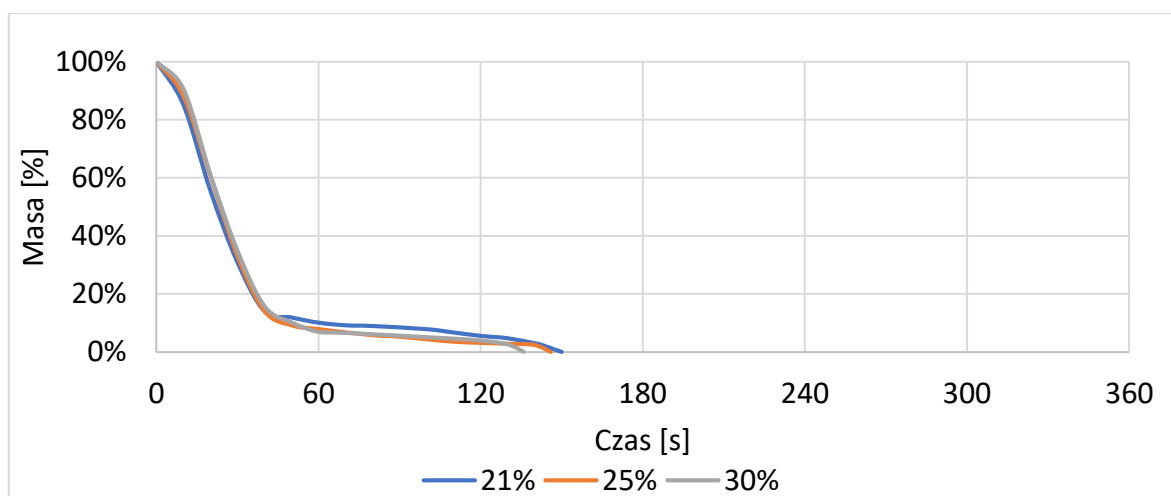


Rys. 51. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

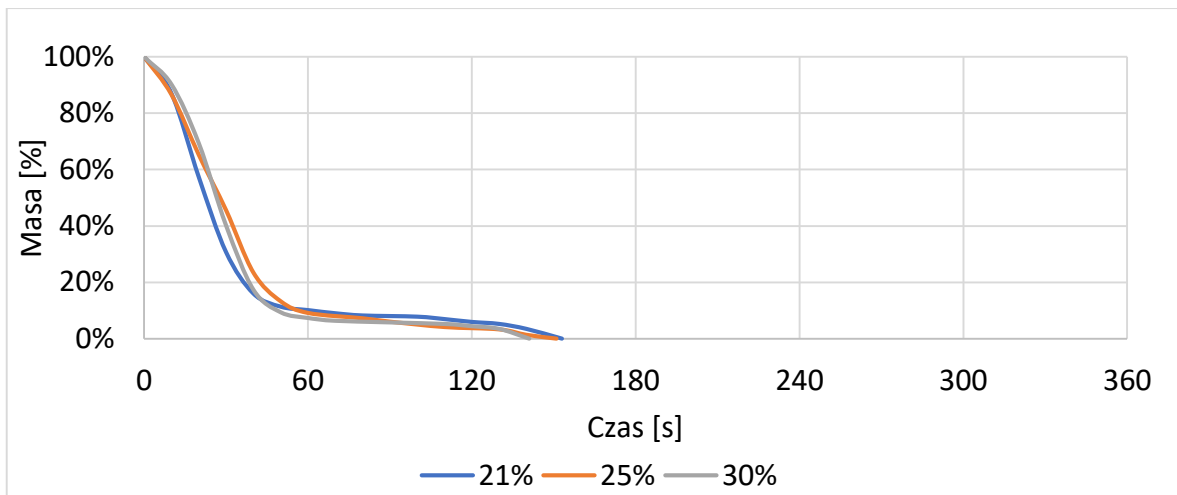


Rys. 52. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

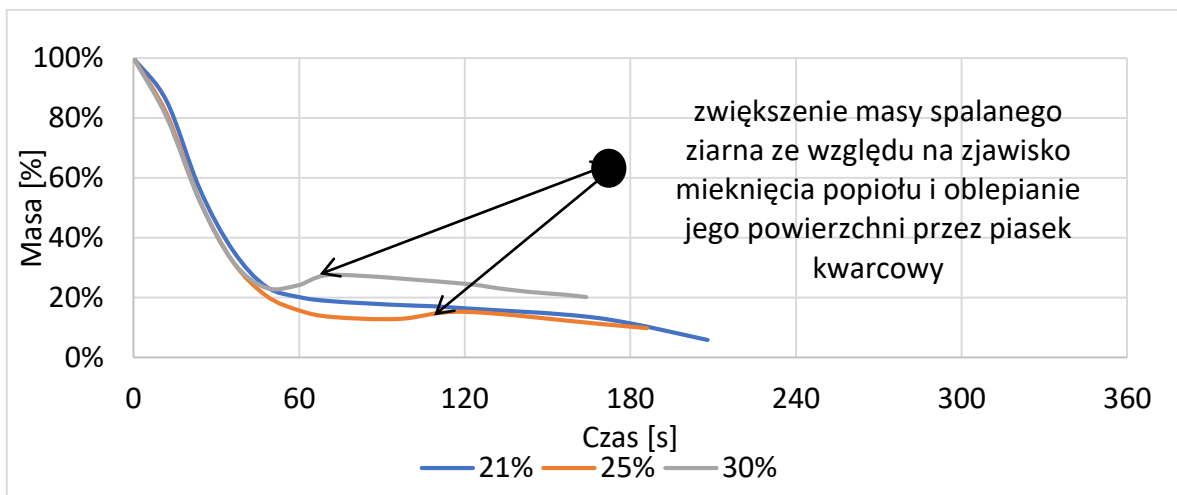
Rys. 53-56 przedstawiają kolejno ubytek masy odpowiednio dla peletu z trociny dębowej, mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb, z łuski słonecznika i słomy dla trzech mieszanin utleniających spalanych w strudze materiału inertyjnego o  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Analizując przebiegi (rys. 53 i 54) spalania biomasy leśnej, tak jak w przypadku spalania przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , wraz ze wzrostem koncentracji utleniacza czas spalania ulegał skróceniu. Natomiast w przypadku peletów z łuski słonecznika (rys. 55) ponownie widoczny jest charakterystyczny lokalny wzrost masy wskazujący na oblepanie peletu przez materiał inertyjny po przekroczeniu temperatury mięknięcia popiołu. Proces ten jest najmniej widoczny w przypadku atmosfery zawierającej 21% tlenu, a najbardziej w przypadku atmosfery zawierającej 30% tlenu. Podczas spalania peletu z łuski słonecznika oraz peletu ze słomy we wszystkich atmosferach utleniających powstawały spieki. Na rys. 55 i 56 na końcu procesu widoczna jest masa pozostałego spieku.



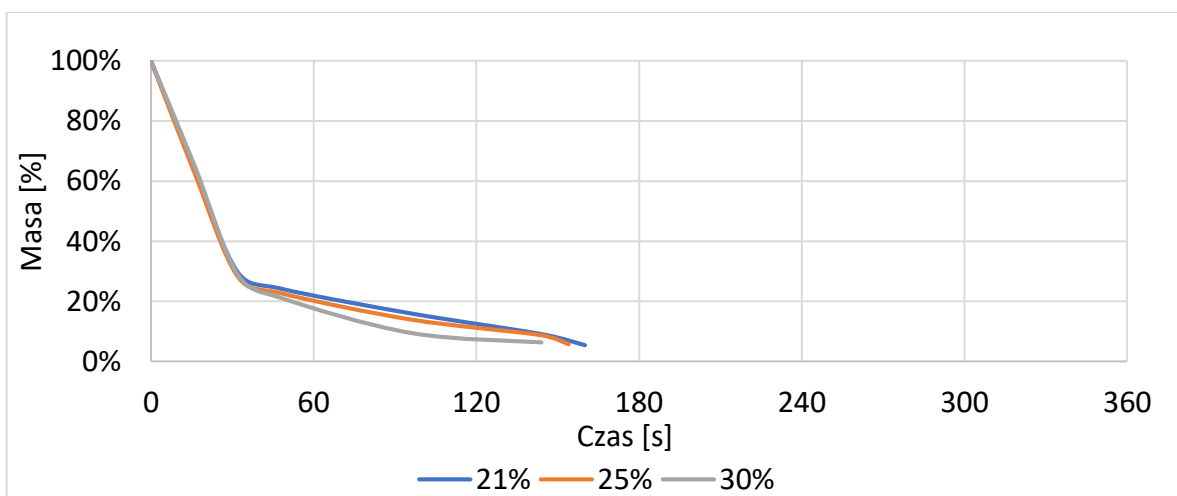
Rys. 53. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 54. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dq̄b spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 55. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

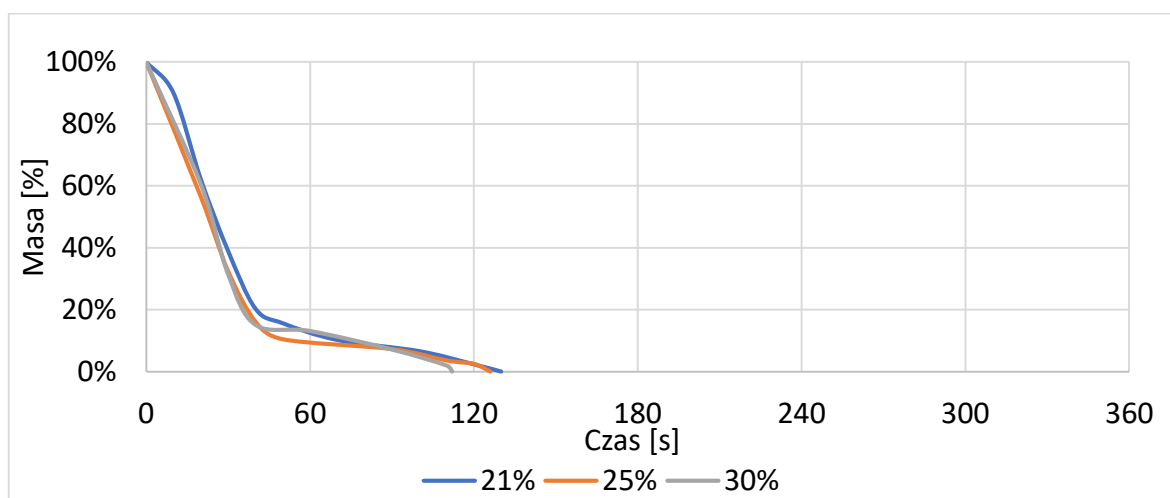


Rys. 56. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

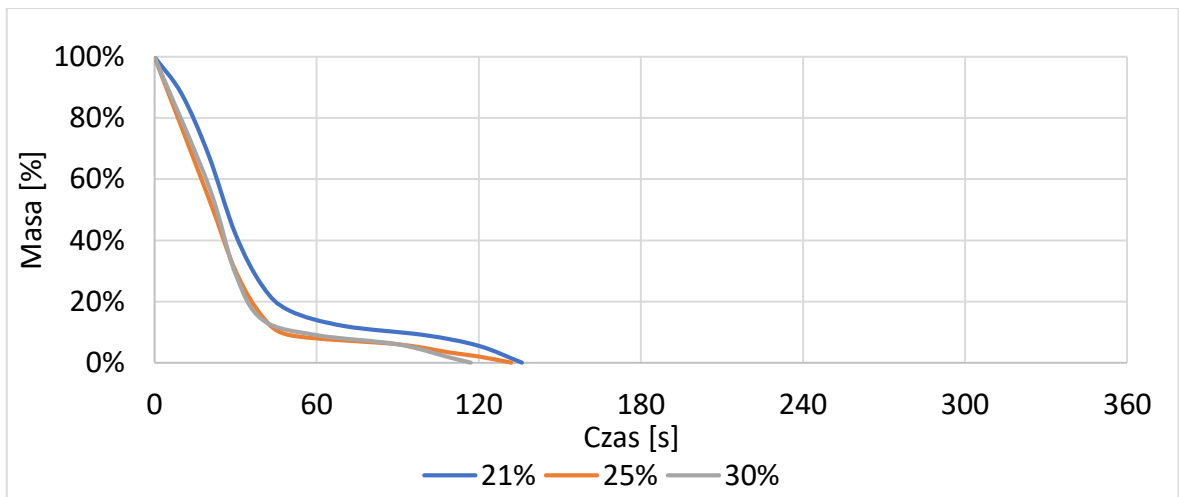
Podobnie jak w pierwszej części badań eksperymentalnych prowadzonych w różnych temperaturach komory spalania, w przeciwieństwie do spalania ziaren peletów przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego jest krótszy niż biomasy agro w każdej atmosferze utleniającej, różnica wynosi 10-18%.

Na kolejnych rys. 57-60 przedstawiono ubytek masy peletów spalanych przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . I w tym przypadku, podobnie jak przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  dla peletu z łuski słonecznika (rys. 55) widoczny jest miejscowy wzrost masy próbki spowodowany oblepianiem ziarna przez materiał inertny, ale tylko w przypadku atmosfery zawierającej największą ilość tlenu tj. 30%. Podczas spalania peletu ze słomy, obserwowano również tworzenie się spieków we wszystkich atmosferach utleniających. Na końcu krzywej zarejestrowanego ubytku masy możliwe jest odczytanie masy spieku po spaleniu, ale tylko w koncentracji 25% tlenu. W pozostałych koncentracjach utworzone spieki uległy całkowitemu zniszczeniu w wyniku oddziaływania materiału inertnego – rys. 60.

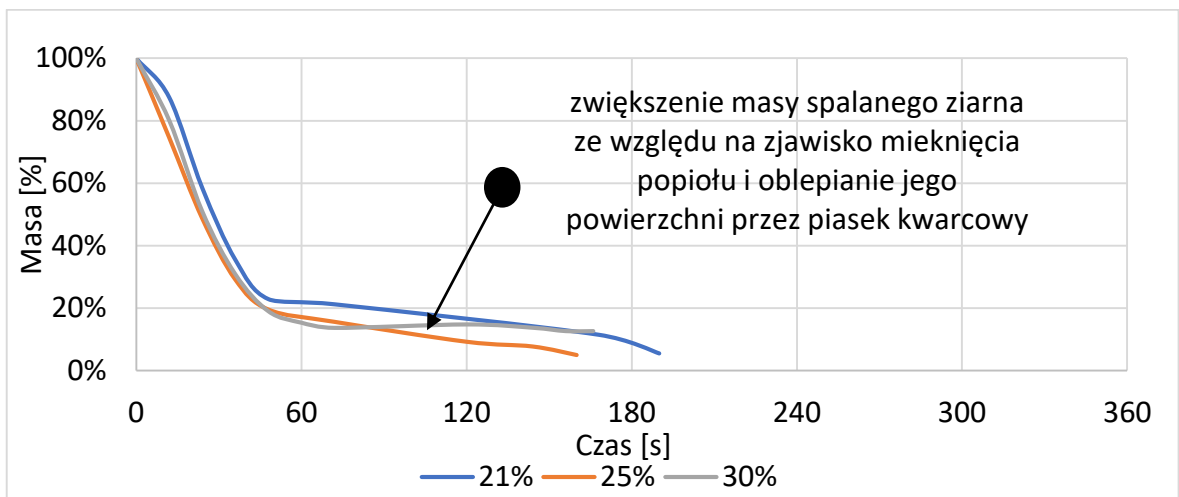
Podobnie jak przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  średnie czas spalania biomasy pochodzenia leśnego jest krótszy niż biomasy agro w każdej atmosferze utleniającej, różnica wynosi 13-22%.



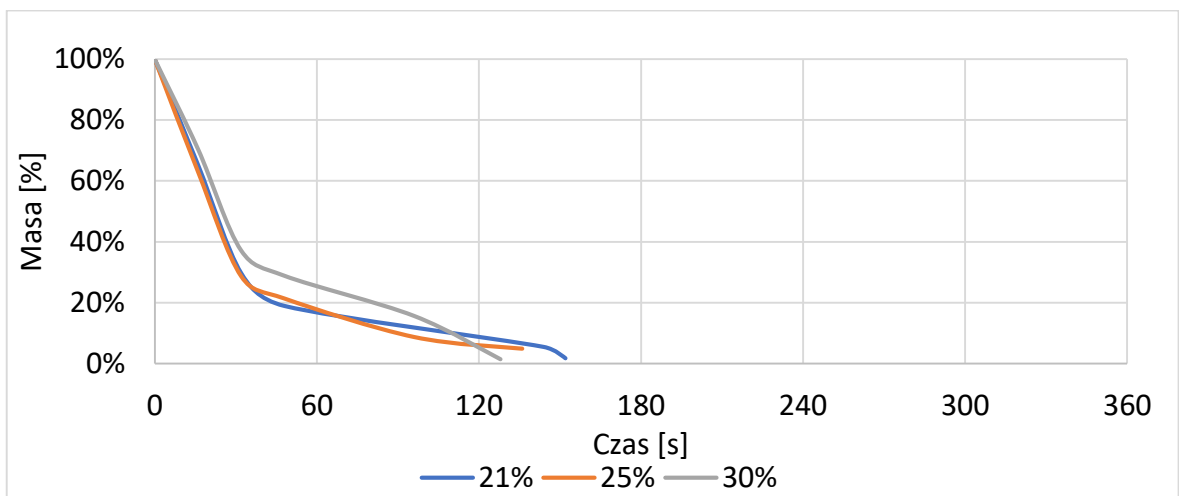
Rys. 57. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 58. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



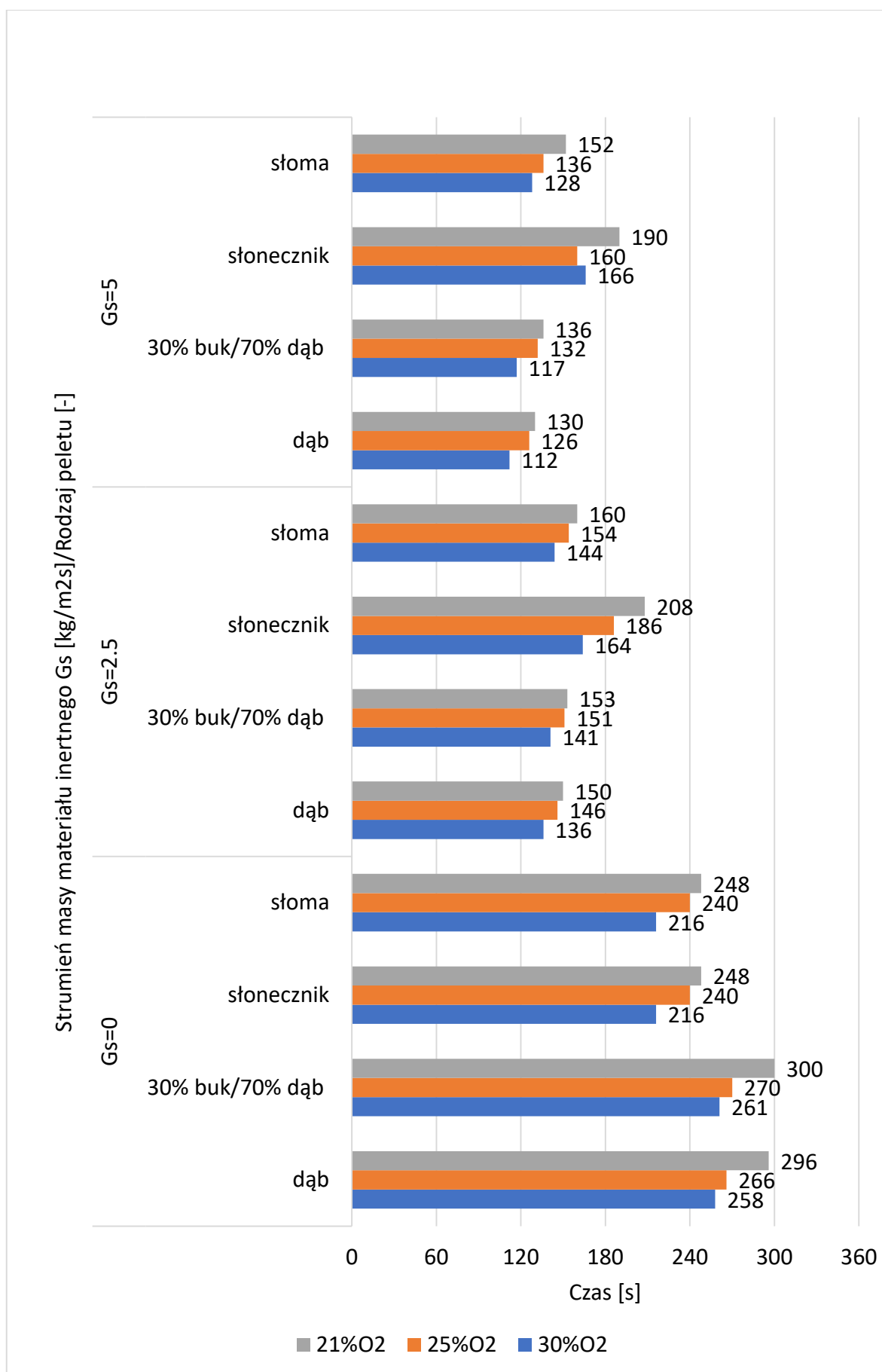
Rys. 59. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 60. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

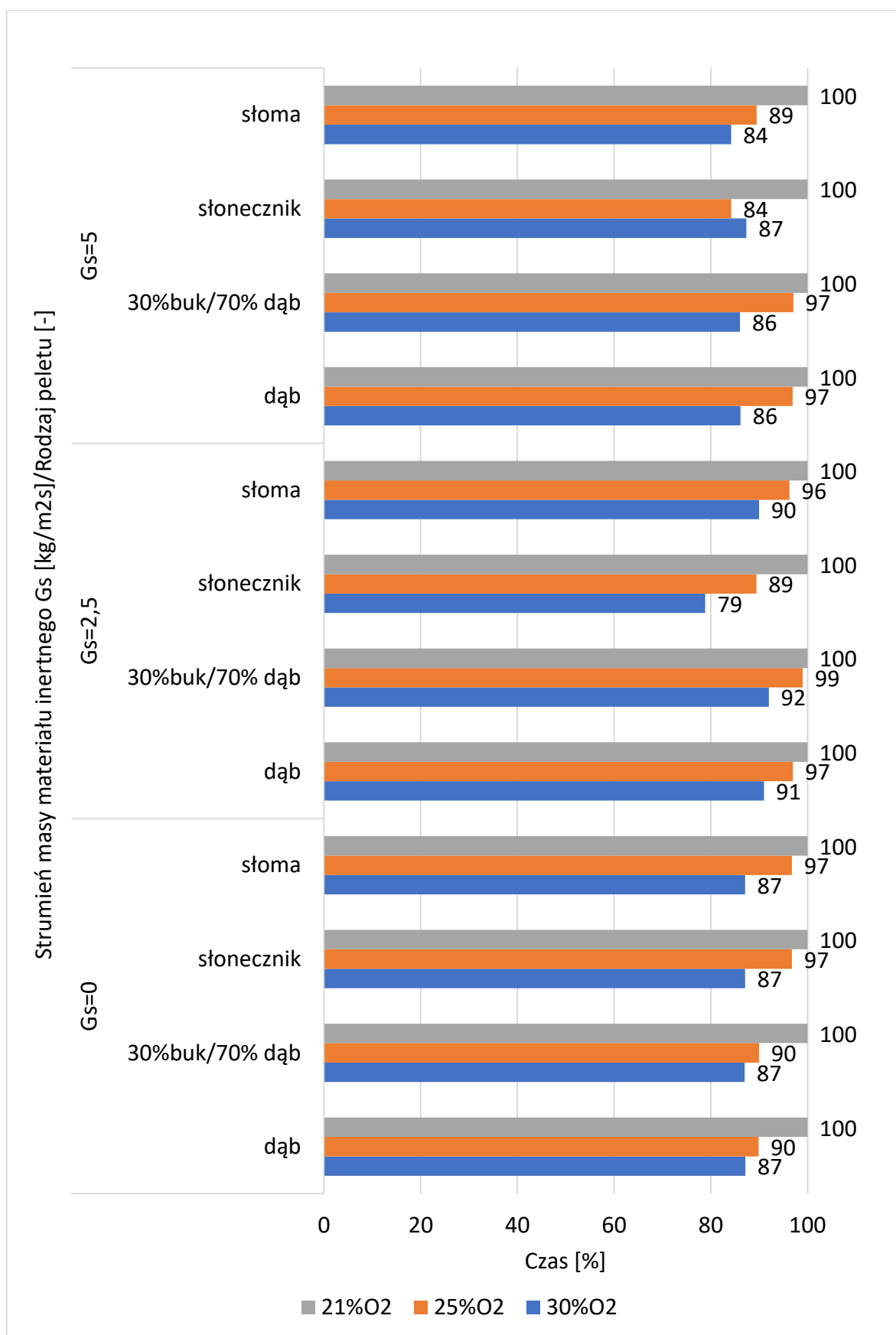
Czas spalania peletów z biomasy w badanych atmosferach utleniających oraz czas spalania peletów z biomasy w odniesieniu do atmosfery 21% O<sub>2</sub>/79% CO<sub>2</sub> został zamieszczony na rys. 61 i 62. Jak opisano wcześniej zwiększenie zawartości utleniacza w atmosferze spalania przyspiesza proces spalania we wszystkich przypadkach. Podczas spalania peletów bez materiału inertnego najdłużej spalały się pelety z biomasy leśnej, najkrócej pelet agro ze słomy. W przypadku spalania tych samych peletów przy G<sub>s</sub>=2,5 i 5 kg/m<sup>2</sup>s sytuacja była odwrotna, najkrócej spalały się pelety z biomasy leśnej, a najdłużej spalał się pelet agro z łuski słonecznika. Podczas spalania biomasy agro w strumieniu materiału inertnego we wszystkich atmosferach spalania zaobserwowane zostało wystąpienie zjawiska mięknięcia popiołu, które spowodowało oblepianie ziaren peletu z łuski słonecznika przez materiał inertny tworząc spiek oraz tworzenie się spieków podczas spalania peletu ze słomy.

Czas spalania wszystkich peletów z biomasy w zależności od wartości G<sub>s</sub> w różnych atmosferach został zamieszczony na rys 63. Obecność materiału inertnego wyraźnie powodowała skrócenie całkowitego czasu spalania w każdej analizowanej atmosferze utleniającej (w zakresie 21-49%), a zwiększenie strumienia G<sub>s</sub> z 2,5 do 5 kg/m<sup>2</sup>s w dalszym ciągu skracало czas spalania, choć w mniejszym stopniu (o 3-13%). Jedynym wyjątkiem był pelet z łuski słonecznika spalany w atmosferze zawierającej 30% tlenu, gdzie czas spalania przy G<sub>s</sub>=5 kg/m<sup>2</sup>s wydłużył się o 1% w porównaniu z czasem spalania przy G<sub>s</sub>=2,5 kg/m<sup>2</sup>s.

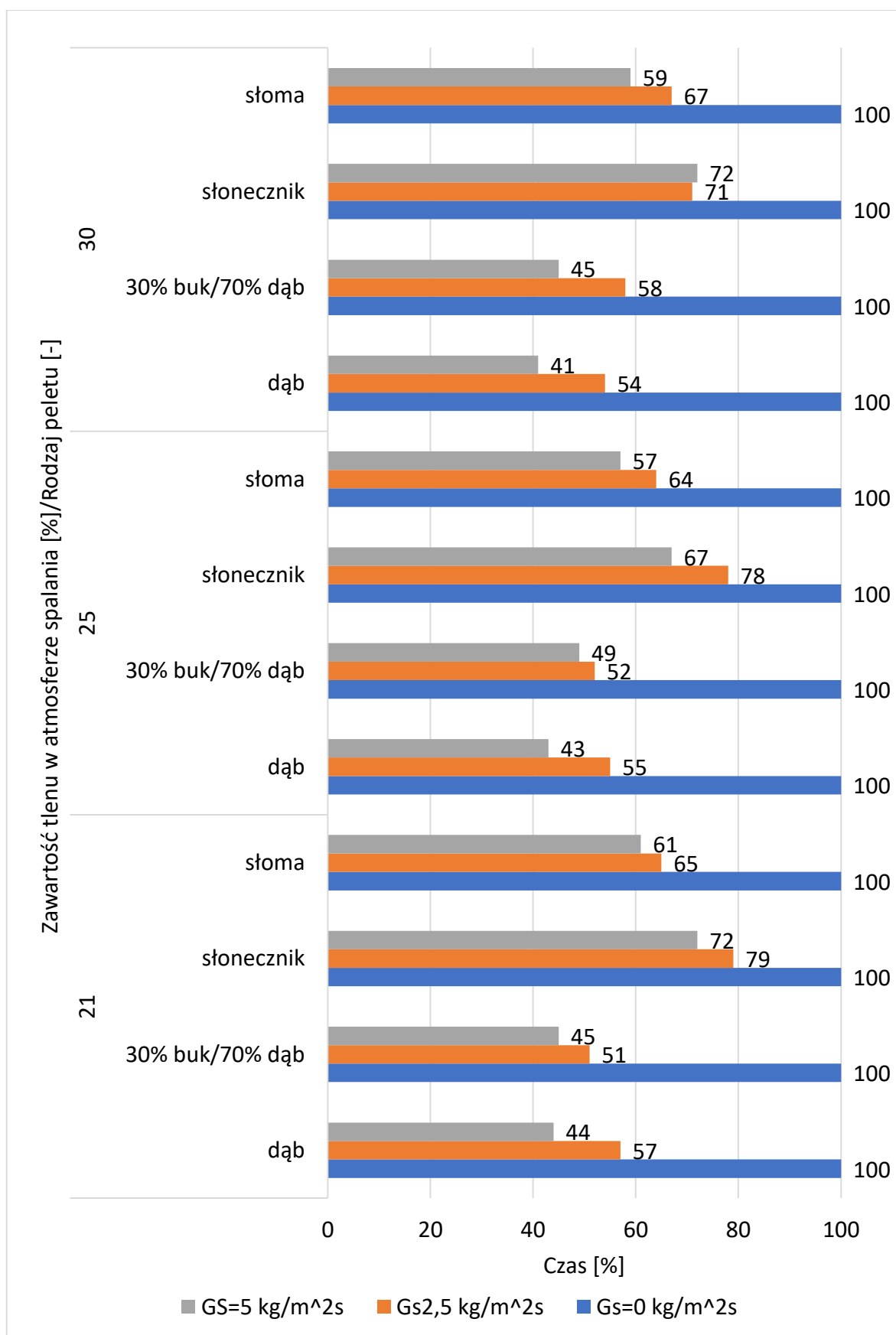


Rys. 61. Czas spalania peletów z biomasy spalanych w różnych warunkach





Rys. 62. Czas spalania peletów z biomasy w atmosferach utleniających o różnej zawartości tlenu w porównaniu do atmosfery odniesienia (21% tlenu)



Rys. 63. Czas spalania peletów z biomasy w zależności od wartości strumienia materiału Gs spalanych w różnych atmosferach (Gs=0 poziom odniesienia)

Przeprowadzone w tej części pracy badania eksperymentalne wskazują, że pochodzenie biomasy istotnie wpływa na mechanizm i czas jej spalania w warstwie fluidalnej. Obecność materiału inertnego powoduje bardzo istotne różnice w procesie spalania biomasy leśnej i agro, które głównie zaobserwowano w temperaturze 850°C. Podczas spalania biomasy leśnej nie występują żadne negatywne zjawiska, które mogłyby wpłynąć na pracę wszystkich typów kotłów. Natomiast biomasa agro zawiera znacznie większą niż biomasa drzewna ilość metali alkalicznych. Zarówno podczas jej spalania w atmosferze powietrza jak i mieszaninie O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> w strudze materiału inertnego w temperaturze 850°C obserwowano zjawisko mięknięcia popiołu i tworzenie się spieków. W konsekwencji wytworzone spieki, mogą zaburzyć warunki hydrodynamiczne złoża, a nawet doprowadzić do jego defluidyzacji.

### 7.2.1 Analiza popiołu badanych paliw biomasowych

W celu wyjaśnienia powodów mięknięcia popiołu zaobserwowanego i opisanego we wcześniejszym rozdziale zdecydowano się na analizę popiołu badanych paliw.

Generalnie biomasa zawiera znacznie mniej popiołu niż typowe paliwa kopalne. Zawartość popiołu w węglu kamiennym waha się w zakresie 3,5-27,9%, a w przypadku biomasy leśnej 0,3-6,9% [141]. Jednak jego skład chemiczny jest znacznie bardziej zróżnicowany – tab.3 [54]. Jak wspomniano w przeglądzie literatury szczególnie istotnym zagadnieniem w aspekcie energetycznego wykorzystania biomasy w procesach spalania i współspalania jest stosunkowo wysoka zawartość chloru oraz związków alkalicznych sodu i potasu, które mogą spowodować poważne uszkodzenie jednostek spalania.

Wyniki analizy składu chemicznego tlenkowego popiołu badanych paliw zostały przedstawione w tab. 15. Analizę popiołu wykonano techniką fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją fali WD-XRF.

Wskazują one na wysoką zawartość tlenków metali alkalicznych w obu przypadkach paliw z biomasy agro. Wyniki te potwierdzają, iż powodem mięknięcia popiołu jest wysoka zawartość tlenku potasu w przypadku peletu z łuski słonecznika oraz tlenku sodu w przypadku słomy.

Tab. 15. Wyniki analizy składu chemicznego popiołu badanych paliw biomasowych

Paliwo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	Mn
Pelet z trociny dębowej	0,48	0,76	3,57	42,1	12,95	4,44	0,8	0,05
Pelet 30%buk /70%dąb	0,49	0,69	3,14	40,91	13,02	4,49	0,71	0,04
Pelet łuska słonecznika	0,81	0,51	3,04	18,47	34,65	3,55	0,61	0,03
Pelet ze słomy	0,11	0,34	2,84	18,94	10,93	3,68	2,29	0,11

W przypadku paliw bogatych w potas, w wyniku interakcji między składnikami popiołu a obojętnym materiałem złoża fluidalnego dochodzi do tworzenia się lepkich powłok wokół cząstek złoża. Najbardziej dominującą reakcją jest tworzenie się niskotopliwych krzemianów, podczas reakcji metali alkalicznych z popiołu paliwa oraz krzemu z piasku kwarcowego. Lepkość związana z obecnością na powierzchni warstwy krzemianów, powoduje ich wzajemne przyleganie i ostatecznie mogą zahamować dalszą fluidyzację [155]. Słoma, bogata w związki sodu charakteryzuje się skłonnością do zużłowania [155].

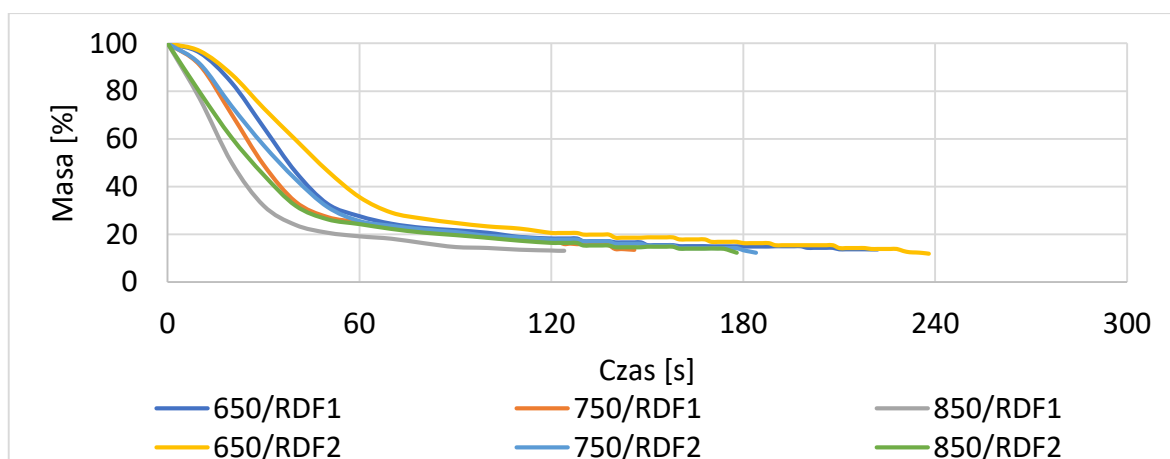
### 7.3 WYNIKI BADAŃ SPALANIA PELETÓW RDF

Dotychczasowy proces transformacji energetycznej sprawia, że udział paliw produkowanych z odpadów w rynku energii systematycznie rośnie. Wykorzystanie paliw RDF pozwala równocześnie na termiczne unieszkodliwienie odpadów z jednoczesnym odzyskiem energii. Przeprowadzenie dodatkowych procesów obróbki paliw z odpadów m.in. proces peletyzacji prowadzi do zmniejszenia zawartości wilgoci, wpływając na zwiększenie ich wartości opałowej. Do wad tego typu paliwa należą m.in. jego zmienne właściwości fizykochemiczne, a także możliwość wystąpienia procesów korozji i szlakowania instalacji spalania. Mogą one jednak zostać zniwelowane przez odpowiedni dobór i kontrolę parametrów procesu termicznego przetwarzania.

W rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych spalania wybranych peletów RDF w warstwie fluidalnej w różnych warunkach procesowych. Przyjęto ten sam zakres badań jak dla przypadku paliw biomasowych. Szczegółowa analiza ich spalania pozwoli na kompleksowe poznanie tego procesu w warunkach warstwy fluidalnej.

Opisane w niniejszym rozdziale badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku eksperymentalnym zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 6.1.

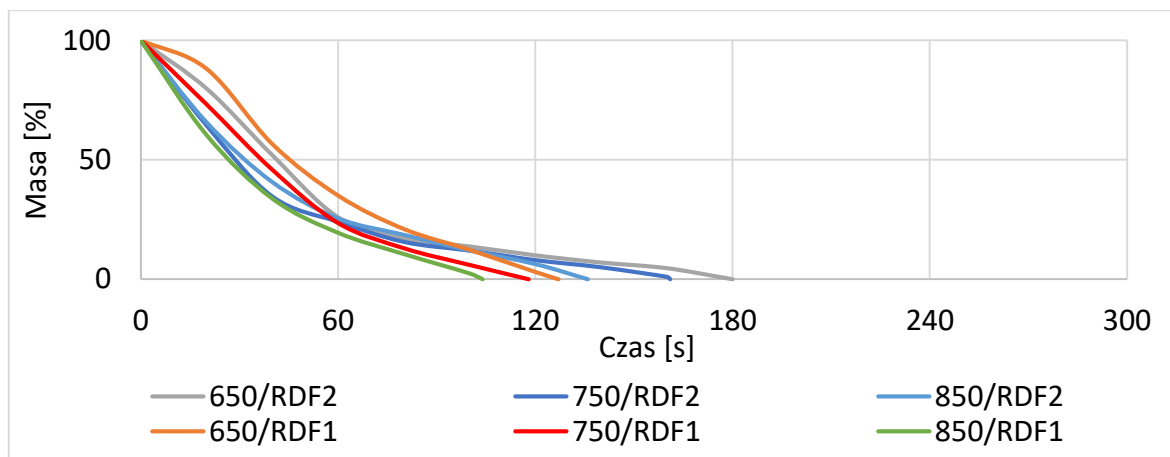
W pierwszym etapie badań procesu spalania RDF, ziarna paliw RDF1 i RDF2 spalono w atmosferze powietrza atmosferycznego przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturze kolejno: 650, 750 oraz 850°C. Wyniki przedstawiające ich procentowy ubytek masy zamieszczono na rys. 64. Zauważono, iż czas nagrzewania ziarna i odparowania wilgoci był najdłuższy w temperaturze 650°C. Dla ziarna RDF1 wyniósł blisko 10 s, a dla ziarna RDF2 15 s, natomiast w przypadku temperatury 750°C uległ skróceniu do 3 s dla obu rodzajów peletów. W temperaturze 850°C sumaryczny czas nagrzewania ziarna i odparowania wilgoci obu rodzajów peletów ponownie uległ skróceniu i był trudny do odnotowania. Kolejnym analizowanym etapem spalania był zapłon i spalanie wydzielających się z paliwa części lotnych charakteryzujący się gwałtownym ubytkiem masy, trwający średnio 40-50s. Ostatnim etapem procesu spalania był powolny proces ubytku masy karbonizatu. Spalanie części lotnych w temperaturze 850°C odbywało się intensywniej niż w niższych temperaturach. W temperaturze 850°C trwało ok. 30- 40 s, a w pozostałych temperaturach blisko 50 s w przypadku obu rodzajów peletów. Wypalanie karbonizatu trwało najdłużej w temperaturze 650°C, 160-170 s dla obu typów peletów. Natomiast w temperaturach 750°C i 850°C etap ten trwał ok. 90 s w przypadku ziarna RDF1 oraz ok. 130 s w ziarna RDF2.



Rys. 64. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w różnych temperaturach przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

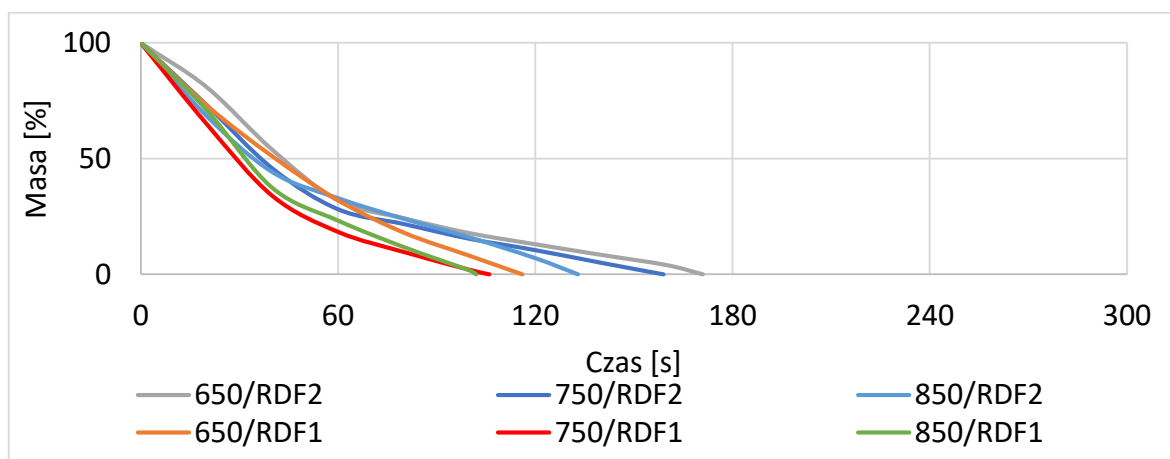
Kolejnym etapem badań było spalanie ziaren peletów RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza, ale w obecności materiału inertnego przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Ich procentowy ubytek masy zamieszczono na rys. 65. Zarejestrowany ubytek charakteryzuje się znacznie większą intensywnością w odróżnieniu do ich ubytku przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Etap procesu

nagrzewania ziarna i odparowania wilgoci jest niezauważalny. Zarejestrowana różnica ubytku masy między etapem wypalania części lotnych a spalaniem karbonizatu w obecności materiału inertnego staje się mniej wyraźna. Wszystkie krzywe obrazujące ubytek masy osiągają wartość zerową.



Rys. 65. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w różnych temperaturach

Procentowy ubytek masy podczas spalania RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w strumieniu materiału inertnego  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturze 650, 750 oraz 850°C przedstawia kolejny rys. 66. W wyniku zwiększenia natężenia strumienia materiału inertnego  $G_s$  z 2,5 do 5  $\text{kg/m}^2\text{s}$  skrócił się czas etapu spalania karbonizatu, szczególnie w temperaturze 650°C o 11 s (16,4%) w przypadku RDF1 oraz 9 s (7,5%) w przypadku RDF2.



Rys. 66. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w strumieniu materiału inertnego  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w różnych temperaturach

Czas spalania RDF1 i RDF2 w różnych warunkach panujących podczas eksperymentów został zamieszczony na rys. 67. Ponownie wraz z obniżaniem

temperatury komory spalania obserwowano wydłużenie czasu spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2. Porównanie czasu spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w różnych warunkach komory paleniskowej przedstawia rys. 68. Podczas spalania ziaren obu rodzajów paliw: RDF1 i RDF2 przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  zmiana temperatury z  $850^\circ\text{C}$  do  $750^\circ\text{C}$  w mniejszym stopniu wpłynęła na wydłużenie całkowitego czasu spalania (o 18% RDF1 i o 3% RDF2) niż obniżenie temperatury w komorze spalania o kolejne  $100^\circ\text{C}$  (o 79% RDF1 oraz o 34% RDF2).

Podobnie jak w przypadku spalania peletów RDF1 i RDF2 przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , podczas ich spalania w obecności materiału inertnego przy  $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , wraz ze spadkiem temperatury obserwowano wydłużenie czasu spalania peletów, ale miało ono inny charakter. Przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  zmiana temperatury z  $850$  do  $750^\circ\text{C}$  oraz z  $750$  do  $650^\circ\text{C}$  spowodowała podobne wydłużenie czasu spalania.

Natomiast podczas spalania ziaren peletów przy  $G_s>0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  wydłużenie czasu w zależności od temperatury komory paleniskowej było bardziej zróżnicowane. Przy niższej wartości natężenia  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  wydłużenie czasu spalania dla RDF1 w  $750^\circ\text{C}$  wynosiło 13%, a w  $650^\circ\text{C}$  22%. Natomiast dla RDF 2 w tych temperaturach odpowiednio 18 i 32%. Po zwiększeniu  $G_s$  do  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w przypadku RDF1 w  $750^\circ\text{C}$  wynosiło 4%, a w  $650^\circ\text{C}$  14% oraz w przypadku RDF 2 w tych samych temperaturach odpowiednio 20 i 29%.

We wszystkich analizowanych warunkach średni czas spalania peletów RDF2 był dłuższy niż czas spalania peletów RDF1.

Podczas spalania peletów przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , różnice były następujące:

- w  $850^\circ\text{C}$  - 44%,
- w  $750^\circ\text{C}$  - 26%,
- w  $650^\circ\text{C}$  - 7%.

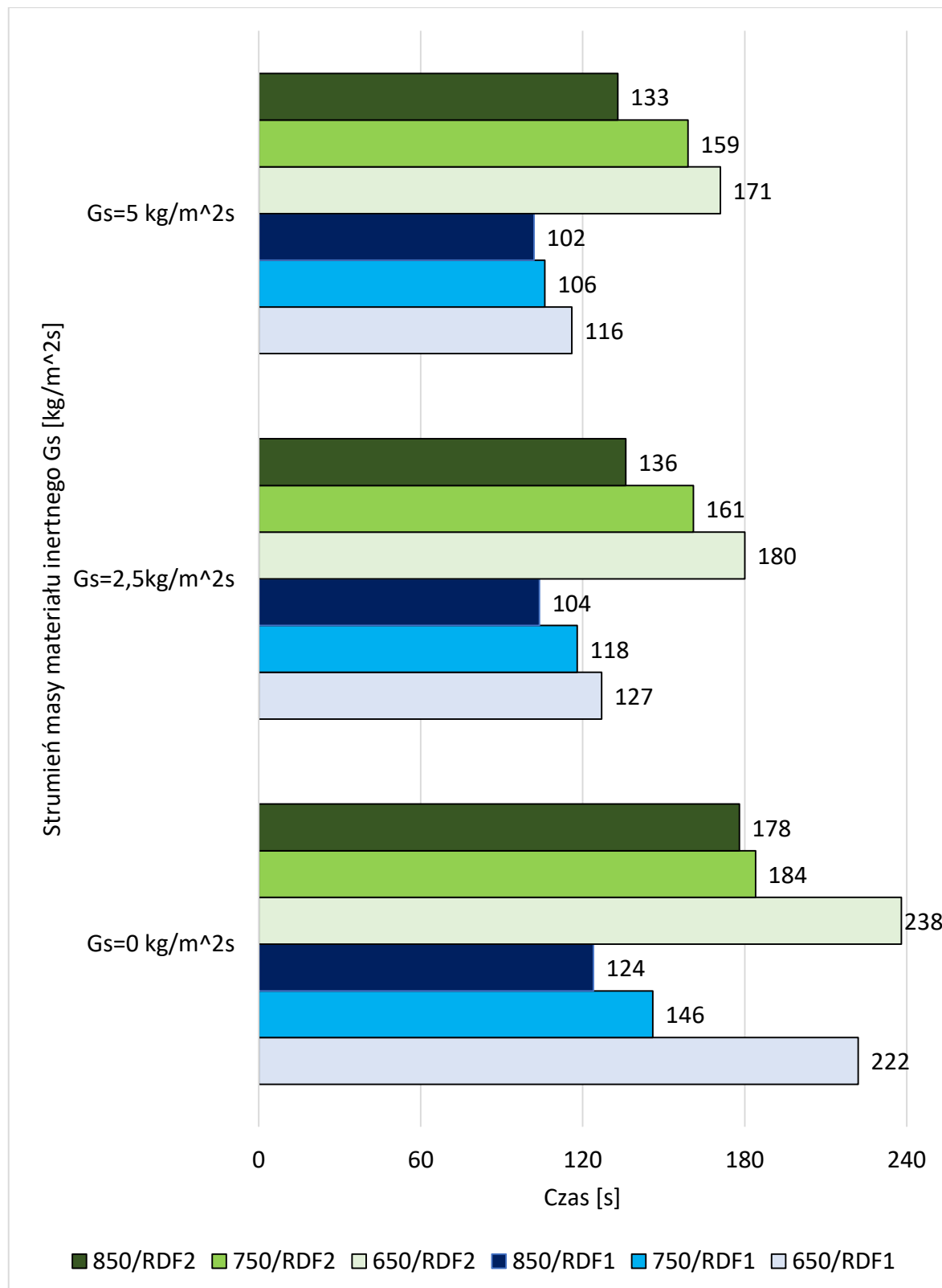
Podczas spalania ziaren peletów przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :

- w  $850^\circ\text{C}$  - 31%,
- w  $750^\circ\text{C}$  - 36%,
- w  $650^\circ\text{C}$  - 42%.

Po zwiększeniu wartości strumienia  $G_s$  do  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :

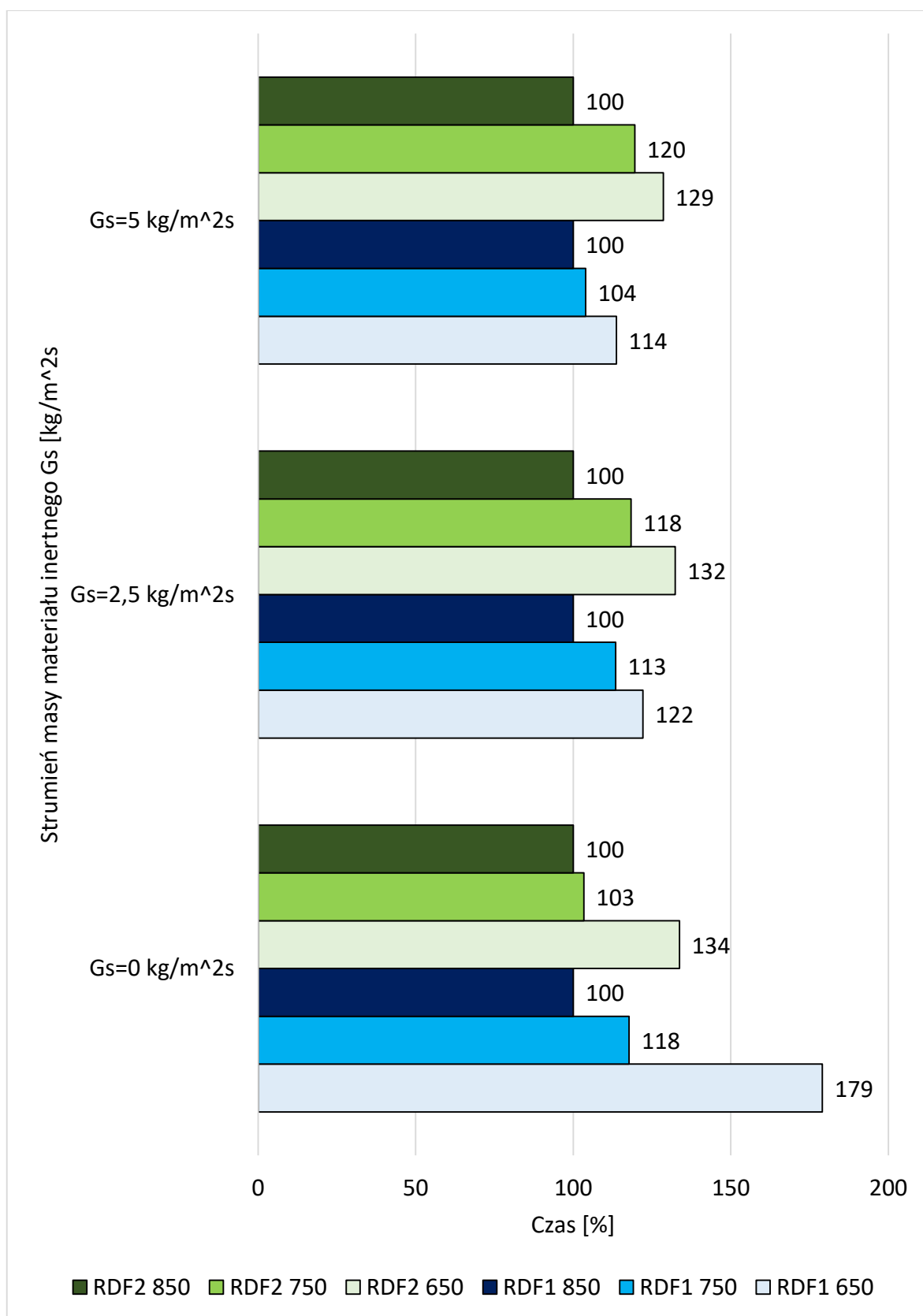
- w  $850^\circ\text{C}$  - 30%,
- w  $750^\circ\text{C}$  - 50%,
- w  $650^\circ\text{C}$  - 47%.

W temperaturze 850°C w miarę zwiększania natężenia strumienia materiału inertnego różnica czasu spalania między peletami RDF1 i RDF 2 się zmniejszała, w pozostałych temperaturach (750°C i 650°C) tendencja była odwrotna.



Rys. 67. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w różnych warunkach komory paleniskowej (temperatury: 650, 750 oraz 850°C, strumień materiału inertnego Gs=0, 2,5 oraz 5 kg/m<sup>2</sup>s)



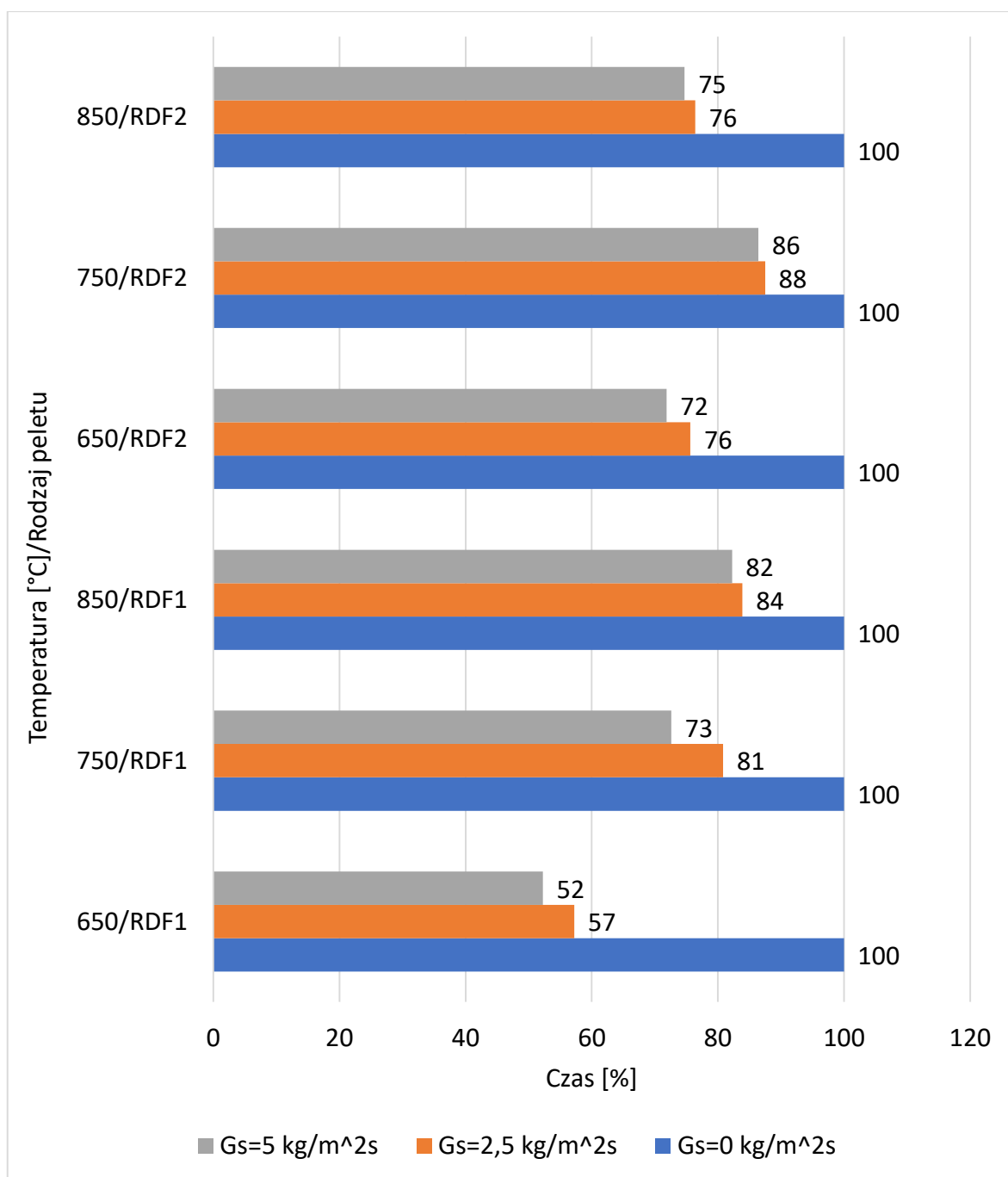


Rys. 68. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w temperaturach 750 i 650°C komory spalania w stosunku do temperatury odniesienia (850°C) w różnych strumieniach materiału inertelego: Gs=0, 2,5 oraz 5 kg/m<sup>2</sup>s

Oddziaływanie materiału inertnego powoduje skracanie czasu spalania RDF1 i RDF2 w każdej temperaturze komory spalania co przedstawiono na rys. 69. Sama obecność materiału inertnego w większym stopniu wpływa na skracenie czasu spalania peletów RDF 1 i RDF2 niż zwiększenie jego natężenia w badanym zakresie. Wzrost strumienia materiału inertnego nie wpływa na mechanizm spalania ziarna paliwa, ale prowadzi do jego intensyfikacji. Zwiększenie natężenia strumienia materiału inertnego zwiększa wpływ erozyjnego oddziaływania uderzających o powierzchnię płonącego ziarna peletu ziaren materiału inertnego, co przyspiesza ubytek masy ziaren i skraca całkowity czas spalania peletów.

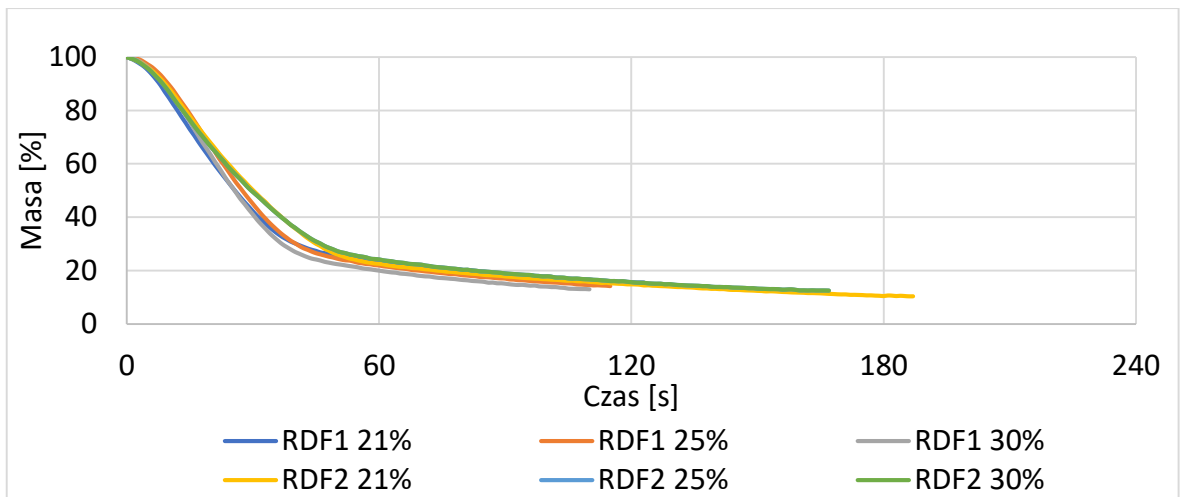
Materiał inertny spowodował największe różnice czasu spalania w przypadku peletu RDF1 i temperatury 650°C, gdzie czas spalania przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  był o 43% krótszy, niż bez materiału inertnego. Zwiększenie natężenia do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  spowodowało skrócenie czasu spalania o kolejne 5%. W przypadku pozostałych temperatur czas spalania przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  był o 16-19% krótszy, niż bez materiału inertnego. Zwiększenie natężenia do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  skróciło czas spalania o kolejne 2-8%.

W przypadku peletów RDF2 we wszystkich temperaturach czas spalania przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  był o około 12-24% krótszy, niż bez materiału inertnego. Zwiększenie natężenia do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  spowodowało skrócenie czasu spalania o kolejne 1-4%.

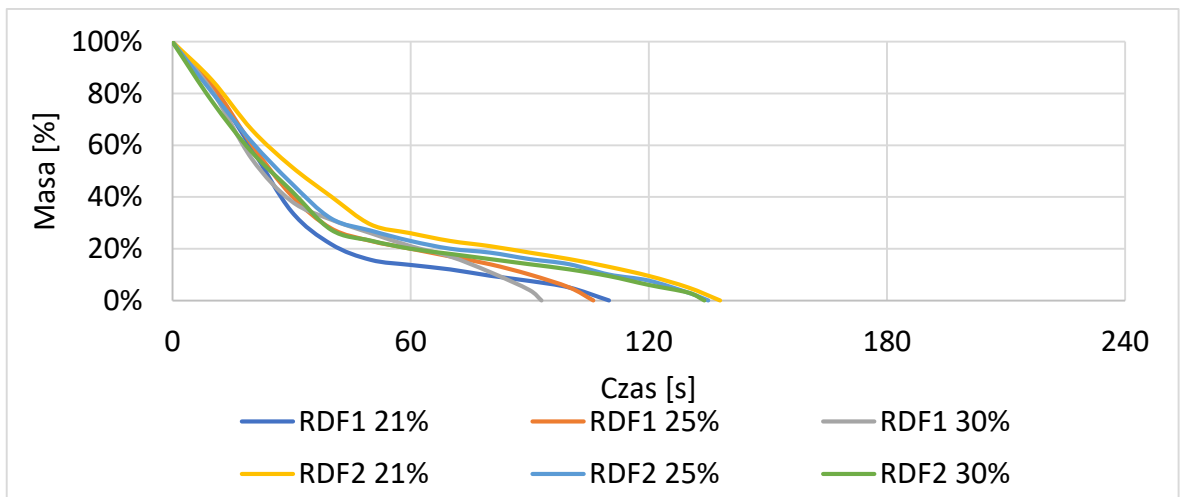


Rys. 69. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach

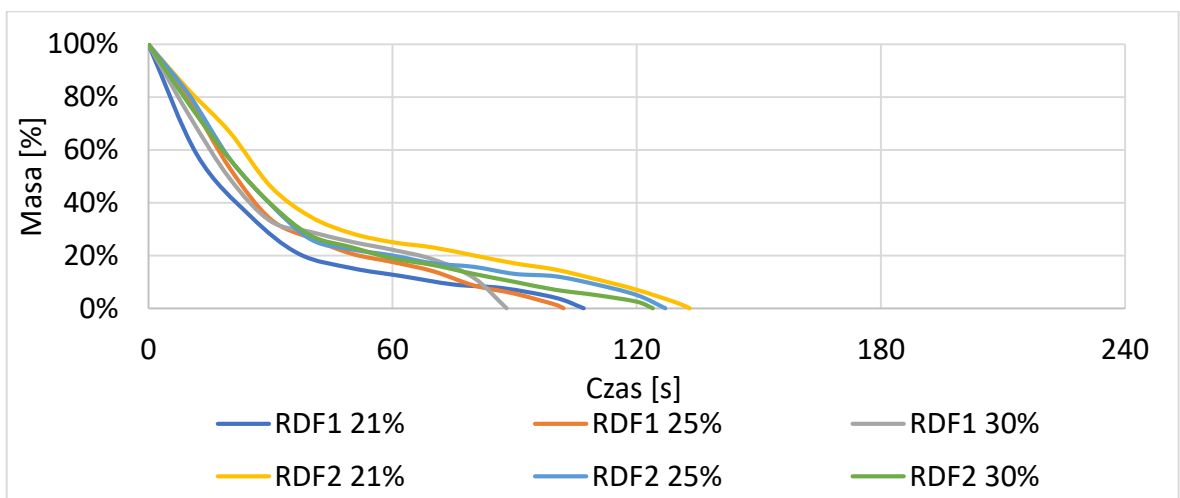
Kolejnym etapem badań RDF była analiza wpływu atmosfery utleniającej na proces spalania. Badania przeprowadzono dla tych samych warunków jak dla paliw biomasowych. We wszystkich rozpatrywanych koncentracjach zwiększenie udziału tlenu w atmosferze spalania powodowało skrócenie czasu całkowitego ubytku masy spalanych ziaren peletów RDF1 i RDF2 - rys. 70-72.



Rys. 70. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu bez materiału inertnego w temperaturze 850°C



Rys. 71. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu i strumieniu materiału inertnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturze 850°C



Rys. 72. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu i strumieniu materiału inertnego  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w temperaturze 850°C

Zestawienie czasu spalania RDF1 i RDF2 w analizowanych podczas eksperymentu warunkach zamieszczono na rys. 73 oraz 74.

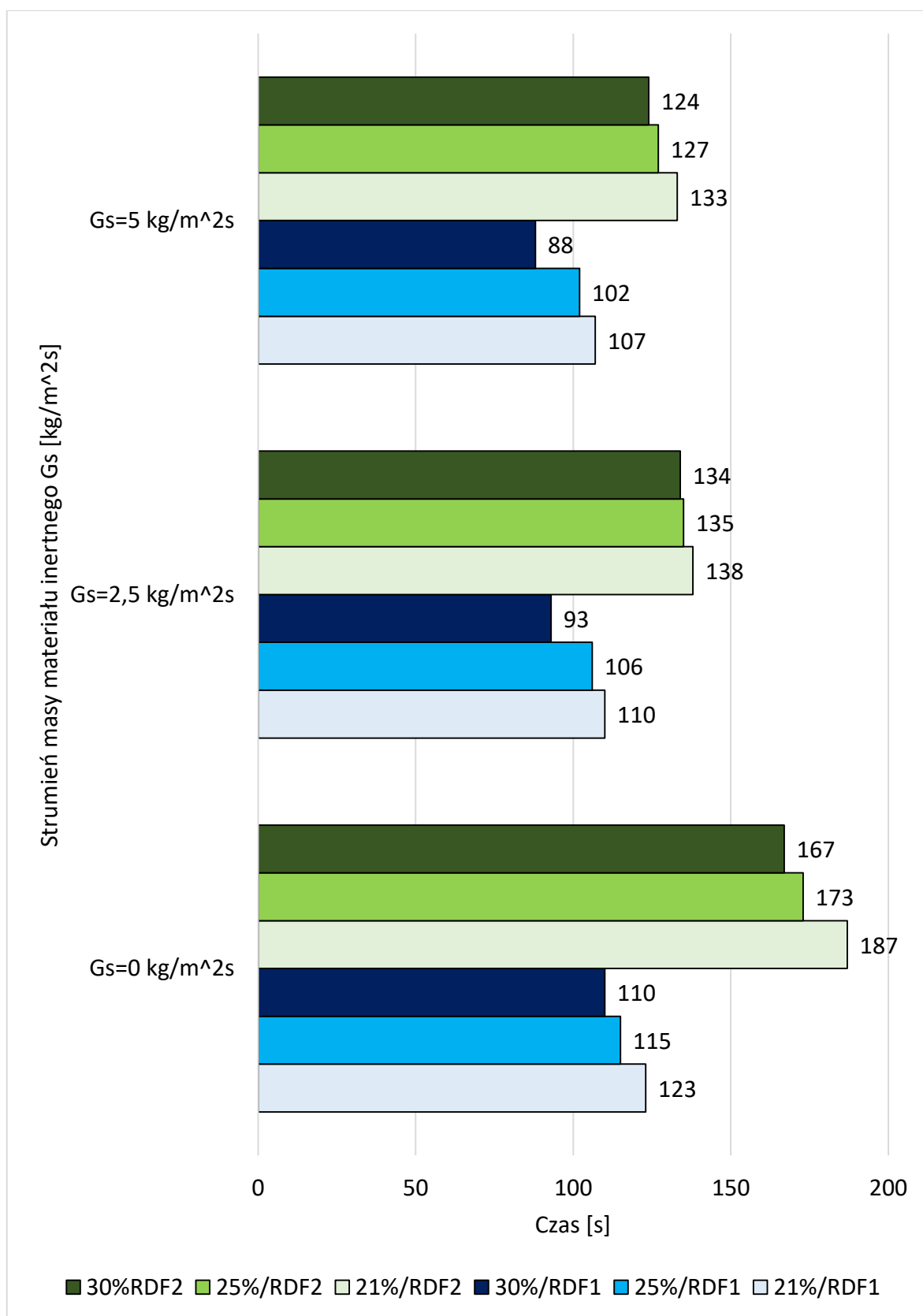
Podczas spalania ziaren peletów RDF 1 i RDF2 przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , skrócenie czasu spalania wynikające ze zmiany koncentracji utleniacza jest takie samo dla obu paliw. Podczas spalania peletów w strumieniu materiału inertnego zwiększenie zawartości utleniacza w atmosferze spalania spowodowało nieco większe skrócenie czasu spalania peletów w przypadku RDF1 (4-18%) niż RDF2 (2-7%).

Podobnie jak podczas pierwszego etapu badań eksperymentalnych spalania paliw RDF czas spalania ziaren peletów RDF2 jest w każdym przypadku dłuższy od czasu spalania peletów RDF1. Przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  pelety RDF2 w każdej atmosferze utleniającej spalały się o około 50% dłużej niż pelety RDF1. Podczas spalania peletów przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , różnice są następujące:

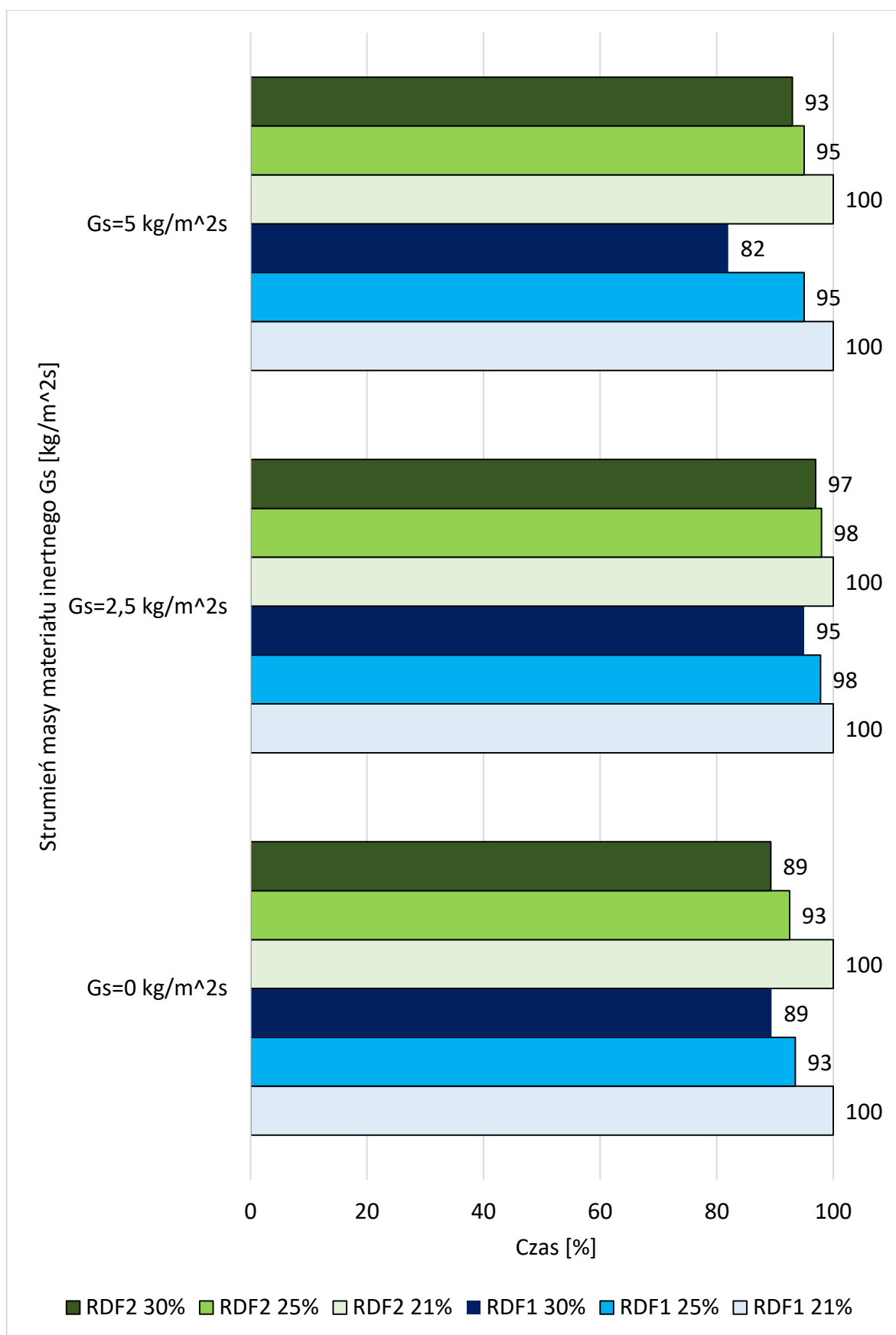
- przy koncentracji utleniacza 21% - 26%,
- przy koncentracji utleniacza 25% -27%,
- przy koncentracji utleniacza 30% - 44%.

Przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ :

- przy koncentracji utleniacza 21% - 24%,
- przy koncentracji utleniacza 25% -24%,
- przy koncentracji utleniacza 30% - 40%.



Rys. 73. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 badanych przy różnym udziale tlenu i strumieniach materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w temperaturze  $850^\circ\text{C}$



Rys. 74. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 podczas zmiany zawartości utleniacza w atmosferze komory spalania w porównaniu z atmosferą odniesienia (21% tlenu) w różnych strumieniach materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ )

Ponownie zauważono, iż wzrost natężenia strumienia materiału inertnego powodował skrócenie czasu spalania paliw RDF w różnych atmosferach utleniających. Czas spalania paliwa RDF1 i RDF2 w strumieniu materiału inertnego w porównaniu ze spalaniem przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  w różnych atmosferach utleniających zamieszczono na rys. 75. Materiał inertny w nieco większym stopniu wpłynął na czas spalania peletów RDF2 niż RDF1, ale zwiększenie jego natężenia spowodowało podobne skracanie czasu spalania:

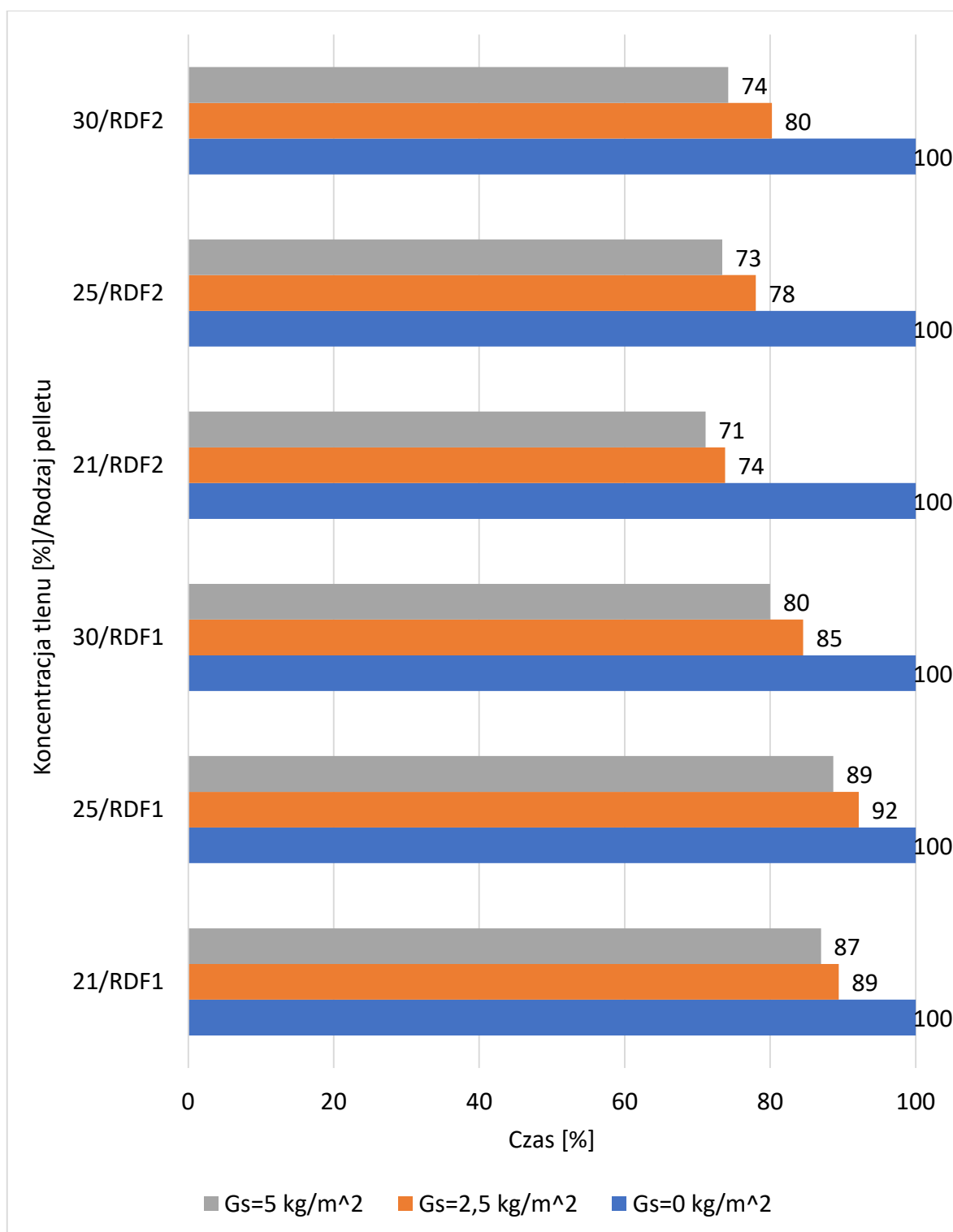
w przypadku spalania RDF1:

- przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  o 8-15%,
- przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  o 2-5%,

w przypadku peletu RDF2:

- przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  o 20-26 %,
- przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  o 3-6%.





Rys. 75. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2$ ) w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) w różnych atmosferach utleniających

Ze względu na fakt, iż podczas badań paliw RDF nie zaobserwowano istotnych ze względów eksploatacyjnych problemów można przyjąć, iż ich spalanie może być zalecane w kotłach fluidalnych.

## 7.4 PORÓWNANIE PROCESU SPALANIA PALIW BIOMASOWYCH ORAZ RDF

Przeprowadzone i opisane w poprzednich rozdziałach badania paliw biomasowych oraz paliw RDF umożliwiają zestawienie i porównanie ich wyników.

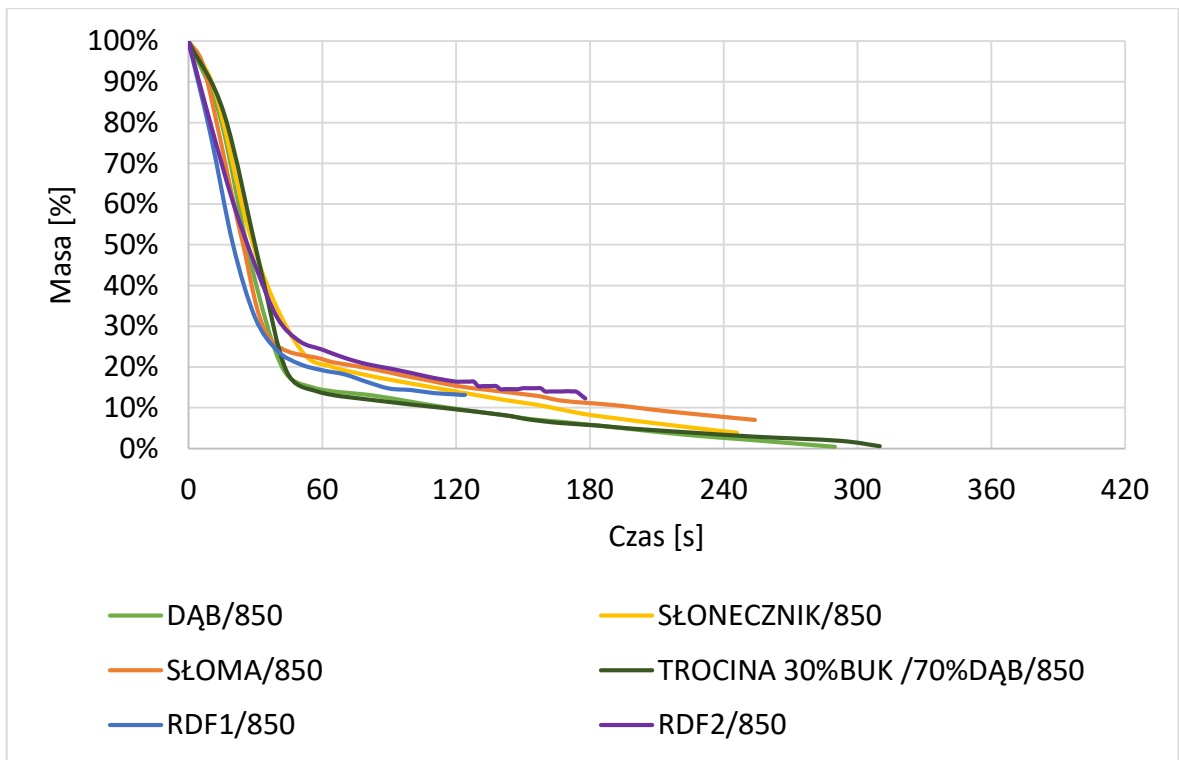
Paliwa te mimo zupełnie innego pochodzenia posiadają wiele wspólnych cech. Jedną z nich jest bardzo duży udział części lotnych >70%, co powoduje, że podczas etapów odparowania wilgoci, odgazowania i spalania części lotnych następuje gwałtowny blisko 70- 80% ubytek masy ziaren obu paliw.

Ze względu na zbliżoną zawartość części lotnych 70- 80% oraz wilgoci 2-8% (biomasa średnio 8,65% oraz 7,4% RDF2, wyjątkiem była najniższa zawartość wilgoci peletu RDF1- 2,1%) - tab. 7 i 12, czas etapu nagrzewania, odparowania wilgoci oraz zapłonu i spalania części lotnych wszystkich badanych paliw jest zbliżony i wynosi średnio 30- 50 s w 850°C - rys. 76 oraz 50-60 s w pozostałych temperaturach – rys. 77 i 78.

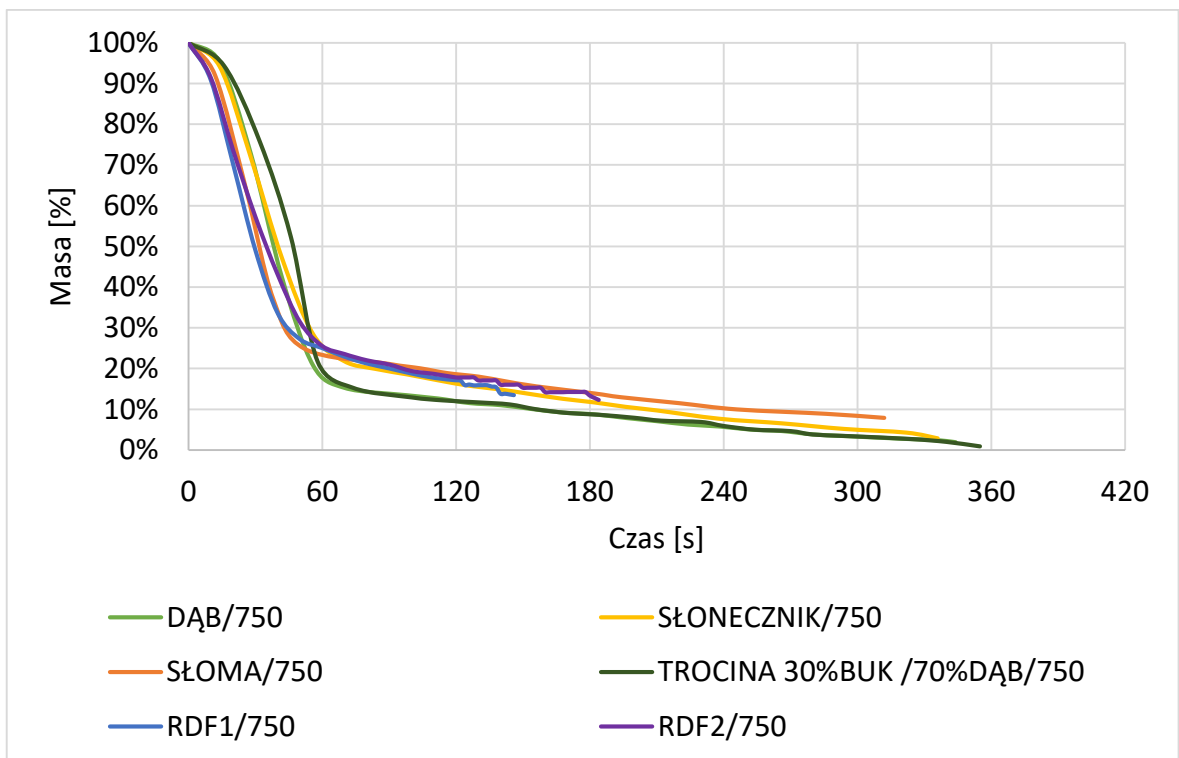
Zawartość stałej części palnej w przypadku paliw biomasowych była zbliżona i średnio wynosiła 10,2%. Podobnie było w przypadku paliw RDF, gdzie zawartość stałej części palnej była zbliżona w obu przypadkach i średnio wynosiła 6,65%. Ze względu na powyższe, czas spalania karbonizatu był krótszy w przypadku paliw RDF, niż w przypadku biomasy. Przykładowo w 850°C wynosił 90 s dla RDF1 oraz około 130 s dla RDF2. Spalanie karbonizatu biomasy agro trwało około 200 s, zaś w przypadku paliw z biomasy leśnej ok 240 s – rys.76.

Proces spalania paliw biomasowych oraz RDF bez materiału inertnego (przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) przebiegał podobnie we wszystkich temperaturach. Obniżenie temperatury spalania powodowało wydłużenie czasu spalania wszystkich paliw. W przypadku biomasy różnica wynosiła 15-25% na każde 100°C, a dla RDF różnica waha się od kilku do kilkudziesięciu % na każde 100°C, przy czym obniżenie temperatury z 850°C do 750°C w mniejszym stopniu wpłynęło na wydłużenie całkowitego czasu spalania niż obniżenie temperatury w komorze spalania do 650°C.

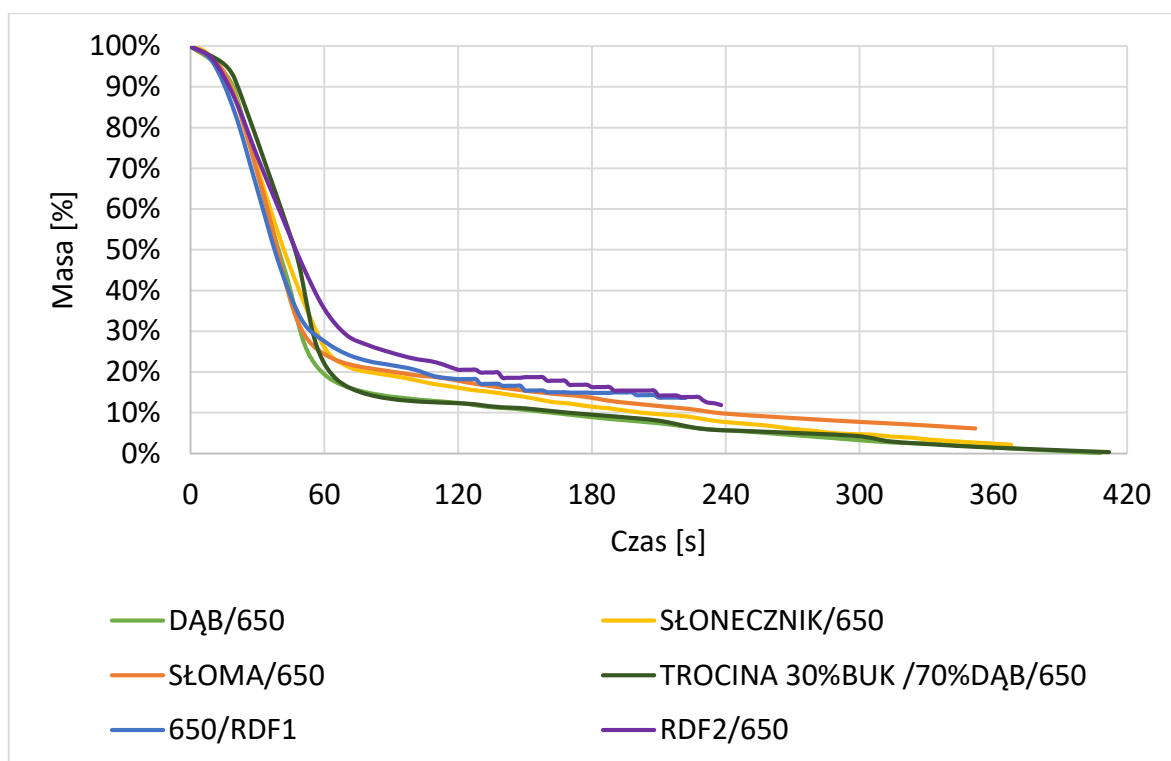
Średni czas spalania biomasy pochodzenia leśnego przy  $G_s= 0 \text{ kg/m}^2$  we wszystkich temperaturach był najdłuższy i o blisko 50% dłuższy niż paliw RDF. Czas spalania biomasy agro w porównaniu z biomasą leśną był krótszy o 7-17% we wszystkich analizowanych temperaturach.



Rys. 76. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 77. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

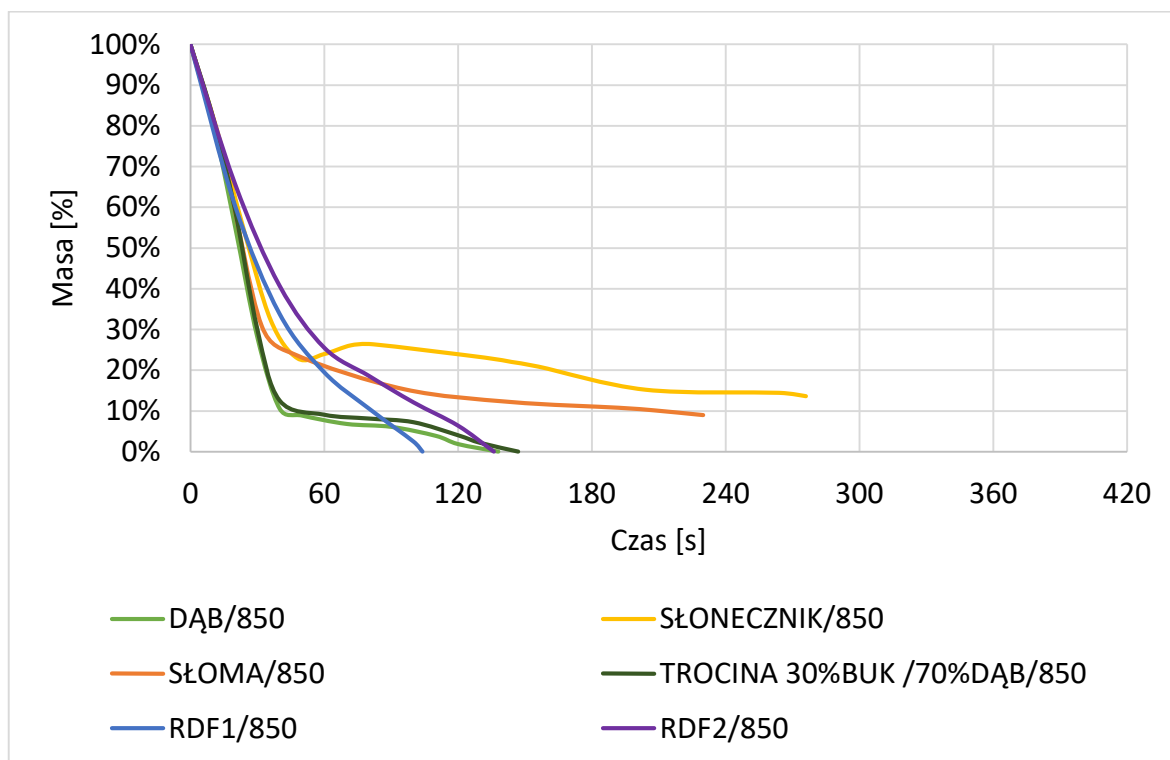


Rys. 78. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$

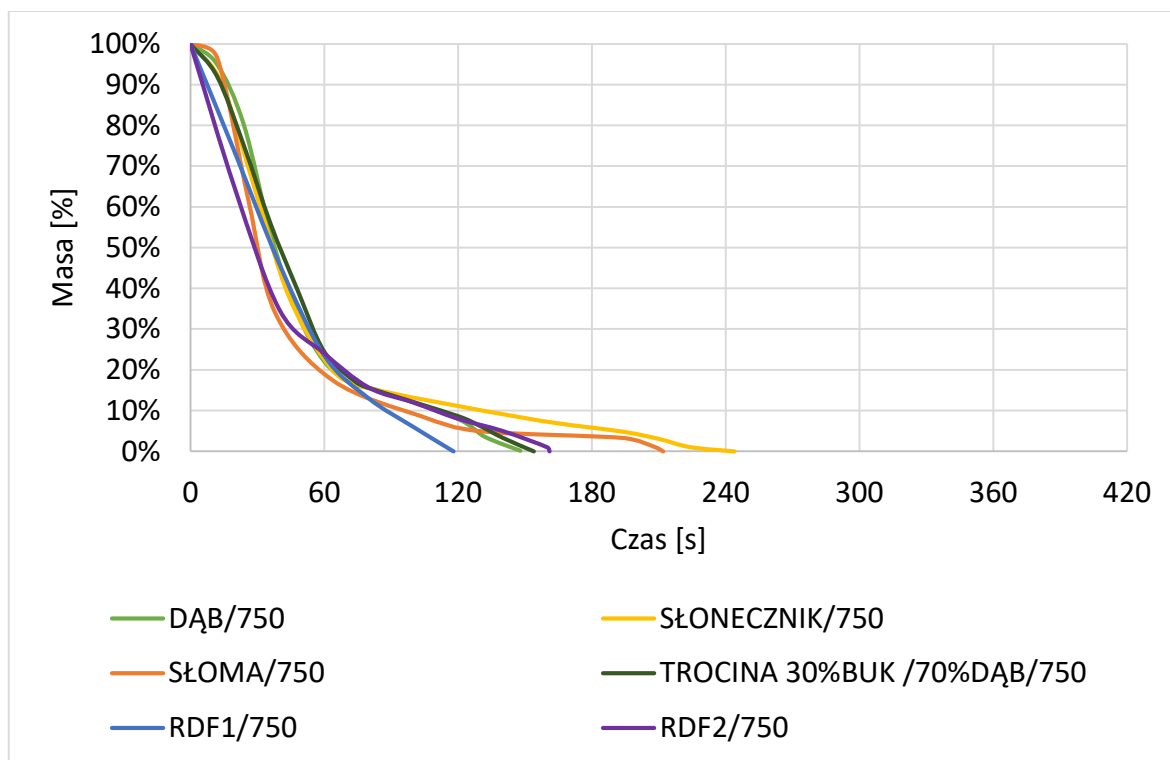
Ubytek masy paliw biomasowych oraz RDF spalanych w strumieniu materiału inertnego przy  $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2$  w różnych temperaturach przedstawiają rys. 79 – 84. Obniżenie temperatury komory podczas spalania przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , spowodowało nieco mniejsze wydłużenie czasu spalania w porównaniu ze spalaniem przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , które wynosiło dla biomasy leśnej 5-12% na każde 100°C, a dla RDF ok. 9-20% na każde 100°C. Natomiast przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , dla biomasy leśnej 7-14% na każde 100°C, a dla RDF 3-20% na każde 100°C.

Średni czas spalania peletów RDF jest najkrótszy we wszystkich temperaturach spalania. Z uwagi na intensyfikację procesu spalania wynikającą z obecności materiału inertnego różnica całkowitego czasu spalania biomasy leśnej i paliwa RDF jest mniejsza i waha się w zakresie 0-16% (przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  różnica między RDF a wszystkimi paliwami z biomasy wynosiła blisko 50%). Natomiast w przypadku biomasy agro w temperaturze 850°C z uwagi na omówione w rozdziale 6.2 zjawisko mięknięcia popiołu czas spalania uległ wydłużeniu, a na końcu krzywych przebiegu ubytku masy podczas procesu spalania – rys. 79 i 82 można odczytać masę spieku z peletu z łuski słonecznika oraz słomy. Podczas spalania biomasy i RDF przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2$  w temperaturach 650 i 750 °C pelety z biomasy agro spalały się blisko o 50% dłużej niż biomasa leśna. Natomiast po zwiększeniu strumienia materiału inertnego przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2$  w 750°C biomasa agro spalała się o

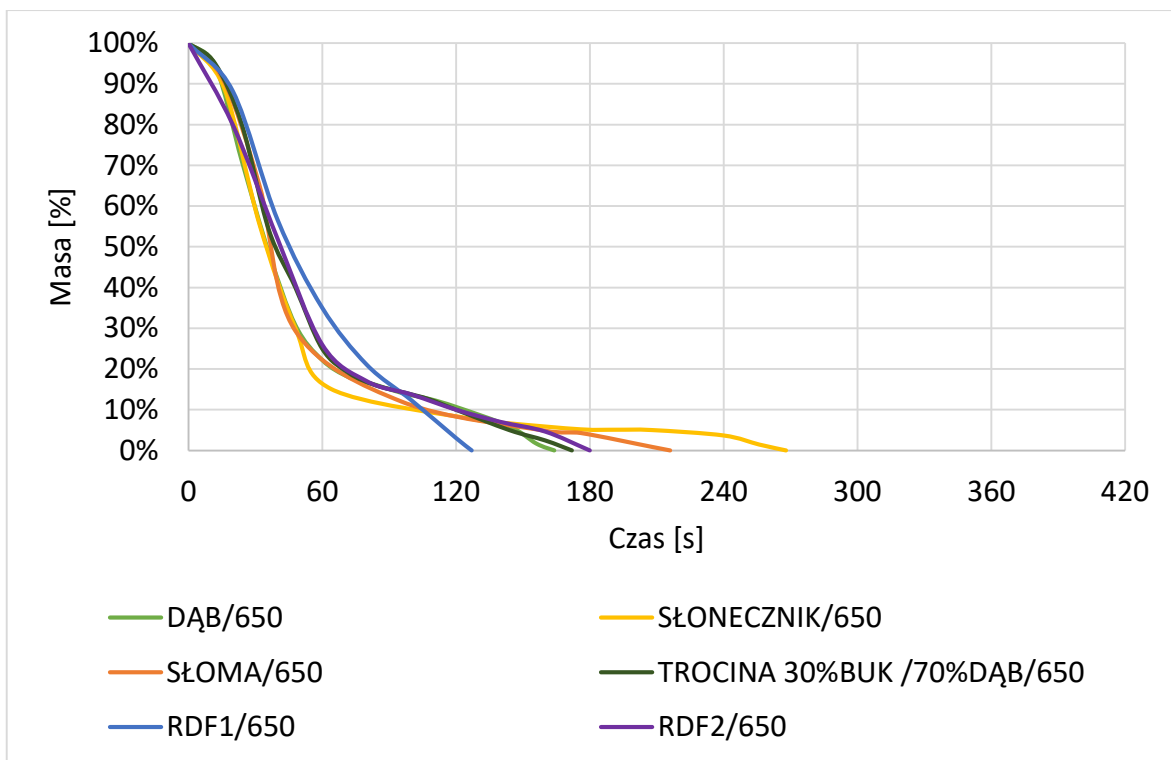
ponad 40% dłużej niż biomasa leśna, a w 650°C średni czas spalania obu typów biomasy był zbliżony (różnica 1,5 s).



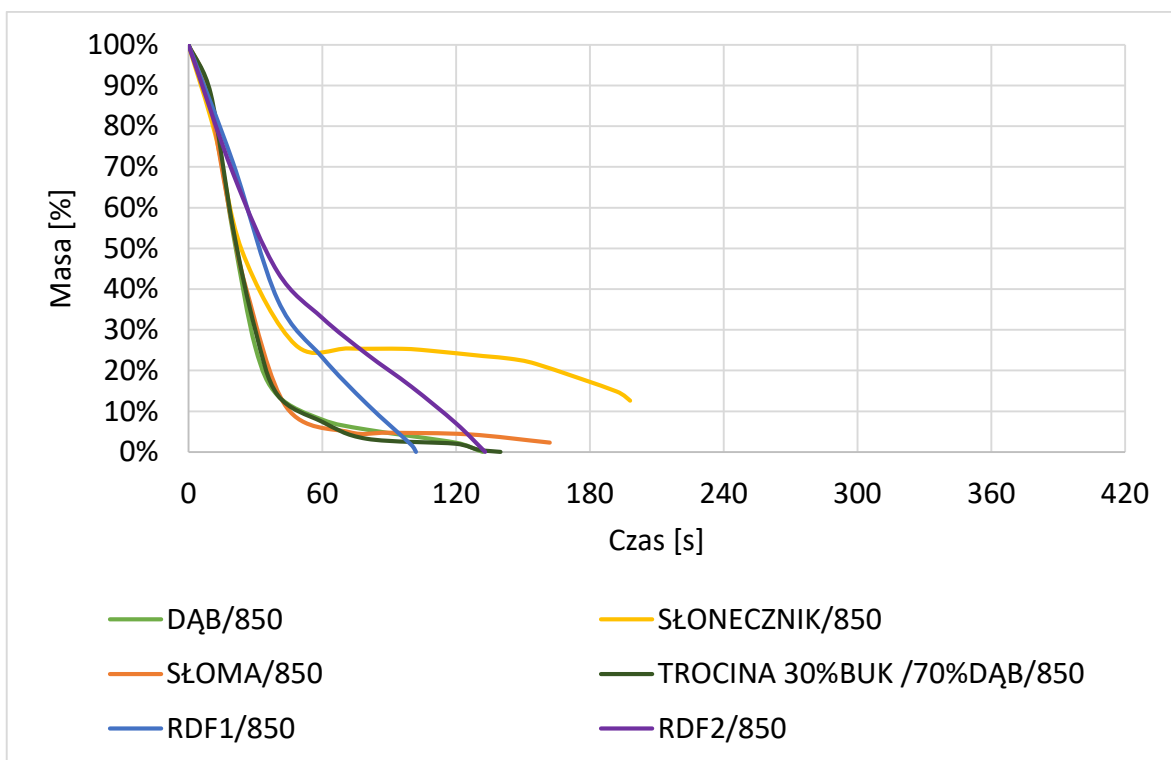
Rys. 79. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



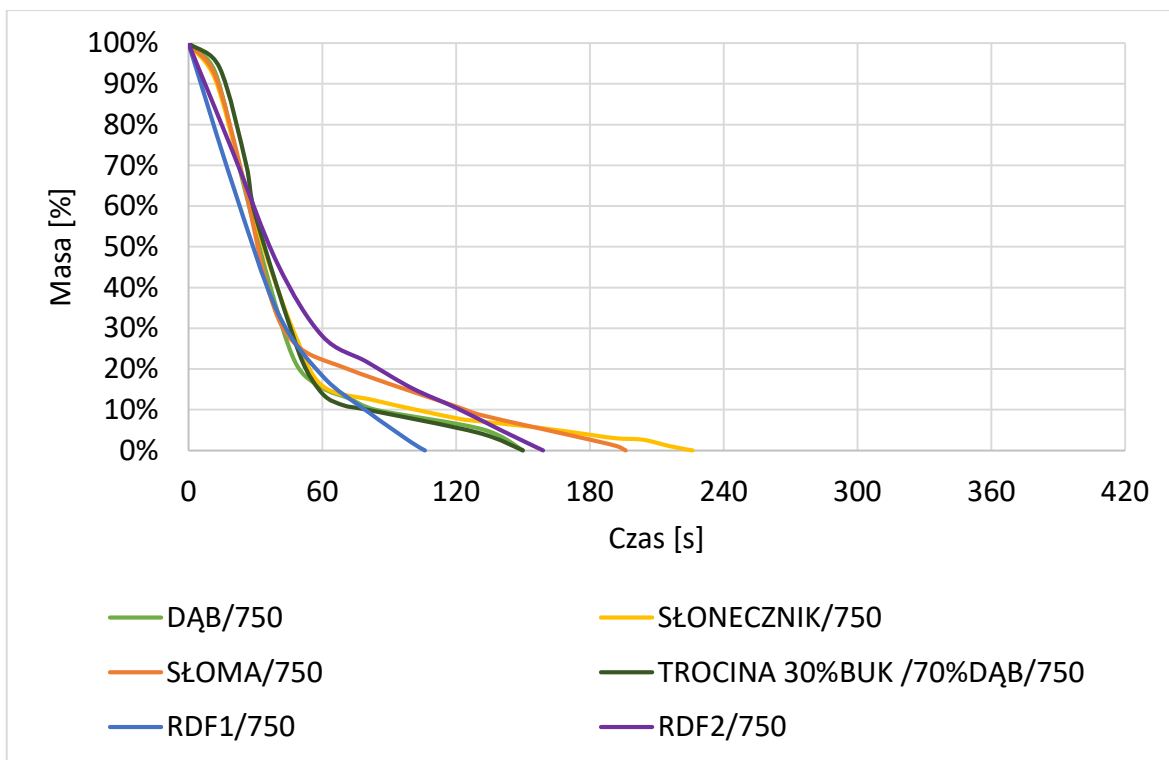
Rys. 80. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



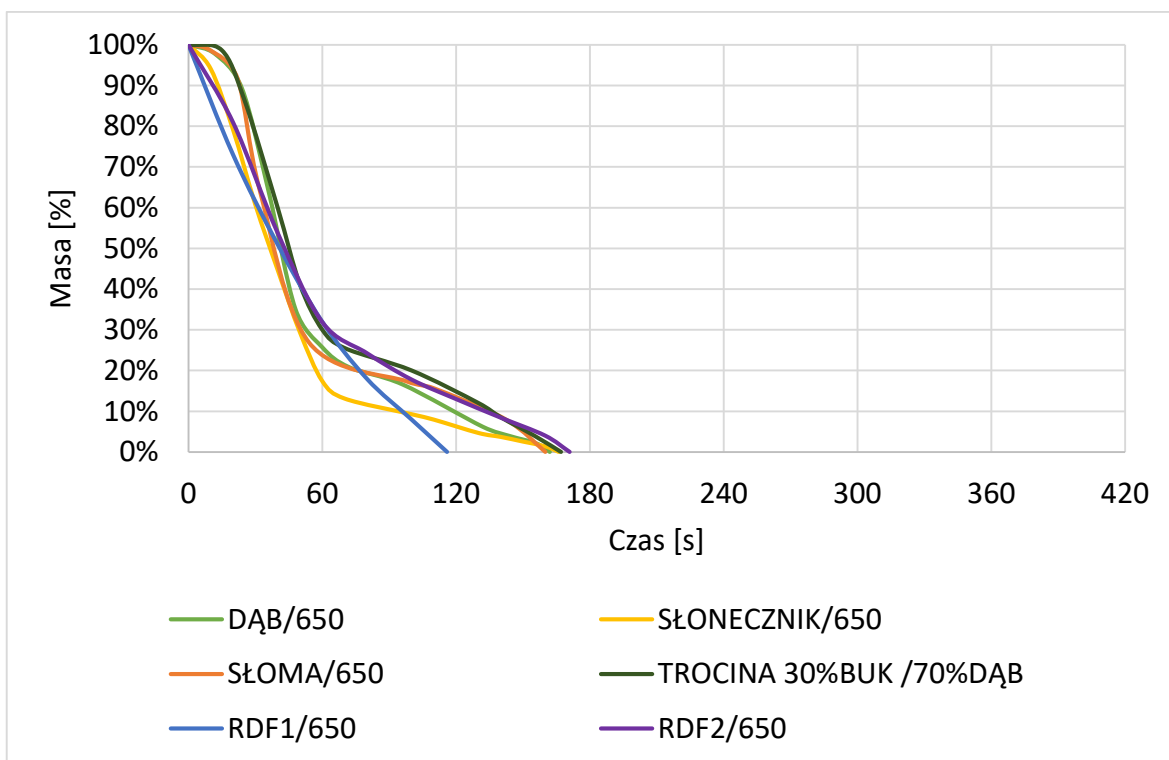
Rys. 81. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 82. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



Rys. 83. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$



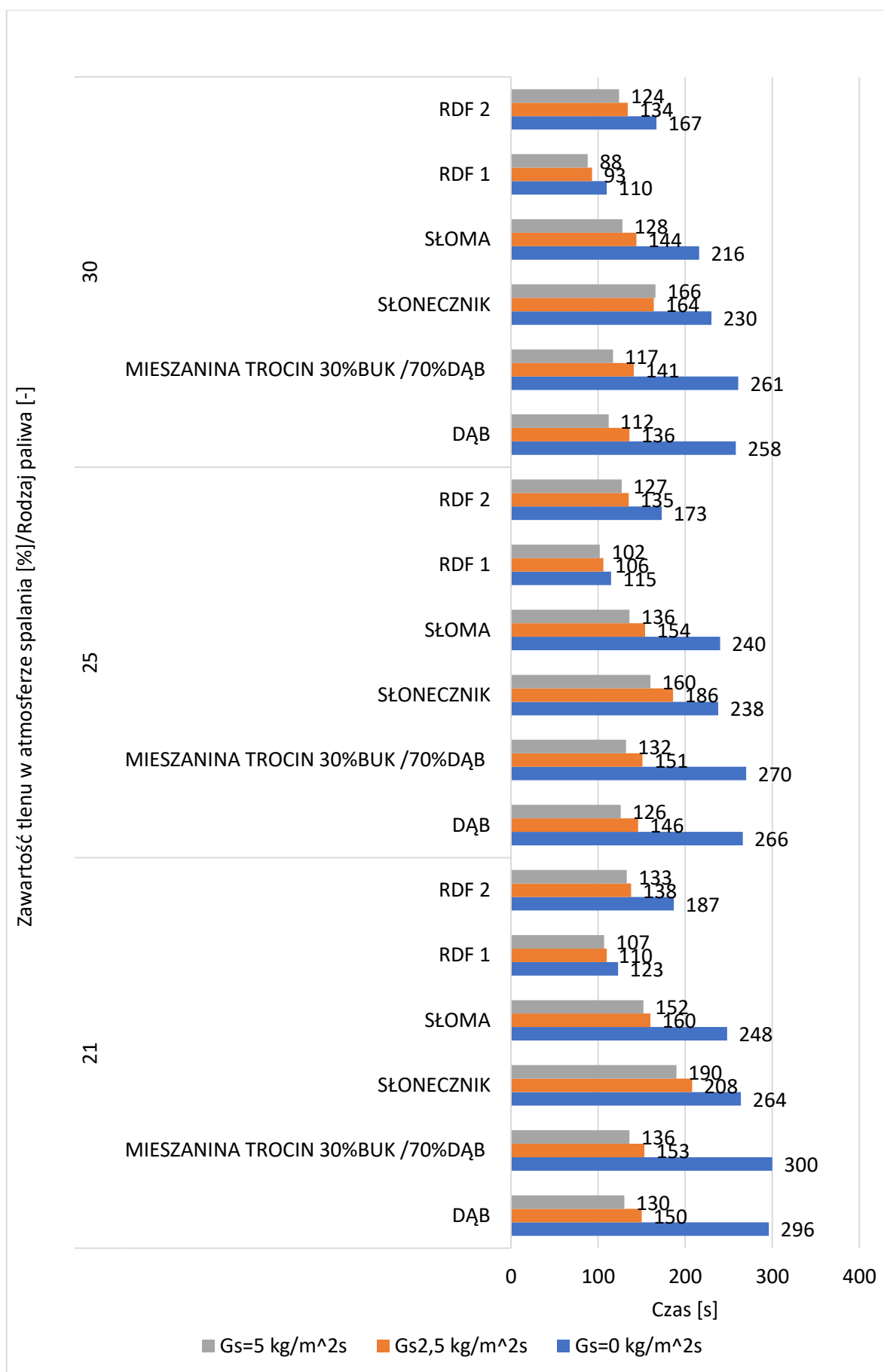
Rys. 84. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Ubytek masy paliw RDF spalanych w strudze dwufazowej przy  $G_s > 0 \text{ kg/m}^2$  we wszystkich temperaturach charakteryzował się największą intensywnością

w porównaniu z pozostałymi paliwami biomasowymi. RDF charakteryzuje się najkrótszym etapem spalania karbonizatu ze względu na najniższą zawartość stałej części palnej. Z tego względu, że sumaryczny czas trwania etapu nagrzewania, odparowania wilgoci oraz zapłonu i spalania części lotnych jest zbliżony do czasu spalania karbonizatu bardzo trudne, a czasem wręcz niemożliwe jest odróżnienie poszczególnych etapów procesu spalania.

Czas spalania paliw biomasowych i RDF w atmosferach utleniających zamieszczono na rys. 85. Zarejestrowany ubytek masy obu typów paliw w miarę zwiększania ilości utleniacza w atmosferze spalania ulega przyśpieszeniu (rys. 49-60 i rys. 70-72). Zmiana koncentracji utleniacza spowodowała bardzo podobny wzrost prędkości ubytku masy poszczególnych typów paliw. Podczas spalania bez materiału inertnego zmiana z 21 na 25%  $O_2$  skróciła czas spalania o 3-10%, a zmiana z 25 na 30%  $O_2$  o 5%. Podczas spalania paliw w strudze dwufazowej czas spalania skrócił się o 1-11% przy obu wartościach zawartości utleniacza.





Rys. 85. Czas spalania wybranych paliw przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$  oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych koncentracjach tlenu w atmosferze spalania

Podsumowując, przeprowadzone porównanie procesu spalania paliw biomasowych i RDF wskazuje, że kinetyka spalania paliw RDF podczas procesu spalania bez materiału inertnego (przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) jest zbliżona do kinetyki spalania paliw biomasowych niezależnie od jej rodzaju. Podczas badań w warstwie fluidalnej w temperaturze  $850^\circ\text{C}$  zauważono, że proces spalania paliw RDF jest bardziej zbliżony do procesu spalania biomasy leśnej. W przeciwieństwie do procesu spalania biomasy agro podczas spalania RDF nie obserwowano zjawiska mięknięcia popiołu, które mogłoby wpłynąć na proces spalania paliw oraz uszkodzenie jednostki spalania.

## 7.5 BADANIA EKSPERYMENTALNE SPALANIA MIESZANEGO PALIWA WTÓRNEGO WYTWARZANEGO Z PALIWA BIOMASOWEGO ORAZ RDF

Jednym z rozwiązań technologicznych tzw. współspalania bezpośredniego paliw jest wytworzenie mieszanek różnych paliw tzw. mieszane paliwo wtórne [156].

W energetyce zawodowej dominuje obecnie wspólny przemiał węgla z biomasą. Przykładem mieszanych paliw wtórnych są węgiel brunatny z brykietami drzewnymi oraz węgiel kamienny z łuską słonecznika [156].

Z tego powodu w niniejszej pracy zdecydowano się na przygotowanie mieszanego paliwa wtórnego z peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF2 w proporcjach 50/50. Badania te miały na celu analizę procesu spalania paliwa o zmodyfikowanym składzie w warunkach warstwy fluidalnej. Mając do dyspozycji różne typy paliw biomasowych zdecydowano o zastosowaniu peletu z łuski słonecznika. Pelet z łuski słonecznika podczas badań eksperymentalnych procesu spalania w warunkach warstwy fluidalnej wykazywał pewne problemy eksploatacyjne polegające na tworzeniu z materiałem inertnym spieku. Efekt ten utrudnia wykorzystanie tego typu biomasy w zastosowaniu komercyjnym i przemysłowym. Spalanie paliw biomasowych o wysokiej zawartości związków metali alkalicznych, które obniżają temperaturę mięknięcia popiołu może powodować powstawanie osadów na powierzchniach wymiany ciepła oraz zużłowanie, co w konsekwencji pogarsza proces wymiany ciepła. Dodatkowo tworzenie się spieków może prowadzić do zmiany warunków hydrodynamicznych warstwy fluidalnej zakłócając pracę reaktora z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić nawet do defluidyzacji złoża.

### 7.5.1 Metodyka badawcza

W celu przygotowania ziaren mieszanego paliwa wtórnego pelety z łuski słonecznika oraz RDF2 zostały oddzielnie zmielone w nożowym młynku elektrycznym. Po zmieleniu uzyskane próbki zostały zmieszane w ustalonej proporcji – rys 86. Kolejnym etapem przygotowania mieszanego paliwa wtórnego było wytworzenie ziaren peletu. Zdecydowano się na wykorzystanie prasy hydraulicznej wyposażonej w system podgrzewania, która została przedstawiona na rys. 87. Wzrost temperatury procesu peletyzacji powoduje zwiększenie gęstości i trwałości peletów [157]. Produktem procesu peletyzacji były ziarna peletu o średnicy 8mm - rys. 88.



*Rys. 86. Pelety po zmieleniu, mieszanka zawierająca 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF*



*Rys. 87. Prasa hydrauliczna wyposażona w system podgrzewania*



Rys. 88. Pelet o średnicy 8mm zawierający 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF

*Analiza techniczna peletu z mieszaniny peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF*

Przygotowane pelety zostały poddane ponownie analizie technicznej - tab. 16. Stwierdzono, iż w wyniku procesów mielenia oraz peletyzacji w temperaturze 100°C nastąpiło osuszenie materiału wyprodukowanego paliwa w stosunku do materiałów wyjściowych (tab. 7 i 12). Oznaczona wartość opałowa wyprodukowanego paliwa jest zbliżona do wartości opałowej peletu z łuski słonecznika (tab. 7).

Tab. 16. Wyniki oznaczenia zawartości wilgoci, popiołu i części lotnych w peletach z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika/50% peletu RDF2

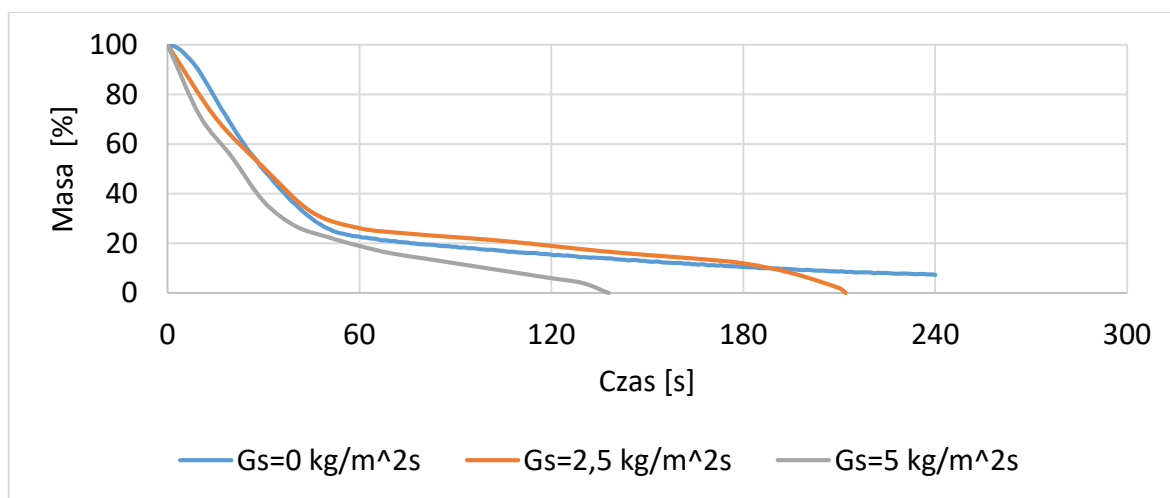
Pelety	Części lotne [%]	Wilgoć [%]	Popiół [%]	Stałe części palne[%]	Ciepło spalania [MJ/kg]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Pelety z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika/50% peletu RDF	77,7	7,03	6,45	8,7	19,73	18,25

W celu możliwości porównania wyników badań procesu spalania mieszanego paliwa wtórnego z wcześniej wykonanymi badaniami procesu spalania paliw biomasowych oraz RDF, dobrano ziarna o tym samym rozmiarze, zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 6.1. Masa peletów wynosiła:  $0,7 \pm 0,1$ g, a długość  $14 \pm 0,5$ mm.

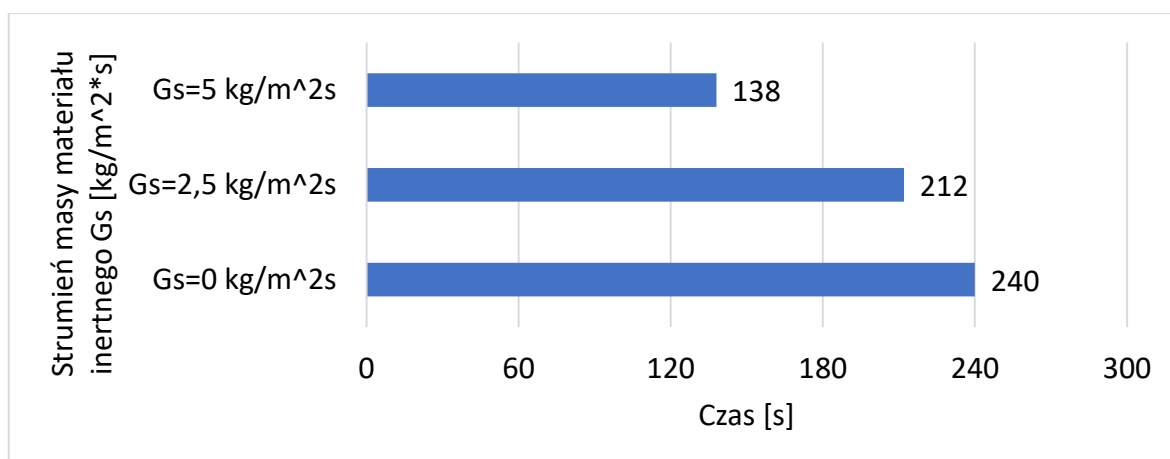
Podczas badań procesu spalania wytworzonej mieszaniny peletu analizowano wpływ oddziaływania materiału inertnego na proces spalania w stałej temperaturze wynoszącej 850°C.

### 7.5.2 Wyniki badań eksperymentalnych

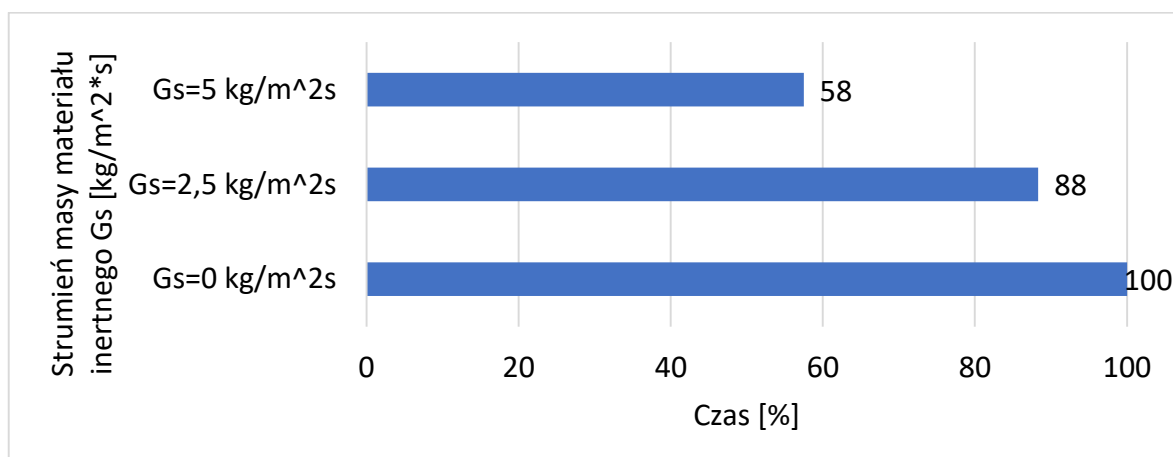
Uzyskane w trakcie eksperymentu wyniki (rys. 89) wskazują, że przebieg procesu spalania mieszanego paliwa wtórnego jest typowy dla wcześniej zbadanych procesów spalania paliw z biomasy leśnej oraz paliw RDF – rys. 76, 78 i 82. Obecność materiału inertnego spowodowała podobne skrócenie czasu spalania jak w przypadku paliwa RDF2 spalane w tych samych warunkach (o ok. 12%) – rys. 90 i 91. Największą różnicą w stosunku do procesu spalania wymienionych paliw (biomasy leśnej oraz RDF) był zdecydowanie większy wpływ zwiększenia natężenia strumienia materiału inertnego na całkowity czas spalania mieszanego paliwa wtórnego. W przypadku paliw z biomasy leśnej oraz RDF zwiększenie strumienia materiału inertnego powodowało skrócenie czasu spalania o zaledwie kilka procent (rys. 48, 63, 69 i 75) natomiast w przypadku peletu z mieszaniny łuski słonecznika i RDF czas spalania skrócił się o blisko 30%. Powodem zaistniałej sytuacji jest najprawdopodobniej proces technologiczny wytwarzania paliwa w warunkach laboratoryjnych. Struktura peletu mieszanego paliwa wtórnego jest bardziej podatna na oddziaływanie materiału inertnego w porównaniu z materiałem wyjściowym.



Rys. 89. Ubytek masy podczas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$  oraz  $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ )



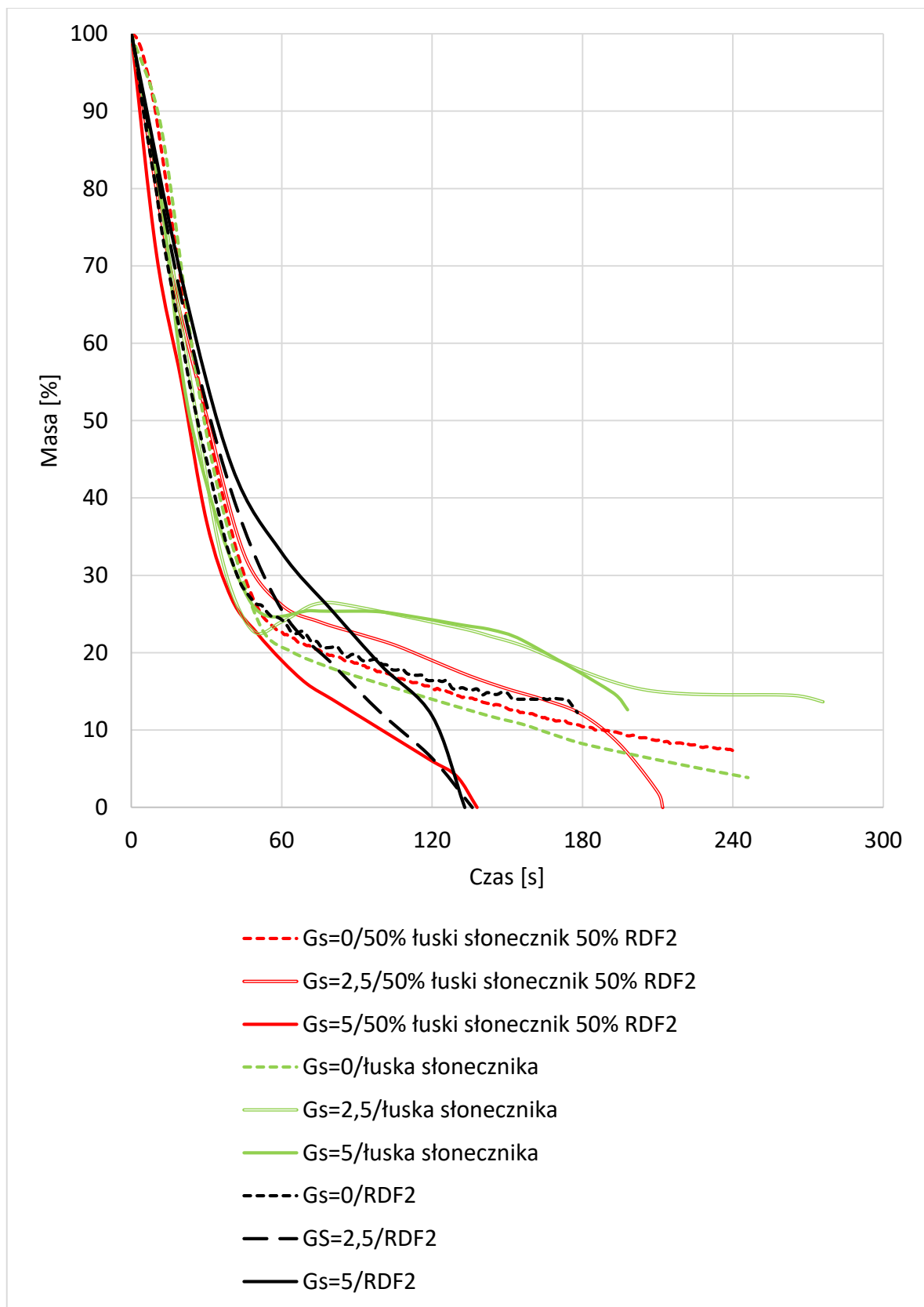
Rys. 90. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  oraz  $G_s=5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )



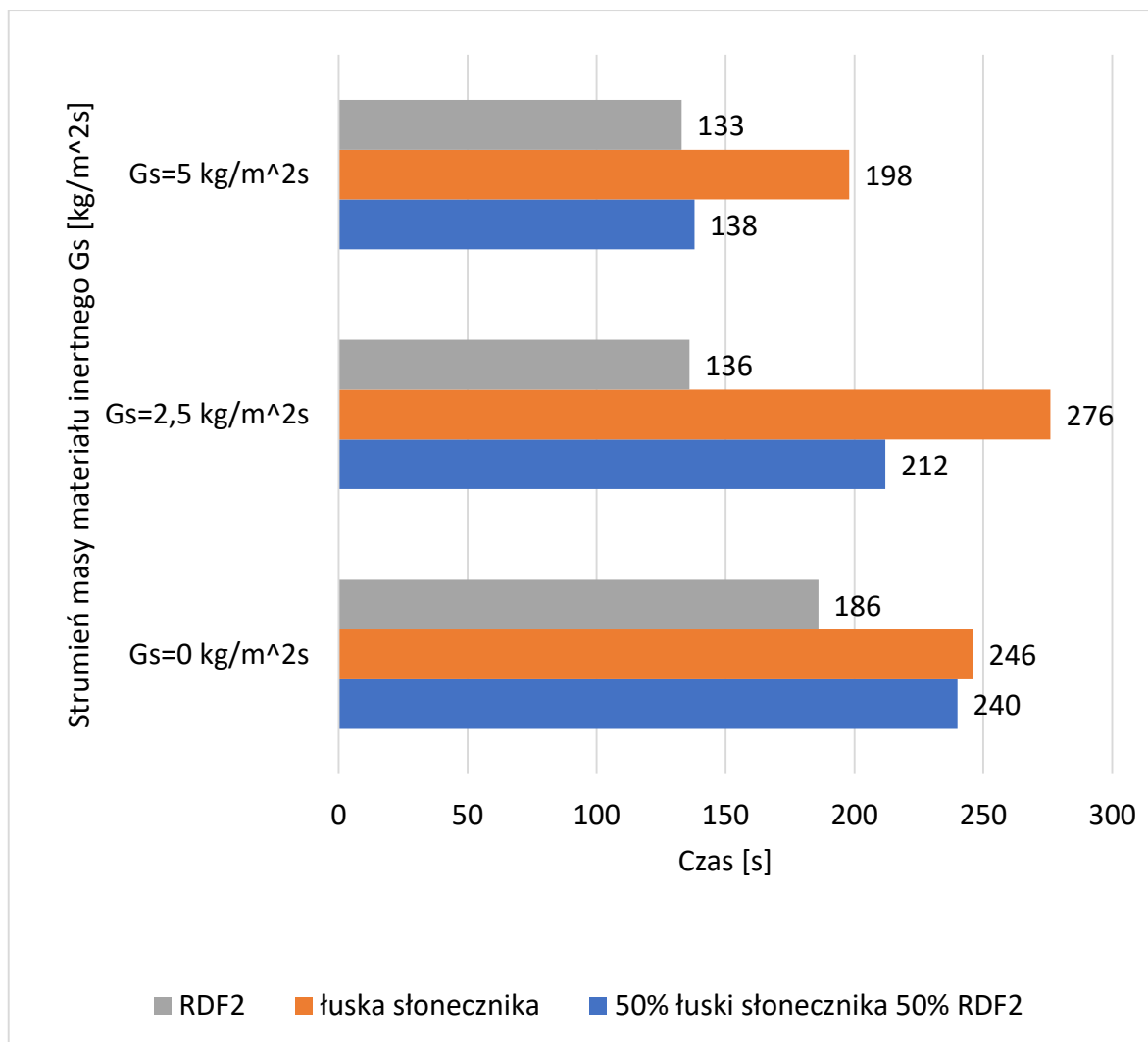
Rys. 91. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  i  $G_s=5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) porównany ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg}/\text{m}^2$ ) w temperaturze 850°C

Porównanie ubytku masy podczas spalania ziaren peletów mieszanej paliwa wtórnego z ziarnami peletów z łuski słonecznika oraz RDF2 w tych samych warunkach przedstawiono na rys. 92. Wyraźnie widoczna jest różnica w przebiegu spalania mieszanej paliwa wtórnego oraz RDF2 w porównaniu ze spalaniem peletu z łuski słonecznika przy  $G_s=2,5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ . Powodem zaistniałej sytuacji jest wyeliminowanie w wytworzonej mieszance powstawania spieku.

Czas spalania peletu mieszanej paliwa wtórnego podczas spalania bez materiału inertnego był bliski czasowi spalania peletu z łuski słonecznika, natomiast w przypadku  $G_s=5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  był bliski czasowi spalania paliwa RDF2 – rys. 92 i 93.



Rys. 92. Ubytek masy podczas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2, peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$  oraz  $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ )



Rys. 93. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2, peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF2 w temperaturze  $850^\circ\text{C}$  przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ,  $G_s=2,5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$  oraz  $G_s=5\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )

Wyprodukowanie paliwa składającego się z biomasy agro oraz RDF w proporcji 50/50 spowodowało zmniejszenie wpływu związków metali alkalicznych z biomasy agro na obniżenie temperatury topnienia popiołu i w konsekwencji na proces spalania mieszanego paliwa wtórnego. Jak wcześniej wspomniano, proces spalania mieszanego paliwa wtórnego w warunkach warstwy fluidalnej ma przebieg typowy dla biomasy leśnej oraz RDF. Zatem odpowiedni dobór mieszanek paliw może zwiększyć wykorzystanie paliwa o niepożądanych podczas spalania w strumieniu materiału inertnego cechach, jednocześnie zmniejszając ryzyko wystąpienia problemów eksploatacyjnych i uszkodzenia jednostki spalania.



## 8 PORÓWNANIE PROCESU SPALANIA BIOMASY I RDF Z PROCESEM SPALANIA WĘGLA BRUNATNEGO I KAMIENNEGO

---

W porównaniu do paliw kopalnych biomasa oraz paliwa RDF charakteryzują się zmiennymi, wysoce zróżnicowanymi właściwościami paliwowymi wśród których należy wymienić wartość opałową, zawartość wilgoci, popiołu, węgla, chloru, siarki całkowitej i azotu – tab. 17. W porównaniu do węgla paliwa biomasowe i RDF zawierają średnio około czterokrotnie więcej tlenu, dwukrotnie mniej węgla, siarki i azotu. Konsekwencją tych właściwości jest wysoka zawartość części lotnych i wysoka reaktywność. Odmienny jest również skład chemiczny popiołów, w przypadku biomasy pochodzenia rolniczego szczególnie znacznie ma zawartość: krzemu, wapnia, fosforu i potasu, które wpływają na charakterystyczne temperatury topliwości popiołów.

Z tego powodu zdecydowano się na dokonanie porównania uzyskanych w pracy wyników z wynikami uzyskanymi dla paliw stałych, a przedstawionymi w literaturze. Do porównania wybrano wyniki przedstawione w pracy [131], a dotyczące badania węgla kamiennego typu płomiennego z kopalni Sobieski. Węgiel ten to paliwo stosowane w energetyce m.in. w elektrowni Łagisza, ze względu na wysoką zawartość części lotnych oraz bardzo słabą zdolność do spiekania. Proces spalania węgla brunatnego z kopalni Bełchatów był natomiast badany w pracy [116] w podobnych warunkach warstwy fluidalnej, tj. przy temperaturze 850°C oraz  $G_s = 0$  i 5 kg/m<sup>2</sup>s. W obu przypadkach próbki węgla były mechanicznie preparowane z ziaren rzeczywistych węgla. W odróżnieniu do badanych w pracy paliw, ziarna węgla miały sferyczny kształt i średnicę  $d = 10$  mm.

W tab. 17 zestawiono wyniki analizy technicznej porównywanych paliw. Największą zawartość wilgoci miał węgiel brunatny – 14,5%. Zawartość wilgoci wszystkich czterech paliw z biomasy była podobna i średnio wynosiła 8,65%. Paliwa RDF miały bardzo zróżnicowaną zawartość wilgoci (2,1% RDF1 oraz 7,4% RDF2), natomiast węgiel kamienny zawierał 12,4% wilgoci. Zawartość części lotnych we wszystkich paliwach z biomasy oraz RDF miała zbliżone wartości. Wynosiła średnio 75,7% i była prawie trzykrotnie wyższa w porównaniu z węglem kamiennym (27,9%). Węgiel brunatny zawierał 42,5% części lotnych. Średnia zawartość stałej części palnej w przypadku paliw biomasowych była na zbliżonym poziomie. Średnio wynosiła 10,2% i była ponad czterokrotnie niższa niż w przypadku węgla kamiennego (43%). W przypadku paliw RDF zawartość stałej części

palnej była podobna w przypadku obu typów i średnio wynosiła 6,7%, co oznacza, że była ponad sześciokrotnie niższa w porównaniu z węglem kamiennym. Zawartość stałej części palnej w węglu brunatnym była prawie dwukrotnie niższa niż w przypadku węgla kamiennego i wynosiła 24,5%. Najwyższą wartość opałową miał węgiel kamienny (26,5 MJ/kg), a najniższą pelet ze słomy (14,7 MJ/kg).

Tab. 17. Dane porównujące właściwości badanych w pracy paliw (tab. 7-14) z węglem brunatnym i kamiennym [116, 131].

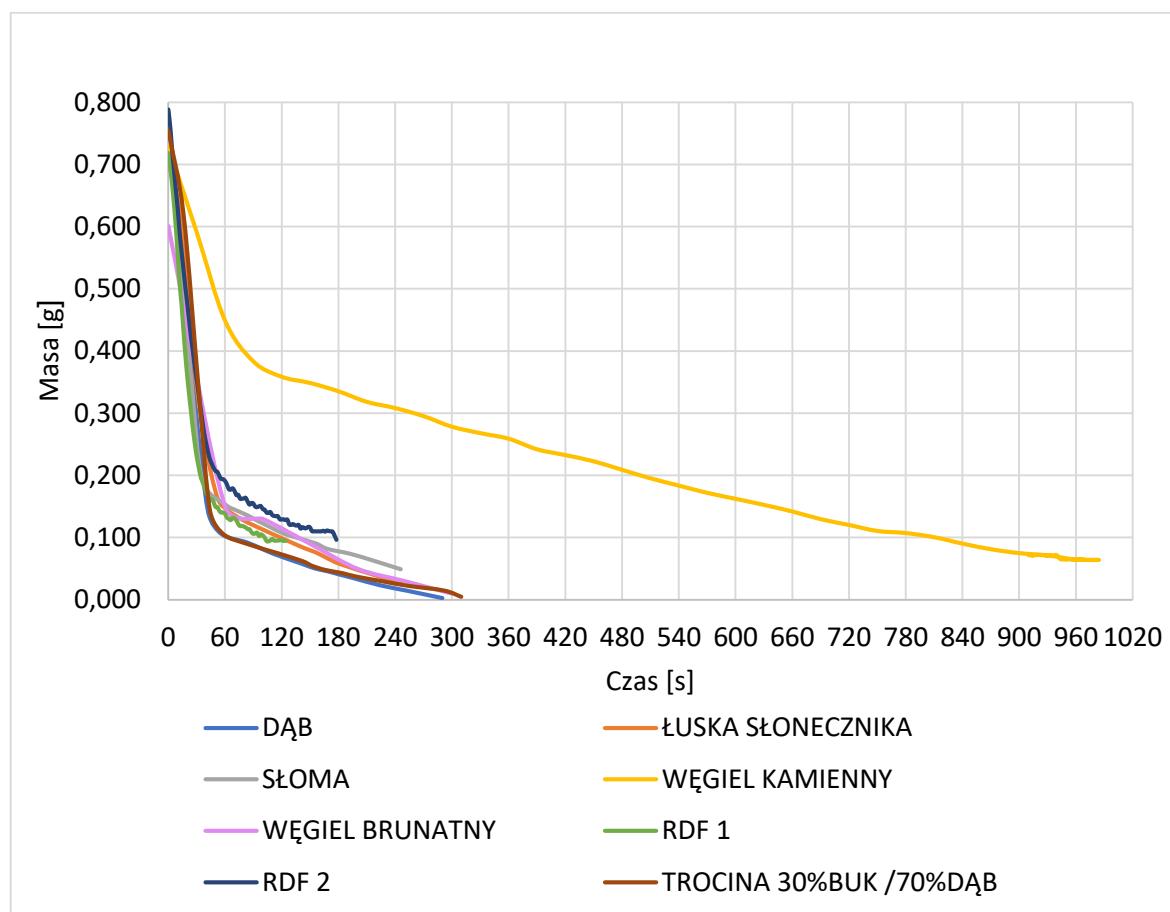
Parametr	Węgiel kamienny	Węgiel brunatny	Biomasa drzewna/leśna	Biomasa agro	RDF
Wilgoć [%]	12,4	14,5	8,7-8,8	8,4-8,7	2,1 -7,4
Popiół [%]	16,7	18,5	1,2-1,3	5,5-12,2	12,1-13,8
Części lotne [%]	27,9	42,5	78,7	72,8	75,7
Stała część palna [%]	43,0	24,5	10,6	9,8	6,7
Siarka [%]	1,44	1,1	0,0	0,0	0,18-0,22
Wartość opałowa [MJ/kg]	26,5	18,5	16,1-16,5	14,7-18,3	19,6-21,0
Węgiel [%]	55,80	46,00	47,06-47,09	42,46-47,56	53,84-54,21
Azot [%]	1,17	0,55	0,01-0,02	0,27-0,68	0,69-1,03

Masowy ubytek wszystkich 8 paliw zamieszczono na rys. 94. Należy podkreślić, iż wszystkie porównywane ze sobą paliwa miały bardzo zbliżoną masę początkową wynoszącą  $0,7 \pm 0,1$  g.

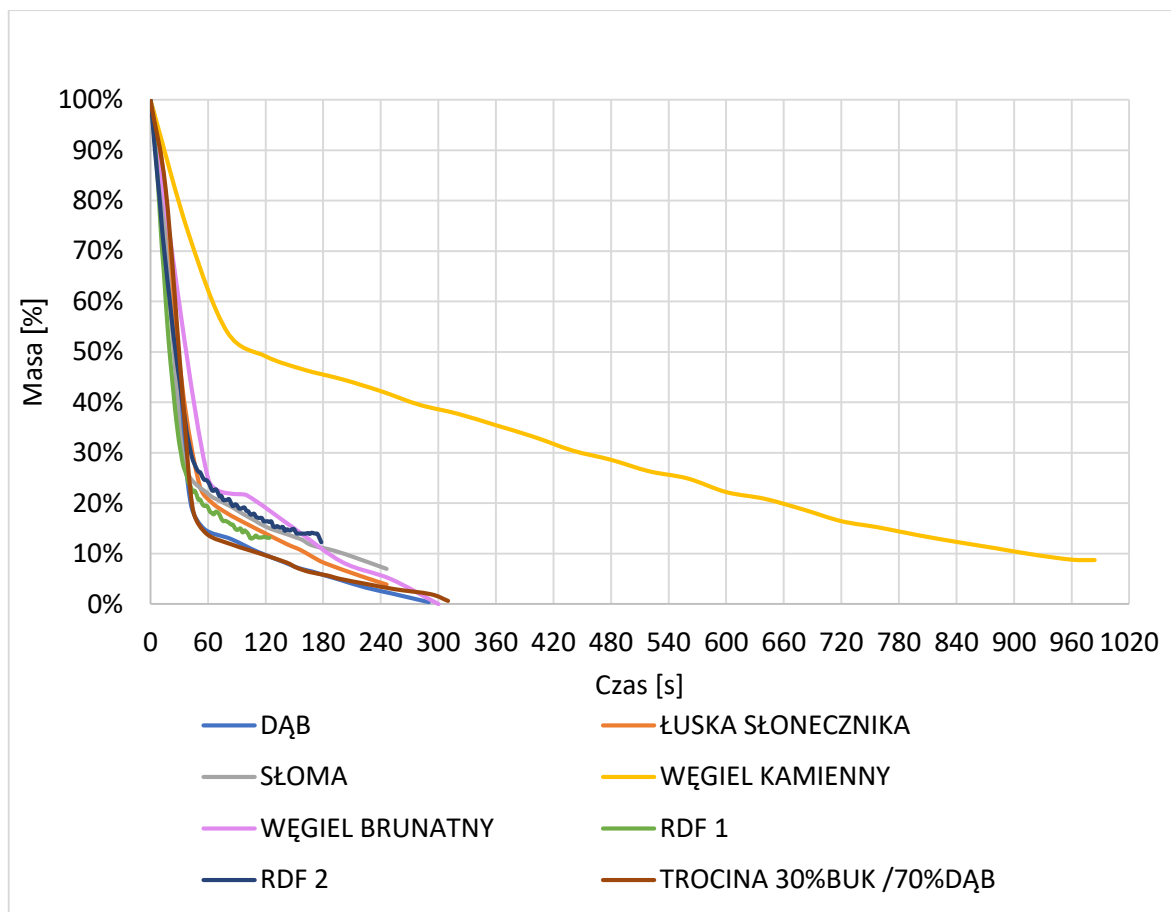
Analizując wykresy przedstawione na rys. 94 i 95 wyraźnie widać, że wysoki udział części lotnych w paliwach z biomasy, RDF i węgla brunatnego powoduje, że podczas etapów odparowania wilgoci, odgazowania i spalania części lotnych ziarna tracą ponad 70% swojej masy początkowej. Węgiel kamienny jak wspomniano wcześniej zawierał trzykrotnie mniej części lotnych, dlatego spadek masy był mniejszy i wynosi ok. 30%. W przypadku biomasy i RDF czas trwania tych etapów wynosił ok 30-50 s, w przypadku węgla brunatnego 60 s, natomiast w przypadku węgla kamiennego powyżej 70 s.

Zawartość stałej części palnej w przypadku paliw biomasowych była ponad czterokrotnie niższa, a w przypadku paliw RDF ponad sześciokrotnie niższa w porównaniu z węglem kamiennym (43%). Ze względu na wysoką reaktywność wynikającą ze składu paliw, szybkość spalania karbonizatu RDF, biomasy i węgla brunatnego jest zdecydowanie większa w porównaniu do węgla kamiennego. Najkrótszy czas spalania karbonizatu odnotowano w przypadku paliw RDF (ok. 90s RDF1 oraz ok. 130 s RDF2). Spalanie karbonizatu biomasy agro trwało około 200 s, w przypadku paliw z biomasy leśnej ok. 240 s, węgla brunatnego ok. 240 s a dla węgla kamiennego ok. 870 s.

Średnio spalanie RDF (151 s) trwa prawie 2 razy krócej niż średni czas spalania biomasy (275 s) i węgla brunatnego (300 s) oraz ponad 6-krotnie krócej niż spalanie węgla kamiennego (984 s), biomasa i węgiel brunatny spala się niemal trzykrotnie krócej niż węgiel kamienny.



Rys. 94. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C bez materiału inertnego

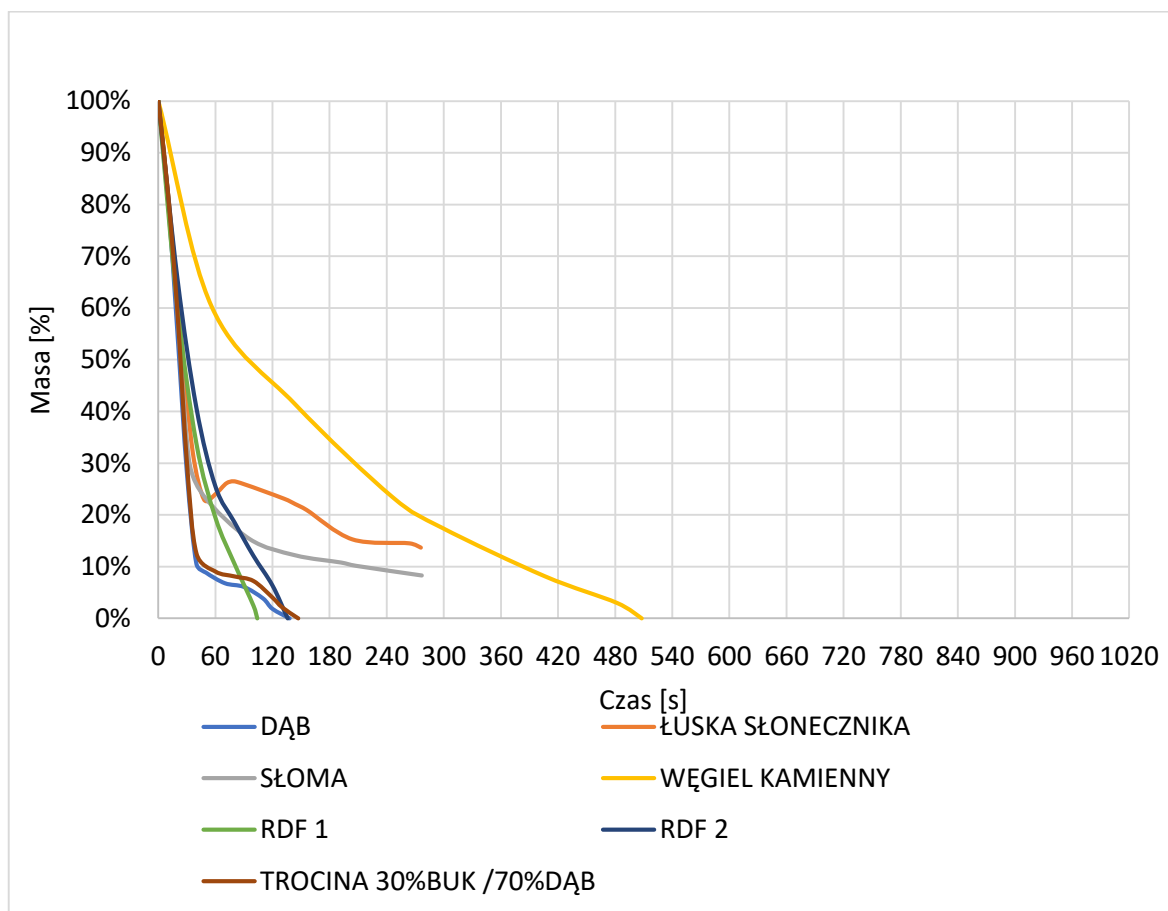


Rys. 95. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C bez materiału inertnego

Podczas spalania paliw w strumieniu materiału inertnego przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  – rys. 96 ujawniły się kolejne różnice w procesie spalania między paliwami. Etap wydzielania i spalania części lotnych w przypadku peletów RDF i biomasy trwa ok. 40- 50 s, natomiast w przypadku węgla kamiennego 70 s. Spalanie karbonizatu w przypadku paliw RDF trwa prawie pięć razy krócej, a paliw z biomasy leśnej prawie cztery razy krócej niż w przypadku węgla kamiennego.

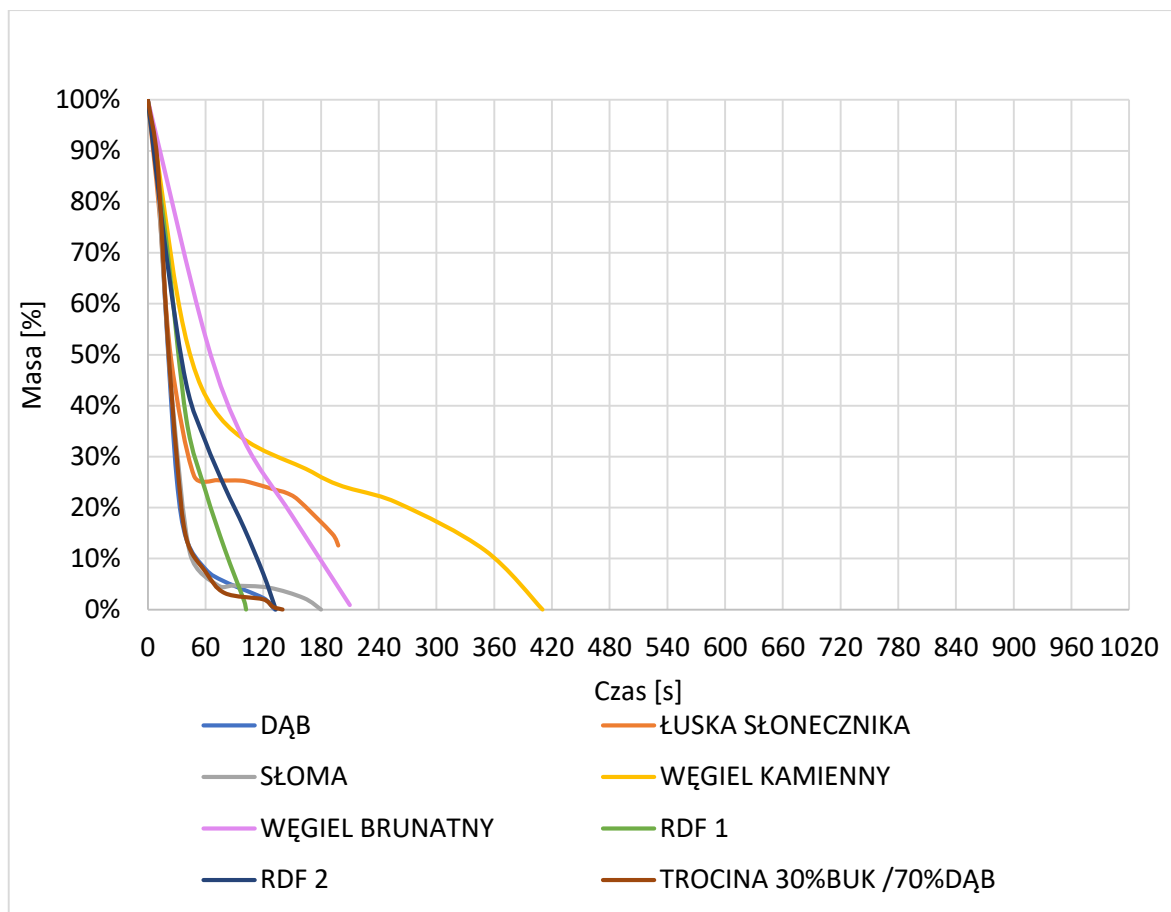
Oddziaływanie materiału inertnego spowodowało skrócenie całkowitego czasu spalania w przypadku biomasy leśnej oraz węgla kamiennego o blisko połowę, w przypadku paliw RDF całkowity czas spalania skrócił się o około 20%. Przyczyną mniejszego skrócenia czasu spalania paliw RDF w porównaniu do biomasy leśnej i węgla kamiennego była najniższa wśród paliw zawartość stałej części palnej, a tym samym najkrótszy czas spalania karbonizatu. Oddziaływanie materiału inertnego w największym stopniu wpływa na skrócenie czasu spalania karbonizatu. Natomiast podobne skrócenie czasu spalania w przypadku biomasy leśnej oraz węgla kamiennego, których różnica w czasie spalania karbonizatu jest blisko czterokrotna, wynikało z tego iż ziarna biomasy

wykazywały większą podatność na proces erozyjnego ubytku masy w porównaniu z węglem kamiennym.



Rys. 96. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C w strumieniu materiału inertyjnego  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Zwiększenie strumienia materiału inertyjnego do  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (rys. 97) w przypadku biomasy leśnej oraz paliw RDF spowodowało dalsze skrócenie całkowitego czasu spalania tych paliw o około 2%, a w przypadku węgla kamiennego skrócenie czasu spalania o blisko 10%. Jak wspomniano wyżej odnotowane rozbieżności wynikają przede wszystkim z różnicy w czasie trwania etapu spalania karbonizatu paliw, który w przypadku węgla kamiennego jest ponad trzykrotnie dłuższy niż w przypadku pozostałych paliw. Czas spalania w przypadku węgla brunatnego skrócił się o 30% w porównaniu ze spalaniem przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .



Rys. 97. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C w strumieniu materiału inertnego  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Rys. 98 przedstawia czas spalania wybranych paliw przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$  oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej.

Obniżenie temperatury komory paleniskowej podczas spalania ziaren wszystkich paliw przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$  spowodowało wydłużenie czasu spalania – rys. 99. Ale wydłużenie to ma inny charakter w przypadku biomasy i węgla kamiennego w porównaniu z paliwem RDF. W przypadku biomasy oraz węgla kamiennego różnica wynosi około 15-25% na każde 100°C, natomiast w przypadku peletów RDF różnica waha się od kilku do kilkudziesięciu % na każde 100°C. Podczas spalania peletów RDF obniżenie temperatury z 850°C do 750°C w mniejszym stopniu wpłynęło na wydłużenie całkowitego czasu spalania niż obniżenie temperatury w komorze spalania do 650°C, gdzie występuje najdłuższy czas nagrzewania i odgazowania części lotnych.

Podczas spalania paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) – rys. 100 i 101, obniżenie temperatury komory również powoduje wydłużenie czasu spalania we wszystkich przypadkach z wyjątkiem biomasy agro, która w temperaturze

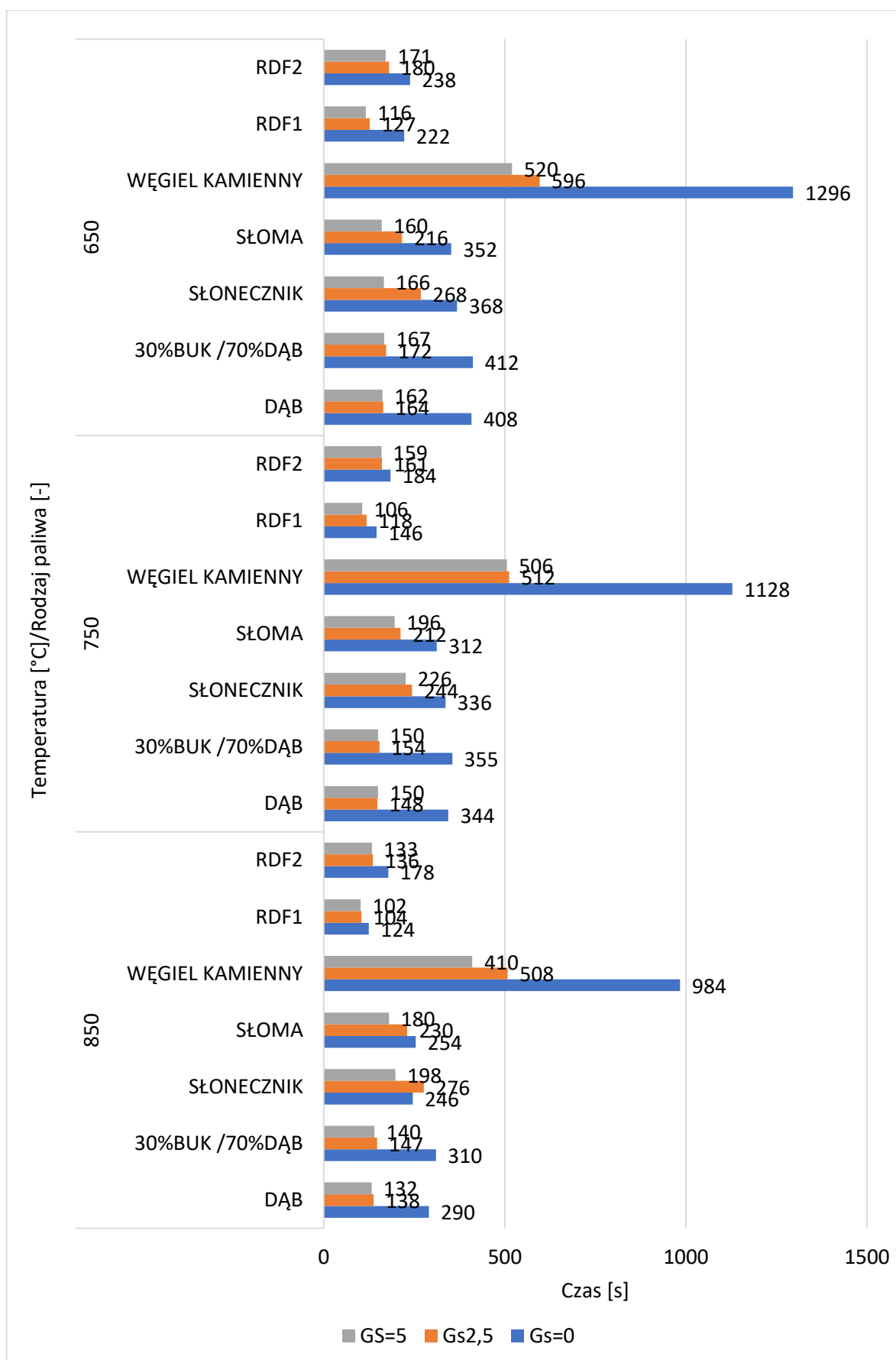
850°C jak wcześniej już wspomniano ulegała spiekaniu. W niższych temperaturach biomasa agro spalała się podobnie jak pozostałe paliwa.

Obniżenie temperatury komory podczas spalania przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , spowodowało nieco mniejsze wydłużenie czasu spalania w porównaniu ze spalaniem przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , które wynosiło odpowiednio:

- biomasa leśna o ok. 5-12% na każde 100°C,
- węgiel kamienny o ok. 1-16% na każde 100°C,
- paliwa RDF o ok. 9-20% na każde 100°C.

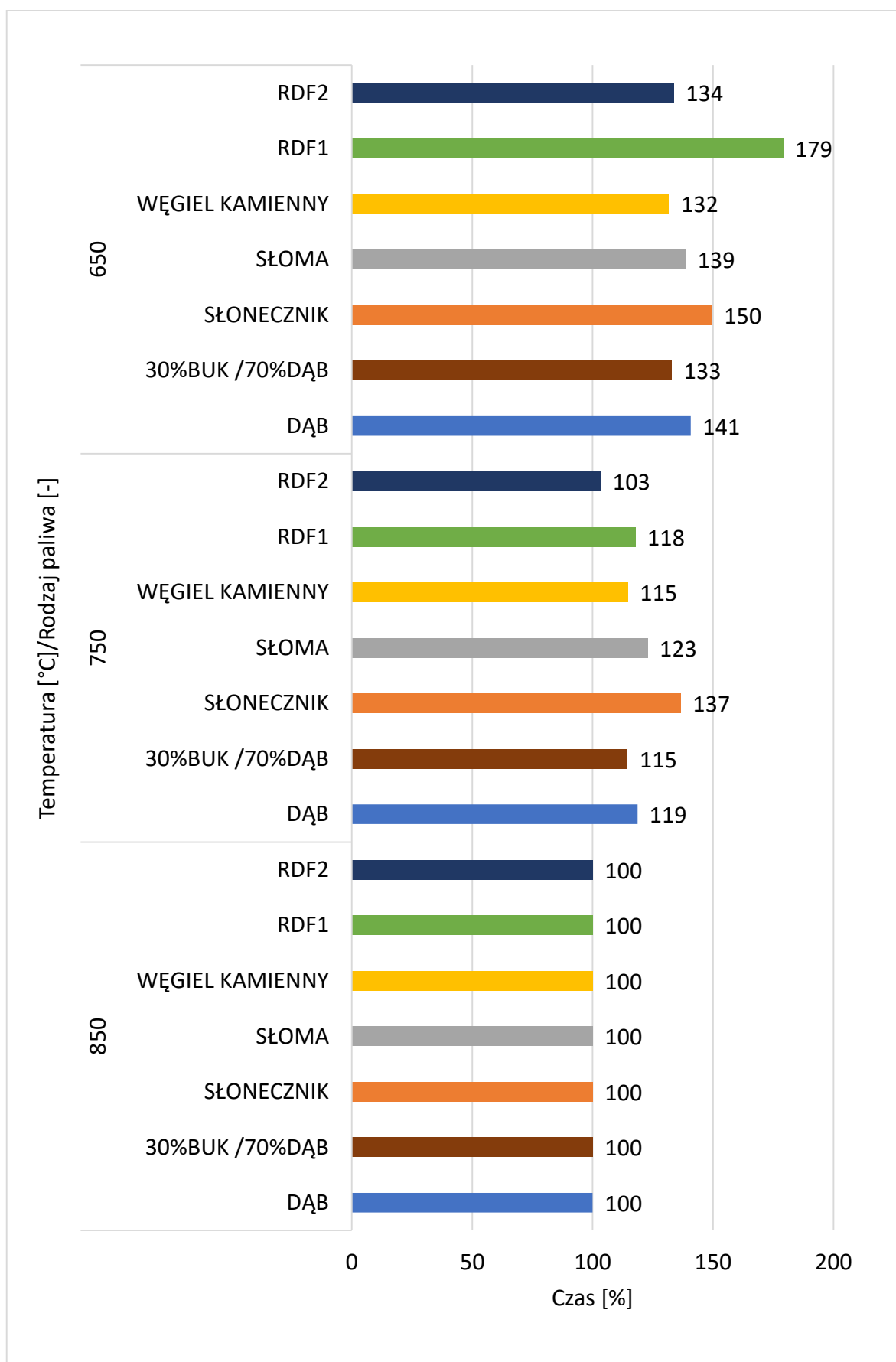
Obniżenie temperatury komory podczas spalania paliw przy  $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , spowodowało podobne wydłużenie czasu spalania jak przy  $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , odpowiednio:

- biomasa leśna o ok. 7-14% na każde 100°C,
- węgiel kamienny o ok. 4-24% na każde 100°C,
- paliwa RDF o ok. 3-20% na każde 100°C.

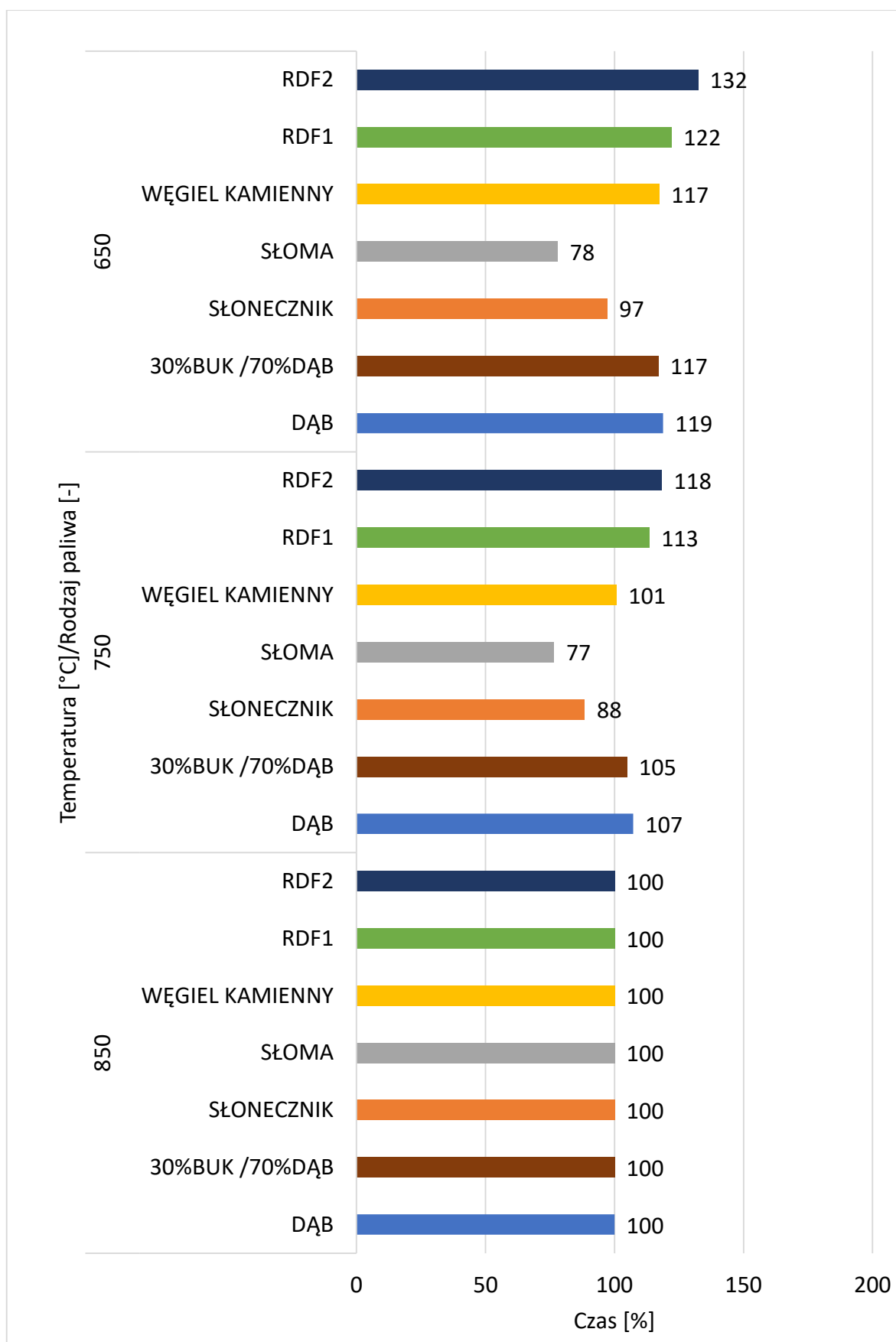


Rys. 98. Czas spalania wybranych paliw przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$  oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej

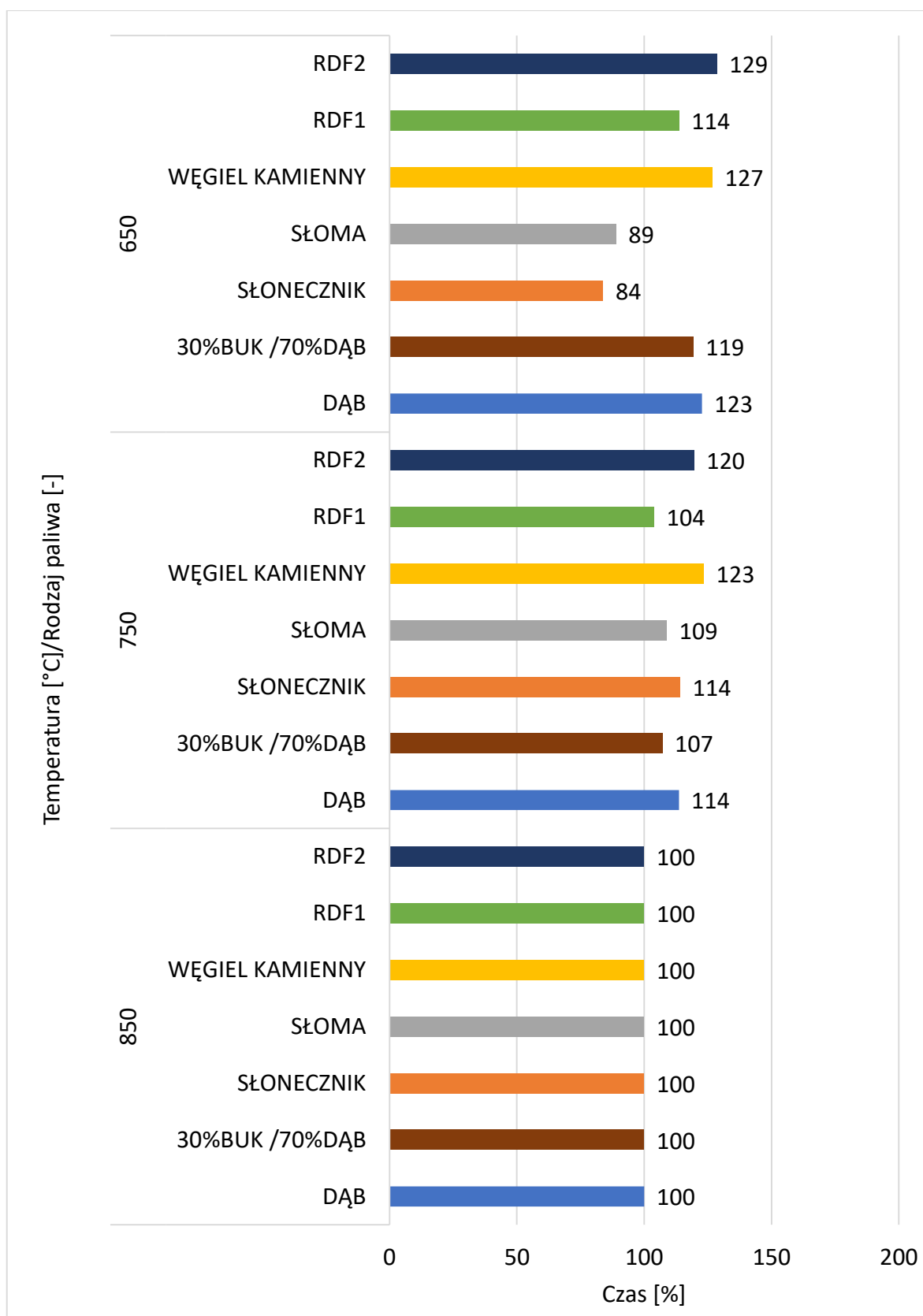




Rys. 99. Czas spalania ziaren paliw bez materiału inerteo ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura  $850^\circ\text{C}$  jako poziom odniesienia)



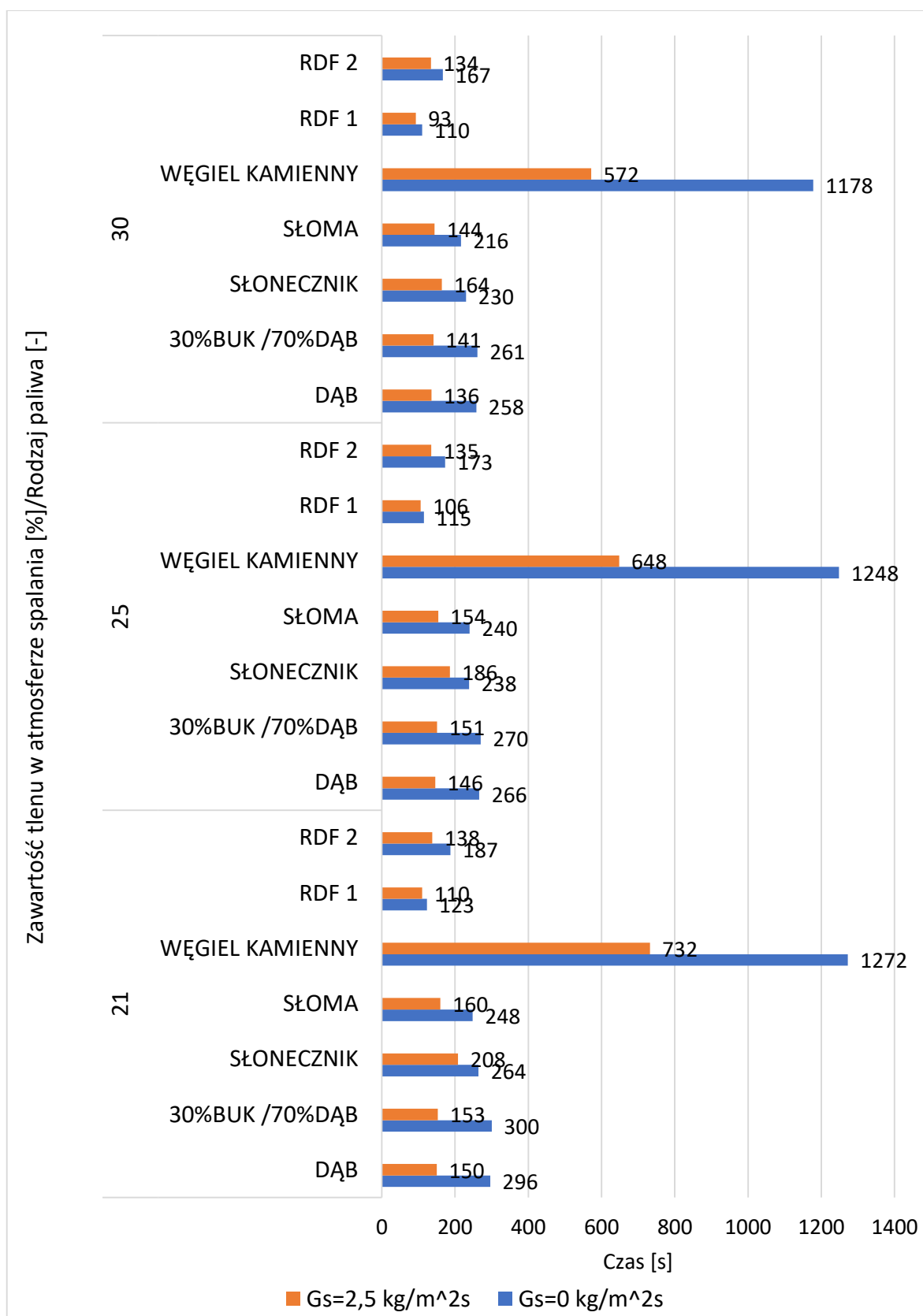
Rys. 100. Czas spalania ziaren paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura  $850^\circ\text{C}$  jako poziom odniesienia)



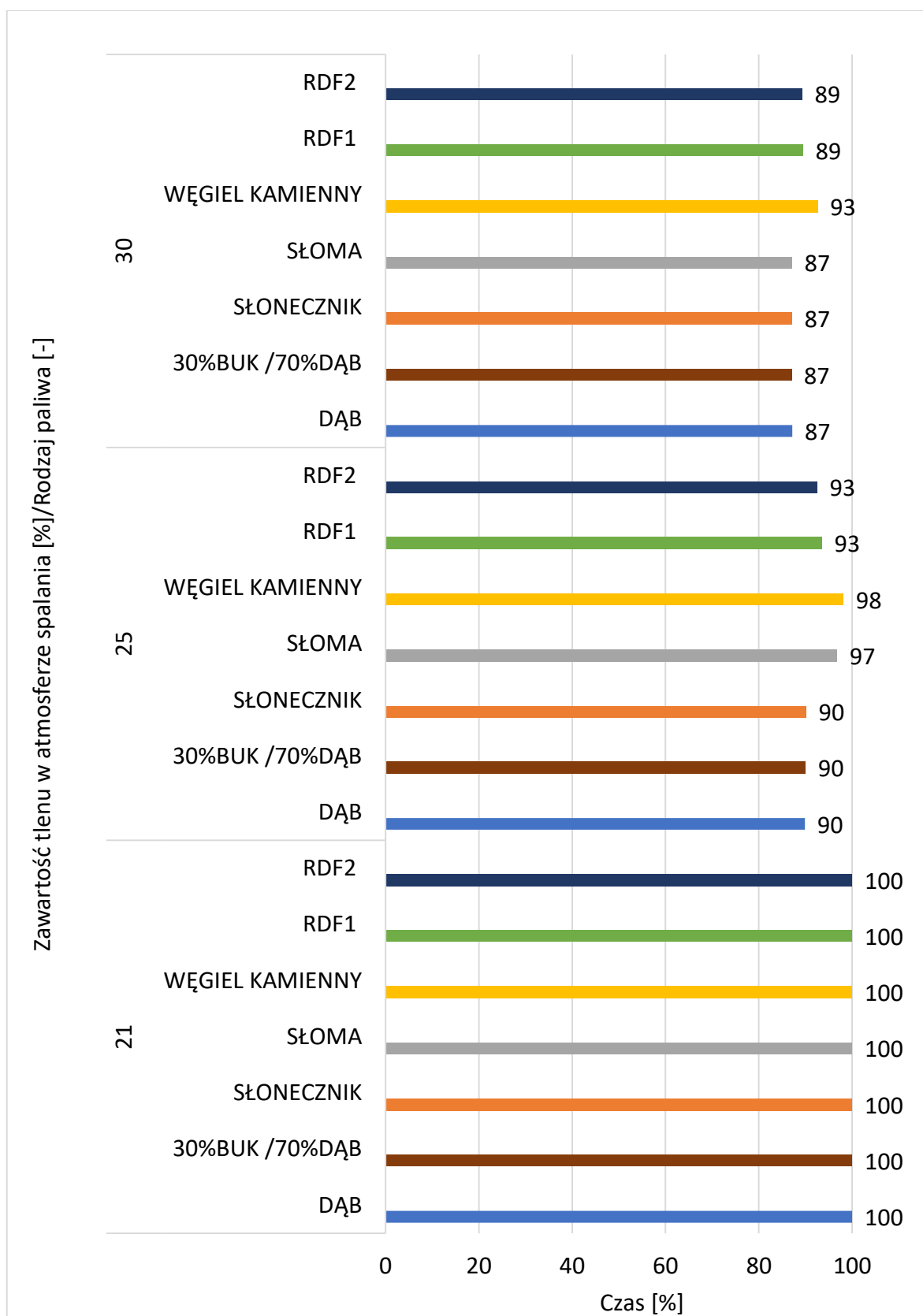
Rys. 101. Czas spalania ziaren paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura  $850^\circ\text{C}$  jako poziom odniesienia)

W drugim etapie porównano proces spalania wszystkich paliw w atmosferach utleniających: tlen/dwutlenek węgla: 21%/79%, 25%/75%, 30%/70% - rys. 102. Proces spalania, a tym samym ubytek masy wszystkich paliw w miarę zwiększania koncentracji utleniacza w atmosferze spalania ulega przyśpieszeniu.

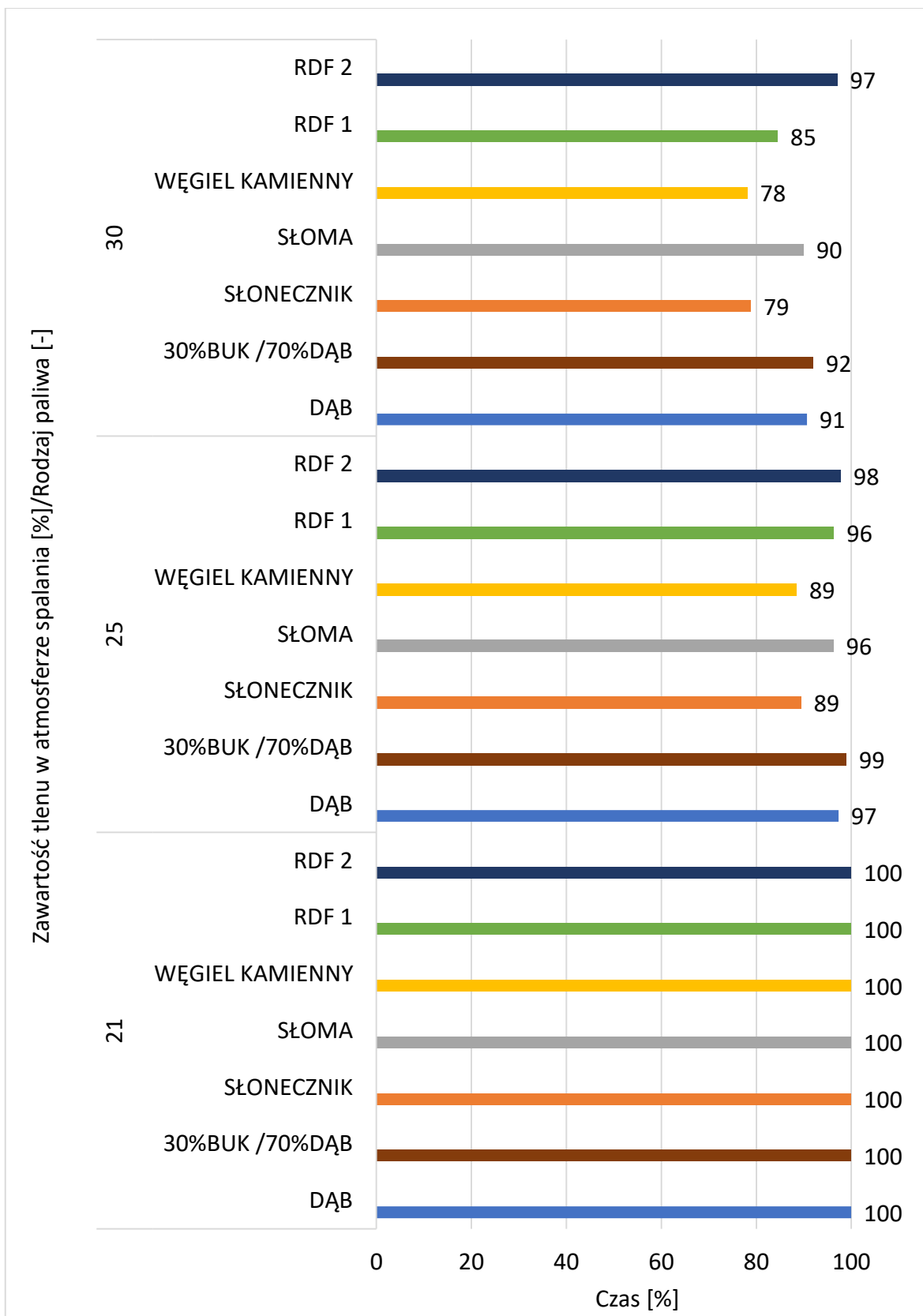
Czas spalania paliw w różnych atmosferach utleniających w porównaniu z czasem spalania w atmosferze zawierającej 21% tlenu (poziom odniesienia) przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$  zostały zamieszczone na rys. 103, a przy  $G_s = 2,5 \text{ kg/m}^2$  na rys. 104.



Rys. 102. Czas spalania paliw bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2$ ) w różnych atmosferach utleniających



Rys. 103. Czas spalania paliw bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) przy zwiększaniu stężenia utleniacza w atmosferze (czas spalania w atmosferze zawierającej 21% utleniacza jako poziom odniesienia)



Rys. 104. Czas spalania paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s = 2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) przy zwiększaniu stężenia utleniacza w atmosferze (czas spalania w atmosferze zawierającej 21% utleniacza jako poziom odniesienia)

Zmiany zawartości utleniacza spowodowały bardzo podobne zwiększenie ubytku masy poszczególnych typów paliw:

a) podczas spalania bez materiału inertnego:

- zmiana z 21 na 25% O<sub>2</sub> - biomasa i RDF 3-10%, węgiel kamienny 2%,
- zmiana z 25 na 30% O<sub>2</sub> - biomasa i RDF 3-10%, węgiel kamienny 5%,

b) w jego obecności:

- zmiana z 21 na 25% O<sub>2</sub> - biomasa i RDF 1-11%, węgiel kamienny 11%,
- zmiana z 25 na 30% O<sub>2</sub> - biomasa i RDF 1-11%, węgiel kamienny 11%.



## 9 WNIOSKI KOŃCOWE

---

Szeroki zakres badań eksperymentalnych dotyczących paliw biomasowych oraz paliw alternatywnych typu RDF w warunkach modelujących warstwę fluidalną pozwoliły na kompleksową analizę procesu ich spalania i sformułowanie następujących wniosków:

1. Wszystkie wybrane do analizy paliwa biomasowe oraz RDF mogą być spalane bądź współspalane z paliwami węglowymi w kotłach fluidalnych.
2. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż mimo zasadniczych różnic związanych z pochodzeniem, składem chemicznym oraz sposobem przygotowania paliw biomasowych i alternatywnych proces ich spalania może być w pełni kontrolowany i wysoce efektywny. Warunkiem koniecznym jest optymalizacja procesu spalania polegająca na doborze parametrów procesu tj. temperatury, koncentracji utleniacza oraz natężenia strumienia materiału inertnego.
3. Analiza procesu kinetyki spalania w różnych temperaturach w zakresie 650-850°C, wskazuje, iż paliwa te mogą być wykorzystywane zarówno do procesu spalania jak i zgazowania oraz pirolizy.
4. Zauważono, iż spalanie paliw biomasowych typu agro prowadzi w temperaturze 850°C do powstawania spieków zagrażających hydrodynamicie warstwy fluidalnej. Powodem tego jest wysoka zawartość związków pierwiastków alkalicznych tj. sodu i potasu.
5. Proces powstawania spieków może zostać wyeliminowany na etapie przygotowania paliwa poprzez obniżenie stężenia zawartości pierwiastków alkalicznych w substancji mineralnej poprzez zmieszanie paliwa typu agro z paliwami typu RDF.
6. Niewielka zawartość stałej części palnej oraz duża zawartość części lotnych w stosunku do węgla kamiennych i brunatnych charakterystyczna dla paliw biomasowych oraz alternatywnych powoduje wyraźne skrócenie całkowitego czasu procesu ich spalania. Należy to uwzględnić podczas projektowania poszczególnych jednostek kotłów fluidalnych przeznaczonych do spalania bądź współspalania tego typu paliw.
7. Stwierdzono, iż paliwa te mogą być również stosowane w technologii oxy-combustion. Wzrost utleniacza w zakresie 21-30% jest jedynie niebezpieczny

w przypadku paliw biomasowych typu agro ze względu na wzrost temperatury na powierzchni spalanego ziarna.

8. Obecność warstwy fluidalnej przyspiesza proces spalania ze względu na usuwanie powstającego na powierzchni ziarna popiołu, poprawę procesu dyfuzji w obrębie spalanego ziarna oraz na proces mechanicznej destrukcji ziarna. Stwierdzono, że obecność warstwy fluidalnej o koncentracji charakterystycznej dla środkowej części kotła CFB tj.  $G_s=2,5-5 \text{ kg/m}^2\text{s}$  przyspiesza proces spalania dla paliw z biomasy leśnej o 42-60%, a w przypadku paliw RDF 8-48%.

## WYKAZ TABEL

---

Tab. 1. Klasyfikacja SRF na podstawie jego trzech kluczowych parametrów [29]	17
Tab. 2. Wyniki analizy składu biomasy różnego pochodzenia [42]	19
Tab. 3. Składniki popiołu niektórych paliw biomasowych i węgla kamiennego (% masowy popiołu) [54]	21
Tab. 4. Typowy skład próbek stałych paliw alternatywnych SRF/ RDF produkowanych w celach handlowych z komunalnych odpadów stałych, na podstawie najbardziej rozpowszechnionych kategorii pozycji odpadów w różnych regionach świata [16, 61-67]	25
Tab. 5. Typowe zakresy zawartości biopolimerów w biomacie drzewnej, niedrzewnej oraz składnikach paliw SRF/RDF [16,75]	26
Tab. 6. Porównanie technologii spalania CFB i BFB [107]	34
Tab. 7. Wyniki analizy technicznej paliw biomasowych	49
Tab. 8. Wyniki analizy elementarnej peletu z trociny dębowej	49
Tab. 9. Wyniki analizy elementarnej peletu z trociny 30%buk /70%dąb	49
Tab. 10. Wyniki analizy elementarnej peletu ze słomy	49
Tab. 11. Wyniki analizy elementarnej peletu z łuski słonecznika	50
Tab. 12. Wyniki analizy technicznej peletów RDF1 i RDF2	51
Tab. 13. Wyniki analizy elementarnej peletów RDF 1	51
Tab. 14. Wyniki analizy elementarnej peletów RDF 2	51
Tab. 15. Wyniki analizy składu chemicznego popiołu badanych paliw biomasowych	92
Tab. 16. Wyniki oznaczenia zawartości wilgoci, popiołu i części lotnych w peletach z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika/50% peletu RDF2	116
Tab. 17. Dane porównujące właściwości badanych w pracy paliw (tab. 7-14) z węglem brunatnym i kamiennym [116, 131].	122

## WYKAZ ILUSTRACJI

---

Rys. 1. Tempo wzrostu światowego zapotrzebowania na energię w latach 2011-2021 [2,4,5]	8
Rys. 2. Udział w całkowitym zapotrzebowaniu na energię pierwotną według paliw, 2010- 2019 [2]	9
Rys. 3. Światowa produkcja energii elektrycznej z biomasy w latach 2011-2020 [9]	10
Rys. 4. Prognozowane wytwarzanie odpadów na świecie [15]	12
Rys. 5. Termograwimetryczny analizator wilgoci LECO	44
Rys. 6. Półautomatyczny kalorymetr LECO AC600	44
Rys. 7. Analizator elementarny CHNSO serii FlashSmart	45
Rys. 8. Pelety z biomasy	46
Rys. 9. Pelety RDF 1 i RDF 2	47
Rys. 10. Pelety RDF1 o średnicy 6mm po zmieleniu	47
Rys. 11. Pelety RDF2 o średnicy 8 mm po zmieleniu	48
Rys. 12. Schemat stanowiska eksperymentalnego	55
Rys. 13. Widok stanowiska eksperymentalnego oraz wnętrza komory spalania podczas eksperymentu	56
Rys. 14. Układ pomiarowy ubytku masy próbki paliwa stałego. 1 – uchwyt na próbkę, 2 – ramię wagi tensometrycznej, 3 – waga tensometryczna	57
Rys. 15. Wyświetlacz szafy sterowniczej	58
Rys. 16. Etapy spalania peletu z biomasy (pelet z trociny dębowej) bez materiału inertnego, $G_s=0$	59
Rys. 17. Etapy spalania peletu RDF2 bez materiału inertnego, $G_s=0$	59
Rys. 18. Schemat kotła z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym, wraz z zaznaczonymi strefami spalania [148]	60
Rys. 19. Etapy spalania peletu z biomasy (na przykładzie peletu z trociny dębowej) w atmosferze powietrza w strudze materiału inertnego	61
Rys. 20. Etapy spalania peletu RDF2 w atmosferze powietrza w strudze materiału inertnego	61
Rys. 21. Zarejestrowany przebieg ubytku masy podczas spalania RDF1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C	63

Rys. 22. Ubytek masy ziarna podczas spalania RDF 1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C _____	63
Rys. 23. Ubytek masy podczas spalania RDF 1 w atmosferze powietrza bez materiału inertnego, 650°C, gdzie 1 – etap nagrzewania i odparowania wilgoci, 2 – zapłon i spalanie części lotnych, 3 – spalanie karbonizatu _____	64
Rys. 24. Wyniki pomiarów ubytku masy peletów RDF1 spalanych w temperaturze 650°C i strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ uzyskane z programu rejestrującego, przed opracowaniem _____	65
Rys. 25. Wynik pomiaru ubytku masy peletu 1 RDF1 spalane w temperaturze 650°C i strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ uzyskany z programu rejestrującego, zawierający oznaczenie najważniejszych punktów krzywej _____	65
Rys. 26. Ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 650°C _____	66
Rys. 27. Procentowy ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 650°C _____	66
Rys. 28. Średni procentowy ubytek masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 650°C _____	67
Rys. 29. Aproksymacja średniego procentowego ubytku masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 650°C, gdzie 1 – nagrzewanie i odparowanie wilgoci oraz zapłon i spalanie części lotnych, 2 – spalanie karbonizatu. _	67
Rys. 30. Aproksymacja średniego procentowego ubytku masy podczas spalania RDF1 w strumieniu materiału inertnego $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 650°C, gdzie 1 – nagrzewanie i odparowanie wilgoci oraz zapłon i spalanie części lotnych, 2 – spalanie karbonizatu __	68
Rys. 31. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalane w różnej temperaturze przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	70
Rys. 32. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalane w różnej temperaturze przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	70
Rys. 33. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalane w różnej temperaturze przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	70
Rys. 34. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalane w różnej temperaturze przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	71
Rys. 35. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalane w różnej temperaturze przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	72

Rys. 36. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	72
Rys. 37. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	73
Rys. 38. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	73
Rys. 39. Pozostałość po spaleniu peletu z łuski słonecznika w temperaturze $850^\circ\text{C}$ przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	73
Rys. 40. Pozostałość po spaleniu peletu ze słomy w temperaturze $850^\circ\text{C}$ przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	73
Rys. 41. Ubytek masy ziarna peletu z trociny dębowej spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	74
Rys. 42. Ubytek masy ziarna peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	74
Rys. 43. Ubytek masy ziarna peletu z łuski słonecznika spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	75
Rys. 44. Ubytek masy ziarna peletu ze słomy spalanego w różnej temperaturze przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	75
Rys. 45. Czas spalania peletów z biomasy w różnych temperaturach oraz różnym strumieniu materiału inertnego _____	77
Rys. 46. Czas spalania peletów z biomasy przy obniżeniu temperatury komory spalania w stosunku do temperatury odniesienia ( $850^\circ\text{C}$ ) _____	78
Rys. 47. Pozostałość po spaleniu peletu z łuski słonecznika w temperaturze $850^\circ\text{C}$ przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	79
Rys. 48. Czas spalania peletów z biomasy w zależności od wartości strumienia materiału $G_s$ , podczas spalania w różnych temperaturach ( $G_s=0$ poziom odniesienia) _____	80
Rys. 49. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	82
Rys. 50. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	82
Rys. 51. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	82

Rys. 52. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	83
Rys. 53. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	83
Rys. 54. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	84
Rys. 55. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	84
Rys. 56. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	84
Rys. 57. Ubytek masy ziaren peletu z trociny dębowej spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	85
Rys. 58. Ubytek masy ziaren peletu z mieszaniny trocin 30%buk /70%dąb spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	86
Rys. 59. Ubytek masy ziaren peletu z łuski słonecznika spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	86
Rys. 60. Ubytek masy ziaren peletu ze słomy spalanych w różnych koncentracjach tlenu przy $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	86
Rys. 61. Czas spalania peletów z biomasy spalanych w różnych warunkach _____	88
Rys. 62. Czas spalania peletów z biomasy w atmosferach utleniających o różnej zawartości tlenu w porównaniu do atmosfery odniesienia (21% tlenu) _____	89
Rys. 63. Czas spalania peletów z biomasy w zależności od wartości strumienia materiału $G_s$ spalanych w różnych atmosferach ( $G_s=0$ poziom odniesienia) _____	90
Rys. 64. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w różnych temperaturach przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	93
Rys. 65. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ w różnych temperaturach _____	94
Rys. 66. Ubytek masy podczas spalania ziaren peletu RDF1 i RDF2 w atmosferze powietrza w strumieniu materiału inertnego $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ w różnych temperaturach _____	94
Rys. 67. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w różnych warunkach komory paleniskowej (temperatury: 650, 750 oraz 850°C, strumienie materiału inertnego $G_s=0, 2,5$ oraz $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) _____	96

Rys. 68. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w temperaturach 750 i 650°C komory spalania w stosunku do temperatury odniesienia (850°C) w różnych strumieniach materiału inertnego: $G_s=0, 2,5$ oraz $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	97
Rys. 69. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$ i $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach _____	99
Rys. 70. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu bez materiału inertnego w temperaturze 850°C _____	100
Rys. 71. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu i strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ w temperaturze 850°C _____	100
Rys. 72. Ubytek masy podczas spalania ziaren RDF1 i RDF2 przy różnym udziale tlenu i strumieniu materiału inertnego $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ w temperaturze 850°C _____	100
Rys. 73. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 badanych przy różnym udziale tlenu i strumieniach materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w temperaturze 850°C _____	102
Rys. 74. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 podczas zmiany zawartości utleniacza w atmosferze komory spalania w porównaniu z atmosferą odniesienia (21% tlenu) w różnych strumieniach materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) _____	103
Rys. 75. Czas spalania ziaren peletów RDF1 i RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$ i $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w porównaniu ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych atmosferach utleniających _____	105
Rys. 76. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	107
Rys. 77. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	107
Rys. 78. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	108
Rys. 79. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	109
Rys. 80. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	109
Rys. 81. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	110
	144



Rys. 82. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 850°C i $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	110
Rys. 83. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 750°C i $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	111
Rys. 84. Ubytek masy podczas spalania ziaren paliw biomasowych i RDF w 650°C i $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	111
Rys. 85. Czas spalania wybranych paliw przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$ i $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych koncentracjach tlenu w atmosferze spalania	113
Rys. 86. Pelety po zmieleniu, mieszanka zawierająca 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF _____	115
Rys. 87. Prasa hydrauliczna wyposażona w system podgrzewania _____	115
Rys. 88. Pelet o średnicy 8mm zawierający 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF _____	116
Rys. 89. Ubytek masy podczas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$ oraz $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ ) _____	117
Rys. 90. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$ oraz $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ ) _____	118
Rys. 91. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2 w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ i $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) porównany ze spalaniem bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) w temperaturze 850°C _____	118
Rys. 92. Ubytek masy podczas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2, peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$ oraz $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ ) _____	119
Rys. 93. Czas spalania peletu z mieszaniny 50% peletu z łuski słonecznika oraz 50% peletu RDF2, peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF2 w temperaturze 850°C przy różnych wartościach strumienia masy materiału inertnego ( $G_s=0\text{kg/m}^2\text{s}$ , $G_s=2,5\text{kg/m}^2\text{s}$ oraz $G_s=5\text{kg/m}^2\text{s}$ ) _____	120
Rys. 94. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C bez materiału inertnego _____	123

Rys. 95. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C bez materiału inertnego _____	124
Rys. 96. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C w strumieniu materiału inertnego $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	125
Rys. 97. Ubytek masy podczas spalania węgla kamiennego, paliw biomasowych RDF w temperaturze 850°C w strumieniu materiału inertnego $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ _____	126
Rys. 98. Czas spalania wybranych paliw przy $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5$ i $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej _____	128
Rys. 99. Czas spalania ziaren paliw bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura 850°C jako poziom odniesienia) _____	129
Rys. 100. Czas spalania ziaren paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura 850°C jako poziom odniesienia) _____	130
Rys. 101. Czas spalania ziaren paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w różnych temperaturach komory paleniskowej (temperatura 850°C jako poziom odniesienia) _____	131
Rys. 102. Czas spalania paliw bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) oraz w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2$ ) w różnych atmosferach utleniających _____	133
Rys. 103. Czas spalania paliw bez materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) przy zwiększaniu stężenia utleniacza w atmosferze (czas spalania w atmosferze zawierającej 21% utleniacza jako poziom odniesienia) _____	134
Rys. 104. Czas spalania paliw w strumieniu materiału inertnego ( $G_s=2,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) przy zwiększaniu stężenia utleniacza w atmosferze (czas spalania w atmosferze zawierającej 21% utleniacza jako poziom odniesienia) _____	135

## LITERATURA

---

- [1] Cambers G., Sibley S.: Cambridge IGCSE Geography Coursebook. Cambridge University Press, II wydanie, 2015, s. 4.
- [2] IEA, Global Energy Review 2019, IEA, Paryż, 2020, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>, data dostępu: 26.08.2022 r.
- [3] IEA, Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report 2019, Paryż, 2019, <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>, data dostępu: 26.08.2022 r.
- [4] IEA, Global Energy Review 2020, Paryż, 2020, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>, data dostępu: 26.08.2022 r.
- [5] IEA, Global Energy Review 2021, Paryż, 2021, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>, data dostępu: 26.08.2022 r.
- [6] IEA, World Energy Balances: Overview, Paryż, 2020, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, data dostępu: 26.08.2022 r.
- [7] UNFCCC, The Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015, [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php), data dostępu: 26.08.2022 r.
- [8] UNSDG, United Nations Sustainable Development Goal report, 2019, <http://www.un.org/sustainabledevelopment/>, data dostępu: 23.05.2020 r.
- [9] International Renewable Energy Agency (IRENA), IRENA Data Centre, <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels>, data dostępu: 20.04.2023 r.
- [10] Sims R., The Brilliance of Bioenergy: In Business and Practice. Earthscan Publications Ltd., 2002.
- [11] Greinert A., Mrówczyńska M., Szefer W., The Use of Waste Biomass from the Wood Industry and Municipal Sources for Energy Production. Sustainability, 2019, 11: 3083, DOI:10.3390/su11113083.
- [12] Mboumboue E., Njomo D., Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. Biomass Bioenergy, 2018, 118: 16–2, DOI:10.1016/j.biombioe.2018.08.002.

- [13] Rajca P., Zajemska M., Ocena możliwości wykorzystania paliwa RDF na cele energetyczne. Rynek Energii, 2018, 4(137): 29-37.
- [14] COM (2015) 614, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów, Ku gospodarce o obiegu zamkniętym: program "zero odpadów dla Europy", Bruksela, 02.12.2015.
- [15] Kaza S. i in., What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. The World Bank Group 2018.  
*<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>*, data dostępu: 24.05.2022 r.
- [16] Gerassimidou S., Velis C.A., Williams P.T., Komilis D. Characterisation and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review. Waste Management & Research, 2020, 38(9):942-965, DOI:10.1177/0734242X20941085
- [17] COM(2020) 98 final, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów, Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy, Bruksela 11.3.2020.
- [18] Milne T., Brennan S., Glenn B., Sourcebook of Methods of Analysis for Biomass and Biomass-Conversion Processes. US Department of Energy, 1990,  
*<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3548.pdf>*, data dostępu: 21.04.2021 r.
- [19] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy
- [20] Spurek G., The classification of solid recovered fuels for the needs of polish cement industry. Structure and Environment, 2012, 4(1): 37—42, ISSN 2081-1500.
- [21] European Commission, Refuse derived fuel, current practice and perspectives – Final Report, European Commission – Directorate General Environment, 2003.
- [22] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 27.09.2001 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. 2001 nr 112 poz. 1206.
- [23] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 4.08.2003 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, Dz.U. 2003 nr 163, poz. 1584.
- [24] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z 31.10.2003 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie rodzajów odpadów innych niż

niebezpieczne oraz rodzajów instalacji i urządzeń, w których dopuszcza się ich termiczne przekształcanie, Dz. U. 2003 nr 192 poz. 1877.

- [25] Wandrasz J.W., Wandrasz A.J., Formed fuels. Biofuels and fuels from waste in thermal processes, Edition: Seidel-Przywecki Sp. z o. o., Warszawa, 2006.
- [26] Wandrasz J.W., Fuel from waste and its place in thermal processes, p. 5, in: Waste to Energy Environment, Department of Technologies and Installations for Waste Management Silesian University of Technology, Gliwice, 2010.
- [27] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach, Dz.U. 2015 poz. 1277.
- [28] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. 2020 poz. 10.
- [29] European Committee for Standardization, Solid Recovered Fuels – Specifications and Classes, CEN/TS15359:2011, 2011.
- [30] Garg A., Smith R., Hill D., Simms N., Pollard S., Wastes as co-fuels: the policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications Environ. Sci. Technol., 2007, 41: 4868-4874, DOI:10.1021/es062163e.
- [31] Rice K.M., Walker E.M., Wu M., Gillette C., Blough E.R., Environmental mercury and its toxic effects. J. Prevent. Med. Public Health, 2014, 47: 74-83, DOI:10.3961/jpmph.2014.47.2.74.
- [32] Del Zotto L., Tallini A., Di Simone G., Molinari G., Cedola L., Energy enhancement of solid recovered fuel within systems of conventional thermal power generation. Energy Procedia, 2015, 81: 319-338, DOI:10.1016/j.egypro.2015.12.102.
- [33] Di Lonardo M.C., Franzese M., Costa G., Gavasci R., Lombardi F. The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome. Comparison and implications Waste Manage., 2016, Part B, 47:195-205, DOI:10.1016/j.wasman.2015.07.018.
- [34] Dunnu G., Maier J., Hilber T., Scheffknecht G., Characterisation of large solid recovered fuel particles for direct co-firing in large PF power plants. Fuel, 2009, 88: 2403-2408, DOI:10.1016/j.fuel.2009.03.004.
- [35] Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T., Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical—biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., 2010, 40: 979-1105, DOI:10.1080/10643380802586980.

- [36] Połomka J., Jędrzak A., RDF from Compost-Like-Output's Produced in the MBT Installation in the Case of Marszów, Poland. *Energies*, 2020, 13: 4353, DOI:10.3390/en13174353.
- [37] CEMBUREAU - the European Cement Association, *Alternative fuels In cement manufacture*, Brussels: Cembureau, 1999.
- [38] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii , Dz.U. 2022 poz. 1378 z późn. zm.
- [39] Tumuluru J.S., Sokhansanj S., Wright C.T., Boardman R.D., Yancey N.A., A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods ASABE Annual International Meeting, Idaho National Laboratory, 2011, DOI:10.13031/2013.37191.
- [40] Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles T.R. Jr., Miles T.R., Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 1998, 54 (1–3): 17–46, DOI:10.1016/S0378-3820(97)00059-3
- [41] Faaij A.P.C., Biomass combustion., in *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, Vol. 1, 2004, 175–191.
- [42] Saidura R., Abdelaziza E.A., Demirbasb A., Hossaina M.S., Mekhilefc S., A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 2262–2289.
- [43] Maciejewska A., Veringa H., Sanders J., Peteves S. Co-firing of biomass with coal: constraints and role of biomass pre-treatment, DG JRC Inst. Energy, 2006.
- [44] Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 40: 153-160, DOI:10.1016/j.rser.2014.07.181.
- [45] Chen W.H., Peng J., Bi X.T., A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2015, 44: 847–866, DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.039.
- [46] Singh R., Krishna B.B., Mishra G., Kumar J., Bhaskar T., Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass. *Renew. Energy*, 2016, 98: 226–237, DOI:10.1016/j.renene.2016.03.023.
- [47] Geng A., Yang H., Chen J., Hong Y., Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas

- mitigation. *Forest Policy Econ.*, 2017, 85: 192–200, DOI: 10.1016/j.forpol.2017.08.007.
- [48] Zhang J., Liu J., Evrendilek F., Xie W., Kuo J., Zhang X., Buyukada M., Kinetics, thermodynamics, gas evolution and empirical optimization of cattle manure combustion in air and oxy-fuel atmospheres. *Appl. Therm. Eng.*, 2019, 149: 119–131, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.010.
- [49] Weiland P., Biogas production: Current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2010, 85: 849–860, DOI:10.1007/s00253-009-2246-7.
- [50] Johansson A.-C., Wiinikka H., Sandström L., Marklund M., Öhrman O.G.W., Narvesjö J., Characterization of pyrolysis products produced from different Nordic biomass types in a cyclone pilot plant. *Fuel Process. Technol.*, 2016, 146: 9–19, DOI:10.1016/j.fuproc.2016.02.006.
- [51] Li Y., Rezgui Y., Zhu H., District heating and cooling optimization and enhancement—towards integration of renewables, storage and smart grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017, 72: 281–294, DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.061.
- [52] Demirbas A., Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30 (2): 219–230, DOI:10.1016/j.pecs.2003.10.004
- [53] Demirbas A., Fuel and combustion properties of bio-wastes. *Energy Sources*, 2005, 27 (5): 451–462, DOI:10.1080/00908310490441863.
- [54] Khana A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90 (1): 21-50, DOI:10.1016/J.FUPROC.2008.07.012.
- [55] Dafnomilis I., Hoefnagels R., Pratama Y.W., Schott D.L., Lodewijks G., Junginger M., Review of solid and liquid biofuel demand and supply in Northwest Europe towards 2030 – a comparison of national and regional projections. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017, 78: 31–45, DOI:10.1016/j.rser.2017.04.108.
- [56] Pradhana P., Mahajanib S.M., Aroraa A., Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 2018; 181: 215–232, DOI:10.1016/j.fuproc.2018.09.021.
- [57] Basu P., Butler J., Leon M.A. Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants. *Renewable Energy*, 2011, 36 (1): 282-288, DOI:10.1016/j.renene.2010.06.039.

- [58] Malat'ak J., Velebil J., Bradna J., Specialty types of waste paper as an energetic commodity. *Agron. Res.*, 2018, 16 (2): 534–542, DOI:10.15159/AR.18.045.
- [59] Vekemans O., Chaouki J., Municipal solid waste Co-firing in coal power plants: combustion performance. *Dev. Combust. Technol.*, 2016, 118–142, DOI: 10.5772/63940.
- [60] Montané D., Abelló S., Farriol X., Berruero C., Volatilization characteristics of solid recovered fuels (SRFs). *Fuel Process. Technol.*, 2013, 113: 90-96, DOI:10.1016/j.fuproc.2013.03.026
- [61] Porshnov D., Ozols V., Ansone-Bertina L., i in., Thermal decomposition study of major refuse derived fuel components. *Energy Procedia*, 2018, 147: 48–53, 10.1016/j.egypro.2018.07.032.
- [62] Stępień P., Pulka J., Serowik M., i in., Thermogravimetric and calorimetric characteristics of alternative fuel in terms of its use in low-temperature pyrolysis. *Waste Biomass and Valorization*, 2019, 10: 1669–1677, DOI:10.1007/s12649-017-0169-6.
- [63] Sarc R., Seidler I., Kandlbauer L., et al, Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry—Update 2019. *Waste Management & Research*, 2019, 37: 885–897, DOI: 10.1177/0734242X19862600.
- [64] Di Maria F., Micale C., Sordi A., i in., Urban mining: Quality and quantity of recyclable and recoverable material mechanically and physically extractable from residual waste. *Waste Management*, 2013, 33: 2594–2599, DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.008.
- [65] Skodras G., Grammelis P., Basinas P., i in., A thermochemical conversion study on the combustion of residue-derived fuels. *Water, Air, Soil Pollution: Focus*, 2009, 9: 151–157, DOI:10.1007/s11267-008-9197-3.
- [66] Robinson T., Bronson B., Gogolek P., i in., Sample preparation for thermo-gravimetric determination and thermo-gravimetric characterization of refuse derived fuel. *Waste Management*, 2016, 48: 265–274, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.018.
- [67] Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., i in., Elemental balance of SRF production process: Solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Management & Research*, 2016, 34: 38–46 DOI:10.1177/0734242X1561569.



- [68] Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., i in., Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 1: SRF produced from commercial and industrial waste. *Waste Management*, 2014, 34: 1398–1407, DOI:10.1016/j.wasman.2014.03.011.
- [69] Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., i in., Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3: Solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Management & Research*, 2015, 33: 146–156, DOI: 10.1177/0734242X14563375.
- [70] Korkmaz A., Yanik J., Brebu M., et al Pyrolysis of the tetra pak. *Waste Management*, 2009, 29: 2836–2841, DOI:10.1016/j.wasman.2009.07.008
- [71] *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*, red. Pohl G., Cambridge: Woodhead Publishing 2010.
- [72] Miranda R., Sosa-Blanco C., Bustos-Martinez D., i in., Pyrolysis of textile wastes: I. Kinetics and yields. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*, 2007, 80: 489–495, DOI:10.1016/j.jaap.2007.03.008.
- [73] Liu Z., Wang H., Hui L., Pulping and papermaking of non-wood fibers. W: Salim, NK (ed.) *Pulp and Paper Processing*. London: IntechOpen, 2018, 3–31, DOI:10.5772/intechopen.79017.
- [74] Wong K.K., Gamage N., Setunge S., i in. Thermal behaviour of hardwood and softwood composites. *Advanced Materials Research*, 2014, 905: 220–225, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.905.220.
- [75] Gerassimidou S., Velis C.A., Williams P.T., Komilis D., Supplemental material for Characterisation and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review. *Waste Management & Research*, 2020, 38(9):942-965, DOI:10.1177/0734242X20941085
- [76] Bodzay B., Bánhegyi G. Polymer waste: Controlled breakdown or recycling? *International Journal of Design Sciences Technology*, 2016, 22: 109–138, ISSN 1630 - 7267.
- [77] European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, 2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal->

*content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN*, data dostępu 14.04.2021 r.

- [78] Iacovidou E., Hahladakis J., Deans I., Velis C., Purnell P., Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal: Impact on multi-dimensional resource recovery value. *Waste Management*, 2018, 73: 535-545, DOI:10.1016/j.wasman.2017.07.001.
- [79] Deans I., Dimas I., Velis C.A., Modelling of solid recovered fuel (SRF) properties based on material composition—Chloride quality. *Waste Management*, 2016, 6: 389–398. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.001.
- [80] Rada E.C., Ragazzi M., Selective collection as a pretreatment for indirect solid recovered fuel generation. *Waste Manage.*, 2014, 34: 291-297, DOI:10.1016/j.wasman.2013.11.013.
- [81] Ma W., Rotter S., Overview on the chlorine origin of MSW and Cl-originated corrosion during MSW & RDF combustion process. 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Shanghai, 2008, DOI:10.1109/ICBBE.2008.564.
- [82] Vainikka P., Bankiewicz D., Frantsi A., Silvennoinen J., Hannula J., Yrjas P., Hupa M., High temperature corrosion of boiler waterwalls induced by chlorides and bromides. Part 1: Occurrence of the corrosive ash forming elements in a fluidised bed boiler co-firing solid recovered fuel. *Fuel*, 2011, 90: 2055-2063, DOI:10.1016/j.fuel.2011.01.020.
- [83] Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., Hurme M., Elemental balance of SRF production process: solid recovered produced from construction and demolition waste. *Fuel*, 2015, 159: 280-288, DOI:10.1016/j.fuel.2015.06.082.
- [84] Lorber K.E., Sarc R., Aldrian A., Design and quality assurance for solid recovered fuel. *Waste Manage. Res.*, 2012, 30: 370-380, DOI: 10.1177/0734242X12440484.
- [85] Lee B.-K., Ellenbecker M.J., Moure-Eraso R., Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes. *Waste Management*, 2002, 22(5): 461-470, DOI: 10.1016/s0956-053x(02)00006-5.
- [86] Cocchi A., Andreini P., Cassitto L., Del Zotto L., Tallini A., Di Simone G., Molinari G., Cedola L., 69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014 Energy enhancement of solid recovered fuel within systems of conventional

- thermal power generation *Energy Procedia*, 2015, 81: 319-338,  
DOI:10.1016/j.egypro.2015.12.102
- [87] Cheng J., Zhou F., Si T., Zhou J. Cen K., Mechanical strength and combustion properties of biomass pellets prepared with coal tar residue as a binder. *Fuel Processing Technology*, 2018, 179: 229-237, DOI:10.1016/j.fuproc.2018.07.011.
- [88] Coulon F., Orsi R., Turner C., Walton C., Daly P., Pollard S.J., Understanding the fate and transport of petroleum hydrocarbons from coal tar within gasholders. *Environ. Int.*, 2009, 35: 248-252, 10.1016/j.envint.2008.06.005.
- [89] Close F., Coulon Whelan M.J., Paton G.I., Semple K.T., Villa R., Pollard S.J., Multimedia fate of petroleum hydrocarbons in the soil: oil matrix of constructed biopiles. *Chemosphere*, 2010, 81: 1454-1462, DOI:10.1016/j.chemosphere.2010.08.057.
- [90] Gao L., Dong F., Dai Q., Zhong G., Halik U., Lee D., Coal tar residues based activated carbon: preparation and characterization. *J. Taiwan Inst. Chem. E.*, 2016, 63: 166-169, DOI:10.1016/j.jtice.2016.02.029.
- [91] Wang X., Shen J., Niu Y., Sheng Q., Liu G., Wang Y., Solvent extracting coal gasification tar residue and the extracts characterization. *J. Clean. Prod.*, 2016, 133: 965-970, DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.060.
- [92] Shi S., Qiao G., Zhou X., The Properties of Coal-tar Residue and its Utilization Techniques, Twenty-Second Annual International Pittsburgh Coal Conference 22nd, 2005.
- [93] Mišljenović N., Mosbye J., Schüller R.B., Lekang O.I., Salas B.C., Physical quality and surface hydration properties of wood based pellets blended with waste vegetable oil. *Fuel Process. Technol.*, 2015, 134: 214–222, DOI:10.1016/j.fuproc.2015.01.037.
- [94] Kong L., Tian S., He C., Du C., Tu Y., Xiong Y., Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust. *Appl. Energy*, 2012, 98: 33–39, DOI:10.1016/j.apenergy.2012.02.068.
- [95] Li Y.D., Liu H., Zhang O., High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel. *Fuel Process Technol*, 2001, 74: 81–91, DOI:10.1016/S0378-3820(01)00218-1.
- [96] Craven J.M., Swithenbank J., Sharifi V.N., Peralta-Solorio D., Kelsall G., Sage P.,

- Hydrophobic coatings for moisture stable wood pellets. *Biomass Bioenergy*, 2015, 80: 278–285, DOI:10.1016/j.biombioe.2015.06.004.
- [97] Madadian E., Akbarzadeh A., Orsat V., Lefsrud M., Pelletized Composite Wood Fiber Mixed with Plastic as Advanced Solid Biofuels: Physico-Chemo-Mechanical Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10 (1): 721–732, DOI:10.1007/s12649-017-0080-1.
- [98] Åmand L.-E., Kassman H., Decreased PCDD/F formation when co-firing a waste fuel and biomass in a CFB boiler by addition of sulphates or municipal sewage sludge. *Waste Manage.*, 2013, 33: 1729-1739, DOI: 10.1016/j.wasman.2013.03.022.
- [99] Teixeira P., Lopes H., Gulyurtlu I., Lapa N., Abelha P., Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed. *Biomass Bioenerg.*, 2012, 39: 192-203, DOI:10.1016/j.biombioe.2012.01.010.
- [100] Wu H., Glarborg P., Frandsen F.J., Dam-Johansen K., Jensen P.A., Sander B., Trace elements in co-combustion of solid recovered fuel and coal. *Fuel Process. Technol.*, 2013, 105: 212-221, DOI:10.1016/j.fuproc.2011.05.007.
- [101] Wu H., Glarborg P., Frandsen F.J., Dam-Johansen K., Jensen P.A., Sander B., Co-combustion of pulverized coal and solid recovered fuel in an entrained flow reactor – General combustion and ash behavior. *Fuel*, 2011, 90 (5): 1980-1991, DOI:10.1016/j.fuel.2011.01.037.
- [102] Basu, P., *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006.
- [103] Basu, P., *Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: A review*. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, 54: 5547–5557.
- [104] Al-Mansour F., Zuwała J., An evaluation of biomass co-firing in Europe. *Biomass Bioenergy*, 2010, 34: 620–629, DOI:10.1016/j.biombioe.2010.01.004.
- [105] Miller B.G., *Clean Coal Engineering Technology*, Elsevier: Oxford, UK, 2010.
- [106] Bis Z., *Kotły Fluidalne teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010.
- [107] Leski K., Luty P., Łucki A., Jankowski D., Application of circulating fluidized bed boilers in the fuel combustion process. *Technical Transactions*, 2018, 4: 83–96.

- [108] Bis Z., Radecki M., Alternatywne sorbenty wapniowe do odsiarczania spalin w kotłach fluidalnych, W: Materiały IX Konferencji Kotłowej 2002 nt. Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów, tom 1, 12–15 listopada 2002, Szczyrk.
- [109] Toftegaard M.B., Brix J., Jensen P.A., Glarborg P., Jensen A.D. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Prog Energy Combust Sci.*, 2010, 36(5): 581–625, DOI:10.1016/j.pecs.2010.02.001.
- [110] Scheffknecht G., Al-Makhadmeh L., Schnell U., Maier J., Oxy-fuel coal combustion – anreview of the current state-of-the-art. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2011, 5:S16–35, DOI:10.1016/j.ijggc.2011.05.020.
- [111] Desai B.G., CO2 emissions—Drivers across time and countries. *Curr. Sci.*, 2018, 115: 386–387, <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/115/03/0386.pdf>, data dostępu: 12.04.2020 r.
- [112] Pałamarczuk P., Koniecznyński J. Ekologiczne walory stosowania kotłów fluidalnych w sektorze komunalnym. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko / Główny Instytut Górnictwa*, 2005, 3: 13–24.
- [113] Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., The kinetics of periodic combustion of coal. *Powder Handling & Processing*, 2004. 16 (2): 126-131.
- [114] Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Co-combustion of coal and biomass in the fluidized bed. *Archives of Thermodynamics*, 2007, 28 (4): 63-77.
- [115] Pełka P., Analysis of a coal particle mass loss burning in flow of inert material. *Combust. Flame*, 2009, 156 (8): 1604-1613, DOI:10.1016/j.combustflame.2009.04.009.
- [116] Pełka P., Erozja ziaren węgla spalanych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2013.
- [117] Pełka P., Mass loss of coal particles burning in fluidized bed. *Archives of Mining Sciences*, 2017, 62 (2): 339-354, DOI:10.1515/amsc-2017-0026.
- [118] Kijo-Kleczkowska A., Combustion of coal–water suspensions. *Fuel*, 2011, 90 (2): 865-877, DOI:10.1016/j.fuel.2010.10.034.
- [119] Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A., Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmos Environ*, 2004, 38(25): 4183–95.
- [120] Wierzbicka A., Lillieblad L., Pagels J., Strand M., Gudmundsson A., Gharibi A., i in. Particle emissions from district heating units operating on three commonly used

- biofuels. *Atmos Environ*, 2005, 39(1): 139–50, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.027.
- [121] Wiinikka H., Gebart R., Boman C., Bostrom D., Ohman M., Influence of fuel ash composition on high temperature aerosol formation in fixed bed combustion of woody biomass pellets. *Fuel*, 2007, 86(1–2): 181–93, DOI:10.1016/j.fuel.2006.07.001.
- [122] Wiinikka H., Gebart R., Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor. *Biomass Bioenergy*, 2004, 27(6): 645–52, DOI:10.1016/j.biombioe.2003.08.020.
- [123] Brunner T., Obernberger I., Scharler R., Primary measures for low-emission residential wood combustion-Comparison of old with optimised modern systems. *Proceedings of 17th European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 2009*, 1319–28.
- [124] Obernberger I., Brunner T., Barnthaler G., Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass Bioenergy*, 2006, 30(11): 973–82, DOI:10.1016/j.biombioe.2006.06.011.
- [125] Diaz-Ramirez M., Sebastian F., Royo J., Rezeau A., Influencing factors on NOX emission level during grate conversion of three pelletized energy crops. *Appl Energy*, 2014, 115: 360–73, DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.011.
- [126] Diaz-Ramirez M., Boman C., Sebastian F., Royo J., Xiong S., Bostrom D., Ash characterization and transformation behavior of the fixed-bed combustion of novel crops: poplar, brassica, and cassava fuels. *Energy Fuels*, 2012, 26(6): 3218–29 DOI:10.1021/ef2018622.
- [127] Diaz-Ramirez M., Sebastian .F, Royo J., Rezeau A., Combustion requirements for conversion of ash-rich novel energy crops in a 250 kWth multifuel grate fired system. *Energy*, 2012, 46(1): 636–43, DOI:10.1016/j.energy.2012.07.029.
- [128] Diaz-Ramirez M., Frandsen F.J., Glarborg P., Sebastian F., Royo J., Partitioning of K, Cl, S and P during combustion of poplar and brassica energy crops. *Fuel* 2014, 134: 209–19, DOI:10.1016/j.fuel.2014.05.056.
- [129] Vamvuka D., Zografos D., Alevizos G., Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds. *Bioresource Technology*, 2008, 99 (9): 3534–3544, DOI:10.1016/j.biortech.2007.07.049.

- [130] Mathekga H.I., Oboirien B.O., North B.C., A review of oxy-fuel combustion in fluidized bed reactors. *Int J Energy Res*, 2016, 40(7): 878–902, DOI:10.1002/er.3486.
- [131] Kaczyński K., Kaczyńska K., Pełka P., Analiza ubytku masy ziarna węgla w atmosferze utleniającej oraz obojętnej w zmiennej temperaturze panującej w komorze paleniskowej w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego, *Rynek Energii*, 2019, 1(140): 87-97.
- [132] Singh R.I., Kumar R., Current status and experimental investigation of oxy-fired fluidized bed. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2016, 61: 398–420, DOI:10.1016/j.rser.2016.04.021.
- [133] de las Obras-Loscertales M., Mendiara T., Rufas A., de Diego L.F., García-Labiano F., Gayán P., i in. NO and N<sub>2</sub>O emissions in oxy-fuel combustion of coal in a bubbling fluidized bed combustor. *Fuel*, 2015, 150: 146–53, DOI:10.1016/j.fuel.2015.02.023.
- [134] Duan L., Duan Y., Zhao Ch., Anthony E.J., NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor. *Fuel*, 2015, 150: 8-13, DOI:10.1016/j.fuel.2015.01.110.
- [135] Sher F., Pans M.A., Sun Ch., Snape C., Liu H., Oxy-fuel combustion study of biomass fuels in a 20 kWth fluidized bed Combustor. *Fuel*, 2018, 215: 778–786, DOI:10.1016/j.fuel.2017.11.039.
- [136] Kosowska-Golachowska M., Wolski K., Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Musiał T., Środa K., Spalanie biomasy agro i leśnej w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej. *Rynek Energii* 2016, 3(124).
- [137] Kosowska-Golachowska M., Kijo-Kleczkowska A., Luckos A., Wolski K., Musiał T., Oxy-combustion of biomass in a circulating fluidized bed. *Archives of Thermodynamics*, 2016, 37(1): 17-30, DOI:10.1515/aoter-2016-0002.
- [138] Lu L., Ismail T.M., Jin Y.Q., El-Salam M.A., Yoshikawa K. Numerical and experimental investigation on co-combustion characteristics of hydrothermally treated municipal solid waste with coal in a fluidized bed. *Fuel Process Technol.*, 2016, 154: 52–65, DOI:10.1016/j.fuproc.2016.08.007.
- [139] Peng N.N., Li Y., Liu Z.G., Liu T.T., Gai C., Emission, distribution and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during municipal solid waste (MSW)

- and coal co-combustion. *Sci. Total Environ.*, 2016, 565: 1201–1207, DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.05.188.
- [140] Qin J., Zhao R., Chen T. i in., Co-combustion of municipal solid waste and coal gangue in a circulating fluidized bed combustor. *Int. J. Coal Sci. Technol.*, 2019, 6: 218–224, DOI:10.1007/s40789-018-0231-4.
- [141] Peters J., May J., Ströhle J., Epple B., Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. *Energies*, 2020, 13: 4665, DOI:10.3390/en13184665.
- [142] Soleh M., Hidayat Y., Abidin Z., Co-firing RDF in CFB Boiler Power Plant. *International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, 1-6, DOI:10.1109/IEEECONF48524.2019.9102591.
- [143] Glapa W., Korzeniowski J.I., Mały leksykon górnictwa odkrywkowego. Wyd. i szkolenia górnicze Burnat & Korzeniowski, Wrocław, 2005.
- [144] Prawne, techniczne, ekonomiczne i środowiskowe aspekty gospodarki skałą płonną w kopalniach węgla kamiennego, red. Kicki J., Sobczyk E.J., Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 2016.
- [145] Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych, red. J. Kulczycka, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2019, ISBN 978-83-956380-0-8.
- [146] Róg, L., Wawrzyńkiewicz, W., Hamala, K., Rompalski, P., Solik, M. Wyznaczanie dokładności pobierania i przygotowywania próbek analitycznych biopaliw i stałych paliw wtórnych. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko / Główny Instytut Górnictwa*. 2008, (3), ISBN: 978-83-62922-64-2, 39–49.
- [147] Mehdi M., i in, Study of Hyrothermally RDF Samples for Energy Applications: Thermogravimetric Analysis. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020, 565: 012096, DOI:10.1088/1755-1315/565/1/012096.
- [148] Trybuś T., Fluidalne spalanie paliw jako metoda ograniczania emisji dwutlenku siarki i tlenków azotu. *Ochrona Środowiska*, 1995, 2(57): 15-16.
- [149] Bibrzycki J., Katelbach-Woźniak A., Niestrój M., Szlęk A., Wpływ szybkości nagrzewania na przebieg pirolizy mieszanek biomasy. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, odnawialne źródła energii*, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Kraków, 2013, 13-20.
- [150] Stelmach S., Wasilewski R., Figa J., Zgazowanie biomasy-przykłady nowych technologii. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 2008, 7: 9-20.



- [151] Zaini I.N., Wen Y., Mousa E., Jönsson P.G., Yang W., Primary fragmentation behavior of refuse derived fuel pellets during rapid pyrolysis, *Fuel Processing Technology*, 2021, 216: 106796, ISSN 0378-3820, DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106796.
- [152] Yang Y., Liew R.K., Tamothran A.M. i in. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environ Chem Lett*, 2021, 19: 2127–2140 DOI:10.1007/s10311-020-01177-5.
- [153] Tomeczek J., *Spalanie węgla*, Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej, nr 1667, Gliwice, 1992.
- [154] Myrphy J.J., Shaddix C.R., Combustion kinetics of coal chars on oxygen-enriched Environments. *Combustion and Flame*, 2006, 144(4): 710–729.
- [155] Mokrosz W. Migracja związków chloru z biomasy w procesie spalania oraz ich wpływu na procesy korozyjne i eksploatacyjne kotłów. W: *Nowoczesne kotłownie, inwestycje, bezpieczeństwo*, Zawiercie, 23-25 marca 2011, 1–22.
- [156] Szymanowicz R., Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych w procesie spalania mieszanego paliwa wtórnego zawierającego biomasę, *Energetyka*, 2011, 5: 298–305.
- [157] Hejft R., Peletowanie i brykietowanie w urządzeniach o niewielkiej wydajności. *Czysta Energia*, 2008, 6: 43-44.

## SUMMARY

---

Presented doctoral dissertation, entitled „*Research on the combustion process and co-combustion of biomass fuels and alternative fuels in a fluidized bed in different process conditions*”, has an experimental character.

The thesis that biomass fuels and RDF can be a relevant complement to fuels used in fluidized bed boilers, and the type of biomass fuels and composition of RDF are crucial in the selection of operating parameters of a fluidized bed boiler, i.e., temperature, inert material stream, and oxidizing atmosphere, was presented in the paper. In addition, proper preparation of alternative fuels at the production stage may improve their combustion/co-combustion process and increase the use of agro-biomass fuels.

Experimental research was preceded by a literature review and analysis. The literature review began with a discussion of global energy trends. The following subsections present the properties of biomass and alternative fuels, focusing on their various physicochemical properties. Then, the technical, environmental and economic aspects of combustion and co-combustion of biomass and alternative fuels were discussed. Fluidized bed combustion technology was also indicated as the leading technology that allows the use of various fuels. In addition, it enables the implementation of the oxy-combustion technology. Based on the analysis of the literature, it was found that the issues related to the thermal conversion of biomass fuels, fuels from waste, as well as modified alternative fuels was studied by a great group of researchers for a long time. The literature lacked detailed information on the analysis of the combustion of commercially available alternative fuels, such as pellets, produced from biomass and waste (RDF) in a fluidized bed. Of particular importance was the determination of the combustion kinetics of these fuels for different temperatures and different O<sub>2</sub> concentrations.

To confirm the papers' theses, selected alternative fuels detailed analysis of the combustion process of fluidized bed conditions was undertaken. The research material consisted of commercial pellet fuels, produced from forest and agro biomass and waste (RDF - Refuse Derived Fuel). Before conducting experimental studies of fuel combustion under various conditions in the fluidized bed, preliminary tests were carried out to determine the physicochemical properties of the fuels selected for analysis. Initial tests of fuels included technical analysis, i.e., determination of the content of volatiles,

moisture, ash, calorific value, and elemental analysis in the scope of the content of elements N, C, H, S determination.

In the first stage of experimental research, the chamber temperature and inert material influence on the combustion rate of the tested biomass fuels was analyzed. Initially, particles of selected fuels were combusted in an air atmosphere without inert material ( $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s) at three different temperatures of the combustion chamber: 850°C, 750°C, and 650°C. Then, the particles mass loss of all fuels was measured during combustion in a two-phase flow with the inert material at  $G_s=2.5$  and 5 kg/m<sup>2</sup>s.

In the second stage of experimental research, the effect of the share of oxygen in the mixture with carbon dioxide during the combustion process was analyzed. As in the first stage, the initial tests were carried out at  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s, and then in a stream of inert material modeling the conditions of the fluidized bed at  $G_s=2.5$  and 5 kg/m<sup>2</sup>s. The tests were carried out at 850°C in the following concentrations of the oxygen/carbon dioxide gas mixture: 21%/79%, 25%/75%, 30%/70%. The same set of experimental tests was also applied to experimental tests on the combustion of selected RDF pellets.

The carried out and described tests of biomass fuels and RDF fuels made it possible to compile and compare their results. During the combustion of fuels in the fluidized bed, differences in the combustion process were observed, visible at the temperature of 850°C. The presence of the fluidized bed accelerated the combustion process of fuels from forest biomass and RDF due to the removal of ash formed on the particle surface, improvement of the diffusion process within the burned particle, and the process of mechanical particle destruction. On the other hand, the combustion of agro biomass fuels in a fluidized bed at 850°C led to the formation of sinters threatening the hydrodynamics of the fluidized bed.

To explain the reasons for the ash softening and the formation of sinters, the ash of the tested fuels analysis was performed. A high content of alkali metal oxides in both cases of agro biomass fuels, a high content of potassium oxide in the sunflower husk pellet, and sodium oxide in the straw pellet was shown. During the combustion of biomass and RDF fuels in oxidizing atmospheres, the acceleration the fuel combustion process with the increase in the amount of oxidant was notice. The change in the oxidant concentration caused a very similar increase in the mass loss rate of the tested fuel types. It was found that the tested fuels can be used in the oxy-combustion technology. An

increase in the oxidant in the range of 21-30% is only dangerous in the case of agro biomass fuels due to the increase in temperature on the surface of the burned particle.

In the next part of the research, it was decided to prepare a mixed secondary fuel from sunflower husk pellet and RDF pellet. These studies were aimed at analyzing the combustion process of fuel with a modified composition in the conditions of a fluidized bed. During the research, the influence of the inert material on the process of mixed secondary fuel combustion in fluidized bed at a constant temperature of 850°C was analyzed. The tests were carried out at  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s, and then in a stream of inert material at  $G_s=2.5$  and 5 kg/m<sup>2</sup>s.

In the last part of the doctoral thesis, it was decided to compare the results obtained during experimental research with the literature data for solid fuels. For the comparison, the testing results of hard coal from the Sobieski mine and brown coal from the Bełchatów mine were selected.

The research and analyses carried out in the work allowed us to prove the theses set out in the work. All biomass and RDF fuels selected for analysis can be combusted or co-combusted with coal fuels in fluidized bed boilers. Based on the carried out analyses, it was found that despite the fundamental differences related to the origin, chemical composition, and the method of preparation of biomass and alternative fuels, the combustion process can be fully controlled and highly effective. The necessary condition is the optimization of the combustion process consisting of the selection of process parameters, i.e., temperature, the concentration of the oxidant, and the intensity of the stream of inert material. The process of sinter formation can be eliminated at the stage of fuel preparation by lowering the concentration of alkaline elements in the mineral substance by mixing agrofuel with RDF fuels.

## STRESZCZENIE

---

Niniejsza rozprawa doktorska pt. „Badania procesu spalania i współspalania paliw biomasowych oraz paliw alternatywnych w warstwie fluidalnej w różnych warunkach procesowych” ma charakter eksperymentalny.

W pracy przedstawiono tezy, iż paliwa biomasowe oraz RDF mogą być dobrym uzupełnieniem paliw stosowanych w kotłach fluidalnych, a typ paliw biomasowych oraz skład RDF ma istotne znaczenie przy wyborze parametrów pracy kotła fluidalnego tj. temperatury, strumienia materiału inertnego oraz atmosfery utleniającej. Ponadto właściwe przygotowanie paliw alternatywnych na etapie produkcji może poprawić proces ich spalania/współspalania oraz zwiększyć wykorzystanie paliw biomasowych typu agro.

Badania eksperymentalne poprzedzone zostały przeglądem i analizą literatury. Przegląd literatury rozpoczął od omówienia globalnych trendów energetycznych. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono charakterystykę paliw biomasowych oraz alternatywnych ze szczególnym uwzględnieniem ich zmiennych właściwości fizykochemicznych. Następnie omówiono aspekty techniczne, środowiskowe i gospodarcze spalania oraz współspalania biomasy i paliw alternatywnych. Wskazano również technologię spalania w złożu fluidalnym jako wiodącą technologię pozwalającą na wykorzystanie różnorodnych paliw. Ponadto umożliwia ona realizację technologii oxy-combustion. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono, iż zagadnienia związane z termiczną konwersją paliw biomasowych, paliw z odpadów, a także modyfikowanych paliw alternatywnych są podejmowane od dawna przez szerokie grono badaczy. W literaturze brakowało szczegółowych informacji dotyczących analizy spalania dostępnych na rynku paliw alternatywnych typu pelet, wytwarzanych z biomasy i odpadów (RDF) w warstwie fluidalnej. Szczególnie istotne było określenie kinetyki spalania tych paliw dla różnych temperatur i różnej koncentracji  $O_2$ .

W celu potwierdzenia postawionych w pracy tez podjęto się szczegółowej analizy procesu spalania wybranych paliw alternatywnych w warunkach warstwy fluidalnej. Materiał badawczy stanowiły dostępne na rynku paliwa typu pelet, wytwarzane z biomasy leśnej i agro oraz odpadów (RDF - Refuse Derived Fuel). Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych spalania paliw w różnych warunkach warstwy fluidalnej przeprowadzono badania wstępne, które miały na celu określenie własności fizykochemicznych paliw wybranych do analizy. Badania wstępne paliw obejmowały

analizę techniczną tj. oznaczenie zawartości części lotnych, wilgoci, popiołu, wartości opałowej i analizę elementarną w zakresie oznaczenia zawartości pierwiastków N, C, H, S.

W pierwszym etapie badań eksperymentalnych dokonano analizy wpływu temperatury paleniska oraz materiału inertnego na szybkość spalania badanych paliw biomasowych. Początkowo ziarna wybranych paliw spalano w atmosferze powietrza bez przepływu materiału inertnego ( $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) w trzech ustalonych w komorze paleniskowej temperaturach tj. 650, 750 oraz 850°C. Następnie dokonano pomiaru ubytku masy ziaren wszystkich paliw podczas spalania w dwufazowym przepływie z udziałem materiału inertnego przy  $G_s=2,5$  i  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . W drugim etapie badań eksperymentalnych analizowano wpływ udziału tlenu w mieszaninie z dwutlenkiem węgla podczas procesu spalania. Podobnie jak w etapie pierwszym początkowe badania prowadzono przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , a następnie w strudze materiału inertnego modelującej warunki warstwy fluidalnej, przy  $G_s=2,5$  oraz  $5 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Badania procesu spalania prowadzono w jednej temperaturze wynoszącej 850°C i zmiennej koncentracji utleniacza  $O_2/CO_2$ : 21%/79%, 25%/75%, 30%/70%. Ten sam zakres badań eksperymentalnych został również przyjęty podczas badań eksperymentalnych spalania wybranych peletów RDF.

Przeprowadzone i opisane badania paliw biomasowych oraz paliw RDF umożliwiły następnie zestawienie i porównanie ich wyników. Paliwa te mimo zupełnie innego pochodzenia posiadały wiele wspólnych cech. Jedną z nich był bardzo duży udział części lotnych >70%. Proces spalania paliw biomasowych oraz RDF bez materiału inertnego (przy  $G_s=0 \text{ kg/m}^2$ ) przebiegał podobnie we wszystkich temperaturach. Obniżenie temperatury spalania powodowało wydłużenie czasu spalania wszystkich paliw. Analiza procesu kinetyki spalania w różnych temperaturach w zakresie 650-850°C, udowodniła, iż paliwa te mogą być wykorzystywane zarówno do procesu spalania jak i zgazowania oraz pirolizy.

Podczas spalania paliw w warstwie fluidalnej zauważono różnice w procesie ich spalania, widoczne w temperaturze 850°C. Obecność warstwy fluidalnej przyspieszała proces spalania paliw z biomasy leśnej oraz RDF ze względu na usuwanie powstającego na powierzchni ziarna popiołu, poprawę procesu dyfuzji w obrębie spalanego ziarna oraz z uwagi na proces mechanicznej destrukcji ziarna. Natomiast spalanie paliw biomasowych typu agro w warstwie fluidalnej w temperaturze 850°C prowadziło do powstawania spieków zagrażających hydrodynamicznie warstwie fluidalnej.

W celu wyjaśnienia powodów mięknięcia popiołu i tworzenia spieków wykonano analizę popiołu badanych paliw. Wykazała ona wysoką zawartość tlenków metali

alkalicznych w obu przypadkach paliw z biomasy agro, wysoką zawartość tlenu potasu w przypadku peletu z łuski słonecznika oraz tlenu sodu w przypadku peletu ze słomy.

Podczas spalania paliw biomasowych i RDF w atmosferach utleniających zauważono, iż w miarę zwiększania ilości utleniacza proces spalania paliw ulegał przyśpieszeniu. Zmiana koncentracji utleniacza spowodowała bardzo podobny wzrost prędkości ubytku masy badanych typów paliw. Stwierdzono, iż badane paliwa mogą być stosowane w technologii oxy-combustion. Wzrost utleniacza w zakresie 21-30% jest jedynie niebezpieczny w przypadku paliw biomasowych typu agro ze względu na wzrost temperatury na powierzchni spalanego ziarna.

W kolejnej części badawczej pracy zdecydowano się na przygotowanie mieszanego paliwa wtórnego z peletu z łuski słonecznika oraz peletu RDF. Badania te miały na celu analizę procesu spalania paliwa o zmodyfikowanym składzie w warunkach warstwy fluidalnej. Podczas badań analizowano wpływ oddziaływania materiału inertnego na proces spalania mieszanego paliwa wtórnego w stałej temperaturze wynoszącej 850°C. Badania prowadzono przy  $G_s=0$  kg/m<sup>2</sup>s, a następnie w strudze materiału inertnego, przy  $G_s=2,5$  oraz 5 kg/m<sup>2</sup>s.

W ostatniej części rozprawy zdecydowano się na porównanie uzyskanych podczas badań eksperymentalnych wyników z wynikami przedstawionymi w literaturze dla paliw stałych. Do porównania wybrano wyniki dotyczące badania węgla kamiennego z kopalni Sobieski oraz węgla brunatnego z kopalni Bełchatów.

Przeprowadzone w pracy badania i analizy pozwoliły na udowodnienie postawionych w pracy tez. Wszystkie wybrane do analizy paliwa biomasowe oraz RDF mogą być spalane bądź współspalane z paliwami węglowymi w kotłach fluidalnych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż mimo zasadniczych różnic związanych z pochodzeniem, składem chemicznym oraz sposobem przygotowania paliw biomasowych i alternatywnych proces ich spalania może być w pełni kontrolowany i wysoce efektywny. Warunkiem koniecznym jest optymalizacja procesu spalania polegająca na doborze parametrów procesu tj. temperatury, koncentracji utleniacza oraz natężenia strumienia materiału inertnego. Proces powstawania spieków może zostać wyeliminowany na etapie przygotowania paliwa poprzez obniżenie stężenia zawartości pierwiastków alkalicznych w substancji mineralnej poprzez zmieszanie paliwa typu agro z paliwami typu RDF.