

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią  
Polskiej Akademii Nauk

# ENERGETYCZNE WYKORZYSTANIE BIOMASY

Tomasz MIROWSKI  
Eugeniusz MOKRZYCKI  
Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK

Wydawnictwo IGSMiE PAN  
KRAKÓW 2018



Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią  
Polskiej Akademii Nauk

# ENERGETYCZNE WYKORZYSTANIE BIOMASY

Tomasz MIROWSKI  
Eugeniusz MOKRZYCKI  
Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK



Wydawnictwo IGSMiE PAN  
Kraków 2018

RECENZENCI

dr hab. inż. Mariusz Filipowicz

dr hab. inż. Tadeusz Olkusi

AFILIACJE AUTORÓW:

Tomasz Mirowski, IGSMiE PAN

Eugeniusz Mokrzycki, IGSMiE PAN

Alicja Uliasz-Bocheńczyk, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,

Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

*Monografia ta została opracowana w ramach realizacji prac statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz badań statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej nr 11.11.100.482.*

ADRES REDAKCJI

ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków

tel. (12) 632-33-00

Redaktor Wydawnictwa: Emilia Rydzewska

Redaktor techniczny: Beata Stankiewicz, Barbara Sudoł

Projekt okładki: Tomasz Mirowski

© Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN – Wydawnictwo

© Copyright by Tomasz Mirowski, Eugeniusz Mokrzycki, Alicja Uliasz-Bocheńczyk

Kraków 2018

Printed in Poland

ISBN 978-83-62922-94-9 (wersja papierowa)

ISBN 978-83-953167-8-4 (wersja elektroniczna)



Ten utwór jest dostępny na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0 Polska.

IGSMiE PAN – Wydawnictwo, Kraków 2018

Nakład 100 egz. Objętość: ark. wyd. 14,98; ark. druk. 21,0 (×8)

Druk i oprawa: Drunkarnia „PATRIA” Beata Szul, Kraków, ul. Borsucza 30

## SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE .....	5
2. REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE OZE .....	7
3. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE ZWIĄZANE Z BIOMASĄ .....	19
3.1. Tworzenie biomasy – proces fotosyntezy .....	19
3.2. Definicja biomasy .....	21
3.3. Klasyfikacja biomasy .....	22
4. RODZAJE BIOMASY NA CELE ENERGETYCZNE .....	25
4.1. Drewno .....	25
4.2. Odpady rolnicze – słoma .....	30
4.3. Uprawy energetyczne .....	34
4.3.1. Słonecznik bulwiasty topinambur .....	35
4.3.2. Róża wielokwiatowa .....	37
4.3.3. Trawy wieloletnie .....	39
4.3.4. Wieloletnie rośliny energetyczne do pozyskania drewna .....	45
5. WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE WYBRANYCH SUROWCÓW BIOMASOWYCH ORAZ PRZETWA- RZANIE BIOMASY ROSLINNEJ NA BRYKIETY I PELETY .....	49
5.1. Właściwości fizykochemiczne wybranych surowców biomasowych .....	49
5.1.1. Skład chemiczny .....	49
5.1.2. Wartość opałowa .....	58
5.1.3. Zawartość wilgoci .....	60
5.1.4. Zawartość części lotnych .....	61
5.1.5. Zawartość popiołu .....	61
5.1.6. Gęstość biomasy .....	62
5.2. Przetwarzanie biomasy pochodzenia roślinnego na brykiety i pelety .....	64
5.3. Zapewnienie jakości paliwa z biomasy .....	68
6. POPIOŁY ZE SPALANIA BIOMASY .....	75
6.1. Skład chemiczny .....	76
6.2. Skład fazowy .....	84
6.3. Wymywalność zanieczyszczeń .....	107
6.4. Właściwości fizyczne .....	112
6.4.1. Uziarnienie .....	112
6.4.2. Gęstość .....	113

---

6.5. Gospodarcze wykorzystanie popiołów .....	115
6.5.1. Produkcja materiałów budowlanych .....	117
6.5.2. Zastosowanie popiołów ze spalania w rolnictwie .....	118
7. PRZEGLĄD TECHNOLOGII ENERGETYCZNEGO WYKORZYSTANIA BIOMASY .....	121
7.1. Spalanie biopaliw stałych w kotłach .....	122
7.1.1. Kotły na paliwa stałe małej mocy .....	123
7.1.2. Kotły przemysłowe .....	131
7.2. Zgazowanie i piroliza biomasy .....	138
7.2.1. Proste układy zgazowujące.....	138
7.2.2. Zaawansowane układy zgazowania i pirolizy .....	139
7.2.3. Zgazowarki .....	139
7.3. Skojarzone układy hybrydowe .....	141
7.4. Instalacje do produkcji paliw ciekłych .....	142
7.5. Instalacje do produkcji karbonizatu z biomasy .....	144
7.6. Spalanie biomasy a niska emisja .....	145
PODSUMOWANIE .....	151
LITERATURA .....	155
SPIS TABEL .....	165
SPIS RYSUNKÓW .....	167

## 1. WPROWADZENIE

Światowe zapotrzebowanie na energię stale wzrasta. Z uwagi na to, że zasoby paliw kopalnych kurczą się, a ich cena rośnie, poszukuje się innych źródeł, które będą w stanie sprostać przyszłemu zapotrzebowaniu na energię. Do takich źródeł zalicza się m.in.: energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię geotermalną, energię pływów morskich, energię spadku wód, jak również energię zawartą w biomasie. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii przynosi wiele korzyści, pozwala zmniejszyć emisję szkodliwych substancji (pyłów, gazów, odpadów) do atmosfery, związanych ze stosowaniem paliw kopalnych, i umożliwia stworzenie nowych miejsc pracy. Ponadto wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym kraju, wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego, zmniejszenie stopnia uzależnienia od importu nośników energii i pozwala na zaoszczędzenie zasobów surowców kopalnych.

Obecnie podstawowym źródłem energii odnawialnej w naszym kraju, obok energetyki wiatrowej, jest biomasa. Polska posiada duże zasoby tego surowca, technicznie możliwe do energetycznego zastosowania i zasoby te są dużo wyższe od pozostałych zasobów energii odnawialnej, z wyjątkiem energii promieniowania słonecznego. Zmiany na rynku biomasy od 2015 roku, zapoczątkowane gwałtownym spadkiem cen zielonych certyfikatów oraz rozporządzeniem zmieniającym zasady przyznawania świadectw pochodzenia z procesu współspalania biomasy z węglem, spowodowały rezygnację wielu elektrowni z tego surowca.

Z uwagi na to, że wykorzystanie biomasy i innych odnawialnych źródeł energii jest ważnym składnikiem zrównoważonego rozwoju kraju i realizacji jego polityki energetycznej, wprowadzono szereg dyrektyw, ustaw i programów wspierających rozwój przedsięwzięć w tym zakresie. Najważniejsze dokumenty, dotyczące wykorzystania biomasy w energetyce, zostały przedstawione w rozdziale drugim niniejszej monografii.

Rozdział trzeci zawiera podstawowe pojęcia i definicje związane z biomasą stosowaną do celów energetycznych. Podana została także klasyfikacja biomasy dla celów energetycznych.

W rozdziale czwartym scharakteryzowano rodzaje biomasy na cele energetyczne: drewno, słomę, uprawy energetyczne (topinambur, róża wielokwiatowa), trawy wielo-

letnie (miskant olbrzymi, miskant cukrowy, spartina preriowa, rdest sachaliński, ślazo-wiec pensylwański), wieloletnie rośliny energetyczne do pozyskania drewna (wierzba, topola, robinia).

Rozdział piąty dotyczy właściwości fizykochemicznych wybranych surowców bio-masowych. Omówiono w nim: skład chemiczny, podstawowe parametry charakteryzu-jące ich przydatność do celów energetycznych oraz właściwości wybranych rodzajów biomasy (wartość opałowa, zawartość wilgoci, zawartość części lotnych, zawartość po-piołu, gęstość).

Rozdział szósty dotyczy wytwarzania i przetwarzania biomasy pochodzenia roślin-nego na brykiety i pelety.

Rozdział siódmy poświęcony jest popiołom ze spalania biomasy. W tabelach przed-stawiono skład chemiczny popiołów ze spalania różnych rodzajów biomasy według różnych autorów, podano przykłady składów pierwiastkowych popiołów oraz skład fazowy. Zwrócono uwagę na wymywalność zanieczyszczeń z tych popiołów, jak rów-nież na ich gospodarcze wykorzystanie do produkcji materiałów budowlanych i w rol-nictwie.

W rozdziale ósmym dokonano przeglądu technologii energetycznego wykorzystania biomasy w procesach spalania w kotłach małej mocy oraz w kotłach przemysłowych. Omówiono zgazowanie i pirolizę biomasy, skojarzone układy hybrydowe, instalacje do produkcji paliw ciekłych i karbonizatu. Zwrócono uwagę na problem niskiej emisji przy spalaniu biomasy.

Rozdział dziewiąty stanowi podsumowanie monografii.

*Autorzy wyrażają nadzieję, że książka będzie przydatnym źródłem informacji dla wszystkich, którzy odkrywają wielką szansę rozwoju energetycznego wykorzystania bio-masy. Szczególne podziękowania składamy recenzentom tej pracy: dr hab. inż. Mariu-szowi Filipowiczowi, prof. nadzw. z Wydziału Energetyki i Paliw AGH oraz dr hab. inż. Tadeuszowi Olkuskemu z Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.*

## 2. REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE BIOMASY

Wykorzystanie biomasy, jak również innych odnawialnych źródeł energii jest bardzo ważnym elementem zrównoważonego rozwoju kraju. Wykorzystanie to uzależnione będzie od obowiązujących dokumentów strategicznych Unii Europejskiej i krajowych (Dyrektywy UE, Polityka Energetyczna Polski, Ustawa o OZE), jak również regulacji prawnych w zakresie energetyki, ochrony środowiska, planowania i infrastruktury, podatków.

W Europie i na świecie wprowadzono szereg dyrektyw, rezolucji, krajowych ustaw i programów mających na celu wspieranie rozwoju OZE i zwiększenie udziału energii wyprodukowanej z tych źródeł w całkowitym bilansie produkcji energii. Działania te mają przyczynić się również do poprawy stanu środowiska, wskutek redukcji emisji szkodliwych gazów do atmosfery oraz poprawić efektywność energetyczną u odbiorcy końcowego (Ney 2004).

Poniżej scharakteryzowano najważniejsze dokumenty dotyczące wspierania biomasy według ich ukazywania się.

### **Biała Księga UE – Energia dla przyszłości – odnawialne źródła energii**

Ten strategiczny dokument Unii Europejskiej (White Paper... 1997) traktuje o wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii ze względu na ich zalety ekologiczne. Określał on długookresową politykę Unii Europejskiej, w którym założono między innymi zwiększenie udziału energii wyprodukowanej z OZE z 6% w 1998 roku, do 12% w 2010 roku.

Wskazano również na znaczącą rolę biomasy w realizacji tego celu. Założono znaczny wzrost jej udziału zarówno w produkcji paliw płynnych, jak również energii elektrycznej i ciepła. Zwrócono także uwagę na konieczność promowania i wspierania przedsięwzięć z zakresu OZE oraz określenia przez kraje członkowskie odpowiednich ulg podatkowych dla tego typu działań.

Biała Księga wytycza kierunki zużycia biomasy; są to:

- współspalanie bądź spalanie,
- budowa nowych ciepłowni oraz systemów chłodzenia,



- rozwój technologii IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) w systemach 25–50 MW,
- wytwarzanie energii z odpadów miejskich za pomocą obróbki termicznej.

#### **Biała Księga – Transport europejski do roku 2010: czas na decyzje**

Dokument ten wskazuje na alternatywne źródła zasilania pojazdów w celu ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> (White Paper... 2001). Dla krótkiego i średniego okresu za najbardziej obiecujące uznane zostały biopaliwa, w średnim – gaz ziemny, a w długim okresie – wodór. W celu promocji biopaliw Unia Europejska wydała dyrektywę o obowiązkowym stosowaniu biopaliw w zużyciu energii oraz rozporządzenie zmniejszające podatek na paliwa.

#### **Zielona Księga – ku europejskiej strategii bezpieczeństwa energetycznego**

W dokumencie tym zwrócono uwagę na problem uzależnienia Europy od importu nośników energii (Green Paper... 2000). Światowe zapotrzebowanie na energię ciągle rośnie, a duże rezerwy surowców energetycznych znajdują się jedynie w kilku krajach. W Unii Europejskiej około połowa zużywanego gazu pochodzi z importu, a głównymi dostawcami są Rosja, Norwegia i Algieria. Ceny ropy i gazu stale rosną i prawdopodobnie będą się utrzymywać na stałym poziomie. Jeśli nie nastąpią poważne zmiany, za 20–30 lat wskaźnik importu surowców energetycznych może ulec zmianie z obecnych 50 do 70%. W Zielonej Księdze zwrócono uwagę na fakt, że potencjał odnawialnych źródeł energii jest duży, natomiast są one wykorzystywane w niewielkim stopniu. Sporządzono ogólny zarys długookresowej strategii energetycznej, w której promuje się między innymi rozwój czystych technologii wykorzystujących OZE i prowadzenie takiej polityki energetycznej, która pozwoli zmniejszyć wskaźnik uzależnienia od importu surowców energetycznych.

#### **Dyrektywa 2001/77/WE w sprawie wspierania produkcji energii elektrycznej wytworzonej z odnawialnych źródeł na wewnętrznym rynku energii**

Według tej dyrektywy (Dyrektywa... 2001), wspieranie odnawialnych źródeł energii elektrycznej uznawane jest za działanie priorytetowe. Wzrost udziału energii wytwarzanej z OZE ma bowiem korzystny wpływ na ochronę środowiska, przyczynia się do trwałego rozwoju kraju, zwiększenia spójności społecznej i ekonomicznej, zabezpieczenia dostaw surowców energetycznych i szybszego wywiązania się ze zobowiązań, wynikających z Protokołu z Kioto. Dyrektywa nakłada na państwa członkowskie cele ilościowe, dotyczące uzyskania określonego udziału zużycia zielonej energii w całkowitym zużyciu energii elektrycznej brutto. Celem tego dokumentu jest promowanie

rozwoju energii elektrycznej pochodzącej z OZE, z tego powodu zwraca on uwagę na liczne systemy wsparcia (zielone certyfikaty, pomoc inwestycyjna, zwolnienia i zwroty podatkowe, systemy wsparcia cen bezpośrednich), szanse lokalnego i regionalnego rozwoju, aspekt spójności społecznej czy też możliwości stworzenia nowych miejsc pracy. Dyrektywa ta została uchylona przez Dyrektywę 2009/28/WE (Dyrektywa... 2009).

### **Protokół z Kioto**

Protokół został przyjęty 11 grudnia 1997 roku, a wszedł w życie 16 lutego 2005 roku. Został ratyfikowany przez 141 państw wytwarzających łącznie 61% światowej emisji gazów cieplarnianych. Protokół zakładał w latach 2008–2012 ograniczenie emisji gazów cieplarnianych przez kraje uprzemysłowione (KIOTO... 2002). Dla poszczególnych krajów został przyjęty różny poziom obciążeń, jedne kraje zobowiązane były do redukcji emisji, inne do stabilizacji emisji. Limit redukcji dla Unii Europejskiej wyniósł 8%, dla poziomu z 1990 roku. Redukcja emisji przez Polskę miała wynosić 6% w stosunku do 1988 roku, gdyż jest to rok względnie normalnego funkcjonowania gospodarki, w którym emisje gazów cieplarnianych były najwyższe w dekadzie.

### **Dyrektywa 2003/30/WE o promowaniu użycia biopaliw lub innych paliw odnawialnych w transporcie**

Dyrektywa ta (Dyrektywa... 2003) zakładała wzrost zużycia w transporcie biopaliw lub innych nośników odnawialnych. Sektor transportowy ciągle się rozwija, zużywając coraz większe ilości paliw węglowodorowych. Dyrektywa zwraca uwagę, iż różnorodność surowców do produkcji biopaliw jest duża, a zwiększając udział biopaliw na rynku, możemy przyczynić się nie tylko do szybszego wywiązania się ze zobowiązań dotyczących zmian klimatu, ale również do zmniejszenia uzależnienia od importu paliw płynnych.

Biopaliwa mogą być udostępnione jako: czyste biopaliwa, bądź biopaliwa o wysokim stężeniu pochodnych olejów mineralnych, jak również biopaliwa w mieszance pochodnych olejów mineralnych, a także płyny pochodne do biopaliw (ETBE – *Eter-Tert-Butyl-Ether*).

### **Energy Roadmap 2050**

Ogromny wpływ na sektor energetyczny wywiera polityka klimatyczna. W UE instaluje się moce wytwórcze wykorzystujące odnawialne źródła energii, natomiast z paliw pierwotnych rację bytu ma tylko gaz ziemny. Energia wytwarzana z tych źródeł jest droższa niż z węgla czy energetyki jądrowej, dlatego też przenosi się to na ceny energii płacone przez odbiorców końcowych. Stąd kraje członkowskie UE zaczęły tworzyć róż-

ne systemy wsparcia dla odnawialnych źródeł energii i skojarzonych z wytwarzaniem ciepła.

Długoterminowe cele UE do 2050 roku w zakresie polityki niskowęglowej zakładają redukcję emisji gazów cieplarnianych w granicach 80–95% (Communication... 2011).

### **Plan działania w zakresie energii do roku 2050**

Dokument ten (Plan... 2011) uwzględnia następujące scenariusze rozwoju energetyki:

- odniesienia,
- aktualne inicjatywy strategiczne,
- wysoką efektywność energetyczną,
- zróżnicowane technologie dostaw,
- duży udział odnawialnych źródeł energii,
- opóźnione wprowadzenie technologii CCS,
- niski udział energii jądrowej.

We wszystkich scenariuszach udział energii odnawialnej jest znaczący, dochodząc w 2050 roku co najmniej do poziomu 55% końcowego zużycia energii brutto. Wyzwaniem dla Europy jest umożliwienie uczestnikom rynku utrzymania kosztów energii odnawialnej na niskim poziomie poprzez: usprawnione badania naukowe, uprzemysłowienie łańcucha dostaw, bardziej skuteczną politykę oraz udoskonalone systemy wsparcia.

Należy jednak mieć na uwadze:

- zmienna charakterystyka OZE oznacza konieczność zmian polityki odzwierciedlającej ich dalszy rozwój,
- wiele technologii OZE wymaga dalszego dopracowania w celu obniżenia kosztów,
- konieczne są inwestycje w nowe technologie pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych (wykorzystanie energii oceanów i słońca do produkcji energii elektrycznej oraz II i III generacji biopaliw),
- konieczność usprawnienia obecnych technologii,
- dalszy rozwój technologii magazynowania, które mają kluczowe znaczenie dla rozwoju technologii OZE.

Biopaliwa będą najprawdopodobniej podstawowym wariantem dla transportu lotniczego, długodystansowego transportu drogowego i kolei (gdy elektryfikacja jest wykluczona). Ogrzewanie i chłodzenie z wykorzystaniem OZE ma kluczowe znaczenie dla dekarbonizacji.

Polska była jedynym krajem, który nie zgodził się na przyjęcie konkluzji.

### **Pakiet Zimowy Czysta energia dla wszystkich Europejczyków**

Pakiet Zimowy Czysta energia dla wszystkich Europejczyków został opublikowany przez Unię Europejską 30 listopada 2016 roku (Komisja... 2016).

Pakiet ten jest wypełnieniem wytycznych politycznych wyznaczonych w Pakiecie 2030 z dnia 20 października 2014 roku (Konkluzje... 2014) oraz Strategii Unii Europejskiej z dnia 20 marca 2015 r. (Komunikat... 2015).

Pakiet 2030 zakłada trzy główne cele ramowe polityki klimatyczno-energetycznej:

- ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do 2030 roku o co najmniej 40% w odniesieniu do 1990 roku; dotyczy to odpowiednio sektorów objętych unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji (ETS – *Emissions Trading System*) i nieobjętych tym systemem: 43 i 30% w odniesieniu do 2005 roku (cel wiążący);
- osiągnięcia co najmniej 27% energii odnawialnej w zużyciu energii finalnej w 2030 r. (cel wiążący);
- osiągnięcie co najmniej 27% poprawy efektywności energetycznej w 2030 roku w stosunku do *business as usual* (cel indykatorywny).

Strategia Unii Energetycznej obejmuje pięć priorytetów (Morawiecka 2017):

- bezpieczeństwo energetyczne, solidarność i zaufanie;
- wewnętrzny rynek energii;
- efektywność energetyczną;
- dekarbonizację;
- badania naukowe, innowacje i konkurencyjność.

Pakiet Zimowy obejmuje osiem głównych propozycji, ujętych w trzy grupy (Morawiecka 2017):

1. Rynek energii elektrycznej i odbiorcy:

- projekt zmiany rozporządzenia w sprawie wewnętrznego rynku energii elektrycznej (Projekt... 2016);
- projekt zmiany dyrektywy w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej (Projekt Dyrektywy... 2016);
- projekt zmiany rozporządzenia ustanawiającego Agencję Unii Europejskiej ds. Współpracy Organów Regulacji Energetyki (ACER – *Agency for the Cooperation of Energy Regulation*) (Projekt zmiany... 2016a);
- projekt rozporządzenia w sprawie gotowości na wypadek zagrożeń w sektorze energii elektrycznej i uchylającego dyrektywę 2005/89/WE (Projekt rozporządzenia... 2016a).

2. Transformacja w kierunku gospodarki niskoemisyjnej:

- projekt zmiany dyrektywy w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, tzw. Dyrektywa Red II (Projekt zmiany... 2016b);
- projekt zmiany dyrektywy o efektywności energetycznej (Projekt rewizji... 2016a);
- projekt zmiany dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej budynków (Projekt rewizji... 2016b).

3. System zarządzania Unią Energetyczną:

- projekt rozporządzenia w sprawie zarządzania Unią Energetyczną, tzw. *Governance* (Projekt rozporządzenia... 2016b).

**Rezolucja sejmku Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 8 lipca 1999 roku, w sprawie wzrostu wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych**

W dokumencie tym zawarto zapisy dotyczące wspierania biomasy (Rezolucja... 1999). Biorąc pod uwagę korzyści wynikające z użytkowania odnawialnych źródeł energii, Sejm RP zobowiązał się do uzyskania odpowiedniego poziomu zielonej energii w bilansie energetycznym kraju, stworzenia warunków umożliwiających podmiotom inwestowanie w tego rodzaju przedsięwzięcia, jak również zaprojektowania do końca 1999 roku strategii rozwoju OZE zarówno w długim, jak i krótkim okresie. Wyrażono także wolę zintegrowania strategii OZE z polityką energetyczną i ekologiczną państwa (Rezolucja... 1999).

**Strategia rozwoju energetyki odnawialnej**

Strategia ta (Strategia... 2000) została przyjęta przez Radę Ministrów 5 września 2000 roku, a przez Sejm 23 sierpnia 2001 roku. Dokument zawiera ocenę krajowej energetyki odnawialnej, jej stan obecny i działania na przyszłość, perspektywy rozwoju, możliwości wdrażania czystych technologii i ich kosztów, bariery blokujące rozwój tego sektora energii, jak również źródła finansowania inwestycji w zakresie OZE. Strategia rozwoju energetyki odnawialnej zakłada zwiększenie udziału energii pochodzącej z OZE w krajowym bilansie paliwowo-energetycznym do 7,5% w 2010 roku i 14% w 2020 roku.

**Polska 2025 – długookresowa strategia trwałego i zrównoważonego rozwoju**

Dokument ten został przyjęty przez Radę Ministrów 26 lipca 2000 roku (Polska 2025... 2000) i oparty jest na koncepcji trwałego i zrównoważonego rozwoju, który zakłada integrację i spójność aspektów społecznych, ekonomicznych i ekologicznych. Przedstawiono również kierunki działań, które mają doprowadzić do osiągnięcia wyznaczonych celów i realizacji zamierzonych planów.

**Polityka klimatyczna Polski**

Dokument ten (Polityka... 2003) został przyjęty przez Radę Ministrów dnia 4 listopada 2003 roku i jest rezultatem zobowiązania wynikłego z powołanej do życia w 1992 r. na

szczyście Ziemi w Rio de Janeiro Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, podpisaną wówczas przez ponad 150 krajów, w tym Polskę. Konwencja weszła w życie w 1994 r. Polska jest stroną dokumentu od 1994 r., oznacza to obowiązek podjęcia działań na rzecz stabilizacji zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze na poziomie zabezpieczającym przed trwałymi zmianami klimatu globalnego.

### **Rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii**

Rozporządzenie to (Rozporządzenie... 2003) zostało wydane przez Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej 30 maja 2003 roku. Nakłada ono, na przedsiębiorstwa zajmujące się obrotem energią cieplną i elektryczną, obowiązek zakupu energii elektrycznej i ciepła pochodzących ze źródeł odnawialnych. Przedsiębiorstwa te muszą wykazywać się określonym udziałem zielonej energii w całkowitej rocznej sprzedaży energii elektrycznej. Ponadto Rozporządzenie uznaje za energię odnawialną energię wytworzoną w procesie współspalania biomasy lub biogazu z paliwami kopalnymi, w części odpowiadającej udziałowi energii chemicznej biomasy lub biogazu w całości energii chemicznej paliwa zużywanego do produkcji energii elektrycznej. Takie rozporządzenia wydawane są przez Ministerstwo co roku na mocy ustawy Prawo Energetyczne (Ustawa... 1997) (do 2014 roku), a obecnie na podstawie art. 116 ust. 3 ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Ustawa... 2015).

### **Polityka energetyczna Polski do 2030 roku**

Dokument ten wskazuje na liczne korzyści, które wynikają z rozwoju energetyki odnawialnej. Głównym celem Polityki energetycznej jest (Polityka... 2009):

- wzrost wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w bilansie energii finalnej do 15% w 2020 roku i 20% w 2030 roku;
- zwiększenie udziału biopaliw na rynku paliw transportowych do poziomu 10% w 2020 roku i utrzymanie tego udziału w kolejnych latach;
- ochrona obszarów leśnych przed ich nadmiernym eksploataowaniem, związanym z pozyskiwaniem surowca do produkcji energii;
- pozyskiwanie biomasy z terenów rolniczych, w sposób niedopuszczający do powstania konfliktu pomiędzy rolnictwem a energetyką odnawialną.

W dokumencie zwrócono również uwagę na liczne działania zmierzające do rozwoju wykorzystania OZE. Do najważniejszych z nich należą: zachowanie mechanizmów wspierających podmioty wytwarzające energię ze źródeł odnawialnych (zielone certyfikaty), zastosowanie ulg podatkowych, wprowadzenie w życie planu budowy biogazowni rolniczych na terenie każdej gminy, zwolnienie z akcyzy energii wyprodukowanej w OZE, wspieranie budowy nowych jednostek OZE ze środków funduszy europejskich i funduszy ochrony środowiska, realizacja przedsięwzięć w hydroenergetyce.

### **Koncepcja Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2030 (KPZK)**

Wśród celów polityki przestrzennego zagospodarowania kraju (KPZK... 2012) istotny jest cel 5 – *Zwiększenie odporności struktury przestrzennej kraju na zagrożenia naturalne i utraty bezpieczeństwa energetycznego oraz kształtowanie struktur przestrzennych wspierających zdolności obronne państwa*. W obrębie tego celu znajduje się kierunek działań 5.1 – *Przeciwdziałanie zagrożeniu utraty bezpieczeństwa energetycznego i odpowiednie reagowanie na to zagrożenie*.

### **Średniookresowa Strategia Rozwoju Kraju 2020 (ŚSRK)**

Dokument (ŚSRK... 2012) określa podstawowe uwarunkowania, cele i kierunki rozwoju kraju w wymiarze społecznym, gospodarczym, regionalnym i przestrzennym. Problematyka energetyczna została ujęta w II obszarze ŚSRK – *Konkurencyjna gospodarka* w ramach celu II.6 – *Efektywność energetyczna i poprawa stanu środowiska*.

### **Długookresowa Strategia Rozwoju Kraju 2030 (DSRK)**

Dokument (DSRK... 2013) jest katalogiem najistotniejszych decyzji, które należy podjąć aby zapewnić rozwój społeczno-gospodarczy Polski w perspektywie do 2030 roku. Problematyka energetyczna uwzględniona jest w ramach tzw. filara innowacyjności, zawierającego priorytet V – *Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko*, w obrębie którego wyznaczono 3 cele szczegółowe:

- zbilansowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i paliwa oraz zapewnienie bezpieczeństwa dostaw,
- poprawę efektywności energetycznej oraz rozwój konkurencyjnych rynków paliw i energii,
- poprawę i ochronę stanu środowiska oraz adaptacji do zmian klimatu.

### **Strategia Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko**

W dokumencie (Strategia... 2014) zwraca się uwagę na wykorzystanie zalet, jakie mają odnawialne źródła energii dla wzrostu bezpieczeństwa energetycznego na tych obszarach, gdzie rozwój energetyki napotyka na ograniczenia. Należy jednak pamiętać, że rozwój OZE wymaga dostosowania sieci przesyłowej i dystrybucyjnej do nowych warunków oraz procedur dotyczących ich funkcjonowania.

Dokument ten poświęca kilka działań odnawialnym źródłom energii:

- działanie 30 – wspieranie inwestycji w odnawialne źródła energii,
- działanie 31 – promocja energetyki odnawialnej w Polsce,

- działanie 32 – opracowanie zasad i systemu promocji wysokosprawnych instalacji dedykowanych do spalania biomasy ze szczególnym uwzględnieniem małych instalacji,
- działanie 33 – wspieranie powstawania upraw energetycznych na glebach najniższych kategorii.

Zwrócono uwagę, że rozwój energetyki odnawialnej (zwłaszcza rozproszonej) ma istotne znaczenie dla realizacji podstawowych celów polityki klimatyczno-energetycznej.

### **Projekt Polityki Energetycznej Polski do 2050 roku**

Głównym celem Projektu Polityki Energetycznej (PEP... 2015) jest tworzenie warunków dla stałego i zrównoważonego rozwoju sektora energetycznego, przyczyniającego się do: rozwoju gospodarczego kraju, jego bezpieczeństwa energetycznego oraz zaspokojenia potrzeb energetycznych podmiotów gospodarczych i gospodarstw domowych. Wyznaczono trzy cele operacyjne: zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju, zwiększenie konkurencyjności oraz efektywności gospodarki narodowej.

Projekt zakłada, że OZE będą stanowić istotny element systemu elektroenergetycznego. Przewiduje się, że OZE po 2035 roku będą konkurowały z energetyką konwencjonalną bez konieczności wsparcia. Zakłada się, że do 2035 roku krajowy system OZE powinien wypracować specjalizację technologiczną w oparciu o rozpoznany potencjał poszczególnych źródeł (biomasa, wiatr, biogaz, geotermia, energia słoneczna), umożliwiającą maksymalizację korzyści z rozwoju technologii OZE w skali gospodarki kraju. Ponadto postęp technologii energetyki odnawialnej przyczyni się do rozwoju energetyki rozproszonej.

### **Rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków i warunków technicznych zakupu ciepła z odnawialnych źródeł energii...**

Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 18 maja 2017 roku (Rozporządzenie... 2017) określa między innymi:

1. Szczegółowy zakres obowiązku i warunki techniczne zakupu ciepła wytwarzanego w instalacjach:

- termicznego przekształcania odpadów,
- odnawialnego źródła energii z wyłączeniem ciepła wytwarzanego w instalacjach spalania wielopaliwowego innego niż ciepło wytworzone w wysokosprawnej kogeneracji.

2. Warunki przyłączenia instalacji do sieci ciepłowniczych, w tym wymagania techniczne tego przyłączenia instalacji.



### Ustawa o Odnawialnych Źródłach Energii

W dokumencie określono zasady i warunki wykonywania działalności w zakresie wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, biogazu rolniczego w instalacjach odnawialnego źródła energii i biopłynów. Ponadto wskazano mechanizmy i instrumenty wspierające wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła wyżej wymienionych OZE, zasady wydawania gwarancji pochodzenia energii elektrycznej wytwarzanej w tych źródłach, zasady realizacji KPD w zakresie OZE, warunki i tryb certyfikowania instalatorów mikroinstalacji, małych instalacji i instalacji odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej nie większej niż 600 kW oraz akredytowania organizatorów szkoleń.

Nowelizacja ustawy o OZE z dnia 7 czerwca 2018 roku (Ustawa... 2018) wprowadza nowe pojęcia i definicje: biomasy, biomasy pochodzenia rolniczego, biowęgla, toryfikatu, dedykowanej instalacji spalania biomasy, hybrydowej instalacji OZE, małej instalacji, mikroinstalacji, spółdzielni energetycznej. Określa także pojęcie stałej ceny zakupu energii.

Wykorzystanie biomasy ujęto również w ekspertyzach dotyczących prognozowania zapotrzebowania na pierwotne nośniki energii oraz na nośniki odnawialnych źródeł energii.

### Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 roku – analizy scenariuszowe

W opracowaniu (Gawlik 2013) przedstawiono 15 scenariuszy zapotrzebowania na węgiel kamienny energetyczny oraz na węgiel brunatny w gospodarce krajowej przy różnych uwarunkowaniach rozwoju poszczególnych elementów gospodarki i przy zmianie uwarunkowań zewnętrznych. Jednym z nich jest scenariusz OZE (Odnawialnych Źródeł Energii), dla którego przyjęto następujące założenia:

- podaż węgla poprzez pozyskiwanie nowych koncesji i rozwój bazy wydobywczej;
- popyt na energię elektryczną wyznaczony spadkiem energochłonności gospodarki kraju;
- wysoka cena uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>;
- wysokie cele OZE (wyższe niż w scenariuszu referencyjnym);
- ceny paliw zgodnie z prognozami światowymi;
- rozwój energetyki jądrowej; możliwość budowy trzech bloków po 1,5 GW w latach: 2025, 2030 i 2035;
- rozwój technologii CCS, która osiągnie dojrzałość komercyjną w 2030 roku.

Udział energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w tym scenariuszu w latach: 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 wynosi odpowiednio: 23; 25,89; 33,62; 35,16; 40; 45 i 50%. Należy zauważyć, że udział OZE w latach 2030 i 2035 przewyższa założone cele OZE; oznacza to, że technologia ta rozpatrywana jest przez model jako konkurencyjna ekonomicznie, a ich praca w systemie nie wynika z narzuconych wymuszeń ich udziału.

#### **Polski sektor energetyczny 2050. 4 scenariusze**

Według opracowania (Forum... 2017) rozpatrywano cztery scenariusze rozwoju krajowej energetyki:

- węglowy; opiera się na jednostkach węglowych, zakłada budowę nowych kopalń węgla kamiennego i węgla brunatnego; udział odnawialnych źródeł energii w latach 2030 i 2050 wynosi odpowiednio: 15 i 17%;
- zdywersyfikowany z energetyką jądrową; wprowadza zróżnicowany mix technologii energetycznych włącznie z energetyką jądrową zamiast elektrowni na węgiel brunatny; udział odnawialnych źródeł energii w latach 2030 i 2050 wynosi odpowiednio: 24 i 38%;
- zdywersyfikowany bez energetyki jądrowej; zamiast produkcji energii z elektrowni jądrowych będzie zwiększona produkcja energii z gazu ziemnego; udział odnawialnych źródeł energii w latach 2030 i 2050 wynosi odpowiednio: 26 i 50%;
- odnawialny; zakłada stopniowe wycofywanie energetyki jądrowej; udział odnawialnych źródeł energii w latach 2030 i 2050 wynosi odpowiednio: 39 i 73%; jednostki kogeneracji gazowej dopełniają bilans produkcji. Ponadto scenariusz ten zapewnia największy poziom niezależności energetycznej (jedynie 30% importu paliw w 2050 roku), ze względu na wykorzystanie lokalnych zasobów energii pierwotnej.

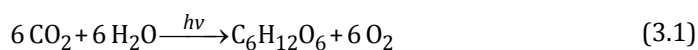


### 3. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE ZWIĄZANE Z BIOMASĄ

#### 3.1. Tworzenie biomasy – proces fotosyntezy

Pod pojęciem odnawialnego źródła energii należy rozumieć takie źródło energii, którego wykorzystanie nie wiąże się z trwałym niedoborem, ponieważ podlega odnawianiu w krótkim czasie. Źródłem energii odnawialnej jest m.in. promieniowanie słoneczne, wiatr, ciepło z wnętrza Ziemi, woda, biomasa, biogaz, biopaliwa. Opisu-  
jąc biomasę, należy uzupełnić tę definicję o wpływ tzw. metabolizmu społecznego, ponieważ dzięki działaniu Słońca zasoby drewna czy słomy ulegają regeneracji, natomiast jeśli chodzi o odtwarzanie zasobów takich jak: biogaz, makulatura itp., niezbędne jest działanie tzw. metabolizmu społecznego. Pod terminem „biomasa” należy rozumieć więc każdą substancję pochodzenia organicznego, która jest produkowana przy pomocy energii słonecznej, dwutlenku węgla obecnego w atmosferze i wody pobieranej z gleby, ale może też powstawać w wyniku tzw. metabolizmu społecznego (Kowalik 2003).

Tworzenie biomasy roślinnej zawdzięcza się procesowi fotosyntezy, który można zapisać następująco (Lewandowski 2012):



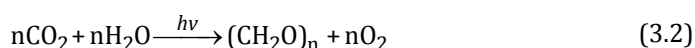
Do połowy ubiegłego wieku proces fotosyntezy przedstawiano w postaci reakcji asymilacji, która polega na rozkładzie cząsteczki dwutlenku węgla, według wzoru (3.1).

W trakcie reakcji powstaje tlen i węglowodany, które są częścią bardziej skomplikowanych związków organicznych, takich jak:

- monosacharydy (glukoza, fruktoza),
- oligosacharydy (sacharoza, laktoza),

- polisacharydy (skrobia, celuloza),
- białka, tłuszcze i inne.

Pogląd na mechanizm fotosyntezy uległ zmianie, gdy do jego zbadania zastosowano metodę atomów znaczonych, w wyniku której stwierdzono, że to nie dwutlenek węgla, a woda rozkłada się pod wpływem promieniowania słonecznego. Reakcja przebiega następująco (Kubica 2003; Mirowski i in. 2005):



Na podstawie reakcji (3.2) w węglowodorach syntezowych z jednego mola dwutlenku węgla akumulowane jest 470 kJ energii chemicznej.

Proces fotosyntezy można podzielić na dwie fazy:

- pierwsza: zależy bezpośrednio od światła (faza jasna), w wyniku której dochodzi do wytworzenia tzw. siły asymilacyjnej umożliwiającej dalsze etapy,
- druga: nie zależy bezpośrednio od światła (faza ciemna), dochodzi w niej do asymilacji  $\text{CO}_2$  i powstania związków organicznych (produktów fotosyntezy), które mogą służyć jako substancje wyjściowe do dalszych przemian.

Podstawowe składniki biomasy to: węglowodany (dwucukry, cukry proste), skrobia (amyloza około 20%, amylopektyny około 80%) oraz lignina (biopolimer o dużym ciężarze cząsteczkowym, w skład którego wchodzi nienasycone alkohole i fenole). Węglowodany i skrobia są głównym i docelowym produktem upraw rolniczych. Stanowią one pokarm dla zwierząt i ludzi, są surowcem do produkcji etanolu (produkt wyjściowy w syntezie licznych cennych i pożądaných substancji, a także użyteczne źródło energii). Pozostała część biomasy, nieposiadająca właściwości odżywczych, taka jak: celuloza, hemiceluloza i lignina są bardzo dobrym surowcem energetycznym. Ich ilość uzależniona jest od rodzaju roślin. W roślinach energetycznych proporcje składników pokarmowych do energetycznych są odwrócone, a ich orientacyjny skład to: celuloza 40–60%, hemiceluloza 20–40%, lignina 10–25%.

Podczas przetwarzania energii chemicznej biomasy na ciepło emitowany jest jako produkt uboczny  $\text{CO}_2$ . W przypadku biomasy nie stanowi on jednak zagrożenia dla środowiska. Nie ma on wpływu na pogłębianie efektu cieplarnianego, gdyż w wyniku procesu fotosyntezy krąży on w obiegu zamkniętym w przyrodzie.

Spalając biomasę, uwalniamy pewną ilość dwutlenku węgla, która jest równoważna ilości  $\text{CO}_2$  pobranej przez roślinę podczas jej wzrostu. Możemy więc stwierdzić, iż dwutlenek węgla cyrkuluje w przyrodzie w obiegu zamkniętym. Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne można więc uznać za odwrócenie procesu fotosyntezy (Jesionek i Soliński 2004). Skład chemiczny biomasy może być przedstawiony jako  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ , a dla porównania skład węgla kamiennego można zapisać jako  $(\text{CH})_n$ . W przeszłości biomasa ulegała procesom odtleniania, czego wynikiem było powstanie węgla kamiennego lub brunatnego (Kubica 2003).

W skali całego świata potencjał energii z biomasy pochodzącej z lasów, jak również odpadów z rolnictwa szacuje się na około 30 EJ/rok (McKendry 2002). Natomiast świa-

towe zużycie biomasy szacuje się na 53 EJ/rok i według szacunków mapy drogowej Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej wzrośnie do 108 EJ/rok w 2030 roku (IRENE... 2014).

### 3.2. Definicja biomasy

Nie ma jednolitej, jednoznacznej definicji biomasy. Każdy z aktów prawnych wymagający definicji na potrzeby omawianych zagadnień (ustawa, rozporządzenie), formułuje własną definicję biomasy. Stąd też poszczególne zakłady wykorzystujące ten surowiec starają się stworzyć odrębną definicję na swoje potrzeby.

Biomasa jest jednym z pierwotnych źródeł energii. Najnowsza nowelizacja ustawy z 7 czerwca 2018 r. o OZE (Ustawa... 2018) definiuje bioimasa jako „ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów 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” (Ustawa... 2018).

Według Dyrektywy 2009/28/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 kwietnia 2009 roku (Dyrektywa... 2009) dotyczącej wspierania produkcji energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych, „biomasa oznacza ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych i miejskich”.

Biomasa obejmuje więc substancję organiczną wszelkiego rodzaju (roślinną i zwierzęcą), jak i wszystkie substancje otrzymane w wyniku przerobu tych surowców. Do surowców tych zaliczamy: drewno różnego pochodzenia (leśnictwo, plantacje drzew energetycznych), substancję organiczną pochodzącą z hodowli zwierząt (gnojowica, obornik) lub z osadów ściekowych, słomę pozyskiwaną w rolnictwie, jak i pozostałości o naturze organicznej pochodzące z przemysłu spożywczego (Kowalik 2003).

### 3.3. Klasyfikacja biomasy

Biomasa może być użytkowana w formie stałej (drewno, słoma) lub po jej konwersji do postaci ciekłej (alkohol, bioolej), czy gazowej (biogaz powstający w procesie fermentacji wszelkiego rodzaju odpadów organicznych) (Soliński 2001).

Biomasę można podzielić według różnych kryteriów, np. stanu skupienia (forma stała, ciekła, gazowa). Biorąc pod uwagę stopień przetworzenia biomasy wyróżniamy (Mirowski i in. 2005):

- surowce energetyczne nieprzetworzone (np. drewno, słoma),
- surowce energetyczne przetworzone (np. biogaz, biopaliwa ciekłe).

Można dokonać także podziału biomasy na:

- biomasę pochodzenia roślinnego, tzw. fitomasę,
- biomasę pochodzenia zwierzęcego, tzw. zoomasę.

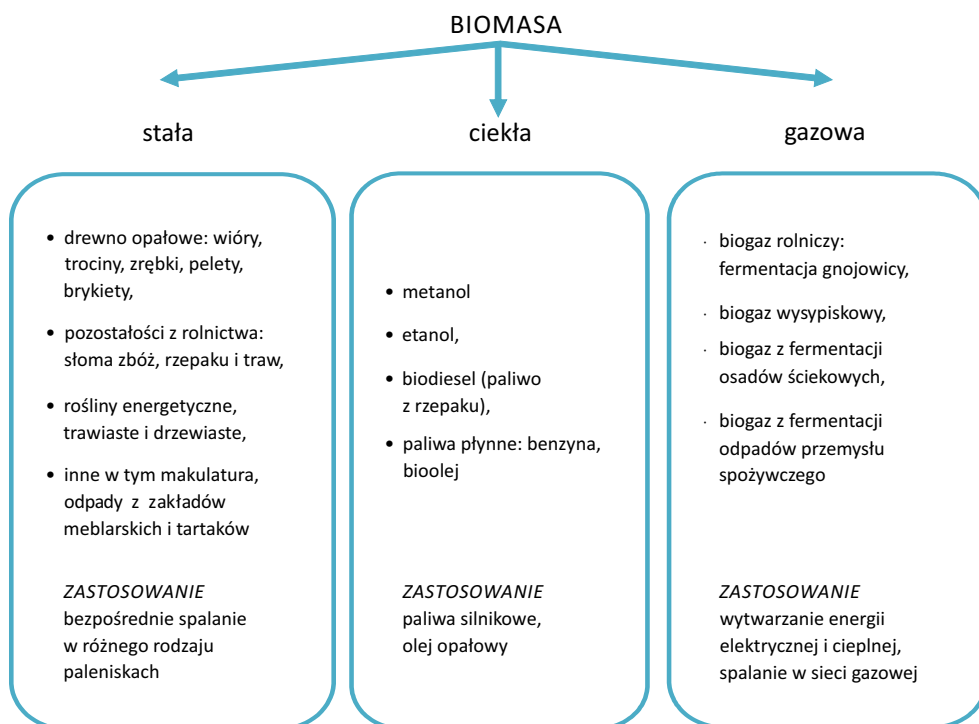
Według innego podziału wyróżniamy:

- biomasę producentów, produkowaną w procesie fotosyntezy,
- biomasę konsumentów, produkowaną kosztem biomasy producentów.

Biomasa dla celów energetycznych dzielona jest również na sześć grup (Vassilev i in. 2010, 2012):

1. Biomasa drzewna (np.: drzewa iglaste, liściaste, okrytonasienne, miękkie lub twarde, łodygi, kora, gałęzie (gałązki), liście, krzewy (krzaki), zrębki, bryłki, pellety, brykiety, trociny).
2. Biomasa zielna i rolnicza:
  - 2.1. Trawy i kwiaty (np.: lucerna, bambus, trzcina, miskant, życica).
  - 2.2. Słoma (np.: jęczmienia, fasoli, kukurydzy, lnu, mięty, owsa, rzepaku, ryżu, żyta, sezamu, słonecznika, pszenżyta, pszenicy).
  - 2.3. Łodygi (np.: fasola, kukurydza, bawełna, słonecznik, oset, tytoń).
  - 2.4. Włókna (np.: kokosowe, lnu).
  - 2.5. Łuski (skorupy) i plewy (np.: migdałów, orzechów nerkowca, kawy, bawełny, orzechów laskowych, prosa, słoneczników).
  - 2.6. Pestki (np.: moreli, czereśni, oliwek, brzoskwiń, śliwek).
  - 2.7. Inne pozostałości (np.: owoce, pestki, ziarna, nasiona, kolby, wytłoki, pasze, pulpy).
3. Biomasa wodna – morska lub słodkowodna, makroalgi lub mikroalgi oraz gatunki wielokomórkowe lub jednokomórkowe (np.: zielone i czerwone algi, okrzemki, rzęski, wodorosty, hiacynt wodny).
4. Odpady biomasy pochodzenia zwierzęcego i ludzkiego (np.: kości, ściółka drobiowa, mączka mięsno-kostna, nawóz).
5. Zanieczyszczona biomasa i biomasa przemysłowa (np.: odpady komunalne, drewno z rozbiórki, osady ściekowe, szlam z masy papierniczej, odpady z tektury, płyty wiórowe, płyty pilśniowe, sklejka, palety i skrzynki drewniane, podkłady kolejowe).
6. Mieszaniny biomasy.

Klasyfikacja biomasy pod względem perspektyw jej przetwarzania na paliwa energetyczne pokazana jest na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Klasyfikacja biomasy pod względem perspektyw jej przetwarzania na cele energetyczne

Źródło: Grzybek 2003

W związku z działaniami mającymi na celu stosowanie paliw z biomasy o odpowiedniej jakości zostały opracowane normy, wśród których należy wymienić najważniejsze:

- PN-EN ISO 16559:2014-09 – Biopaliwa stałe – Terminologia, definicje i określenia;
- Norma PN-EN ISO 16559:2014-09 dotyczy tylko surowych i przetworzonych materiałów pochodzących z leśnictwa i sadownictwa; rolnictwa i ogrodnictwa oraz akwakultury;
- Norma PN-EN ISO 17225-1:2014-07 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 1: Wymagania ogólne; określa klasy jakościowe paliwa i wymagania dla biopaliw stałych z surowców naturalnych i przetworzonych. Norma zawiera wymagania dla biomasy pochodzącej z: leśnictwa i uprawy drzew i krzewów ozdobnych, rolnictwa i ogrodnictwa oraz upraw roślin wodnych;



- PN-EN ISO 17225-2:2014-07 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 2: Klasy peletów drzewnych; określająca klasy jakościowe paliwa i wymagania dla klas peletów drzewnych stosowanych do celów nieprzemysłowych i przemysłowych. Norma ta obejmuje pelety wytwarzane z: drewna z lasów, plantacji i z innych naturalnych źródeł; produkty uboczne i pozostałości z przemysłu drzewnego; drewno używane nieprzetworzone chemicznie;
- – PN-EN ISO 17225-3:2014-07 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 3: Klasy brykietów drzewnych;
- PN-EN ISO 17225-4:2014-07 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 4: Klasy zrębków drzewnych;
- PN-EN ISO 17225-5:2014-08 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 5: Klasy drewna kominkowego;
- PN-EN ISO 17225-6:2014-08 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 6: Klasy peletów niedrzewnych; pelety niedrzewne produkowane z następujących surowców: biomasy zielnej pochodzącej z roślin o niezdrewniałych łodygach, które usychają pod koniec okresu wegetacji. Zawiera ziarna lub nasiona roślin z produkcji żywności lub jej przetwórstwa i ich produkty uboczne, takie jak zboża; biomasa owocowa; biomasa wodna; biomasa w postaci mieszanek i mieszanin;
- PN-EN ISO 17225-7:2014-08 – Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 7: Klasy brykietów niedrzewnych.

## 4. RODZAJE BIOMASY NA CELE ENERGETYCZNE

Polska ze względu na warunki klimatyczne może uprawiać trzy grupy roślin na cele energetyczne (Szczukowski i Stolarski 2013):

- drzewa i krzewy: wierzba (*Salix* L.), topola (*Populus* L.), robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia* L.), róża wielokwiatowa (*Rosa multiflora*),
- trawy: miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*), miskant chiński (*Miscanthus sinensis*), miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*), spartina preriowa (*Spartina pectinata*),
- byliny: ślaziołek pensylwański (*Sida hermaphrodita*), rożnik przerośnięty (*Silphium perfoliatum* L.), topinambur (*Helianthus tuberosus* L.).

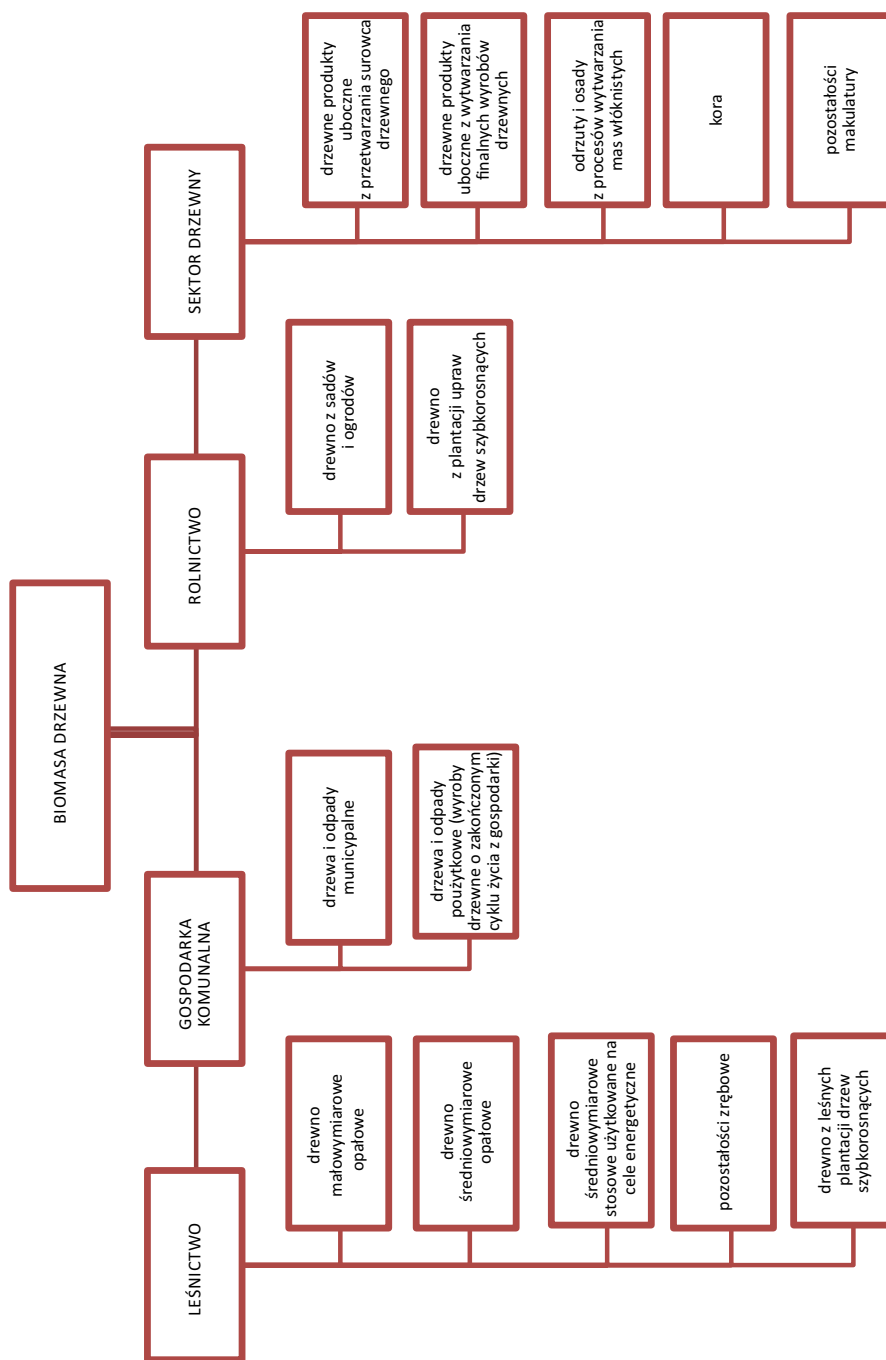
### 4.1. Drewno

Poprzez drewno należy rozumieć surowiec pochodzenia drzewnego, powstający wskutek ścinania drzew i formowany na drodze obróbki w różnego rodzaju sortymenty.

Na rysunku 4.1 przedstawiono miejsca powstawania biomasy drzewnej i jej rodzaje na cele energetyczne (Ratajczak i Bidzińska 2013). Tak więc źródłem biomasy są: leśnictwo, sektor drzewny, gospodarka komunalna i rolnictwo.

Lasy w Polsce zajmują (2011 r.) 29,2% powierzchni, podczas gdy w krajach ościennych wielkość ta przekracza 30%, a więc: Niemcy – 32%, Czechy – 34%, Litwa – 36%, Słowacja – 40%, Białoruś – 43% (Kaliszewski 2013).

W tabeli 4.1 zamieszczono potencjalne ilości drewna możliwe do pozyskania na cele energetyczne w Lasach Państwowych (będących w zarządzie Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe) oraz lasach prywatnych (Zajączkowski 2013). Z tabeli tej widać, że teoretyczna (prognozowana) baza drewna na cele energetyczne będzie



Rys. 4.1. Miejsca powstawania biomasy drzewnej na cele energetyczne i jej rodzaje  
 Źródło: Ratajczak i Białzińska 2013

4. RODZAJE BIOMASY NA CELE ENERGETYCZNE

wzrastać zarówno w Lasach Państwowych, jak i lasach prywatnych. Wielkości te kształtują się następująco (oszacowane w przeliczeniu na jeden rok):

- Lasy Państwowe: 2011 r. – 5,99 mln m<sup>3</sup>, 2021 r. – 6,82 mln m<sup>3</sup>, 2031 r. – 7,53 mln m<sup>3</sup>,
- lasy prywatne: 2011 r. – 0,91 mln m<sup>3</sup>, 2021 r. – 1,12 mln m<sup>3</sup>, 2031 r. – 1,38 mln m<sup>3</sup>.

Tabela 4.1. Teoretyczna baza drewna na cele energetyczne w Lasach Państwowych oraz w lasach prywatnych (mln m<sup>3</sup>)

Sortyment	Lasy Państwowe	Lasy prywatne	Razem
Pozyskanie w 2011 r.: Lasy Państwowe – 32,4 mln m <sup>3</sup> , lasy prywatne – 3,9 mln m <sup>3</sup> grubizny netto			
Grubizna opałowa	2,43	0,51	2,94
Drewno małowymiarowe	1,94	0,20	2,14
w tym drobnica opałowa	1,30	0,16	1,46
Pozostałości zrębowe	1,62	0,20	1,82
Razem	5,99	0,91	6,90
Razem bez drobnicy przemysłowej	5,35	0,87	6,22
Prognoza pozyskania w 2021 r.: Lasy Państwowe – 36,9 mln m <sup>3</sup> , lasy prywatne – 4,9 mln m <sup>3</sup> grubizny netto			
Grubizna opałowa	2,77	0,64	3,41
Drewno małowymiarowe	2,21	0,24	2,45
w tym drobnica opałowa	1,48	0,20	1,68
Pozostałości zrębowe	1,84	0,24	2,08
Razem	6,82	1,12	7,94
Razem bez drobnicy przemysłowej	6,09	1,08	7,17
Prognoza pozyskania w 2031 r.: Lasy Państwowe – 40,7 mln m <sup>3</sup> , lasy prywatne – 6,0 mln m <sup>3</sup> grubizny netto			
Grubizna opałowa	3,05	0,78	3,83
Drewno małowymiarowe	2,44	0,30	2,74
w tym drobnica opałowa	1,63	0,24	1,87
Pozostałości zrębowe	2,04	0,30	2,34
Razem	7,53	1,38	8,91
Razem bez drobnicy przemysłowej	6,72	1,32	8,04

Źródło: Zajczkowski 2013

Drewno posiada strukturę komórkową. Ściany komórek zbudowane są z substancji organicznej, a pory wypełnia pewna ilość powietrza i wody, która podlega zmianom. W przekroju poprzecznym każdego pnia drzewnego możemy wyróżnić:

- korę, która spełnia rolę tkanki okrywającej,
- łyko,
- miazgę,
- właściwe drewno, które składa się z dwóch stref: bieli spełniającej rolę przewodzenia wody i twardej składającej się z obumarłych komórek.

Skład chemiczny rośliny jest różny w poszczególnych jej częściach (w zależności czy jest to łodyga, korzeń, czy nasiona). Drewno jest substancją o niejednorodnym składzie chemicznym, składa się z:

- celulozy, będącej głównym składnikiem substancji roślinnej, jej zawartość w zależności od jego rodzaju wynosi 40–60%,
- hemicelulozy, której zawartość wynosi 15–29%,
- ligniny, stanowiącej 18–30% drewna.

Średnio drewno zawiera 39,5% celulozy (min. 12,4%, maks. 65,5%), 34,5% hemicelulozy (min. 6,7%, maks. 65,6%) i 23,1% lignin (min. 26,0%, maks. 44,5%) (Vassilev i in. 2012).

Zawartość podstawowych pierwiastków (C, H, O, N, S) w poszczególnych gatunkach drzew liściastych i iglastych jest zbliżona.

Średnia zawartość w drewnie:

- C – 52,1% (min. 48,7%, maks. 57,0%),
- O – 41,2% (min. 32,0%, maks. 45,3%),
- H – 6,2% (min. 5,4%, maks. 10,2%),
- N – 0,4% (min. 0,1%, maks. 0,7%),
- S – 0,08% (min. 0,1%, maks. 0,42%).

Przyjmuje się, iż wysuszone drewno zawiera: 49,5% C; 6,3% H; 44,2% O; 0,04–0,26% N i 0,2–2,3% związków mineralnych (Vassiliev i in. 2012).

Budowa struktury organicznej biomasy ma duży wpływ na jej przydatność do celów technologicznych. Wszystkie biopaliwa stałe mają niski poziom kondensacji struktury organicznej, co sprzyja ich dużej podatności na procesy chemicznej i termicznej degradacji, a także skłonności do reagowania na drodze chemicznej z różnymi utleniaczami. W procesach tych istotną rolę odgrywają dodatkowo takie elementy struktury biopaliw jak: boczne łańcuchy alifatyczne, struktury mostkowe i grupy funkcyjne złożone z ugrupowań wodorowych i tlenowych.

Drewno, jak i inne rodzaje paliw drzewnych zawierają w swym składzie substancję palną, substancje lotne, wilgoć i zanieczyszczenia mineralne. Zawartość części lotnych w drewnie jest bardzo wysoka – średnio wynosi 78% (min. 69,5%, maks. 86,3%) (Vassilev i in. 2010), około 80% jego masy odgazowuje w trakcie jego ogrzewania, a pozostałe 20% stanowi tzw. pozostałość koksowa. Taki skład drewna sprawia, iż w celu uzyskania efektywnego spalania paliwa, istnieje konieczność stosowania zaawansowanych rozwiązań konstrukcyjnych komór spalania.

Każde biopaliwo stałe ma w swoim składzie określoną ilość substancji mineralnej. Jej zawartość w drewnie wyznacza się na podstawie ilości popiołu otrzymanego po

spaleniu i wyprażeniu próbki drewna. Zawartość popiołu w drewnie zależy od gatunku drewna i średnio wynosi 3,5% (min. 0,1%, maks. 16,5%) (Vassilev i in. 2010). Typowe drewno wykorzystywane do celów opałowych zawiera około 1–2% popiołu na suchą masę (Rybak 2006).

Przy stosowaniu odpadów drzewnych do procesu spalania przeprowadza się badania tych paliw pod kątem przydatności energetycznej. Obecne metody badawcze w zakresie spalania drewna przyczyniają się do opracowania optymalnych rozwiązań. Metody te wykorzystują różne zjawiska fizyczne i procesy chemiczne (Filipowicz i in. 2017):

- monitoring (pomiar rozkładu temperatury, analiza składu spalin i zawartości pyłów, metody spektrometryczne i inne),
- metody analizy chemicznej, analizy paliwa i produktów spalania oraz metody analizy termicznej,
- analizę układu sterowania procesami spalania i oczyszczania spalin w oparciu o wyniki przedstawionych metod badawczych,
- wykorzystanie nowoczesnych metod matematycznych i numerycznych do symulacji przebiegu procesu spalania i dystrybucji ciepła; numeryczny model oparty na metodzie obliczeniowej mechaniki płynów (*Computonal Fluid Dynamics* – CFD) umożliwia odtworzenie dynamicznych zachowań urządzeń grzewczych, redukując przy tym czas i koszty przeprowadzenia eksperymentu (Basista i Szubel 2017),
- systemy transmisji i gromadzenia danych, analiza statystyczna.

Zawartość wilgoci w drewnie uzależniona jest od jego rodzaju i może podlegać zmianom. Wilgotność świeżo ściętego drewna wynosi 50% dla drzew iglastych i 60% dla drzew liściastych. Po okresie około 2 lat leżakowania w nasłonecznionym, suchym miejscu drewno osiąga najlepszą jakość, a jego wilgotność wynosi wówczas 15%.

Drewno cechuje duża porowatość, która wynosi od 20 do 45%, w zależności od gatunku drewna. Porowatość wywiera znaczny wpływ na właściwości mechaniczne i fizyczne drewna.

Średnia wartość gęstości drewna wykorzystywanego w naszej strefie klimatycznej wynosi 500–600 kg/m<sup>3</sup>, natomiast gęstość rzeczywista drewna (stosunek masy drewna w stanie suchym do jego objętości, z pominięciem porów) przeważnie wynosi 1500–1600 kg/m<sup>3</sup> (Rybak 2006). Gęstość nasypowa i zawartość wilgoci całkowitej różnych odpadów drzewnych zostały przedstawione w tabeli 4.2.

Gęstość drewna zależy od jego gatunku, warunków siedliskowych i wzrostowych drzew, jak i jego wilgotności. W związku z tym rozróżnia się następujące rodzaje gęstości drewna:

- gęstość drewna bezpośrednio po ścinie (najwyższa zawartość wilgoci),
- gęstość w stanie powietrzno–suchym (przy zawartości wilgoci na poziomie 15%),
- gęstość suchego drewna (przy zerowej zawartości wilgoci).

Biorąc pod uwagę gęstość drewna bezpośrednio po ścinie, rozróżniamy:

- drewno o gęstości powyżej 1000 kg/m<sup>3</sup> (cis, jodła, dąb, grab),
- drewno o gęstości 900–1000 kg/m<sup>3</sup> (jesion, wiąz, brzoza, buk),
- drewno o gęstości 700–800 kg/m<sup>3</sup> (modrzew, sosna, świerk, lipa).

Tabela 4.2. Zawartość wilgoci całkowitej i gęstość nasypowa odpadów drzewnych

Sortyment odpadów z drewna	Zawartość wilgoci całkowitej* [%]	Gęstość nasypowa [kg/m <sup>3</sup> ]
Zrębki	40–60	250–400
Zrębki z odpadów drzewnych	10–50	150–300
Kora	50–60	250–350
Trociny	45–60	250–350
Wióry	5–15	80–120
Trociny z mielenia odpadów	5–15	100–150
Drewno rozbiórkowe nie malowane	15–30	150–250

\* Materiał pierwotny bez suszenia i przechowywania  
Źródło: Rybak 2006

Kierując się natomiast gęstością drewna w stanie powietrzno-suchym wyróżniamy (Energoprojekt... 2003):

- drewno bardzo ciężkie (powyżej 800 kg/m<sup>3</sup>) – grab, cis,
- drewno ciężkie (710–800 kg/m<sup>3</sup>) – buk, dąb, jesion,
- drewno umiarkowanie ciężkie (610–700 kg/m<sup>3</sup>) – brzoza, klon, jawor, modrzew,
- drewno umiarkowanie lekkie (510–600 kg/m<sup>3</sup>) – kasztanowiec,
- drewno lekkie (410–500 kg/m<sup>3</sup>) – sosna, świerk, jodła, olcha, lipa,
- drewno bardzo lekkie (poniżej 400 kg/m<sup>3</sup>) – topola.

Wartość opałowa drewna z różnych gatunków drzew jest zbliżona. Różne rodzaje biomasy mają kaloryczność 15,5–16,5 MJ/kg, przy zawartości wilgoci na poziomie 15%. Przeprowadzone badania zależności kaloryczności drewna w od jego wilgotności wskazują, iż korzystne jest suszenie paliwa przed spalaniem. Wilgoć zawarta w drewnie stanowi balast cieplny, zmniejsza wartość ciepła spalania drewna, jak i sprawność całego procesu spalania (Rybak 2006).

## 4.2. Odpady rolnicze – słoma

Według małej encyklopedii rolniczej słoma to: „dojrzałe lub wysuszone źdźbła roślin zbożowych; określenia tego używa się także do wysuszonych roślin strączkowych, lnu i rzepaku”. Cechą charakterystyczną słomy jest wysoka (blisko 85%) zawartość suchej masy oraz zdolność do pochłaniania gazów i wilgoci.

Udział odpadów rolniczych w całkowitej ilości energetycznych zasobów biomasy wynosi aż 33%. Światowa, roczna produkcja odpadów rolniczych kształtuje się

na poziomie 3 mld ton (Rybak 2006). Słoma jest odpadem, który pochodzi z upraw zbożowych, a wielkość jej produkcji zależy od wielu czynników, takich jak (Mirowski i in. 2005):

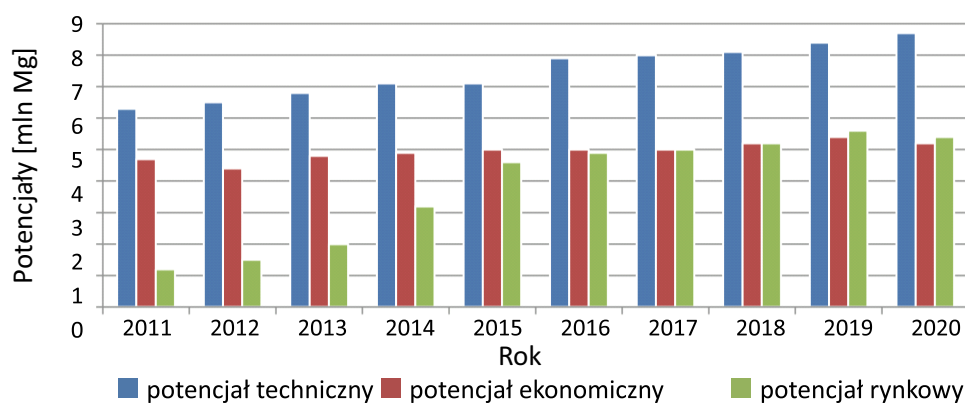
- powierzchnia uprawy,
- gatunek rośliny,
- wielkość plonów,
- nawożenie gleby,
- warunki atmosferyczne.

W Polsce w ogólnej powierzchni zasiewów struktura poszczególnych grup upraw jest następująca (GUS 2018):

- zboża (70,7%), w tym głównie pszenica i pszenżyto stanowi ponad 50%,
- uprawy przemysłowe (11,1%) w tym głównie: rzepak i rzepik, buraki cukrowe, tytoń, len, słonecznik na ziarno i inne,
- uprawy pastewne (9,7%),
- ziemniaki (3%),
- rośliny strączkowe na ziarno (2,5%),
- pozostałe (3%).

Ilość słomy możliwej do energetycznego wykorzystania wynika głównie z tego, jakie jest zapotrzebowanie na ten surowiec w rolnictwie. Podstawowa część słomy wykorzystywana jest dla zaspokojenia własnych potrzeb rolniczych (jako ściółka, dodatek do pasz), a pozostała nadwyżka może stanowić ewentualną rezerwę energetyczną (Rybak 2006; Mirowski i in. 2005).

Roczna produkcja słomy w polskich gospodarstwach rolnych wynosi ponad 34 mln ton. Od kilku lat zwiększają się nadwyżki słomy i obecnie szacuje się je na 10–11 mln ton rocznie (Hryniowicz i Grzybek 2017). Zgodnie z założeniami ekspertów, 25% słomy zbożowej można przeznaczyć na cele energetyczne bez wywierania negatywnego wpływu na jakość gleby. Potencjał techniczny, ekonomiczny i rynkowy słomy przedstawia rysunek 4.2.



Rys. 4.2. Przewidywany potencjał techniczny, ekonomiczny i rynkowy słomy do energetycznego wykorzystania (mln ton)

Źródło: Deluga i Mickiewicz 2013



Poszczególne rodzaje potencjałów produkcji słomy wykazują tendencję wzrostową w latach 2011–2016. W przypadku potencjału technicznego wzrost ten jest znaczący, i wynosił około 2 mln Mg; w 2011 r. wynosił ponad 6 mln Mg, a w 2016 roku zbliżył się do 8 mln Mg; w przypadku potencjału ekonomicznego wzrost ten wyniósł około 0,5 mln Mg, w 2011 r. potencjał ten wynosił ponad 4,5 mln Mg, a w 2016 r. – prawie 5 mln Mg. Największy wzrost wykazał potencjał rynkowy i wynosił około 4 mln Mg, w 2011 r. potencjał ten wynosił około 1 mln Mg, a w 2016 r. – około 5 mln Mg. Natomiast prognoza do 2020 roku również pokazuje wzrost produkcji słomy; w 2020 roku potencjał techniczny szacowany jest powyżej 8,5 mln Mg, natomiast potencjał ekonomiczny – powyżej 5 mln Mg, a potencjał rynkowy również powyżej 5 mln Mg, jednak przewyższający potencjał ekonomiczny.

Głównym składnikiem słomy jest surowe włókno. Średnio słoma zawiera 45,4% celulozy, 31,5% hemicelulozy i 23,1% ligniny (Vassilev i in. 2012). Analiza elementarna różnych rodzajów słomy została przedstawiona w tabelach 4.3 i 4.4.

Tabela 4.3. Analiza elementarna słomy wybranych zbóż (w stanie suchym)

Rodzaj słomy	Oznaczenie [% s.m.]												
	Oznaczenia zgodne z PN										Szybki nagrzew		
	C <sup>d</sup>	H <sup>d</sup>	N <sup>d</sup>	S <sup>d</sup>	Cl <sup>d</sup>	O <sup>d</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>d</sup>	K <sup>d</sup>	Q <sup>d</sup>	V <sup>d</sup>	K <sup>d</sup>	A <sup>d</sup>
	[%]										[kJ/kg]	[%]	
Pszenna	45,82	5,28	0,43	0,08	0,27	43,89	4,22	78,24	17,51	17 068	87,95	9,19	2,8
Żytnia	46,17	6,15	0,64	0,07	0,43	40,72	5,81	76,46	17,69	17 325	88,26	7,55	4,1
Rzepakowa	48,25	5,48	0,95	0,24	0,58	38,30	7,09	74,15	18,71	17 030	85,73	8,62	5,6

Źródło: Karcz i in. 2013

W swym składzie słoma zawiera pewną ilość składników chlorowych, które mogą oddziaływać korozyjnie na powierzchnie ogrzewalne. Duża zawartość substancji alkalicznych (głównie związków potasu) powoduje, iż temperatury mięknięcia i topnienia popiołu ze słomy są relatywnie niskie, a to może prowadzić do występowania problemów w kotłach, związanych z popieleniem, żużłowaniem powierzchni ogrzewalnych, jak również korozją wysokotemperaturową tych elementów (Rybak 2006).

Przyjmuje się, że słoma zawiera średnio: C – 49,6% (min. 48,5%, maks. 50,6%); O – 43,2% (min. 40,1%, maks. 44,6%), H – 6,1% (min. 5,6%, maks. 6,4%); N – 1,2% (min. 0,5%, maks. 2,8%), S – 0,15% (min. 0,08%, maks. 0,28%) (Vassilev i in. 2010).

Słoma, tak jak trawy, charakteryzuje się względnie wysoką zawartością: Cl, K, N, Na, S i Si (Vassilev i in. 2010).

Słoma jest paliwem niejednorodnym. Jedną z jej negatywnych cech jest duża objętość w stosunku do wartości energetycznej. Słomę, jak i inne odpady rolnicze, charakteryzuje mała gęstość, np. gęstość pociętej słomy wynosi 150–200 kg/m<sup>3</sup>, podczas gdy gęstość węgla kamiennego wynosi 800–1000 kg/m<sup>3</sup>. Ta jej właściwość utrudnia

Tabela 4.4. Skład chemiczny (uśredniony w skali kraju) słomy wybranych roślin

Rodzaj słomy	Zawartość składnika [% s.m.]								Wartość opałowa [MJ/kg]		Zawartość wilgoci [%]
	C	H	O	N	S	Cl	popiół	części lotne	stan suchy Q <sup>d</sup>	stan roboczy Q <sup>r</sup>	
Żytnia	46,6	6,0	41,9	0,5	0,085	0,40	4,8	76,4	17,5	12,9–14,1	15–20
Pszenna	45,6	5,8	42,1	0,5	0,082	0,19	5,7	77,0	17,2	12,6–13,9	15–20
Pszennyto	43,9	5,9	43,5	0,4	0,056	0,26	6,0	75,2	17,1	12,4–13,8	15–20
Jęczmienna	47,5	5,9	45,6	0,5	0,089	0,40	4,8	77,3	17,5	12,0–13,9	15–22
Kukurydziana	45,7	5,3	41,1	0,7	0,177	0,35	6,7	76,8	17,7	5,3–8,2	45–60
Rzepakowa	47,1	5,9	39,3	0,8	0,270	0,47	6,2	75,8	17,1	10,3–12,3	30–40

Źródło: Karcz i in. 2013

składowanie, spalanie, jak i transport, który wymaga zastosowania samochodów ciężarowych o dużej pojemności (Rybak 2006; Mirowski i in. 2005).

W przypadku biomasy trawiastej, takiej jak słoma czy trawa, podstawową procedurą jest proces jej zagęszczania. Proces prasowania podnosi gęstość energetyczną i ułatwia transport surowca. Powstałe w ten sposób baloty magazynuje się na polu lub transportuje do magazynów elektrociepłowni bądź elektrowni (Rybak 2006).

Słomie wykorzystywanej w energetyce stawiane są pewne wymagania, szczególnie odnośnie do zawartości wilgoci. Wysoka wilgotność słomy jest bowiem przyczyną wielu problemów przy jej magazynowaniu, transporcie, jak i załadunku. Spalanie odpadów rolniczych o dużej zawartości wilgoci utrudnia zapłon, prowadzi do obniżenia temperatury spalania, co uniemożliwia całkowite dopalenie paliwa i wpływa niekorzystnie na jakość procesu spalania. Maksymalna, dopuszczalna zawartość wilgoci w słomie wykorzystywanej na cele energetyczne wynosi średnio 18–22%. Główny wpływ na jej wartość ma okres zbioru oraz warunki przechowywania. Biomasa sucha może osiągać wilgotność nawet poniżej 10%, jednak biomasa świeża najczęściej posiada nawet 60–70% wilgotności względnej. Jest wiele metod suszenia biomasy stosowanych w przemyśle. Do najpopularniejszych można zaliczyć:

- 1) suszarki bębnowe przeponowe i bezprzeponowe z przepływem czynnika suszącego we współ- i przeciwpłądzie względem suszonego paliwa,
- 2) suszarki pneumatyczne,
- 3) suszarki fluidalne,
- 4) suszarki taśmowe, oraz
- 5) innowacyjna suszarka na cylindryczne baloty słomy (Goryl i Filipowicz 2016).

Wartość opałowa słomy zależy od zawartości wilgoci surowca, rodzaju gleby, z której dokonano jej zbioru, nawożenia plantacji. Czynnikiem, który również wpływa na wartość tego parametru, jest stopień zwiędnięcia rośliny. Wyróżniamy zatem słomę żółtą i słomę szarą (Rybak 2006; Soliński 2001). Wartości opałowe słomy wybranych zbóż zostały zawarte w tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Wartość opałowa słomy szarej i żółtej oraz zawartość wilgoci słomy żółtej

Słoma	Wartość opałowa słomy szarej [MJ/kg]	Wartość opałowa słomy żółtej [MJ/kg]	Zawartość wilgoci w słomie żółtej [%]
Pszenna	17,3	12,9-14,9	12-22g
Jęczmienna	16,1	12,0-13,9	12-22g
Kukurydziana	16,8	3,3-7,2	50-70

Źródło: Rybak 2006

### 4.3. Uprawy energetyczne

Uprawa energetyczna to celowa produkcja leśna i rolna, nastawiona na pozyskanie biomasy przeznaczonej na cele energetyczne, czyli użytkowanej w celu wytworzenia energii elektrycznej, ciepłej lub wykorzystanej do produkcji paliw ciekłych lub gazowych (biogazu) (Mirowski i in. 2005).

Pod pojęciem roślin energetycznych należy rozumieć takie rośliny, które dają obfite plony biomasy we względnie krótkim okresie. Rośliny te cechuje zdolność intensywnego kumulowania oleju lub węglowodanów, stanowiących produkt wyjściowy do produkcji nośników energii.

W celu wytypowania poszczególnych roślin energetycznych brano pod uwagę (Jabłoński 2004):

- stosunek energii zawartej w biomase do energii, jaka jest potrzebna na jej uprawę i pozyskanie,
- zdolność kumulowania energii słonecznej w postaci biomasy,
- sprawność przetwarzania biomasy na paliwa ciekłe i gazowe, która jest zależna od składu substancji organicznej rośliny.

Wyróżniamy:

- rośliny energetyczne jednoroczne (np. zboża, słonecznik, topinambur),
- rośliny energetyczne wieloletnie, użytkowane corocznie (np. rośliny trzcinowate, charakteryzujące się szybkim przyrostem, wybrane gatunki roślin drzewiastych).

Za uprawy energetyczne uznaje się:

- uprawy roślin dające duże przyrosty substancji zdrewniałej (wierzba energetyczna, topinambur),
- uprawy roślin oleistych służących do wytwarzania estrów i olejów (np. rzepak, len),
- uprawy trzciny cukrowej, kukurydzy, ziemniaków w celu otrzymania paliw ciekłych (metanolu, etanolu).

Zasadniczo w grupie wieloletnich roślin energetycznych można wyróżnić rodzaje biomasy:

- w postaci drewna (wierzba krzewiasta, topola, róża wielokwiatowa),
- w postaci półzdrewniałej (topinambur, ślazier pensylwański, rdest japoński, rdest sachaliński),
- w postaci słomy (miskant olbrzymi, miskant cukrowy, miskant chiński i inne trawy).

Najbardziej obiecującymi spośród wyżej wymienionych roślin, mających szansę wejść na rynek produkcji biomasy, są: wierzba, ślazier i miskant. Wielkość uzyskanego plonu zależy od: gatunku i odmiany gleby przeznaczonej pod uprawę, zabiegów agrotechnicznych, gęstości sadzenia, a także od cyklu zbioru rośliny, jeśli chodzi o wierzbę. Biorąc pod uwagę przytoczone informacje, roczna zdolność produkcyjna tych roślin może wynosić od kilku do kilkudziesięciu ton suchej biomasy z 1 ha (Stolarski 2008).

#### 4.3.1. Słonecznik bulwiasty topinambur

Topinambur (*Helianthus tuberosus* L.), inaczej słonecznik bulwiasty – to roślina blisko spokrewniona ze słonecznikiem zwyczajnym. Roślina uprawna należąca do rodziny astrowatych. Jej nazwa wywodzi się od nazwy plemienia północnoamerykańskich Indian Tupinamba. Topinambur występuje w postaci pojedynczych łodyg o średnicy do 30 mm i osiąga wysokość 2–4 m. Roślina ma szerokie, ponad dwudziestocentymetrowe, owalno-sercowate liście i rozległy system korzeniowy. Korzenie zakończone są bulwami różnego kształtu i koloru. W Polsce są zarejestrowane dwie odmiany: albiak, o białych, maczugowatych w kształcie bulwach i rubiak o nieregularnej owalnej bulwie, barwy fioletowej. Bulwy topinamburu mają też kształt wrzecionowaty oraz barwę żółtą, czerwoną o różnych odcieniach i brązową.

Topinambur może być uprawiany na różnych gruntach, gdyż wymagania klimatyczno-glebowe tej rośliny są niewielkie (Szczukowski i in. 2012). Najlepsze pod jego uprawę są gleby średnio zwięzłe, przewiewne, bogate w składniki pokarmowe i wodę, o pH wyższym od 5,5. Wymagania te spełniają gleby brunatne właściwe oraz lepsze gleby bielicowe i płowe. Zaletą topinamburu jest jego zdolność do samoodnawiania się, bulwy potrafią przetrwać trzydziestostopniowe mrozy, jak również czas suszy, charakteryzuje się dużą odpornością na choroby. Przy odpowiednim prowadzeniu plantacji można użytkować ją przez 15–20 lat. Topinambur rozmnaża się wyłącznie wegetatywnie. Topinambur sadi się – mechanicznie lub ręcznie – jesienią lub wiosną, w odstępach 50–60 cm od siebie nawzajem, w rzędach o rozstawie 0,7–1 m. Topinambur uprawia się na masę zieloną, jak i bulwy. Zbioru masy zielonej dokonuje się ścinając rośliny na wysokości 20–30 cm. Rocznie można uzyskać 3 pokosy: w lipcu, sierpniu i listopadzie. Natomiast bulwy zbiera się późną jesienią. Roślina daje duży plon. W Polsce wynosi on obecnie od 12 do 36 Mg/ha, co umożliwia produkcję około 2610 dm<sup>3</sup> etanolu (Piskier

2004). W odpowiednich warunkach można uzyskać nawet 200 Mg świeżej masy z ha i 90 Mg bulw.

Topinambur może być wykorzystywany jako słoma do bezpośredniego spalania, może być także przetworzony na pelety lub brykiety, poddany fermentacji alkoholowej lub przerabiany na biogaz. Według badań (Piskier 2006) wartość opałowa słomy topinamburu o zawartości wilgoci na poziomie 10% wynosi 15,93 MJ/kg.

Topinambur ma wiele zastosowań (Kowalczyk-Juśko 2012b):

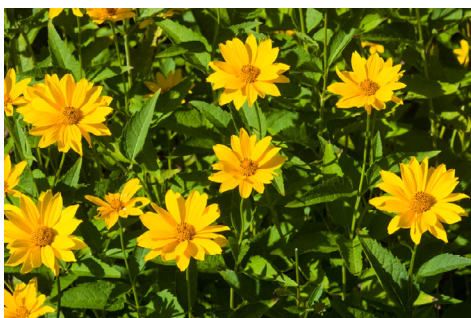
- jego liście i łodygi wykorzystuje się jako paszę dla zwierząt gospodarskich – zarówno bezpośrednio, jak i po przetworzeniu na susz czy granulę,
- sieczka z surowych łodyg nadaje się na podłoże do produkcji grzybów jadalnych, m. in. bocznika, a sok z bulw i napary z kwiatów znajdują zastosowanie w leczeniu chorób przewodu pokarmowego,
- służy też do produkcji alkoholu (również na cele energetyczne) i syropów fruktozowych,
- jest cennym, bogatym w wielocukry, białka, kwasy organiczne i witaminy surowcem zielarskim,
- ze względu na obecność insuliny znajduje zastosowanie w diecie diabetyków – jest też pożytkiem pszczelim,
- jest rośliną dekoracyjną i przeciwerozyjną.

Jako roślina energetyczna topinambur może być:

- spalany bezpośrednio, bądź dopiero po przetworzeniu na brykiety czy pelety,
- jest też wykorzystywany do produkcji etanolu i biogazu (także po zakiszeniu).

Topinambur można wykorzystać do rekultywacji terenów przemysłowych lub zdewastowanych przez gospodarkę komunalną. Na rysunku 4.3 zamieszczono fotografię topinambura bulwiastego.

a)



b)



Rys. 4.3. Słonecznik bulwiasty topinambur (*Helianthus tuberosus* L.)

a) łodygi z kwiatami, b) bulwy

Źródło: (9)

### 4.3.2. Róża wielokwiatowa

**Róża wielokwiatowa** (*Rosa multiflora*) – pospolity gatunek krzewu z rodziny różowatych, na terenie Polski spotykany w postaci dzikiej. Charakteryzuje się długimi pędami o wysokości od 4 do 7 m z krótkimi i hakowatymi kolcami, oraz z drobnymi kwiatostanami o płatkach białych lub różowych. Gatunek jest mało wymagający pod względem klimatycznym i glebowym. Rośnie na glebach V i VI klasy, spotykana jest nawet na wydmach. Głęboki system korzeniowy sprawia, iż roślina dobrze znosi skrajne temperatury, zarówno wysokie, jak i niskie. Posiada skłonność do tworzenia wielu pędów i szybkiego rozrostu, dzięki temu nadaje się do produkcji biomasy. Raz w roku należy przyciąć pędy na wysokości 15–20 cm. Pędy te są cięte na zrębki, następnie są brykietowane i spalane lub zgazowywane do metanu. Różę bezkolcową sadi się na plantacjach energetycznych w rozstawach 0,5 × 1 m. Cechą charakterystyczną rośliny jest bardzo szybki roczny przyrost biomasy. Uzyskany z 1 hektara roczny plon w zależności od warunków glebowych oscyluje w granicach 10–20 Mg (Rozprawa... 2007). Badania doświadczalne uprawy róży wielokwiatowej odmiany Jatar wysadzonej wiosną 2007 roku na terenie stacji doświadczalnej Katedry Agrotechniki i Ekologii Rolniczej w Krakowie – Mydlnikach – w rozstawie 0,7 × 0,7 m, na glebie brunatnej, wylugowanej, klasy IVb o niskiej zawartości mikroelementów wykazały niższy plon, niż podano w pracy (Rozprawa... 2007). W tabeli 4.6 zestawiono wartości wilgotności oraz plon dla świeżej i suchej masy w poszczególnych latach uprawy. Warunki tego doświadczenia były odmienne od warunków na plantacjach przemysłowych, gdyż nie stosowano chemicznej ochrony roślin oraz nawożenia, w celu sprawdzenia zasadności uprawy róży wielokwiatowej na słabych glebach przy zachowaniu minimalnych nakładów na uprawę tego gatunku rośliny energetycznej (Kieć i in. 2011).

Tabela 4.6. Wilgotność oraz plony świeżej i suchej masy róży wielokwiatowej

Rok	Wilgotność [%]	Świeża masa [Mg/ha]		Sucha masa [Mg/ha]	
		rośliny roczne	rośliny dwuletnie	rośliny roczne	rośliny dwuletnie
2007	53,6	4,4	–	2,1	–
2008	50,0	12,5	24,4	6,3	12,2
2009	49,0	12,1	15,9	6,2	7,8
2010	43,5	28,8	34,3	12,5	14,9

Źródło: Kieć i in. 2011

Różę wielokwiatową wykorzystuje się przy rekultywacji gleb narażonych na erozję wodną i wietrzną. Wartość opałowa róży wielokwiatowej wynosi do 18 900 MJ/kg.

Zebrane pędy rośliny tną się na zrębki. Następnie produkt może być bezpośrednio spalany, poddany brykietowaniu lub zgazowywany do metanolu. Ponadto róża może

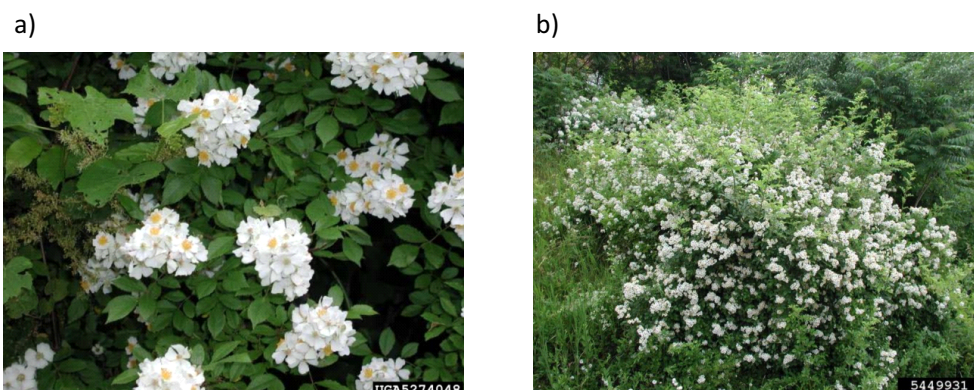
być wykorzystana do rekultywacji terenów (obsadzenia wysypisk, składowisk i powierzchni skażonych). Jedynym niekorzystnym czynnikiem, jakim do tej pory zaobserwowano, jest to, iż plantacje tej rośliny na północy kraju przemarzają, co skutkuje niższym plonem biomasy. W tabeli 4.7 przedstawiono wybrane właściwości fizykochemiczne róży wielokwiatowej. Na uwagę zasługuje niska zawartość popiołu 2,3–2,5%.

Tabela 4.7. Parametry fizykochemiczne róży wielokwiatowej

Zawartość [%]	Stan biomasy		
	roboczy	analityczny	suchy
Wilgotność	6,8	6,8	0,0
Popiół	2,3	2,3	2,5
Części lotne	6,13	6,13	6,58
Węgiel	45,9	45,9	49,2
Wodór	5,72	5,72	6,14
Siarka	0,12	0,12	0,13

Źródło: Kieć i in. 2011

Na rysunku 4.4 przedstawiono fotografię róży wielokwiatowej.



Rys. 4.4. Róża wielokwiatowa (*Rosa multiflora*)

a) kwiaty, b) pojedynczy krzew

Źródło: MDA... 2017

### 4.3.3. Trawy wieloletnie

W celach energetycznych można wykorzystywać rodzime, jak i obce gatunki traw wieloletnich. Do rodzimych gatunków należą, np. pozyskiwana w warunkach naturalnych trzcina pospolita, trawy wieloletnie obficie plonujące jak kostrzewy i życice. Jednak większe znaczenie dla energetyki mają rośliny obcego pochodzenia. Trawy te pochodzą z Azji i Ameryki Północnej, charakteryzują się większą wydajnością, zdolnością wiązania CO<sub>2</sub> i niższą zawartością popiołu, powstającego podczas spalania.

Przedstawicielami tych traw są:

- miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*),
- miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*),
- spartina preriowa (*Spartina pectinata*),
- ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*),
- rdest sachaliński (*Reynoutria sachalinensis*).

Miskanty są to wieloletnie trawy kępowe. Naturalne siedliska tych roślin występują między innymi w Chinach, Japonii, USA, Rosji i Tajlandii. Cechą charakterystyczną tych roślin są mocno rozbudowane kłącza podziemne i rozgałęziony system korzeniowy, sięgający na głębokość 2,5 m i grubych, sztywnych, wypełnionych gąbczastym rdzeniem źdźbłach wysokości 2–3,5 m o średnicy pędów do 3 cm. Zapewnia to wysoką efektywność wykorzystania wody i składników pokarmowych pobieranych z gleby, co przekłada się na wielkość uzyskanych plonów, które w uprawach doświadczalnych mieściły się między 16 a 20 Mg/ha s.m. W naszych warunkach klimatycznych, w celu zastosowania biomasy tej rośliny w energetyce, możemy wykorzystać 2 gatunki: miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*) i miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*) (Szcukowski i in. 2012).

Średnio trawy zawierają: 45,4% celulozy, 31,5% hemicelulozy i 23,1% ligniny (Vassilev i in. 2012).

Trawy, tak jak słoma, zawierają znaczące ilości Cl, K, N, Na, S i Si (Vassilev i in. 2010). Stwierdzono również, że rośliny jednoroczne i szybko rosnące trawy charakteryzują się dużo większą zawartością popiołu, wilgoci i pierwiastków mobilnych: Cl, K, Mg, N, P i S (czasami Na) w porównaniu do roślin wieloletnich (Vassilev i in. 2010).

Trawy zawierają średnio: C – 49,2% (min. 46,1%, maks. 52,0%); O – 43,7% (min. 42,5%, maks. 44,5%), H – 6,1% (min. 5,1%, maks. 6,5%); N – 0,9% (min. 0,3%, maks. 2,6%), S – 0,13% (min. 0,04%, maks. 0,27%) (Vassilev i in. 2010).

Zawartość części lotnych wynosi w trawach średnio 79,0%, a popiołu 4,8% (Vassilev i in. 2010).

#### Miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*)

Miskant olbrzymi jest trawą wieloletnią z rodziny wiechlinowatych. Powstał w wyniku skrzyżowania się dwóch gatunków: miskanta chińskiego i miskanta cukrowego. Rozmnaża się tylko wegetatywnie lub przez kultury tkankowe, co obala stwierdzenie o jego



dużej inwazyjności (Matyjewski i Mos 2012). Istnieje wiele odmian miskanta olbrzymiego, które zależą od dostosowania się danego genotypu do warunków środowiskowych.

Miskant olbrzymi charakteryzuje się szybkim wzrostem (wiosną rośnie około 5 cm na dobę). Średnica pędów waha się w granicach od 1 do 3 cm, a ich wysokość dochodzi nawet do 4 m (Szczukowski i in. 2012). Kolejną zaletą jest niewielkie zapotrzebowanie na składniki odżywcze i względnie wysoka odporność na niskie temperatury. Uprawa miskanta daje obfite plony nawet na glebach V i VI klasy bonitacyjnej, o ile zapewniony jest odpowiedni stopień jej uwilgotnienia. Produktywność uprawy wynosi od 15 do 30 ton suchej masy drewna z 1 ha i zależy ona od jakości gleby i warunków klimatycznych. Ogromne znaczenie ma tutaj zdolność gleby do zatrzymywania i oddawania wody, przede wszystkim w głównym okresie wzrostu rośliny, trwającym od czerwca do sierpnia. Jak wykazały badania, plonowanie miskanta pod wpływem nawożenia azotowego wzrasta tylko do określonego poziomu, w przeciwieństwie do pszenżyta, u którego wysokość uzyskanego plonu jest proporcjonalna do wielkości nawożenia. Uprawa miskanta nie wymaga więc dużego nakładu energii (nawożenia azotowego) w celu osiągnięcia wysokich plonów biomasy (Lewandowski 2005). Zbiór miskanta olbrzymiego może być realizowany w dwóch terminach: zbiór jesienny (od października do listopada), zbiór wiosenny (od lutego do marca). Zawartość wilgoci w plonie jesiennym kształtuje się w granicach od 55 do 65%, a w plonie wiosennym wynosi około 30% [6]. Za najbardziej korzystny okres zbioru uważa się luty, gdyż wtedy zawartość wilgoci w roślinie spada do poziomu 25%. Wartość opałowa suchej masy miskanta wynosi około 18 MJ/kg. Według szacunków 1 kg suchej masy uzyskanej z uprawy miskanta jest równoważny 0,4 litra oleju opałowego. Ponadto roślina zawiera mniej siarki niż słoła zbóż, a w wyniku jej spalania powstaje mniejsza ilość popiołu (Rybak 2006).

Na rysunku 4.5 przedstawiono fotografię miskanta olbrzymiego.



Rys. 4.5. Miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*)

Źródło: (4)

**Miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*)**

Roślina posiadająca pędy o grubości 1 cm i wysokości do 2,5 m. Cechuje się lepszą odpornością na niskie temperatury niż miskant olbrzymi. Trwałość plantacji wynosi około 15 lat. Plon suchej masy drewna z jednego hektara wynosi od 5 (bez nawożenia mineralnego) do 20, a nawet 30 Mg rocznie (przy odpowiednim nawożeniu). Uprawę tego gatunku powinno się prowadzić na glebach lekkich, bogatych w składniki pokarmowe i niezbyt uwilgotnionych. Za najbardziej korzystny okres zbioru biomasy miskanta cukrowego uważa się miesiąc luty i marzec, gdyż wtedy zawartość wilgoci w roślinie jest najmniejsza i nie przekracza 30%. Wartość opałowa suchej masy drewna tej rośliny jest bardzo wysoka i wynosi ponad 19 MJ/kg (Rybak 2006). Na rysunku 4.6 przedstawiono fotografię miskanta cukrowego.



Rys. 4.6. Miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus*)  
Źródło: (5)

**Spartina preriowa (*Spartina pectinata*)**

Spartina preriowa jest trawą wieloletnią. Jest to roślina, która tworzy kępy z pędami sięgającymi 200 cm. W warunkach naturalnych gatunek ten spotykamy w Ameryce Północnej. Spartina preriowa nie jest rośliną wymagającą – dobrze sprawdza się na glebach V i VI klasy. W warunkach klimatycznych Polski potrafi dawać zadowalające plony wynoszące 17–29 Mg/ha. Na metr kwadratowy powierzchni plantacji należy zasadzić do 10 sadzonek tej rośliny. Osiąga wysokość do 2 m, długość liści 80–90 cm a szerokość liści: 1,5 cm. Na rysunku 4.7 przedstawiono fotografię spartiny preriowej.



Rys. 4.7. *Spartina preriowa* (*Spartina pectinata*)  
Źródło: (3)

#### **Ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*)**

Ślazowiec pensylwański, inaczej malwa pensylwańska (*Sida hermaphrodita*) to roślina sprowadzona do Polski w latach 50. ubiegłego wieku. Naturalnie występuje w Ameryce Północnej, a w Polsce uprawiany jest głównie w celach energetycznych (Rybak 2006). Jest rośliną wieloletnią, a okres jej użytkowania szacuje się na 15–20 lat. Malwa pensylwańska rośnie w postaci kęp o silnym korzeniowym systemie i wykształca do kilkunastu łodyg o średnicy od 5–35 mm i wysokości do 4 m. Roślina rozmnażana jest poprzez sadzonki korzeniowe lub nasiona. System korzeniowy ślazowca jest bardzo silny. W trzecim roku wegetacji korzeń główny sięga w głąb ziemi na głębokość 120 cm, a w płaszczyźnie poziomej szerokość korzeni sięga 70–100 cm (Jesionek i Soltiński 2004; Szczukowski i in. 2012). Ponadto roślina jest odporna na niskie i wysokie temperatury, a rozbudowany i głęboki system korzeniowy pozwala na przetrwanie okresów suszy [7].

Plantacje zakłada się pod koniec kwietnia do maja. Ślázowiec można uprawiać na glebach wszystkich z wyjątkiem klasy VI i słabej klasy V, o odczynie obojętnym, lub lekko kwaśnym. Stanowisko przeznaczone pod uprawę nie może być zachwaszczone. Na glebach lekkich w roku założenia plantacji należy zasilić rośliny dawką nawozu w ilości N:P:K odpowiednio 50:30:40 kg/ha. W następnych latach wysokość dawek nawozów mineralnych zależy jest od zasobności gleby i wynosi: 100–170 kg N/ha, 80–120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha i 50–100 kg K<sub>2</sub>O/ha. Nawozy powinno stosować się wczesną wiosną. W korzystnych warunkach (gleba klasy III–IV), sprzyjających intensywnemu wytwarzaniu pędów, zalecana obsada wynosi 30 tys. roślin na 1 ha. Na stanowiskach słabszych obsadę należy zwiększyć do 50–60 tys. roślin/ha. Takie zagęszczenie roślin uzyskamy wysiewając 1,2–2,4 kg nasion na 1 ha. Najczęściej stosowana rozstawa rzędów wynosi 60–70 cm, w rzędzie 24–56 cm (Matyjewski i Mos 2012).

Plonem pozyskiwanym corocznie są zdrewniałe i zaschnięte łodygi. Zbioru dokonuje się w zależności od regionu od lutego do kwietnia, uzyskując około 12 Mg s.m./ha. Z doświadczeń polowych (Stolarski i in. 2007) wynika, iż wilgotność biomasy pozyskanej ze ślázowca, w grudniu, po zakończeniu okresu wegetacji, wynosiła średnio 25%. Ciepło spalania suchej masy drewna z tej rośliny wynosi: cienkich łodyg (14,5 MJ/kg), łodyg grubych (11,2 MJ/kg). Brykiety ze ślázowca charakteryzują się kalorycznością o wartości 18 MJ/kg (Jesionek i Soliński 2004; Mirowski i in. 2005).

Oprócz wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, zrębki ślázowca mogą być wykorzystywane do produkcji materiałów aglomerowanych, mas celulozowych, paliw stałych (typu *brix*) i płynnych (typu *bioxol*) (Stolarski 2005). Za zastosowaniem ślázowca na cele energetyczne przemawiają następujące argumenty: trwałość plantacji, duży plon w odniesieniu do jednostki powierzchni i wydajność cieplna (Jesionek i Soliński 2004).

Na rysunku 4.8 przedstawiono ślázowiec pensylwański.



Rys. 4.8. Ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita*)  
Źródło: (1), (2)

**Rdest sachaliński (*Reynoutria sachalinensis*)**

Rdest sachaliński to szybko rosnąca roślina pochodząca z Azji wschodniej, o pojedynczych liściach o długości 30 cm i szerokości do 15 cm (Szczukowski i in. 2012). Wysokość rdestu dochodzi do 6 m, a jednoroczne pędy osiągają 4 m wysokości. Okres eksploatacji plantacji szacuje się na 15 lat. Ze względu na intensywny wzrost rośliny, jego uprawa musi być nawożona, gdyż w przeciwnym razie można doprowadzić do wyjąłwienia podłoża. Pędy rdestu ścinane są jesienią lub zimą. Z tego względu, iż w okresie zbioru zawartość wilgoci w roślinie wynosi zaledwie 32–36%, nie jest wymagane dosuszenie. Ścięte pędy przeznaczone są bezpośrednio do spalania lub poddane są procesowi zgazowania (Jabłoński 2004).

Na rysunku 4.9 przedstawiono fotografię rdestu sachalińskiego.



Rys. 4.9. Rdest sachaliński (*Reynoutria sachalinensis*)

Źródło: (10)

W Polsce zaaklimatyzowano nowy gatunek trawy – perz wydłużony (*Agropyron elongatum*) odmiany Bamar (Martyniak i Martyniak 2011) oraz prowadzone są badania nad przystosowaniem innych gatunków roślin o wysokiej wartości energetycznej do warunków krajowych, wymienić tutaj należy (Łukaszek i in. 2011): szarłat – amarantus (*Amaranthus caudatus*), lnicznik siewny popularnie nazywany rydzą (*Camelina sativa*), ślázówka turyngska (*Lavathera thuringiaca*), proso różgowe (*Panicum virgatum*), palczatka Gerarda (*Andropogon gerardii*).

#### 4.3.4. Wieloletnie rośliny energetyczne do pozyskania drewna

Do wieloletnich roślin energetycznych, jak już wcześniej wspomniano, zaliczyć należy: wierzbę, topolę i robinie, które są źródłem biomasy w postaci drewna.

##### Wierzba (*Salix* L.)

Rodzaj *Salix* – wierzba – należy do rodziny *Salicaceae*. Znanych jest ponad 300 gatunków wierzb. Po przeprowadzeniu wielu doświadczeń ustalono, że dla celów energetycznych najlepsze wyniki osiąga wierzba wiciowa *Salix viminalis* i jej liczne krzyżówki. Wierzba *Salix viminalis* często nazywana wierzwą konopianką. Istnieje możliwość także wykorzystania do celów energetycznych innych wierzb takich jak: *Salix rigida*, *Salix amygdalina*, *Salix pentandra*, *Salix dasyclados* i innych. Sadzonki w hodowli nazywane „klonami” powinny pochodzić z pewnego źródła i muszą spełniać oczekiwania plantatora:

- możliwość łatwego rozmnażania wegetatywnego,
- szybki wzrost i duża produkcja w sezonie wegetacyjnym,
- szybka odbudowa karpy po wycince pędów dla celów energetycznych,
- możliwość produkcji przez okres do 20–30 lat – bez konieczności ponownego zakładania nowych plantacji,
- duża odporność na choroby i szkodniki oraz na warunki klimatyczne, głównie mróz i przymrozki,
- duża aklimatyzacja w odniesieniu do gleby, produkcja na glebach rolnych, podmokłych, a także na osadach ściekowych,
- duża produktywność i wydajność jak i wysoka jakość drewna dla celów energetycznych.

Wyodrębniono kilka „klonów” wierzby wiciowej *Salix viminalis*, które charakteryzują się dobrymi osiągnięciami potrzebnymi dla celów energetycznych. Według badań (Szczukowski i in. 2012) najbardziej przydatnymi i znanymi „klonami” są przedstawione w tabeli 4.8.

Wierzba jest rośliną krzewiastą i może być uprawiana na różnych rodzajach gleb, bardzo duże przyrosty osiąga na glebach klasy: III, IV i V, i glebach okresowo wilgotnych. Gleby słabsze także nadają się pod uprawę wierzby, jednak wymagają stosowania odpowiedniego nawożenia. Szczególną rolę na przyrost odgrywa odpowiednie nawodnienie oraz kwasowość gleby. Wierzba wymaga gleb wilgotnych i o odczynie lekko kwaśnym. Aby uzyskać jak najlepsze plony, należy do każdego rodzaju gleby dobrać najbardziej odpowiednią odmianę wierzby.

Pozyskiwanie drewna małowymiarowego w systemach upraw drzewnych o krótkiej rotacji, 3–6 lat (*Short Rotation Woody Crops* – SRWC) wierzby, topoli, robinii akacyjowej jest atrakcyjne do energetycznego wykorzystania. W przypadku wierzby wysokie koszty jej produkcji ograniczają jej szerokie zastosowanie.

Tabela 4.8. Gatunki wierzby nadające się na cele energetyczne

Gatunki wierzby	Plon świeżej biomasy [Mg/ha]	
	rośliny dwuletnie	rośliny trzyletnie
<i>Salix viminalis</i> 082	74,13	144,48
<i>Salix viminalis</i> var. <i>gigantea</i>	60,30	114,28
<i>Salix viminalis</i> 052	70,30	126,21
<i>Salix viminalis</i> 051	59,98	107,44
<i>Salix viminalis</i> „piaskówka”	52,34	102,03

Źródło: Szczukowski i in. 2012

W tabeli 4.9 zamieszczono ilość biomasy pozyskiwanej w ciągu roku w systemie Eko-Salix z pięcioletnich pędów wierzby (Szczukowski i Stolarski 2013).

Tabela 4.9. Ilość biomasy pozyskanej rocznie w systemie Eko-Salix z pięcioletnich pędów

Parametr	Jednostka	Wielkość		
		minimalna	maksymalna	średnia
Plon świeżej biomasy (drewna)	Mg/ha/rok	11,0	21,4	15,4
Plon suchej biomasy	Mg s.m./ha/rok	5,5	10,7	7,7
Wysokość rośliny	m	6,5	8,3	7,3
Średnica pędu (pierścienia)	mm	53	84	65
Wilgotność biomasy (zbiór)	%	48,3	51,2	50
Wartość opałowa (świeża masa)	MJ/kg	8,3	9,0	8,6

Źródło: Szczukowski i Stolarski 2013

Biomasa pozyskana z wierzby charakteryzuje się niską zawartością popiołu, siarki i chloru. Zawartość pierwiastka C przekracza 48%, ciepło spalania wynosi ponad 19 MJ/kg s.m., a wartość opałowa wynosi powyżej 8 MJ/kg. Wilgotność jest duża i wynosi około 50%. Średnia wysokość plonów wierzby *Salix* kształtuje się na poziomie 7,7 Mg s.m./ha/rok.

Na rysunku 4.10 przedstawiono fotografię wierzby wiciowej.

Charakteryzując biomasę z wierzby przyjmuje się, że zawiera ona średnio: C – 49,8%, O – 43,4%, H – 6,1%, N – 0,6%, S – 0,06%.



Rys. 4.10. Wierzba wiciowa (*Salix viminalis*)  
Źródło: Kowalczyk-Juśko 2012b

#### **Topola bujna (*Populus x candensis*)**

Topola bujna to odmiana topoli (*Populus L.*) charakteryzująca się szybkim wzrostem. To mieszaniec powstały w Polsce. Tworzy prosty pień, bez sęków, wytwarzający kanciaste pędy. Roślina osiąga wysokość od 20 do 40 m. Jest to najszybciej rosnące w naszym kraju drzewo, odporne na choroby (Szczukowski i in. 2012).

Obecnie wzrasta w Polsce zainteresowanie uprawą topoli. Trzeba podkreślić, że chcąc uzyskać zadowolające jej plony, plantacje topoli powinny być zakładane na stosunkowo żyznych glebach o dobrych warunkach powietrzno-wodnych. Ponadto problematyka planowania plantacji topolowych jest jeszcze mało rozpoznana (Szczukowski i Stolarski 2013).

Najlepszymi glebami dla tych drzew są gleby przewiewne, o dobrym stopniu napowietrzenia, gdzie wody gruntowe występują na głębokości 100–200 m. Pozyskiwanie biomasy z tego surowca następuje co 3 lub 4 lata. Pozytywną cechą topoli jest jej zdolność do bioakumulacji pierwiastków biogennych i metali ciężkich. Nowe drzewa topoli wyrastają z odrośli korzeniowych, mogą również rozmnażać się z fragmentów jednorocznych pędów rośliny. Eksploatacja plantacji trwa około 25–30 lat. Podczas zbioru zawartość wilgoci w drewnie wynosi około 53%, natomiast wartość ta stopniowo obniża się do 35% na skutek leżakowania surowca.

Biomasa topoli charakteryzuje się niską zawartością popiołu i siarki, wysokim ciepłem spalania, natomiast jej wartość opałowa w stanie wilgotnym wynosi około 10 MJ/kg.

Topola zawiera średnio: C – 51,6%, O – 41,7%, H – 6,1%, N – 0,6%, S – 0,02%, Cl – 0,03.



**Robinia (*Robinia pseudoacacia*)**

Robinia akacyjowa może być uprawiana na glebach suchych i zdegradowanych, dlatego też jest wykorzystywana przy zadrzewieniu nieużytków oraz do chronienia stoków przed erozją wodną. Roślina ta nadaje się do uprawy w krótkich rotacjach na cele energetyczne. Wysokość plonów kształtuje się różnie w różnych krajach, np. plantacje w Grecji od 2,90 do 8,98 Mg s.m./ha/rok (Szczukowski i Stolarski 2013).

## 5. WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOCHEMICZNE WYBRANYCH SUROWCÓW BIOMASOWYCH ORAZ PRZETWARZANIE BIOMASY ROŚLINNEJ NA BRYKIETY I PELETY

Wybór techniki i technologii uzyskiwania energii z biomasy zależy od stawianych wobec tego rodzaju paliwa wymagań, takich jak: wysoka sprawność cieplna, niska emisja zanieczyszczeń do atmosfery, mała ilość odpadów paleniskowych. Największy wpływ na wyżej wymienione wymagania mają następujące właściwości tego paliwa: skład chemiczny, wartość opałowa, zawartość wilgoci, zawartość części lotnych, zawartość popiołu, gęstość.

### 5.1. Właściwości fizykochemiczne wybranych surowców biomasowych

#### 5.1.1. Skład chemiczny

Skład chemiczny biomasy jest w głównej mierze zależny od jej rodzaju. Strukturę chemiczną biomasy w formie stałej można w sposób uproszczony przedstawić za pomocą następującego wzoru sumarycznego:  $C_1H_{1,45}O_{0,7}$  (Kubica 2003). Skład chemiczny biomasy wykorzystywanej na cele energetyczne jest jakościowo taki sam jak skład węgla. Różnice, jakie występują między tymi rodzajami paliw, polegają na zróżnicowa-

nych udziałach poszczególnych pierwiastków i związków chemicznych, z jakich się one składają (biomasę cechuje dwukrotnie mniejsza zawartość węgla i około czterokrotnie większa koncentracja tlenu). Przyczyną takiego składu biomasy jest wysoka zawartość części lotnych, a co za tym idzie, wysoka reaktywność. Ponadto zawiera ona duże ilości substancji alkalicznych, wapnia, fosforu, a w przypadku niektórych jej rodzajów, także wysoką zawartość chloru, co może niekorzystnie wpływać na warunki pracy kotła (korozja, powstawanie osadów). Natomiast jej pozytywną cechą, w stosunku do węgla, jest mniejsza zawartość popiołu i siarki.

Głównymi składnikami popiołów z biomasy są:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  i  $\text{K}_2\text{O}$  (Ściążko i in. 2007). W pierwiastkowym składzie chemicznym w malejącym porządku występują: C, O, H, N, Ca, K, Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn i Ti. Naturalna biomasa zawiera zazwyczaj znaczące ilości: Ca, Cl, H, K, Mg, Mn, Na, O i P w porównaniu do węgla (Vassilev i in. 2010).

Na podstawie samego składu chemicznego nie można bezpośrednio wnioskować o właściwościach fizycznych substancji, gdyż zależą one również od innych czynników, np. struktury krystalicznej.

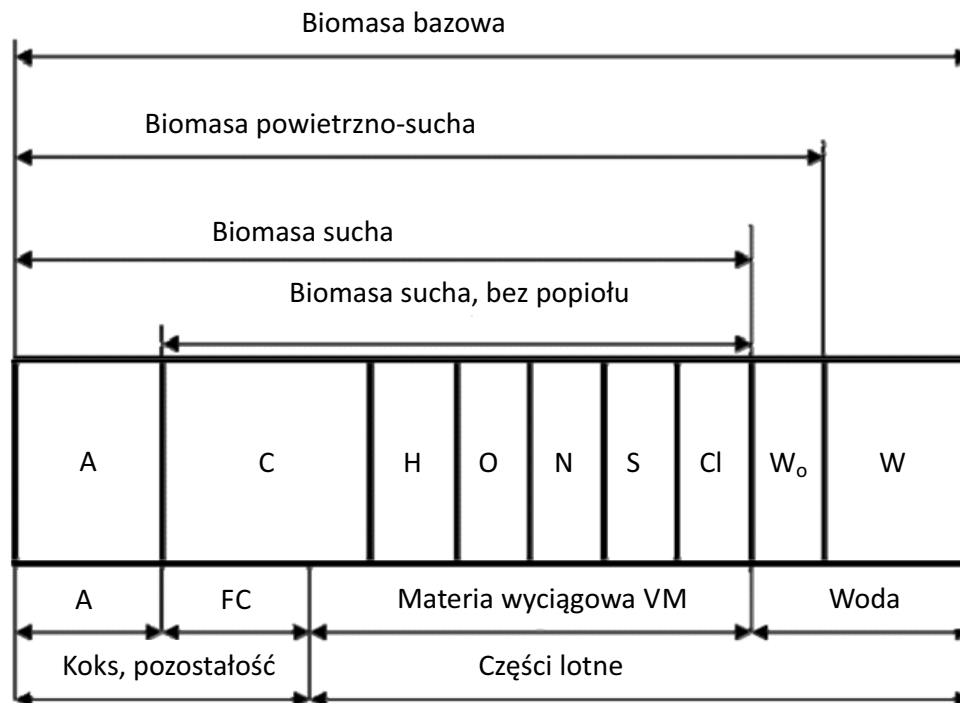
Podczas spalania należy dostarczyć, oprócz paliwa, odpowiednią ilość czynnika utleniającego (tlenu zawartego w powietrzu). Paliwo składa się z części palnej oraz balastu. Balastem jest wilgoć oraz substancja mineralna oraz gazowe składniki niepalne ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ).

Na rysunku 5.1 przedstawiono schemat ilustrujący strukturę składu chemicznego i biochemicznego biomasy z wyszczególnieniem rodzajów pierwiastków podstawowych. Przydatność paliwa do określonego procesu możemy określić po jego składzie chemicznym i fizycznym. Decydująca jest tutaj także zawartość wilgoci. Zawartość popiołu w paliwie niekorzystnie wpływa na jego wartość energetyczną oraz na przebieg spalania.

Poszczególne rodzaje biopaliw różnią się między sobą składem chemicznym, zawartością wilgoci, popiołu, jak również azotu, siarki i chloru. Przyczyną owych różnic pomiędzy poszczególnymi biopaliwami jest zróżnicowane zachowanie i oddziaływanie na paleniska kotłowe podczas ich spalania. Powinno zostać to uwzględnione w trakcie projektowania i eksploatacji kotłów spalających dany rodzaj biomasy, jak również urządzeń ochrony środowiska (Rybak 2006).

Skład biomasy zależy od różnych czynników, wśród których należy wymienić przede wszystkim (Vassiliev i in. 2010, 2012):

- rodzaj biomasy – gatunek rośliny lub część rośliny,
- proces wzrostu, w tym zdolności pobierania związków z wody, gleby i powietrza oraz do transportu i deponowania ich w tkankach roślinnych,
- warunki wzrostu (światło słoneczne, geograficzna lokalizacja, klimat, pora roku, rodzaj gleby (typ, pH, zawartość składników odżywczych), lokalizacji (skraj lasu, bliskość morza lub zanieczyszczonego obszaru),
- wiek roślin,
- zastosowane nawozy i pestycydy,
- odległość od źródeł zanieczyszczeń (autostrady, miasta, fabryki i kopalnie),
- czas i technika zbioru, a także warunki transportu i przechowywania,



Rys. 5.1. Struktura składu chemicznego i biochemicznego biomasy

Objaśnienia: analiza elementarna C+H+O+N+S+Cl+W; analiza techniczna VM+FC+W+A;  
 VM – produkty bez wody, wydzielone z gazami (parami) według określonej metody, zależnie od biomasy; FC – węgiel związany; A – popiół, C – węgiel, H – wodór, O – tlen, N – azot, S – siarka, Cl – chlor, W<sub>o</sub> – woda wewnętrzna, W – woda zewnętrzna

Źródło: Roszkowski 2013

- zanieczyszczenie kurzem, brudem, glebą podczas zbierania, transportem i przenoszeniem biomasy,
- mieszanie różnych rodzajów biomasy.

Typowe składy i właściwości niektórych biopaliw stałych zostały zawarte w tabeli 5.1.

Skład chemiczny biomasy w zależności od grupy (Vassilev i in. 2010) może różnić się biorąc pod uwagę zawartość głównych składników (tab. 5.2).

Biorąc pod uwagę średnią zawartość najczęściej występujących tlenków w składzie chemicznym biomasy, można je przedstawić w malejących wartościach dla każdej grupy i podgrupy (Vassilev i in. 2010):

- drewno i biomasa drzewna:  $\text{CaO} > \text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{P}_2\text{O}_5$ ,
- biomasa zielna, rolnicza i trawy:  $\text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- słoma:  $\text{SiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- biomasa zielna i rolnicza – odpady:  $\text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3$ .

Tabela 5.1. Analiza techniczna i elementarna biomasy

Składnik	Jednostka	Słoma żółta	Słoma szara	Zrębki	Granulaty/ brykiety	Wierzba
Wilgość	%	10–20	10–25 g	20–50	7–12	50–60
Części lotne	%	70–80	70–80	76–86	> 70	> 70
Popiół	%	5	3	0,8–1,4	0,4–1,5	1,1–4,0
C*	%	45–48	43–48	47–52	48–52	47–51
H	%	5–6	5–6 g	6,1–6,3	6–6,4	5,8–6,7
O	%	36–48	36–48	38–45	40	40–46
Cl	%	0,97	0,14	0,02	0,02–0,04	0,02–0,05
N	%	0,3–0,6	0,3–0,6	< 0,3	0,3–0,9	0,2–0,8
S	%	0,05–0,2	0,05–0,2	< 0,05	0,04–0,08	0,02– 0,1
K	%	1,3	0,7	0,02	n.o.	0,2–0,5
Ca	%	0,6	0,1	0,04	n.o.	0,2–0,7
Ciepło spalania	MJ/kg	17,4	17,4	19,2–19,4	16,–19	18,4–19,2
Gęstość	kg/m <sup>3</sup>	100–170	100–170	250–350	500–780	120
Temp. topliwości	°C	800–1 000	800–1 000	1 000–1 400	> 1 120	n.o.

\* Analiza pierwiastkowa w przeliczeniu na stan suchy paliwa

Źródło: Rybak 2006

Tabela 5.2. Zawartość składników w biomacie z uwzględnieniem grup i podgrup

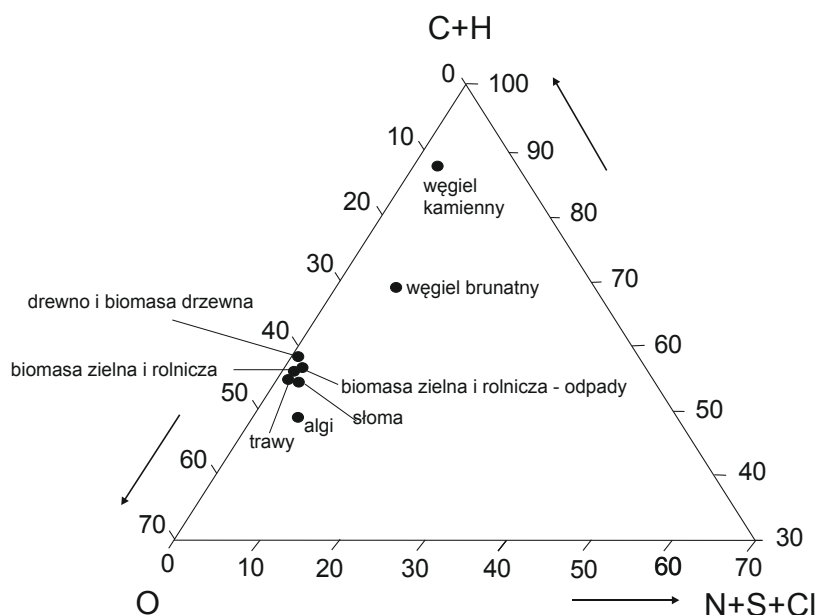
Grupy i podgrupy biomasy	Wysoka zawartość	Niska zawartość
Drewno i biomasa drzewna	CaO, M, MgO, Mn, części lotne	A, Cl, N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , S, SiO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
Biomasa zielna i rolnicza: – trawy – słoma – inne odpady	węgiel związany, K <sub>2</sub> O, O, części lotne, K <sub>2</sub> O, O, SiO <sub>2</sub> , Cl, K <sub>2</sub> O, O, SiO <sub>2</sub> węgiel związany, K <sub>2</sub> O, MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	C, H, CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C, CaO, H, Na <sub>2</sub> O C, H, Na <sub>2</sub> O Cl

Źródło: Vassilev i in. 2010

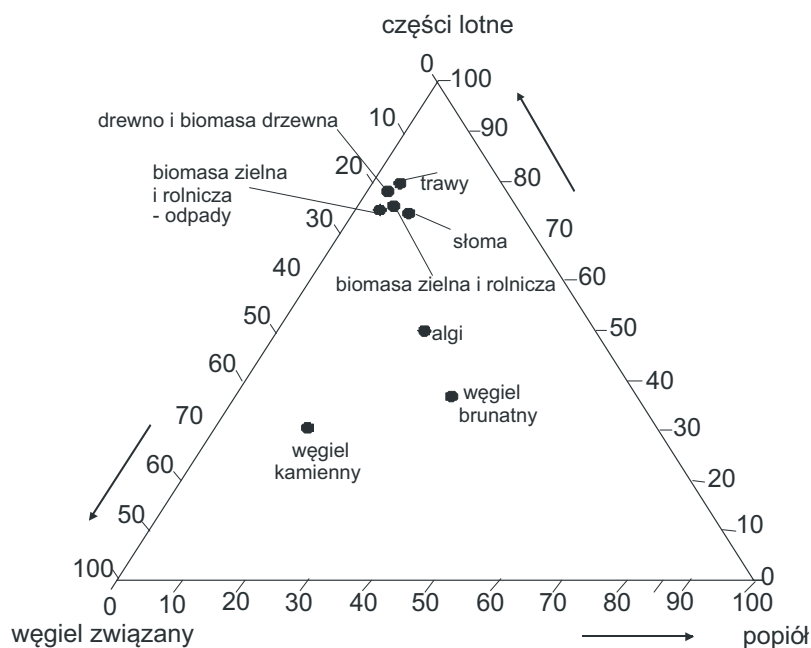
Na rysunku 5.2 zamieszczono porównanie średniego składu różnych rodzajów biomasy i węgla, natomiast na rysunku 5.3 – średniego składu w zakresie: zawartości popiołu, części lotnych i węgla związanego oraz różnych rodzajów biomasy i węgla (kamiennego i brunatnego).

Biomasa jest to złożona heterogeniczna mieszanina materii organicznej i, w mniejszym stopniu, materii nieorganicznej, zawierająca różne cząstki stałe i płynne (tab. 5.3).

Fazy w biomacie pochodzą z procesów naturalnych i antropogenicznych. Procesy naturalne – podczas uprawy roślin generowane przez procesy biogeniczne rosnących roślin (fotosynteza, dyfuzja, adsorpcja, osmoza, pinocytoza, endocytoza, hydroliza, strącanie, inne) oraz po zwiędnięciu – powstały w wyniku naturalnych procesów po zwięd-



Rys. 5.2. Porównanie średniego składu różnych rodzajów biomasy i węgla  
Źródło: Vassilev i in. 2010



Rys. 5.3. Porównanie średniego składu w zakresie: zawartości popiołu, części lotnych i węgla związanego, różnych rodzajów biomasy i węgla  
Źródło: Vassilev i in. 2010

Tabela 5.3. Skład fazowy biomasy

Materia	Stan i typ składników	Fazy i składniki
Materia organiczna	stałe, niekrystaliczne	składniki strukturalne: celuloza, hemiceluloza, lignina, substancje ekstrakcyjne, inne
	stałe, krystaliczne	minerały organiczne, takie jak: szczawiany Ca-Mg-K-Na, inne
Substancje nieorganiczne	stałe, krystaliczne	gatunki mineralne z: fosforanów, węglanów, krzemianów, chlorków, siarczanów, tlenowodorotlenków, azotanów i innych
	stałe, półkrystaliczne	słabo skryształizowane mineraloidy niektórych krzemianów, fosforanów, wodorotlenków i innych
	stałe, bezpostaciowe	fazy amorficzne, takie jak: różne szkła, krzemiany, inne
Płynna materia	płynny, gazowy	wtrącenia wilgoci, gazu oraz gazu i cieczy związane zarówno z materią organiczną, jak i nieorganiczną

Źródło: Vassilev i in. 2010, 2012

nięciu (odparowanie, opad atmosferyczny), a także utworzone poza biomasą – przed sadzeniem roślin (istniejące i dobrze zdyspergowane ziarna mineralne (zwykle  $<1 \mu\text{m}$ ) wprowadzane do roślin przez zawiesiny wodne podczas endocytozy, a także drobnoziarniste cząstki (zwykle  $<10\text{--}100 \mu\text{m}$  przez wodę i wiatr na powierzchni roślin). Antropogeniczne – tworzone na zewnątrz lub wewnątrz biomasy i włączone do biomasy, podczas i po zebraniu roślin (składniki naturalne i/lub przemysłowe (pył, materiały, dodatki, zanieczyszczenia, inne) wprowadzone w biomasie podczas zbierania, obróbki, transportu i kolejnych etapów przetwarzania) (Vassilev i in. 2010, 2012).

Obecnie wykorzystuje się znaczną liczbę nowych rodzajów biomasy do spalania, bądź współspalania w energetyce. Różnorodność oferowanej dla energetyki biomasy wymaga dokładnego poznania jej właściwości oraz wpływu na proces i instalację. Dlatego też niezbędna jest kontrola parametrów jakościowych biomasy. W tabeli 5.4 przedstawiono wartości podstawowych parametrów jakościowych ( $W_t^r$  – zawartość wilgoci całkowitej w stanie roboczym,  $Q_t^r$  – wartość opałowa w stanie roboczym,  $A^d$  – zawartość popiołu w stanie suchym,  $C_t^d$  – zawartość węgla całkowitego w stanie suchym) dla różnych rodzajów biomasy pochodzących zarówno z upraw rolnych, jak również z produkcji rolnej i przetwórstwa produktów rolnych.

W tabeli 5.5 przedstawiono właściwości (udział masowy: węgla, wodoru, tlenu, azotu, siarki, chloru; zawartość popiołu; zawartość części lotnych; wartość opałowa) różnych rodzajów biomasy: słomy, ziarna zbóż, roślin zbożowych, jak również siana, drewna popularnych drzew liściastych i iglastych.

Zawartość takich pierwiastków jak: siarka, azot, chlor w paliwie jest niepożądana ze względu na ich szkodliwe działanie na środowisko przyrodnicze. Ponadto chlor i siarka wywołują korozję urządzeń stosowanych w procesach spalania.

Tabela 5.4. Podstawowe parametry charakteryzujące przydatność paliwa do celów energetycznych

Rodzaj biomasy	Parametr			
	zawartość wilgoci $W_t^r$ [%]	wartość opałowa $Q^r$ [MJ/kg]	zawartość popiołu $A^d$ [%]	zawartość węgla $C_t^d$ [%]
Wierzba energetyczna	4,5–52,9	7,0–19,2	0,3–10,8	49,0–53,8
Ślaziolec pensylwański	6,9–13,6	14,5–16,1	2,2–4,5	47,8–49,9
Miskant	7,7–31,0	11,1–16,1	1,6–5,1	47,4–49,9
Sorgo	12,0–81,6	1,1–10,9	6,6–44,4	27,2–46,7
Palma olejowa	2,5–17,7	14,9–24,5	1,2–6,5	48,6–59,1
Kukurydza – kolby	9,1–45,5	6,9–17,0	1,9–21,2	40,5–49,5
Słoma rzepakowa	10,1–17,3	13,0–15,4	4,0–10,2	46,0–49,6
Łuski słonecznika	6,0–41,0	10,0–19,3	2,6–11,2	50,7–53,8
Susz owocowy	12,2–82,2	1,6–16,4	0,9–4,4	50,4–54,2
Wytłoki z oliwek	5,1–53,8	8,5–17,4	3,2–12,4	49,1–52,1
Wysłodki buraczane	9,9–11,9	13,4–15,0	3,7–9,5	44,9
Łuski kakaowca	7,6–12,3	14,9–18,4	1,7–10,1	47,3–54,5
Łupiny kokosa	9,0–20,5	16,0–16,9	0,5–2,5	53,0–53,9
Nanercz zachodni	6,1	21,7	2,8	58,7

Źródło: Jagustyn i in. 2011

Tabela 5.5. Właściwości wybranych rodzajów biomasy

Wielkość	Udział masowy składnika [kg s.m.i./kg s.m.]						Popiół [kg/kg paliwa]	Części lotne [% s.m.]	Wartość opałowa $W^d$ [MJ/kg s.m.]
	C	H	O*	N	S* $10^{-3}$	Cl* $10^{-3}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Słoma									
Słoma zbóż (mieszana) – ogółem	0,451	0,059	0,425	0,005	0,737	2,503	0,057	76,2	17,2
Słoma żytnia	0,466	0,060	0,419	0,006	0,848	3,961	0,048	76,4	17,5
Słoma pszeniczna	0,456	0,058	0,421	0,005	0,818	1,922	0,057	77,0	17,2
Słoma pszenżyta	0,439	0,059	0,435	0,004	0,556	2,653	0,060	75,2	17,1
Słoma jęczmienna	0,475	0,059	0,456	0,005	0,888	4,046	0,048	77,3	17,5
Słoma kukurydziana	0,457	0,053	0,433	0,007	1,167	3,533	0,067	76,8	17,7
Słoma rzepakowa	0,471	0,059	0,393	0,008	2,703	4,668	0,062	75,8	17,1
Łodygi słonecznika	0,425	0,051	0,381	0,011	1,464	8,131	0,122	72,7	15,8
Słoma lnu	0,470	0,059	0,415	0,007	1,241	3,689	0,044	74,8	17,8



Tabela 5.5. cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ziarno									
Ziarno zbożowe (ogółem)	0,443	0,064	0,449	0,019	1,058	0,863	0,023	80,8	17,0
Ziarno żyta	0,457	0,064	0,437	0,019	1,078	1,606	0,020	80,9	17,1
Ziarno pszenicy	0,436	0,065	0,447	0,023	1,205	0,426	0,027	80,0	17,0
Ziarno pszenżyta	0,435	0,064	0,461	0,017	1,067	0,692	0,021	81,0	16,9
Ziarno rzepaku	0,605	0,072	0,237	0,039	1,000	-	0,046	85,2	26,5
Całe rośliny									
Rośliny zbożowe (ogółem)	0,453	0,061	0,429	0,012	1,370	1,807	0,042	78,2	17,1
Żyto	0,480	0,058	0,404	0,011	1,123	3,420	0,042	79,1	17,7
Pszenica	0,452	0,064	0,427	0,014	1,197	0,857	0,041	77,6	17,1
Pszenżyto	0,440	0,060	0,442	0,011	1,795	1,401	0,044	78,2	17,0
Siano łąkowe i specjalne uprawy trawy	0,451	0,059	0,397	0,013	1,650	7,588	0,071	74,2	17,1
Trzcina	0,414	0,063	0,423	0,009	1,416	4,983	0,085	72,0	16,4
Trawa łąkowa	0,461	0,056	0,367	0,013	1,350	13,900	0,088	74,8	16,5
Konopie (włókno konopne ÷ słoma)	0,461	0,059	0,422	0,007	1,034	1,981	0,048	81,4	17,0
Specjalne									
Siano ze zbiorów pielęgnacyjnych	0,455	0,061	0,411	0,011	1,281	3,112	0,057	75,4	17,4
Trawa z koszenia poboczy dróg	0,371	0,051	0,321	0,015	1,923	8,771	0,231	61,7	14,1
Drewno popularnych drzew liściastych A	0,500	0,063	0,428	0,010	0,234	0,087	0,008	82,0	18,8
Drewno popularnych drzew liściastych B	0,478	0,062	0,448	0,001	0,402	0,167	0,006	83,2	18,4
Drewno świerkowe z korą	0,497	0,063	0,433	0,001	0,190	0,970	0,006	82,9	18,8
Drewno sosnowe z korą	0,532	0,059	0,403	0,001	0,600	0,050	0,004	81,3	19,2
Drewno bukowe z korą	0,479	0,062	0,4517	0,002	0,201	0,070	0,005	84,0	18,4

Źródło: Głodek 2010

W tabeli 5.6 przedstawiono jakość biomasy z pięcioletnich pędów wierzby *Salix viminalis* pozyskanej w systemie Eko-Salix (Szczukowski i Stolarski 2013). Drewno wierzby pozyskanej w takim cyklu charakteryzuje się niską zawartością popiołu i siarki, wysoką wartością opałową oraz korzystnym składem elementarnym.

Tabela 5.6. Jakość biomasy pozyskanej z pięcioletnich pędów wierzby *Salix viminalis*

Wyszczególnienie	Jednostka	Wielkość		
		min.	maks.	średnio
Zawartość węgla	%	48,3	49,0	48,6
Zawartość wodoru	%	5,5	6,1	5,8
Zawartość siarki	%	0,03	0,04	0,04
Zawartość azotu	%	0,35	0,55	0,42
Zawartość chloru	%	0,02	0,04	0,03
Zawartość popiołu	%	1,07	1,54	1,32
Wilgotność biomasy (zbiór)	%	48,3	51,2	50,0
Ciepło spalania (sucha masa)	MJ/kg s.m.	19,5	19,8	19,6
Wartość opałowa (świeża masa)	MJ/kg	8,3	9,0	8,6

Źródło: Szczukowski i Stolarski 2013

W tabeli 5.7 przedstawiono jakość biomasy topoli, którą pozyskiwano w trzyletniej rotacji (Szczukowski i Stolarski 2013). Wartość energetyczna topoli jest zróżnicowana – zależy od zawartości kory w biomacie, a ta z kolei od wieku drzewa i jego średnicy. Udział kory w biomacie decyduje o zawartości popiołu w tym paliwie.

Tabela 5.7. Jakość biomasy topoli pozyskiwanej w trzyletniej rotacji

Wyszczególnienie	Zawartość [% s.m.]					Wilgotność [%]	Ciepło spalania [G]/[Mg]	Wartość opałowa [G]/[Mg]
	C	H	S	N	popiół			
Ultra 1	49,05	5,14	0,043	1,10	2,62	52,62	20,01	9,48
Ultra 2	50,71	5,22	0,029	0,59	2,03	52,76	20,32	9,60
Ultra 3	49,40	5,16	0,032	0,68	2,67	52,20	20,02	9,57
Ultra 4	49,16	5,28	0,030	0,71	2,54	51,96	19,86	9,54
Średnio	49,58	5,20	0,034	0,77	2,47	52,39	20,05	9,55

Źródło: Szczukowski i Stolarski 2013

W tabeli 5.8 zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych wybranych pierwiastków w kolejnych częściach drzewa. Badania te zostały przeprowadzone na 95- i 33-letnim

drzewostanie sosnowym z podziałem na: drzewo strzałowe, korę strzały, gałęzie, igliwie i karpę (Gornowicz i Pilarek 2013).

Tabela 5.8. Średnia zawartość wybranych pierwiastków w badanych częściach drzew (% s.m.)

Część drzewa	Pierwiastek				
	azot N	fluor F	potas K	wapń Ca	magnez Mg
Drewno strzały	0,1108–0,2012	0,0117–0,0197	0,0125–0,0308	0,0925–0,2227	0,0157–0,0217
Kora strzały	0,3243–0,3803	0,0150–0,0307	0,0697–0,1218	0,4608–0,7867	0,0307–0,0617
Gałęzie	0,1695–0,3513	0,0140–0,0453	0,0483–0,1523	0,1287–0,2883	0,0160–0,0453
Igliwie	1,2107–1,5750	0,1233–0,2815	0,4108–0,5933	0,1577–0,3800	0,0417–0,0718
Karpa	0,1435–0,1937	0,0138–0,0207	0,0295–0,0753	0,0478–0,0755	0,0065–0,0223

Źródło: Gornowicz i Pilarek 2013

W przypadku azotu największa jego zawartość jest w igliwiu i kształtuje się od 1,2107% s.m. (drzewostan 95-letni) do 1,5750% s.m. (drzewostan 33-letni), a więc zależy od wieku drzewa.

Zawartość średnia fosforu w poszczególnych częściach drzewa kształtuje się różnie; większa zawartość jest w drewnie strzał drzew młodszych, a niska w korze. Odwrotna kolejność zawartości tego pierwiastka jest w korze i igliwiu; maksymalna w drzewach starszych, minimalna w drzewach młodszych.

Największa zawartość potasu jest w igliwiu i wynosi od 0,4108 (drzewostan 95-letni) do 0,5933% (drzewostan 33-letni). Wiek drzewa ma jednak decydujący wpływ na zawartość tego pierwiastka w badanych częściach drzewa.

W przypadku wapnia największa jego zawartość występuje w korze drzewa, natomiast największą zawartość magnezu stwierdzono w igliwiu i wahała się ona w granicach 0,0417–0,0718% s.m. Zawartość magnezu w gałęziach i karpi zależna była od wieku drzew – większa dla młodszego drzewostanu.

### 5.1.2. Wartość opałowa

Wartość opałowa jest to ilość ciepła wydzielająca się przy spalaniu jednostki masy lub jednostki objętości substancji palnej podczas jego całkowitego i zupełnego spalania, przy czym produkty zostają ochłodzone do temperatury substratów, a para wodna zawarta w spalinach nie ulega wykropleniu (Wandrasz J. i Wandrasz A. 2006).

W przypadku biomasy parametr ten uzależniony jest w głównej mierze od zawartości wilgoci, gęstości surowca, a także od rodzaju biomasy (jej składu), jak i sposobu

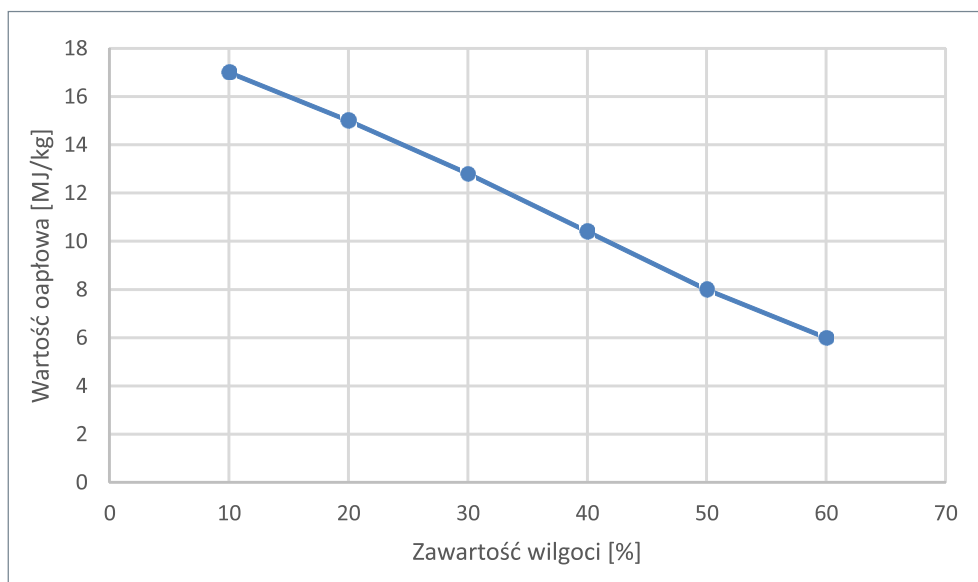
przygotowania paliwa. Do obliczenia wartości opałowej paliwa należy znać procentowe zawartości składników palnych. Dla biomasy i materiałów pochodnych można wykorzystać następującą zależność (Głodek 2010):

$$Q^d = 341 C + 1322 H - 120 (O + N) - 15,3 A + 68,6 S \text{ [kJ/kg]} \quad (5.1)$$

gdzie:

- $Q^d$  – wartość opałowa w stanie suchym [kJ/kg],  
 C, H, O, N, A, S – zawartość węgla, wodoru, tlenu, azotu, popiołu i siarki w paliwie [% masowych].

Na rysunku 5.4 przedstawiono zależność wartości opałowej drewna od zawartości wilgoci całkowitej w nim zawartej.



Rys. 5.4. Zależność wartości opałowej drewna od zawartości wilgoci całkowitej

Źródło: Zuwała i Ściężko 2007

Jak wynika z powyższego rysunku, wraz ze wzrostem udziału wilgoci całkowitej w paliwie, jego wartość opałowa maleje. Wartość opałowa biomasy w zależności od jej rodzaju i zawartości wilgoci waha się w granicach od 5000 do 19 000 kJ/kg [8], np. wartość opałowa odpadów drzewnych mokrych (o naturalnej wilgotności na poziomie 55–60%) wynosi zaledwie 6–9 MJ/kg, natomiast po podsuszeniu do stanu powietrzno-suchego (wilgotność 15–20%) wzrasta do 15–17 MJ/kg. Wartość opałowa biomasy (średnio 13 MJ/kg) jest prawie dwukrotnie mniejsza niż wartość opałowa węgla (około

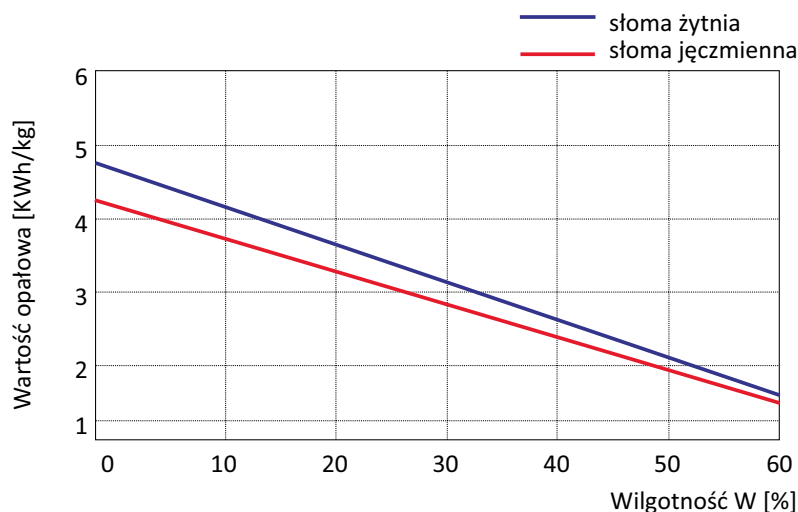
25 MJ/kg) i dlatego przyjmuję się, że 1 Mg węgla kamiennego jest równoważny 2 Mg suchej biomasy, natomiast 1 m<sup>3</sup> biogazu jest energetycznie równoznaczny 1 kg węgla (Ściążko i Zieliński 2003).

### 5.1.3. Zawartość wilgoci

Zawartość wilgoci jest jednym z podstawowych parametrów określających przydatność paliwa do celów technologicznych. W sposób istotny wpływa na kaloryczność paliwa i odgrywa znaczącą rolę w procesie spalania, nie bez znaczenia jest również przy ocenie możliwości sprzedaży i składowania. Wilgoć gromadzi się głównie w materiałach porowatych (w porach i kapilarach), a zależna jest między innymi od rodzaju paliwa czy sposobu jego magazynowania (Wandrasz J. i Wandrasz A. 2006).

Wilgoć obecna w biomase jest podstawowym parametrem wpływającym na jej wartość opałową, a co za tym idzie, na jej cenę. Niekorzystną cechą biomasy jest jej wysoka (nawet do 50%) i zmienna (w zależności od rodzaju biomasy i okresu jej sezonowania) zawartość wilgoci.

Na rysunku 5.5 przedstawiono zależność wartości opałowej od wilgotności dla słomy żytniej i jęczmiennej. Słoma żytnia ma większą wartość opałową niż słoma jęczmienna.



Rys. 5.5. Zależność wartości opałowej od wilgotności dla słomy żytniej i jęczmiennej  
Źródło: Głodek 2010

Wilgoć wpływa również na przebieg samego procesu spalania, powodując powiększenie objętościowego strumienia spalin. Spalanie paliw o dużej zawartości wilgoci

może spowodować obniżenie temperatury spalania, co wpływa niekorzystnie na sam proces, gdyż utrudnia dopalenie paliwa. Mogą pojawić się duże straty związane z niepełnym i niecałkowitym spalaniem, co konsekwencji prowadzi do zwiększenia emisji substancji szkodliwych (Gebler 2004).

#### **5.1.4. Zawartość części lotnych**

Części lotne są to składniki substancji lotnych biomasy, które wydzielają się przy podgrzewaniu paliwa powyżej 100°C. Cechą charakterystyczną biopaliw stałych jest duża zawartość części lotnych. Około 67% energii cieplnej doprowadzanej z paliwem wydzielają się w czasie spalania części lotnych. Dlatego efektywne spalanie tego typu paliw wymaga specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych komór spalania, m.in. powietrze do spalania wprowadzane jest powyżej złoża paliwa, tam gdzie pojawiają się części lotne.

Szczególnie kłopotliwe jest współspalanie biomasy z węglem kamiennym. Relatywnie duża zawartość części lotnych w porównaniu z węglem kamiennym (przeciętnie 70–80%, a węgle 10–50%) w istotny sposób komplikuje proces współspalania.

#### **5.1.5. Zawartość popiołu**

Popiół jest produktem wtórnym, otrzymanym przez działanie wysokiej temperatury na substancje mineralne biomasy. Zawartość popiołu w biomacie jest znacznie mniejsza od zawartości popiołu w większości węgla, natomiast skład chemiczny i mineralny popiołów jest znacząco różny. Popiół pochodzący z biopaliw stałych zawiera duże ilości składników alkalicznych, przede wszystkim soli sodu i potasu. Związki te powodują znaczne obniżenie temperatury topności popiołu (tab. 5.9).

Popioły ze spalania biomasy cechują się niższymi temperaturami mięknięcia (zwykle od 750 do 1000°C), podczas gdy dla popiołów z większości węgla wynoszą około 1000°C i więcej. Zmianę temperatury mięknięcia popiołu można odnotować nawet przy stosunkowo niewielkich udziałach masowych współspalanej biomasy. Zwiększeniu ulega wówczas szybkość narastania osadów na powierzchniach ogrzewalnych kotłów zarówno z powodu niższej temperatury mięknięcia popiołu spalanej mieszanki węgla – biomasa, jak i w wyniku przesunięcia składu chemicznego w kierunku związków o większej skłonności do osadzania się na powierzchniach ogrzewalnych. Rezultatem tego procesu jest wzrost temperatury spalin wylotowych, a co za tym idzie – obniżenie sprawności brutto kotła w przypadku spalania mieszaniny węgla z biomasą w porównaniu do sprawności uzyskiwanej podczas spalania samego węgla.

Tabela 5.9. Temperatury mięknięcia, topnienia i płynięcia substancji palnych (°C)

Rodzaj substancji palnej	Temperatura			
	początek spiekania	mięknięcia	topnienia	płynięcia
Drewno iglaste	1 171	1 389	1 521	1 530
Drewno liściaste	1 190	1 265	1 310	1 420
Słoma zbożowa ogólnie	931	960	1 162	1 214
Słoma żytnia	935	1 002	1 147	1 188
Słoma pszeniczna	1 008	998	1 246	1 302
Słoma jęczmienna	720	980	1 130	1 173
Słoma rzepakowa	1 120	1 273	1 460	1 403
Słoma kukurydziana	930	1 050	1 120	1 140
Siano łąkowe	852	918	1 160	1 207
Miskant cukrowy	760	>1 500	>1 500	>1 500
Ślazowiec pensylwański	680	740	>1 500	>1 500
Słonecznik bulwiasty	620	690	960	1 120
Róża bezkolcowa	730	>1 500	>1 500	>1 500
Węgiel gazowy	-	1 290	1 500	1 530
Węgiel brunatny młody		1 120	1 380	1 430

Źródło: Głodek 2010; Kowalczyk-Juśko 2009

W niektórych technologiach popiół spełnia pozytywną rolę. W piecach opalanych biomasą warstwa popiołu w dolnej części pieca akumuluje część ciepła i tworzy powierzchnię nagrzewania, oddając ciepło do końcowego etapu spalania – dopalania koksu. W palenisku rusztowym obecność warstwy popiołu na powierzchni rusztu chroni rusztowiny przed nadmiernym promieniowaniem płomienia.

### 5.1.6. Gęstość biomasy

Gęstość jest to stosunek masy do objętości (w przypadku substancji jednorodnych).

Gęstość drewna zależy od wielu czynników takich jak: gatunek i budowa drewna, wilgotność, miejsce na przekroju i długości strzały, warunków siedliskowych i wzrostu drzewa. Istotny wpływ na gęstość ma wilgotność drewna, w związku z czym, wyróżnia się w przypadku drewna (tab. 5.10):

- gęstość drewna suchego o wilgotności 0%,
- gęstość drewna w stanie powietrzno-suchym, w Polsce przyjmuje się wilgotność 15%,

- gęstość drewna bezpośrednio po ścięciu, a więc drewna o największej zawartości wody.

Gęstość biomasy mieści się w zakresie wartości od 50 kg/m<sup>3</sup> dla słomy do 800 kg m<sup>3</sup> dla drewna (tab. 5.10 i 5.11). Natomiast dla węgla brunatnego wielkość ta wynosi od 800 do 1200 kg/m<sup>3</sup> dla węgla kamiennego.

Mała gęstość energetyczna biomasy powoduje określone kłopoty transportowe i konieczność użycia dużych powierzchni do składowania.

W odniesieniu do biomasy i innych paliw stosowanych w energetyce ogromne znaczenie ma również gęstość usypowa, która definiowana jest jako masa jednostki objętości materiału uziarnionego, luźno nasypanego. Gęstość nasypowa zależy od wielu czynników takich jak: rodzaj paliwa, jego uziarnienie, zawartość zanieczyszczeń czy zawartość wilgoci. Parametr ten może ulegać zmianom w zależności od sposobu przechowywania i od stanu, w jakim występuje dany surowiec.

Biomasa posiada dużo mniejszą gęstość nasypową niż węgiel, a to wymaga większych powierzchni magazynowych i ponosi za sobą wyższe koszty transportowe. Dlatego też biomasę należy poddać procesowi brykietowania (tab. 5.10). Wtedy też biomasa staje się paliwem niewiele odbiegającym wartością opałową od gorszych sortymentów węgla kamiennego. Z powodu małej gęstości biopaliwa stałe generalnie źle się dozują do paleniska. Mogą wystąpić problemy z blokowaniem systemu dozowania i utratą ciągłości podawania paliwa.

Tabela 5.10. Gęstość biomasy i paliw kopalnych, kg/m<sup>3</sup> suchej masy

Substancja	Gęstość nasypowa
Drewno	
Drewno iglaste metrowe	284
Drewno liściaste metrowe	396
Zrębki drewna iglastego	166
Zrębki drewna liściastego	232
Pelety drewniane	528
Trociny	160
Słoma – bele okrągłe	88
Słoma – duże prostopadłościennne bele	94
Sieczka siana ze stogów	122
Sieczka	50
Węgiel brunatny	562
Brykiety węgla brunatnego	700–725
Węgiel kamienny	816
Brykiety węgla kamiennego	980–1 080

Źródło: Głodek 2010



W tabeli 5.11 zamieszczono gęstości różnych rodzajów drzew dla trzech stanów: po ścięciu drzewa, przy zawartości wilgoci w granicach 12–15%, w stanie suchym oraz trzech poziomów wartości: minimalny, średni, maksymalny.

Tabela 5.11. Gęstość drewna ( $\text{kg/m}^3$ )

Rodzaj drzewa	Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ] [min.-śr.-maks.]		
	w stanie zupełnie suchym	przy wilgotności 12–15%	po ścięciu
Brzoza	460-610-800	510-650-830	800-850-900
Buk	490-680-880	540-720-910	820-1 070-1 270
Cis	610-640-740	640-670-810	ok. 1 160
Daglezja	320-470-730	350-510-750	640-700
Dąb	390-650-930	430-690-960	900-1 150
Grab	410-650-820	540-830-860	660-970-1 200
Jesion	450-650-860	450-650-860	600-800-1 140
Jodła	320-410-710	350-450-750	800-900
Lipa	320-490-560	350-530-600	580-880
Modrzew	404-550-820	440-590-850	800-900
Olcha	450-510-600	490-550-640	800-850-930
Orzech	450-640-750	570-680-810	900-1 000
Osika	360-450-560	400-490-600	610-810-990
Platan	380-580-650	420-620-680	820-832-850
Sosna	300-490-860	330-510-890	750-820-850
Świerk	300-430-640	340-470-680	700-800-850
Wiąz	440-640-820	480-680-850	750-990

Źródło: Głodek 2010

## 5.2. Przetwarzanie biomasy pochodzenia roślinnego na brykiety i pelety

Proces otrzymywania biopaliw stałych składa się z kilku etapów, które obejmują okres wzrostu roślin, ich pielęgnacji i zbioru.

Drewno jest kluczowym paliwem stosowanym w celach energetycznych. Obejmuje różne rodzaje biopaliw, które są uzyskiwane ze ściętych drzew, krzewów i innych roślin drzewiastych, jak również sortymenty powstałe w wyniku obróbki tych surowców.

Kierując się stanem występowania, drewno możemy podzielić na (Rybak 2006):

1. Drewno nieprzerobione:

a) drewno opałowe – pozyskiwane przede wszystkim z drzew w wyniku ich przycinania. Do grupy tej należą: kłocki, kłody, polana i kawałki powstałe wskutek cięcia korzeni i pni drzew. Wymiary gotowego drewna opałowego wynoszą: 15–35 cm długości i 6–8 cm grubości. W celu określenia ilości tego surowca podaje się najczęściej jego objętość.

Drewno opałowe może być magazynowane w postaci:

- kawałków pni, polan, kłód,
- długich kłód i pni,
- zrębków i kawałków w luźno upakowanej formie;

b) paliwo rozbijane;

c) paliwo rozgniatane w młynie bijakowym lub zgniataczu rolkowym;

d) zrębki paliwowe – czyli rozdrobnione drewno o wymiarach: 2–5 cm długości i około 1 cm grubości. Pochodzenie zrębków jest bardzo zróżnicowane, pozyskuje się je w wyniku wycinania obumarłych plantacji sosny, z wycinania drzew zasadzonych dla ochrony innych roślin przed chwastami, czy też z plantacji roślin energetycznych. Zrębki mają różną zawartość wilgoci w zależności od sposobu ich pozyskania. Ponadto zrębkowanie przynosi wiele korzyści:

- pozwala na wykorzystanie rozmaitych odpadów pochodzenia drzewnego,
- proces zrębkowania wymaga małych nakładów energii,
- zrębki są stosunkowo tanie w porównaniu z peletami czy brykietami.

2. Drewno przerobione:

- pył drzewny o wielkości cząstek mniejszych od 1 mm,
- trociny – wielkość cząstek od 1 do 5 mm,
- brykiety – powstałe w skutek sprasowania rozdrobnionego materiału drzewnego, których wielkość przekracza 25 mm,
- pelety – wytwarzane w sposób podobny do brykietów, z tym że ich wielkość nie przekracza 25 mm.

Wytwarzanie paliw drzewnych składa się z następujących etapów (Rybak 2006):

- zrywka i układanie w stosy pozostałości pozrębowych,
- pokrycie stosów specjalnym papierem, w celu ochrony surowca przed opadami atmosferycznymi,
- zrębkowanie, a następnie załadunek zrębek do kontenerów,
- transport poza drogami,
- magazynowanie (w lesie),
- transport drogowy.

Ścinka drzew odbywa się w trzech pierwszych miesiącach roku, kiedy to zawartość wilgoci w drewnie osiąga najniższy poziom. Następnie drewno jest magazynowane w lesie, aż do okresu letniego, w wyniku czego zawartość wilgoci zmniejsza się z pozio-

mu 50–55% do około 35–45%. Ścinki drzew dokonuje się za pomocą pił łańcuchowych lub pił samojezdnych. Zrębkowanie prowadzi się przy użyciu rębaków różnego rodzaju (talerzowych, śrubowych, bębnowych) (Rybak 2006).

Brykiety i pelety z biomasy powstają wskutek prasowania wiórów, trocin i pyłu drzewnego. Wskutek kompaktowania biomasy wzrasta jej gęstość, zmniejsza się zawartość wody i podnosi się koncentracja energii w jednostce objętości tego paliwa (Stolarski 2004).

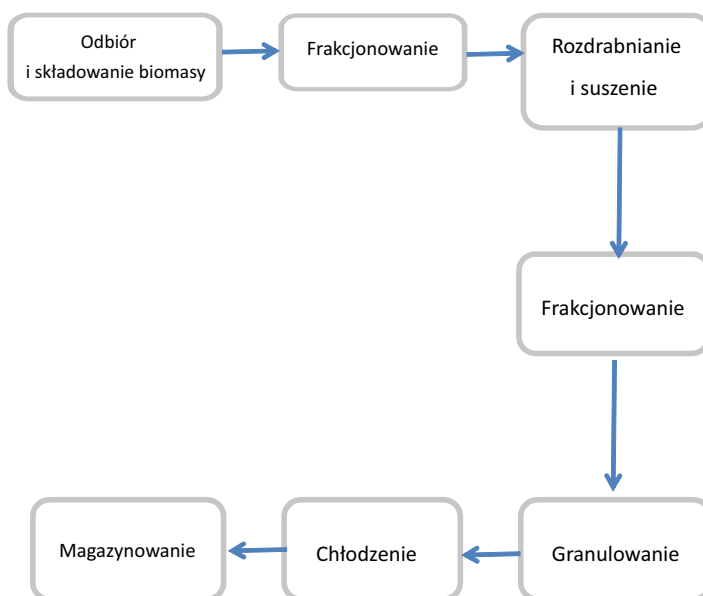
Brykiety mają kształt prostopadłościenny lub cylindryczny o długości 10–30 cm i szerokości (średnicy) 6–12 cm. Pelety są granulami o cylindrycznym kształcie, których długość waha się w granicach 5–40 mm, a średnica wynosi 8–12 mm. Jednolity rozmiar granulatu ułatwia ich transport. Wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia zwiększa się zdolność do prasowania, natomiast wzrasta również zużycie energii. Zagęszczenie granulatu zależy od:

- zawartości wilgoci w biomacie,
- rozmiaru i postaci cząstek paliwa,
- zawartości ligniny w roślinie.

Odpady drewnopochodne posiadają strukturę z dobrymi właściwościami do ściskania. Dodatkowo zawierają wewnętrzne lepiszcze w postaci ligniny, co sprawia, iż są surowcami podatnymi na zagęszczanie.

Natomiast odpady rolnicze są trudne do zagęszczania, gdyż z natury surowce te są odporne na ściskanie. W celu zagęszczenia słomy należy zniszczyć w pierwszej kolejności jej strukturę poprzez siekanie lub mielenie. Zagęszczanie zwiększa oczywiście koszty paliwa, gdyż proces ten zużywa około 2–10% energii zawartej w suchym paliwie.

Proces produkcji granulatu został przedstawiony na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Proces wytwarzania granulatu z biomasy  
Źródło: Rybak 2006

W tradycyjnych urządzeniach do produkcji granulatu stosuje się jedynie materiały, których zawartość wilgoci jest w zakresie 15–17%, stąd często prowadzi się poduszanie materiału przeznaczonego do prasowania. Surowy materiał jest mielony do cząstek o rozmiarach poniżej 3 mm i podawany do prasy, gdzie zostaje przepychany przez otwory matrycy, w wyniku czego powstają brykiety/pelety. Po opuszczeniu prasy gorące granulaty, o temperaturze 90–95°C są chłodzone. Proces ten pomaga w utwardzeniu, stabilizacji i uformowaniu granulatów.

Wady i zalety brykietów i peletów zostały zawarte w tabeli 5.12.

Tabela 5.12. Wady i zalety granulatów z biomasy drzewnej

Rodzaj granulatu	Wady	Zalety
Brykiety	<ul style="list-style-type: none"> <li>ograniczona podaż surowca (wiórów i trocin),</li> <li>drżania i siły przenoszone na fundament i ściany budynku w trakcie procesu granulowania,</li> <li>duże nakłady pracy ręcznej w toku produkcyjnym,</li> <li>wysoka wrażliwość na wilgoć,</li> <li>awaryjność maszyn i urządzeń produkcyjnych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>niskie nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacji linii,</li> <li>niższa cena jednostki energii przy spalaniu,</li> <li>możliwość zagęszczania różnorodnych materiałów,</li> <li>dość łatwe i efektywne użytkowanie w kominkach domowych</li> </ul>
Pelety	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysokie nakłady inwestycyjne linii produkcyjnej,</li> <li>mniej korzystna relacja energii pierwotnej zawartej w surowcu do energii włożonej w czasie jego produkcji,</li> <li>wyższy koszt wytworzenia niż w przypadku brykietów,</li> <li>większa wrażliwość procesu na wilgotność surowca</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoka automatyzacja procesu produkcyjnego,</li> <li>możliwość różnorodnego konfekcjonowania,</li> <li>niższe koszty transportu, możliwe przewożenie materiału za pomocą cystern,</li> <li>większa odporność na uszkodzenia mechaniczne,</li> <li>możliwość granulowania drewna bez względu na kształt surowca,</li> <li>wysoki komfort użytkowania, wynikający z możliwości automatyzacji procesu spalania</li> </ul>

Źródło: Pasyniuk 2004

Przy jednakowych parametrach, biorąc pod uwagę ochronę środowiska, brykiety charakteryzują się wyższą wartością opałową niż pelety, a ponadto mają niższą cenę. Większa powierzchnia sprawia, iż proces spalania trwa dłużej. Natomiast ich wadą jest mała wytrzymałość na uderzenia mechaniczne. Łatwo kruszą się i rozpadają, ich masa nasypowa jest mniejsza, co pociąga za sobą wyższe koszty transportu (Pasyniuk 2004).

Różnorodność surowców do produkcji granulatu jest bardzo duża. Praktycznie każdy rodzaj biomasy stałej może zostać poddany temu procesowi. Obecnie do produkcji pe-

letów stosuje się odpady z przemysłu drzewnego, biomasę pochodzącą z upraw energetycznych (ślazowiec, wierzba, malwa), słomę, a nawet susz jabłkowy czy otręby. Brykiety natomiast produkuje się głównie ze słomy i wiórów (Stolarski i Szczukowski 2007).

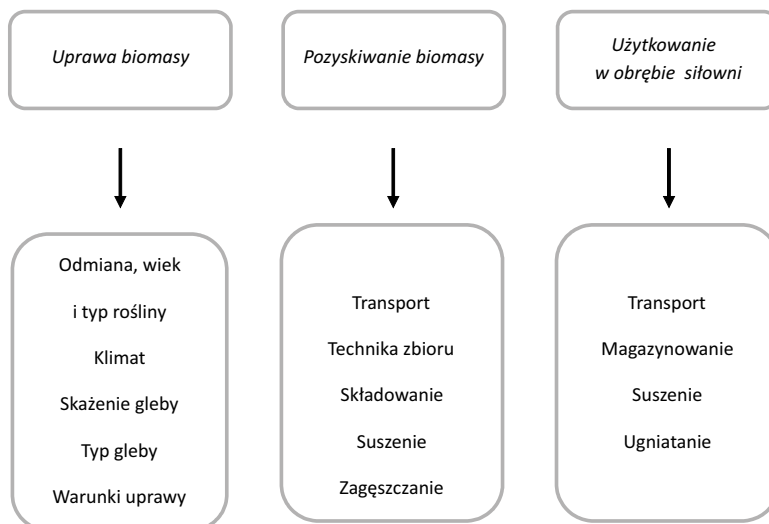
Polska może skorzystać na handlu granulatem, zwiększyć udział OZE w krajowym bilansie energii i ograniczyć w ten sposób emisję gazów cieplarnianych do atmosfery. Rozwój rynku granulatu wymaga jednak wsparcia władz państwowych i samorządowych. Podmioty będące uczestnikami rynku powinny współpracować ze sobą jak i z uczestnikami rynku europejskiego, co pomoże w jego stabilizacji i uczyni go odpornym na wahania koniunktury w poszczególnych krajach (Wach 2005).

### 5.3. Zapewnienie jakości paliwa z biomasy

Na jakość biomasy wpływa wiele czynników, wśród których warto wymienić:

- odpowiednie zabiegi agrotechniczne związane ze wzrostem i zbiorem biomasy,
- proces przygotowania paliwa,
- proces magazynowania,
- proces suszenia,
- inne zabiegi mające na celu poprawę jakości surowca.

Wszystkie ważniejsze składniki, wpływające na jakość spalanego biopaliwa zostały przedstawione na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Wpływ różnych procesów uzyskiwania i przygotowania biopaliw na ich jakość

Źródło: Rybak 2006

Do najważniejszych zabiegów agrotechnicznych należą: wybór gatunku i miejsca pod uprawę, nawożenie i okres zbioru rośliny. Nawożenie jest najważniejszym zabiegiem wpływającym na jakość uzyskanej biomasy i skład substancji mineralnej. W miarę zwiększania dawek stosowanych nawozów mineralnych obserwuje się wzrost ich udziału w uprawianych roślinach. Najczęściej stosowanymi nawozami są nawozy azotowe i potasowe. Innym ważnym czynnikiem jest okres zbioru. Skład biomasy zmienia się bowiem w czasie wzrostu rośliny, szczególnie wahaniom podlega zawartość wilgoci i skład substancji mineralnej. Pozostawienie biomasy na polu, po okresie żniw, powoduje wymywanie przez deszcz niektórych składników zawartych w biomacie, takich jak: potas czy chlor, będących przyczyną korozji wysokotemperaturowej i powodujących powstawanie osadów w kotle (Rybak 2006).

Procesy uzdatniania paliw mają duży wpływ na ich jakość, a tym samym na jakość procesu spalania, szczególnie na współczynnik sprawności i dyspozycyjność instalacji. Poprzez zastosowanie odpowiednich zabiegów technicznych mających na celu rozdrobienie, sprasowanie i wysuszenie, surowiec drzewny może osiągnąć właściwości podobne do konkurencyjnych paliw: węgla i gazu. Uzdatnianie wpływa korzystnie na jednorodność surowca i podnosi jego wartość opałową (Gebler 2004).

Biopaliwa stałe charakteryzują się dużą zmiennością zawartości wilgoci. Parametr ten zależy od rodzaju biomasy, pory zbioru, stopnia przetworzenia surowca oraz sposobu i czasu magazynowania. W celu podniesienia kaloryczności danego biopaliwa przeprowadza się jego suszenie. Proces ten nie tylko podnosi wartość opałową paliwa, lecz przynosi również wiele innych korzyści:

- redukuje niebezpieczeństwo związane z powstawaniem pleśni i emisją zarodników,
- zapewnia utrzymanie w biopaliwach ściśle określonej zawartości wilgoci,
- umożliwia optymalizację i monitorowanie procesu spalania.

Magazynowanie biopaliw o dużej zawartości wilgoci jest przyczyną zmniejszenia substancji organicznej paliwa, wskutek utlenienia związków organicznych i działalności mikroorganizmów. Im większa zawartość wilgoci w paliwie i im mniejsze są rozmiary jego cząstek, tym utrata masy organicznej jest większa.

Ponadto proces wytwarzania brykietów i granulatów wymaga ograniczenia zawartości wilgoci w materiale wyjściowym do poziomu mniejszego niż 15% wag. Zazwyczaj prowadzone są następujące sposoby ograniczenia zawartości wilgoci w biopaliwach (Rybak 2006):

- naturalne suszenie świeżo ściętej biomasy; ścinka drzew ma miejsce w okresie zimowym, kiedy obecna w nich wilgoć spada do najniższego poziomu. Następnie ścięte drzewa są magazynowane do lata. Operacja ta pozwala na obniżenie zawartości wilgoci w drewnie z poziomu 50 do 30%,
- naturalne suszenie zrębków na placu magazynowym,
- suszenie wymuszone, czyli suszenie biomasy znajdującej się na składowisku wskutek jej wentylowania przez powietrze z otoczenia lub podgrzane powietrze. Suszenie jest szczególnie ważne w przypadku słomy zbalowanej, która będzie podlegała magazynowaniu (Goryl i in. 2016).

Ze względu na niewielką gęstość energetyczną biomasy występuje konieczność zapewnienia obszernych magazynów. Magazyny te powinny zapobiegać obniżaniu wartości opałowej surowca w wyniku działania warunków atmosferycznych, przeciwdziałać zapyleniu składowiska i zanieczyszczeniu wód podziemnych, na skutek wypłukiwania składników biomasy. Położenie magazynu powinno umożliwiać transport paliwa do paleniska w sposób ograniczający łączne koszty, zarówno samego transportu, jak i robocizny. Zazwyczaj do zasilania paleniska paliwem stosuje się podajniki automatyczne (Gebele 2004).

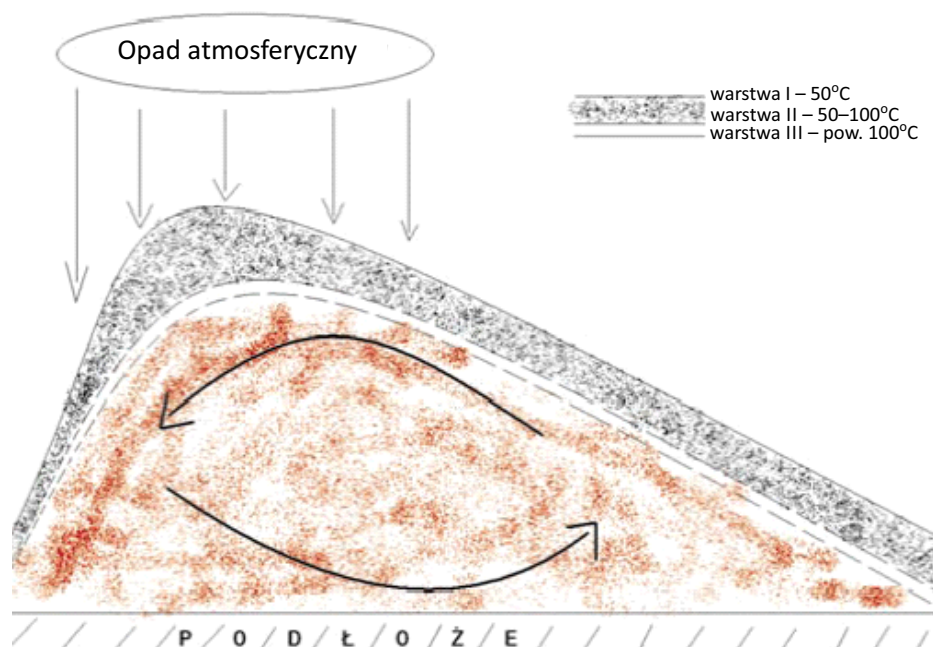
Jednym z najczęściej stosowanych sposobów magazynowania biomasy jest przyzmowanie. Pryzma paliwa zlokalizowana jest w pobliżu drogi umożliwiającej transport biomasy, a ponadto powinna znajdować się powyżej niej, by zapobiegać przedostawaniu się wody z drogi do paliwa. Teren przeznaczony do magazynowania winien być wyrównany, pozbawiony kamieni, pni i odpadów. Biomase przechowywaną przez okres dłuższy niż 2 tygodnie powinno się przykrywać (np. brezentem). W celu zmniejszenia zawartości wilgoci w biomacie zaleca się jej magazynowanie pod dachem. Jak pokazały doświadczenia, magazynowanie biomasy pod dachem przez okres 4–6 miesięcy może przyczynić się do obniżenia zawartości wilgoci w paliwie z 45 do 25–30% (Rybak 2006).

Magazynowanie biomasy na wolnym powietrzu, w postaci dużych stosów nie jest najlepszym rozwiązaniem. Biomasa wówczas narażona jest na wpływ warunków atmosferycznych, szczególnie wahań temperatury i wilgotności powietrza, co ma duży wpływ na jej jakość i jest przyczyną wielu procesów zachodzących wewnątrz stosu (np. korozja mikrobiologiczna).

Składowisko (hałda) magazynowanej biomasy składa się z trzech warstw (rys. 5.8).

Warstwa górna (I) jest warstwą najbardziej odsłoniętą i narażoną na działanie czynników atmosferycznych. Tutaj ma miejsce najintensywniejsza wymiana cząstek biomasy z otoczeniem, a wahania temperatury występują w dość szerokich granicach. Warstwa pośrednia (II) jest cienką warstwą narażoną na działanie największych sił, pochodzących zarówno od warstwy górnej (ciężar drewna, nacisk spychacza), jak i dolnej (procesy izochoryczne). Warstwa dolna (III) jest warstwą najbardziej odizolowaną od atmosfery. Temperatura magazynowanego surowca w tej warstwie jest najwyższa i ciągle się podnosi, co może prowadzić do samozapłonu.

W poszczególnych warstwach zrębków drewna wilgoć rozłożona jest nierównomiernie, a jej zawartość zależy głównie od wilgotności i temperatury powietrza. Duży wpływ wywierają także ruchy powietrza przenoszące wilgoć z obszarów wodnych zlokalizowanych blisko składowiska, jak i temperatura poszczególnych warstw. Wilgoć obecna w składowanej biomacie przemieszcza się w postaci pary wodnej z miejsc o wyższej temperaturze, do miejsc o temperaturze niższej. Taki mechanizm przemieszczania się wilgoci sprawia, że w chłodniejszych miejscach może wystąpić proces gnilny biomasy, jak również kiełkowanie nasion przypadkowo znajdujących się w magazynowanym paliwie. Te procesy powodują wydzielenie dużych ilości ciepła i pary wodnej, co skutkuje zwiększeniem wilgotności i podwyższeniem temperatury w poszczególnych warstwach.



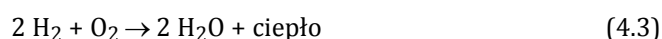
Rys. 5.8. Schemat usypanego składowiska zrębków drzewnych

Źródło: Suski 2008

Czynniki prowadzące do wzrostu temperatury składowanej biomasy są następujące:

- pogorszenie jakości paliwa i ubywanie suchej masy składowanej biomasy (wilgoć wchłaniana przez drewno jest przyczyną podniesienia jego temperatury),
- tarcie, spowodowane przemieszczaniem cząstek materiału względem siebie, w trakcie którego następuje przekazywanie energii między cząstkami,
- zagęszczanie biomasy, które powoduje wzrost ciśnienia zarówno w przestrzeniach pomiędzy cząstkami paliwa, jak i w samych cząstkach, co skutkuje również gradientem temperatury,
- mikroorganizmy i nasiona znajdujące się w magazynowanym surowcu.

W trakcie magazynowania biomasy zachodzi wiele reakcji, w wyniku których wydziela się ciepło. Wspomniane wyżej reakcje są następujące:







Przy odpowiednio wysokiej temperaturze węgiel obecny w biomase reaguje z tlenem zgodnie z reakcją:



W wyniku spalania 1 kg węgla powstaje  $CO_2$  i wydzielą się ciepło w ilości 32,2 MJ/kg. Proces samonagrzewania zaczyna się od tzw. ognisk zapalnych, czyli miejsc o najwyższej temperaturze, a następnie rozprzestrzenia się na sąsiednie części składowiska.

Sam proces samonagrzewania przebiega w kilku etapach. W pierwszym biomasa nagrzewa się do temperatury 24–30°C, w etapie drugim biomasa zmienia swoją barwę, a jej temperatura wynosi już 34–38°C. Rozwijające się drobnoustroje powodują podniesienie temperatury do ponad 50°C i wtedy ma miejsce trzecie stadium procesu. Wewnątrz składowiska temperatura szybko wzrasta, powyżej temperatury 110°C następuje powolny rozkład termiczny składników biomasy. W ostatnim etapie w zakresie temperatur 210–350°C następuje zapalenie biomasy.

Zewnętrzne, okresowe zraszanie zrębków drewna jest praktykowane w celu zmniejszenia ryzyka samozapłonu składowiska. Nie jest to jednak dobra metoda, dlatego że temperatura zostaje zmniejszona tylko w górnej warstwie składowiska, a wysoka temperatura niższych warstw i zjawisko przenoszenia ciepła i tak prowadzi zaraz do zmniejszenia wilgotności w warstwie powierzchniowej. Pewnym rozwiązaniem jest zagęszczanie biomasy drzewnej. Proces ten usuwa jednak tylko pewną część powietrza znajdującego się w składowisku paliwa, a oprócz tego ugniatane są jedynie warstwy powierzchniowe i to do pewnej głębokości. Najlepszym sposobem zapobiegania samozapłonowi składowanej mokrej biomasy jest proces jej suszenia (Suski 2008).

Na składowiskach biomasy pojawia się czasem pleśń, występują różne gatunki grzybów i bakterii, które powodują zagrożenia zdrowotne. Pyły, bakterie i zarodniki pleśni mają bardzo małe wymiary, poniżej 1–5  $\mu\text{m}$ , a ich stężenie na składowisku może dochodzić nawet do 10 mln cząstek w jednym litrze. Dzięki tym cechom łatwo unoszą się w powietrzu, podrażniając drogi oddechowe i wywołując liczne alergie. Choroby przez nie powodowane mają ostry lub chroniczny przebieg. W celu ochrony zdrowia zaleca się, by w miejscach o dużym stężeniu pyłu i mikroorganizmów, wszystkie prace były zautomatyzowane. W magazynie służącym do składowania paliwa powinien znajdować się system wentylacji, a powietrze z magazynu może być wciągane do kotła. Osoby zmuszone do przebywania w takich miejscach powinny być wyposażone w maski gazowe z filtrami.

Ponadto, aby ograniczyć powstawanie pleśni, grzybów, bakterii i zminimalizować ich aktywność biologiczną, w czasie długiego okresu składowania drewna stosowane są następujące zabiegi:

- magazynowanie drewna w dużych kawałkach lub polanach,
- używanie środków grzybobójczych i innych związków chemicznych,

- wstępne suszenie materiału,
- ochładzanie składowiska, przy użyciu wentylatorów, do temperatur, w których zmniejsza się aktywność biologiczna.

Poprawę jakości biomasy uzyskuje się również poprzez zastosowanie sortowania i przesiewania dostarczonego materiału, w wyniku czego otrzymuje się rozmaite sortymenty ziarnowe (Rybak 2006).



## 6. POPIOŁY ZE SPALANIA BIOMASY

W wyniku spalania biomasy powstają produkty odpadowe, których ogólny podział uwzględnia dwie podstawowe grupy (Vassilev i in. 2013b, c; 2014; Pels i Sarabèr 2011):

- popioły lotne (z systemów oczyszczania spalin) powstające w zakresie temperatur – 800–1600°C,
- popioły denne (*bottom ash*) lub żużle.

Popioły lotne ze spalania biomasy są grupą odpadów dość dobrze scharakteryzowaną w literaturze, w porównaniu do popiołów dennych definiowanych jako – część niepalna pozostałości po spalaniu paliwa w kotle (Cuenca i in. 2013).

Popioły lotne ze spalania biomasy mają następujące wspólne cechy (Pels i Sarabèr 2011):

- są to drobne proszki o bardzo niskiej gęstości nasypowej,
- zawierają składniki popiołu z paliwa, a w popiołach z kotłów fluidalnych występują produkty odsiarczania i sorbent,
- wykazują duże różnice w składzie,
- charakteryzują się niskimi lub bardzo wysokimi stratami prażenia (ubytkami masy w zależności od temperatury ogrzania),
- zawartość węgla zależy od rodzaju biomasy, rodzaju i warunków pracy instalacji,
- zawierają elementy wynikające z techniki spalania, które są kondensowane, gdy spaliny są schładzane,
- zazwyczaj wykazują wysokie wymywanie zanieczyszczeń.

Odpady ze spalania biomasy według rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie katalogu odpadów (Rozporządzenie... 2014) zaliczane są do grupy 10 – *odpady z procesów termicznych*, podgrupy – 10 01 – *odpady z elektrowni i innych zakładów energetycznych spalania paliw* (z wyłączeniem grupy 19). Do odpadów tych zalicza się popioły lotne z torfu i drewna niepoddanego obróbce (10 01 03).

Popioły ze spalania biomasy mogą być również klasyfikowane pod kodem 10 01 82 – *mieszanki popiołów lotnych i odpadów stałych z wapniowych metod odsiarczania gazów odlotowych (metody suche i półsuche odsiarczania spalin oraz spalanie w złożu fluidalnym)*.

Popioły denne z kotłów fluidalnych ze spalania biomasy są klasyfikowane pod kodem – 10 01 24 *Piaski ze złóż fluidalnych* (z wyłączeniem 10 01 82) (Cruz i in. 2017).

Popioły denne z kotłów konwencjonalnych można zaklasyfikować pod kodem 10 01 01 – *Żużle, popioły paleniskowe i pyły z kotłów* (z wyłączeniem pyłów z kotłów wymienionych w 10 01 04).

## 6.1. Skład chemiczny

Na skład chemiczny popiołów z biomasy wpływa wiele czynników, przede wszystkim (Vassilev i in. 2012; 2013a, b; 2014; Gianoncelli i in. 2013):

- pochodzenie biomasy (rodzaj biomasy, mieszanie różnych rodzajów biomasy, wiek roślin, część rośliny, wykorzystanie nawozów sztucznych do upraw, proces i warunki wzrostu, czas żniw, wilgotność, zanieczyszczenie terenu, rodzaj gleb, pH, procesy przygotowania, pogoda, położenie geograficzne – np. bliskość morza, czy odległość od źródła zanieczyszczenia takiego jak: autostrady, miasta, fabryki, kopalnie i inne),
- spalanie biomasy (przygotowanie paliwa, technika i warunki spalania, urządzenia do oczyszczania spalin),
- zbieranie, transport i składowanie biomasy.

Ważnym czynnikiem wpływającym na skład popiołów z biomasy jest względnie niska temperatura topnienia (Gianoncelli i in. 2013).

W składzie chemicznym popiołów ze spalania biomasy przeważają przede wszystkim:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  (tab. 6.1, 6.2).

Popioły ze spalania biomasy charakteryzują się zawartością  $\text{SiO}_2$  w granicach od 1,45 do 88,2% (tab. 6.1). Najwyższą zawartością  $\text{SiO}_2$  charakteryzują się popioły ze spalania łusek ryżowych (Garcia i in. 2015), a najniższą popioły ze spalania łusek słonecznika – 1,45% (Vassilev i in. 2014).

Największe zawartości  $\text{CaO}$  stwierdzono w popiołach ze spalania ostu – 69,3% (Garcia i in. 2015) oraz zrębków drewna bukowego – 62,58% (Vassilev i in. 2014), a także topoli – 47,2% (Vamvuka i Kakaras 2011), a najmniej w odpadach drewna z tartaku – 1,16% (Yeboah i in. 2014) i słomie z pszenicy – 2–4% (Vamvuka i Kakaras 2011).

W przypadku  $\text{K}_2\text{O}$  najwyższe zawartości stwierdzono w popiołach ze spalania łusek słonecznika – 49,84% (Vassilev i in. 2014) i łupin orzecha włoskiego – 49,33%, a najniższe w popiołach ze spalania drewna – 1,1% (Ban i Ramli 2011).

Popioły te mogą zawierać podstawowe składniki w ilościach od 0,00 do kilkudziesięciu procent (tab. 6.1) (Xing i in. 2016; Garcia i in. 2015; Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a; Cruz i in. 2017; Ściążko i in. 2007; Berra i in. 2015; Jukić i in. 2017; Vassilevi in. 2014; Koukouzas i in. 2009; Yeboah i in. 2014; Rajamma i in. 2009; Wang i in. 2008;

Tabela 6.1(1). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Popioły ze spalania											
	kory z eukaliptusa z biomasa leśną	zrębów z wierzby energetycznej	zrębów sosnowych	zrębów bukowych	biomasy leśnej i odpadów z rolnictwa	biomasy leśnej A	biomasy leśnej B	zrębki z kasztanów lub topoli A	zrębki z kasztanów lub topoli B	drewna		
	Cruz i in. 2017	Ściążko i in. 2007			Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a							Berra i in. 2015
SiO <sub>2</sub>	71	18,97	28,25	30,47	32,4	28,9	34,1	29,88	36,44	40,38		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8	3,52	4,58	3,63	6,21	2,17	4,56	9,58	8,96	9,54		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,6	2,09	5,02	2,14	2,53	1,84	2,90	5,79	6,39	6,09		
CaO	13	44,5	36,54	29,60	8,62	23,05	21,13	33,13	23,76	20,76		
MgO	1,9	3,93	8,15	3,67	3,42	6,82	5,64	3,50	3,52	3,00		
Na <sub>2</sub> O	0,55	0,58	1,20	0,35	0,5	0,4	0,6	1,32	1,49	3,04		
K <sub>2</sub> O	3,1	8,51	6,26	10,27	3,7	18,1	13,7	3,64	6,70	2,08		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,84	5,90	0,65	2,68	b.d.	b.d.	b.d.	2,33	1,90	0,68		
SO <sub>3</sub>	0,98	3,15	0,58	1,71	3,1	7,1	10,0	2,90	4,68	9,30		
MnO	b.d.	0,11	0,20	2,13	b.d.	b.d.	b.d.	0,77	0,52	0,15		
TiO <sub>2</sub>	0,20	0,15	0,10	0,22	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.		
BaO	b.d.	0,09	0,04	0,35	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.		
SrO	b.d.	0,10	0,01	0,06	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.		
Cl	0,35	b.d.	b.d.	b.d.	0,45	1,82	1,19	1,07	1,90	1,74		

Tabela 6.1(2). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Popioły ze spalania										
	łusek stonecznika	łodyg bawełny	topoli	sosny	słomy z pszenicy	prosa różgowego	nasion oliwek	łusek ryżu	prosa różgowego	kolb kukurydzy	pestek śliwek
	Vamvuka i Kakaras 2011					Vassilev i in. 2014					
SiO <sub>2</sub>	29,3	8,4	2,6	32,5	48-78	57-70	45,0	89,86	62,9	36,67	12,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,9	0,8	0,9	4,5	0,5-2	0,4-0,5	7,0	1,04	0,89	0,81	2,57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	0,5	0,5	3,5	1,2	0,4-0,6	6,2	0,41	0,42	1,75	1,75
CaO	15,8	16,4	47,2	49,2	4-6	5-16	22,9	1,40	7,69	2,12	43,95
MgO	6,1	5,2	4,4	0,4	2-4	1,5-5	3,8	0,49	4,20	2,57	4,18
Na <sub>2</sub> O	1,5	2,0	0,2	0,4	0,2-1,0	0,1-0,5	0,9	0,23	0,23	0,79	0,79
K <sub>2</sub> O	35,6	30,0	20,0	2,5	7-25	1-15	9,2	4,16	18,77	47,57	16,29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,8	b.d.	5,0	0,3	3-4	2-5,5	2,4	0,60	2,44	4,82	10,17
SO <sub>3</sub>	1,3	b.d.	2,7	2,5	b.d.	2-3	1,6	1,31	2,17	0,14	7,72
MnO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,27	0,14	b.d.	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,1	b.d.	0,3	0,4	b.d.	<0,1	b.d.	0,02	0,04	0,16	0,16
BaO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
SrO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Cl	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	1,3	0	0,8	b.d.

Tabela 6.1(3). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Popioły ze spalania										
	drewna	alg morskich	zrębków drewna bukowego	łupin orzecha włoskiego	łusek słonecznika	drewna	biomasy leśnej, odpadów drewna z tartaku, odpadów drewna z tartaku miejskich	odpadów drewna z tartaku	biomasy leśnej	drewna	drewna
	Jukić i in. 2017	Vassilev i in. 2014	Koukourzas i in. 2009	Yeboah i in. 2014	Rajamma i in. 2009	Wang i in. 2008	Cuenca i in. 2013				
SiO <sub>2</sub>	19,1	5,60	5,48	2,84	1,45	29,2	6,43	1,74	41,00	48,94	11,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,33	0,98	0,49	0,52	0,12	14,63	0,75	0,27	6,2	12,47	2,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,90	0,69	0,36	0,40	1,32	8,89	0,54	0,09	2,2	5,45	1,38
CaO	45,9	22,06	62,58	38,11	15,57	19,59	24,12	1,16	11,4	13,55	54,82
MgO	4,60	7,69	7,49	3,80	11,87	5,70	2,54	b.d.	2,3	3,16	4,36
Na <sub>2</sub> O	2,05	14,07	0,11	0,12	0,22	0,28	0,40	b.d.	0,9	0,26	0,16
K <sub>2</sub> O	10,2	7,56	18,00	49,33	49,84	2,96	7,48	0,13	3,9	3,37	9,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,06	0,97	2,49	2,37	6,54	1,03	2,18	0,07	0,9	0,95	3,40
SO <sub>3</sub>	1,54	28,49	0,77	2,03	11,39	3,80	2,88	0,44	b.d.	1,23	b.d.
MnO	b.d.	0,02	2,11	0,05	0,07	b.d.	0,65	0,05	0,3	0,12	0,10
TiO <sub>2</sub>	0,415	0,03	0,03	0,05	0,01	0,39	0,07	0,01	0,4	0,78	0,35
SrO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,09	0,04	b.d.	0,07	b.d.
Cl	b.d.	13,8	b.d.	0,38	1,60	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,2	b.d.



Tabela 6. 1(4). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy

Składnik	Popioły ze spalania												
	miskanta Lanzerstorfer 2017a	odpadów trzciny cukrowej i łusek ryżu Horsakulthai i in. 2011	zrębków drewna i skorupki kakaowców Fontes i in. 2017	Ban i Ramli 2011					Garcia i in. 2015				
				drewna A	drewna B	drewna C	drewna D	drewna E	łupiny migdałów	łuski kawy	odpady oliwek z produkcji oliwy	odpady z produkcji wina	
Jedn.	g/kg	%											
SiO <sub>2</sub>	509	78,4	4,9	32,4	13,0	50,70	30,0	8,10	31,0	5,3	26,6	23,9	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91,1	2,6	0,6	17,10	7,80	8,20	12,3	7,50	4,4	1,5	6,2	4,1	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,0	1,7	2,8	9,80	2,60	2,10	14,2	3,00	1,2	1,9	3,1	1,3	
CaO	37,7	7,4	6,7	3,50	13,70	19,60	2,2	25,30	25,7	59,4	37,0	15,9	
MgO	17,3	1,3	15,5	0,70	2,60	6,50	0,7	4,50	6,3	14,4	11,7	9,2	
Na <sub>2</sub> O	0,43	0,2	1,17	0,90	0,60	2,10	0,5	2,70	1,4	1,5	0,9	1,7	
K <sub>2</sub> O	92,0	3,7	37,1	1,10	0,40	2,80	2,0	3,30	25,0	11,5	11,0	32,9	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	12,5	b.d.	4,7	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	3,9	3,9	3,0	10,8	
SO <sub>3</sub>	19,4	b.d.	1,5	2,20	0,90	0,10	2,1	12,50	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	
MnO	2,36	1,1	0,15	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,1	0,4	0,1	0,1	
TiO <sub>2</sub>	2,45	b.d.	0,15	0,70	0,50	1,20	0,9	0,30	0,1	0,1	0,4	0,1	
Straty prażenia	b.d.	b.d.	22,8	31,60	58,10	6,70	35,3	32,80	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	

Tabela 6.1(5). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny) – cyklon		Odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny) – odpylacz filtracyjny		Trocin	Pelet drewnianych	Roślin energetycznych		Odpadów rolniczych				Odpadów leśnych	
							sorgo	oset	pelety buraków	słomy	pędy winorośli	łuski ryżowe	odpady z przycinania drzewek oliwnych	odpad sosny
	Garcia i in. 2015													
	Li i in. 2012													
SiO <sub>2</sub>	22,33	50,5	28,8	21,3	53,9	5,5	42,5	53,5	6,6	88,2	50,1	18,1		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,99	7,95	5,1	4,8	7,2	1,2	5,2	1,6	1,0	1,3	3,9	4,7		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,32	4,95	7,4	3,7	3,3	1,5	1,5	0,6	0,6	0,4	1,6	6,3		
CaO	54,12	17,99	35,5	28,5	29,5	69,3	35,1	20,6	53,6	1,8	33,5	11,5		
MgO	4,83	9,34	5,2	8,8	1,9	10,5	6,3	2,3	14,7	1,1	2,6	14,2		
Na <sub>2</sub> O	1,28	1,16	1,8	1,7	0,7	0,9	1,2	0,9	0,7	0,4	0,5	1,9		
K <sub>2</sub> O	4,04	4,19	5,7	20,9	2,2	5,0	4,2	17,8	9,5	4,9	5,5	35,3		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	b.d.	b.d.	3,4	8,1	0,8	5,8	3,8	2,5	12,7	1,7	1,9	7,7		
MnO	b.d.	b.d.	0,7	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,3	0,1	0,3		
TiO <sub>2</sub>	0,58	0,96	6,5	1,8	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	0,4	0,1		
Straty prażenia	3,23	1,25	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.		

Tabela 6.1(6). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Popioły ze spalania									
	biomasy leśnej	orzesków ziemnych	odpadów trzciny cukrowej	areki katechu	łupin nerkowca	łusek ryżowych	kawaików jodły	drewna i biomasy leśnej	kory eukaliptusowej	
	Umamaheswaram i Batra 2008									
SiO <sub>2</sub>	16,8	43,13	65,03	42,45	8,18	93,52	16,4	41	Rajamma i in. 2015	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,54	10,71	0,49	3,85	3,06	0,01	5,9	9,3		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,97	3,96	0,49	4,20	2,06	0,51	3,6	2,6		
CaO	14,47	10,81	2,75	1,23	7,52	0,68	33,7	11,4		
MgO	5,29	6,10	3,26	0,48	10,66	0,47	11,7	2,3		
Na <sub>2</sub> O	0,49	5,60	0,06	0,20	5,25	0,40	1,4	0,9		
K <sub>2</sub> O	31,06	9,61	1,73	18,91	21,66	2,40	13,0	3,9		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	b.d.	4,19	1,14	7,29	14,67	1,06	3,3	0,9		
SO <sub>3</sub>	17,96	b.d.	b.d.	b.d.	5,09	4,07	b.d.	b.d.		
MnO	b.d.	b.d.	b.d.	0,02	0,2	b.d.	2,8	0,3		
TiO <sub>2</sub>	b.d.	0,55	0,08	0,07	0,12	0,04	0,7	0,4		
Cl	1,19	1,44	0,12	3,70	1,99	0,11	1,7	b.d.		
Straty prażenia	0,27	3,90	24,84	12,51	20,56	0,80	0,8	b.d.		

Tabela 6.2. Maksymalne, minimalne i średnie zawartości podstawowych tlenków w popiołach ze spalania biomasy (%)

Składnik	Zawartość	Składniki									
		SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
<b>Popioły ze spalania biomasy drzewnej i drewna</b> m.in.: trociny z jodły, kora drzewa bukowego, kora brzozy, kora wiązu, kora eukaliptusa, pozostałości leśne, drewno z wycinki, kora klonu, trociny dębowe, drewno dębowe, drewno oliwne, kora sosnowa, wióry sosnowe, gałęzie sosny, trociny sosnowe, topola, kora topoli, trociny i kora świerkowa, drewno świerkowe, kora modrzewia amerykańskiego, wierzba, drewno, pozostałości z drewna	maksymalna	68,18	83,46	31,99	13,01	15,12	14,57	9,54	11,66	29,82	1,20
	minimalna	1,86	5,79	2,19	0,66	0,12	1,10	0,37	0,36	0,22	0,06
	średnia	22,22	43,03	10,75	3,48	5,09	6,07	3,44	2,78	2,85	0,29
<b>Popioły ze spalania biomasy zielonej i rolniczej</b> <b>Trawy</b> m.in.: bambus, rozplenica stoniowa, kętnia konopiowata, miskant, móżga trzcinowata, sorgo, proso różgowe <b>Słoma</b> m.in.: lucerna siewnej, jęczmienna, kukurydzy, mięty, owsa, rzepakowa, pszenicy, ryżowa <b>Odpady</b> m.in.: plewy gorczycy, plewy oliwek, pestki oliwek, łupiny migdałowe, łupiny orzecha kokosowego, plewy kawowe	maksymalna	94,48	44,32	63,90	31,06	14,60	16,21	36,27	14,74	26,20	2,02
	minimalna	2,01	0,97	2,29	0,54	0,10	0,19	0,22	0,01	0,09	0,01
	średnia	33,39	14,86	26,65	6,48	3,66	5,62	3,26	3,61	2,29	0,18

Źródło: Vassilev i in. 2010

Cuenca i in. 2013; Umamaheswaram i Batra 2008; Rajamma i in. 2015; Vamvuka i Kararas 2011).

Chemiczny skład tlenkowy popiołów lotnych ze spalania biomasy można uszeregować w następujący sposób:  $\text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SO}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MnO} > \text{TiO}_2$  (Vassilev i in. 2013a, b; 2014).

Na skład pierwiastkowy popiołów ze spalania biomasy mają wpływ przede wszystkim nieorganiczne składniki obecne w spalanej biomacie (Gianoncelli i in. 2013).

Skład pierwiastkowy (tab. 6.3 i 6.4) to przede wszystkim zawartość Ca, K, Si, Mg, Al, Fe, P, Na, S, Mn, Si oraz w niewielkich ilościach Cl, C, H, N (Vassilev i in. 2013a).

Popioły lotne ze spalania biomasy mogą zawierać metale ciężkie: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn (Berra i in. 2015; Cuenca i in. 2013; Rajamma i in. 2009).

Pierwiastki takie jak: Al, C, Ca, Cl, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, S, Si i Ti, a także: As, Ba, Br, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, V, Zn mogą występować w fazach rozpuszczalnych w wodzie.

Popioły lotne ze spalania biomasy zawierają w swoim składzie charakterystyczne (specyficzne) związki, których nie stwierdzono w popiołach lotnych ze spalania węgla kamiennego, takie jak: krzemiany Ca–K–Mn, chlorki K–Na–Cl i węglany K–Ca–Mg–Na. Związane to jest jednak z większą zawartością: Ca, Cl, K, Mg, Na, O i P w popiołach ze spalania biomasy oraz niższą zawartością: Al, Si, Ti, Fe, S (Vassilev i in. 2013a, 2014).

Związki pomiędzy tlenkami:  $\text{Si}+\text{Al}+\text{Fe}+\text{Na}+\text{Ti}$ ,  $\text{Mg}+\text{Ca}+\text{Mn}$  i  $\text{K}+\text{P}+\text{S}+\text{Cl}$  były podstawą do podziału popiołów lotnych z biomasy na cztery typy: S, C, K i CK (Vassilev i in. 2010) (rys. 6.1).

Tak jak w przypadku popiołów lotnych ze spalania biomasy popioły denne charakteryzują się zróżnicowanym składem chemicznym (tab. 6.5 i 6.6) z przewagą zawartości  $\text{SiO}_2$  i CaO.

Wyniki badań składów chemicznych popiołów dennych ze spalania mieszaniny biomasy w postaci: odpadów z oliwek, eukaliptusa, topoli i sosny przedstawionych przez zespół Hinojosa i in. (2014) pokazują, że zawartość krzemu Si we wszystkich próbkach była podobna pomimo wykorzystania różnych rodzajów biomasy. Duże zróżnicowanie autorzy stwierdzili w przypadku zawartości Ca i K. Badacze wskazują, że pomimo różnic w składzie chemicznym zależących od kilku czynników, najważniejszym jest według nich rodzaj paliwa w przypadku jednej techniki spalania.

## 6.2. Skład fazowy

Popioły lotne ze spalania biomasy są złożonymi nieorganiczno-organicznymi mieszaninami z polikomponentami heterogenicznymi i zmiennym składem zawierającymi stałe, ciekłe i gazowe fazy o różnym pochodzeniu (Vassilev i in. 2013a).

Tabela 6.3(1). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (%)

Składnik	Popioły ze spalania									
	łusek ryżu	prosa różgowego	kolb kukurydzy	pestek śliwek	alg morskich	zrębków drewna bukowego	łupin orzecha włoskiego	łusek słonecznika		
Cl	0,15	0,15	0,40	0,10	8,32	0,05	0,20	0,96		
S	0,46	0,68	0,97	1,36	9,84	0,20	0,53	3,35		
Si	36,86	23,01	12,11	2,47	2,26	1,66	0,87	0,50		
Al	0,48	0,37	0,30	0,60	0,45	0,17	0,18	0,05		
Ca	0,88	4,30	1,07	13,82	13,61	28,96	17,82	8,18		
K	3,02	12,15	27,79	5,93	5,40	9,64	26,69	30,29		
Mg	0,26	1,98	0,84	1,11	4,00	2,92	1,50	5,26		
Na	0,15	0,07	0,15	0,26	9,00	0,05	0,06	0,12		
Fe	0,25	0,23	0,74	0,54	0,42	0,16	0,18	0,68		

Źródło: Vassilev i in. 2014

Tabela 6.3(2) Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy

Składnik	Popioły ze spalania																		
	drewna Jukić i in. 2017	słomy Bogush i in. 2018	odpadów drewna z korą		drewna iglastego		drewna liściastego		odpadów papiermniczych		drewna	drewna z kasztanów lub topoli	zrębki z kasztanów lub topoli	zrębki z kasztanów lub topoli	biomasy leśnej				
			strzała	kora	strzała	kora	strzała	kora	strzała	kora						Cuenca i in. 2013	Berra i in. 2015	Rajamma i in. 2009	
Jedn.	mg/kg	mg/kg	%														ppm	mg/kg	mg/kg
Ca	b.d.	13	22,4	28,5	19,5	27,1	16,6	8,09	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Mg	b.d.	0,17	4,3	2,8	3,6	2,2	1,07	0,90	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
P	b.d.	2,2	12,4	9,8	20,4	12,2	2,57	4,48	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Na	b.d.	0,051	-	-	-	-	0,10	0,96	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
K	b.d.	14,0	2,4	2,8	4,2	3,4	0,39	0,83	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Si	b.d.	2,2	2,3	1,2	2,1	1,1	0,02	1,00	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Al	b.d.	0,04	-	-	-	-	0,91	4,23	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Fe	b.d.	0,021	0,8	0,2	0,5	0,6	0,51	1,33	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Mn	b.d.	0,015	0,67	2,9	1,7	0,8	0,32	-	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
C	b.d.	b.d.	-	-	-	-	25,5	-	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
N	b.d.	b.d.	<0,1	-	-	-	-	-	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
As	3,34	1,3	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	18	15	45	b.d.	b.d.			
Cd	2,38	3,3	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	9,0	7,6	60	1,0	b.d.			
Cr	76,4	12	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	101	18	124	47	b.d.			
Cu	89,6	43	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	175	48	920	99	b.d.			
Hg	0,031	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,2	0,3	0,4	< 1	b.d.			
Ni	28,0	1,8	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	41	50	102	35	b.d.			
Pb	13,1	28	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	177	39	5 318	191	b.d.			
Zn	102	490	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	2 274	636	17 470	376	b.d.			
Pb, ppm	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			
Zn, ppm	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.			

Tabela 6.3(3). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (ppm)

Składnik	Popioły ze spalania									
	łusek ryżu	prosa różowego	kolb kukurydzy	pestek śliwek	alg morskich	zrębków drewna bukowego	łupin orzechów włoskiego	łusek słonecznika		
B	4 101	7 106	6619	11,311	8 653	10,257	8 908	5 900		
P	2 299	8 320	14,880	19,571	3 668	7 012	6 758	21,001		
Ba	101	386	47	136	43	1 786	113	46		
Be	33,6	31,7	23,4	13,0	8,7	20,9	27,4	25,1		
Ce	2,93	4,55	3,31	6,61	3,15	3,52	1,52	0,78		
Cs	0,54	0,84	0,87	0,40	0,26	4,98	0,44	0,51		
Dy	0,71	1,05	0,60	0,50	0,21	0,49	0,76	0,36		
Er	0,80	0,53	0,41	0,27	0,17	0,32	0,41	0,47		
Eu	0,46	0,48	0,26	0,16	0,15	0,21	0,38	0,26		
Gd	1,35	1,30	0,97	0,44	0,34	0,62	1,22	0,77		
Hf	0,63	0,63	0,37	0,71	0,20	0,44	0,77	0,40		
Ho	0,20	0,17	0,15	0,09	0,06	0,10	0,16	0,09		
La	1,30	2,20	1,53	3,16	1,13	2,41	0,74	0,39		
Li	2,0	14,8	30,2	36,7	12,9	37,3	19,9	14,2		
Lu	0,20	0,20	0,11	0,05	0,09	0,08	0,15	0,09		
Mo	4,35	5,43	5,71	2,69	1,60	2,06	5,55	8,95		
Nb	0,54	0,80	0,88	1,34	0,14	0,45	0,43	0,29		
Pb	7,4	3,0	68,3	32,4	2,7	38,7	11,7	1,5		
Sb	1,89	1,60	1,38	0,63	0,59	0,71	1,54	1,22		
Se	35,3	37,1	15,7	10,5	9,8	16,4	28,9	19,0		
Sn	4,1	3,6	5,2	5,3	0,9	2,1	6,6	2,1		
Zn	103	103	1 232	779	52	213	110	338		
Th	0,57	0,42	0,42	0,98	0,23	0,27	0,30	0,16		
U	0,18	0,28	0,20	0,29	0,43	0,11	0,16	0,11		
Ag	4,13	3,37	1,91	1,00	0,90	1,08	2,57	1,98		
Au	0,62	0,73	0,32	0,20	0,16	0,37	0,52	0,30		

Źródło: Vassilev i in. 2014



Tabela 6.3(4). Przykłady składników pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (ppm)

Składnik	Popioły ze spalania									
	łusek ryżu	prosa różgowego	kolb kukurydzy	pestek śliwek	alg morskich	zrębków drewna bukowego	łupin orzecha włoskiego	łusek słonecznika		
Nd	1,27	2,11	1,17	3,17	1,37	1,79	0,94	0,61		
Pr	0,38	0,58	0,31	0,67	0,31	0,32	0,20	0,12		
Rb	35	54	233	19	25	453	64	278		
Sm	1,42	1,55	1,04	0,71	0,55	0,57	1,29	0,83		
Sr	47	241	72	326	1 142	324	465	448		
Ta	0,26	0,25	0,20	0,09	0,05	0,15	0,21	0,13		
Tb	0,17	0,21	0,10	0,07	0,04	0,09	0,19	0,10		
Tm	0,25	0,21	0,11	0,05	0,06	0,09	0,16	0,09		
W	1,16	1,11	0,75	0,57	0,31	0,53	0,99	0,70		
Y	0,62	1,42	17,51	2,72	1,22	3,18	32,22	0,29		
Yb	1,10	1,37	0,64	0,40	0,29	0,79	1,34	0,70		
Zr	5,9	18,2	9,0	23,6	3,5	6,2	3,7	2,4		
Co	2,1	1,3	2,6	3,4	3,5	4,2	1,4	4,2		
Cr	348	49	750	160	66	24	167	1 504		
Mn	1 825	872	404	466	167	10,595	202	365		
Ni	107	37	286	64	42	36	60	574		
Sc	4,1	4,8	2,6	1,4	1,3	2,1	3,5	2,4		
Ti	128	196	211	432	174	91	157	27		
V	10,8	10,5	13,1	11,8	32,8	8,9	7,2	17,6		
As	9,4	9,4	6,4	2,6	5,6	4,5	7,5	5,2		
Bi	0,01	0,49	0,50	2,48			0,49	0,49		
Cd	8,2	9,8	5,1	3,5	5,0	4,9	5,9	4,4		
Cu	76	66	139	636	36	98	477	331		
Ga	3,6	8,8	2,2	4,1	8,9	37,7	3,1	1,6		
Ge	21,2	27,0	13,2	6,4	6,1	11,1	19,8	12,6		

Źródło: Vassilev i in. 2014

Tabela 6.3(5). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (mg/kg)

Składnik	Popioły ze spalania									
	zrębków drewna pozostałości leśnych > 90%; trociny i kora < 10%	drewna z odpadów leśnych, 80% drewna iglastego, 20% drewno liściaste	drewna z odpadów leśnych, 80% świerku, 20% – buk, dąb i brzoza	zrębków z odpadów leśnych, 90% świerku, 10% – buk, dąb i brzoza	drzewa kauczukowego: 95% zrębków i 5% kory	90% wiórów drzewnych z resztek leśnych i 10% odchodów końskich	drewna	słomy pszennej	słomy pszenicznej, rozdrobnionej	słomy
Na	3,3	8,0	4,8	47,0	26,7	5,1	16 ± 18	7,4	4,9	6 ± 2
K	47,2	311	192	177	148	118	165 ± 88	570	407	488 ± 115
Mg	12,7	4,7	30,0	11,6	17,5	3,7	13 ± 10	0,4	7,7	4 ± 5
Ca	158	59,3	231	125	281	316	171 ± 87	5,4	32,8	19 ± 19
Al	19,1	2,1	8,4	7,2	4,6	1,3	7 ± 6	1,4	0,01	0,7 ± 1,0
Fe	13,2	3,2	8,6	10,4	4,1	1,9	7 ± 5	1,5	0,7	1,1 ± 0,6
Mn	8,4	4,1	14,6	6,8	2,9	1,0	6 ± 5	0,1	0,04	0,1 ± 0,1
Cl	6,2	34,4	25,0	236,7	74,6	52,3	72 ± 84	161,0	254,2	208 ± 66

Źródło: Lanzerstorfer 2015

Tabela 6.3(6). Przykłady składów plewiaszkowych popiołów ze spalania biomasy (mg/kg)

Składnik	Popioły ze spalania							
	zrębki drewna z pozostałości leśnych > 90%; trociny i kora < 10%	drewna z odpadów leśnych, 80% drewna iglastego, 20% drewno liściaste	drewna z odpadów leśnych, 80% świerku, 20% – buk, dąb i brzoza	zrębki z odpadów leśnych, 90% świerku, 10% – buk, dąb i brzoza	drzewa kauczukowego: 95% zrębki i 5% kory	90% wiórów drzewnych z resztek leśnych i 10% odchodów końskich	stomy pszenicznej	stomy pszenicznej rozdrobnionej
As	19	36	27	62	15	19	7	10
B	263	221	671	292	227	114	17	103
Ba	484	91	191	136	357	144	271	33
Bi	95	237	124	167	59	104	8	45
Cd	19	105	41	77	9	32	3	8
Co	39	39	<25	<25	34	34	<25	33
Cr	92	76	87	70	15	41	22	7
Cu	11	140	145	156	<5	<5	<5	<5
Hg	0,8	0,1	1,7	4,2	<0,05	0,1	0,3	0,4
Mo	24	43	<5	<5	27	32	<5	46
Ni	31	23	27	4	31	6	<5	<5
Pb	352	602	250	892	53	228	<20	<20
Sb	10	12	<10	<10	10	11	<10	<10
Sr	284	242	641	283	461	141	55	25
V	36	38	<10	<10	30	10	<10	13
Zn	3,67	19,0	7,99	15,4	0,567	4,38	0,238	0,325

Źródło: Lanzeisforfer 2015

Tabela 6.3(7). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (mg/kg)

Składnik	Popioły ze spalania																			
	Li i in. 2012					Romero i in. 2017					Supancic i in. 2014					Lanzerstorfer 2017b				
	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodyga bawełny) – cyklon	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodyga bawełny) – odpylacz filtracyjny	suchych odpadów z oliwek	mokrych odpadów i liści oliwek	mokrych odpady z oliwek i trzciny cukrowej	kory i zrębków drewna	zrębków drewna	kawałków drewna z resztek leśnych	kawałków drewna z resztek leśnych	kawałków drewna z resztek leśnych	kawałków drewna z resztek leśnych									
P, g/kg	b.d.	b.d.	4,2 ± 0,1	5,3 ± 0,3	6,9 ± 0,6	5,34	2,44	b.d.	b.d.	b.d.										
K, g/kg	b.d.	b.d.	58 ± 3	35 ± 3	23 ± 2	63,2	45,0	138	81,2	143										
Na, g/kg	b.d.	b.d.	2,8 ± 0,2	2,1 ± 0,1	12 ± 1	3,15	32,5	2,7	2,3	39,4										
Mg, g/kg	b.d.	b.d.	15 ± 0,9	14 ± 1	21 ± 1	11,7	5,74	24,0	28,4	10,7										
Ca, g/kg	b.d.	b.d.	52 ± 1	96 ± 1	69 ± 3	155,0	48,2	161	228	104										
Fe, g/kg	1,988 mg/kg	8,136 mg/kg	6,3 ± 0,2	3,9 ± 0,4	10,8 ± 0,3	8,02	8,5	8,3	8,5	11,2										
Mn	5,02	7,144	172 ± 5	218 ± 14	297 ± 12	5,090	1 10	13,8 g/kg	7,7 g/kg	7,7 g/kg										
Cu	18,9	31,6	181 ± 5	214 ± 6	178 ± 5	70,1	44,2	145	177	207										
Zn	61,65	252	274 ± 4	156 ± 9	77 ± 3	198,0	420,0	7,27	4,31	14,8										
Ba	206,4	671,4	560 ± 17	228 ± 20	233 ± 14	b.d.	b.d.	662	623	371										
Cd	1,9	2,3	<0,2	<0,2	<0,2	4,5	0,2	40	31	75										
Ni	24,5	68,3	30 ± 1	29 ± 2a	32 ± 2	34,1	8,0	46	49	28										
Pb	23,4	36,1	67 ± 0,3	7 ± 1,1	5 ± 0,1	20,7	18,5	259	307	911										
Cr	10,1	128,1	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.										
As	5,1	25,6	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.										
Co	6,4	11,5	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.										
Ti	982	179	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.										
Hg	0,014	0,007	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.										

Tabela 6.3(8). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy (mg/kg)

Składnik	Popioły ze spalania	
	kawałków świerka pospolitego Maresca i in. 2017	miskanta Lanzerstorfer 2017a
As	2,68–6,98	6
B	b.d.	193
Ba	0,797–2,32	b.d.
Si	45,6–124,0	b.d.
S	4,21–15,3	b.d.
Cd	7,32–16,3	7
Co	5,79–9,69	16
Cr	26,5–62,7	90
Mn	4,03–30,3	b.d.
Na	6,65–12,0	b.d.
Mo	1,46–4,29	43
Ni	22,4–52,5	45
Pb	10,7–73,8	57
Sb	0,721–5,83	28
Se	<16,7	b.d.
Sn	1,21–6,37	b.d.
Sr	578–1 240	b.d.
Tl	0,975–1,98	b.d.
V	6,75–18,2	101
Zn	0,446–1,120	185
P	10,2–22,9	b.d.
Mg	19,3–32,9	b.d.
K	40,0–60,3	b.d.
Cu	0,106–0,161	51
Fe	2,88–8,3	b.d.
Ca	104–263	b.d.
Al	5,92–11,8	b.d.

Tabela 6.4. Zawartość pierwiastków w popiole biomasy różnych gatunków drzew (mg/kg)

Rodzaj drzewa	Zawartość w popiołach z biomasy									
	Mg	Ca	K	Na	P	S	Al	Fe	Mn	Si
Sosna Banksa	33,2	387	22,5	23,0	12,2	10,4	33,3	35,0	39,0	74,8
Sosna zwyczajna	120,0	600	300,0	3–22	30,0	b.d.	1–18	3–15	70,0	b.d.
Świerk pospolity	90,0	700	300,0	b.d.	20,0	b.d.	b.d.	b.d.	90,0	b.d.
Sosna	70,3	290	162,5	0,6	8,4	10,7	4,7	5,8	40,4	b.d.
Choina zachodnia	79,0	421	25,3	8,2	9,2	5,6	11,1	9,1	19,0	46,7
Brzoza	25,3	466	36,3	9,6	12,6	12,8	0,0	20,3	47,0	14,0
Brzoza omszona	90,0	500	400,0	7,0	40,0	100	3,0	7,0	90,0	90,0
Klon	117,0	402	31,9	16,3	4,8	5,6	20,1	11,9	27,0	46,3
Topola osikowa	35,5	212	112,5	0,6	11,8	7,0	1,4	2,6	1,4	1,1
Topola	90,9	257	79,3	23,0	9,5	10,2	3,5	3,2	4,5	b.d.
Dąb czerwony	52,0	366	60,8	0,8	15,6	18,0	6,8	b.d.	14,9	b.d.
Dąb biały	75,7	314	102,5	b.d.	5,6	12,1	b.d.	0,9	1,4	1,3

Źródło: Kowalkowski i Olejarski 2013

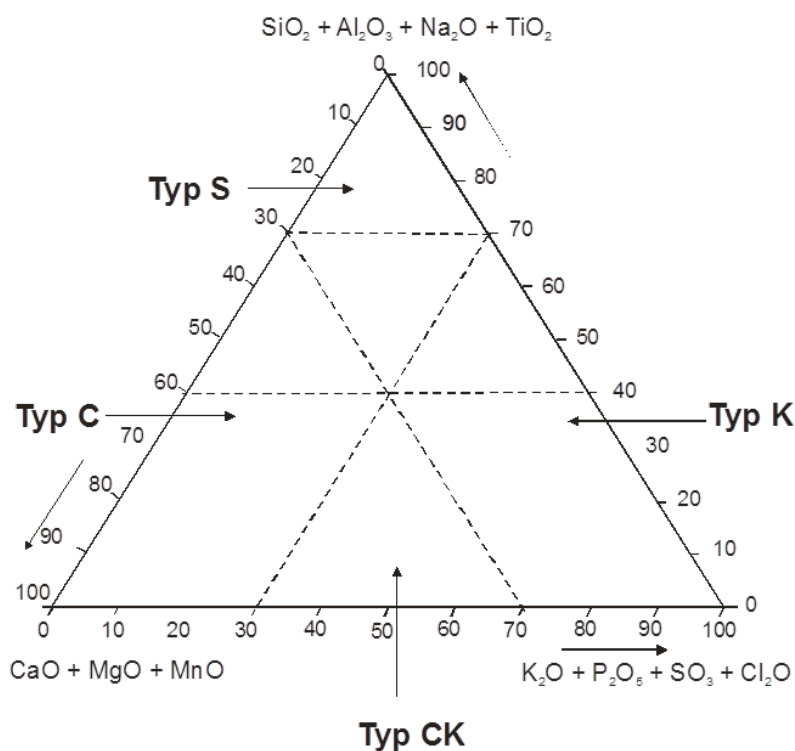
Rys. 6.1. Chemiczny podział popiołów z biomasy z podziałem na cztery typy: S, C, K i CK  
Źródło: Vassilev i in. 2010; Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki 2015

Tabela 6.5. Skład chemiczny popiołów dennych ze spalania biomasy

Składnik	Popioły ze spalania							
	Miskanta Lanzerstorfer 2017a	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodyga bawełny)	biomasy leśnej A	biomasy leśnej B	wytłoków z oliwek (40%) i pozostałości rolnicze – gałązki drzew oliwnych i owocowych oraz upraw energetycznych (60%)	kory z eukaliptusa z biomasą leśną	kawałków jodły	zrębków drewna i skorupki kakaowców
	Li i in. 2012	Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016b	Carrasco i in. 2014	Cruz i in. 2017	Maschio i in. 2011	Fontes i in. 2017		
Jedn.	mg/kg	%						
SiO <sub>2</sub>	719	42,0	90,0	27,87	71	14,8	10,2	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,2	14,5	2,5	4,34	4,8	3,2	1,6	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,9	3,5	1,0	3,59	1,6	3,3	2,8	
CaO	33,3	15,56	3,0	29,96	13,0	48,4	8,3	
MgO	13,9	7,32	0,7	4,05	1,9	9,9	15,8	
Na <sub>2</sub> O	0,40	1,29	b.d.	0,35	0,55	1,0	0,93	
K <sub>2</sub> O	107	4,14	b.d.	23,22	3,1	11,1	32,2	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11,5	b.d.	b.d.	4,18	0,84	1,0	11,3	
SO <sub>3</sub>	5,0	b.d.	3,0	0,762	0,98	<0,1	1,3	
MnO	1,39	b.d.	b.d.	0,091	b.d.	0,4	0,13	
TiO <sub>2</sub>	1,03	0,58	b.d.	0,352	0,20	<0,1	0,29	
Cl	b.d.	2,56	b.d.	b.d.	0,35	<0,1	b.d.	
Straty prażenia	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	1,5	2,4	15,3	

Tabela 6.6. Pierwiastkowy skład chemiczny popiołów dennych (mg/kg)

Składnik	Popiół denny ze spalania				
	kawałków świerka pospolitego	odpadów rolniczych (30%) i odpadów drewna (70%)	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny)	zrębków drewna w kotle rusztowym	zrębków drewna w kotle fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym
	Maresca i in. 2017	Shi i in. 2017	Li i in. 2012	Supancic i in. 2014	
Cl	b.d.	b.d.	b.d.	8,3	2,0
S	153-967	b.d.	b.d.	634	592
Al	14 300-16 800	20,49, g/kg	b.d.	39	17 300
Ca	79 400-162 000	63,72, g/kg	b.d.	277 000 mg/kg	48 200
Fe	4 610-6 570	16,38, g/kg	5 230,9	25 800	2 730
K	35 800-73 200	56,14, g/kg	b.d.	41 200	45 000
Mg	16 500-20 600	9,94, g/kg	b.d.	44 400	5 740
Mn	3 470-19 400	3,84, g/kg	4864	10 300	1 210
Na	8 260-11 100	3,31, g/kg	b.d.	4 780	3 250
P	8 310-17 400	5,63, g/kg	b.d.	9 720	2 440
Si	208 000-27 3000	b.d.	b.d.	117 000	377 000
As	2,17-3,19	17,47	9,2	1,6	1,9
Cd	0,158-0,467	2,54	1,1	0,7	0,2
Co	4,23-7,3	7,95	6,7	6,7	2,0
Cr	24,9-69,5	139,63	24,6	192,0	21,1
Cu	64,6-111	44,32	12,8	114,0	44,2
Mo	1,06-1,84	3,79	b.d.	1,0	0,4
Ni	27,4-38,6	30,57	28,5	56,6	8,0
Pb	4,74-79,8	34,30	29	5,7	18,5
V	10,4-18,4	b.d.	b.d.	54,7	9,5
Zn	73,9-234	253,92	99,19	94,0	420,0
Ba	802-1 400	b.d.	534,9	b.d.	b.d.
Ti	b.d.	b.d.	160	b.d.	b.d.
Hg	b.d.	0,24	0,005	b.d.	b.d.

Fazy występujące w popiołach ze spalania biomasy mogą mieć pochodzenie: pierwotne, które powstają przed i podczas rośnięcia i po „ścięciu” roślin; wtórne – powstające podczas spalania i trzeciorzędne – powstające podczas transportu i składowania produktów spalania. Mechanizmy powstawania tych faz są złożone i wśród procesów



powstawania można wymienić m. in.: krystalizację, dekarbonatyzację, rozkład, dehydratację, odparowanie, witrifikację, ulatnianie (tab. 6.7).

W składzie fazowym popiołów ze spalania biomasy występują: głównie – składniki nieorganiczne amorficzne i krystaliczne (minerały); podrzędnie – składniki organiczne w tym zwęglone i organiczne minerały i, w niewielkim zakresie, składniki płynne i gazowe (organiczne i nieorganiczne) (tab. 6.8).

W popiołach ze spalania biomasy zidentyfikowano 229 minerałów i faz (tabela 6.8) (Vassilev i in. 2013b).

W popiołach lotnych ze spalania biomasy stwierdzono występowanie amorficznych, półkrystalicznych i krystalicznych składników organicznych i nieorganicznych oraz składników ciekłych i gazowych. Nieorganiczna faza amorficzna występuje w postaci kulistych, sferoidalnych lub kanciastych, nieregularnych cząstek szkła. Nieorganiczne składniki krystaliczne (minerały) i półkrystaliczne mogą występować w popiołach ze spalania biomasy w postaci: kryształów, ziaren, agregatów czy minerałów słabokryształizowanych takich jak: krzemiany, tlenki, wodorotlenki, siarczany, siarczki, węglany chlorki i inne. Stwierdzono również występowanie składników organicznych: krystalicznych, półkrystalicznych i amorficznych w postaci kryształów, ziaren i agregatów minerałów organicznych oraz niespalony węgiel. Składniki płynne (płynne, ciekłe, gazowe) w popiołach ze spalania biomasy to: wilgotność i gaz oraz gazowo-ciekłe inkluzje połączone zarówno ze składnikami organicznymi, jak i nieorganicznymi (Vassilev i in. 2013a).

Najczęściej występują w popiołach ze spalania biomasy: kwarc, kalcyt, sylwin, arkanit, anhydryt, niespalony węgiel, faza szklista, wapno, peryklaz i hematyt. Jako składniki podrzędne wymieniane są: portlandyt, krystobalit, hydroksyapatyt, larnit, albit, fosforany wapnia, węglan potasu, skalenie potasu, halit, krzemiany wapniowo-potasowe (tab. 6.6). Rzadziej spotykane są: akermanit, plagioklasy, wollastonit, dolomit, apatyt, dioksyny, furany, gelenit, krzemiany potasu, rutyl. Rzadko spotykane są m. in.: ettringit, gips, melilit, merwinit, muskowitz, trydymit, natryt, amorficzne składniki nieorganiczne (Vassilev i in. 2013a).

Popioły ze spalania roślin, takich jak drzewa, które mają długie okresy rośnięcia, posiadają skład mineralny bardzo różniący się od roślin, które są zbierane kilka razy w ciągu roku. Popioły ze spalania roślin o krótkim okresie rośnięcia zawierają duże ilości tlenków o niskich temperaturach topnienia, głównie K i P, a także charakteryzują się niższą zawartością metali ciężkich (Nunes i in. 2016).

Skład fazowy jest ściśle zależny od zastosowanej techniki spalania (Gianoncelli i in. 2013), co potwierdzają dane zawarte w tabeli 6.9.

W popiołach z kotłów fluidalnych oprócz faz pochodzących ze spalania biomasy znajdują się również – produkt dekarbonatyzacji sorbentu (CaO) i produkt odsiarczania (anhydryt) (tab. 6.9).

Różnice w składach fazowych w zależności od rodzaju spalanej biomasy oraz stosowanego kotła występują również w przypadku popiołów dennych, na co wskazuje zespół Hinojosa i in. (2014) (tab. 6.10).

Tabela 6.7. Pochodzenie faz w popiołach ze spalania biomasy

Pochodzenie	Procesy powstawania	Miejsce powstawania	Czas powstawania	Mechanizm powstawania	Przykłady powstających faz
Pierwotne	naturalne	biomasa	przed i podczas rośnięcia i po „ścięciu” roślin	fazy i minerały, które nie ulegają przekształcaniu podczas spalania	SiO <sub>2</sub> (amorficzna), minerały ilaste, fajalit – Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , illit – (KH <sub>2</sub> O)Al <sub>2</sub> (AlSi)Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> , kaolinit – Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> , muskowitz – KAl <sub>2</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>
Wtórne	antropogeniczne	instalacja spalania	podczas spalania	nowe fazy powstające podczas reakcji stałych, ciekłych i gazowych między wczesniej istniejącymi i nowo powstającymi związkami (m.in.: karbonizacja, krystalizacja, dekarbonatyzacja, rozkład, dehydratacja, dehydroksylacja, zniszczenie, odsiarczanie, rozpuszczanie, odparowanie, rozdrobnienie, hydratacja, hydroksylacja, topienie, nukleacja, utlenianie, transformacja polimorficzna, strącanie, rekrytalizacja, redukcja, zmękczenie, reakcje w fazie stałej, wityfikacja, ulatnianie)	anortyt – (CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ), afwillit – Ca <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> O <sub>7</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O, kwarc – SiO <sub>2</sub> , langbeinit – K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , arkanit – K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , anhydryt – CaSO <sub>4</sub> , natryt – Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , syderyt – FeCO <sub>3</sub> , forsteryt – Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Trzeciorzędne	naturalne	instalacje transportujące i miejsca składowania	podczas transportu i składowania produktów spalania	nowe minerały lub fazy powstałe w wyniku wietrzenia (m.in.: karbonatyzacja, krystalizacja, rozkład, dehydratacja, dehydroksylacja, zniszczenie, rozpuszczanie, odparowanie, hydratacja, hydroksylacja, utlenianie, transformacja polimorficzna, strącanie, rekrytalizacja)	ettringit – Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> [(OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]·26 H <sub>2</sub> O, arterite – Mg <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O; hydroxalcite – Mg <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>16</sub> ·4H <sub>2</sub> O, gips – CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O, sepiolit – Mg <sub>4</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>15</sub> (OH) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, gismondyt – Ca <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>16</sub> ·9H <sub>2</sub> O

Źródło: Vassilev i in. 2013a

Tabela 6.8. Składy fazowe popiołów ze spalania biomasy

Składniki nieorganiczne	2
1	<p>afwillit – <math>\text{Ca}_3(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math>; akermanit – <math>\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7</math>; albit – <math>\text{NaAlSi}_3\text{O}_8</math>; krzemionka amorficzna – <math>\text{SiO}_2</math>; anortyt – <math>\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8</math>; augit – <math>(\text{Al,Ca})_2(\text{Fe,Mg,Ti})_2(\text{Al,Si})_2\text{O}_6</math>; bredigit – <math>\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4</math>; glinokrzemiany wapniowe – <math>\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2</math>; krzemiany Ca-Fe-Mg – <math>\text{Ca}(\text{Fe,Mg})\text{Si}_2\text{O}_6</math>; krzemiany wapniowo-magnezowe; uwodniony krzemian wapniowy – <math>\text{CaSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}</math>; krzemiany wapniowe – <math>\text{CaSiO}_4</math>; <math>\text{CaSi}_2\text{O}_5</math>, <math>\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_8</math>, <math>\text{Ca}_8\text{Si}_5\text{O}_{18}</math> i inne; krzemian kadmu – <math>\text{CdSiO}_3</math>; chloryt – <math>(\text{MgFe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8</math>; minerały ilaste; klinochlor – <math>(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})</math>; kordieryt – <math>\text{Mg}_2\text{Al}_3\text{AlSi}_5\text{O}_{18}</math>; krystobalit – <math>\text{SiO}_2</math>; diopsyd – <math>\text{CaMgSi}_2\text{O}_6</math> lub <math>\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2</math>; enstatyt – <math>\text{MgSiO}_3</math>; faujasyt – <math>\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10,6} \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math>; fajalit – <math>\text{Fe}_2\text{SiO}_4</math>; ferrogehlenit – <math>\text{Ca}_2\text{FeAlSiO}_7</math>; skalenie – <math>\text{NaAlSi}_3\text{O}_8</math> – <math>\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8</math>, <math>\text{KAlSi}_3\text{O}_8</math>; ferrosillite – <math>\text{FeSi}_2\text{O}_6</math>; forsteryt – <math>\text{Mg}_2\text{SiO}_4</math>; granaty (andradyt, pirop, grossular) – <math>\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3</math>, <math>\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3</math>, <math>(\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3)</math>; gehlenit – <math>\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7</math>; gismondyt – <math>\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}</math>; <i>hatrurite</i> – <math>\text{Ca}_3\text{SiO}_5</math>; hedenbergit – <math>\text{CaFeSi}_2\text{O}_6</math> lub <math>\text{Ca}(\text{FeMg})(\text{SiO}_3)_2</math>; illit – <math>(\text{KH}_2\text{O})\text{Al}_2(\text{AlSi})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2</math>; kalsilit – <math>\text{KAlSiO}_4</math>; glinokrzemiany potasowe; kaolinit – <math>\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4</math>; glinokrzemiany potasowo-wapniowe; krzemiany wapniowo-potasowe – <math>\text{K}_2\text{CaSiO}_4</math>, <math>\text{K}_4\text{CaSi}_3\text{O}_8</math> i inne; skałen potasowy – <math>\text{KAlSi}_3\text{O}_8</math>; krzemian potasowo-magnezowy – <math>\text{K}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7</math>; krzemiany potasowe – <math>\text{K}_2\text{Si}_4\text{O}_9</math>, inne; larnit – <math>\text{Ca}_2\text{SiO}_4</math>; leucyt – <math>\text{KAlSi}_2\text{O}_6</math>; makatite – <math>\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_8(\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})</math>; melilit (akermanito-gehlenit) – <math>\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7</math> – <math>\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7</math>; merwinit – <math>\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2</math>; metakaolinit – <math>\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5</math>; krzemiany magnezowe; mikroklin – <math>\text{KAlSi}_3\text{O}_8</math>; monticellit – <math>\text{CaMgSiO}_4</math>; mullit – <math>\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}</math>; muskowit – <math>\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2</math>; krzemian sodowo-wapniowy – <math>\text{Na}_2\text{CaSiO}_4</math>; mellilit sodowy – <math>\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7</math>; szkło wodne – <math>\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7</math> lub <math>\text{Na}_2\text{SiO}_3</math>; tremolit sodowy – <math>(\text{Ca,Na})_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2</math>; ortoklaz – <math>\text{KAlSi}_3\text{O}_8</math>; paranatrolite – <math>\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}</math>; plagioklasy – <math>\text{NaAlSi}_3\text{O}_8</math> – <math>\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8</math>; kwarc – <math>\text{SiO}_2</math>; rankinite – <math>\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7</math>; ribeckit – <math>\text{Na}_2\text{Fe}_3\text{Fe}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2</math>; samidyn – <math>\text{KAlSi}_3\text{O}_8</math> lub <math>(\text{K, Na})(\text{Si, Al})_4\text{O}_8</math>; sepiolit – <math>\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}</math>; <math>\text{Na}(\text{MnCa})_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})</math>; krzemionka – <math>\text{SiO}_2</math>; <i>suolunite</i> – <math>\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})</math>; talk – <math>\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2</math>; tridymit – <math>\text{SiO}_2</math>; wermikulit – <math>(\text{MgFeAl})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>; wollastonit – <math>\alpha</math>-<math>\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9</math> lub <math>\alpha</math>-<math>\text{CaSiO}_3</math>; zeolity – <math>(\text{Ca, Sr, Ba, Na}_2, \text{K}_2)\text{Al}_2\text{Si}_2\text{-}_{10}\text{O}_8\text{-}_{2,4} \cdot 2\text{-}8\text{H}_2\text{O}</math></p>
Tlenki i wodorotlenki	<p><math>\gamma</math>-<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>; <math>\text{Ca}_x\text{Fe}_y\text{O}_z</math>; <math>\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6</math>; <math>\text{Ca}_2\text{MnO}_4</math>; tlenki kadmu; korund – <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>; tlenki chromu (Cr, Fe)<math>_2\text{O}_3</math>; tlenki żelaza; gibbsyt – <math>\text{Al}(\text{OH})_3</math>; getyt – <math>\alpha</math>-<math>\text{FeOOH}</math>; hematyt – <math>\alpha</math>-<math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>; <i>hydrocalumite</i> – <math>\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6[\text{Cl}_{1-x}(\text{OH})_x] \cdot 3(\text{H}_2\text{O})</math>; <math>\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Cl}_2\text{O}_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}</math>; <math>\text{K}_2\text{Al}_2\text{O}_4</math> lub <math>\text{K}_2\text{Al}_{19}\text{O}_{29,5}</math>; <math>\text{K}_3\text{FeO}_2</math>; <math>\text{KOH}</math>, <math>\text{K}_2\text{O}</math>; <i>macedonite</i> – <math>\text{PbTiO}_3</math>; maghemite – <math>\gamma</math>-<math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>; magnetyt – <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>; <math>\text{Mg}(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4</math>; <math>\text{MgFeAlO}_4</math>; <math>\text{Mg}_6\text{MnO}_8</math>; <i>monteponite</i> – <math>\text{CdO}</math>; <math>\text{NaOH}</math>; <math>\text{Na}_2\text{O}</math>; <math>\text{PdO}</math>; peryklaz – <math>\text{MgO}</math>; <i>plattnerite</i> – <math>\text{PbO}_2</math>; portlandyt – <math>\text{Ca}(\text{OH})_2</math>; rutył – <math>\text{TiO}_2</math>; srebrodolskite – <math>\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5</math>; wustyt – <math>\text{FeO}</math>; cynk – <math>\text{ZnO}</math>; tlenki Zn-Al (Zn, Fe)<math>[\text{Fe}_2\text{O}_4; \text{Zn}_x\text{Ti}_y\text{O}_4</math></p>
Siarczany, siarczki, siarczyny i tiosiarczany	<p>siarczany amorficzne K, Na, Ca i Mg; anhydryt – <math>\text{CaSO}_4</math>; <i>aphtitalite</i> – <math>(\text{KNa})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2</math>; arkanit – <math>\text{K}_2\text{SO}_4</math>; bassanit – <math>\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}</math>; Ca-K siarczany; langbeinit – <math>\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3</math> lub <math>\text{K}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)_3</math>; <math>\text{CaMg}_3(\text{SO}_4)_4</math>; ettryngit – <math>\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}</math>; <i>glaserite</i> – <math>\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2</math>; gips – <math>\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}</math>; <math>\text{MgSO}_4</math>; <math>\text{K}_2\text{S}</math>, <math>\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3</math>; <math>\text{Mg}_2\text{SO}_3</math>; <i>millosevichit</i> – <math>\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3</math>; <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3</math>; <i>oldhamite</i> – <math>\text{CaS}</math>; <i>picromerite</i> – <math>\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}</math>; siarczki; siarczyny; syngenit – <math>\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}</math>; <math>\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_3</math>; tenardyt – <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>; <i>xanthoconite</i> – <math>\text{Ag}_3\text{AsS}_3</math></p>

Tabela 6.8 cd.

1	2
Fosforany	apatyt – $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH}, \text{CO}_3)$ lub $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH}, \text{CO}_3)$ ; $\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$ ; <i>berlinit</i> – $\text{AlPO}_4$ ; $\text{Ca}_9\text{FeH}(\text{PO}_4)_7$ ; $\text{CaKPO}_4$ ; $\text{Ca}_9\text{MgK}(\text{PO}_4)_7$ ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ , inne; chloroapatyt – $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{Cl})$ lub $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl})$ ; <i>durapatite</i> – $\text{Ca}_5\text{HO}_{13}\text{P}_3$ ; $\text{FePO}_4$ ; $\text{Fe}_7(\text{PO}_4)_6$ ; hydroksoapatyt – $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ lub $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ; $\text{KCa}(\text{PO}_4)$ ; $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; $\text{K}_3\text{PO}_4$ ; $\text{K}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ; $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ – $3\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{MgCaPO}_4$ ; Mg fosforany; $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ; Na-K fosforany; Na fosforany – $\text{Na}_6\text{P}_2\text{O}_8$ i inne; <i>whitlockite</i> – $\text{Ca}_9\text{Fe}(\text{PO}_4)_7$ lub $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , Zn fosforany
Węglały	ankeryt – $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$ ; <i>arterite</i> – $\text{Mg}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; <i>baylissite</i> – $\text{K}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ; $\text{Ca}_2\text{K}_2(\text{CO}_3)_3$ ; kalcyt – $\text{CaCO}_3$ ; węglany zawierające Cr; dolomit – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ; <i>eitelite</i> – $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$ ; <i>fairchildite</i> – $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ; <i>hydrocalcite</i> – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; <i>hydrotalcite</i> – $\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; <i>kalicinite</i> – $\text{KHCO}_3$ ; $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; magnezyt – $\text{MgCO}_3$ ; natryt – $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; <i>natrofairchildite</i> – $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ; <i>nesquehonite</i> – $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; <i>nyerereite</i> – $(\text{Na}_{0,82}\text{K}_{0,18})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ ; <i>paraalumohydrocalcit</i> – $\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; syderyt – $\text{FeCO}_3$
Chlorki	$\text{CaCl}_2$ ; $\text{Ca}(\text{ClO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{CaOHCl}$ ; $\text{KCaCl}_3$ ; $\text{CdCl}_2$ ; <i>cotunnite</i> – $\text{PbCl}_2$ ; chlorki żelaza, halit – $\text{NaCl}$ ; halit potasowy – $\text{K}_0,2\text{Na}_{0,8}\text{Cl}$ lub $\text{K}_{0,4}\text{Na}_{0,6}\text{Cl}$ ; nadchloran potasu $\text{KClO}_4$ ; sylwin – $\text{KCl}$ ; $\text{ZnCl}_2$
Azotany	$\text{KNO}_3$
Szkło	różne składniki
Inne fazy nieorganiczne	materiał amorficzny nieorganiczny; Al; Pb; $\text{K}_2\text{Mo}_3\text{Se}_{18}$ ; <i>margaritasite</i> – $(\text{CsKH}_3\text{O})_2(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; stopy metali i czyste metale
Składniki organiczne	koks (niespalona materia organiczna, półkoks, koks, sadza, smoła, inne) chlorobenzen – $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ ; chlorofenol – $\text{C}_6\text{H}_5\text{ClO}$ ; cyjanki; $\text{NaOCN}$ ; polichlorowane dioksyny i furany; poliaromatyczne lub wielopiersścieniowe węglowodory
Związki organiczne	<i>weddellite</i> – $\text{Ca}(\text{CO}_2)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$ lub $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; <i>whewellite</i> – $\text{CaC}_2\text{O}_4$ ; $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;
Faza ciekła	

Źródło: Vassilev i in. 2013a

Tabela 6.9(1). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy

Składnik	Popioły lotne ze spalania										
	Romero i in. 2017		Berra i in. 2015			Koukouzas i in. 2009		Rajamma i in. 2009		Yeboah i in. 2014	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	suchych odpadów z oliwek w kotle rusztowym	mokrych odpadów i liści oliwek w kotle rusztowym	mokrych odpadów z oliwek i trzciny cukrowej w kotle fluidalnym	zrębków kasztanów lub topoli A	zrębków kasztanów lub topoli B	odpadów drewna	drewna w kotle fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym	biomasy leśnej w kotle z rusztem wibracyjnym	biomasy leśnej, odpadów drewna z tartaku, odpadów drewna miejskich w kotle rusztowym	odpadów drewna z tartaku w kotle rusztowym	
1	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kwarc ( $SiO_2$ )	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomit ( $CaMg(CO_3)_2$ )	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_2CO_3$	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anhydryt ( $CaSO_4$ )	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Kalcyt ( $CaCO_3$ )	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Skaleń	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Hematyt ( $Fe_2O_3$ )	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-
Illit ( $(KH_2O)Al_2(AlSi)_3O_{10}(OH)_2$ )	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Arkanit ( $K_2SO_4$ )	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
CaO	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Gelenit ( $CaAl_2SiO_2$ )	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-
Sylwin (KCl)	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Halit (NaCl)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 6.9(1) cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Aphthitalite ((KNa) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydroksyapatyt (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH))	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Kalcynit (KHCO <sub>3</sub> )	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
MgSO <sub>4</sub>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Getyt (FeOOH)	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Minamite (Na,Ca,K)Al <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Faza amorficzna						+				
Minium (Pb <sup>2+</sup> , <sub>2</sub> Pb <sup>4+</sup> O <sub>4</sub> )	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Anglezyt (PbSO <sub>4</sub> )	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Fluoroapatyt (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F)	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Vuagnatite (CaAlSiO <sub>4</sub> (OH))	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 6.9(2). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy

Składnik	Popioły lotne ze spalania										
	Umamaheswaram i Batra 2008										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	łusek ryżowych	odpadów trzciny cukrowej	orzesków ziemnych	areki katechu	łupin nerkowca	biomasy leśnej w kotle rusztowym	biomasy leśnej w kotle fluidalnym	80% biomasy leśnej i 20% odpadów z rolnictwa w kotle fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym	biomasy leśnej w kotle fluidalnym z naturalną cyrkulacją	biomasy leśnej w kotle fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym	
1						Girón i in. 2013	Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a				
Kwarc ( $\text{SiO}_2$ )	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Anhydryt ( $\text{CaSO}_4$ )	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-
Kalcyt ( $\text{CaCO}_3$ )	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Hematyt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-
Arkanit ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+
CaO	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+
Gelenit ( $\text{CaAl}_2\text{SiO}_2$ )	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Sylwin (KCl)	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+
$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Portlandyt ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Magnezyt ( $\text{MgCO}_3$ )	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Halit (NaCl)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
Anortyt ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mikroklin ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ )	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 6.9(2) cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Peryklaz (MgO)	-	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Merwinit (Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Hydroksyapatyt (Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH))	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalcymit (KHCO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgSO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Natroalunite (NaAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Krystobalit (SiO <sub>2</sub> )	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trydymit (SiO <sub>2</sub> )	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Butschiite K <sub>2</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>										
Diopsyd (CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Apatyt Ca(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (Cl, F, OH, CO <sub>3</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabela 6.9(3). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy

Składnik	Popioły lotne ze spalania									
	kawałków jodły	zrębków drewna w kotle fluidalnym ze złożem cyrkulacyjnym	kawałków świerka pospolitego	słomy w kotle rusztowym	drewna w kotle z ruchomym rusztem	trocin i kory sosny w kotle fluidalnym – odpylacz workowy	trocin i kory sosny w kotle fluidalnym – cyklon	trocin, kory i zrębków japońskiego cedru w kotle rusztowym – odpylacz workowy	trocin, kory i zrębków japońskiego cedru – cyklon	
	Maschio i in. 2011	Supancic i in. 2014	Maresca i in. 2017	Bogush i in. 2018	Jukić i in. 2017	Maeda i in. 2017				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Kwarc ( $\text{SiO}_2$ )	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-
Anhydryt ( $\text{CaSO}_4$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalcyt ( $\text{CaCO}_3$ )	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Hematyt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Arkanit ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-
CaO	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Gelenit ( $\text{CaAl}_2\text{SiO}_2$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sylwin ( $\text{KCl}$ )	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+
$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Portlandyt ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Magnezyt ( $\text{MgCO}_3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Halit ( $\text{NaCl}$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Fe}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Anortyt ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 6.9(3) cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mikroklim ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Peryklaz ( $\text{MgO}$ )	+	+	+	-	+	-	-	-	-
Merwinit ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ )	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydroksyapatyt ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calicinite ( $\text{KHC}\text{O}_3$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{MgSO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Natroalunite ( $\text{NaAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kryształit ( $\text{SiO}_2$ )	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Trydymit ( $\text{SiO}_2$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{K}_2\text{CO}_3$	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Butschiite $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$									
Diopsyd ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ )	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Apatyt $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{Cl, F, OH, CO}_3)$	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$\text{CaSi}_2\text{O}_5$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Na}_4\text{Ca}_4\text{Si}_6\text{O}_{18}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leucyt ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kalsilit ( $\text{KAlSiO}_4$ )	-	+	-	-	+	-	-	-	-
$\text{K}_2\text{SO}_4$	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Dolomit	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Akermanit ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ )	-	+	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Na}_2\text{CaSiO}_4$	-	-	-	-	+	-	-	-	-

Tabela 6.10. Przykładowe składy fazowe popiołów dennych ze spalania biomasy

Składnik	Popiół denny ze spalania				
	odpadów rolniczych (30%) i odpadów drewna (70%)	kawałków jodły	wytłoków z oliwek (40%) i pozostałości rolniczych – gałązki drzew oliwnych i owocowych oraz upraw energetycznych (60%) w kotle parowym z rusztem wibracyjnym	zrębków drewna w kotle rusztowym	drzewa oliwnego, orzeszków pini, topoli, dębu, eukaliptusa
	Shi i in. 2017	Maschio i in. 2011	Carrasco i in. 2014	Supancic i in. 2014	Cabrera i in. 2014
Kwarc ( $\text{SiO}_2$ )	+	+	+	+	+
Kalcyt ( $\text{CaCO}_3$ )	+	+	+	+	+
CaO	-	+	-	+	-
Larnit ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ )	-	-	+	+	-
Leucyt ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ )	-	-	-	-	-
Kalsilit ( $\text{KAlSiO}_4$ )	-	-	-	+	-
Portlandyt ( $\text{Ca(OH)}_2$ )	-	-	-	+	-
Albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	-	-	+	-
Mikroklin ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )	-	-	-	+	-
Peryklaz ( $\text{MgO}$ )	-	+	-	+	-
Apatyt $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{Cl, F, OH, CO}_3)$	+	-	-	+	-
Merwinit ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ )	-	-	-	+	-
Akermanit ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ )	-	+	-	+	-
Aphthitalite ( $(\text{KNa})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ )	-	-	-	-	-
Ankeryt $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$	-	-	+	-	-
Langbeinite $\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$	-	-	+	-	-
$\text{K}_3\text{FeO}_2$	-	-	-	-	-
Sylwin (KCl)	+	-	-	-	-
$\text{CaSO}_4$	+	-	-	-	-
Krystobalit ( $\text{SiO}_2$ )	+	-	-	-	-
Dolomit	-	+	-	-	-
$\text{Ca}_4\text{Fe}_{14}\text{O}_{25}$	-	-	+		

### 6.3. Wymywalność zanieczyszczeń

Popioły ze spalania biomasy mogą charakteryzować się wysoką wymywalnością zanieczyszczeń i przez to ich gospodarcze wykorzystanie może być ograniczone (tab. 6.11–6.13).

W popiołach lotnych zawartość składników rozpuszczalnych w wodzie jest wysoka i może wynosić do 61% (Vassilev i in. 2013a, b; 2014), a nawet dochodzić do 70% (Bogush i in. 2018).

Wartość pH wynosi od 4,5 do 13,4%. Taka wartość pH wynika przede wszystkim z wysokiej zawartości składników bogatych w K, Cl, Ca i Mg. Podczas spalania biomasy powstają rozpuszczalne związki Ca, Mg, K i Na: tlenki, wodorotlenki, węglany i wodorowęglany, a w rezultacie rośnie pH. Na wartość pH ma również wpływ temperatura spalania i czas składowania. Alkaliczność spada ze wzrostem temperatury spalania i czasu składowania. Zjawisko obniżania pH składowanych popiołów ze spalania biomasy wynika z zachodzących procesów powstawania węglanów w wyniku zachodzenia naturalnego procesu karbonatyzacji (Vassilev i in. 2013a, b; 2014).

Wysoka wymywalność związana jest z występowaniem w tego typu popiołach łatwo rozpuszczalnych chlorków (sylwin, halit), siarczanów (syngenit, ettringit, gips), tlenków (CaO), wodorotlenków (portlandyt), azotanów, węglanów i wodorowęglanów.

Wysoka wymywalność takich pierwiastków jak: Ba, Cl, Cr, Mo, Pb może stanowić problem środowiskowy (Vassilev i in. 2013a, b; 2014).

Średnią zawartość pierwiastków wymywanych z różnych popiołów można uszeregować w następujący sposób: Cl > S > Na > Sr > Ni > Mn > Cd > Cr > Zn > Co > Si > Mo > Li > (Mg, Pb) > Ca > Cu > Ba > P > Se > Sb > Al > Fe > (Br, Hg) > (As, B, Sn, Ti, V) (Vassilev i in. 2013c).

Wymywalność większości pierwiastków jest zależna od wartości pH i bardziej alkaliczny charakter powoduje obniżenie wymywania dużej ilości pierwiastków: Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn, ale zwiększa wymywalność: As, B, Cr, F, Mo, Sb, Se, V i W (Vassilev i in. 2013b; 2014).

Pierwiastki takie jak: As, B, Ba, Cl, Cr, F, Mo, Pb, S, Sb, Se, V mogą być wymywane ze względu na ich mobilność w warunkach alkalicznych, które są typowe dla popiołów ze spalania biomasy. Z drugiej jednak strony, produkty hydratacji takie jak: glinokrzemian wapnia, portlandyt czy ettringit w warunkach wysokiego pH mogą zmniejszać ich mobilność na drodze fizycznej zmniejszając porowatość popiołu lub chemicznie wiążąc te pierwiastki. Jednak proces naturalnej karbonatyzacji może spowodować obniżenie pH i uwolnienie wielu pierwiastków śladowych z popiołów np. Cr (Supancic i in. 2014).

Toksyczność popiołów dennych jest zazwyczaj niższa niż popiołów lotnych, jednak popioły denne mogą zawierać zanieczyszczenia, w tym metale ciężkie, w formie łatwo ługowalnej (Carrasco i in. 2014).

Badania prowadzone przez Supancic i in. (2014) wskazują na zmniejszone wymywanie Ca w czasie składowania związane z reakcją  $\text{Ca(OH)}_2$  z  $\text{CO}_2$  i powstawaniem  $\text{CaCO}_3$ , który ma niższą rozpuszczalność w porównaniu do  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Tabela 6.11. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy

Rodzaj zanieczyszczenia/ pH	Wymywalność z popiołów ze spalania									
	kawałków świerka pospolitego [mg/kg]	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny) – cyklon [mg/kg]	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny) – odpylacz filtracyjny [mg/kg]	kory i zrębków drewna w kotle fluidalnym ze złożem bąbelkowym [mg/kg]	zrębków drewna z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym [mg/kg]	słomy [mg/kg]	biomasy leśnej [mg/dm <sup>3</sup> ]	biomasy [mg/dm <sup>3</sup> ]	biomasy leśnej i odpadów z rolnictwa [mg/dm <sup>3</sup> ]	
	Maresca i in. 2017	Li i in. 2012	Supancic i in. 2014	Bogush i in. 2018	Uliasz-Bocheńczyk i in. 2015					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Chlorki	3 200	b.d.	b.d.	166	1,21	13	445,6	1 449,0	658,3	
Siarczany	1 600	b.d.	b.d.	1 040	320	0,32	1 436,9	5 745,8	4 779,7	
K	28 000	b.d.	b.d.	14 200	384	11,2%	604	9 446	3 161	
Na	2 400	b.d.	b.d.	197	42	0,037%	25	83	67	
As	<0,022	b.d.	b.d.	< 5	< 5	b.d.	-	0,002196	-	
Cd	<0,007	0,01	0,01	< 0,03	< 0,03	< 0,1	0,000336	0,000057	0,000073	
Cu	0,066	0,14	0,18	b.d.	b.d.	1,6	0,447	0,1642	0,2013	
Cr	6,2	0,34	0,05	0,91	0,08	b.d.	0,001158	0,001634	0,00142	
Hg	b.d.	0,003	0,002	b.d.	b.d.	b.d.	0,000141	0,000374	0,00004	
Pb	0,09	0,02	0,02	0,11	< 0,5	21	0,009927	0,004876	0,340	
Ba	2,9	b.d.	b.d.	10,6	1,27	1,4	b.d.	b.d.	b.d.	
Mn	<0,053	1,13	1	0,14	0,03	0,03	b.d.	b.d.	b.d.	

Tabela 6.11 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mo	1,1	b.d.	b.d.	< 0,2	< 0,2	28	b.d.	b.d.	b.d.
Ni	1,1	b.d.	b.d.	< 0,1	< 0,1	<0,01	b.d.	b.d.	b.d.
Sr	56	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	43	b.d.	b.d.	b.d.
Ti	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	<0,01	b.d.	b.d.	b.d.
Zn	0,31	0,13	0,11	< 0,2	< 0,2	5,0	b.d.	b.d.	b.d.
Co	<0,005	b.d.	b.d.	< 0,2	< 0,2	0,48	b.d.	b.d.	b.d.
pH	12,7	b.d.	b.d.	13,5	12,3	12,68	12,25	12,79	12,46

Tabela 6.12. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów ze spalania kory i drewna (mg/kg)

Popioły ze spalania	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Ba	Cd	Pb
Kory	0,84	0,16	1,0	0,37	(0,004)	0,17	110	29	(0,001)	0,56
	0,33	0,16	0,069	0,085	(0,003)	0,009	130	61	0,001	0,078
	0,21	0,1	0,10	0,016	(0,008)	0,009	210	120	0,001	0,28
	3,5	0,14	7,2	1,3	0,28	0,14	3,2	5,6	0,005	0,22
	8,9	0,085	0,45	0,017	0,35	0,061	2,9	1,2	(0,004)	0,036
Drewna	2,0	0,31	7,0	250	0,27	1,2	6,0	5,3	0,20	12
	5,0	0,092	3,3	12	0,62	0,22	5,6	2,4	0,081	0,23
	130	0,071	0,35	0,44	0,51	0,20	1,8	0,94	0,016	1,4
	24	0,053	0,28	0,097	0,69	0,077	1,7	0,68	0,017	0,11
	6,7	0,098	0,027	1,1	0,026	0,31	0,5	0,23	0,005	0,015
Kory i drewna	11	0,072	0,10	5,0	1,1	0,53	7,1	2,8	0,006	0,097
	6,6	0,069	0,043	0,13	0,038	0,084	9,5	7,7	(0,004)	0,029
	0,17	0,19	0,13	0,11	(0,004)	0,012	140	32	(0,001)	0,073
	3,8	0,17	0,18	0,060	0,010	0,040	6,0	0,79	0,006	0,088
	79	0,077	0,36	2,9	16	0,17	2,0	1,1	0,007	0,20
	7,0	0,12	1,4	0,46	0,75	0,67	1,1	0,88	0,012	0,034
	2,7	0,078	0,15	2,2	(0,004)	0,28	15	8,5	(0,002)	0,22
	12	0,16	0,067	0,11	0,081	0,19	6,6	4,8	(0,003)	0,023
	11	0,06	0,10	0,083	(0,003)	0,046	66	28	(0,004)	0,020

Źródło: Sano i in. 2013

Tabela 6.13. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów dennych ze spalania biomasy

Składnik	Popiół denny ze spalania		
	odpadów leśnych (np. kora, zrębki i gałęzie) i rolniczych (np. słoma, łuski ryżu i łodygi bawełny) [mg/kg]	wytłoków z oliwek (40%) i pozostałości rolniczych – gałązki drzew oliwnych i owocowych oraz upraw energetycznych (60%) w kotle parowym z rusztem wibracyjnym [mg/dm <sup>3</sup> ]	zrębków drewna w kotle rusztowym [mg/kg]
	Li i in. 2012	Carrasco i in. 2014	Supancic i in. 2014
Cl	b.d.	b.d.	8,3
S	b.d.	b.d.	10,7
Al	b.d.	b.d.	<1
Ba	b.d.	0.0128	116
Ca	b.d.	b.d.	8 860
Fe	b.d.	b.d.	0,03
K	b.d.	b.d.	1 990
Mg	b.d.	b.d.	0,36
Mn	0,25	b.d.	0,02
Na	b.d.	b.d.	118
P	b.d.	b.d.	<5
Si	b.d.	b.d.	<10
As	b.d.	0,1892	<5
Cd	0,01	0,0009	<0,03
Co	b.d.	b.d.	<0,2
Cr	0,05	0,2265	0,16
Cr(VI)	b.d.	b.d.	0,16
Cu	0,12	1,4070	<0,1
Mo	b.d.	b.d.	<0,2
Ni	0,01	0,9376	<0,1
Pb	0,02	0,0110	<0,5
V	b.d.	b.d.	<0,1
Zn	0,15	0,1913	<0,2
Hg	0,001	0,0019	b.d.
Sb	0,01	b.d.	b.d.
Se	0,14	b.d.	b.d.
pH	b.d.	b.d.	13,27



Zwiększone wartości wymywania K i Na mogą być najprawdopodobniej spowodowane fragmentacją aglomeratów popiołu przez zwiększenie objętości podczas pobierania wody przez CaO i reakcją  $\text{Ca(OH)}_2$  z  $\text{CO}_2$ , przez co większa powierzchnia jest narażona na wymywanie i uwalnianie K i Na (Supancic i in. 2014).

## 6.4. Właściwości fizyczne

### 6.4.1. Uziarnienie

Porównanie składów granulometrycznych popiołów ze spalania biomasy jest bardzo trudne ze względu na różny sposób przedstawiania wyników badań w publikacjach.

Analiza popiołów ze spalania kawałków jodły wykazała, że zawierają one głównie drobne cząstki poniżej  $300\ \mu\text{m}$  (Maschio i in. 2011).

Skład granulometryczny popiołów ze spalania biomasy określony przez zespół Cuenca i in. (2013) wykazał, że frakcja przechodząca przez sito o wymiarze:

- $2\ \text{mm}$  stanowiła 100% próbki,
- $0,125\ \text{mm}$  wyniosła  $96\pm 1\%$ ,
- $0,063\ \text{mm}$  to  $80\pm 2\%$ .

Badane przez zespół Supancic i in. (2014) popioły denne ze spalania zrębków drewna w kotle rusztowym charakteryzują się 30% udziałem cząstek większych niż  $1600\ \mu\text{m}$ . Popioły z kotłów fluidalnych (denny ze spalania zrębków drewna – złożo bąbelkowe oraz denne ze spalania zrębków drewna – złożo cyrkulacyjne) mają mniejszy średni rozmiar cząstek z prawie 100% zawartością frakcji mniejszej niż  $800\ \mu\text{m}$ .

Popioły denne ze spalania kory z eukaliptusa z biomasą leśną charakteryzowały się piaskową, grubą teksturą (Cruz i in. 2017). Rozkład wielkości ziaren dla tych popiołów wynosił odpowiednio:

- $< 2\ \mu\text{m}$  – 0,5%,
- $> 2\ \mu\text{m} < 50\ \mu\text{m}$  – 1,5%,
- $> 50\ \mu\text{m} < 2\ \text{mm}$  – 98%.

Z kolei dla popiołów lotnych ze spalania kory z eukaliptusa z biomasą leśną (Cruz i in. 2017) rozkład wielkości ziaren przedstawiał się następująco:

- $< 2\ \mu\text{m}$  – 12%,
- $> 2\ \mu\text{m} < 50\ \mu\text{m}$  – 76%,
- $> 50\ \mu\text{m} < 2\ \text{mm}$  – 12%.

Romero i in. (2017) stwierdzili, że popioły ze spalania suchych odpadów z oliwek w kotle rusztowym oraz mokrych odpadów i liści oliwek w kotle z ruchomym rusztem

charakteryzują się zawartością powyżej 64% ziaren o średnim wymiarze – 250–50  $\mu\text{m}$ , a popioły lotne ze spalania mokrych odpadów z oliwek i trzciny cukrowej w kotle fluidalnym miały największy udział – 45% małych ziaren poniżej 50  $\mu\text{m}$  i tylko 10% udział dużych cząstek (>250  $\mu\text{m}$ ).

Popioły lotne ze spalania biomasy badane przez Umamaheswaran i Batra (2008) charakteryzowały się następującymi średnimi wymiarami ziaren:

- popioły ze spalania orzeszków ziemnych – 19,6  $\mu\text{m}$ ,
- popioły ze spalania odpadów trzciny cukrowej – 26,4  $\mu\text{m}$ ,
- popioły ze spalania łupin nerkowca – 17,7  $\mu\text{m}$ ,
- popioły ze spalania areki katechu – 57,4  $\mu\text{m}$ ,
- popioły ze spalania łusek ryżowych – 28,3  $\mu\text{m}$ .

Popioły denne ze spalania kawałków jodły charakteryzują się uziarnieniem z przewagą frakcji piaskowej – 51,51%, a tylko w 25,75% całkowitej badanej próbki ma wymiar poniżej 400  $\mu\text{m}$  (Carrasco i in. 2014).

Wyniki oznaczeń w zakresie uziarnienia prowadzone przez Lanzerstorfera (2015) i Madea i in. (2017) przedstawia tabela 6.14.

Próbki popiołów ze spalania biomasy z różnych źródeł (García i in. 2015) wykazały, że ponad 80% jest grubsze niż 200  $\mu\text{m}$ . Popioły ze spalania peletów, buraków, odpadów sosny lub odpadów z produkcji wina, nawet 90%.

Analizy popiołów ze spalania drewna wykazały różne uziarnienie dla trzech badanych próbek (Berra i in. 2015). Pierwsza – popioły ze spalania zrębków kasztanów lub topoli charakteryzowała się uziarnieniem, w którym 50% wagowych cząstek ma rozmiary (d<sub>50</sub>) mniejsze niż 60  $\mu\text{m}$ , druga próbka, również z tego samego paliwa – d<sub>50</sub> około 100  $\mu\text{m}$  i 140  $\mu\text{m}$  dla trzeciej ze spalania odpadów drewna. Średnia wielkość cząstek wynosiła 135, 86 i 17  $\mu\text{m}$ .

Badania składu ziarnowego popiołów ze spalania drewna i biomasy leśnej wykazały średni wymiar ziaren – 52,92  $\mu\text{m}$ , a ze spalania kory eukaliptusa – 16,04  $\mu\text{m}$ .

Popioły ze spalania biomasy leśnej i odpadów z rolnictwa w kotłach fluidalnych charakteryzują się podobnymi składami granulometrycznymi (rys. 6.2).

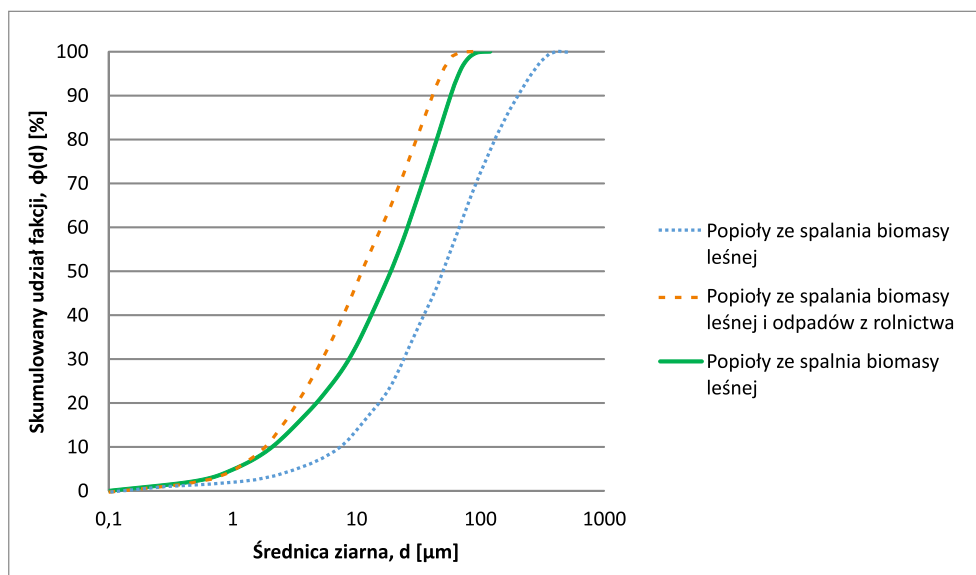
#### 6.4.2. Gęstość

Popioły ze spalania biomasy charakteryzują się różną gęstością wynoszącą powyżej 2000 g/cm<sup>3</sup> (tab. 6.15).

Popioły denne ze spalania drewna oliwnego, orzeszków pinii, topoli, dębu, eukaliptusa charakteryzowały się gęstością od 1700 do 2000 kg/dm<sup>3</sup> (Cabrera i in. 2014), o wiele niższą niż ze spalania kawałków jodły wynoszącą 2600 kg/dm<sup>3</sup> (Maschio i in. 2011).

Tabela 6.14. Charakterystyka uziarnienia przykładowych popiołów ze spalania biomasy

Składnik	Popioły ze spalania									
	trocin, kory i zrębków japońskiego cedru w kotle rusztowym – odpylacz workowy	trocin, kory i zrębków japońskiego cedru w kotle rusztowym – odpylacz workowy	zrębków drewna pozostatości leśnych > 90%; trociny i kora < 10%	drewna z odpadów leśnych, 80% iglastego, 20% drewno liściaste	drewna z odpadów leśnych, 80% świerku, 20% – buk, dąb i brzoza	drewna z odpadów leśnych, 90% świerku, 10% – buk, dąb i brzoza	zrębków z odpadów leśnych, 90% świerku, 10% – buk, dąb i brzoza	drzewa kauczukowego: 95% zrębków i 5% kory	90% wiórów drzewnych z resztek leśnych i 10% odchodów konskich	słomy pszennej
	Maeda i in. 2017									
Mediana średnicy uziarnienia popiołu (µm)	4.1	5.4	31	3,2	5,2	4,8	4,2	4,2	4,0	1,6
Zakres wielkości ziaren	b.d.	b.d.	51	6	18	29	30	11	89	55
	Lanzerstorfer 2015									



Rys. 6.2. Skład granulometryczny badanych popiołów  
Źródło: Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a

## 6.5. Gospodarcze wykorzystanie

Z popiołami ze spalania biomasy należy postępować zgodnie z hierarchią metod zapisaną w ustawie o odpadach (Ustawa... 2012), jednak duża różnorodność składu popiołów utrudnia wybór kierunku wykorzystania popiołów ze spalania biomasy.

W przypadku popiołów ze spalania biomasy recykling następuje wtedy, gdy popioły – w rzeczywistości składniki odżywcze w nich zawarte – zostają zwrócone do gleby, gdzie powstała biomasa (Pels i Sarabèr 2011).

Odzyskiwanie jest szeroką kategorią i obejmuje zarówno bezpośrednie aplikacje, jak i wykorzystanie jako surowca do wytwarzania produktu. Aplikacje te mogą być z przygotowaniem wstępnym lub bez i stanowią większość opcji wykorzystania w kierunkach takich w jakich stosowane są popioły lotne ze spalania węgla – produkcja materiałów budowlanych czy budownictwo drogowe. Również wykorzystanie popiołów do nawożenia mieści się w kategorii odzysku (Pels i Sarabèr 2011).

Najważniejsze kierunki analizowane dla popiołów lotnych ze spalania biomasy to zastosowanie (Uliasz-Bocheńczyk, Mokrzycki 2015; Uliasz-Bocheńczyk, Mokrzycki 2018):

- w produkcji materiałów budowlanych (Wang i in. 2008; Rajamma i in. 2015; Cuenca i in. 2013; Maschio i in. 2011; Rajamma i in. 2009; Fontes i in. 2017; Ban i Ramli 2011; Demis i in. 2014; Lessard i in. 2017),

Tabela 6.15. Gęstości popiołów ze spalania biomasy

Składnik	Popioły ze spalania										Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]						
	drewna	drewna i biomasy leśnej	kory eukaliptusa	zrębków kasztanów lub topoli A	zrębków kasztanów lub topoli B	odpadów drewna	Maschio i in. 2011	wytoków z oliwek (40%) i pozostałości rolniczych – gałązki i pozostałości i owocowych oraz drzew oliwnych i owocowych oraz upraw energetycznych (60%)	zrębków drewna pozostałości leśnych > 90%; trocin i kory < 10%	drewna z odpadów leśnych, 80% drewna iglastego, 20% drewna liściastego		drewna z odpadów leśnych, 80% świerku, 20% – buku, dębu i brzozy	zrębków z odpadów leśnych, 90% świerku, 10% – buku, dębu i brzozy	drewna kauczukowego: 95% zrębków i 5% kory	90% wiórów drzewnych z resztek leśnych i 10% odchodów konskich	słomy pszennej	słomy pszennej, rozdoblonej
	Cuenca i in. 2013	Rajamma i in. 2015	Rajamma i in. 2015	Berra i in. 2015	Berra i in. 2015	Maschio i in. 2011	Carrasco i in. 2014									Lanzerstorfer 2015	
	2 900	2 590	2 540	2 350	2 400	2 760	2 345	2 570	2 610	2 720	2 740	2 570	2 540	2 210	2 320		

- w rolnictwie (Pels i Sarabèr 2011; Ciesielczuk i in. 2011; Meller i Bilenda 2013),
- w budownictwie drogowym do wykonywania podbudowy dróg i do wytwarzania spoiw asfaltowych (Girón i in. 2013; Xue i in. 2014),
- do stabilizacji chemicznej komunalnych osadów ściekowych – substancja higienizująca osad ściekowy (Poluszyńska 2013),
- do oczyszczania ścieków i jako absorbenty (Meller i Bilenda 2013; An i in. 2011; Barbosa i in. 2014; Vassilev i in. 2013a; Srivastava i in. 2006, 2008).

Popioły te mogą być również zastosowane między innymi do (Vassilev i in. 2013a) produkcji:

- ceramiki,
- filtrów membranowych stosowanych w przemyśle spożywczym i petrochemicznym,
- szkła i glazury,
- materiałów ogniotrwałych,
- geopolimerów,
- zeolitów.

Popioły denne mogą być potencjalnie stosowane:

- w budownictwie drogowym (Hinojosa i in. 2014; Cabrera M. i in. 2014),
- w zaczynach cementowych (Maschio i in. 2011),
- w materiałach budowlanych (Carrasco i in. 2014; Cuenca i in. 2013; Fontes i in. 2017),
- jako czynnik poprawiający jakość gleby (Cruz i in. 2017).

W podrozdziałach 6.5.1 i 6.5.2 przedstawiono dwa najczęściej rozpatrywane kierunki stosowania popiołów ze spalania biomasy – do produkcji materiałów budowlanych i w rolnictwie.

### **6.5.1. Produkcja materiałów budowlanych**

Wysoka zawartość  $\text{SiO}_2$  w popiołach z biomasy nie wskazuje jednoznacznie, że charakteryzują się one właściwościami pucolanowymi (Demis i in. 2014).

Stosowanie popiołów ze spalania biomasy w produkcji materiałów budowlanych jest ograniczone przede wszystkim ze względu na wysokie stężenia potasu i chloru, a tym samym ryzykiem występowania korozji w rezultacie ich wymywania. Również możliwe i nieprzewidywalne zawartości metali ciężkich powodują, że popioły te są mniej atrakcyjnym surowcem w stosunku do popiołów ze spalania węgla kamiennego (Pels i Sarabèr 2011).

Zastosowanie popiołów ze spalania drewna powoduje wydłużenie czasu wiązania cementu. Popioły te wykazują podobne wartości wytrzymałości na ścislenie jak po-

pioły ze spalania węgla i współspalania węgla z biomasą w zakresie 1–7 dni, ale niższe w dłuższych okresach dojrzewania – od 1 miesiąca. Obniżają również znacząco wytrzymałość na zginanie po 56 dniach (Wang i in. 2008).

Prowadzono również badania w zakresie zastosowania popiołów ze spalania biomasy do sporządzania zapraw. Cement w zaprawach zastąpiono popiołami lotnymi ze spalania biomasy w ilości: 5, 10, 20 i 30% wag. Zaobserwowano, że obecność popiołu modyfikuje właściwości reologiczne zaprawy w odniesieniu do mieszanki wzorcowej. Zaprawy zawierające 5% wag. popiołów ze spalania biomasy wykazały porównywalną wytrzymałość na ściskanie do mieszanki wzorcowej bez dodatku po 28 dniach i wyraźny spadek po 180 dniach hydratacji (Maschio i in. 2011).

Badania prowadzone przez zespół Rajamma i in. (2009) wykazały, że biorąc pod uwagę skład chemiczny popioły lotne ze spalania biomasy są podobne do popiołów lotnych klasy C według specyfikacji EN 450. Dodatek badanych popiołów do 20% jako zamiennika cementu w zaprawach cementowych nie wpływa na obniżenie wytrzymałości na ściskanie. Powyżej tej ilości stwierdzono obniżenie wytrzymałości na ściskanie. Autorzy podkreślają jednak fakt, że ze względu na charakter popiołów ze spalania biomasy konieczne jest kontrolowanie zawartości: węgla, chlorków i siarczanów.

Badania Cuenca i in. (2013) wykazały, że popioły lotne ze spalania biomasy mogą być wykorzystane do produkcji betonów samozagęszczalnych. Beton z dodatkiem popiołu lotnego z biomasy miał wytrzymałość na ściskanie równą lub większą niż wytrzymałość betonu wzorcowego.

Betony i zaprawy zawierające popiół ze spalania drewna wykazują większe zapotrzebowanie na wodę w celu osiągnięcia określonego poziomu urabialności mieszanki w porównaniu do betonów i zapraw wzorcowych. Dodatkowo wprowadzenie popiołu ze spalania biomasy wpływa na obniżenie skurczu. Niewielkie ilości do 10% dodatku mogą przyczynić się do poprawy wytrzymałości na ściskanie mieszanek betonowych (Ban i Ramli 2011). Również wyniki zespołu Demis i in. (2014) wskazują na pozytywny wpływ zastosowania popiołów ze spalania biomasy na rozwój wytrzymałości betonu oraz jego skuteczności w zmniejszaniu przepuszczalności betonu.

Ban i Ramli (2011) stwierdzili również zwiększenie odporności na korozję chlorkową przy wprowadzeniu 25% dodatku popiołu. Obecność popiołu ze spalania biomasy drzewnej w betonie nie wpływa niekorzystnie na mrozoodporność.

Prowadzono również badania mające na celu określenie wpływu dodatku popiołu w ilości 15 i 30% z biomasy na moduł Younga we wczesnym okresie dojrzewania betonu (0–7 dni) (Velay-Lizancos i in. 2017).

### **6.5.2. Zastosowanie popiołów**

W popiołach lotnych ze spalania biomasy znajdują się składniki odżywcze z biomasy, dlatego logiczne jest wykorzystanie popiołów lotnych w rolnictwie – czyli „zawracanie”

ich do ziemi, gdzie wyrosła biomasa. Na plantacjach leśnych i energetycznych możliwy jest recykling popiołów ze spalania biomasy. Prawie wszystkie składniki odżywcze które zostały zebrane wraz z drzewami są skoncentrowane w popiołach (Pels i Sarabèr 2011).

Wśród zalet stosowania popiołów ze spalania biomasy do celów rolniczych (Vassilev 2013c) należy wymienić:

- poprawę równowagi w glebie poprzez dodatek składników odżywczych i niezbędnych składników obecnych w popiołach ze spalania biomasy – (C, O, H, Ca, K, czasami N, S, Mg, P, Cl, Na, Mn, Zn, Fe, B, Cu, Mo, inne),
- zapewnienie alkalicznego pH (efekt wapnowania), które powoduje:
  - wzrost: wartości pH, zasolenia (przewodnictwa elektrycznego), kationów zasadowych, potencjału neutralizacji kwasów oraz wietrzenia,
  - ograniczenie ługowania niebezpiecznych pierwiastków z gleby,
  - wzrost aktywności biologicznej i poprawę środowiska dla niektórych mikroorganizmów,
  - poprawę tekstury gleby, jej napowietrzania i zdolności zatrzymywania wody.

Jednak ich przydatność zależy od rodzaju stosowanej jako paliwa biomasy. Popiół z czystych peletów drzewnych zawiera głównie Ca i Mg, ale popioły z odpadów rolniczych mogą być bogate w fosfor i potas. Wśród ważnych składników odżywczych, które mogą występować w popiołach z biomasy, jest siarka (Pels i Sarabèr 2011).

Znaczne zawartości manganu, cynku i miedzi występujące w popiołach ze spalania biomasy mogą być przyczyną ograniczenia ich wykorzystania jako źródła tych pierwiastków dla gleb (Ciesielczuk i in. 2011).

Bezpośrednie stosowanie popiołów powoduje, że potas jest łatwo ługowany i natychmiast dostępny dla roślin. Z kolei fosfor jest często w nierozpuszczalnej postaci i wymaga długiego czasu (do 20 lat), zanim będzie w pełni dostępny dla roślin, co powoduje, że ich wykorzystanie jest szczególnie atrakcyjne w leśnictwie (Pels i Sarabèr 2011).

Popioły z biomasy zawierające duże ilości potasu i fosforu, np. ze spalania odpadów leśnych, są najbardziej odpowiednie do wykorzystania do poprawy jakości gleb. Popioły z biomasy zawierające głównie wapń i magnez, np. ze spalania kory, mogą być stosowane jako środek poprawiający jakość gleby w celu zrównoważenia pH (Pels i Sarabèr 2011).

Badania (Meller i Bilenda 2013) dotyczące wykorzystania popiołów lotnych ze spalania biomasy do nawożenia kukurydzy zwyczajnej uprawianej na cele energetyczne w ilości 60 Mg/ha, wykazały dużą skuteczność w plonowaniu kukurydzy oraz najkorzystniejszą zawartość fosforu i magnezu w ziarnie kukurydzy.

Najlepsze właściwości nawozowe mają popioły ze spalania określonych pozostałości rolniczych, takich jak: odpady z kakaowca, oliwek, łupiny kawy itp. (Pels i Sarabèr 2011).

Badania zespołu Cruz i in. (2017) wskazują, że analizowane przez nich popioły mogą być stosowane jako czynnik poprawiający jakość gleby, jednak pod warunkiem ich wstępnego przygotowania przed zastosowaniem mającym na celu obniżenie zawartości Cr.



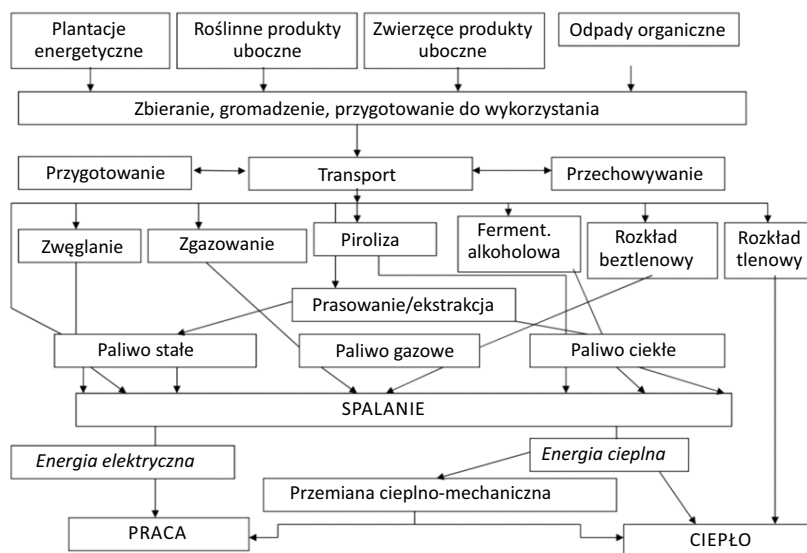
Badania potwierdziły korzystne oddziaływanie popiołów ze spalania biomasy na poprawę buforowości gleby (Diatta i Kowalski 2017).

Wyniki badań (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016b) wykazały, że popioły denne ze spalania biomasy mogą modyfikować właściwości fizyczne gleb, mogą również stanowić źródło niezbędnych dla roślin składników pokarmowych. Jednak ze względu na ich silnie alkaliczny charakter (pH około 12) powinny być stosowane na glebach kwaśnych (Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016b).

## 7. PRZEGLĄD TECHNOLOGII ENERGETYCZNEGO WYKORZYSTANIA BIOMASY

Istnieje wiele rozwiązań instalacji spalania lub współspalania biomasy. Wybór odpowiedniej technologii spalania uzależniony jest od mocy układu, parametrów paliwa (skład chemiczny paliwa i popiołu, zawartość części lotnych, balast, wilgoć, kaloryczność, gęstość itp.) oraz wielkości paliwa (biopaliwa mogą być spalane w postaci drewna kawałkowego, zrębków, brykietów, peletów, pyłu, balotów itp.).

W celu uzyskania energii z biomasy spala się ją w piecach lub przetwarza na media energetyczne. Różne przykłady przetwarzania poszczególnych rodzajów biomasy zostały pokazane na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Produkcja energii z surowców biomasowych  
Źródło: Kowalczyk-Juško 2012a

## 7.1. Spalanie biopaliw stałych w kotłach

Podziału kotłów zasilanych biomasą można dokonać ze względu na sposób podawania paliwa, zastosowaną technikę spalania, osiągnięte gabaryty (moc) oraz rodzaj spalającego paliwa. W tabeli 7.1 zestawiono najczęściej stosowane rozwiązania.

Tabela 7.1. Rodzaje urządzeń grzewczych na biomasę oraz zakres ich mocy

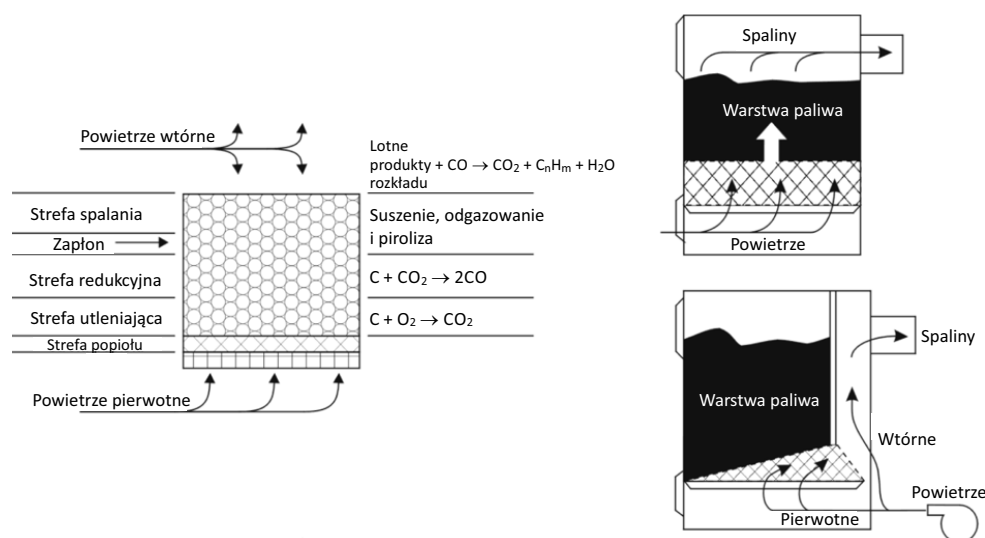
Sposób podawania paliwa/proces	Rodzaj urządzenia grzewczego	Zakres mocy	Rodzaj paliwa
Ręcznie	piece	2–10 kW	drewno kawałkowe
	kotły	5–100 kW	polana, szczapy
Automatycznie	piece i kotły	2–35* kW	pelety
	paleniska podsuwowe	20 kW–2,5 MW	zrębki, odpady drzewne
	paleniska z rusztem mechanicznym	150 kW–15 MW	wszystkie rodzaje biomasy
	przedpalenisko	20 kW–1,5 MW	drewno, trociny
	palenisko obrotowe podsuwowe	2–5 MW	zrębki
	palenisko cygarowe	3–5 MW	baloty słomy
	palenisko do spalania słomy	100 kW–5 MW	pocięta słoma
	pęcherzykowe spalanie w złożu fluidalnym BFBC ( <i>Bubbling Fluidized Bed Combustion</i> )	5–15 MW	różne rodzaje biomasy d<10 mm
	cyrkulacyjne spalanie w złożu fluidalnym CFBC ( <i>Circulating Fluidized Bed Combustion</i> )	15–100 MW	
	palenisko pyłowe	5–10 MW	różne rodzaje biomasy d<5 mm
palenisko do spalania całych kostek/balotów	3–5 MW	baloty/kostki słomy	
Współspalanie biomasy z węglem	pęcherzykowe spalanie w złożu fluidalnym BFBC ( <i>Bubbling Fluidized Bed Combustion</i> )	50–150 MW	różne rodzaje biomasy d<10 mm z miazem węglowym
	cyrkulacyjne spalanie w złożu fluidalnym CFBC ( <i>Circulating Fluidized Bed Combustion</i> )	100–300 MW	
	palenisko pyłowe	100 MW–1 GW	różne rodzaje biomasy d<2–5 mm z pyłem węglowym (z młynów)

\* W 2016 roku pojawiły się kotły o zmiennej geometrii komory spalania, w których zakres mocy cieplnej w największej jednostce wynosi 86–285 kW

Źródło: na podstawie Głodek 2010

### 7.1.1. Kotły na paliwa stałe małej mocy

Kotły na paliwa z biomasy dzielą się ze względu na sposób podawania paliwa na kotły z załadunkiem ręcznym (tzw. wsadowe) oraz kotły z automatycznym podawaniem paliwa. Pierwszy rodzaj kotłów jest najbardziej rozpowszechniony wśród użytkowników kotłów wielopaliwowych węglowych oraz kotłów na drewno kawałkowe. Konstrukcje takich kotłów przedstawiają poglądowo rysunki 7.2, 7.3 i 7.4.



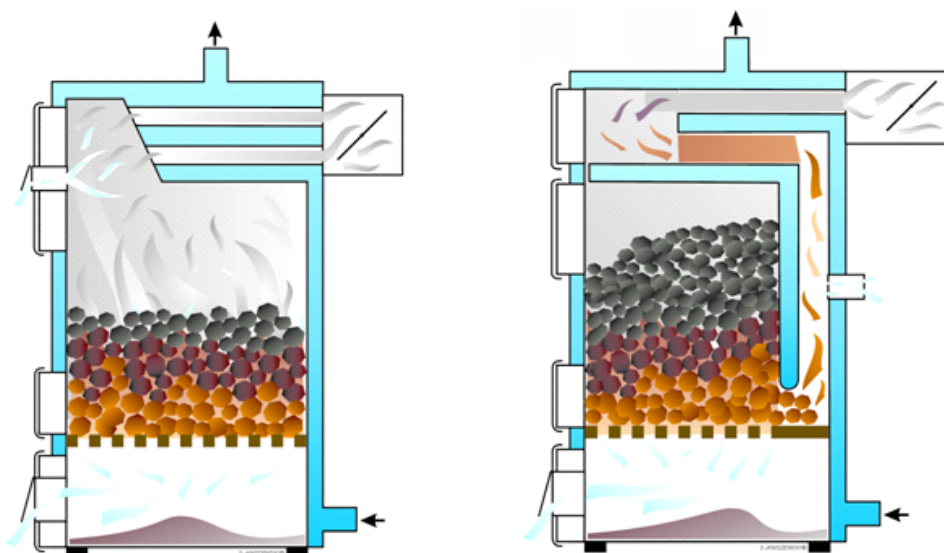
Rys. 7.2. Technika dolnego spalania – spalanie przeciwprądowe w całej objętości oraz spalanie w części złoża  
Źródło: Kubica i in. 2016

#### Kotły z ręcznym załadunkiem

Istnieje kilka technik spalania paliw stałych. Najbardziej rozpowszechnioną, a jednocześnie przynoszącą największe negatywne skutki dla środowiska przyrodniczego, jest technika dolnego spalania całej objętości złoża, czyli spalanie przeciwprądowe. Technika ta jest charakterystyczna dla kotłów stosowanych w indywidualnym ogrzewnictwie (gospodarstwa domowe, budynku użyteczności publicznej). Rysunek 7.2 przedstawia zasadę działania dolnego spalania. Technika ta polega na tym, że na rozpalonej cienkiej warstwie paliwa w komorze kotła umieszcza się jego kolejną porcję od strony przeciwnej do kierunku dopływu powietrza. Powietrze jest także doprowadzane pod ruszt znajdujący się w dolnej komorze. Również i tu paliwo spala się na tym ruszcie, ale płomień i spaliny odprowadzane są do góry bocznymi kanałami wymiennika kotła. Dzięki temu nie pali się cały wsad, tylko jego dolna część.

W praktyce stosowanie tej techniki, przy słabej jakości paliwa i braku nadzoru, powoduje, że substancje lotne podczas termicznego rozkładu przechodzą do strefy, gdzie nie ma wystarczającej ilości tlenu oraz odpowiedniej temperatury do całkowitego ich spalania, co powoduje emisję tych substancji do atmosfery w formie dymu z dużą zawartością szkodliwych substancji takich jak np.: benzo(a)piren czy dioksyny (Kubica 2007).

Na rysunku 7.3 przedstawiono technikę spalania w części złoża w prądzie krzyżowym. Jest to technika z poprawioną dystrybucją powietrza pierwotnego i wtórnego, która sprawia, że w górnej części komory dopalania ulegają spalaniu produkty rozkładu paliwa wpływając tym samym na wzrost sprawności energetycznej i zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Wiąże się to jednak z całkowitą zmianą organizacji spalania (Kubica i in. 2016).

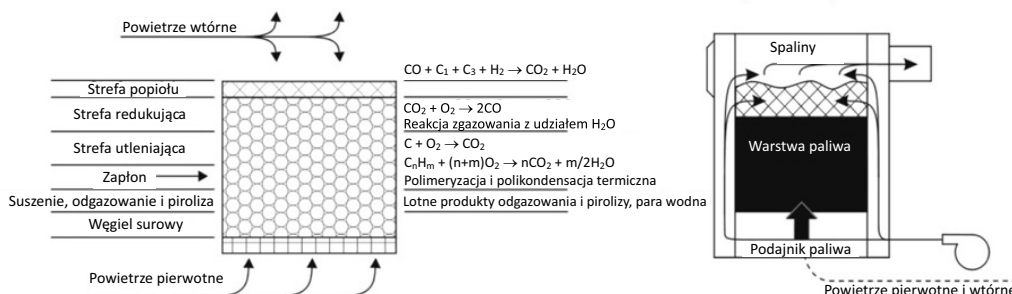


Rys. 7.3. Przykład kotła z dolnym spalaniem w całej objętości złoża oraz w części złoża w prądzie krzyżowym

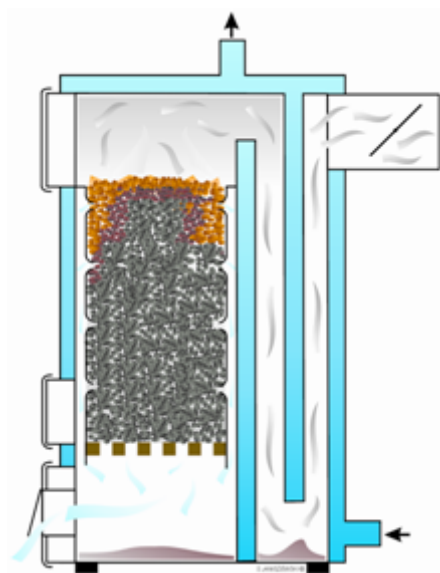
Źródło: Zawistowski 2016

W kotle wykorzystującym technikę górnego spalania powietrze doprowadzane jest pod ruszt od dołu do górnej jego części, a paliwo spala się w górnej części komory. Spaliny odprowadzane są z górnej części złoża paliwa do wymiennika ciepła. Stosowane potocznie dla tego typu kotła pojęcie „kocioł z górnym spalaniem” również nie budzi wątpliwości, jednakże z technicznego punktu widzenia poprawne jest pojęcie „kocioł ze spalaniem w górnej części złoża”, paliwo spala się na ruszcie znajdującym się w dolnej części komory spalania (rys. 7.4).

Na rysunku 7.5 przedstawiono graficzny przykład spalania techniką „od góry” w kotle.



Rys. 7.4. Technika górnego spalania w części złoża – spalanie współprądowe  
Źródło: Kubica i in. 2016



Rys. 7.5. Przykład kotła górnego spalania  
Źródło: Zawistowski 2016

W kotłach komorowych zasypowych (zwanymi też kotłami rusztowymi komorowymi) ze spalaniem w dolnej części złoża, spalanie paliwa odbywa się na ruszcie, przez który od dołu doprowadzane jest powietrze potrzebne do spalania. W kotłach o takiej konstrukcji warstwa żaru osiąga najwyższe temperatury przy ruszcie, w strefie intensywnego napowietrzania. Temperatury na powierzchni rusztu mogą osiągać wartości powyżej  $1000^\circ\text{C}$ , stwarzając zagrożenie deformacji rusztowin oraz topienia i spiekania się popiołu, z tworzeniem w szczelinach między rusztowinami zatorów żużlowych. Ten nieunikniony problem rozwiązuje się dwójako – poprzez zastosowanie rusztu składanego z żeliwnych rusztowin sztabkowych, które są łatwo wymienia-

ne w razie potrzeby, bez naruszania konstrukcji kotła (ten typ rusztu nazywany jest potocznie rusztem ruchomym), lub poprzez zastosowanie rusztu chłodzonego wodą, wykonanego z rusztowin w postaci stalowych rur (o przekroju kołowym, eliptycznym lub trapezowym) wbudowanych na stałe do przestrzeni wodnej kotła (ten typ rusztu nazywany jest potocznie rusztem stałym).

Zaletą rusztu sztabkowego jest niski koszt, duża łatwość samodzielnej wymiany przez użytkownika kotła oraz możliwość łatwej zamiany na rusztowiny o innej wielkości szczeliny (w przypadku zmiany sortymentu stosowanego paliwa), natomiast wadą – krótka żywotność eksploatacyjna w wyniku podatności na deformacje pod wpływem wysokiej temperatury.

Niewątpliwą zaletą rusztu chłodzonego jest obniżenie temperatury powierzchni rusztowin oraz temperatury w przyrusztowej części strefy żaru przez wodę przepływającą wewnątrz rusztowin. Niestety, ze względu na znaczną różnicę temperatur zewnętrzną i wewnętrzną powierzchni ścianki rusztu wodnego, występują w nim znaczne naprężenia mechaniczne przyspieszające zużycie korozyjne, zaś wymiana rusztowin wodnych, w przeciwieństwie do sztabkowych, nie jest możliwa do samodzielnego wykonania przez użytkownika kotła (wymaga wykonania dużego zakresu prac ślusarsko-spawalniczych, w tym rozcięcia powłok wodnych kotła).

Konstrukcja rusztu wodnego wymaga także wykonania w powłokach wodnych kotła dodatkowych otworów i położenia dodatkowych spoin. Każde takie miejsce to potencjalne źródło korozji oraz osłabienie konstrukcji wymiennika ciepła. Duża liczba spoin ułożonych na niewielkiej powierzchni w celu uzyskania szczelnych przestrzeni wodnych powoduje występowanie bardzo dużych naprężeń wewnątrz materiałów wywołanych skurczem spawalniczym oraz zmiany struktury materiału wywołane działaniem ciepła w tzw. strefie wpływu ciepła spoin. Znaczne naprężenia w konstrukcji wpływają ujemnie na jej żywotność i powodują zwiększoną korozyjność zmęczeniową materiału. W kontakcie z płomieniem i produktami spalania paliw konstrukcje stalowe ulegają nadmiernemu nawęgleniu, co skutkuje zmianą ich wytrzymałości mechanicznej i kruchością oraz stanowi jedną z przyczyn występowania rozszczelnień przestrzeni wodnych kotłów stalowych (pękanie spoin).

W przypadku rusztu chłodzonego może wystąpić również wada konstrukcyjna w postaci poziomego ustawienia rusztowin wodnych w kotle (rusztowiny wodne w kotle powinny posiadać pochylenie osiowe w stosunku do podstawy kotła), co powoduje utrudniony odpływ pęcherzyków pary wodnej z rusztowiny i punktowe przegrzewanie jej górnej powłoki, przyspieszające zużycie korozyjne.

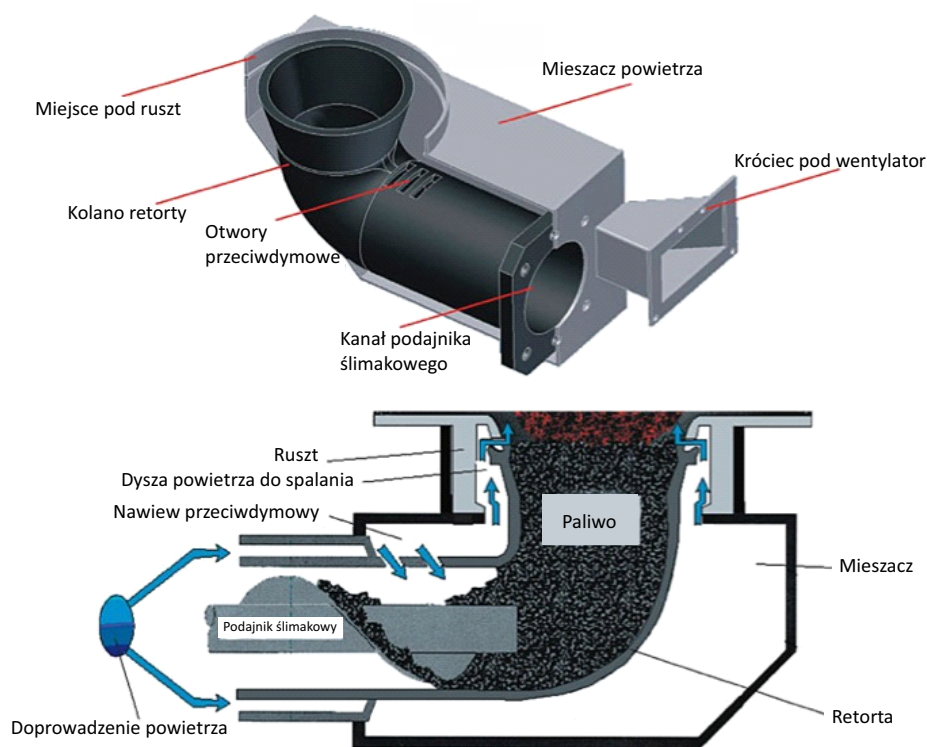
### **Kotły z podajnikiem automatycznym małej mocy**

W kotłach z automatycznym podawaniem paliwa z uwagi na rodzaj zastosowanego palnika i technikę dozowania paliwa, najczęściej stosuje się następujący podział:

- kotły retortowe,
- kotły z palnikiem szufladowym,

- kotły z palnikiem wrzutowym,
- kotły z palnikiem rynnowym (inaczej tubowym lub rurowym).

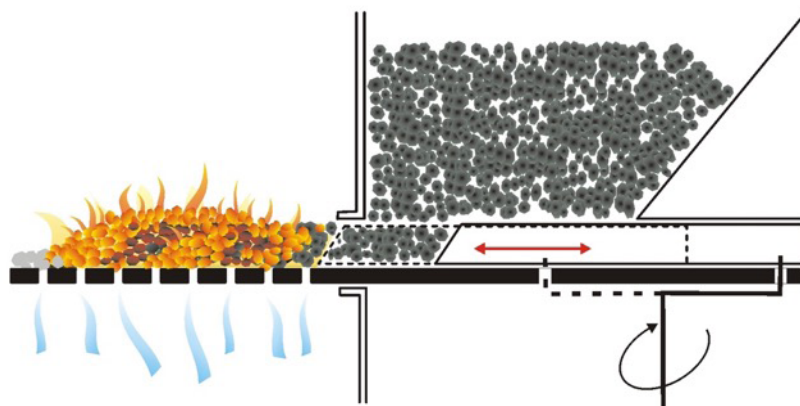
Rysunek 7.6 przedstawia schemat palnika retortowego. Podstawowym członem urządzenia jest samoczyszczące się palenisko retortowe, w którym określona część paliwa jest spalana w celu uzyskania uprzednio zadanej temperatury na elektronicznym sterowniku. Dużym atutem tego rodzaju kotła jest zwiększenie komfortu obsługi dla użytkownika, ponieważ jego czynności polegają na uzupełnianiu paliwa i odprowadzaniu popiołu. Kotły z palnikiem retortowym są praktycznie w pełni zautomatyzowane, regulują i kontrolują ilość powietrza, które jest wpuszczane do komory spalania oraz samoczynnie decydują o ilości wprowadzanego paliwa. W wyniku tego są efektywne ekologicznie i energetycznie, gdyż emisja zanieczyszczeń jest maksymalnie zmniejszona.



Rys. 7.6. Budowa palnika retortowego  
Źródło: (11)

Kotły z palnikiem szufladowym (rys. 7.7) charakteryzują się odmiennym sposobem dozowania paliwa. Paliwo z zasobnika obsuwa się grawitacyjnie do koryta podajnika, w którym, ruchem posuwisto-zwrotnym, porusza się tłok, przesuując kolejne porcje paliwa w kierunku paleniska. Podajnik pracuje cyklicznie – cykl podawania paliwa



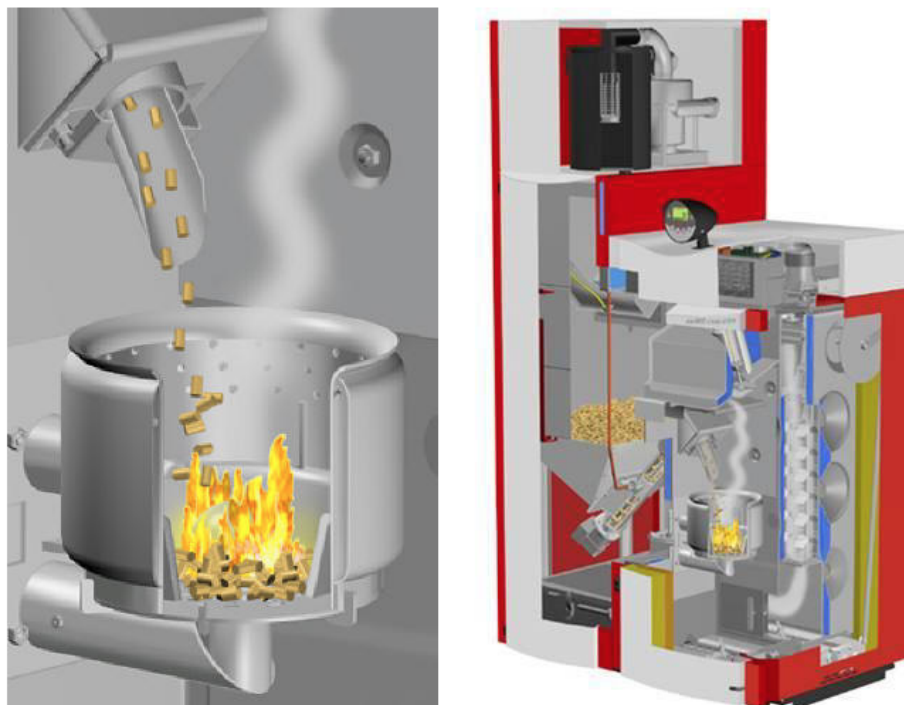


Rys. 7.7. Przykład palnika szufladowego  
Źródło: Zawistowski 2016

trwa od kilku do kilkunastu sekund, cykl przerwy na dopalanie paliwa trwa od kilku do kilkudziesięciu sekund. Przesuwane paliwo przedostaje się do przestrzeni rusztu (szczelinowego lub otworowego), gdzie zapala się od zalegającego tam żaru. Powietrze tłoczone jest kanałem powietrznym za pomocą wentylatora i przez otwory w ruszcie wdmuchiwane jest pod strefę żaru w palenisku. Kolejne nasuwane porcje paliwa przesuwają żar i popiół w kierunku krawędzi rusztu, skąd popiół spada do popielnika.

W kotłach z palnikiem wrzutowym paliwo podawane jest ukośnym podajnikiem ślimakowym do środkowej części kotła, w której znajduje się palnik. Transport odbywa się specjalną rynną zsykową żaroodpornego tygla od góry, w małych porcjach co kilkanaście do kilkudziesięciu sekund. Paliwo jest niemal natychmiast spalane, a automatyczny system odpopielania z obrotowym rusztem usuwa popiół. Takie rozwiązanie usprawnia proces spalania peletu, gdyż paliwo (najczęściej w postaci peletu) nie tworzy stałego złoża, w którym może dochodzić do niedopalenia przy zmianie warunków obciążenia cieplnego kotła. Przykładowy schemat konstrukcyjny kotła z palnikiem wrzutowym przedstawiono na rysunku 7.8.

Ostatnim wariantem w kotłach na paliwa stałe z automatycznym dozowaniem paliwa jest palnik rynnowy (inaczej nazywany tubowym lub rurowym). Jego nazwa wywodzi się z podobieństwa kształtu palnika do rynny, w której otwory służą do odprowadzania deszczu (rys. 7.9). Palniki rynnowe cechuje możliwość spalania wielu rodzajów paliw, po uprzednio wykonanych odpowiednich nastawach sterownika kotła. Montowane są zazwyczaj z deflektorem ceramicznym lub żeliwnym, który odbijając czoło płomienia poprawia cyrkulację gorących spalin zwiększając tym samym efektywność odbioru ciepła przez płaszcz wodny. Powietrze pierwotne podawane jest przez otwory w dolnej części palnika, a powietrze wtórne ma osobne wloty w części bocznej. Podawanie paliwa do palnika nie powoduje dużego tarcia, jak to ma miejsce w konstrukcjach z palnikiem retortowym.



Rys. 7.8. Przykład palnika (rys. po lewej) i kotła z palnikiem wrzutowym (rys. po prawej)  
Źródło: IS... 2018



Rys. 7.9. Budowa palnika rynnowego  
Źródło: (12)

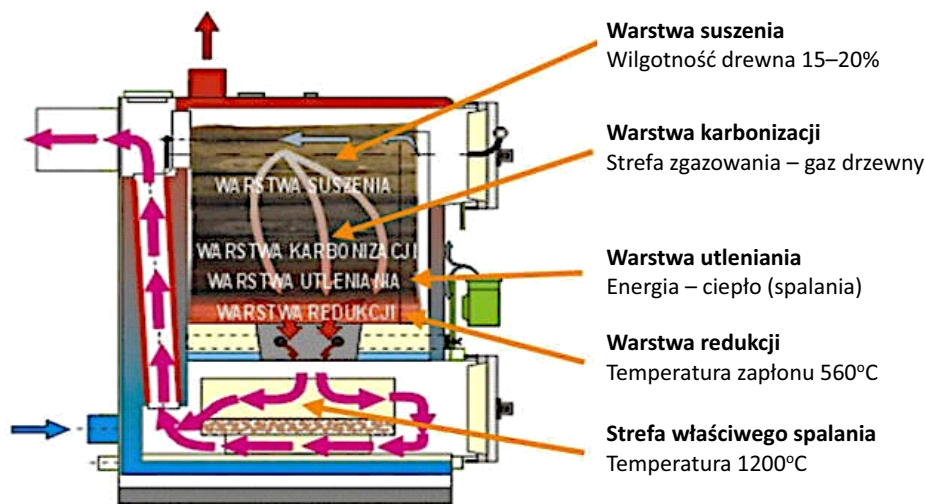
### Kotły zgazowujące drewno

W kotłach zgazowujących biomasę w postaci drewna kawałkowego proces przemiany energii chemicznej paliwa na energię w postaci ciepła dzieli się na trzy zasadnicze etapy. W etapie 1 następuje suszenie paliwa. Drewno jest to przygotowywane w komorze paleniskowej do docelowego zgazowania. Suszenie odbywa się podczas palenia drewna. Nieliczni użytkownicy stosują całkowicie suche drewno. Nawet na składach opału można kupić drewno, ale tylko świeżo ścięte niesezonowane. W związku z tym, duża wilgotność drewna powoduje znaczne obniżenie jego kaloryczności, ponieważ część ciepła w procesie spalania paliwa musi być właśnie przeznaczona na osuszenie drewna. Zamiast ogrzewać spaliny w znaczącym stopniu odparowujemy wilgoć z drewna. Za suche drewno uważa się drewno sezonowane przez 24 miesiące, jednak nie mniej niż 15 miesięcy. O suche drewno musi więc zadbać sam użytkownik kotła. Jak się okazuje, powinien to przewidzieć około 2 lata wcześniej, gdyż skład opału dysponuje wyłącznie mokrym, świeżo ściętym drewnem. Żeby składować drewno i suszyć je z wyprzedzeniem dwóch lat, należy też mieć specjalne do tego miejsce o dość sporej powierzchni. Jest to pewien dyskomfort, szczególnie w nowo wybudowanych domach, gdzie jeszcze przed rozpoczęciem budowy drewno używane jako paliwo do ogrzewania budynku powinno już być osuszane.

Etap 2 – to proces zgazowania i pirolizy. W tym procesie następuje wytwarzanie gazu drzewnego w wysokiej temperaturze przy niedomiarze tlenu (współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda < 1$ ). Podczas zgazowania następuje rozpad cząsteczkowy substancji organicznej paliwa. Najważniejszym warunkiem poprawnego procesu, w którym mamy do czynienia z zespołem równoczesnych reakcji chemicznych i przemian fizycznych, jest temperatura zgazowania. Oprócz węgla drzewnego i gazu drzewnego, wytwarzane są substancje smoliste, które są szkodliwe dla metalowych elementów kotła. Dlatego najlepiej jest dokonywać osuszania oraz zgazowania w kotłach z komorami paleniskowymi odpornymi na korozję, np. wyłożonymi ceramiką lub szamotem, które stanowią dobrą ochroną dla metalowej części kotła, a jednocześnie bardzo dobrze oddają ciepło do wymiennika kotła.

Etap 3 – proces dopalania. Ostatnim etapem jest dopalanie wytworzonego wcześniej gazu palnego.

Przykładowy schemat budowy kotła zgazowującego drewno przedstawiono na rysunku 7.10. Na szczególną uwagę zasługuje podział na trzy strefy w kotle, w których przebiegają wymienione procesy. Wadą takiej konstrukcji kotła jest ręczny, jednorazowy załadunek paliwa oraz jego cykl pracy. Wymagany jest także bufor (magazyn ciepła), ponieważ wytwarzanie ciepła w cyklu pracy kotła od kilku do kilkunastu godzin najczęściej nie jest zbieżne z zapotrzebaniem na ciepło ogrzewanego obiektu.



Rys. 7.10. Schemat kotła zgazowującego drewno kawałkowe  
Źródło: IS... 2018

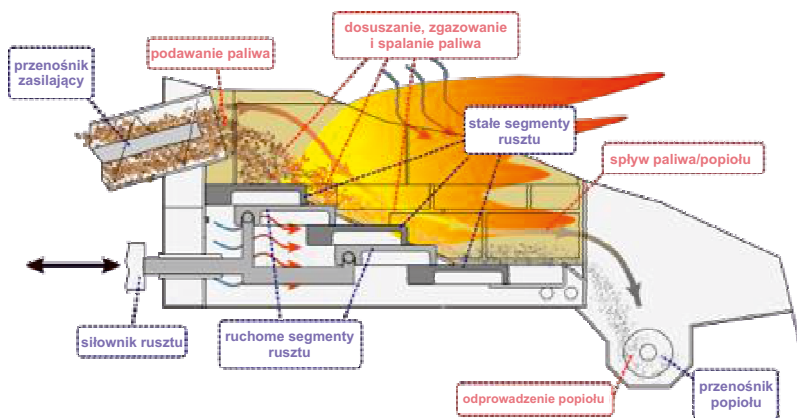
## 7.1.2. Kotły przemysłowe

### Kotły rusztowe

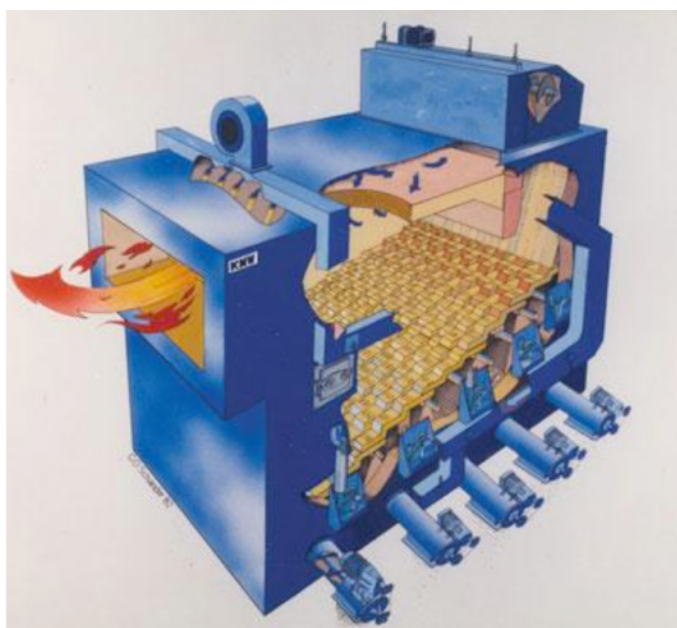
Proces spalania rozdrobnionej biomasy w kotłach przemysłowych średniej i dużej mocy odbywa się za pośrednictwem ruchomego rusztu, którego część elementów wykonuje ruchy posuwisto-zwrotne (rys. 7.11). Paleniska rusztowe umożliwiają spalanie różnych rozmiarów cząsteczek biomasy o dużych zawartościach wilgoci i popiołu.

Dla paliwa o wilgotności 20–25% stosuje się kotły z rusztami poziomymi, natomiast przy większych wartościach (40–60%) zastosowanie znajdują kotły wyposażone w ruszty schodkowe z różnymi kątami nachylenia, co przedstawiono na rysunku 7.12. Drobnoziarnistą biomasę spala się na rusztach wibracyjnych.

Praca rusztu ruchomego polega na wykonywaniu rewersyjnych ruchów z różnymi prędkościami przez część rusztowin. Pozwala to na przepychanie biomasy wzdłuż rusztu z jednoczesnym wymieszaniem i przesypaniem cząsteczek paliwa, co zapewnia jednakową dystrybucję powietrza pierwotnego na całej długości rusztu. Powietrze dostarcza się pod ruszt, które następnie opływa spalane frakcje wsadu przedostając się przez małe kanały rozdzielające wąskie rusztowiny. Ruchome elementy wykonuje się z żaroodpornej stali stopowej i chłodzi się przepływem powietrza pierwotnego, gdy spala się wilgotną biomasę roślinną (świeże zrębki, trociny, kora). Natomiast w przypadku spalania suchej biomasy o małej zawartości popiołu i niskiej tempera-



Rys. 7.11. Ruszt posuwisto-schodkowy  
Źródło: (13)

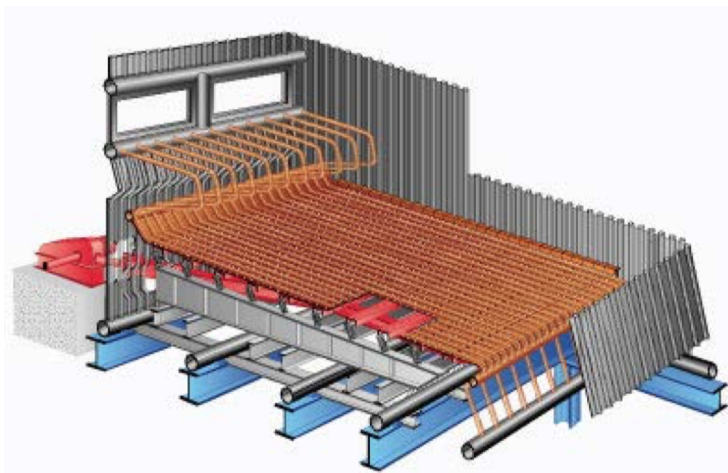


Rys. 7.12. Kocioł z rusztem posuwisto-schodkowym  
Źródło: (13)

turze spiekania, ruszt dodatkowo ochładza się wodą ze względu na wyższe temperatury pochodzące od promieniowania komory spalania. Popiół odbiera się spod rusztu w suchej lub mokrej formie z odpopielaniem mechanicznym lub hydraulicznym. Ruch posuwisto-zwrotny elementów rusztu jest wymuszany przez siłownik hydrauliczny lub silnik elektryczny z zamianą ruchu obrotowego na rewersyjny poprzez mechanizm

korbowy. Regulacja procesu spalania jest przeprowadzana poprzez zmianę częstości ruchów rusztowin. W celu przeciwdziałania nagłemu wzrostowi warstwy paliwa na ruszcie montuje się nad poszczególnymi sekcjami czujniki promieniowania podczerwonego, co umożliwia skuteczne prowadzenie procesu spalania. W rusztach poziomych pozycja rusztu wynika z ukośnego położenia rusztowin. Takie ułożenie hamuje niekontrolowane przesypy paliwa, co prowadzi do bardziej jednorodnego rozkładu paliwa na ruszcie z mniejszą wysokością złoża. Dla spalania rozdrobnionej biomasy z tendencją do żużlowania (drewno odpadowe, słoma) stosuje się ruszty, których części rusztowin wykonują w krótkich odstępach czasu ruchy wibracyjne dla ograniczenia spiekania się większych cząstek. Jednakże w tym przypadku zwiększa się strata niezupełnego spalania i emisja pyłu z powodu cyklicznych zakłóceń w pracy rusztu.

Na rysunku 7.13 przedstawiono fragment kotła z rusztem wibracyjnym chłodzonym wodą.

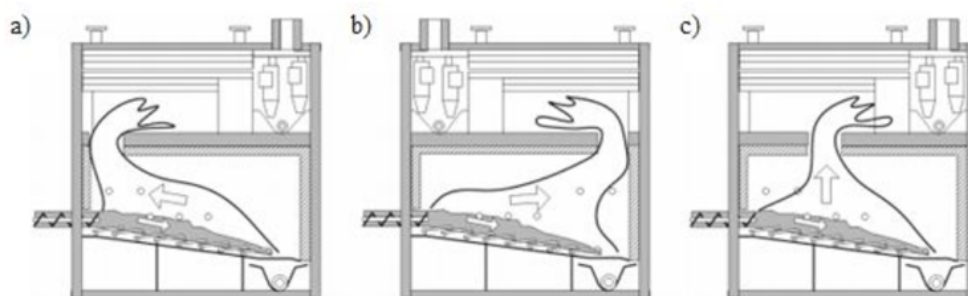


Rys. 7.13. Fragment kotła z rusztem wibracyjnym chłodzonym wodą  
Źródło: DP CleanTech 2016

Skuteczna realizacja procesu spalania w kotłach rusztowych związana jest z pełnym spaleniem (dopaleniem) części lotnych uwolnionych z biomasy nad rusztem. Jednakże ze względu na dość dużą przestrzeń komory spalania trudno jest doprowadzić odpowiednią ilość powietrza dla dobrego wymieszania z gazem. Dlatego projektuje się takie kształty komory, z której opuszczające ją spaliny z dużą ilością produktów lotnych muszą przyspieszać w specjalnym przewężeniu. W tym miejscu instaluje się dysze powietrza wtórnego z których dozuje się duży strumień gazu (tlenu). Prowadzi to do zawirowania niedopalonych części lotnych z powietrzem oraz ich zupełnego i całkowitego spalania w atmosferze gorących spalin. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość podstechiometrycznego i strefowego doprowadzania powietrza pierwotnego, co pozwala na dokładną kontrolę procesu spalania przy różnych obciążeniach i ograniczenie emisji tlenków azotu. Ponadto ściany komory wyklada się materiałem ceramicznym,

którego duża pojemność i bezwładność cieplna optymalizują temperaturę spalania niezależnie od chwilowej ilości i wilgotności wydzielonych części lotnych.

Wyróżnia się trzy metody odprowadzania spalin z komory spalania przez przeżęnie w ceramicznej przegrodzie do komory dopalania gazu (rys. 7.14).



Rys. 7.14. Klasyfikacja różnych systemów rusztowych; a) przeciwny, b) współprądowy, c) mieszany  
Źródło: Van Loo i Koppejan 2008

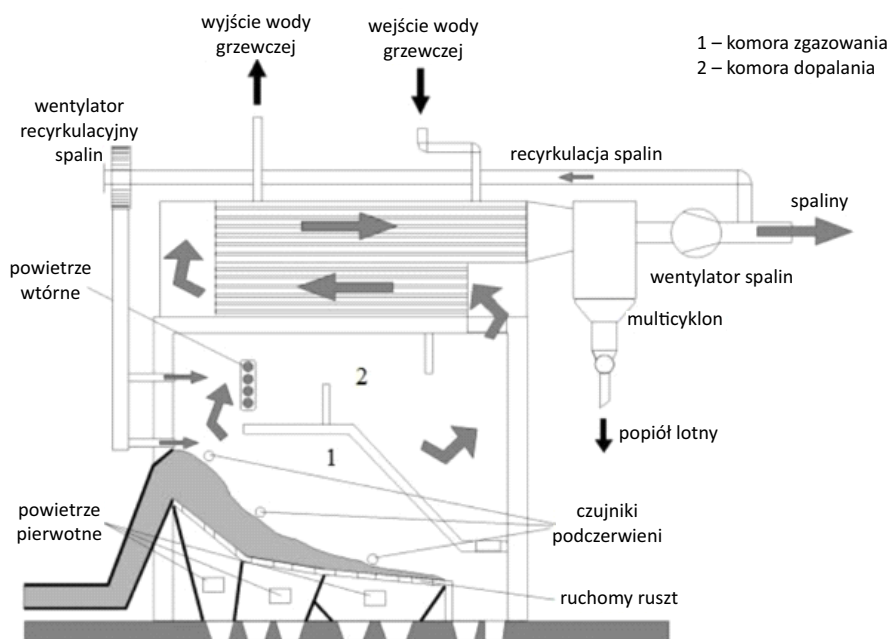
Przepływ przeciwny jest najbardziej odpowiedni dla paliw wilgotnych o małej wartości opałowej (wilgotne zrębki, mokra kora). Polega on na odprowadzaniu gorących spalin w pobliżu wlotu świeżej biomasy nad strefą suszenia, co dodatkowo wzmacnia proces odparowywania wilgoci w wyniku konwekcji (odgazowanie części lotnych paliwa następuje głównie przez promieniowanie w komorze). Kierunki przepływów spalin i paliwa są w dużej części przeciwne. Spaliny chłoną wilgoć z biomasy, więc mają tendencję do tworzenia niejednorodnych struktur. Dlatego wymaga się ich dobrego wymieszania dla ograniczenia formowania się strug o niejednorodnym składzie z zawartością palnych gazów.

Przepływ współprądowy stosuje się natomiast przy spalaniu biomasy suchej (rozdrobniona słoma, drewno odpadowe) lub w systemach z podgrzewem powietrza pierwotnego. W tym przypadku wylot spalin z komory zgazowania ma miejsce w końcu rusztu w strefie spalania części stałych paliwa. Zarówno kierunek przepływu spalin, jak i cząstek na ruszcie są zgodne. W rezultacie uwolnione gazy z rozkładu termicznego paliwa przebywają dłużej w strefie wysokich temperatur, co ułatwia ich całkowite dopalenie i redukcję emisji tlenków azotu. Ważną rolę spełnia tutaj konstrukcja paleniska i rozdział strumieni powietrza, tak aby unoszące się spaliny nie porywały z powierzchni rusztu drobnych cząstek popiołu i paliwa.

Z kolei przepływ krzyżowy (mieszany) stanowi kombinację dwóch wcześniejszych. Spaliny wydostają się z komory nad strefą odgazowania paliwa. Dla zintensyfikowania mieszania się palnych gazów i powietrza wtórnego często realizuje się nawrót gorących spalin. Jednakże recyrkulacja gazów zwiększa ich objętość i stwarza niebezpieczeństwo zużycia kanałów wylotowych.

Wspomniane wymienniki płomieniówkowe w kotłach domowych znajdują także zastosowanie w rozwiązaniach przemysłowych. W jednostkach o małej mocy cien-

kościene rurki (płomieniówki) wymiennika są w układzie pionowym, zaś w kotłach o dużej mocy zabudowuje się je w poziomie z wykorzystaniem recyrkulacji spalin (rys. 7.15).



Rys. 7.15. Schemat kotła o dużej mocy  
Źródło: Van Loo i Koppejan 2008

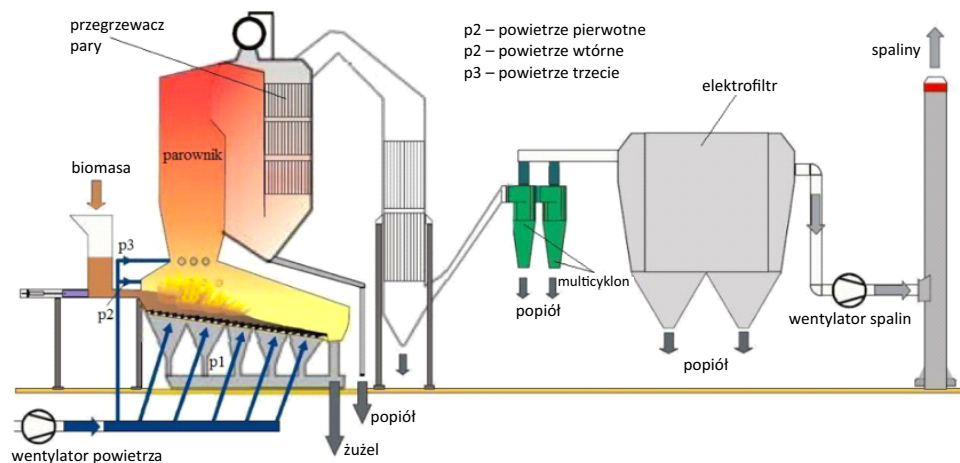
W kotłach o średniej i dużej mocy przeznaczonych do skojarzonego wytwarzania elektryczności i ciepła, oprócz wymiennika podgrzewającego wodę, instaluje się parownik i przegrzewacze pary (rys. 7.16). Swoją budową są podobne do węglowych kotłów walczkowych, które wytwarzają wysokociśnieniową, przegrzaną parę wodną zasilającą turbinę parową.

Kotły tego typu są wyposażone w urządzenia odpylające spaliny: multicyklony, ale również elektrofiltry oraz filtry workowe. Są to instalacje osiągające w kogeneracji moc elektryczną do 10–15 MW.

### Współspalanie w kotłach energetycznych

Istnieje wiele technologii umożliwiających energetyczne wykorzystanie biomasy przy użyciu istniejących jednostek kotłowych opalanych węglem kamiennym. Ze względu na sposób podawania biomasy do kotła technologie współspalania można podzielić na:



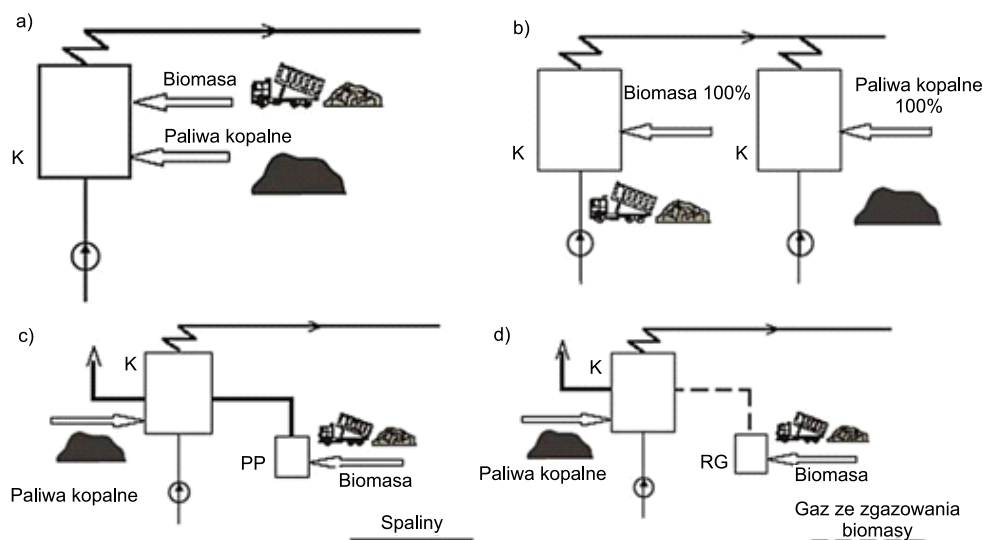


Rys. 7.16. Kocioł rusztowy z instalacją oczyszczania spalin  
Źródło: BIOS... 2016

- współspalanie bezpośrednie polegające na równoczesnym spalaniu mieszanki paliwa węglowego i biomasy w jednej komorze (rys. 7.17a);
- współspalanie pośrednie, do którego możemy zaliczyć: spalanie biomasy lub biogazu w tzw. przedpalenisku. Entalpia powstających tam spalin wykorzystywana jest w komorze spalania, w której zabudowane są powierzchnie ogrzewalne bądź bezpośrednio jako czynnik grzewczy w wymiennikach ciepłowniczych. Drugi przypadek dotyczy zgazowania lub pirolizy biomasy w gazogeneratorze. Powstający gaz kierowany jest do komory spalania kotła, gdzie spalany jest w palnikach gazowych (rys. 7.17c i 7.17d);
- współspalanie równoległe polegające na spalaniu biomasy w osobnym kotle i przesłaniu wyprodukowanej w nim pary lub gorących skroplin do odrębnego kotła węglowego (rys. 7.17b).

Mimo niewątpliwych zalet (takich jak prostota procesu, mniejsza emisja CO, NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub> oraz prawie zerowy bilans CO<sub>2</sub> w zakresie udziału biomasy w węglu), bezpośrednie współspalanie biomasy i węgla w kotłach energetycznych rodzi wiele trudności. Związane są one przede wszystkim z właściwościami fizykochemicznymi biomasy znacznie różniącymi się od węgla spalanego w kotłach energetycznych. Różnice polegają na:

- wyższej zawartości wilgoci w surowej biomacie, która wpływa negatywnie na efektywność procesu spalania,
- wyższej zawartości części lotnych zmieniające warunki zapłonu i spalania,
- niższej wartości opałowej surowej biomasy,
- istotnych różnic w składzie ilościowym (jakościowo skład chemiczny jest zbliżony),
- różnym czasie przebywania obu paliw w komorze spalania wynikającym ze znacznej różnicy gęstości cząsteczek biomasy i węgla.



Rys. 7.17. Rozwiązania technologiczne współpalania węgla i biomasy  
 a) współpalanie bezpośrednie, b) współpalanie równoległe, c) współpalanie pośrednie w przedpalenisku, d) współpalanie pośrednie – zgasowanie lub piroliza biomasy w gazogeneratorze  
 Źródło: Głodek 2010

Pozostałe ograniczenia współpalania biomasy w kotłach energetycznych związane są z problemami natury:

- logistycznej – szacuje się, że w warunkach klimatycznych naszego regionu Europy, plantacja biomasy o powierzchni  $1 \text{ km}^2$  będzie produkowała rocznie ilość suchej masy roślinnej, wystarczającą do zasilania instalacji (zasilanej wyłącznie biomasa) o mocy  $< 300 \text{ kW}$ . Elektrownie o mocy elektrycznej powyżej  $30\text{--}40 \text{ MW}$  wymagają paliwa z plantacji o powierzchniach rzędu  $100 \text{ km}^2$ . Zdobywanie takiej ilości biomasy jest problematyczne;
- ekonomicznej – według szacunkowych danych zwiększenie o  $1\%$  zawartości biomasy o wilgotności  $40\text{--}60\%$  (a więc uzyskiwanej bezpośrednio po ścięciu) w strumieniu paliwa podawanego do kotła w celu jej współpalania z węglem powoduje  $0,5\text{--}1\%$  spadek sprawności kotła. Kompensacja tej wielkości wymaga zwiększenia ilości energii chemicznej pochodzącej z paliw kopalnych, co wpływa na zmniejszenie korzystnych efektów współpalania.

## 7.2. Zgazowanie i piroliza biomasy

### 7.2.1. Proste układy zgazowujące

Technologie zgazowania paliw można podzielić na procesy prowadzone w złożach stałych (nieruchomych lub przesuwanych), fluidalnych oraz dyspersyjnych (strumieniowych).

Zgazowanie w złożu stałym jest technologią najstarszą i najbardziej dojrzałą. Reaktory ze złożem stałym przeznaczone są do zgazowania paliw o uziarnieniu  $\sim 5\text{--}80$  mm. W rozpowszechnionych komercyjnie rozwiązaniach stosowany jest przeciwprądowy przepływ paliwa i czynnika zgazowującego.

W reaktorach ze złożem stałym biomasa spoczywa na ruszcie, pod który podaje się czynniki zgazowujące – powietrze i/lub parę wodną, pod wpływem których następuje jej zgazowanie. Wytworzone gazy reagują również z powietrzem lub wodą – przeważnie z wytworzeniem tlenku węgla oraz wodoru – w procesie zwanym reformingiem.

Przy przeciwprądowej realizacji procesu (gaz odbierany jest u góry, podczas gdy drewno opada w dół złoża) wytworzony gaz jest chłodzony przez doprowadzane paliwo i jego temperatura na wyjściu z reaktora jest stosunkowo niska ( $\sim 400\text{--}600^\circ\text{C}$ ). Niskie temperatury w górnej części reaktora są niewystarczające dla efektywnego rozkładu zanieczyszczeń smołowych, fenoli czy niskowrzących węglowodorów uwalnianych w strefie pirolizy i substancje te są transportowane wraz z gazem opuszczającym reaktor.

Współprądowa realizacja procesu (powietrze lub para wodna podawane jest wraz z biomasą od góry, a gazy reakcyjne odprowadzane są od dołu) powoduje uzyskiwanie wyższych temperatur wyprowadzanego z reaktora gazu (konieczność stosowania bardziej kosztownych układów chłodzenia gazu), jednak gaz charakteryzuje się niższym poziomem zawartości zanieczyszczeń.

Zgazowanie w układach fluidalnych polega na wdmuchu powietrza i/lub pary wodnej od dołu rusztu pod ciśnieniem, umożliwiającym utrzymywanie cząstek biomasy w stanie zawieszonym nad rusztem. Zgazowarki pracujące w technice złoża stałego cechują się niskimi zakresami wydajności (mocy). Zgazowanie fluidalne jest bardziej korzystne ekonomicznie, począwszy od zakresu mocy kilku MW.

Karbonizat powstający w czasie procesu jest zgazowywany w tej samej instalacji, względnie odbierany i wykorzystywany w inny sposób, w zależności od zastosowanej technologii zgazowania. W zgazowarkach pracujących w temperaturach wyższych niż  $1000^\circ\text{C}$  w uzyskiwanych produktach gazowych zwykle nie występują zanieczyszczenia smołowe, gdyż ulegają one krakingowi termicznemu.

Produkty gazowe odbierane ze zgazowarki są schładzane i oczyszczane w instalacjach o różnych konfiguracjach technologicznych. Odpylanie gazu odbywa się zazwyczaj w elektrofiltrach. Oczyszczanie gazu przez wymywanie (*quench*) następuje albo przy

użyciu wody, co prowadzi do powstawania zanieczyszczonych ścieków, lub przy pomocy rozpuszczalników organicznych. Gorący gaz można wykorzystać bezpośrednio włączając go do systemu gazu turbinowego lub w wysokotemperaturowych ogniach paliwowych. W obecnie stosowanych lub testowanych technologiach zgazowania próbuje się przede wszystkim opanować problemy związane z powstawaniem i usuwaniem zanieczyszczeń smołowych oraz kondensatów.

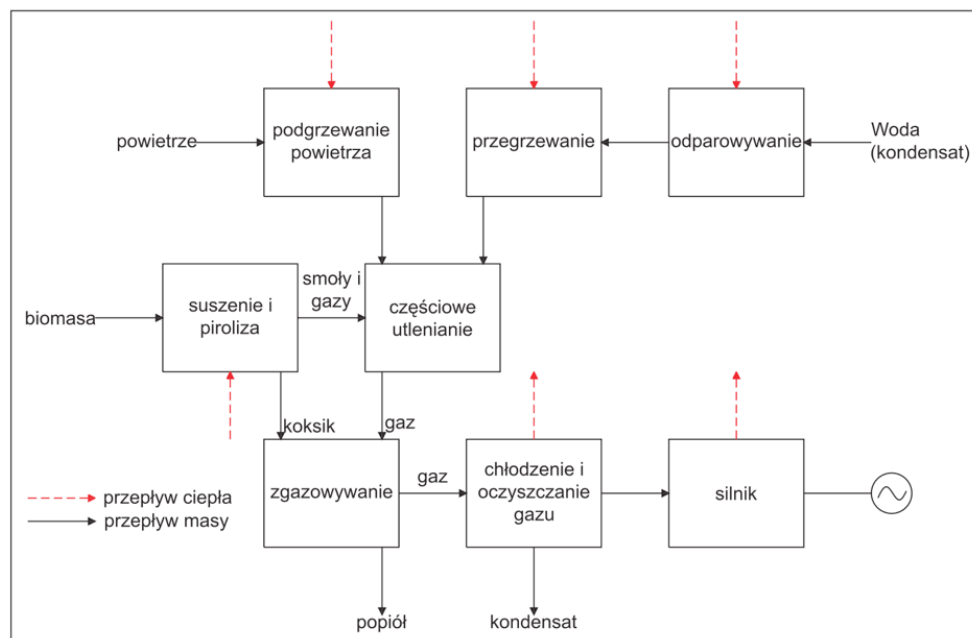
W reaktorach strumieniowych (dyspersyjnych), rozdrobnione paliwo wprowadzane jest do strefy reakcyjnej w strumieniu mieszaniny tlenu i pary wodnej. Reaktory te wymagają rozdrobnienia podawanego paliwa do wielkości ziarna poniżej 0,1 mm, przy czym paliwo to doprowadzane jest w stanie suchym lub w zawiesinie wodnej. Ze względu na konieczność bardzo subtelnego rozdrobnienia paliwa kierowanego do procesu – reaktory strumieniowe dotychczas nie są stosowane w procesach zgazowania biomasy, ze względu na jej nienajlepsze właściwości przemiałowe. Przy stosowaniu innych paliw – przeważnie węgla – uzyskiwane temperatury procesowe mieszczą się w przedziale 1200–1600°C, a reaktory pracują pod ciśnieniem 2–8 MPa (najczęściej ~2,5 MPa). Krótki czas przebywania gazu w układzie reakcyjnym pozwala na osiągnięcie dużej przepustowości reaktora. Reaktory strumieniowe umożliwiają uzyskanie wysokiego stopnia konwersji paliwa i minimalizację zanieczyszczeń smolistych w wytwarzanym gazie (Stelmach i in. 2008).

### **7.2.2. Zaawansowane układy zgazowania i pirolizy**

Interesującym przykładem termochemicznego procesu produkcji energii z biomasy jest proces dwustopniowy łączący pirolizę i gazyfikację. Procesy pirolizy i gazyfikacji odbywają się w dwóch różnych reaktorach. Instalacja składa się z jednostki pirolitycznej podgrzewanej propanem, strefy częściowego utleniania i reaktora zgazowania zbudowanego z żaroodpornej cegły, ruchomego rusztu, komory na popiół, chłodnicy gazu, systemu oczyszczania gazu oraz silnika. Podgrzewacz powietrza, odparowywacz oraz przegrzewacz są podgrzewane elektrycznie. Instalacja ma dwa systemy zasilania: jeden na zrębki drzewne, drugi na pelety lub brykiety. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 7.18 (Bonder i Mirosz 2007).

### **7.2.3. Zgazowarki**

W Polsce jedną z najbardziej znanych instalacji krajowej konstrukcji była zgazowarka biomasy EKOD-1, o mocy 3 MW, opracowana przez firmę SEGI-AT sp. z o.o. (rys. 7.19). Jest ona przeznaczona do utylizacji odpadów w zakładach garbarskich i przetwarza

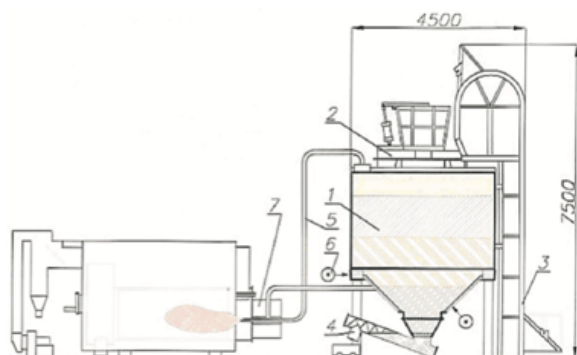


Rys. 7.18. Schemat procesu dwustopniowego zgazowania  
Źródło: Bonder i Mirosz 2007

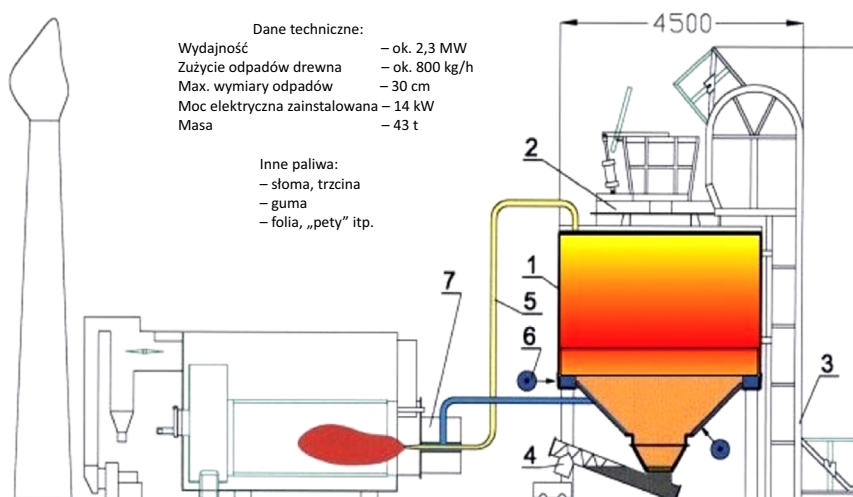
8 Mg/24 h mokrych ścinków skóry w ciepło, produkując 4 Mg/h pary wodnej o ciśnieniu 1,3 MPa. Proces zgazowywania odpadów przebiega dwustopniowo. W pierwszym etapie zgazowania, przy niedoborze powietrza i w temperaturze 600–800°C, powstaje gaz palny i pozostałość mineralna. W drugim etapie procesu gaz jest spalany w komorze dopalania, w temperaturze 1000–1200°C. Reaktor uzyskał sprawność eksploatacyjną 92%. Dzięki wykorzystaniu energii z EKOD-1 w Zakładach Garbarskich można było zainstalować nowy kocioł opalany gazem otrzymanym ze zgazowania odpadów produkcyjnych i wyeliminować część dotychczas spalanego węgla, niezbędnego do wytwarzania pary technologicznej w ilości około 10 ton pary o ciśnieniu 1,3 MPa na godzinę. Katalogowe parametry zgazowarki EKOD-1 są następujące: wydajność – 2,5 MW, przerób – 850 kg/h biomasy o wymiarach do 40 cm, moc elektryczna zainstalowana – 25 kW i masa – 43 tony.

Badania eksploatacyjne przeciwprądowej zgazowarki EKOD, w której zgazowanie przebiega zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.20, przeprowadzono w Zakładzie Meblarskim Holzwerk sp. z o.o. w Drygalech.

Na rysunku 7.21 przedstawiono schemat kolejnej zgazowarki, EKOD-2, produkowanej w Zakładach Mechanicznych ZAMER w Kraszewie k. Lidzbarka Warmińskiego, która ma następujące parametry katalogowe: moc – około 2,8 MW, przerób – 1000 kg/h, moc elektryczna zainstalowana – 35 kW i masa – 40 ton.



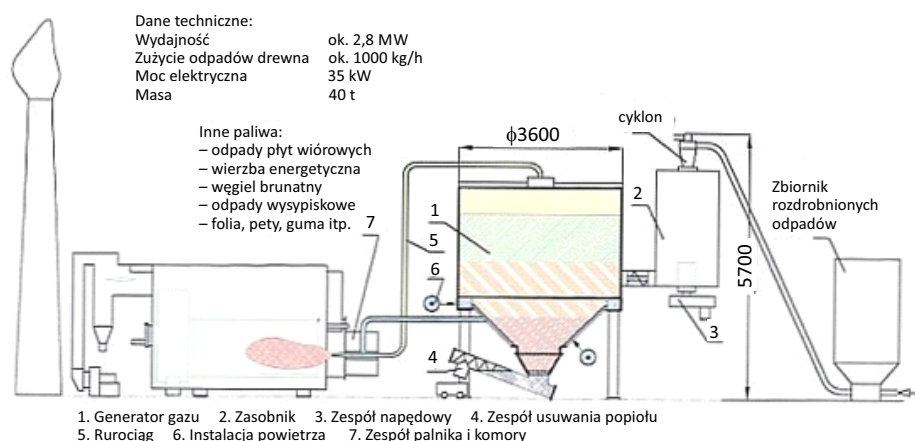
Rys. 7.19. Gazyfikator EKOD-1 współpracujący z kotłem wodnym  
 1 – generator gazu, 2 – śluza, 3 – zespół transportowo-zatadowczy, 4 – zespół usuwania popiołu, 5 – rurociąg, 6 – instalacja powietrzna, 7 – zespół palnika i komory spalania  
 Źródło: Lewandowski i in. 2010



Rys. 7.20. Zgaszarka pirolityczna EKOD firmy Zamer  
 Źródło: Chmielniak i Żuromski 2003

### 7.3. Skojzarzone układy hybrydowe

W systemach hybrydowych stosuje się głównie spalinowe zespoły prądowórcze (np. z silnikami diesla), układy fotowoltaiczne czy małe elektrownie wiatrowe. Technologie te mogą pracować w kombinacjach podwójnych (po dwa) lub być wykorzystywane



Rys. 7.21. Zgaszarka pirolityczna typ EKOD-2 firmy Zamer  
Źródło: Lewandowski i in. 2010

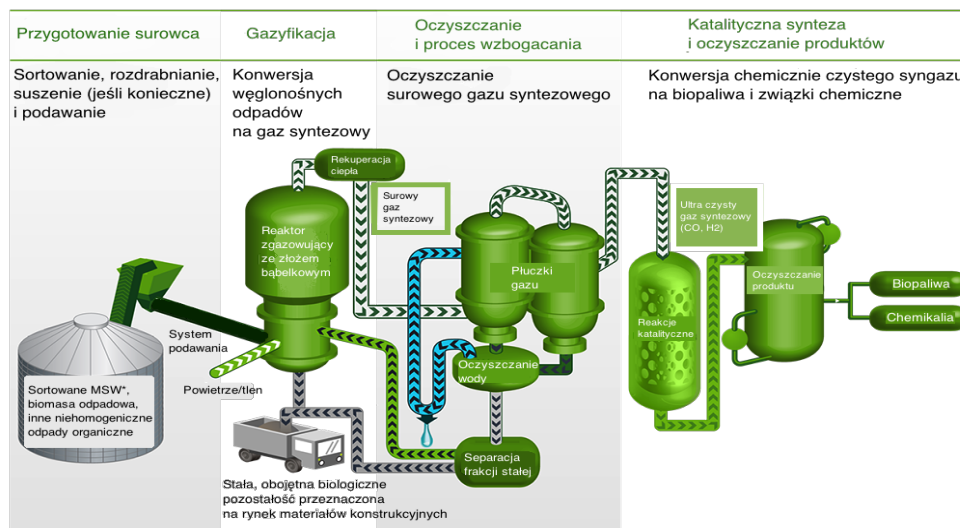
jednocześnie. Oprócz tego systemy hybrydowe budowane są w oparciu o elektrownie zasilane biomasą, w szczególności małe jednostki modułowe (do 5 MW), małe elektrownie wodne i ogniwa paliwowe, łącznie z bateriami słonecznymi i turboszespołami wiatrowymi. Tematyka technologii energetycznego wykorzystania biomasy, uwzględniająca jedno- i wielopaliwowe układy turbin gazowych z zewnętrznym spalaniem biomasy oraz technologie układów silników spalinowych, turbin gazowych i układów gazowo-parowych zintegrowanych ze zgaszaniem biomasy, została szeroko rozwinięta w pracy (Paska i in. 2010).

#### 7.4. Instalacje do produkcji paliw ciekłych

Istnieje wiele układów technologicznych do produkcji paliw ciekłych z biomasy. Jednym z nich jest kanadyjska technologia konwersji biomasy ENERKEM. Jest ona wynikiem wieloletnich badań i została przetestowana w skali pilotowej w 2003 roku. Technologia ta jest obecnie stosowana w pierwszym zakładzie komercyjnym ENERKEM w Westbury, Quebec, Kanada. Proces produkcji łączy gazyfikację i syntezę katalityczną wymagającą dostarczenia ciepła, ciśnienia, zaawansowanej chemii i wykorzystania sprawdzonego katalizatora. Proces produkcji paliwa przedstawiono na uproszczonym schemacie blokowym na rysunku 7.22.

Wsad jest suszony, sortowany i rozdrabniany, a następnie przechowywany w zbiorniku, który jest dołączony do generatora gazu za pomocą systemu ładowania typu *front-end*. Układ generatora gazu jest w stanie obsługiwać luźny materiał bez konieczności

7. PRZEGLĄD TECHNOLOGII ENERGETYCZNEGO WYKORZYSTANIA BIOMASY



Rys. 7.22. Uproszczony schemat produkcji paliw ciekłych z biomasy – technologia ENERKEM

Źródło: ENERKEM... 2016

\* MSW (Municipal Solid Waste) – odpady komunalne

jego granulacji. Zawiesiny węglowe lub ciecze mogą być wprowadzane do generatora gazu przez odpowiednio zaprojektowane wtryskiwacze.

Biomasa jest doprowadzana do gazyfikatora, gdzie przekształca się w gaz syntezowy, w reaktorze ze złożem fluidalnym, który jest połączony z cyklonem w celu odzyskania materiału fluidyzowanego złoża (piasku) z gazu syntezowego. Zgazowanie odbywa się przy użyciu powietrza lub powietrza wzbogaconego tlenem częściowo jako środka utleniającego.

Wymagany poziom wzbogacenia tlenem jest funkcją pożądanego składu gazu syntezowego. Para wodna przy kontrolowanym ciśnieniu cząstkowym jest również niezbędna w procesie zgazowania. Stosunkowo niski reżim pracy generatora gazu, temperatury od 700 do 750°C i ciśnienia od 2 do 10 atm (30 do 150 psi), pozwala na korzystanie z niedrogich materiałów konstrukcyjnych i ogniotrwałych.

Gaz syntezowy z generatora jest oczyszczony i wzbogacany dla dalszych procesów przez cyklon. Otrzymany gaz syntezowy wytwarzany w tym procesie nadaje się do konwersji do produktów płynnych. Za pomocą sekwencyjnego procesu konwersji katalitycznej, gaz syntezowy przekształca się w paliwa transportowe i związki chemiczne, takie jak: metanol, etanol, benzyna syntetyczna, syntetyczny olej napędowy i eter dimetylowy (Enerkem 2016).



## 7.5. Instalacje do produkcji karbonizatu z biomasy

Technologią przyszłościową energetycznego wykorzystania biomasy jest toryfikacja lub karbonizacja. Toryfikacja jest procesem przetwarzania biomasy ligno-celulozowej w paliwo stałe o właściwościach zbliżonych do węgla. Proces ten polega na termicznej obróbce biomasy w zakresie temperatur 200–400°C pod ciśnieniem zbliżonym do atmosferycznego, bez dostępu tlenu. W wyniku działania temperatury w zakresie 240–280°C następuje rozerwanie długich łańcuchów ligniny i celulozy, dzięki czemu uzyskuje się produkt łatwy do obróbki mechanicznej (Kratofil i in. 2015).

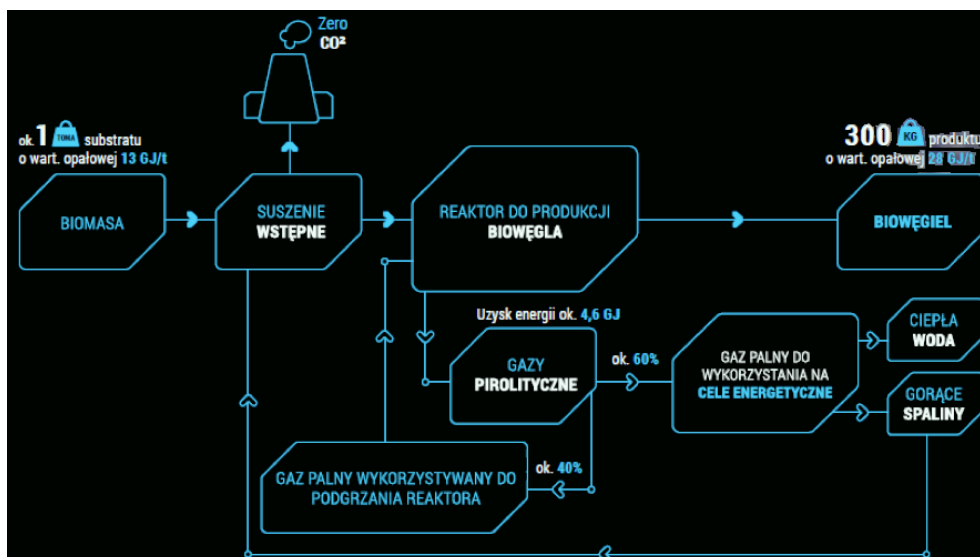
Proces karbonizacji biomasy polega na pirolizie rozdrobnionego materiału wejściowego (np. zrębki drzewnej) w specjalnie przygotowanych do tego reaktorach. Biomasa do reaktora transportowana jest podajnikiem ślimakowym z poziomu gruntu do zbiornika buforowego, który znajduje się w górnej części reaktora. Podczas kolejnych etapów procesu przetwarzany materiał przesuwany jest pionowo w dół.

W pierwszym etapie biomasa wprowadzona do retorty jest poddana podgrzaniu i suszeniu w temperaturze około 250°C. Następnie przetwarzany materiał jest odgazowywany w temperaturze 370–400°C. Proces uwęglania następuje w komorze wirowej, gdzie przetwarzany materiał jest mieszany w celu uzyskania produktu o jednorodnym stopniu uwęglania. W ostatnim etapie wytworzony karbonizat jest wyprowadzany i chłodzony w podajniku odbioru. W zależności od oczekiwanego sposobu wykorzystania karbonizatu może on być skierowany bezpośrednio do systemu załadowczego, peletowany lub konwertowany na energię.

Podczas odgazowania biomasy powstaje pewna ilość syngazu, który wraz z wilgotnymi spalinami jest wyprowadzany komorą spalin i wykorzystywany do celów energetycznych. Rozwiązanie, opracowane przez polską firmę Carbontim GK TIMEX SA, pozwala na wykorzystanie powstałej w wyniku uwęglania biomasy energii cieplnej do suszenia przetwarzanego materiału (TIMEX 2016). Głównym produktem jest karbonizat o wartości opałowej (21–29 GJ/Mg), jednak instalacja jest zdolna przetworzyć autotermicznie substrat o wilgotności do 60% w biowęgiel charakteryzujący się wartością opałową na poziomie 21–23 GJ/Mg oraz zawierający 30–35% części lotnych. Zdecydowaną zaletą tej technologii jest jej samowystarczalność energetyczna oraz wysoka sprawność procesu, która sięga nawet 90% w zależności od wilgotności i rodzaju biomasy.

Biowęgiel może być stosowany jako paliwo bezpośrednio do kotłów pyłowych lub po procesie peletowania lub brykietowania do kotłów rusztowych. Zaawansowane prace nad formowaniem paliw zawarto w pracy (Hryniowicz i in. 2015; Bembenek 2017). Dodatkowo podczas produkcji biowęglu będącego substytutem tradycyjnego węgla kamiennego powstaje mieszanina gazów palnych, tzw. syngaz. Około 60% objętości gazu zostaje wykorzystana do ogrzania komory reaktora, natomiast pozostała część (40%) może być spożytkowana na cele energetyczne lub na wstępne suszenie biomasy. Zasada działania wraz z bilansem energetycznym dla przykładowego substratu przedstawiono na rysunku 7.23.

Jedną z kluczowych zalet opisanego powyżej reaktora jest możliwość płynnej zmiany parametrów uzyskanego karbonizatu determinując jego zastosowanie w gospodarce, po-



Rys. 7.23. Przykładowy bilans energetyczny instalacji uwęglania biomasy TIMEX dla 1 Mg substratu o wartości opałowej 13 GJ/Mg  
Źródło: TIMEX... 2016

cząwszy od substytucji węgla kamiennego (karbonizat o wartości opałowej 21–23 GJ/Mg oraz zawartości części lotnych około 30%) po rolnictwo, oczyszczanie wody pitnej, remediacji składowisk odpadów, przemysł itp. (karbonizat o zawartości węgla przekraczającej 80% odznaczający się wysoką powierzchnią aktywną).

Oczekiwana wydajność urządzeń do karbonizacji biomasy zawiera się w przedziale od 250 do 1000 kg/h gotowego karbonizatu. Modułowość opracowanej technologii pozwala na zastosowanie baterii kilku urządzeń obsługiwanych przez tę samą liczbę pracowników w przypadku, gdy lokalny potencjał biomasy lub zapotrzebowanie na gotowy materiał przekroczy możliwości produkcyjne pojedynczego urządzenia (TIMEX... 2016).

Na rysunku 7.23 przedstawiony jest schemat instalacji wraz z bilansem dla 1 Mg materiału wsadowego w postaci zrębki z korą o wartości opałowej 13 GJ/Mg.

## 7.6. Spalanie biomasy a niska emisja

Jednym z czynników wpływających na powstanie niskiej emisji jest korzystanie z przestarzałych instalacji spalania. Urządzenia takie charakteryzują się niską sprawnością cieplną, która często średniorocznie nie przekracza 50%. Komory spalania oraz wymiennik są w takich instalacjach nierównomiernie obciążone cieplnie. Co więcej,

aparatura nie posiada strefy, gdzie produkty zgazowania węgla mogą ulec dopaleniu, a podczas fazy uzupełniania paliwa obserwuje się wzmożoną emisję produktów spalania niecałkowitego i niepełnego. W tego typu instalacjach nie ma także odpowiedniego systemu doprowadzania powietrza wtórnego, który działałby efektywnie i w sposób kontrolowany. Wszystko to wpływa na wysoką emisję zanieczyszczeń do środowiska i jest zagrożeniem dla innych osób, jak również dla samego palącego.

Stosowanie niskiej jakości paliwa i odpowiedni jego dobór do techniki spalania ma duży wpływ na omawiany problem niskiej emisji. W Polsce ponad 50% energii w sektorze komunalno-bytowym jest uzyskiwane z węgla. W mniejszym stopniu używa się gazu ziemnego, paliw ciekłych oraz odnawialnych źródeł energii, np. w postaci kolektorów słonecznych. Dlatego też jakość węgla ma duże znaczenie, gdyż uzależnia osiągnięcie danych parametrów energetycznych i emisyjnych kotłów, ustalonych przez odpowiednie normy: PN-EN 303-5:2012 (Norma... 2012) oraz PN-EN 12809:2002/A1:2006 (Norma... 2002). *Trzeba również brać pod uwagę jaki rodzaj paleniska jest zastosowany w kotle, gdyż inne uwarunkowania są dla tych z automatycznym i podsuwowym podajnikiem, a inne z załadunkiem ręcznym. Parametry, które odgrywają znaczącą rolę w jakości paliwa węglowego to: zawartość wilgoci, części lotnych, popiołu, siarki, chloru i rtęci, wartość opałowa w stanie roboczym, a także uziarnienie i spiekalność.* Prawidłowe parametry jakościowe węgla według Polskiej Izby Ekologicznej dla kotłów z automatycznym oraz z ręcznym załadunkiem są przedstawione w tabeli 7.2 oraz w tabeli 7.3.

Tabela 7.2. Parametry jakościowe węgla dla kotłów z automatycznym załadunkiem

Parametr	Symbol	Jednostka	Zakres	Optymalny
Typ węgla	n.d.	n.d.	31; 32.1	n.d.
Wartość opałowa	$Q_i^r$	MJ/kg	24–29	26–27
Zawartość wilgoci	$W_t^r$	%	6–15	≤ 10
Zawartość popiołu	$A^r$	%	3–10	≤ 8
Zawartość części lotnych	$V_{daf}$	%	> 28	> 28
Zawartość siarki	$S_t^a$	%	< 1,0	≤ 0,6
Zawartość chloru	$Cl^a$	%	< 0,3	≤ 0,15
Zawartość rtęci	Hg	ppm	< 0,05	≤ 0,02
Zdolność spiekania	RI	n.d.	< 20	< 10
Temperatura spiekania popiołu <sup>a)</sup>	$t_s$	°C	> 900	> 1 100
Temperatura mięknięcia popiołu <sup>a)</sup>	$t_A$	°C	≥ 1 200	> 1 250
Uziarnienie	n.d.	mm	4–25 <sup>1),3)</sup>	5–25 <sup>2)</sup>
Udział podziarna	n.d.	%	≤ 5	≤ 3

<sup>1)</sup> Dla kotłów retortowych o mocy powyżej 100 kW 5–31 mm

<sup>2)</sup> Dla kotłów retortowych o mocy powyżej 100 kW 8–31 mm

<sup>3)</sup> Dla kotłów podsuwowych 1–31 mm

<sup>a)</sup> Parametr mierzony w warunkach redukcyjnych

n.d. – nie dotyczy

Źródło: Kubica i in. 2013

Tabela 7.3. Parametry jakościowe węgla dla kotłów z ręcznym załadunkiem

Parametr	Symbol	Jednostka	Zakres	Optymalny
Typ węgla	n.d.	n.d.	31, 32, 38, 41	n.d.
Wartość opałowa	$Q^r_i$	MJ/kg	24–30	$\geq 27$
Zawartość wilgoci	$W^r_t$	%	6–15	$\leq 10$
Zawartość popiołu	$A^r$	%	3–10	$\leq 8$
Zawartość części lotnych	$V^{daf}$	%	$> 28$	$> 28$
Zawartość siarki	$S^a_t$	%	$< 1,0$	$\leq 0,6$
Zawartość chloru	$Cl^a$	%	$< 0,3$	$\leq 0,2$
Zawartość rtęci	Hg	ppm	$< 0,08$	$\leq 0,05$
Zdolność spiekania	RI	n.d.	$< 35$	$< 20$
Temperatura spiekania popiołu	$t_s$	$^{\circ}C$	$> 900$	$> 1\ 000$
Temperatura mięknięcia popiołu	$t_A$	$^{\circ}C$	$\geq 1\ 200$	$> 1\ 250$
Uziarnienie	n.d.	mm	8–80 <sup>1,2,3)</sup>	25–50 <sup>3)</sup>
Udział nadziarna	n.d.	%	$\leq 5$	$\leq 3$
Udział podziarna	n.d.	%	$\leq 10^4)$	$\leq 3$
Udział podziarna 6,3–0 mm	n.d.	%	$\leq 2$	0

<sup>1)</sup> Groszek: 8–31,5 mm, w tym groszek I: 16–31,5 mm i groszek II: 8–20 mm

<sup>2)</sup> Orzech I: 40–80 mm

<sup>3)</sup> Orzech II: 25–50 mm

<sup>4)</sup> Zawartość podziarna dla orzecha I i II  $\leq 8\%$ ; według PN-82/G-97001 (w części dotyczącej węgla energetycznego)

<sup>a)</sup> Parametr mierzony w warunkach redukcyjnych

n.d. – nie dotyczy

Źródło: Kubica i in. 2013

„W budownictwie indywidualnym węgiel używany do ogrzewania powinien być wzbogacony w porównaniu do węgla surowego wydobytego z kopalni. Dobry jakościowo węgiel jest zawsze certyfikowany przez laboratorium badawcze mające upoważnienie Polskiego Centrum Akredytacji dla paliwa, które jest dobre gatunkowo według jego producenta” (Kubica i in. 2013). Mając to na względzie, należy zwracać szczególną uwagę na zawartość popiołu i siarki w zakupionym worku węgla. Jeśli te parametry nie będą zachowane, to spalanie takiego paliwa będzie skutkowało emisją zanieczyszczeń w postaci pyłu, metali ciężkich oraz siarki, doprowadzi do zmniejszenia sprawności energetycznej spalania, a także spowoduje trudności w pracy kotła. Niewłaściwe dobranie typu węgla do kotła, oprócz produkcji zanieczyszczeń, może mieć skutki w postaci spieków, czyli brył węgla sklejonych w jedną całość. Utrudnia to znacznie spalanie się paliwa oraz wpływa negatywnie na pracę kotła i jego instalację. Ponadto, kupując węgiel z dużą zawartością części lotnych, trzeba mieć na uwadze, że jest to materiał opałowy znacznie trudniejszy do spalania ze względu na zawartość smoły. Potrzeba wyższych temperatur niż te, które są możliwe do osiągnięcia w kotłach domowych.

W wyniku tego następują problemy z urządzeniami i instalacją kominową, gdyż porcje smoły mogą je zaklejać.

Ostatnią przyczyną wpływającą na powstawanie niskiej emisji jest nieodpowiedni stan instalacji kominowej. Zaniedbana instalacja to też pośredni skutek spalania i współspalania odpadów, ponieważ taka praktyka powoduje osadzanie się niespalonych śmieci na ścianach komina. Niesprawny system kominowy zmniejsza również sprawność eksploatacji kotła, co prowadzi do zwiększenia emisji zanieczyszczeń do 30%, a także możliwości zatrucia tlenkiem węgla CO.

### Techniczne sposoby redukcji niskiej emisji

Biorąc pod uwagę skutki wynikające z niskiej emisji, należy im przeciwdziałać oraz zacząć stosować odpowiednie metody i techniki pozwalające na ich redukcję. Działania te można umownie podzielić na techniczne i pozatechniczne. Jedną z możliwości technicznych wpływającą na znaczne zmniejszenie emitowania zanieczyszczeń do powietrza jest właściwy sposób palenia paliw stałych. Ta metoda polega na ciągłym i zautomatyzowanym doprowadzaniu paliwa do górnej warstwy, która jest w danym momencie rozżarzona. Takie paliwo jest wtedy w strefie spalania i dzięki temu lotne produkty odgazowania mogą ulec niemalże całkowitemu spalaniu, gdy przechodzą przez warstwę żaru o bardzo wysokiej temperaturze. Zastosowanie takiej metody powoduje małą emisję szkodliwych zanieczyszczeń i dodatkowo jest bardzo ekonomiczne, gdyż praktycznie całe paliwo ulega spalaniu, a nie jest emitowane w postaci toksycznego dymu przez komin. W instalacjach małej mocy takie techniki stosuje się w kotłach retortowych, które są obecnie uważane na rynku za najbardziej efektywne i nowoczesne. Ponadto spełniają one normę PN-EN 303-5:2012 i należą do piątej klasy, czyli realizują odpowiednie wymagania co do emisji zanieczyszczeń, jak również do minimalnej sprawności urządzenia (Norma... 2012).

Tabela 7.4 przedstawia porównanie wartości granicznych emisji tlenku węgla CO, węgla organicznie związanego OGC (niespalone substancje organiczne w postaci gazowej) i pyłu dla kotłów o mocy poniżej 0,5 MW według wyżej wymienionej normy. Wartości te są najniższe dla kotłów piątej klasy, co oznacza, że takie urządzenia emitują najmniej zanieczyszczeń. W porównaniu do klasy trzeciej, która przed wprowadzeniem normy była klasą najwyższą, limity emisji są znacznie bardziej rygorystyczne i zależnie od rodzaju kotła dopuszczają niemal dwukrotnie, czterokrotnie lub nawet siedmiokrotnie (dla małych kotłów na biopaliwo z załadunkiem ręcznym) niższą emisję zanieczyszczeń. Stosowanie kotłów spełniających te surowe kryteria gwarantuje, że osoby korzystające z takich urządzeń nie będą winne nadmiernego zanieczyszczenia środowiska.

Stosowanie „dobrych praktyk” może pomóc w wielu kwestiach, zaczynając od zaoszczędzenia paliwa aż po bezpieczeństwo mieszkańców i budynku, w jakim kocioł się znajduje. Ważnym czynnikiem jest odpowiednia edukacja wszystkich dorosłych domowników w zakresie obsługi kotła. Może się to okazać istotne w sytuacji zagrożenia wybuchem w kotłowni. Co więcej, zakup czujnika czadu jest w takich wypadkach bar-

Tabela 7.4. Wymagania energetyczno-emisyjne w odniesieniu do kotłów o mocy  $\leq 500$  kW na paliwa stałe, według Rozporządzenia Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r.

Rodzaj stałego paliwa	Rok obowiązywania od 2020 <sup>1)</sup>				
	sezonowa sprawność energetyczna	sezonowa emisja zanieczyszczeń <sup>4)</sup>			
		pył (PM)	OGC	CO	NO <sub>x</sub>
	%	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Automatyczne zasilanie paliwem					
Biopaliwa	75 <sup>2)</sup> ; 77 <sup>3)</sup>	40	20	500	200
Kopalne	75 <sup>2)</sup> ; 77 <sup>3)</sup>	40	20	500	350
Ręcznie zasilane paliwem					
Biopaliwa	75 <sup>2)</sup> ; 77 <sup>3)</sup>	60	30	700	200
Kopalne	75 <sup>2)</sup> ; 77 <sup>3)</sup>	60	30	700	350

<sup>1)</sup> Państwa członkowskie UE mogą wdrożyć do prawa narodowego wcześniej, przed rokiem 2020

<sup>2)</sup> Dla kotłów o mocy 20 kW oznaczany tylko dla mocy nominalnej

<sup>3)</sup> Dla kotłów o mocy > 20 kW

<sup>4)</sup> Odniesiona do spalin suchych: 0°C, 1013 mbar, zawartość 10% O<sub>2</sub>

dzo znaczący, gdyż może uratować życie mieszkańcom budynku. Innym sposobem jest również regularne czyszczenie kotła oraz sprawdzanie uszczelnień drzwiczek i innych otworów, co pozwala zabezpieczyć się przed przenikaniem spalin do pomieszczenia i tym samym trucią mieszkańców. Dodatkową czynnością na rzecz stosowania „dobrych praktyk” jest niespalanie śmieci oraz zgłaszanie takich zachowań odpowiednim organom prawnym. Takie postępowanie ograniczy emisję wysokotoksycznych związków, które są szkodliwe dla zdrowia i oddziałują negatywnie na środowisko przyrodnicze. Należy również dbać o czystość przewodu kominowego. Brak regularnych kontroli może spowodować niebezpieczny pożar sadzy. Trzeba mieć też na uwadze, aby rodzaj stosowanego paliwa był odpowiedni do typu kotła lub pieca, jaki jest używany. Sprawdzenia tych danych dokonuje się na podstawie dokumentacji od producenta lub autoryzowanego sprzedawcy.

Kolejnym ważnym czynnikiem jest odpowiednie dobranie mocy kotła do zapotrzebowania na ciepło danego domu. Pozwoli to na uniknięcie sytuacji, w której spala się więcej opału niż wymaga tego konfiguracja kotła, emitując przy tym zwiększoną ilość niespalonych gazów. Trzeba się wystrzegać przewymiarowania kotła centralnego ogrzewania. Ma to miejsce wtedy, gdy moc nominalna urządzenia jest wyższa od tej, której potrzebuje budynek i nie będzie w pełni wykorzystywana. Konsekwencje, jakie niesie ze sobą przewymiarowanie, to między innymi zużywanie bardzo dużych ilości paliwa, pozostałości węgla w popiele, tworzenie się sadzy w kotle, czy też jego zasmolenie. Powyższe przyczyny sprawiają, że takie urządzenie pracuje na niskiej mocy, a więc jego sprawność jest również niska, rzędu 20–30%, co jest wysoce nieefektywne

i nieekonomiczne. W przypadku, gdy kocioł pracuje na pełnej mocy i zużywa bardzo dużą ilość opału, a nadal nie jest w stanie ogrzać domu, należy się spodziewać, że urządzenie jest za słabe na potrzeby mieszkańców. Przyczyny można szukać w zaniedbaniu czyszczenia wymiennika z sadzy, jak również w stosowaniu opału niezgodnego z instrukcją pochodzącą od producenta. W przypadku kotła z podajnikiem powodem mogą być złe nastawy sterownika.

## PODSUMOWANIE

1. Wykorzystanie biomasy, jak również innych odnawialnych źródeł energii, jest ważnym elementem zrównoważonego rozwoju kraju. Wykorzystanie to uzależnione będzie od obowiązujących dokumentów strategicznych Unii Europejskiej i dokumentów krajowych. Działania te mają na celu wspieranie rozwoju OZE i zwiększenie udziału energii wyprodukowanej z tych źródeł w całkowitym bilansie produkcji energii i tym samym przyczyni się do poprawy stanu środowiska, wskutek redukcji emisji szkodliwych gazów do atmosfery oraz poprawienie efektywności energetycznej u odbiorcy końcowego.

2. Biomasa jest jednym z odnawialnych źródeł energii. Obejmuje substancję organiczną wszelkiego rodzaju (roślinną i zwierzęcą), jak i wszystkie substancje otrzymane w wyniku przerobu tych surowców: drewno różnego pochodzenia (leśnictwo, plantacje drzew energetycznych), substancję organiczną pochodzącą z hodowli zwierząt (gnojowica, obornik) lub z osadów ściekowych, słomę pozyskiwaną w rolnictwie i pozostałości o naturze organicznej pochodzące z przemysłu spożywczego. Występuje szereg norm dotyczących stosowania paliw z biomasy o odpowiedniej jakości.

3. W Polsce występujące warunki klimatyczne umożliwiają uprawę trzech grup roślin na cele energetyczne: drzewa i krzewy (wierzba, topola, robinia akacjowa, róża wielokwiatowa), trawy (miskant: olbrzymi, chiński i cukrowy, spartina preriowa), byliny (ślazowiec pensylwański, topinambur).

4. Największe znaczenie dla celów energetycznych ma biomasa drzewna, której źródłem są: leśnictwo, sektor drzewny, gospodarka komunalna i rolnictwo. Potencjalne ilości drewna możliwe do pozyskania na cele energetyczne w 2021 r. szacowane są w Lasach Państwowych na 36,9 mln m<sup>3</sup>, a w lasach prywatnych – 4,9 mln m<sup>3</sup> grubizny netto, natomiast w 2031 r. odpowiednio: 40,7 i 6,0 mln m<sup>3</sup> grubizny netto.

5. Udział odpadów rolniczych w całkowitej ilości zasobów biomasy wynosi około 33%. Prognoza produkcji słomy w 2020 r. kształtować się będzie następująco: potencjał techniczny szacowany jest powyżej 8,5 mln ton, natomiast potencjał ekonomiczny – powyżej 5 mln ton, a potencjał rynkowy również powyżej 5 mln ton, jednak przewyższający potencjał ekonomiczny.



6. Najbardziej obiecującymi roślinami energetycznymi, mającymi szansę wejść na rynek produkcji biomasy, są: wierzba, ślazier pensylwański i miskant. Wielkość uzyskanego plonu zależy od: gatunku i odmiany gleby przeznaczonej pod uprawę, zabiegów agrotechnicznych, gęstości sadzenia i od cyklu zbioru roślin w przypadku wierzby. Roczne plony tych roślin mogą wynosić od kilku do kilkudziesięciu ton suchej masy.

7. Wybór techniki i technologii uzyskiwania energii z biomasy zależy od stawianych wobec tego rodzaju paliwa wymagań dotyczących wysokiej sprawności cieplnej, niskiej emisji zanieczyszczeń do atmosfery, małej ilości odpadów paleniskowych. Znaczący wpływ na wymienione wymagania mają następujące właściwości tego paliwa: skład chemiczny, wartość opałowa, zawartość wilgoci, zawartość części lotnych, zawartość popiołu i gęstość.

8. Różnorodność surowców do produkcji granulatu (pelety, brykiety) jest bardzo duża. Praktycznie każdy rodzaj biomasy stałej może zostać poddany granulacji. Obecnie do produkcji pelet stosuje się odpady z przemysłu drzewnego, biomasę pochodzącą z upraw energetycznych (ślazier pensylwański, wierzba, miskant), słomę, a nawet susz jabłkowy. Brykiety natomiast produkuje się głównie ze słomy i wiórów. Wzrost produkcji granulatu wymaga jednak wparcia władz państwowych i samorządowych.

9. W wyniku spalania biomasy powstają produkty odpadowe, których ogólny podział uwzględnia dwie podstawowe grupy: popioły lotne (z systemów oczyszczania spalin) powstające w zakresie temperatur 800–1600°C oraz popioły denne lub żuźle. Na skład chemiczny popiołów z biomasy wpływa wiele czynników; pochodzenie biomasy, spalanie biomasy (przygotowanie paliwa, technika i warunki spalania, urządzenia do oczyszczania spalin), zbieranie oraz transport i składowanie biomasy.

10. Popioły lotne ze spalania biomasy są złożonymi nieorganiczno-organicznymi mieszaninami z polikomponentami heterogenicznymi i zmiennym składem zawierającym stałe, ciekłe i gazowe fazy o różnym pochodzeniu. Popioły te zawierają w swoim składzie charakterystyczne (specyficzne) związki, których nie stwierdzono w popiołach lotnych ze spalania węgla kamiennego, takie jak: krzemiany Ca–K–Mn, chlorki K–Na–Cl i węglany K–Ca–Mg–Na. Związane to jest jednak z większą zawartością: Ca, Cl, K, Mg, Na, O i P w popiołach ze spalania biomasy oraz niższą zawartością: Al, C, N, S, Si, Ti.

11. Popioły ze spalania biomasy mogą charakteryzować się wysoką wymywalnością zanieczyszczeń i przez to ich gospodarcze wykorzystanie może być ograniczone. Wysoka wymywalność związana jest z występowaniem w tego typu popiołach łatwo rozpuszczalnych chlorków (sylwin, halit), siarczanów (sygenit, ettringit, gips), tlenków (CaO), wodorotlenków (portlandyt), azotanów, węglanów i wodorowęglanów. Wysoka wymywalność takich pierwiastków jak: Ba, Cl, Cr, Mo, Pb może stanowić problem środowiskowy.

12. Najważniejsze kierunki wykorzystania popiołów lotnych ze spalania biomasy to zastosowanie: w produkcji materiałów budowlanych, w rolnictwie, w budownictwie drogowym do wykonywania podbudowy dróg i do wytwarzania spoiw asfaltowych, do stabilizacji chemicznej komunalnych osadów ściekowych, do oczyszczania ścieków i jako absorbenty; ponadto mogą mieć zastosowanie do produkcji: ceramiki, filtrów stosowanych w przemyśle spożywczym i petrochemicznym, szkielek i glazury, materiałów

ogniotrwałych, geopolimerów, zeolitów. Popioły denne mogą być potencjalnie stosowane: w budownictwie drogowym, w zaczynach cementowych, w materiałach budowlanych, jako czynnik poprawiający jakość gleby.

13. Występuje wiele rozwiązań instalacji spalania lub współspalania biomasy. Wybór odpowiedniej technologii spalania uzależniony jest od mocy układu, parametrów paliwa (skład chemiczny paliwa i popiołu, zawartość części lotnych, popiołu, wilgoci, kaloryczności, gęstości itp.) oraz wielkości paliwa (biopaliwa mogą być spalane w postaci drewna kawałkowego, zrębków, brykietów, peletów, pyłu, balotów itp. Kotły na paliwa z biomasy dzielą się ze względu na sposób podawania paliwa na kotły z załadunkiem ręcznym (tzw. wsadowe) oraz kotły z automatycznym podawaniem paliwa.



## LITERATURA

- An i in. 2011 – An D.M., Guo Y.P., Zou B., Zhu Y.C. i Wang Z.C., 2011 – A study on the consecutive preparation of silica powders and active carbon from rice husk ash. *Biomass Bioenergy* 35, s. 1227–1234.
- Ban i Ramli 2011 – Ban C.C., Ramli M., 2011 – The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling* 55, s. 669–685.
- Basista i Szubel 2017 – Basista G. i Szubel M., 2017 – Komputerowe wspomaganie optymalizacji pracy urządzeń grzewczych opalanych drewnem. [W:] *Drewno w energetyce*. Red. naukowa M. Szubel, W. Goryl. Fundacja na rzecz Czystej Energii. Poznań, s. 100–111.
- Barbosa i in. 2014 – Barbosa R., Lapa N., Lopes H., Günther A. i Mendes B., 2014 – Biomass fly ashes as low-cost chemical agents for Pb removal from synthetic and industrial wastewaters. *Journal of Colloid and Interface Science* 424, s. 27–36.
- Bembenek M., 2017 – Badania i perspektywy nowych obszarów stosowania pras walcowych. *Przemysł Chemiczny* t. 96, nr 9, s. 1845–1847.
- Berra i in. 2015 – Berra M., Mangialardi T. i Paolini A.E., 2015 – Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials. *Construction and Building Materials* 76, s. 286–296.
- BIOS... 2016. *BIOS Bioenergiesysteme GmbH*. [Online] <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/biomass-gasification.html> [Dostęp 15.11.2016].
- Bogush i in. 2018 – Bogush A.A., Stegemanna J.A., William R. i Wood J.G., 2018 – Element speciation in UK biomass power plant residues based on composition, mineralogy, microstructure and leaching. *Fuel* 211, s. 712–725.
- Bonder i Mirosz 2007 – Bonder L. i Mirosz M., 2007 – Przegląd technologii zgazowania biopaliw stałych. *INSTAL* nr 11, s. 10–15.
- Cabrera i in. 2014 – Cabrera M., Galvin A.P., Agrela F., Carvajal M.D. i Ayuso J., 2014 – Characterization and technical feasibility of using bottom ash for civil infrastructures. *Construction and Building Materials* 58, s. 234–244.
- Carrasco i in. 2014 – Carrasco B., Cruz N., Terrados J., Corpas F.A. i Pérez L., 2014 – An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel* 118, s. 272–280.
- Chmielniak i Żuromski 2003 – Chmielniak T. i Żuromski Z., 2003 – *Zgazowanie biomasy w układach małej mocy*. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla. [Online] [http://www.ichpw.pl/wp-content/uploads/2015/07/Artykul\\_2003\\_06.pdf](http://www.ichpw.pl/wp-content/uploads/2015/07/Artykul_2003_06.pdf) [Dostęp 30.05.2018].
- Ciesielczuk i in. 2011 – Ciesielczuk T., Kusza G. i Nemś A., 2011 – Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 49, s. 219–227.

- Communication... 2011 – Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Energy Roadmap 2050. (COM(2011)885 final). Brussels, 15.12.2011.
- Cruz i in. 2017 – Cruz N. C., Rodrigues M.S., Carvalho L., Duarte A.C., Pereira E., Römkens P.F.A.M. i Tarelho L. A.C., 2017 – Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: recycling to soil as a viable management option. *Environmental Science and Pollution Research* 24, s. 14770–14781.
- Cuenca i in. 2013 – Cuenca J., Rodríguez J., Martín-Morales M., Sánchez-Roldán Z. i Zamorano M., 2013 – Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self compacting concrete. *Construction and Building Materials* Vol. 40, s. 702–709.
- Deluga i Mickiewicz 2013 – Deluga W. i Mickiewicz B., 2013 – *Odnawialne Źródła Energii* – praca zbiorowa. EKSPERT-SITR Spółka z o.o., Koszalin.
- Demis i in. 2014 – Demis S., Tapali J.G. i Papadakis V.G., 2014 – An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials* 68, s. 291–300.
- Diatta i Kowalski 2017 – Diatta J. i Kowalski M., 2017 – Popioły ze spalania biomasy roślinnej (fitotopopioły) – recykling i agrochemiczny potencjał. [W:] *Materiały XXIV Międzynarodowej Konferencji Popioły z energetyki*. Sopot, s. 81–96.
- DP CleanTech 2016 – *Katalog produktów DP CleanTech*. [Online] <https://www.dpcleantech.com/commercial-industrial-biomass-boilers/biomass-conversion-boiler-system> [Dostęp 04.05.2018].
- DSRK... 2013 – Uchwała nr 16 Rady Ministrów z dnia 3 lutego 2013 r. w sprawie przyjęcia Długookresowej Strategii Rozwoju Kraju. Polska 2030. Trzecia Fala Nowoczesności. Załącznik do uchwały. Ministerstwo Administracji i Cyfryzacji. M. P. 2013, poz. 121. Warszawa, dnia 1 marca 2013.
- Dyrektywa... 2001 – Dyrektywa 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 r. w sprawie wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych. Dz.U. L 283 z 27.10.2001.
- Dyrektywa... 2003 – Dyrektywa 2003/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 8 maja 2003 roku, w sprawie wspierania użycia w transporcie biopaliw lub innych paliw odnawialnych. Dz.U. UE L 123 z 17.05.2003.
- Dyrektywa... 2009 – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- Enerkem... 2016. *Materiały firmy Enerkem*. [Online] <http://enerkem.com/> [Dostęp 12.12.2016].
- Energoprojekt... 2003 – Energoprojekt – Katowice S.A. 2003 – Koncepcja logistyki pozyskiwania biomasy i funkcjonowania systemu zaopatrzenia Elektrowni Stalowa Wola S.A. w biopaliwa.
- Filipowicz i in. 2017 – Filipowicz M., Szubel M., Goryl W., Matras B. i Tomczyk B., 2017 – Wybrane metody badawcze w zakresie spalania drewna w domowych instalacjach grzewczych. [W:] *Drewno w energetyce*. Red. naukowa M. Szubel, W. Goryl. Fundacja na rzecz Czystej Energii. Poznań, s. 122–139.
- Fontes i in. 2017 – Fontes C.M.A., Silva R.B. i Lima P.R.L., 2017 – *Waste Biomass Valor*. [Online] <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0031-x> [Dostęp 04.05.2018].
- Forum... 2017 – Rubczyński A. (opieka merytoryczna), Ecke J., Steinert T., Bukowski M. i Śniegocki A. – Polski sektor energetyczny 2050. 4 scenariusze. Forum Energii, WiseEuropa, Enervis, CZliTT. [Online] [www.forum-energii.eu](http://www.forum-energii.eu) [Dostęp 04.05.2018].
- Franus i Wdowin 2010 – Franus W. i Wdowin M., 2010 – Removal of ammonium ions by selected natural and synthetic zeolites. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 26, z. 4, s. 133–148.
- Garcia i in. 2015 – Garcia, R., Pizarro C., Alvarez A., Lavin A.G. i Bueno J.L., 2015 – Study of biomass combustion wastes. *Fuel* 148, s. 152–159.
- Gawlik i in. 2013 – Gawlik L. (red. naukowa), Grudziński Z., Kamiński J., Kaszyński P., Kryzia D., Lorenz U., Mirowski T., Mokrzycki E., Olkusi T., Ozga-Blaschke U., Pluta M., Sikora A., Stala-Szlugaj K., Suwała W., Szurlej A., Wyrwa A. i Zyśk J., 2013 – *Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 roku – analizy scenariuszowe*. Górnicza Izba Przemysłowo-Handlowa. Katowice.

- Gebele 2004 – Gebele Ch., 2004 – Warunki energetycznego wykorzystania biomasy stałej. *Czysta Energia* nr 5, s. 24–25.
- Gianoncelli i in. 2013 – Gianoncelli A., Zacco A., Struis R.P.W.J., Borgese L., Depero L.E. i Bontempi E., 2013 – Fly Ash Pollutants, Treatment and Recycling. [In:] Lichtfouse E., Schwarzbauer J., Robert D. (eds) *Pollutant Diseases, Remediation and Recycling. Environmental Chemistry for a Sustainable World 4*. Springer, Cham.
- Giron i in. 2013 – Giron R.P., Ruiz B., Fuente E., Gil R.R. i Suarez-Ruiz J., 2013 – Properties of fly ash from forest biomass combustion. *Fuel* No. 114, s. 71–77.
- Głodek 2010 – Głodek E., 2010 – *Spalanie i współspalanie biomasy – poradnik*. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Opole.
- Gornowicz i Pilarek 2013 – Gornowicz R. i Pilarek Z., 2013 – Wpływ pozyskiwania biomasy na wycofywanie pierwiastków biogenych ze środowiska leśnego. [W:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Red. P. Gołos i A. Kaliszewski. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 138–146.
- Goryl i Filipowicz 2016 – Goryl W., Filipowicz M., 2016 – Metody wykorzystywane w suszeniu biomasy. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* z. 63, nr 4, s. 151–158.
- Goryl i in. 2016, Goryl W., Szubel M., Filipowicz M., 2016 – *Processes of heat and mass transfer in straw bales using flue gases as a drying medium*. EPJ Web of Conferences 114, 02033 (2016). DOI: 10.1051/epj-conf/201611402033.
- Green Paper... 2000 – Green Paper: Towards a European strategy for the security of energy supply. COM(2000)769 z dnia 29 listopada 2000.
- Grzybek 2003 – Grzybek A., 2003 – Kierunki rozwoju i możliwości przetwarzania biomasy na cele energetyczne. *Czysta Energia* nr 10, s. 23–25.
- GUS 2018. Użytkowanie gruntów i powierzchnia zasiewów w 2017 r. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.
- Hinojosa i in. 2014 – Hinojosa M.J.R., Galvin A.P., Agrela F., Perianes M. i Barbudo A., 2014 – Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: Conflictive chemical parameters according to technical regulations. *Fuel* 128, s. 248–259.
- Horsakulthai i in. 2011 – Horsakulthai V., Phiuvanna P. i Kaenbud W., 2011 – Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage. *Construction and Building Materials* 25, s. 54–60.
- Hryniewicz i Grzybek 2017 – Hryniewicz M. i Grzybek A., 2017 – Nadwyżka słomy dostępnej do wykorzystania na potrzeby energetyczne w 2016 r. *Problemy Inżynierii Rolniczej/Problems of Agricultural Engineering* 3(97), s. 15–31.
- Hryniewicz i in. 2015 – Hryniewicz M., Bemberek M., Jancewicz A., Kosturkiewicz B. – Brykietowanie materiałów drobnoziarnistych w prasach walcowych z niesymetrycznym układem zagęszczania — Agglomeration of fine-grained materials in roll presses with asymmetrical compaction unit. *Przemysł Chemiczny* t. 94, nr 12, s. 2223–2226.
- IRENE... 2014 – Global bioenergy supply and demand projections. International Renewable Energy Agency, 2014.
- IS... 2018. Materiały szkoleniowe i edukacyjne Państwowej Szkoły Budownictwa i Geodezji w Lublinie. [Online] <http://www.instsani.pl/sys/sitemap> [Dostęp 21.09.2018].
- Jabłoński 2004 – Jabłoński R., 2004 – Rośliny energetyczne – wyniki badań energetyczności. *Czysta Energia* nr 10, s. 33–34.
- Jagustyn i in. 2011 – Jagustyn B., Bątołek-Giesia N. i Wilk B., 2011 – Ocena właściwości biomasy wykorzystywanej do celów energetycznych. *Chemik* t. 65, nr 6, s. 557–563.
- Jesionek i Soliński 2004 – Jesionek, J. i Soliński I., 2004 – Biomasa – ekologiczne i odnawialne paliwo XXI wieku. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 7, z. 1, s. 39–47.
- Jukić i in. 2017 – Jukić M., Ćurković L., Šabarić J. i Kerolli Mustafa M., 2017 – Fractionation of Heavy Metals in Fly Ash from Wood Biomass Using the BCR Sequential Extraction Procedure. *Bull Environ Contam Toxicol* 99, s. 524–529.

- Kaliszewski 2013 – Kaliszewski A, 2013 – Możliwości i ograniczenia zwiększania lesistości Polski. [W:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Redakcja naukowa P. Gołos i A. Kaliszewki. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 9–20.
- Karcz i in. 2013 – Karcz H. i in. 2013 – Możliwość wykorzystania słomy jako źródła paliwowego w kotłach energetycznych. *Piece Przemysłowe & Kotły* nr 11–12, s. 8–15.
- Kowalkowski i Olejarski 2013 – Kowalkowski A. i Olejarski J., 2013 – Możliwości wykorzystania popiołów z biomasy leśnej jako źródła elementów odżywczych. [W:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Red. naukowa P. Gołos i A. Kaliszewski. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 147–176.
- Kieć i in. 2011 – Kieć J., Łabza T. i Wieczorek D., – Róża wielokwiatowa (*Rosa multiflora*) odmiany Jatar na cele energetyczne. *FRAGMENTA AGRONOMICA* 28(3) 2011, s. 35–41.
- KIOTO... 2002 – Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu. Dz.U. UE L 130 z dnia 15 maja 2002 r., s. 0004–0020.
- Komisja... 2016 – Komisja Europejska – Komunikat prasowy. Czysta energia dla wszystkich Europejczyków, czyli jak wyzwolić potencjał wzrostu Europy. Bruksela, 30 listopada 2016.
- Komunikat... 2015 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Banku Inwestycyjnego. Strategia ramowa na rzecz stabilnej unii energetycznej opartej na przyszłościowej polityce w dziedzinie klimatu. COM(2015) 80 final. Bruksela, 25 lutego 2015.
- Konkluzje... 2014 – Konkluzje Rady Europejskiej w sprawie ram polityki klimatyczno-energetycznej do roku 2030. EUCO 169/14. Bruksela, 24 października 2014.
- Koukouzias i in. 2009 – Koukouzias, N., Wardb, C.R., Papanikolaou, D., Li, Z. i Ketikidis, C., 2009 – Quantitative evaluation of minerals in fly ashes of biomass, coal and biomass-coal mixture derived from circulating fluidised bed combustion technology. *Journal of Hazardous Materials* 169, s. 100–107.
- Kowalczyk-Juško 2009 – Popiół z różnych roślin energetycznych. Wyd. Towarzystwo Chemii i Inżynierii Ekologicznej. *Proceedings of ECOpole* t. 3, nr 1, s. 159–164.
- Kowalczyk-Juško 2012a – Kowalczyk-Juško A., 2012a – Technologie konwersji biomasy na energię użytkową. Seminarium pt.: Popularyzacja prac badawczo-rozwojowych z zakresu odnawialnych źródeł energii. [Online] [www.ozewortal.pl](http://www.ozewortal.pl) [Dostęp 02.12.2015].
- Kowalczyk-Juško 2012b – Kowalczyk-Juško A., 2012b – Agrotechnika, parametry energetyczne i możliwości wykorzystania biomasy wybranych gatunków roślin. Seminarium pt.: Popularyzacja prac badawczo-rozwojowych z zakresu odnawialnych źródeł energii. [Online] [www.ozewortal.pl](http://www.ozewortal.pl) [Dostęp 02.12.2015].
- Kowalik 2003 – Kowalik P., 2003 – Wykorzystanie biomasy jako surowca energetycznego. [W:] *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Red. Ściążko M., Zieliński H. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, Kraków-Zabrze, s. 39–41.
- KPZK... 2012 – Uchwała nr 239 Rady Ministrów z dnia 13 grudnia 2011 r. w sprawie przyjęcia koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2030. Załącznik do uchwały. M. P. 2012, poz. 252. Warszawa, dnia 27 kwietnia 2012 r.
- Kratofil 2015 – Kratofil M., Zarzycki R., Kobyłecki R., Bis Z. – Analiza procesu toryfikacji biomasy. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. *Mechanika* z. 87, nr 2, s. 119–126.
- Kubica 2003 – Kubica K., 2003 – Przemiany energochemiczne węgla i biomasy. [W:] *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Red. Ściążko M., Zieliński H. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, Kraków-Zabrze, s. 145–197.
- Kubica 2007 – Kubica K., 2007 – *Efektywne i przyjazne środowisku źródła ciepła – ograniczenie niskiej emisji*. Katowice, Wydawnictwo Polskiego Klubu Ekologicznego Okręg Górnośląski.
- Kubica i in. 2013 – Kubica K., Kurczabiński L. i Włodarczyk K., 2013 – *Propozycja wymagań jakościowych dla węgla jako paliwa dla sektora komunalno-bytowego*. Polska Izba Ekologii. Katowice.
- Kubica i in. 2016 – Kubica K., Kubica R., Bogacz W. i Stec M., 2016 – *Czyste paliwo w moim domu z paliw stałych*. Poradnik. Ministerstwo Środowiska. Warszawa.
- Lanzerstorfer 2015 – Lanzerstorfer Ch., 2015 – Chemical composition and physical properties of filter fly ashes from eight grate-fired biomass combustion plants. *Journal of Environmental Sciences* 30, s. 191–197.

- Lanzerstorfer 2017a – Lanzerstorfer Ch., 2017a – Chemical composition and properties of ashes from combustion plants using *Miscanthus* as fuel. *Journal of Environmental Sciences* 54, s. 178–183.
- Lanzerstorfer 2017b – Lanzerstorfer Ch., 2017b – Grate-Fired Biomass Combustion Plants Using Forest Residues as Fuel: Enrichment Factors for Components in the Fly Ash. *Waste Biomass Valor* 8, s. 235–240.
- Lessard i in. 2017 – Lessard J.-M., Omran A., Tagnit-Hamou A. i Gagne R., 2017 – Feasibility of using biomass fly and bottom ashes in dry-cast concrete production. *Construction and Building Materials* 132, s. 565–577.
- Lewandowski i in. 2010 – Lewandowski W.M., Ryms M. i Meler P., 2010 – Termiczno-chemiczna piroliza do biopaliw ciekłych i gazowych, jako metoda podnoszenia sprawności konwersji energii biomasy. *Nafta – Gaz* nr 8, s. 675–680.
- Lewandowski 2012 – Lewandowski, M.W. 2012 – *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*. Warszawa. WNT.
- Li i in. 2012 – Li L., Yu Ch., Bai J., Wang Q. i Luo Z., 2012 – Heavy metal characterization of circulating fluidized bed derived biomass ash. *Journal of Hazardous Materials* 233–234, s. 41–47.
- Łukaszek i in. 2011 – Łukaszek O., Łukaszek W. i Bartkiewicz K., 2011 – Polska technologia produkcji energii elektrycznej – aspekty ekonomiczne, techniczne i surowcowe. *Czysta Energia* nr 7–8, s. 40–42.
- Maeda i in. 2017 – Maeda N., Katakura T., Fukasawa T., Huang A.N., Kawano T. i Fukui K., 2017 – Morphology of woody biomass combustion ash and enrichment of potassium components by particle size classification. *Fuel Processing Technology* 156, s. 1–8.
- Maresca i in. 2017 – Maresca A., Hyks J. i Astrup T.F. – Recirculation of biomass ashes onto forest soils: ash composition, mineralogy and leaching properties. *Waste Management* 70, s. 127–138.
- Martyniak i Martyniak 2011 – Martyniak D. i Martyniak J., 2011 – Perz wydłużony kępowy źródłem taniej bioenergii (fitoenergii). *Czysta Energia* z. 7–8, s. 20–21.
- Maschio i in. 2011 – Maschio S., Tonello G., Piani L. i Furlani E., 2011 – Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere* 85, s. 666–671.
- Matyjewski i Mos 2012 – Matyjewski A. i Mos M., 2012 – Miskant olbrzymi – roślina z wielkim potencjałem. Cz. I. *Czysta Energia* z. 7–8, s. 27–29.
- McKendry P., 2002 – Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* No. 83, pp. 37–46.
- Meller i Bilenda 2013 – Meller E. i Bilenda E., 2013 – Wpływ nawożenia popiołami z biomasy na plon i obranie składników przez kukurydzę zwyczajną. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 339–345.
- MDA... 2017 – Restricted Noxious Weed. Multiflora Rose – *Rosa multiflora* Thunb. Minnesota Department of Agriculture. [Online] [www.mda.state.mn.us/plants/pestmanagement/weedcontrol/noxiouslist/multiflorarose.aspx](http://www.mda.state.mn.us/plants/pestmanagement/weedcontrol/noxiouslist/multiflorarose.aspx) [Dostęp 08.11.2017].
- Mirowski i in. 2005 – Mirowski T., Mokrzycki E. (red.), Olkusiński T., Skoczek A. i Szurlej A., 2005 – *Podstawy gospodarki surowcami energetycznymi*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Morawiecka 2017 – Morawiecka M., 2017 – Pakiet zimowy – czysta energia dla wszystkich Europejczyków czy raczej koniec krajowych polityk energetycznych? *Materiały XXIII Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej REE 2017 – Zmiany w energetyce i wokół niej*. Politechnika Lubelska, Oddział Lubelski Stowarzyszenia Elektryków Polskich. Kazimierz Dolny, 25–27 kwietnia 2017 r., s. 23–33.
- Ney 2004 – Ney R., 2004 – Uwarunkowania wykorzystania energii odnawialnej jako czynnika zrównoważonego rozwoju. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 7, z. 1, s. 25–27.
- Norma... 2012 – Normy PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW. Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie. [Online] [www.kostrzewa.pl](http://www.kostrzewa.pl) [Dostęp 04.03.2017].
- Nunes i in. 2016 – Nunes L., Matias J. i Catalão J., 2016 – Biomass combustion systems: a review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 53, s. 235–242.
- Paska i in. 2010 – Paska J., Klos M., Michalski Ł. i Molik Ł., 2010 – Układy hybrydowe – integracja różnych technologii wytwarzania energii. *Elektroenergetyka* nr 4(6), s. 46–57.



- Pasyniuk 2004 – Pasyniuk P., 2004 – Brykiety czy pelety – próba porównania. *Czysta Energia* nr 4, s. 16-17.
- Pels i Sarabèr 2011 – Pels J. i Sarabèr A., 2011 – Utilization of Biomass Ashes. [In:] Grammelis P. (red.) *Solid Biofuels for Energy. Green Energy and Technology*. Springer, London.
- PEP...2015 – Projekt polityki energetycznej Polski do 2050 roku. Ministerstwo Gospodarki, wersja 0.6. Warszawa, sierpień 2015.
- Piskier 2004 – Piskier T., 2004 – Topinambur – alternatywne źródło energii. *Czysta Energia* nr 12, s. 12.
- Piskier 2006 – Piskier T., 2006 – Topinambur – wszechstronna roślina. *Czysta Energia* nr 7–8, s. 15.
- Polska 2025 ... 2000 – Polska 2025: długookresowa strategia trwałego i zrównoważonego rozwoju: bilans otwarcia. Ministerstwo Środowiska. Wyd. Narodowa Fundacja Ochrony Środowiska: Centrum Informacji o Środowisku UNEP/GRID.
- Poluszyńska 2013 – Poluszyńska J., 2013 – Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 13, s. 49–59.
- Projekt 2016 – Projekt zmiany rozporządzenia w sprawie wewnętrznego rynku energii elektrycznej (COM(2016)861 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt nowelizacji 2018 – Rządowy projekt ustawy o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw. Druk numer 2412. wersja elektroniczna [Online] <http://www.sejm.gov.pl/sejm8.nsf/PrzebiegProc.xsp?nr=2412> [Dostęp 28.05.2018].
- Projekt Dyrektywy... 2016 – Projekt zmiany Dyrektywy w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej (COM(2016)864 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt rewizji 2016a – Projekt rewizji Dyrektywy o efektywności energetycznej (COM(2016)761 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt rewizji... 2016b – Projekt rewizji Dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej budynków (COM(2016)759 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt rozporządzenia... 2016a – Projekt rozporządzenia w sprawie gotowości na wypadek zagrożeń w sektorze energii elektrycznej i uchylającego Dyrektywę 2005/89/WE (COM(2016)862 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt rozporządzenia... 2016b – Projekt rozporządzenia w sprawie zarządzania unią energetyczną (COM(2016)759 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt zmiany... 2016a – Projekt zmiany rozporządzenia ustanawiającego Agencję Unii Europejskiej ds. Współpracy Organów Regulacji Energetyki (COM(2016)863 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Projekt zmiany... 2016b – Projekt zmiany Dyrektywy w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (COM(2016)767 final). Bruksela, 30 listopada 2016.
- Rajamma i in. 2009 – Rajamma R., Ball R., Tarelho L., Allen G., Labrincha J. i Ferreira V., 2009 – Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials* 172, s. 1049–1060.
- Rajamma i in. 2015 – Rajamma R., Senff L., Ribeiro M.J., Labrincha J.A., Ball R.J., Allen G.C. i Ferreira V.M., 2015 – Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials. *Composites Part B: Engineering* 77, s. 1–9.
- Ratajczak i Bidzińska 2013 – Ratajczak E. i Bidzińska G., 2013 – Rynek biomasy drzewnej na cele energetyczne – aspekty ekonomiczne i społeczne. [W:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Redakcja naukowa P. Gołos i A. Kaliszewki. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 59–76.
- Rezolucja... 1999 – Rezolucja Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 8 lipca 1997 roku w sprawie wzrostu wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych. *Monitor Polski* nr 25, poz. 365 z dnia 19 lipca 1999 roku.
- Romero i in. 2017 – Romero E., Quirantes M. i Nogales R., 2017 – Characterization of biomass ashes produced at different temperatures from olive-oil-industry and greenhouse vegetable wastes. *Fuel* 208, s. 1–9.
- Roszkowski 2013 – Roszkowski A., 2013 – Energia z biomasy – efektywność, sprawność i przydatność energetyczna. Cz. 1. *Problemy Inżynierii Rolniczej* nr 79, z. 1, s. 97–124.
- Rozporządzenie... 2003 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 maja 2003 roku w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odna-

- wialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła. Dz.U. 2003, nr 104, poz. 971.
- Rozporządzenie... 2007 – Rozporządzenie Rady (WE) nr 1234/2007 z dnia 22 października 2007 r. ustanawiające wspólną organizację rynków rolnych oraz przepisy szczegółowe dotyczące niektórych produktów rolnych (rozporządzenie o jednolitej wspólnej organizacji rynku). [Online] <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/1234/oj> [Dostęp 09.11.2017].
- Rozporządzenie... 2009 – Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1272/2009 z dnia 11 grudnia 2009 r. ustanawiające wspólne szczegółowe zasady wykonania rozporządzenia Rady (WE) nr 1234/2007 w odniesieniu do zakupu i sprzedaży produktów rolnych w ramach interwencji publicznej. Dz.U. UE L 349 z dnia 29 grudnia 2009 r.
- Rozporządzenie.... 2014 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2014, poz. 1923).
- Rozporządzenie... 2017 – Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 18 maja 2017 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku i warunków technicznych zakupu ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz warunków przyłączania instalacji do sieci. Dz.U. 2017, poz. 1084.
- Rozprawa... 2007. Efekty ekonomiczne i ekologiczne współspalania biomasy z węglem w kotłach pyłowych. Rozprawa doktorska Tomasza Mirowskiego. Wydział Paliw i Energii AGH, Kraków.
- Rybak 2006 – Rybak W., 2006 – *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych*. Wyd. Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 411 s.
- Sano i in. 2013 – Sano T., Miura S., Furusawa H., Kaneko S., Yoshida T., Nomura T. i Ohara S., 2013 – Composition of inorganic elements and the leaching behavior of biomass combustion ashes discharged from wood pellet boilers in Japan. *Journal of Wood Science* 59, s. 307–320.
- Shi i in. 2017 – Shi R., Li J., Jianh J., Mehmood K., Liu Y., Xu R. i Qian W., 2017 – Characteristics of biomass ashes from different materials and their ameliorative effects on acid soils. *Journal of Environmental Sciences* 55, s. 294–302.
- Soliński 2001 – Soliński I., 2001 – *Biomasa. Energia odnawialna*. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Srivastava i in. 2006 – Srivastava V.C., Mall I.D. i Mishra I.M., 2006 – Equilibrium modelling of single and binary adsorption of cadmium and nickel onto bagasse fly ash. *Chemical Engineering Journal* s. 117, s. 79–91.
- Srivastava i in. 2008 – Srivastava V.C., Mall I.D. i Mishra I.M., 2008 – Removal of cadmium(II) and zinc(II) metal ions from binary aqueous solution by rice husk ash. *Colloids and Surfaces A* 312, s. 172–184.
- Stelmach i in. 2008 – Stelmach S., Wasilewski R. i Figa J., 2008 – Zgazowanie biomasy – przykłady nowych technologii. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 7, s. 9–20.
- Stolarski 2004 – Stolarski M., 2004 – Ekonomiczne aspekty produkcji pelet z surowców roślinnych. *Czysta Energia* nr 6, s. 32–33.
- Stolarski 2005 – Stolarski M., 2005 – Pelety z biomasy wierzby i słazowca. *Czysta Energia* nr 6, s. 36.
- Stolarski i in. 2007 – Stolarski M., Szczukowski S. i Tworowski J., 2007 – Charakterystyka wybranych biopaliw z biomasy stałej. *Problemy Inżynierii Rolniczej* nr 4, s. 21–26.
- Stolarski 2008 – Stolarski M., 2008 – Stan plantacji roślin energetycznych. *Czysta Energia* nr 6, s. 41.
- Stolarski i Szczukowski 2007 – Stolarski M. i Szczukowski S., 2007 – Różnorodność surowców do produkcji pelet. *Czysta Energia* nr 6, s. 42–43.
- Strategia... 2014 – Uchwała nr 58 Rady Ministrów z dnia 15 kwietnia 2014 r. w sprawie przyjęcia Strategii Bezpieczeństwo Energetyczne i Środowisko – perspektywa do 2020 r. Załącznik do uchwały. M.P. 2014, poz. 469 z dnia 16 czerwca 2014 r. Warszawa.
- Suski 2008 – Suski S., 2008 – Właściwości drewna w hałdzie paliwa znajdującej się na wolnym powietrzu. *Energetyka i Ekologia* nr 7, s. 536–539.
- Supancic i in. 2014 – Supancic K., Obernberger I., Kienzl N. i Arich A., 2014 – Conversion and leaching characteristics of biomass ashes during outdoor storage – Results of laboratory tests. *Biomass and Bioenergy* 61, s. 211–226.

- Szczukowski i Stolarski 2013 – Szczukowski S. i Stolarski M., 2013 – Plantacje drzew i krzewów szybko rosnących jako alternatywa biomasy z lasu – stan obecny, szanse i zagrożenia rozwoju. [W:] *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Redakcja naukowa P. Gołos i A. Kaliszewki. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 22–46.
- Szczukowski i in. 2012 – *Wieloletnie rośliny energetyczne*. Monografia. Wydawnictwo MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa.
- Ściążko i Zieliński 2003 – Ściążko M. i Zieliński H. (red.), 2003 – *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla, Kraków-Zabrze.
- Ściążko i in. 2007 – Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. i Winnicka G., 2007 – Problemy związane ze współspalaniem biomasy w kotłach energetycznych. [W:] *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce*. Red. M. Ściążko, J. Zuwała i M. Pronobis. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze-Gliwice, s. 17–41.
- ŚSRK... 2012 – Uchwała nr 157 Rady Ministrów z dnia 25 września 2012 r. w sprawie przyjęcia Strategii Rozwoju Kraju 2020. Załącznik do uchwały – Strategia Rozwoju Kraju 2020. Aktywne społeczeństwo, konkurencyjna gospodarka, sprawne państwo. M. P. 2012, poz. 882. Warszawa, dnia 22 listopada 2012.
- TIMEX... 2016. Materiały źródłowe firmy Timex.
- Uliasz-Bocheńczyk i in. 2015 – Uliasz-Bocheńczyk A., Pawluk A. i Sierka J., 2015 – Wymywalność zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 31, z. 3, s. 145–156.
- Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016a – Uliasz-Bocheńczyk A., Pawluk A. i Pyzalski M., 2016a – Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy w kotłach fluidalnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 32, z. 3, s. 149–162.
- Uliasz-Bocheńczyk i in. 2016b – Uliasz-Bocheńczyk A., Śliwka M. i Pawul M., 2016b – Ocena właściwości odpadów dennych ze spalania biomasy w celu określenia kierunków ich przyrodniczego wykorzystania. [W:] *Technologie bezodpadowe i zagospodarowanie odpadów w przemyśle i rolnictwie*. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Szczecin: volumina.pl, s. 125–128.
- Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki 2015 – Uliasz-Bocheńczyk A. i Mokrzycki E., 2015 – Biomasa jako paliwo w energetyce. *Rocznik Ochrony Środowiska – Annual Set the Environment Protection* t. 17, s. 900–913.
- Uliasz-Bocheńczyk i Mokrzycki 2018 – Uliasz-Bocheńczyk A. i Mokrzycki E., 2018 – The elemental composition of biomass ashes a preliminary assessment of the recovery potential. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 34, z. 4, s. 115–132.
- Umamaheswaran i Batra 2008 – Umamaheswaran K. i Batra V.S., 2008 – Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes. *Fuel* 87, s. 628–38.
- Ustawa... 2012 – Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2013, poz. 21).
- Ustawa... 2015 – Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015, poz. 478)
- Ustawa... 2018 – Nowelizacja ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2018, poz. 1276).
- Vamvuka i Kakaras 2011 – Vamvuka D. i Kakaras E., 2011 – Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. *Fuel Processing Technology* 92, s. 570–581.
- Van Loo i Koppejan 2008 – Van Loo S. i Koppejan J., 2008 – *Biomass Combustion & Co-firing*. Earthscan, London.
- Vassilev i in. 2010 – Vassilev S., Baxter D., Andersen L. i Vassileva C. G., 2010 – An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* No. 89, s. 913–933.
- Vassilev i in. 2012 – Vassilev S., Baxter D., Andersen L., Vassileva C. i Morgan T., 2012 – An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel* No. 94, s. 1–33.
- Vassilev i in. 2013a – Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K. i Vassileva C.G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel* 105, s. 40–76.

- Vassilev i in. 2013b – Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L. i Vassileva C. G., 2013b – An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, s. 19–39.
- Vassilev i in. 2014 – Vassilev S.V., Vassileva C.G. i Baxter D., 2014 – Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. *Fuel* No. 129, s. 292–313.
- Velay-Lizancos i in. 2017 – Velay-Lizancos M., Azenha M., Martínez-Lage I. i Vázquez-Burgo P., 2017 – Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation. *Construction and Building Materials* 157, s. 1126–113.
- Wach 2005 – Wach E., 2005 – Właściwości granulatu drzewnego. *Czysta energia* nr 6, s. 35.
- Wandrasz i Wandrasz 2006 – Wandrasz, J. i Wandrasz A., 2006 – *Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*. Wyd. Seidel – Przywecki, Warszawa.
- Wang i in. 2008 – Wang S., Miller A., Llamazos E., Fonseca F. i Baxter L., 2008 – Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel* 87, s. 365–371.
- White Paper... 1997 – White paper a community strategy and action plan. Energy for the future: Renewable sources of energy (COM(97)599 z dnia 26 listopada 1997).
- Yeboah i in. 2014 – Yeboah N. N. N., Shearer Ch. R., Burns S. E. i Kurtis K. E., 2014 – Characterization of biomass and high carbon content coal ash for productive reuse applications. *Fuel* No. 116, s. 438–447.
- Xing i in. 2016 – Xing, P., Mason P.E., Chilton, S., Lloyd, S., Jones, J.M., Williams A., Nimmo W. i Pourkashanian M., 2016 – A comparative assessment of biomass ash preparation methods using X-ray fluorescence and wet chemical analysis. *Fuel* No. 182, s. 161–165.
- Xue i in. 2014 – Xue Y., Wu S., Cai J., Zhou M. i Zha J., 2014 – Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. *Construction and Building Materials* 56, s. 7–15.
- Zajączkowski 2013 – Zajączkowski S., 2013 – Prognozy pozyskania drewna w Polsce w perspektywie 20 lat oraz możliwości ich wykorzystania do szacowania zasobów drewna na cele energetyczne. [W:] *Biomasza leśna na cele energetyczne*. Redakcja naukowa P. Gołos i A. Kaliszewki. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary, s. 21–31.
- Zawistowski 2016 – Zawistowski J., 2016 – Poradnik dla użytkowników kotłowni. [Online] [www https://zawijan.wordpress.com/poradnik-uzytownika/kotly-zasypowe/](https://zawijan.wordpress.com/poradnik-uzytownika/kotly-zasypowe/) [Dostęp 07.12.2016].
- Zuwała i Ściążko 2007 – Zuwała J. i Ściążko M., 2007 – Wytwarzanie energii odnawialnej w obiektach energetycznych o złożonych strukturach technologicznych. [W:] *Współspalanie biomasy i paliw alternatywnych w energetyce*. Red. M. Ściążko, J. Zuwała i M. Pronobis. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze-Gliwice, s. 67–131.

Źródła internetowe (cytowane w tekście jako cyfry w nawiasach):

- [1] [Online] <http://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/inne-uprawy/slawowiec-pensylwanski-na-biogaz,54779.html> [Dostęp 9.08.2018].
- [2] [Online] <http://biomax.com.pl/galeria-slawowiec-pensylwanski> [Dostęp 9.08.2018].
- [3] [Online] <https://www.prairiemoon.com/spartina-pectinata-cord-grass-prairie-moon-nursery.html> [Dostęp 28.05.2018].
- [4] [Online] <http://www.dorangroup.pl/oferta/rosliny-energetyczne/?lang=pl> [Dostęp 12.02.2018].
- [5] [Online] <http://www.bylinyolsztyn.pl/rosliny/643/miscanthus-sacchariflorus-miskant-cukrowy> [Dostęp 21.09.2018].
- [6] [Online] <http://www.wodr.poznan.pl/baza-informacyjna/technologie/produkcja-roslinna/rosliny-energetyczne/miskantus-olbrzymi/item/146-miskant-olbrzymi> [Dostęp 29.05.2018].
- [7] [Online] [http://www.wiu.ur.krakow.pl/zasoby/68/WZDOBiB\\_03\\_os.pdf](http://www.wiu.ur.krakow.pl/zasoby/68/WZDOBiB_03_os.pdf) [Dostęp 28.05.2018].
- [8] Centrum Doradztwa Rolniczego. Uprawa roślin energetycznych. [Online] [http://www.cdr.gov.pl/pol/projekty/AZE/uprawa\\_roslin\\_energ.pdf](http://www.cdr.gov.pl/pol/projekty/AZE/uprawa_roslin_energ.pdf) [Dostęp 28.05.2018].
- [9] Zdjęcia z bazy 123.rf.com (licencja IGSMiE PAN nr aehwcr0000029760).
- [10] Podlaski Ogród Ziołowy. Ogród botaniczny. [Online] [http://ogrod-koryciny.ziolowyzakatek.pl/?page\\_id=2225](http://ogrod-koryciny.ziolowyzakatek.pl/?page_id=2225) [Dostęp 08.11.2017].

- [11] Materiały firmy Klimosz: [Online] <https://www.klimosz.pl/oferta> [Dostęp 06.02.2017].
- [12] Materiały firmy Witkowski: [Online] <http://www.kotly-witkowski.pl/palniki> [Dostęp 29.05.2018].
- [13] Materiały firmy Hamech: [Online] <http://www.old.hamech.pl/ruszt-ruchomy,art,2.html> [Dostęp 07.02.2016].

## SPIS TABEL

Tabela 4.1. Teoretyczna baza drewna na cele energetyczne w Lasach Państwowych oraz w lasach prywatnych [mln m <sup>3</sup> ] .....	27
Tabela 4.2. Zawartość wilgoci całkowitej i gęstość nasypowa odpadów drzewnych .....	30
Tabela 4.3. Analiza elementarna słomy wybranych zbóż (w stanie suchym) .....	32
Tabela 4.4. Skład chemiczny (uśredniony w skali kraju) słomy wybranych roślin .....	33
Tabela 4.5. Wartość opałowa słomy szarej i żółtej [MJ/kg] oraz zawartość wilgoci [%] słomy żółtej .....	34
Tabela 4.6. Wilgotność oraz plony świeżej i suchej masy róży wielokwiatowej .....	37
Tabela 4.7. Parametry fizyko-chemiczne róży wielokwiatowej .....	38
Tabela 4.8. Gatunki wierzb nadające się na cele energetyczne .....	46
Tabela 4.9. Ilość biomasy pozyskanej rocznie w systemie Eko-Salix z pięcioletnich pędów .....	46
Tabela 5.1. Analiza techniczna i elementarna biomasy .....	52
Tabela 5.2. Zawartość składników w biomacie z uwzględnieniem grup i podgrup .....	52
Tabela 5.3. Skład fazowy biomasy .....	54
Tabela 5.4. Podstawowe parametry charakteryzujące przydatność paliwa do celów energetycznych .....	55
Tabela 5.5. Właściwości wybranych rodzajów biomasy .....	55
Tabela 5.6. Jakość biomasy pozyskanej z pięcioletnich pędów wierzby <i>Salix viminalis</i> .....	57
Tabela 5.7. Jakość biomasy topoli pozyskiwanej w trzyletniej rotacji .....	57
Tabela 5.8. Średnia zawartość wybranych pierwiastków w badanych częściach drzew [% s.m.] .....	58
Tabela 5.9. Temperatury mięknięcia, topnienia i płynięcia substancji palnych [°C] .....	62
Tabela 5.10. Gęstość biomasy i paliw kopalnych [kg/m <sup>3</sup> suchej masy] .....	63
Tabela 5.11. Gęstość drewna [kg/m <sup>3</sup> ] .....	64
Tabela 5.12. Wady i zalety granulatów z biomasy drzewnej .....	67
Tabela 6.1(1). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	77
Tabela 6.1(2). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	78
Tabela 6.1(3). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	79
Tabela 6.1(4). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	80
Tabela 6.1(5). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	81

Tabela 6.1(6). Skład chemiczny popiołów ze spalania biomasy [%] .....	82
Tabela 6.2. Maksymalne, minimalne i średnie zawartości podstawowych tlenków w popiołach ze spalania biomasy [%] .....	83
Tabela 6.3(1). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [%] .....	85
Tabela 6.3(2). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy .....	86
Tabela 6.3(3). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [ppm] .....	87
Tabela 6.3(4). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [ppm] .....	88
Tabela 6.3(5). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [mg/kg] .....	89
Tabela 6.3(6). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [mg/kg] .....	90
Tabela 6.3(7). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [mg/kg] .....	91
Tabela 6.3(8). Przykłady składów pierwiastkowych popiołów ze spalania biomasy [mg/kg] .....	92
Tabela 6.4. Zawartość pierwiastków w popiele biomasy różnych gatunków drzew [mg/kg] .....	93
Tabela 6.5. Skład chemiczny popiołów dennych ze spalania biomasy .....	94
Tabela 6.6. Pierwiastkowy skład chemiczny popiołów dennych [mg/kg] .....	95
Tabela 6.7. Pochodzenie faz w popiołach ze spalania biomasy .....	97
Tabela 6.8. Składy fazowe popiołów ze spalania biomasy .....	98
Tabela 6.9(1). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy .....	100
Tabela 6.9(2). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy .....	102
Tabela 6.9(3). Przykładowe składy fazowe popiołów lotnych ze spalania biomasy .....	104
Tabela 6.10. Przykładowe składy fazowe popiołów dennych ze spalania biomasy .....	106
Tabela 6.11. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów lotnych ze spalania biomasy .....	108
Tabela 6.12. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów ze spalania kory i drewna [mg/kg] .....	110
Tabela 6.13. Przykłady wyników badań wymywalności zanieczyszczeń z popiołów dennych ze spalania biomasy .....	111
Tabela 6.14. Charakterystyka uziarnienia przykładowych popiołów ze spalania biomasy .....	114
Tabela 6.15. Gęstości popiołów ze spalania biomasy .....	116
Tabela 7.1. Rodzaje urządzeń grzewczych na biomasę oraz zakres ich mocy .....	122
Tabela 7.2. Parametry jakościowe węgla dla kotłów z automatycznym załadunkiem .....	146
Tabela 7.3. Parametry jakościowe węgla dla kotłów z ręcznym załadunkiem .....	147
Tabela 7.4. Wymagania energetyczno-emisyjne w odniesieniu do kotłów o mocy $\leq 500$ kW na paliwa stałe, według Rozporządzenia Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. ....	149

## SPIS RYSUNKÓW

Rys. 3.1. Klasyfikacja biomasy pod względem perspektyw jej przetwarzania na cele energetyczne ...	23
Rys. 4.1. Miejsca powstawania biomasy drzewnej na cele energetyczne i jej rodzaje .....	26
Rys. 4.2. Przewidywany potencjał techniczny, ekonomiczny i rynkowy słomy do energetycznego wykorzystania [mln ton] .....	31
Rys. 4.3. Słonecznik bulwiasty topinambur ( <i>Helianthus tuberosus</i> L.) .....	36
Rys. 4.4. Róża wielokwiatowa ( <i>Rosa multiflora</i> ): a) kwiaty, b) pojedynczy krzew .....	38
Rys. 4.5. Miskant olbrzymi ( <i>Miscanthus sinensis gigantea</i> ) .....	40
Rys. 4.6. Miskant cukrowy ( <i>Miscanthus sacchariflorus</i> ) .....	41
Rys. 4.7. Spartina preriowa ( <i>Spartina pectinata</i> ) .....	42
Rys. 4.8. Ślaziovec pensylwański ( <i>Sida hermaphrodita</i> ) .....	43
Rys. 4.9. Rdest sachaliński ( <i>Fallopia sachalinensis</i> ) .....	44
Rys. 4.10. Wierzba wiciowa ( <i>Salix viminalis</i> ) .....	47
Rys. 5.1. Struktura składu chemicznego i biochemicznego biomasy .....	51
Rys. 5.2. Porównanie średniego składu różnych rodzajów biomasy i węgla .....	53
Rys. 5.3. Porównanie średniego składu w zakresie: zawartości popiołu, części lotnych i węgla związanego, różnych rodzajów biomasy i węgla .....	53
Rys. 5.4. Zależność wartości opałowej drewna od zawartości wilgoci całkowitej .....	59
Rys. 5.5. Zależność wartości opałowej od wilgotności dla słomy żytniej i jęczmiennej .....	60
Rys. 5.6. Proces wytwarzania granulatów z biomasy .....	66
Rys. 5.7. Wpływ różnych procesów uzyskiwania i przygotowania biopaliw na ich jakość .....	68
Rys. 5.8. Schemat usypanego składowiska zrębków drewnianych .....	71
Rys. 6.1. Chemiczny podział popiołów z biomasy z podziałem na cztery typy: S, C, K i CK .....	93
Rys. 6.2. Skład granulometryczny badanych popiołów .....	115
Rys. 7.1. Produkcja energii z surowców biomasowych .....	121
Rys. 7.2. Technika dolnego spalania – spalanie przeciwprądowe w całej objętości oraz spalanie w części złoża .....	123
Rys. 7.3. Przykład kotła z dolnego spalania w całej objętości złoża oraz w części złoża w prądzie krzyżowym .....	124



---

Rys. 7.4. Technika górnego spalania w części złoża – spalanie współprądowe .....	125
Rys. 7.5. Przykład kotła górnego spalania .....	125
Rys. 7.6. Budowa palnika retortowego .....	127
Rys. 7.7. Przykład palnika szufladowego .....	128
Rys. 7.8. Przykład palnika (rys. po lewej) i kotła z palnikiem wrzutowym (rys. po prawej) .....	129
Rys. 7.9. Budowa palnika rynnowego .....	129
Rys. 7.10. Schemat kotła zgazowującego drewno kawałkowe .....	131
Rys. 7.11. Ruszt posuwisto-schodkowy .....	132
Rys. 7.12. Kocioł z rusztem posuwisto-schodkowym .....	132
Rys. 7.13. Fragment kotła z rusztem wibracyjnym chłodzonym wodą .....	133
Rys. 7.14. Klasyfikacja różnych systemów rusztowych .....	134
Rys. 7.15. Schemat kotła o dużej mocy .....	135
Rys. 7.16. Kocioł rusztowy z instalacją oczyszczania spalin .....	136
Rys. 7.17. Rozwiązania technologiczne współspalania węgla i biomasy .....	137
Rys. 7.18. Schemat procesu dwustopniowego zgazowania .....	140
Rys. 7.19. Gazyfikator EKOD-1 współpracujący z kotłem wodnym .....	141
Rys. 7.20. Zgazowarka pirolityczna EKOD firmy Zamer .....	141
Rys. 7.21. Zgazowarka pirolityczna typ EKOD-2 firmy Zamer .....	142
Rys. 7.22. Uproszczony schemat produkcji paliw ciekłych z biomasy – technologia ENERKEM .....	143
Rys. 7.23. Przykładowy bilans energetyczny instalacji uwęglania biomasy TIMEX dla 1 Mg substratu o wartości opałowej 13 GJ/Mg .....	145