

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

**Zagęszczalność i kompaktowalność biomasy  
lignocelulozowej**

Lignocellulosic Biomass Compressibility and Compactibility

**Marek Wróbel**

Kraków 2019

**Patronat naukowy:** Komitet Inżynierii Rolniczej

**Komitet honorowy**

Prof. dr hab. Janusz Haman – czł. rzecz. PAN

Prof. dr hab. Rudolf Michałek – czł. rzecz. PAN

**Rada Naukowa Wydawnictwa**

Prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)

Prof. Andrew Berger (USA)

Prof. Stefan Cenkowski (Kanada)

Prof. Dariusz Dziki (Polska)

Prof. Girma Gebresenbet (Szwecja)

Prof. Van der Goot, Atze Jan (Holandia)

Prof. Dorota Haman (USA)

Prof. Jayson K. Harper (USA)

Doc Ing. Zuzana Hlaváčová, CSc. (Słowacja)

Prof. Ryszard Hołownicki (Polska)

Dr ing. Bruno Huyghebaert (Belgia)

Prof. Leon Kukielka (Polska)

Prof. Marek Opielak (Polska)

Prof. Jacek Przybył (Polska)

Prof. Michele Rinaldi (Włochy)

Prof. Spiro E Stefanou (USA)

Dr Bernardo Strasbourg (Brazylia)

Prof. Bulgakov Wlodymyr (Ukraina)

**Komitet Redakcyjny**

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – redaktor naczelny

Dr hab. inż. Sławomir Kocira, prof. UP – sekretarz

Prof. dr hab. Pavol Findura

Prof. dr hab. Leon Kukielka

**Wydawca:**

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

**Recenzenci:**

Prof. dr hab. inż. Leszek Romański – UP Wrocław

Dr hab. inż. Paweł Tylek – UR Kraków

ISBN 978-83-64377-35-8

**Druk i oprawa:**

NOVA SANDEC

ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz

tel. +48 (18) 547 45 45

e-mail: [biuro@novasandec.pl](mailto:biuro@novasandec.pl); <http://www.novasandec.pl>

Ark. wyd. 11,75 ; ark. druk. 10,5

Nakład: 100 egz.

## Spis treści:

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH DEFINICJI I OZNACZEŃ .....                              | 5   |
| 1. WSTĘP .....                                                             | 8   |
| 2. PRZEGLĄD LITERATURY .....                                               | 10  |
| 2.1. Biomasa jako surowiec energetyczny .....                              | 10  |
| 2.2. Budowa i skład biomasy roślinnej .....                                | 11  |
| 2.3. Lignina a proces zagęszczania .....                                   | 19  |
| 2.4. Klasyfikacja biomasy .....                                            | 23  |
| 2.5. Paliwa kompaktowane .....                                             | 25  |
| 2.6. Parametry jakościowe paliw kompaktowanych .....                       | 27  |
| 2.7. Zagęszczanie materiałów .....                                         | 33  |
| 2.8. Proces ciśnieniowej aglomeracji .....                                 | 44  |
| 2.9. Struktura rozdrobnionego materiału biomasowego .....                  | 46  |
| 2.10. Czynniki aktywujące i wzmacniające mechanizmy tworzenia wiązań ..... | 49  |
| 3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO I CEL PRACY .....                     | 68  |
| 4. METODYKA .....                                                          | 70  |
| 4.1. Materiał badawczy .....                                               | 70  |
| 4.1.1. Dobór materiału do badań .....                                      | 70  |
| 4.1.2. Charakterystyka gatunków wybranych do badań .....                   | 71  |
| 4.2. Przebieg badań .....                                                  | 74  |
| 4.2.1. Przygotowanie materiału .....                                       | 75  |
| 4.2.2. Charakterystyka rozdrobnionego surowca .....                        | 78  |
| 4.2.3. Zagęszczanie ciśnieniowe – etap I .....                             | 83  |
| 4.2.4. Zagęszczanie ciśnieniowe – etap II .....                            | 96  |
| 4.2.5. Badania weryfikacyjne .....                                         | 106 |
| 5. WYNIKI BADAŃ .....                                                      | 107 |
| 5.1. Parametry rozdrobnionego surowca .....                                | 107 |
| 5.2. Zagęszczanie mieszanek bazowych .....                                 | 116 |
| 5.3. Parametry jakościowe uzyskanych granul .....                          | 121 |
| 5.4. Zagęszczalność i kompaktowalność .....                                | 123 |
| 5.5. Nomogram zagęszczalności i kompaktowalności .....                     | 125 |
| 5.6. Zagęszczanie mieszanek komponowanych .....                            | 127 |
| 5.7. Zagęszczalność i kompaktowalność mieszanek komponowanych .....        | 136 |
| 5.8. Badania weryfikacyjne .....                                           | 141 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 6. DYSKUSJA.....     | 147 |
| 7. WNIOSKI.....      | 153 |
| 8. BIBLIOGRAFIA..... | 155 |
| STRESZCZENIE .....   | 167 |
| SUMMARY .....        | 168 |



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH DEFINICJI I OZNACZEŃ

### DEFINICJE

- Biomasa** – materiał pochodzenia biologicznego (roślinny i zwierzęcy) z wyłączeniem materiałów zawartych w formacjach geologicznych i/lub skamieniałościach (za PN-EN ISO 16559).
- Biomasa lignocelulozowa** – biomasa roślinna której główne składniki strukturalne to celuloza, hemiceluloza i lignina.
- Brykiet drzewny** – zagęszczone biopaliwo wytworzone z/lub bez dodatków, występujące w formie prostopadłościanu, graniastosłupa lub walca o średnicy powyżej 25 mm, otrzymywane w wyniku ciśnieniowego zagęszczania mielonej biomasy (za PN-EN ISO 16559).
- Pelet drzewny** – zagęszczone biopaliwo wytworzone z biomasy drzewnej z/lub bez dodatków, zazwyczaj występujące w formie cylindrycznej, o długości z zakresu 5-40 mm i maksymalnej średnicy wynoszącej 25 mm, z końcami w postaci przełomów (za PN-EN ISO 16559).
- Granula** – tu synonim zagęszczonej i scalonej w wyniku działania ciśnienia, porcji rozdrobnionej biomasy – ogólne określenie peletu, brykietu, kompaktu lub aglomeratu.
- Zagęszczalność** (ang. Compressibility) materiału ziarnistego – to jego zdolność do zmniejszenia objętości, a co za tym idzie zwiększania gęstości, w wyniku działania ciśnienia wywieranego na ten materiał.
- Kompaktowalność** (ang. Compactibility) – to zdolność materiału do tworzenia wytrzymałej mechanicznie granulacji w wyniku działania ciśnienia wywieranego na ten materiał.
- Ziarno** – tu cząstka podstawowa z której zbudowane są złoża rozdrobnionej biomasy.
- Mieszanka komponowana** – mieszanka ziaren rozdrobnionej biomasy o projektowanym składzie ziarnowym.
- Mieszanka bazowa** – mieszanka ziaren rozdrobnionej biomasy o składzie ziarnowym uzyskanym w wyniku rozdrabniania.
- Gęstość bezwzględna** – masa fazy stałej biomasy (lignocelulozy) w stosunku do objętości tej fazy bez objętości fazy ciekłej i gazowej.
- Gęstość właściwa** – stosunek masy próbki biomasy do jej objętości. Objętość ta to suma objętości fazy stałej, objętości porów wewnętrznych (faza gazowa) i objętości wody w nich zawartej (faza ciekła).
- Gęstość nasypowa** – iloraz masy próbki rozdrobnionej biomasy do objętości którą ta próbka zajmuje wraz z objętością pustych przestrzeni pomiędzy cząstkami złoża.

**Porowatość** – procentowy udział porów pomiędzy cząstkami złoża w ogólnej objętości materiału ziarnistego. Inaczej mówiąc jest to suma objętości wolnych przestrzeni w pewnej, jednostkowej objętości materiału ziarnistego.

**Współczynnik wypełnienia** – to stosunek objętości cząstek tworzących materiał ziarnisty do objętości zajmowanej przez ten materiał.

## OZNACZENIA

*Oznaczenia odnoszące się do parametrów jakościowych biomasy i biopaliw przyjęte za PN-EN ISO 16559:2014-09 Biopaliwa stałe - Terminologia, definicje i określenia:*

|                          |                                                                                           |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>AD</i>                | – gęstość bezwzględna ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),                                  |
| <i>BD</i>                | – gęstość nasypowa ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),                                     |
| <i>C</i>                 | – frakcja wymiarowa w analizie składu ziarnowego (mm) wg PN-EN ISO 17827,                 |
| <i>D</i>                 | – średnica lub przekątna peletu lub brykietu (mm), wg PN-EN ISO 17225,                    |
| <i>DE</i>                | – gęstość właściwa ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),                                     |
| <i>DU</i>                | – wytrzymałość mechaniczna biopaliwa stałego (%), wg PN-EN ISO 17831,                     |
| <i>E</i>                 | – gęstość energetyczna ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ),                                 |
| <i>L</i>                 | – długość cząstki biopaliwa (peletu, brykietu, zrębki, sieczki) (mm), wg PN-EN ISO 17225, |
| <i>M</i>                 | – wilgotność względna (%),                                                                |
| <i>M<sub>a</sub></i>     | – wilgotność bezwzględna (%),                                                             |
| <i>M<sub>ad</sub></i>    | – wilgotność względna analityczna (%),                                                    |
| <i>q<sub>p,net</sub></i> | – wartość opałowa ( $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),                                     |
| <i>S</i>                 | – skumulowany udział frakcji wymiarowych (%) wg PN-EN ISO 17827,                          |

### Pozostałe oznaczenia:

|                         |                                                                                            |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>A</i>                | – stała modelu Heckla reprezentująca stopień zagęszczenia materiału przy niskim ciśnieniu, |
| <i>d</i>                | – średnica zastępcza ziarna (mm),                                                          |
| <i>d<sub>50</sub></i>   | – środkowa wartość rozmiaru ziarna (średnicy zastępczej) (mm) wg PN-EN ISO 17827,          |
| <i>D<sub>c</sub></i>    | – gęstość materiału w trakcie zagęszczania ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),              |
| <i>DE<sub>k0</sub></i>  | – gęstość właściwa granuli w chwili wytworzenia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),         |
| <i>DE<sub>k24</sub></i> | – gęstość właściwa granuli po 24h stabilizacji ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),          |
| <i>DE<sub>z</sub></i>   | – progowa gęstość właściwa granuli ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),                      |
| <i>DU<sub>10</sub></i>  | – wytrzymałość mechaniczna granuli zastępczej (%),                                         |
| <i>DU<sub>k</sub></i>   | – progowa wytrzymałość mechaniczna granuli (%),                                            |
| <i>D<sub>w</sub></i>    | – gęstość względna,                                                                        |
| <i>ε</i>                | – porowatość (%),                                                                          |
| <i>ε<sub>c</sub></i>    | – porowatość całkowita złoża materiału ziarnistego (%),                                    |

|                     |                                                                                                                                         |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon_w$     | – porowatość wewnętrzna złoża materiału ziarnistego (%),                                                                                |
| $\varepsilon_z$     | – porowatość zewnętrzna złoża materiału ziarnistego (%),                                                                                |
| $h_{k0}$            | – wysokość granuli w trakcie zagęszczania (mm),                                                                                         |
| $h_{k24}$           | – wysokość granuli po 24 h stabilizacji (mm),                                                                                           |
| $m_{E0}$            | – masa granuli w chwili wytworzenia (g),                                                                                                |
| $m_{E10}$           | – masa granuli zastępczej o wysokości 10 mm (g),                                                                                        |
| $m_{E24}$           | – masa granuli po 24 h stabilizacji (g),                                                                                                |
| $k$                 | – liczba punktów styku przypadająca na pojedyncze ziarno (zwana inaczej liczbą Newtona, liczbą koordynacyjną lub liczbą punktów styku). |
| $K$                 | – stała proporcjonalności w modelu Heckla,                                                                                              |
| $P$                 | – ciśnienie zagęszczania (MPa),                                                                                                         |
| $P_k$               | – ciśnienie progowej kompaktowalności (MPa),                                                                                            |
| $P_z$               | – ciśnienie progowej zagęszczalności (MPa),                                                                                             |
| $R_{24}$            | – rozpręż poaglomeracyjny (%),                                                                                                          |
| $\sigma$            | – na ściskanie wzdłuż średnicy aglomeratu (MPa),                                                                                        |
| $U_w$               | – udział $\varphi_{wew}$ w $\varphi_c$ ,                                                                                                |
| $U_z$               | – udział $\varphi_{zew}$ w $\varphi_c$ ,                                                                                                |
| $V$                 | – objętość materiału po zagęszczeniu,                                                                                                   |
| $V_0$               | – objętość początkowa materiału,                                                                                                        |
| $V_{k0}$            | – objętość granuli w chwili wytworzenia (m <sup>3</sup> ),                                                                              |
| $V_{k24}$           | – objętość granuli po 24 h stabilizacji (m <sup>3</sup> ),                                                                              |
| $\varphi$           | – współczynnik wypełnienia,                                                                                                             |
| $\varphi_c$         | – całkowity współczynnik wypełnienia złoża materiału ziarnistego,                                                                       |
| $\varphi^*_{wew}$   | – względny współczynnik wypełnienia wewnętrznego,                                                                                       |
| $\varphi_{wew}$     | – współczynnik wypełnienia wewnętrznego złoża materiału ziarnistego,                                                                    |
| $\varphi^*_{zew}$   | – względny współczynnik wypełnienia zewnętrznego,                                                                                       |
| $\varphi_{zew}$     | – współczynnik wypełnienia zewnętrznego złoża materiału ziarnistego,                                                                    |
| $\varnothing_{k0}$  | – średnica kanału tulei zagęszczającej (mm),                                                                                            |
| $\varnothing_{k24}$ | – średnica granuli po 24 h stabilizacji (mm),                                                                                           |

## WSTĘP

Odnawialne źródła energii stają się coraz bardziej popularne. Biomasa, ze względu na łatwość i powszechność stosowania, w dalszym ciągu pozostaje źródłem najważniejszym, a co za tym idzie, szeroko wykorzystywanym zwłaszcza w formie biopaliw stałych. Pozytywne zjawisko, jakim jest wzrastająca świadomość ekologiczna jej użytkowników powoduje, że zwracają oni coraz częściej uwagę na wysoką jakość biopaliw stałych, gwarantującą maksymalne wykorzystanie jej potencjału energetycznego jak i wygodę stosowania.

Najogólniej rzecz biorąc, cechy jakościowe podzielić można na istotne z energetycznego i logistycznego punktu widzenia. Cechy energetyczne do biopaliwa wnosi surowiec i proces wytwarzania praktycznie ich nie zmienia. Inna sytuacja ma miejsce w przypadku cech logistycznych, za te odpowiadają cechy materiału, na które nie mamy wpływu, ale w głównej mierze parametry procesu wytwarzania biopaliw, których wartości dobierane są do wymagań bardzo zróżnicowanego surowca.

Biomasa przeznaczona do produkcji biopaliw stałych, oprócz wysokich parametrów energetycznych, musi wykazywać się zdolnością do zagęszczania czyli zagęszczalnością, oraz zdolnością do tworzenia wytrzymałych mechanicznie aglomeratów, a właściwie granul, czyli kompaktownością. Wtedy czynnikiem sprawczym jakim jest ciśnienie zagęszczania i niewielkie wsparcie pozostałych czynników procesowych (wilgotność, temperatura, itd.) pozwoli na uzyskanie wysokojakościowego biopaliwa stałego. Te dwie cechy biomasy (zagęszczalność i kompaktowność), fundamentalne dla procesów ciśnieniowego jej zagęszczania, nie zawsze są ze sobą skorelowane. Poznanie potencjału zagęszczalności i kompaktowności szerokiej gamy biomasy lignocelulozowej, pozwoli w pełni określić wpływ każdego innego, dodatkowego czynnika z osobna oraz zachodzących pomiędzy nimi interakcji.

W pracy podjęto próbę wprowadzenia, do obszaru badań związanych z przetwarzaniem biomasy do postaci biopaliw stałych, dwóch pojęć: zagęszczalności i kompaktowności. Uznano je za główne cechy charakteryzujące i określające predyspozycje biomasy lignocelulozowej do produkcji biopaliw stałych. Pojęcia te co prawda pojawiają się w literaturze przedmiotu związanej z biomasą, jednak występują sporadycznie.

Na podstawie studium bibliografii stwierdzono, że nie ma jednolitego systemu określającego potencjał zagęszczalności i kompaktowności biomasy, który pozwalałby również w łatwy sposób określić wpływ na ten potencjał wielu innych parametrów procesowych takich jak np.: wilgotność, temperatura, czas, geometria systemu formującego, stopień rozdrobnienia, dodatek lepiszczy, itp. Można również stwierdzić, że mimo szeroko zakrojonych badań procesu zagęszczania biomasy prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie, jeden z czynników mogących wpływać na ten proces jest pomijany. Zwraca się uwagę na wpływ rozdrobnienia surowca, zalecając by był on mielony do uzyskania określonej wielkości ziarna, jednak tak uzyskany surowiec nigdy nie jest zbiorem ziaren o zbliżonej wielkości, tylko o wielkości z pewnego zakresu wymiarowego. W wyniku rozdrabniania możemy uzyskać surowce o takim samym rozdrobieniu jednak różniące się składem ziarnowym. Różnice we wzajemnych proporcjach frakcji wymiarowych mogą mieć wpływ na przebieg procesu ciśnieniowego zagęszczania, a w efekcie na cechy uzyskanego produktu. Jak dotychczas brak jest badań w tym zakresie, a być może

jest to kolejny istotny czynnik determinujący ten proces. Co ważne jest to czynnik, którym możemy stosunkowo łatwo sterować bez ponoszenia wysokich nakładów.

Biopaliwami stałymi o najwyższym stopniu przetworzenia są pelety i brykiety wytwarzane w procesie ciśnieniowego zagęszczania rozdrobnionego surowca. Proces ten określany jest również jako aglomeracja ciśnieniowa lub jako kompaktowanie a uzyskane paliwa ogólnie nazywane są paliwami kompaktowanymi. Produkt powstający w wyniku tego procesu nazywać można też granulami i to określenie przyjęto w pracy jako synonim peletu, brykietu, czy też aglomeratu.

Niniejsza praca podejmuje próbę uzupełnienia stanu wiedzy w zakresie opisu relacji zachodzących pomiędzy rodzajem materiału, jego składem ziarnowym i ciśnieniem zagęszczania a uzyskanymi cechami jakościowymi produktu jakimi są gęstość właściwa i wytrzymałość mechaniczna granuli. Zaproponowany sposób opisu tych relacji jest na tyle uniwersalny, że pozwala uwzględnić również inne czynniki procesowe wpływające na cechy produktu finalnego.

## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

### 2.1. Biomasa jako surowiec energetyczny

Jednym z pierwszych punktów zwrotnych w historii człowieka było opanowanie umiejętności używania ognia. Dowody na to, że *Homo erectus*, bo *Homo sapiens* jeszcze nie istniał, pochodzą sprzed miliona lat. Na stanowisku Wonderwerk w Południowej Afryce (Berna i in., 2012), odkryto mikroskopijne ślady popiołu drzewnego pośród nadpalonych kości zwierzęcych i narzędzi krzemiennych (rys. 2.1). Potwierdza to oczywisty fakt, że biomasa od zarania dziejów ludzkości, jest pierwszym źródłem paliwa ten ogień podtrzymującym. Opanowanie umiejętności podtrzymywania ognia, poprzez dostarczanie odpowiedniego paliwa, oznaczało przełom i wpłynęło pozytywnie na wszystkie aspekty życia ówczesnych ludzi. Spalanie biomasy dostarczało ciepła i światła. Pozwalało to przygotowywać i konserwować żywność, zasiedlać nowe, zimniejsze tereny, dawało poczucie bezpieczeństwa oraz odstraszało drapieżniki.



Źródło: (Berna i in., 2012)

Rys. 2.1. Fragmenty nadpalonych kości zwierzęcych ze stanowiska Wonderwerk, południowa Afryka, wiek ok. 1 mln lat

Oprócz rozwoju społecznego, spalanie biomasy rozpoczęło rozwój technologiczny, zaczynający się od opanowania techniki wypalania ceramiki oraz wytopu metali czy szkła.

Podstawową formą biomasy stałej było drewno pozyskiwane z lasów. Tam gdzie to źródło nie występuje, wykorzystywano inne rośliny, najczęściej trawy lub wysuszone na słońcu odchody zwierząt, a w skrajnych przypadkach oleje i tłuszcze roślinne i zwierzęce.

Konwersja termiczna biomasy napędzała rozwój cywilizacji od jej zarania aż do niedawna, kiedy to zastąpiona została paliwami kopalnymi. Jednak ze względu na ich ograniczone zasoby i negatywny wpływ na środowisko biomasa ponownie wraca do łask. Jak wynika z danych GUS w roku 2016, dominującą pozycję krajowego wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych stanowiły biopaliwa stałe – 70,7% (Berent-Kowalska i in., 2017); w roku 2017 udział ten wynosił 68% (Berent-Kowalska, 2018).

Drewno pozyskiwane z lasów znajduje obecnie szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, zatem na cele energetyczne przeznacza się jego stosunkowo niewielką ilość. W związku z tym poszukuje się innych źródeł biomasy przeznaczonej na cele energetyczne – biopaliwa stałe (Frączek i in., 2009, 2011a, 2011b; Karbowniczak i in., 2018; Mudryk i in., 2013; Niemczyk i in., 2018; El Bassam, 1998; Lewandowski i in., 2003; Szczukowski i in., 2012).

Szeroki zakres źródeł biomasy powoduje, że jako surowiec do produkcji biopaliw stałych charakteryzuje się on dużym zróżnicowaniem właściwości morfologicznych i fizycznych, które istotnie wpływają zarówno na poszczególne etapy produkcji biopaliw, jak i na właściwości produktu finalnego (Juliszewski i in., 2012; Mudryk i Wróbel, 2011; Wróbel, 2010). Z punktu widzenia odbiorcy, biopaliwo wytworzone z różnorodnego surowca, ostatecznie powinno posiadać ujednolicone, standardowe właściwości zapewniające prawidłowy przebieg procesu spalania i dostarczenie deklarowanej ilości energii zawartej w paliwie.

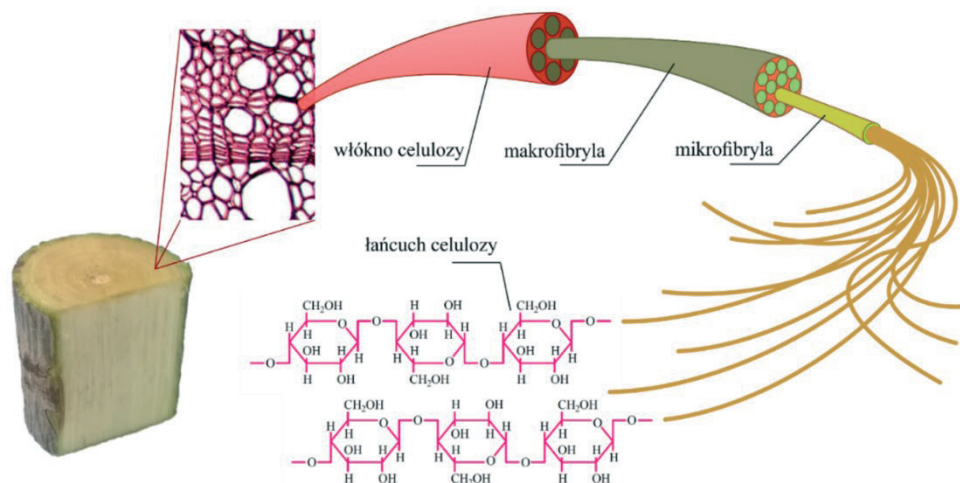
Wg definicji PN-EN ISO 16559, biomasa to materiał pochodzenia biologicznego z wyłączeniem materiałów zawartych w formacjach geologicznych i/lub skamieniałościach. Biomasa jest materiałem organicznym pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, obejmująca ale nie ograniczona do upraw energetycznych i rolnych, żywność, pozostałości upraw roślin włókniстых i paszowych, roślin wodnych, glonów, pozostałości z leśnictwa i pozostałości drzewne, odpady rolnicze, uboczne produkty przetwarzania oraz inne niekopalne substancje organiczne.

## **2.2. Budowa i skład biomasy roślinnej**

Głównym elementem strukturalnym biomasy roślinnej są ściany komórkowe. Różnią się one m. in. w zależności od gatunku (Popper i in., 2011) oraz od pełnionej przez komórkę funkcji i reakcji na warunki środowiskowe (Knox, 2008). Jednak z chemicznego punktu widzenia ściany komórkowe większości roślin zbudowane są z trzech głównych komponentów: celulozy, hemicelulozy i ligniny. Dodatkowo w strukturze tego naturalnego kompozytu znajdują się: związki ekstrakcyjne oraz frakcja mineralna. Biomasa o takim składzie określana jest biomasą lignocelulozową.

CELULOZA – jest głównym składnikiem budulcowym ścian komórek roślinnych i jest uważana za biopolimer najpowszechniej występujący na Ziemi (Somerville, 2006). Łańcu-

chy celulozowe o długości kilku mikrometrów to polisacharydy zbudowane z 3000 – 14000 cząstek glukozy połączonych wiązaniami  $\beta$  – 1,4 – glikozydowymi (Fernandes i in., 2011; Wilson i Lee, 2016). Łańcuchy celulozy połączone są w mikrofibryle, które łączą się w makrofibryle, a te tworzą włókna celulozowe (rys. 2.2).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Magali, 2006)

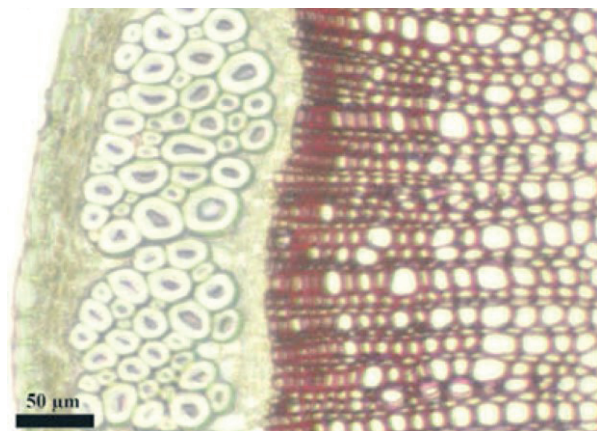
Rys. 2.2. Budowa strukturalna celulozy

HEMICELULOZA – ogólne określenie niejednorodnej grupy polisacharydów, które nie są ani celulozą ani pektyną. Chemicznie i strukturalnie są zbliżone do celulozy – stąd też ich nazwa. Większość hemiceluloz tworzona jest przez połączoną ksylozę, arabinozę, mannozę, glukozę i galaktozę. W odróżnieniu od celulozy, hemicelulozy charakteryzują się rozgałęzionymi łańcuchami. Podobnie jak celuloza są głównym składnikiem strukturalnym ścian komórkowych roślin. Są składnikiem sieciującym, łączącym wiązki celulozy, ligninę, pektyny i inne składniki poprzez szereg interakcji kowalencyjnych i niekowalencyjnych (Pauly i in., 2013; Sorek i in., 2014).

LIGNINA – zwana również drzewnikiem, to trzeci główny składnik budulcowy komórek roślinnych. Jest bezpostaciowym, nieregularnym polimerem, utworzonym z monomerów będących pochodnymi alkoholi fenolowych: koniferylowego, synapinowego i kumarylowego (Mendu i in., 2011; Welker i in., 2015). W związku z powyższym lignina wytwarzana przez różne gatunki roślin różni się od siebie, i może być ogólnie podzielona na III typy (Demirbas, 2017). Struktura chemiczna ligniny, podobna do tworzyw sztucznych, jest usieciowana wiązaniami eterowymi i kowalencyjnymi węgiel – węgiel (Boerjan i in., 2003). Podczas wzrostu rośliny jednostki monomerów są wydzielane do tworzącej się ściany komórkowej, infiltrują polisacharydową sieć i są losowo polimeryzowane tworząc ligninę – proces ten nazywamy lignifikacją lub drewnieniem (Mottiar i in., 2016). Powstała lignina wypełnia przestrzeń między celulozą i hemicelulozą, szczególnie w tkankach



naczyniowych i podtrzymujących (rys. 2.3). Jest kowalencyjnie związana z hemicelulozą, dlatego łączy polisacharydy roślinne, nadając wytrzymałość mechaniczną ścianie komórkowej, a przez to całej roślinie. Jest substancją hydrofobową dlatego uszczelnia ściany komórkowe, co umożliwia tworzenie wyspecjalizowanych tkanek transportujących wodę i substancje odżywcze w roślinie (Chabannes i in., 2001).



Źródło: (Chantreau i in., 2015)

Rys. 2.3. Przekrój poprzeczny lodygi lnu – ciemne komórki wysyczone są ligniną

ZWIĄZKI EKSTRAKCYJNE to substancje powstające w wyniku różnych reakcji biochemicznych zachodzących w komórkach. Nie są one strukturalnymi składnikami biomasy. Najczęściej występujące związki ekstrakcyjne to cukry proste, tłuszcze, woski, białka, fenole, gumy, terpeny, saponiny, pektyny, żywice, kwasy tłuszczowe oraz olejki eteryczne itp. Ich głównym zadaniem jest ochrona komórek roślinnych przed grzybami oraz insektami (Zethraeus, 2012).

FRAKCJA MINERALNA to pierwiastki nieorganiczne, takie jak: azot, siarka, chlor, metale wbudowane w żywe tkanki roślin jako składniki odżywcze. Ich koncentracja w biomase ma duże znaczenie w procesach spalania biomasy, ponieważ pozostają one w postaci popiołów.

Z punktu widzenia energetycznego wykorzystania biomasy nośnikiem większości energii skumulowanej w danej biomase są trzy substancje: celuloza, hemiceluloza i lignina. Jak wykazała analiza elementarna kilku rodzajów biomasy (Demirbaş, 2005), różnice pomiędzy celulozą i hemicelulozą są nieznaczne (tab. 2.1). Dlatego też ich parametry energetyczne są zbliżone (tab. 2.2).

Tabela 2.1.  
Porównanie składu chemicznego celulozy i hemicelulozy

| Komponent strukturalny | Węgiel C (%) | Wodór H (%) | Tlen O (%) | Ciepło spalania (MJ·kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|--------------|-------------|------------|----------------------------------------|
| Hemiceluloza           | 45,5         | 6,1         | 48,4       | 17,9                                   |
| Celuloza               | 44,4         | 6,2         | 49,4       | 17,6                                   |

Źródło: (Demirbaş, 2005)

W przypadku ligniny mamy do czynienia z wyższymi wartościami parametrów energetycznych (tab. 2.1). Wartość opałowa ligniny zależy też od rodzaju biomasy lignocelulozowej. Analiza ligniny pozyskanej z łupin orzechów leszczyny, wytlóków z oliwek, łupin orzecha włoskiego, drewna świerkowego i bukowego wykazała wartości z zakresu 22,2 – 28,5 MJ·kg<sup>-1</sup> (Demirbas, 2017). Autorzy wyróżnili trzy typy ligniny różniące się wartością opałową i występowaniem w danej biomase.

Tabela 2.2.  
Porównanie parametrów energetycznych celulozy hemicelulozy i holocelulozy (polisacharydów traktowanych ogólnie)

| Komponent strukturalny | Ciepło spalania (MJ·kg <sup>-1</sup> ) | Wartość opałowa (MJ·kg <sup>-1</sup> ) | Źródło                    |
|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| Hemiceluloza           | 17,9                                   |                                        | (Demirbaş, 2005)          |
|                        |                                        | 16,2                                   | (Günther i in., 2012)     |
|                        |                                        | 15                                     | (Wihan, 2007)             |
| Celuloza               | 17,6                                   |                                        | (Demirbaş, 2005)          |
|                        |                                        | 17,3                                   | (Günther i in., 2012)     |
|                        |                                        | 16                                     | (Wihan, 2007)             |
| Holoceluloza           | 17,1 – 17,5                            |                                        | (Dziurzyński, 2003)       |
|                        |                                        | 18,6                                   | (White, 1987)             |
|                        |                                        | 17,5                                   | (Tillman, 1978)           |
|                        |                                        | 19,7                                   | (Fuwapę, 1989)            |
|                        |                                        | 16 – 18                                | (Zethræus, 2012)          |
| Lignina                | 27,4 – 28,1                            |                                        | (Dziurzyński, 2003)       |
|                        |                                        | 23,3 – 25,6                            | (White, 1987)             |
|                        |                                        | 27,7                                   | (Tillman, 1978)           |
|                        | 27                                     |                                        | (Kaltschmitt i in., 2009) |
|                        |                                        | 25,5                                   | (Fuwapę, 1989)            |
|                        |                                        | 25,26                                  | (Zethræus, 2012)          |
|                        |                                        | 25                                     | (Wihan, 2007)             |
|                        |                                        | 22,2 – 28,5                            | (Demirbas, 2017)          |

Źródło: opracowanie własne

Jeszcze wyższe wartości parametrów energetycznych wykazują związki ekstrakcyjne: wartość opałowa na poziomie 32,3 MJ·kg<sup>-1</sup> (Chandler i in., 1983), 35,9 – 37,2 MJ·kg<sup>-1</sup> (White, 1987), 25,1 MJ·kg<sup>-1</sup> (Fuwapę, 1989), ciepło spalania to ok 35 MJ·kg<sup>-1</sup> (Zethræus, 2012).

Wyższe wartości ciepła spalania ligniny i związków ekstrakcyjnych (w porównaniu do holocelulozy) spowodowane są niższym stopniem oxydacji i wyższą zawartością węgla w tych pierwszych (Demirbaş, 2005; Kumar i in., 1992; Kumar i in., 2010). Jak można zauważyć w tabeli 2.3, zawartość tlenu w ligninie, w zależności od rodzaju biomasy waha się w przedziale 22,2 – 37,3%, a węgla 57,2 – 66,5% (Demirbaş, 2005). Dla porównania celuloza i hemiceluloza traktowane razem, zawierają średnio 48,9% tlenu i 44,9% węgla (tab. 2.1). Zawartość wodoru w składnikach strukturalnych biomasy lignocelulozowej wynosi średnio 5,8%.

Tabela 2.3.

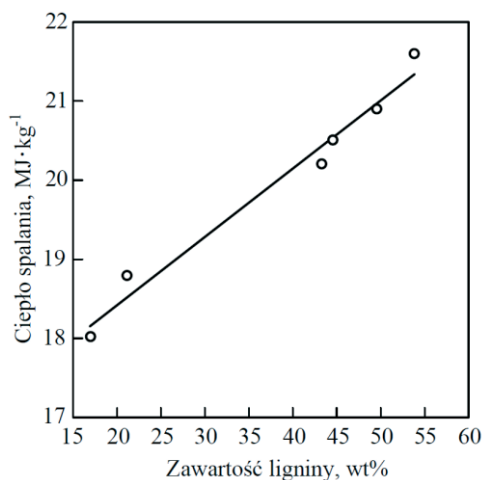
*Skład chemiczny ligniny uzyskanej z różnej biomasy*

| Źródło ligniny           | Węgiel C (%) | Wodór H (%) | Tlen O (%) |
|--------------------------|--------------|-------------|------------|
| Drewno bukowe            | 60,36        | 6,31        | 33,32      |
| Drewno świerkowe         | 66,53        | 6,16        | 27,31      |
| Łupiny orzecha włoskiego | 57,25        | 5,43        | 37,32      |
| Łupiny orzecha lещczyny  | 61,28        | 5,06        | 33,66      |
| Osadki kukurydzy         | 61,2         | 5,65        | 33,15      |
| Słoma pszenna            | 59,54        | 4,96        | 35,5       |
| Łuski słonecznika        | 71,63        | 6,19        | 22,18      |

*Źródło: (Demirbaş, 2005)*

Finalnie, ciepło spalania biomasy zależy zatem w głównej mierze od procentowego udziału w jej strukturze celulozy, hemicelulozy i ligniny. Najwyższym ciepłem spalania charakteryzują się związki ekstrakcyjne, zwłaszcza te zawierające duże ilości żywicy i terpeny, jednak ich niewielka zawartość w biomacie, nie przekraczająca 9,5% (tab. 2.4) powoduje tylko niewielki wzrost ciepła spalania. Związki wysokokaloryczne (żywice, terpeny, woski) w najwyższym stężeniu spotyka się w drewnie roślin iglastych, co powoduje, że ciepło spalania tych materiałów jest wyższe w porównaniu z drewnem roślin liściastych czy biomasą zielną (White, 1987; Wihan, 2007; Zethræus, 2012). Czynnikiem decydującym o wysokiej wartości ciepła spalania jest zatem udział ligniny w stosunku do holocelulozy. Wykazano, że dla pewnych grup biomasy zależność ta ma przebieg liniowy (Demirbaş, 2003, 2005). Rysunek 2.4 przedstawia tę zależność dla biomasy okryw nasiennych kilku gatunków roślin (ciepło spalania biomasy bez popiołu i związków ekstrakcyjnych).

Zawartość ligniny, celulozy i hemicelulozy w różnych gatunkach roślin jest zróżnicowana. Ogólnie holoceluloza w drewnie drzew iglastych stanowi około 2/3, a w drewnie liściastych 3/4 ich składu chemicznego (Helińska-Raczkowska, 1999). Drewno twarde (liściaste) w stanie suchym zawiera 43 – 50% celulozy, 20 – 25% hemicelulozy i 16 – 25% ligniny, a drewno miękkie (iglaste) w stanie suchym zawiera 35 – 44% celulozy, 25 – 30% hemicelulozy i 27 – 33% ligniny (Wihan, 2007). Zawartość ligniny i pozostałych składników biomasy podawane przez różnych autorów zawarto w tabeli 2.4.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Demirbaş, 2003)

Rys. 2.4. Ciepło spalania suchych, bezpopiołowych i pozbawionych związków ekstrakcyjnych okryw nasiennych różnych gatunków roślin w zależności od zawartości ligniny

Tabela 2.4.

Zawartość komponentów strukturalnych w różnego rodzaju biomacie (dane w odniesieniu do stanu suchego)

| Gatunek                | Lignina | Celuloza | Hemi celuloza | Holo celuloza | Związki ekstrakcyjne | Autor                   |
|------------------------|---------|----------|---------------|---------------|----------------------|-------------------------|
| Drewno iglaste ogólnie | 27 – 33 | 35 – 44  | 25 – 30       |               | 1 – 5                | (Zethræus, 2012)        |
|                        | 25 – 35 |          |               |               |                      | (Demirbas, 2017)        |
|                        | 26 – 35 | 48 – 56  | 23 – 25       |               |                      | (Pożgaj i in., 1997)    |
|                        | 28      | 40,4     | 31,1          |               |                      | (Robbins i in., 2012)   |
|                        | 25 – 35 | 40 – 50  | 25 – 35       |               |                      | (Bajpai, 2016)          |
| Świerk                 | 26,9    |          |               |               | 2,4                  | (White, 1987)           |
|                        | 29      | 48,2     | 22,8          |               |                      | (Demirbaş, 2005)        |
|                        | 27,5    | 39,5     | 30,6          |               | 2,1                  | (Križan, 2015)          |
| Świerk biały           | 27,8    | 42,1     | 25,8          |               | 2,3                  | (Križan, 2015)          |
| Cedr                   | 30,8    |          |               |               | 7,8                  | (White, 1987)           |
| Sosna                  | 26,8    |          |               |               | 5,4                  | (White, 1987)           |
|                        | 27,6    |          |               | 67,4          |                      | (Dziurzyński, 2003)     |
|                        | 27,3    |          |               |               | 8,81                 | (Kaliyan i Morey, 2009) |
|                        | 18 – 26 | 37 – 45  | 21 – 30       |               |                      | (Sorek i in., 2014)     |
|                        | 27,7    | 40       | 28,5          |               | 3,5                  | (Križan, 2015)          |
| Sosna wejmutka         | 25,4    | 42,3     | 22,4          |               | 8,3                  | (Križan, 2015)          |
| Sekwoja                | 33,8    |          |               |               | 8,2                  | (White, 1987)           |
| Drewno liściaste       | 16 – 25 | 43 – 50  | 20 – 25       |               | 2 – 8                | (Zethræus, 2012)        |

| Gatunek                  | Lignina    | Celuloza | Hemi celuloza | Holo celuloza | Związki ekstrakcyjne | Autor                    |
|--------------------------|------------|----------|---------------|---------------|----------------------|--------------------------|
| ogólnie                  | 18 – 25    |          |               |               |                      | (Demirbas, 2017)         |
|                          | 15 – 28    | 46 – 48  | 23 – 25       |               |                      | (Pożgaj i in., 1997)     |
|                          | 24,4       | 43,3     | 31,8          |               |                      | (Robbins i in., 2012)    |
|                          | 18 – 25    | 40 – 55  | 24 – 40       |               |                      | (Bajpai, 2016)           |
| Dąb czerwony             | 22,5       |          |               |               | 6,4                  | (White, 1987)            |
|                          | 19,9       |          |               |               | 6,12                 | (Kaliyan i Morey, 2009)  |
| Dąb biały                | 20,74      |          |               |               | 7,88                 | (Kaliyan i Morey, 2009)  |
| Dąb szypułkowy           | 24,67      |          |               | 66,61         |                      | (Waliszewska i in. 2006) |
| Buk                      | 23,5       |          |               | 69,5          |                      | (Dziurzyński, 2003)      |
|                          | 22,2       | 42,5     | 34,3          |               |                      | (Demirbaş, 2005)         |
|                          | 20,9       | 39,2     | 35,3          |               | 4,1                  | (Križan, 2015)           |
| Klon                     | 21,7       |          |               |               | 5,3                  | (White, 1987)            |
|                          | 20,65      |          |               |               | 3,83                 | (Kaliyan i Morey, 2009)  |
| Klon czerwony            | 22,8       | 44,5     | 23,1          |               | 2,5                  | (Pożgaj i in., 1997)     |
| Brzoza brodawkowata      | 22         | 41       | 32,4          |               | 3                    | (Križan, 2015)           |
| Ambrowiec                | 22,32      |          |               |               | 5,1                  | (Kaliyan i Morey, 2009)  |
| Tulipanowiec amerykański | 25,3       | 33,5     | 30,3          |               | 3,6                  | (Križan, 2015)           |
|                          | 20,5       |          |               |               | 3,8                  | (White, 1987)            |
|                          | 18,75      |          |               |               | 5,79                 | (Kaliyan i Morey, 2009)  |
| Topola                   | 18 – 25    | 40 – 55  | 24 – 40       |               |                      | (Sorek i in., 2014)      |
| Topola czerwono-listna   | 31,5       | 32,7     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)      |
| Topola kalifornijska     | 32,1       | 41,4     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)      |
| Osika                    | 23,2       |          |               |               |                      | (Horvath, i in., 2011)   |
|                          | 18,2       | 50,2     | 25,5          |               | 2,4                  | (Križan, 2015)           |
| Wierzba wiciowa          | 22,9 – 7,1 |          |               | 70,1–73,7     | 7,25 – 8,6           | (Waliszewska i in. 2006) |
| Lipa                     | 18,1       |          |               |               | 6,7                  | (White, 1987)            |
| Palisander               | 31,89      |          |               | 70,05         |                      | (Krauss i in., 2011)     |
| Teak                     | 33,82      |          |               | 63,43         |                      | (Waliszewska i in. 2006) |
| Badi                     | 38,37      |          |               | 63,2          |                      | (Waliszewska i in. 2006) |
| Iroko                    | 28,4       |          |               | 67,07         |                      | (Waliszewska i in. 2006) |
| Miskant olbrzymi         | 17 – 21    | 37 – 45  | 19,25         |               |                      | (Sorek i in., 2014)      |
|                          | 13,3       | 41,9     | 16,6          |               | 15                   | (Robbins i in., 2012)    |
| Mozga trzcinowata        | 14         | 28       | 22            |               | 28                   | (Robbins i in., 2012)    |
| Proso różgowe            | 7          | 32       | 36            |               |                      | (Cherney i in., 1988)    |

| Gatunek                  | Lignina | Celuloza | Hemi celuloza | Holo celuloza | Związki ekstrakcyjne | Autor                 |
|--------------------------|---------|----------|---------------|---------------|----------------------|-----------------------|
|                          | 29,4    | 35,7     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
|                          | 12,3    | 46,1     | 32,2          |               |                      | (Robbins i in., 2012) |
|                          | 12      | 45       | 31,4          |               |                      | (Bajpai, 2016)        |
| Kukurydza kolby          | 15,5    | 52,3     | 32,1          |               |                      | (Demirbaş, 2005)      |
|                          | 15      | 45       | 35            |               |                      | (Bajpai, 2016)        |
| Pszenica słoma           | 19,4    | 29,8     | 40,8          |               |                      | (Demirbaş, 2005)      |
|                          | 21,3    | 34,9     | 22,5          |               | 11,9                 | (Robbins i in., 2012) |
|                          | 15      | 30       | 50            |               |                      | (Bajpai, 2016)        |
| Żyto                     | 6       | 34       | 28            |               |                      | (Cherney i in., 1988) |
| Sorgo dwubarwne          | 5       | 28       | 28            |               |                      | (Cherney i in., 1988) |
| Trawy ogólnie            | 10 – 30 | 25 – 40  | 35 – 50       |               |                      | (Bajpai, 2016)        |
| Tytoń pędy               | 13,6    | 31,1     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
| Agawa                    | 7 – 12  | 31 – 55  | 8 – 17        |               |                      | (Sorek i in., 2014)   |
| Łuski słonecznika        | 17      | 48,4     | 34,6          |               | 2,7                  | (Demirbaş, 2003)      |
|                          | 17,1    | 48,3     | 34,6          |               |                      | (Demirbaş, 2005)      |
| Łupiny migdałów          | 20,4    | 50,7     | 28,9          |               | 2,5                  | (Demirbaş, 2003)      |
| Kokos włókno             | 31,9    | 36,3     |               |               |                      | (van Dam i in., 2004) |
| Łupiny orzecha leszczyny | 42,5    | 25,9     | 29,9          |               | 3,3                  | (Demirbaş, 2003)      |
|                          | 43      | 26,8     | 30,2          |               |                      | (Demirbaş, 2005)      |
| Łupiny orzecha włoskiego | 52,3    | 25,6     | 22,1          |               | 3,3                  | (Demirbaş, 2003)      |
|                          | 52,3    | 25,5     | 22,2          |               |                      | (Demirbaş, 2005)      |
|                          | 45,4    |          |               |               | 7,1                  | (Li i in., 2018)      |
| Łupiny o. czarnego       | 40,4    | 28,2     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
| Łupina kokosu            | 44      | 29,7     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
| Pestki oliwek            | 48,4    | 24       | 23,6          |               | 9,4                  | (Demirbaş, 2003)      |
|                          | 39      | 33,7     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
| Pestki brzoskwini        | 45      |          |               |               | 2,8                  | (Li i in., 2018)      |
|                          | 41,6    | 25,6     |               |               |                      | (Mendu i in., 2011)   |
| Kora drzewna             | 43,8    | 24,8     | 29,8          |               | 4,6                  | (Demirbaş, 2003)      |

*Źródło: opracowanie własne*

W zależności od rodzaju biomasy zawartość ligniny wyraźnie się różni. W łupinach i pestkach wysoka zawartość związana jest z ich funkcją ochronną. Komórki tego typu przesycone są ligniną, nadającą im wysoką wytrzymałość oraz zapobiegającą niekontrolowanemu przedostawaniu się wody do wnętrza.

Zawartości ligniny w trawach zależy głównie od stopnia zdrewnienia, które powiązane jest z dojrzałością pędów. Pędy w stanie wegetacji zawierają mniej ligniny, natomiast pędy dojrzałe, zamierające, zawierają jej więcej, ponieważ proces lignifikacji osiąga swoje maksimum tuż przed zamieraniem komórek.

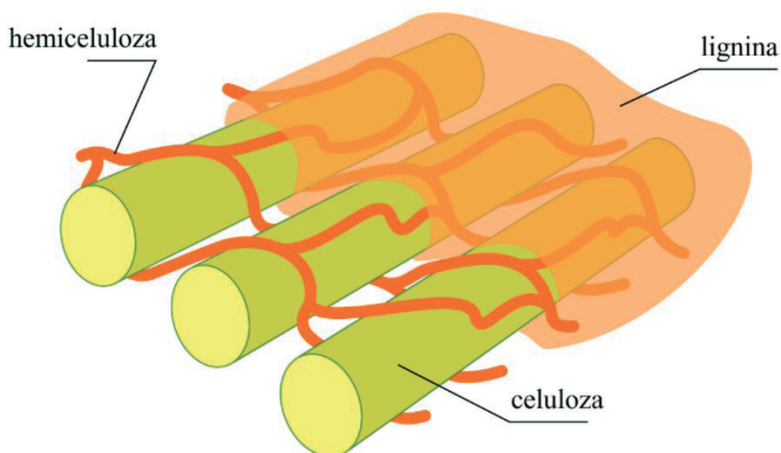
Gatunki drzew egzotycznych charakteryzują się wysoką zawartością ligniny, spowodowane jest to wyższą średnią temperaturą w okresie wegetacji i brakiem zimy co sprzyja lignifikacji (Gindl i in., 2000).

Z energetycznego punktu widzenia, najlepszą biomasą jest ta zawierająca największy udział ligniny w stosunku do zawartości holocelulozy. Taki rodzaj biomasy osiąga maksymalne wartości ciepła spalania, a dodatkowa zawartość związków ekstrakcyjnych może ten

parametr jeszcze poprawić. Powstaje pytanie czy powyższy skład biomasy będzie korzystny z punktu widzenia procesu zagęszczania?

### 2.3. Lignina a proces zagęszczania

Zdrewniałe ściany komórkowe biomasy lignocelulozowej zbudowane są z naturalnego kompozytu, którego szkielet tworzą włókna celulozy powiązane siecią hemicelulozy. Całość spaja lignina (rys. 2.5).

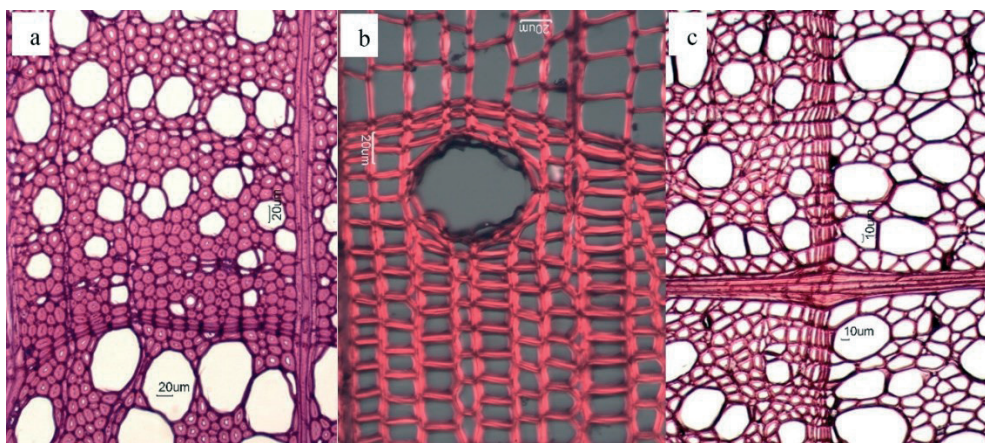


*Źródło: opracowanie własne na podstawie (Sorek i in., 2014)*

Rys. 2.5. Główne komponenty strukturalne ścian komórkowych biomasy lignocelulozowej

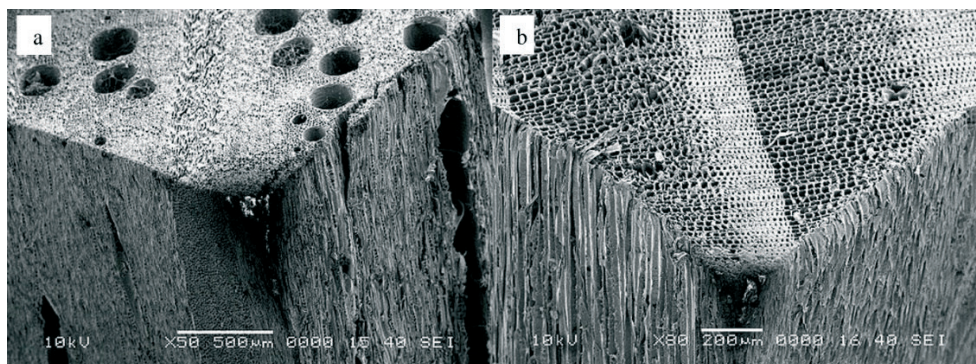
Przestrzennie rzecz biorąc zdrewniałe komórki mają w większości przypadków postać kapilarnej, porowatej struktury plastra miodu (rys. 2.6 i 2.7). Taki kształt w połączeniu z lignocelulozowym kompozytem nadaje wytrzymałość mechaniczną zespołom komórek tworzących szkielet nośny roślin (pnie i gałęzie drzew, źdźbła traw, pędy roślin zielnych). Ogólny kształt tych struktur jest podobny, a główne różnice objawiają się w wielkości (średnicy i grubości ścian) i stopniu upakowania mikrokapilar. Ogólnie rzecz biorąc, w drewnie twardym średnica kapilar jest mniejsza w porównaniu do drewna miękkiego i iglastego. Rysunek 2.6 przedstawia mikroskopowy obraz przekroju poprzecznego drewna buka, świerka oraz lipy, natomiast rysunek 2.7 przedstawia obrazy pozyskane z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego dla drewna dębu i sosny. W przypadku roślin zielnych, ich zdrewniałe pędy są zbudowane podobnie. Jednak w tych przypadkach, w obrębie jednego pędu obserwujemy duże zróżnicowanie w średnicach kapilar (rys. 2.8).





Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów: [www.microlabgallery.com](http://www.microlabgallery.com)

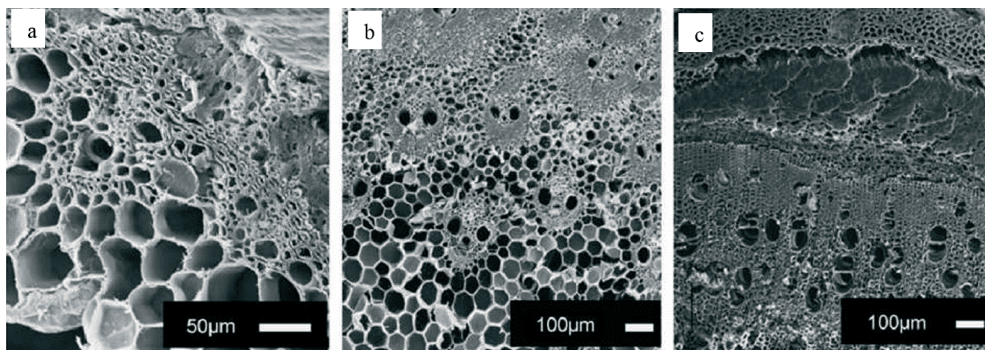
Rys. 2.6. Mikroskopowy obraz przekroju poprzecznego drewna: a – buk, b – świerk, c – lipa



Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com)

Rys. 2.7. Mikroskopowy obraz drewna: a – dąb, b – sosna



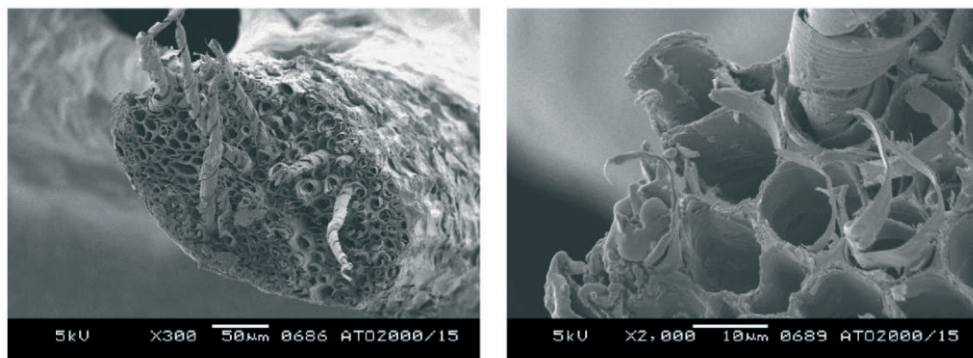


Źródło: (Wihan, 2007)

Rys. 2.8. Mikroskopowy obraz przekroju poprzecznego łodyg: a – pszenicy, b – miskanta, c – konopi

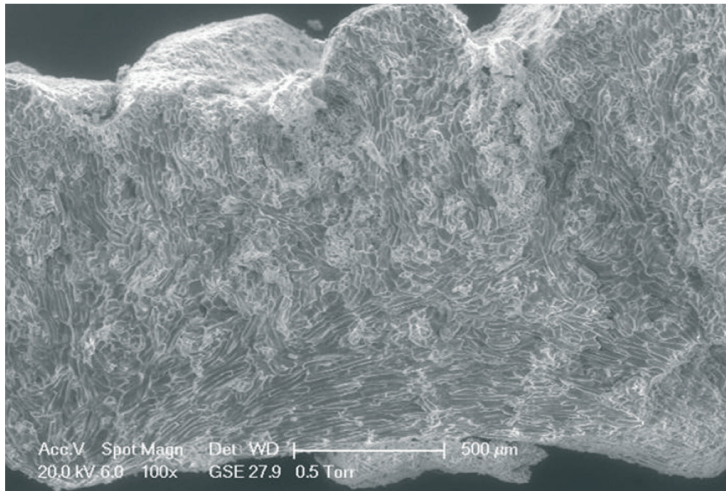
Obserwując budowę innych zliżnifikowanych tkanek roślinnych, nie pełniących funkcji nośnej, można zauważyć większą różnorodność. Włókna okrywy nasiennej kokosu właściwego posiadają wewnątrz kapilar dodatkowe, spiralne struktury (rys. 2.9).

Struktura pestek oliwki jest całkowicie inna – tworzą ją również zdrewniałe komórki ale ciasno upakowane – praktycznie zarówno bez pustych przestrzeni pomiędzy nimi, jak i w ich wnętrzu (rys. 2.10). Podobną budowę mają endokarpy innych owoców: wiśni, śliw, moreli, brzoskwiń, orzecha włoskiego itp. Obrazy wykonane mikroskopem konfokalnym endokarpów orzecha włoskiego, brzoskwini, i dla porównania żdźbła prosa różgowatego oraz drewna sosny przedstawia rysunek 2.11.



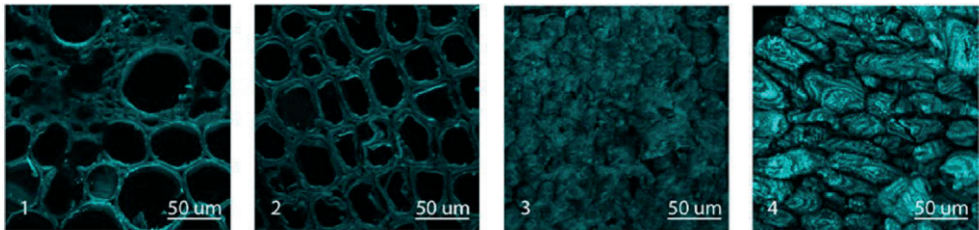
Źródło: (van Dam i in., 2004)

Rys. 2.9. Struktura włókien kokosu właściwego



Źródło: (Sanginés i in., 2015)

Rys. 2.10. Przekrój pestki oliwki



Źródło: (Li i in., 2018)

Rys. 2.11. Struktura surowców biomasowych: 1 – łodyga prosa różgowatego, 2 – drewno sosny, 3 – endokarp orzecha włoskiego, 4 – endokarp brzoskwini

Jeśli przyjmiemy, że gęstość bezwzględna  $AD$  kompozytu lignocelulozowego, niezależnie od rodzaju biomasy jest w przybliżeniu stała, to o gęstości właściwej  $DE$  danej biomasy decyduje w głównej mierze stopień upakowania kompozytu lignocelulozowego w objętości tkanki roślinnej. Jak wykazano powyżej, stopień tego upakowania jest bardzo zróżnicowany i dlatego  $DE$  biomasy charakteryzuje się bardzo szerokim zakresem wartości. Dla przykładu gęstość właściwa pędów różnika przerośniętego to tylko  $210 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , a np. drewna cisowego –  $940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Prosiński, 1984; Wróbel i in., 2018).

W procesach ciśnieniowej aglomeracji dąży się, by niezależnie od surowca, gęstość właściwa produktu przyjmowała zbliżone wartości. Zagęszczając rozdrobniony materiał redukujemy zarówno puste przestrzenie pomiędzy cząstkami surowca jak i puste przestrzenie wewnątrztkankowe. Aby utrzymać stopień redukcji porowatości po ustaniu ciśnienia zagęszczania, aktywowane są mechanizmy spajające cząstki razem (co szczegółowo przed-

stawiono w dalszej części pracy). Jednym z ważniejszych mechanizmów jest łączenie cząstek w punkcie ich styku za pomocą lepiszcza. Jako główne, naturalne, lepiszcze uznawana jest właśnie lignina zawarta w aglomerowanym materiale (Zethraeus, 2012). Można się spodziewać, że im większy udział ligniny w surowcu tym uzyskany granulatu będzie się charakteryzował lepszymi parametrami jakościowymi. Z drugiej strony to właśnie lignina odpowiada za wytrzymałość mechaniczną ścian komórkowych. Biomasa lignocelulozowa pozbawiona ligniny, np. w wyniku rozwoju grzybów powodujących białą zgniliznę drewna, staje się krucha i łamliwa. Wytrzymałość ta powoduje, że biomasę o wysokiej zawartości ligniny trudniej rozdrobnić w porównaniu do biomasy w której jej zawartość obniżono np. w procesie toryfikacji (Govin i in., 2009; Phanphanich i Mani, 2011; Repellin i in., 2010).

Z zawartością ligniny jest również związana sprężystość surowca biomasowego. W trakcie zagęszczania sprężystość i wywoływany przez nią rozkurcz jest głównym czynnikiem niszczącym połączenia powstające pomiędzy zagęszczanymi cząstkami. W procesie ciśnieniowej aglomeracji biomasy lignina jest zatem zarówno składnikiem wspomagającym jak i osłabiającym proces. Lignina w wyniku działania ciśnienia, wilgotności i temperatury w zakresie około 75 – 120°C ulega uplastycznieniu (Nalladurai i in., 2009; Krzysik, 1975). Zatem podczas zagęszczania biomasy lignocelulozowej należy dążyć do pokonania jej sprężystości i uplastycznienia ligniny. Spowoduje to trwałe odkształcenie cząstek zagęszczanego materiału i powstanie nowych połączeń pomiędzy nimi. Otwartym pozostaje pytanie: które z materiałów lignocelulozowych wykazują większą podatność na parametry procesu zagęszczania? Porowate (drewno i pędy roślin zielnych) – dla których w trakcie aglomeracji należy wywołać odkształcenia zewnętrzne, ale w dużej mierze też wewnętrzne (zamknięcie porów), czy te o niskiej porowatości (endokarpy), w których zagęszczanie wywoływać będzie głównie odkształcenia zewnętrzne? W których siła nowopowstałych połączeń będzie na tyle duża by utrzymać nowy kształt cząstek, a tym samym całego granulatu?

## 2.4. Klasyfikacja biomasy

Podstawą klasyfikacji biomasy w systemie jakości Unii Europejskiej jest jej pochodzenie oraz źródło. Klasyfikację tę zawiera norma PN-EN ISO 17225-1 Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy - Część 1: Wymagania ogólne. Wg niej biomasę klasyfikujemy od poziomu pierwszego do czwartego. Hierarchiczny system klasyfikacji na poziomie pierwszym rozróżnia pięć typów biomasy ze względu na ich pochodzenie, tj. biomasę:

- drzewną – drewno i kora drzew i krzewów,
- zielną – rośliny jednoroczne i byliny o pędach nie zdrewniałych, zamierających po okresie wegetacyjnym,
- owocową – części roślin zawierające nasiona lub one same,
- wodną – rośliny przystosowane do życia w środowisku wodnym,
- mieszanek (biomasa zmieszana celowo) i mieszaniny (biomasa zmieszana przypadkowo).

Drugi poziom klasyfikacji opisuje różne źródła biomasy w ramach grupy głównej (produkt uboczny, pozostałość lub materiał nieprzetworzony). Trzeci i czwarty poziom precy-

zuje dane źródło biomasy. Tabela 2.5 przedstawia fragment tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-1. Na podstawie informacji zawartych w tabeli producent biopaliw może w prosty sposób jednoznacznie zakodować informacje o pochodzeniu i źródle biomasy użytej w produkcji np. paliw kompaktowanych. Podanie tej informacji w tzw. metryce produktu jest wymagane przez normę. Dla przykładu, kod 2.1.2.1 oznacza, że biopaliwo zostało wyprodukowane z biomasy zielnej (pierwsza cyfra kodu – 2), że pochodzi ona bezpośrednio z upraw rolniczych lub ogrodniczych (druga cyfra kodu – 1), trzecia cyfra kodu – 2, oznacza że jest to biomasa traw a czwarta precyzuje jaka część roślin została wykorzystana w produkcji (w tym przypadku cyfra 1 oznacza, że wykorzystano całe rośliny). Oprócz kodu, powinna być również podana informacja o gatunku rośliny, w omawianym przykładzie mogła by to być np.: mozga trzcinowata, miskant olbrzymi, proso różgowate lub inne gatunki traw uprawianych na cele energetyczne.

Tabela 2.5.  
*Klasyfikacja pochodzenia i źródeł biomasy*

|                                                                    |                                                    |                               |                                        |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Biomasa drzewna                                                 | 1.1 Drewno z lasów, plantacji i inne surowe drewno | 1.1.1 Całe drzewa bez korzeni | 1.1.1.1 Drzewa liściaste               |
|                                                                    |                                                    |                               | 1.1.1.2 Drzewa iglaste                 |
|                                                                    |                                                    |                               | 1.1.1.3 Zagajniki o krótkiej rotacji   |
|                                                                    |                                                    | 1.1.3 Drewno strzały          | 1.1.3.1 Drzewa liściaste z korą        |
|                                                                    |                                                    |                               | 1.1.3.3 Drzewa iglaste z korą          |
|                                                                    |                                                    |                               | 1.1.3.4 Drzewa iglaste bez kory        |
| 2.1.7 Biomasa zielna z konserwacji terenów użyteczności publicznej |                                                    |                               |                                        |
| 2. Biomasa zielna                                                  | 2.1 Rośliny zielne rolnicze i ogrodnicze           | 2.1.2 Trawy                   | 2.1.2.1 Całe rośliny                   |
|                                                                    |                                                    |                               | 2.1.2.3 Nasiona                        |
|                                                                    |                                                    |                               | 2.1.2.4 Łuski                          |
|                                                                    |                                                    | 2.1.6 Kwiaty                  | 2.1.6.1 Całe rośliny                   |
|                                                                    |                                                    |                               | 2.1.6.2 Łodygi i liście                |
|                                                                    |                                                    |                               | 2.1.6.3 Nasiona                        |
| 3. Biomasa owocowa                                                 | 3.1 Owoce z sadów i ogrodów                        | 3.1.2 Pestki/nasiona z owoców | 3.1.2.3 Pestki/nasiona/włókna z owoców |
|                                                                    |                                                    |                               | 3.1.2.4 Mieszanek i mieszaniny         |
|                                                                    |                                                    | 3.1.3 Orzechy i żółędzie      | 3.1.3.1 Całe orzechy                   |
|                                                                    |                                                    |                               | 3.1.3.2 Skorupy/łuski                  |
| 4. Biomasa wodna                                                   | 4.1 Algi                                           | 4.1.1 Mikroalgi               |                                        |
|                                                                    | 4.4 Trzciny                                        | 4.4.1 Trzcina pospolita       |                                        |
| 5. Mieszanek i mieszaniny                                          | 5.1 Mieszanek                                      |                               |                                        |
|                                                                    | 5.2 Mieszaniny                                     |                               |                                        |

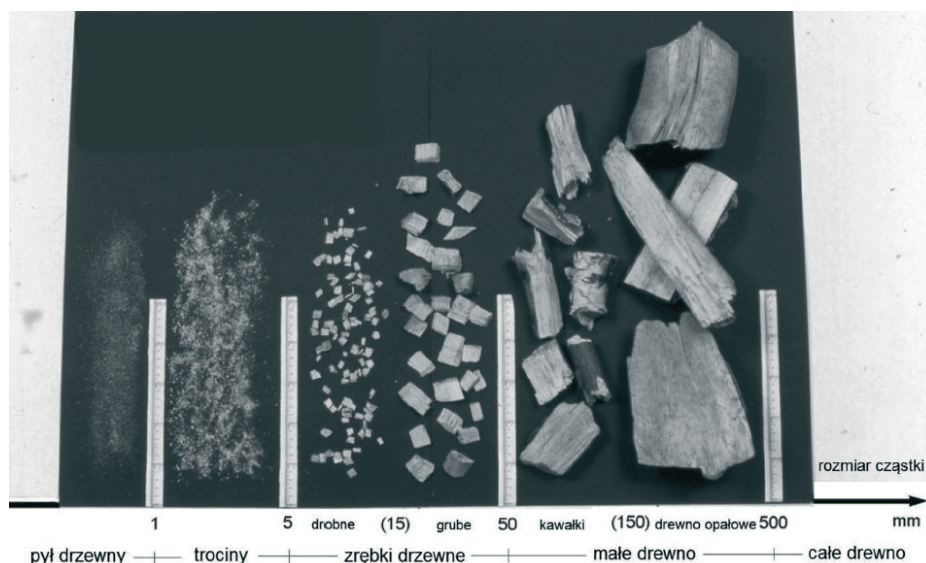
*Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 17225-1*

W dalszej części normy znajdziemy tabelę z podziałem biopaliw stałych ze względu na najczęściej spotykane formy handlowe i informacją jakimi metodami paliwo jest przygotowane oraz ogólną charakterystykę wymiarową paliw, która np. określa, że wymiarowa granica pomiędzy biopaliwami kompaktowanymi tzn. peletem a brykietem to średnica 25 mm. Podobnie w przypadku biopaliw drzewnych – to wymiar główny decyduje o zakwalifikowaniu ich do danego rodzaju paliwa (rys. 2.12). Trzon normy stanowi 13 tabel



zawierających szczegółowe specyfikacje parametrów poszczególnych form handlowych biopaliw. Dodatkowo załącznik B zawiera informacje o typowym składzie chemicznym różnego typu biomasy.

Biorąc pod uwagę zawartość składników strukturalnych, skład chemiczny oraz pochodzenie i źródła biomasy należy stwierdzić, że energetyczne właściwości biomasy nie wykazują dużego zróżnicowania. Jednak parametry fizyczne, takie jak gęstość właściwa  $DE$ , kształt i rozmiar cząstek, gęstość nasypowa  $BD$  przyjmują bardzo szeroki zakres wartości. Aby zatem zbliżone wartości parametrów energetycznych odnoszone do masy biopaliwa można było również uzyskać w stosunku do jego objętości, proces ciśnieniowej aglomeracji jest nieodzowny.



Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 17225-1

Rys. 2.12. Klasyfikacja paliw drzewnych oparta na rozmiarach cząstki paliwa

## 2.5. Paliwa kompaktowane

Kompaktowanie czyli ciśnieniowe zagęszczanie wstępnie przygotowanej biomasy, której formy handlowe charakteryzują się dużą zmiennością zarówno gęstości jak i wymiarów, pozwala na efektywne wykorzystanie zgromadzonej w niej energii. Proces ten prowadzi do homogenizacji tak składników jak i rozmiarów zagęszczanego materiału. Paliwa kompaktowane mogą być wytwarzane pod kątem ich kształtu wymaganego przez system spalania, pod kątem prędkości, długości i równomierności procesu spalania, oraz pod kątem automatyzacji procesu podawania paliwa do komory spalania (Križan, 2015). Kompaktowanie zwiększa gęstość właściwą biopaliw, co radykalnie obniża koszty ich transportu i składowania. Zwiększa także gęstość energetyczną  $E$  tych paliw w stosunku do surowca, z którego

go zostały wykonane (wyrażaną jako stosunek wartości opałowej materiału do jego objętości  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ). W skrajnych przypadkach, gdy surowiec charakteryzuje się niską gęstością nasypową np. słoma w formie siewki, a wytworzone z niej paliwo uzyskuje wysoką *BD* (pelet), to wzrost gęstości energii jest znaczący.

Kompaktowanie pozwala na wykorzystanie w produkcji biopaliw surowców biomasowych, których pierwotna forma utrudnia lub nie pozwala na ich bezpośrednie, ekonomiczne wykorzystanie na cele energetyczne. Jak już wspomniano, biomasa lignocelulozowa jest stosunkowo jednolita pod względem parametrów energetycznych, lecz bardzo zróżnicowana pod względem struktury przestrzennej, zarówno zewnętrznej jak i wewnętrznej. Kompaktowanie jest więc jednym, jeśli nie jedynym, rozwiązaniem pozwalającym na przetworzenie tej szerokiej gamy surowca do postaci nowoczesnego, łatwego w stosowaniu i wydajnego energetycznie biopaliwa stałego. W wyniku ciśnieniowej aglomeracji uzyskujemy zunifikowaną pod względem kształtu, wilgotności, gęstości i wartości opałowej, jednostkę paliwową w formie brykietu lub peletu.

Norma PN-EN ISO 16559 wyróżnia dwa rodzaje brykietów, tj. brykiet drzewny oraz niedrzewny.

**Brykiet drzewny** to zagęszczone biopaliwo wytworzone z/lub bez dodatków, występujące w formie prostopadłościanu, graniastosłupa lub walca o średnicy powyżej 25 mm, otrzymywane w wyniku ciśnieniowego zagęszczania mielonej biomasy. Surowcem do produkcji tego paliwa jest biomasa drzewna w znaczeniu podanym w tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-1.

W przypadku **brykietu niedrzewnego** surowcem do produkcji może być biomasa zielna, owocowa, wodna oraz mieszanki i mieszaniny biomasowe w znaczeniu podanym w tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-1.

Brykiet to blok sprasowanej biomasy najczęściej bez dodatku lepiszcza. Kształt tego bloku w porównaniu do peletu, może być bardzo zróżnicowany. Najczęściej przyjmuje on formę walca o długości równej lub nieznacznie przekraczającej jego średnicę. Inną formą to walec lub graniastosłup o podstawie wielokąta foremnego (kwadratu, sześć- lub ośmiokąta). W tym przypadku długość brykietu zazwyczaj wynosi powyżej 3 – 4 średnic (w przypadku walca) lub średnicy okręgu wpisanego w wielokąt. Dodatkowo brykiety tego typu zazwyczaj posiadają osiowo umieszczony otwór przechodzący przez całą długość brykietu. Trzeci typ brykietu ma formę prostopadłościanu.

Podobnie jak w przypadku brykietów, norma PN-EN ISO 16559 wyróżnia również dwa rodzaje peletów – drzewny oraz niedrzewny.

**Pelet drzewny** to zagęszczone biopaliwo wytworzone z biomasy drzewnej z/lub bez dodatków, zazwyczaj występujące w formie cylindrycznej, o długości z zakresu 5 – 40 mm i maksymalnej średnicy wynoszącej 25 mm, z końcami w postaci przełomów. Surowcem do produkcji tego peletu jest biomasa drzewna w znaczeniu podanym w tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-1.

**Pelet niedrzewny** to zagęszczone biopaliwo wytworzone z rozdrobnionej biomasy z/lub bez dodatków, w formie cylindrycznej o średnicy poniżej 25 mm, długości z zakresu 3,15 – 40 mm i końcami w postaci przełomów uzyskane w wyniku mechanicznego zagęszczania. Surowcem do produkcji peletu niedrzewnego może być biomasa zielna, owocowa, wodna oraz mieszanki i mieszaniny biomasowe w znaczeniu podanym w tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-1. Mieszanki i mieszaniny mogą również zawierać biomasę drzewną.

Pelet w stosunku do brykietów przyjmuje więc jednolitą formę walca o danej, stałej średnicy, nieregularnej podstawie (odłamany fragment prasowanego surowca przechodzący przez otwór matrycy formującej) i zróżnicowanej długości. Inne spotykane nazwy tego paliwa to mikrobrykiet, mikrogranulat, granulat opałowy używane są sporadycznie. Oficjalnie przyjęto spolszczoną formę pelet anglojęzycznego „pellets”. Gęstość właściwa peletu jest wyższa w stosunku do brykietu i przekracza wartość  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 2.6. Parametry jakościowe paliw kompaktowanych

Wymagania jakościowe dotyczą biopaliw przeznaczonych do spalania w kotłach i piecach mniejszej mocy, pracujących w gospodarstwach domowych, małych budynkach komercyjnych i sektora publicznego. Normy mają za zadanie wspieranie wykorzystania biopaliw stałych w instalacjach, gdzie wrażliwość na jakość paliwa jest duża, a paliwo nie spełniające norm jakości może spowodować istotne problemy. Ze względu na fakt, iż systemy spalania małych mocy zazwyczaj nie mają zaawansowanej kontroli przebiegu procesu spalania i oczyszczania spalin, nie są na ogół zarządzane przez profesjonalną obsługę. Są zlokalizowane bezpośrednio w miejscu zamieszkania użytkowników. Muszą więc spełniać przede wszystkim, wysokie parametry jakościowe oraz zapewnić bezpieczeństwo i prawidłowy przebieg procesu spalania. Do tego typu systemów spalania, są dedykowane zwłaszcza paliwa kompaktowane z biomasy drzewnej, których parametry są przedstawione w następujących normach:

- PN-EN ISO 17225-2:2014-07 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 2: Pelety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych,
- PN-EN ISO 17225-3:2014-07 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 3: Brykiety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych.

Do zastosowań indywidualnych przeznaczone są również paliwa kompaktowane z biomasy niedrzewnej, których parametry zawierają normy:

- PN-EN ISO 17225-6:2014-08 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 6: Pelety niedrzewne do zastosowań nieprzemysłowych,
- PN-EN ISO 17225-7:2014-08 Biopaliwa stałe – Specyfikacje paliw i klasy – Część 7: Brykiety niedrzewne do zastosowań nieprzemysłowych.

Jednak stosowanie tych paliw wymaga od użytkownika pewnej ostrożności. Ryzyko stosowania paliw z biomasy niedrzewnej związane jest głównie z jej składem chemicznym. Skład ten może w niewłaściwych warunkach spalania powodować korozję systemów grzewczych oraz przyczyniać się do topnienia popiołu przy niższych temperaturach niż w przypadku biopaliw drzewnych. Dodatkowo paliwa te charakteryzują się większą zawartością popiołu.

Normy zawierają klasy jakości biopaliw kompaktowanych i dla każdej z nich określają dopuszczalne wartości parametrów jakościowych. Parametry te podzielić można na dwie kategorie: niezależne od procesu ciśnieniowej aglomeracji i zależne od tego procesu.

Parametry niezależne od procesu ciśnieniowej aglomeracji to właściwości surowca, których proces aglomeracji nie zmienia. Najważniejsze z nich to: wartość opałowa, zawartość

popiołu, temperatura topnienia popiołu oraz zawartość takich pierwiastków jak:  $N$ ,  $S$ ,  $Cl$ ,  $As$ ,  $Cd$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Pb$ ,  $Hg$  i  $Zn$ , a więc metali ciężkich i pierwiastków przyczyniających się do pogorszenia jakości spalin. Dla przykładu: wysoka zawartość azotu to emisja  $NO_x$ ,  $HCN$  i  $N_2O$ , siarki to emisja  $SO_x$ , a chloru to emisja dioksyn i furanów oraz  $HCl$  wywołującego korozję urządzeń (Hahn, 2004). Są to parametry swoiste dla danego rodzaju biomasy, które należy oznaczyć, by przypisać biomasę do danej klasy jakościowej. Procesy przetwarzania biomasy do postaci biopaliw kompaktowanych nie wpływają lub wpływają tylko nieznacznie na ich wartość. Można obniżyć w niewielkim stopniu np. zawartość popiołu poprzez domieszkę biomasy o niskiej jego zawartości. Natomiast zawartość chloru, siarki i potasu w słomie można obniżyć pozostawiając ją po skoszeniu na polu, aby deszcz i rosa wyługowały z niej związki tych pierwiastków (Robbins i in., 2012).

W związku z powyższym, z punktu widzenia procesu kompaktowania, istotne są parametry jakościowe i wartości progowe które należy uzyskać w tym procesie. Są to: średnica  $D$  oraz długość  $L$ , gęstość nasypowa  $BD$  lub właściwa  $DE$  oraz wytrzymałość mechaniczna  $DU$  wytwarzanego biopaliwa. W tabelach 2.6 – 2.11 przedstawiono właśnie te parametry dla peletów oraz brykietów zarówno drzewnych jak i niedrzewnych. Tabela 2.11 zawiera wymagania dla peletów niedrzewnych do zastosowań przemysłowych, których jakość może być nieznacznie niższa w porównaniu do brykietów i peletów do zastosowań indywidualnych – nieprzemysłowych, przedstawionych w pozostałych tabelach.

Ogólnie, wymagania stawiane paliwom drzewnym są wyższe w porównaniu do paliw niedrzewnych. Spowodowane jest to właściwościami tego rodzaju biomasy wpływającymi na proces aglomeracji, które nie pozwalają uzyskać tak wysokiej jakości jak w przypadku biomasy drzewnej.

Tabela 2.6.

*Wartości parametrów jakościowych peletu drzewnego do zastosowań nieprzemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji*

| Pelet drzewny                                |                                       | Klasa jakości                                                                    |                                                                                  |                                                                                  |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                 | Jednostka                             | A1                                                                               | A2                                                                               | B                                                                                |
| Średnica $D$ i długość $L$<br>ISO 17829      | (mm)                                  | $D06, 6 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$<br>$D08, 8 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$ | $D06, 6 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$<br>$D08, 8 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$ | $D06, 6 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$<br>$D08, 8 \pm 1$ ;<br>$3,15 < L \leq 40$ |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134              | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M10 \leq 10$                                                                    | $M10 \leq 10$                                                                    | $M10 \leq 10$                                                                    |
| Wytrzymałość mechaniczna $DU$<br>ISO 17831-1 | (%, <sub>ar</sub> )                   | $DU97,5 \geq 97,5$                                                               | $DU97,5 \geq 97,5$                                                               | $DU96,5 \geq 96,5$                                                               |
| Dodatki                                      | (%, <sub>ar</sub> )                   | $\leq 2$ podać rodzaj                                                            | $\leq 2$ podać rodzaj                                                            | $\leq 2$ podać rodzaj                                                            |
| Gęstość nasypowa $BD$<br>ISO 17828           | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                                                     | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                                                     | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                                                     |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-2*



Tabela 2.7.

Wartości parametrów jakościowych peletu drzewnego do zastosowań przemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji

| Pelet drzewny przemysłowy                    |                                       | Klasa jakości                               |                                             |                                             |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                 | Jednostka                             | I1                                          | I2                                          | I3                                          |
| Średnica $D$ i długość $L$<br>ISO 17829      | (mm)                                  | $D06 - D08, D \pm 1;$<br>$3,15 < L \leq 40$ | $D06 - D10, D \pm 1;$<br>$3,15 < L \leq 40$ | $D06 - D12, D \pm 1;$<br>$3,15 < L \leq 40$ |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134              | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M10 \leq 10$                               | $M10 \leq 10$                               | $M10 \leq 10$                               |
| Wytrzymałość mechaniczna $DU$<br>ISO 17831-1 | (%, <sub>ar</sub> )                   | $DU97,5 \geq 97,5$                          | $DU97,0 \geq 97,0$                          | $DU96,5 \geq 96,5$                          |
| Dodatki                                      | (%, <sub>ar</sub> )                   | $\leq 3$ podać rodzaj                       | $\leq 3$ podać rodzaj                       | $\leq 3$ podać rodzaj                       |
| Gęstość nasypowa $BD$<br>ISO 17828           | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                | $BD600 \geq 600$<br>max. 750                |

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 2 normy PN-EN ISO 17225-2

Geometria paliw dyktowana jest głównie przez system spalania, a jej uzyskanie w procesie aglomeracji nie stanowi większego problemu. Mimo, że norma ogólna PN-EN ISO 17225-1 uznaje jako pelet paliwo w kształcie walca o średnicy do 25 mm to, wysokojakościowy pelet drzewny zgodnie z normą PN-EN ISO 17225-2 powinien mieć średnicę 6 lub 8 mm i maksymalną długość 40 mm. Związane jest to z tym, że pelet jest paliwem, którego proces spalania może i powinien być prowadzony w zautomatyzowanych systemach. Konstrukcja systemów podających paliwo do spalania jest dostosowana do ujednoliconego geometrycznie paliwa – podajniki te mają zazwyczaj średnicę kilku cm – w związku z czym pelet o większej średnicy i długości, mógłby powodować powstawanie zatorów i nieciągłości lub niejednorodności w strumieniu podawanego paliwa, a co za tym idzie zakłócenia samego procesu spalania. Większy zakres średnic i długości ( $D$  w zakresie 6-25 mm,  $L$  do 50 mm) dopuszcza się w przypadku peletu niedrzewnego (tab. 2.8 i 2.9). Jednak użytkownik decydujący się na stosowanie tego paliwa – zwłaszcza charakteryzującego się górnymi wartościami średnicy i długości – musi do jego spalania wykorzystać system, w którym te zwiększone gabaryty aglomeratu nie będą powodować zakłóceń procesu podawania i spalania paliwa.

W przypadku brykietów ich cechy geometryczne są bardziej zróżnicowane niż w przypadku peletu, dlatego normy nie określają ich konkretnie – wymagają jedynie podania ich charakterystycznych wymiarów wraz z opisem kształtu (tab. 2.10 i 2.11).

W przypadku wilgotności  $M$  peletu drzewnego, bez względu na jego klasę jakości i zastosowanie, jej wartość nie może być wyższa od 10%. Dla peletu niedrzewnego przyjmuje się, że: klasa A – do 12%, klasa B 15% Natomiast pelet niedrzewny, wykonany ze słomy zbóż lub miskanta olbrzymiego, powinien charakteryzować się wilgotnością do 10% (tak jak pelet drzewny), a z mozgi trzcinowatej do 12%. Wilgotność brykietu drzewnego klasy

A1 i nieдрzewnego klasy A to maksymalnie 12%, natomiast brykiet drzewny klasy A2 i B oraz nieдрzewny klasy B może zawierać do 15% wilgoci.

Tabela 2.8.

*Wartości parametrów jakościowych peletu nieдрzewnego do zastosowań nieprzemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji*

| Pelet<br>nieдрzewny ogólnie                  | Klasa jakości                         |                                                                                                          |                                                                                                          |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                 | Jednostka                             | A                                                                                                        | B                                                                                                        |
| Średnica $D$ i długość $L$<br>ISO 17829      | (mm)                                  | $D06 - D25, D \pm 1$ ;<br>Dla $D06 - D10$<br>$3,15 < L \leq 40$<br>Dla $D12 - D25$<br>$3,15 < L \leq 50$ | $D06 - D25, D \pm 1$ ;<br>Dla $D06 - D10$<br>$3,15 < L \leq 40$<br>Dla $D12 - D25$<br>$3,15 < L \leq 50$ |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134              | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M12 \leq 12$                                                                                            | $M15 \leq 15$                                                                                            |
| Wytrzymałość mechaniczna $DU$<br>ISO 17831-1 | (%, <sub>ar</sub> )                   | $DU97,5 \geq 97,5$                                                                                       | $DU96,5 \geq 96,5$                                                                                       |
| Dodatki                                      | (%, <sub>ar</sub> )                   | $\leq 5$ podać rodzaj                                                                                    | $\leq 5$ podać rodzaj                                                                                    |
| Gęstość nasypowa $BD$<br>ISO 17828           | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $BD600 \geq 600$                                                                                         | $BD600 \geq 600$                                                                                         |

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-6

Tabela 2.9.

*Wartości parametrów jakościowych peletu ze słomy zbóż, mискanta olbrzymiego i mozgi trzcinowatej do zastosowań nieprzemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji*

| Pelet<br>nieдрzewny                          | Jednostka                             | Klasa jakości                                                                                            |                                                                                                          |                                                                                                          |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                 |                                       | Słoma zbóż                                                                                               | Miskant olbrzymi                                                                                         | Mozga trzcinowata                                                                                        |
| Średnica $D$<br>i długość $L$<br>ISO 17829   | (mm)                                  | $D06 - D25, D \pm 1$ ;<br>Dla $D06 - D10$<br>$3,15 < L \leq 40$<br>Dla $D12 - D25$<br>$3,15 < L \leq 50$ | $D06 - D25, D \pm 1$ ;<br>Dla $D06 - D10$<br>$3,15 < L \leq 40$<br>Dla $D12 - D25$<br>$3,15 < L \leq 50$ | $D06 - D25, D \pm 1$ ;<br>Dla $D06 - D10$<br>$3,15 < L \leq 40$<br>Dla $D12 - D25$<br>$3,15 < L \leq 50$ |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134              | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M10 \leq 10$                                                                                            | $M10 \leq 10$                                                                                            | $M12 \leq 12$                                                                                            |
| Wytrzymałość mechaniczna $DU$<br>ISO 17831-1 | (%, <sub>ar</sub> )                   | $DU97,5 \geq 97,5$                                                                                       | $DU97,5 \geq 97,5$                                                                                       | $DU96,5 \geq 96,5$                                                                                       |
| Dodatki                                      | (%, <sub>ar</sub> )                   | Podać ilość i rodzaj                                                                                     | Podać ilość i rodzaj                                                                                     | Podać ilość i rodzaj                                                                                     |
| Gęstość nasypowa $BD$<br>ISO 17828           | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $BD600 \geq 600$                                                                                         | $BD580 \geq 580$                                                                                         | $BD550 \geq 550$                                                                                         |

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 2 normy PN-EN ISO 17225-6

Tabela 2.10.

Wartości parametrów jakościowych brykietu drzewnego do zastosowań nieprzemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji

| Brykiet drzewny                                                          | Jednostka                             | Klasa jakości         |                       |                       |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                                             |                                       | A1                    | A2                    | B                     |
| Średnica $D$ ,<br>długość $L_1$ ,<br>szerokość $L_2$ ,<br>wysokość $L_3$ | (mm)                                  | Podać wymiary         | Podać wymiary         | Podać wymiary         |
|                                                                          | (%, <sub>ar</sub> )                   | Podać kod kształtu    | Podać kod kształtu    | Podać kod kształtu    |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134                                          | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M12 \leq 12$         | $M15 \leq 15$         | $M15 \leq 15$         |
| Dodatki                                                                  | (%, <sub>ar</sub> )                   | $\leq 2$ podać rodzaj | $\leq 2$ podać rodzaj | $\leq 2$ podać rodzaj |
| Gęstość właściwa<br>$DE$<br>ISO 18847                                    | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $DE1,0 \geq 1,0$      | $DE0,9 \geq 0,9$      | $DE0,9 \geq 0,9$      |

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-3

Tabela 2.11.

Wartości parametrów jakościowych brykietu niedrzewnego do zastosowań nieprzemysłowych, zależnych od procesu aglomeracji, na podstawie tabeli 1 normy

| Brykiet niedrzewny                                                       | Jednostka                             | Klasa jakości         |                       |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parametr i metoda oznaczania                                             |                                       | A                     | B                     |
| Średnica $D$ ,<br>długość $L_1$ ,<br>szerokość $L_2$ ,<br>wysokość $L_3$ | (mm)                                  | Podać wymiary         | Podać wymiary         |
|                                                                          | (%, <sub>ar</sub> )                   | Podać kod kształtu    | Podać kod kształtu    |
| Zawartość wody $M$<br>ISO 18134                                          | (%, <sub>ar</sub> )                   | $M12 \leq 12$         | $M15 \leq 15$         |
| Dodatki                                                                  | (%, <sub>ar</sub> )                   | $\leq 5$ podać rodzaj | $\leq 5$ podać rodzaj |
| Gęstość właściwa<br>$DE$<br>ISO 18847                                    | (kg·m <sup>-3</sup> , <sub>ar</sub> ) | $DE0,9 \geq 0,9$      | $DE0,6 \geq 0,6$      |

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1 normy PN-EN ISO 17225-7

Różnica w dopuszczalnych poziomach wilgoci w paliwie jest ściśle związana z procesem aglomeracji. Zakres wilgotności 10 – 15% to zakres optymalny z punktu widzenia ciśnieniowego zagęszczania biomasy, surowce o niższej zawartości naturalnych lepiszczy (na ogół biomasa zielna) wymagają wyższej wilgotności w celu uzyskania wyższej gęstości, a zwłaszcza wytrzymałości mechanicznej.

Z przedstawionymi parametrami wiąże się także ilość dodatków, które mogą być mieszane z surowcem bazowym. Dodaje się je w celu poprawy parametrów energetycznych paliwa, zmniejszenia emisji, a najczęściej w celu poprawy przebiegu procesu produkcji. Dodatki te pełnią najczęściej funkcję lepiszcza, jednak ich ilość nie może przekroczyć, w przypadku peletu niedrzewnego do zastosowań indywidualnych 2%, a do zastosowań przemysłowych 3%. Dla uzyskania zadawalającego poziomu *DU* i *BD* peletu niedrzewnego, można zastosować do 5% dodatków. Natomiast w przypadku peletów wytwarzanych ze słomy zbóż, miskanta olbrzymiego lub mozgi trzcinowatej ilość dodatku nie jest limitowana. Brykiet drzewny może zawierać do 2% dodatków, a niedrzewny do 5%.

W każdym przypadku ilość i rodzaj dodatku powinien być podany do wiadomości użytkownika. Dodatkiem spełniającym funkcję lepiszcza mogą być naturalne produkty zawierające skrobię, tłuszcze, pektyny, ligninę, itp.

Zwiększenie wartości parametrów będące bezpośrednim efektem ciśnieniowego zagęszczania biomasy dotyczy: gęstości właściwej *DE* i nasypowej *BD* oraz wytrzymałości mechanicznej *DU*. Ujednolicona gęstość nasypowa (czy też właściwa) gwarantuje zbliżone wartości gęstości energetycznej paliwa – niezależnie od zastosowanego surowca. Natomiast wysoka wytrzymałość mechaniczna gwarantuje bezpieczne i nieuciążliwe użytkowanie paliwa. Brak w paliwie frakcji drobnej i pyłów to brak zapylenia podczas operacji logistycznych, zarówno na etapie dostawy i składowania ale przede wszystkim podczas załadunku zbiorników i zasobników systemów spalania.

Gęstość nasypowa peletu, niezależnie od przeznaczenia i pochodzenia surowca, powinna wynosić co najmniej  $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Wyjątek stanowi pelet z miskanta olbrzymiego dla którego dolna granica gęstości to  $580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , i mozgi trzcinowatej odpowiednio  $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Taka wartość gęstości nasypowej *BD* gwarantuje gęstość właściwą *DE* peletu powyżej  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jednocześnie warto zwrócić uwagę, iż norma nie zaleca przekraczania gęstości nasypowej peletu powyżej  $750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Zbytńo zagęszczone biopaliwo może spowalniać przebieg procesu spalania lub powodować jego niepełne spalanie.

W przypadku brykietu normy podają wymagane dolne granice gęstości właściwej *DE*. Brykiet drzewny klasy A1 to minimalna gęstość  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , a klasa A2 i B oraz brykiet niedrzewny klasy A to gęstość na poziomie  $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Bardzo niski poziom gęstości właściwej wymagany jest dla brykietu niedrzewnego klasy B – tylko  $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

W większości przypadków wymagana minimalna wytrzymałość mechaniczna *DU* peletów to 97,5% (pelet drzewny klasy A1, A2, I1 oraz pelet niedrzewny klasy A oraz wykonany ze słomy zbóż i miskanta olbrzymiego). Wytrzymałość minimalna na poziomie 97% wymagana jest dla peletu drzewnego klasy I2. Pelet drzewny klasy B, oraz I3, pelet niedrzewny klasy B i wytworzony z mozgi trzcinowatej powinien charakteryzować się wytrzymałością nie mniejszą niż 96,5%. Oznacza to, że w masie gotowego peletu może znajdować się, w zależności od klasy jakości, co najwyżej od 2,5 do 3,5% frakcji poniżej 3,5 mm.

Różnica w rodzaju wymaganej gęstości (nasypowa dla peletu, właściwa dla brykietu) wynika ze zróżnicowania sposobu dystrybucji tych paliw. Pelet traktowany jest objętościowo natomiast brykiet jednostkowo. Dodatkowo, ze względu na ten fakt w trakcie operacji logistycznych peletu następują procesy przesypywania, okruszania itp. Dlatego norma wymaga odpowiedniego poziomu wytrzymałości paliwa na te niszczące go procesy. Brykiet, jest zazwyczaj pakowany w opakowania jednostkowe i układany na paletach, co mi-

minimalizuje powstawanie uszkodzeń w trakcie operacji logistycznych. Dlatego też normy nie definiują wymaganego poziomu wytrzymałości mechanicznej. Jednak brykiety, zwłaszcza w formie cylindrycznej, podobnie jak pelet, w niektórych przypadkach są dystrybuowane objętościowo z narażeniem na te same czynniki uszkadzające co pelet. W takim przypadku informacja o wytrzymałości mechanicznej wydaje się nieodzowna. Również w przypadku brykietów stosowanych w pomieszczeniach mieszkalnych (kominki, piece kaflowe, itp.) wysoka trwałość mechaniczna jest pożądana przez użytkowników. Zwłaszcza, że nie zawsze uzyskanie pożądanej gęstości jest skorelowane z wysoką wytrzymałością mechaniczną paliw kompaktowanych (Wróbel i in., 2018; Frączek, 2010).

Biorąc pod uwagę powyższe wartości progowe głównych parametrów uzyskiwanych w trakcie zagęszczania, tj. gęstości i wytrzymałości mechanicznej, znamiennym jest fakt, iż nie są one na jednakowym poziomie. Każda z norm wymaga oczywiście ich wysokich wartości, ale takich, które są realnie do osiągnięcia. O ich poziomie decydują zarówno parametry procesu, ale i właściwości surowca. Biomasa niedrzewna pozwala uzyskać nieco niższą jakość biopaliwa – stąd też niskie wymagania dla peletu z mozgi trzcinowatej (wyższych niż te zawarte w tabeli najczęściej nie da się uzyskać). Wynika stąd jednoznacznie, że cechy jakościowe paliw kompaktowanych zależą od parametrów procesu aglomeracji, ale też w dużym stopniu od potencjału aglomeracyjnego surowca, tzn. podatności na zagęszczanie i kompaktowanie.

## 2.7. Zagęszczanie materiałów

Ciśnieniowe zagęszczanie rozdrobnionych materiałów prowadzone w sposób zamierzony, stosowane jest powszechnie w wielu dziedzinach gospodarki. Warto tu wymienić choćby przemysł farmaceutyczny, chemiczny, spożywczy, paszowy, metalurgiczny, wydobywczy i oczywiście paliwowy z biopaliwami stałymi łącznie. Jak już wspomniano wcześniej cel główny tego procesu to uzyskanie zagęszczonego i trwałego produktu („granuli”) o powtarzalnym kształcie, wymiarach i właściwościach jakościowych wymaganych przez daną gałąź przemysłu. Uzyskanie tych parametrów zależy oczywiście od czynników procesowych, które jednak w większości przypadków są odpowiednio dobrane do właściwości zagęszczanego surowca, tj. do jego podatności na zagęszczanie (lub zagęszczalności z ang. compressibility) i podatności na scalanie lub inaczej kompaktowanie (kompaktowalności z ang. compactibility). Powyższe pojęcia (compressibility i compactibility) stosuje się powszechnie w badaniach dotyczących zwłaszcza zagęszczania materiałów w przemyśle farmaceutycznym, natomiast praktycznie nie występują w badaniach dotyczących zagęszczania biomasy do postaci biopaliw stałych. Ze względu jednak na fakt, iż definiują one dwie najważniejsze cechy materiału zagęszczanego (wymieniona powyżej podatność na zagęszczanie i scalanie), na potrzeby niniejszej pracy wprowadzono te dwa pojęcia tłumacząc je jako *ZAGĘSZCZALNOŚĆ* i *KOMPAKTOWALNOŚĆ*.

Już w 1947 roku Schwarzkopf określił kompaktowalność, jako minimalne ciśnienie potrzebne do wytworzenia pożądanej wytrzymałości, a zagęszczalność wskazuje poziom, do jakiego gęstość materiału wzrasta przy zadanym ciśnieniu. Obecnie te dwa parametry definiowane są szerzej a mianowicie (Aziz i in., 2018; Ghori i Conway, 2016; Janewicz i Kosturkiewicz, 2016):

- **Zagęszczalność** materiału ziarnistego – to jego zdolność do zmniejszenia objętości, a co za tym idzie zwiększania gęstości, w wyniku działania ciśnienia wywieranego na ten materiał.
- **Kompaktowalność** – to zdolność materiału do tworzenia wytrzymałej mechanicznie granuli w wyniku działania ciśnienia wywieranego na ten materiał.

Można zatem uznać, że opis relacji zachodzących pomiędzy ciśnieniem zagęszczania, zagęszczeniem oraz wytrzymałością uzyskanej granuli pozwala na charakterystykę procesu ciśnieniowego zagęszczania. Badania realizowane w pracy bazują na powyższym założeniu.

## ZAGĘSZCZALNOŚĆ

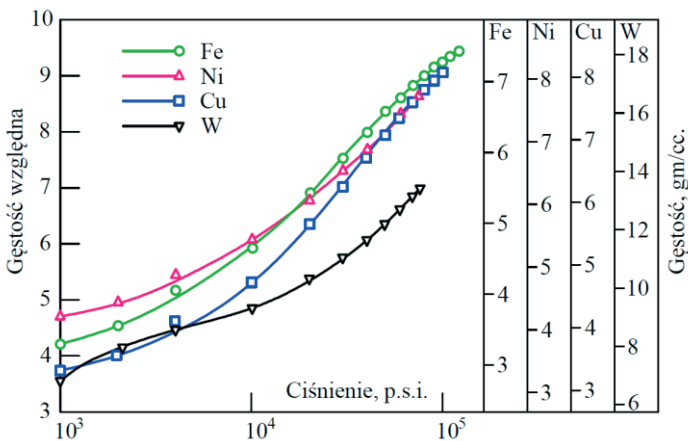
Zagęszczalność opisywana jest zależnością gęstości, porowatości  $\varepsilon$  lub stopnia wypełnienia  $\phi$  od zastosowanego ciśnienia zagęszczania  $P$ .

Spośród matematycznych modeli procesu zagęszczania popularną jest teoria Heckla (1961). Badając proces zagęszczania proszków metali wykreślił on zależność uzyskanej gęstości względnej  $D_w$  zagęszczanego proszku od zadanego ciśnienia  $P$  (rys. 2.13). Gęstość względna  $D_w$  wyrażona jest zależnością:

$$D_w = \frac{D_c}{AD}$$

gdzie:

- $D_c$  – gęstość materiału w trakcie zagęszczania,
- $AD$  – gęstość bezwzględna materiału.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Heckel, 1961)

Rys. 2.13. Zależności gęstości względnej i gęstości zagęszczanych proszków metali (żelazo, nikiel, miedź, wolfram) od ciśnienia zagęszczania  $P$

Próbując opisać te zależności matematycznie opracował teorię bazującą na reakcji chemicznej pierwszego rzędu czyli takiej, w której szybkość reakcji  $r$  jest proporcjonalna do stężenia  $c$  tylko jednego reagenta (Bursa, 1979). Równanie kinetyczne ma formę:

$$r = kc$$

gdzie:

- $r$  – szybkość reakcji,
- $c$  – stężenie substratu  $A$ ,
- $k$  – stała szybkości reakcji.

Jeśli reagenty są wymieszane idealnie to równanie bilansu masy składnika  $A$  przyjmuje postać:

$$\frac{dc}{dt} = -kc$$

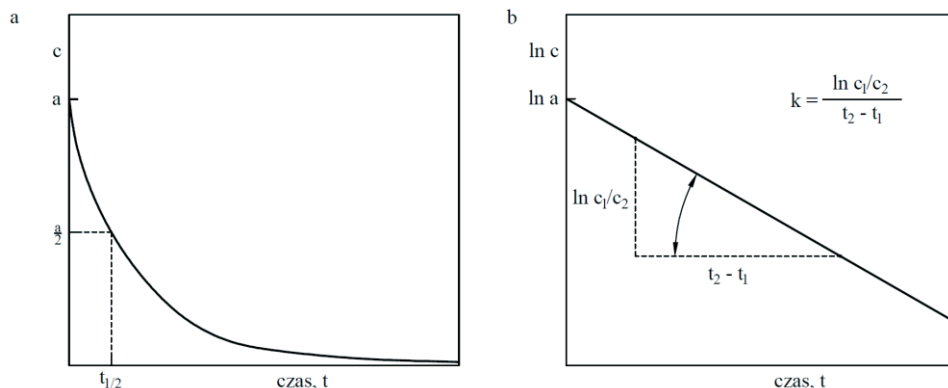
A po rozdzieleniu zmiennych i scałkowaniu:

$$\ln c = -kt + \ln a$$

gdzie:

- $a$  – początkowe stężenie substratu  $A$ ,
- $t$  – czas reakcji.

Zależności te można przedstawić w postaci wykresów: krzywej wykładniczej w układzie współrzędnych  $c, t$  (rys 2.14a) i prostej o współczynniku kierunkowym  $k$  w układzie  $\ln c, t$  (rys. 2.14b).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Bursa, 1979)

Rys. 2.14. Krzywe kinetyczne reakcji pierwszego rzędu:  $c$  – stężenie substratu  $A$ ,  $a$  – stężenie początkowe substratu  $A$ ,  $k$  – stała szybkości reakcji,  $t_{1/2}$  – czas połowicznej przemiany.  $a$  – krzywa wykładnicza w układzie współrzędnych  $c, t$ ;  $b$  – prosta o współczynniku kierunkowym  $k$  w układzie  $\ln c, t$



Przez analogię do powyższego opisu Heckel zaproponował, by porowatość materiału zagęszczanego  $\varepsilon$  uznać za reagent a zagęszczenie za produkt. Wtedy kinetykę procesu można opisać za pomocą proporcjonalności między zmianą gęstości względnej  $D_w$  wraz ze zmianą ciśnienia, a frakcją porów. Jeśli porowatość  $\varepsilon$  zapiszemy w postaci:

$$\varepsilon = 1 - D_w$$

to:

$$\frac{dD_w}{dP} = K(1 - D_w)$$

gdzie:

- $P$  – ciśnienie zagęszczania,
- $K$  – stała proporcjonalności.

Rozdzielając zmienne:

$$\frac{dD_w}{(1 - D_w)} = K dP$$

i całkując:

$$\int_{D_0}^{D_w} \frac{dD_w}{(1 - D_w)} = K \int_0^P dP$$

gdzie:

- $D_{w0}$  – gęstość względna materiału przy zerowym ciśnieniu.

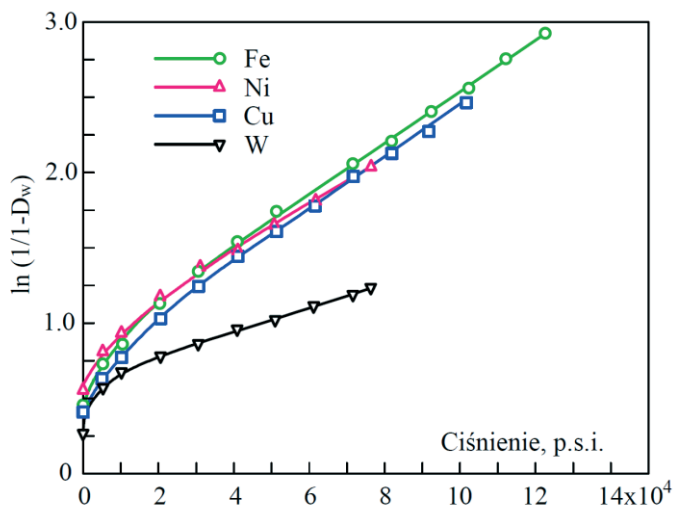
Po przekształceniu możemy zapisać:

$$\ln(1 - D_{w0}) - \ln(1 - D_w) = KP$$

lub:

$$\ln\left(\frac{1}{1 - D_w}\right) = KP + \ln\left(\frac{1}{1 - D_{w0}}\right)$$

Heckel sprawdził prawdziwość tej analizy, wykreślając zależności  $\ln(1/(1-D_w))$  od  $P$  dla badanych proszków metali (rys. 2.15). Mimo, że nie wszystkie dane z całego zakresu ciśnienia leżą na linii, liniowość istnieje dla 65 – 80% badanego zakresu. Nieliniowość we wczesnym etapie zagęszczania jest wg Heckla spowodowana procesem przegrupowania cząstek proszku i ogólnym zachowaniem proszku jako jeszcze pojedynczych cząstek, a nie koherencyjnej masy.



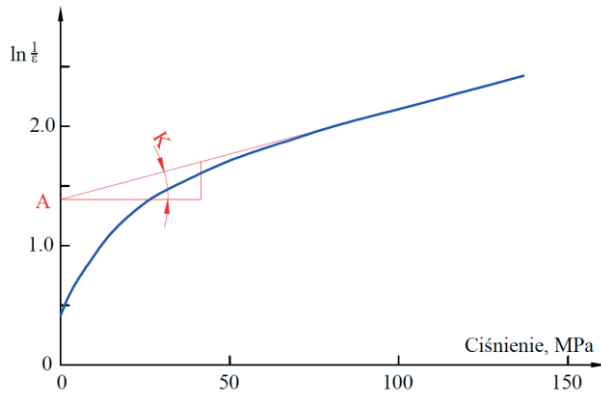
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Heckel, 1961)

Rys. 2.15. Zależności  $\ln(1/(1-D_w))$  zagęszczanych proszków metali (żelazo, nikiel, miedź, wolfram) od ciśnienia zagęszczania  $P$

Z uwagi na to, że wyznaczone zależności wykazują zakrzywienie przy niskich ciśnieniach, zatem nie opisują procesu ilościowo. Heckel zastąpił element wzoru  $\ln(1/(1-D_w))$  stałą  $A$ , i uzyskał w efekcie wyrażenie opisujące proces ilościowo, z wyjątkiem najniższych ciśnień.

$$\ln\left(\frac{1}{1-D_w}\right) = KP + A$$

Początkowy, zakrzywiony fragment wykresu związany jest z zagęszczaniem, które wynika z mechanizmu indywidualnego ruchu cząstek bez wystąpienia wiązań międzycząsteczkowych. Przejście z fragmentu zakrzywionego do liniowego odpowiada ściśle minimalnemu ciśnieniu koniecznemu do utworzenia spójnej granuli. Zagęszczenie, które jest reprezentowane przez liniowy fragment wykresu, następuje w wyniku plastycznych odkształceń cząstek i przy znacznej obecności połączeń międzycząsteczkowych. Heckel stwierdził również, że stała  $A$ , która zawsze jest nieco większa niż  $\ln(1/(1-D_{w0}))$ , reprezentuje stopień zagęszczenia osiągnięty przy niskim ciśnieniu, a stała  $K$  będąca nachyleniem liniowego fragmentu, daje miarę zdolności materiału do zagęszczania poprzez plastyczne odkształcenie (rys 2.16). Wysokie wartości stałej  $K$  wskazują na zdolność substancji do odkształcenia plastycznego przy niskim ciśnieniu.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2.16. Oznaczenie stałych  $A$  i  $K$  na wykresie Heckla

Za teorią Heckla wprowadzane zostały kolejne. I tak Shapiro (1971) zmodyfikował model Heckla do postaci:

$$\ln \varepsilon = \ln \varepsilon_0 - kP - lP^{0,5}$$

gdzie:

$\varepsilon$  – porowatość początkowa materiału zagęszczanego,  $k$  i  $l$  – stałe.

Z kolei Kawakita i Lüdde (1971) zaproponowali liniową zależność:

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{ab} + \frac{P}{a}$$

gdzie:

$C$  oznacza stopień zmniejszenia objętości wyrażony jako:

$$C = \frac{V_0 - V}{V_0}$$

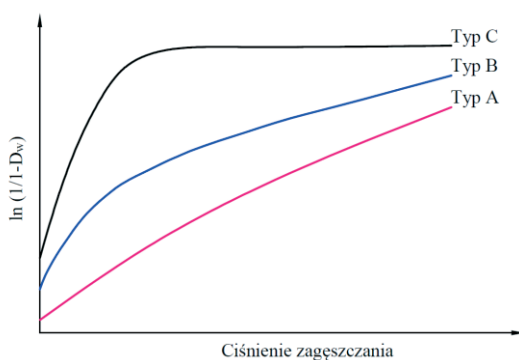
gdzie:

$V_0$  – objętość początkowa materiału,  
 $V$  – objętość materiału po zagęszczeniu,  
 $a$  i  $b$  – stałe.

Pośród przytoczonych modeli warto jeszcze raz podkreślić szczególną wartość zależności Heckla. Wartość ta wynika z możliwości identyfikacji dominującej formy deformacji w materiale. Znajduje ona zastosowanie przy rozróżnieniu substancji, które zagęszczają się poprzez fragmentację, a tych, które poprzez deformację plastyczną. Pozwala ocenić plastyczność materiału. Miękkie materiały łatwo ulegają odkształceniu plastycznemu, a materiały twarde zazwyczaj najpierw poddawane są zagęszczeniu przez fragmentację, aby

zapewnić gęstsze upakowanie. Twarde, kruche materiały są na ogół trudniejsze do zagęszczenia niż miękkie (Odeku, 2016).

Wyróżnia się trzy typy krzywych Heckla (rys. 2.17). Typ A charakteryzuje się liniową zależnością, co oznacza, że materiał odkształca się plastycznie. Taką zależnością charakteryzują się materiały miękkie, łatwo ulegające odkształceniu plastycznemu. Typ B to typowy przykład, w którym w początkowym okresie cząsteczki materiału reorganizują się w wyniku zmiany położenia lub kruszenia, dopiero drugi etap oznacza odkształcenia plastyczne. Trzeci typ charakteryzuje się bardzo stromym pierwszym etapem oznaczającym, że nie występuje tu reorganizacja cząstek tylko materiał szybko traci porowatość w wyniku odkształceń cząstek i ich scalaniu. Hersey i Rees (1975) oraz York i Pilpel (1972) zaproponowali klasyfikację proszków bazującą na omówionych typach wykresów i tak typ A to materiał miękki, B – materiał twardy, C – materiał bardzo twardy.



Źródło: opracowanie własne

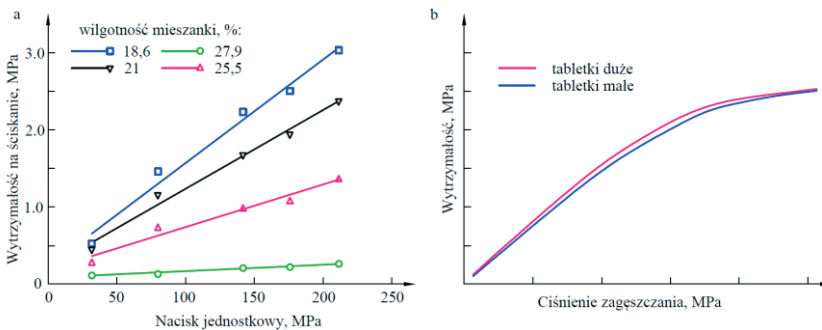
Rys. 2.17. Typy krzywych Heckla

Nordström wraz z zespołem opracowali procedurę klasyfikacji proszków w aspekcie ich zagęszczalności bazującą na wykresach Heckla oraz modelach Shapiro i Kawakity i podzielił proszki na 4 grupy: bardzo miękkie, miękkie, umiarkowanie twarde i twarde (Nordström et al., 2012).

Oprócz przytoczonych modeli charakteryzujących zmianę gęstości materiału w trakcie jego zagęszczania, można spotkać jeszcze kilka innych modeli. Ich szeroki przegląd znajdziemy w publikacjach (Adapa i in., 2009; Al-Hashimi i in., 2018; Mallick, 2014; Nordström i in., 2012; Peciar i in., 2016; Popescu i Vidu, 2018). Jednak to model Kawakity i Shapiro, a zwłaszcza Heckla stosowane są najczęściej w wielu gałęziach przemysłu. Jest on bardzo popularny w przemyśle farmaceutycznym (Ghori i Conway, 2016; Hooper i Clarke, 2016; Leuenberger i Rohrer, 1986; Šantl i in., 2011; Sun i Grant, 2001; Amidon, i in., 2016; Katz i Buckner, 2017), spożywczym (Mahmoodi i in., 2013; Skonecki i in., 2014), metalurgicznym (Heckel, 1961; Li i An, 2017; Minerich i Labuza, 2003; Popescu i Vidu, 2018). Również do oceny zagęszczalności rozdrobnionej biomasy podejmowane są próby zastosowania wspomnianych modeli (Adapa i in., 2009; Mani i in., 2003, 2004; Tabil i Sokhansanj, 1997).

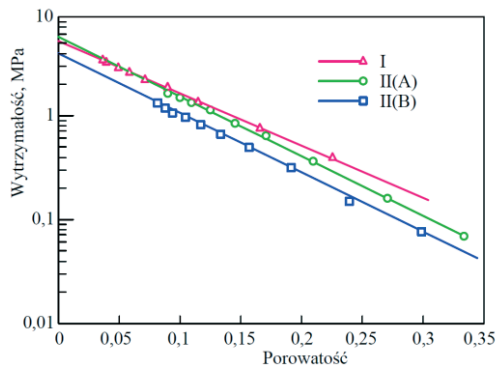
## KOMPAKTOWALNOŚĆ

Kompaktowalność opisywana jest zależnością uzyskanej wytrzymałości granuli od zastosowanego ciśnienia zagęszczania  $P$  lub też w zależności od porowatości. Ze względu na to, w literaturze spotkać się można z opisem kompaktowalności w postaci zależności wytrzymałości od ciśnienia co przedstawiono na rysunku 2.18 (Janewicz i Kosturkiewicz, 2016; Krstic i in., 2018) lub częściej wytrzymałości od porowatości (rys. 2.19) lub parametru z nią powiązanego jakim jest współczynnik wypełnienia (Feng i in., 2007; Ghori i Conway, 2016; Huang, 2013; Joiris i in., 1998; Sun, 2011; Changquan i in., 2016). W przypadku zależności wytrzymałości od ciśnienia, wielu autorów, zwłaszcza z branży farmaceutycznej, określa ją mianem podatności na tabletkowanie – z ang. *tableability* (Feng i in., 2007; Ghori i Conway, 2016; Huang, 2013; Joiris i in., 1998; Sun, 2011).



Źródło: opracowanie własne na podstawie: a – (Janewicz i Kosturkiewicz, 2016), b – (Sun, 2011)

Rys. 2.18. Kompaktowalność jako zależność wytrzymałości od ciśnienia zwana również tabletkowalnością: a – mieszanka węgla brunatnego z biomasą o różnej wilgotności b – tabletki o różnej wielkości



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Feng i in., 2007)

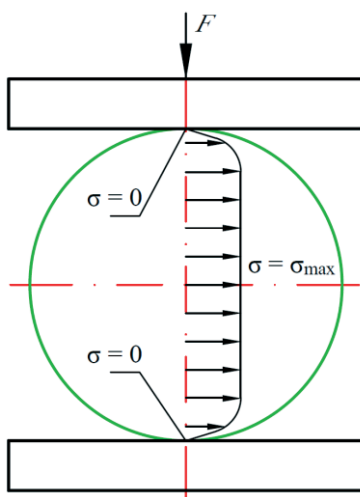
Rys. 2.19. Kompaktowalność jako zależność wytrzymałości od porowatości, materiał: sulfmerazyna typu I, II(A) i II(B)

Miernikami wytrzymałości są najczęściej: twardość, maksymalna siła niszcząca, wytrzymałość na ściskanie wzdłuż osi (Bacher i in., 2007; Leuenberger i Rohera, 1986; Murakami i in., 2001; Sonnergaard, 2006; Vo i Navard, 2016). Najczęściej jednak miernikiem tym jest wytrzymałość  $\sigma$  na ściskanie wzdłuż średnicy granuli (rys. 2.20) określana w tzw. teście brazylijskim (Janewicz i Kosturkiewicz, 2016; Krstic i in., 2018; Mansa i in., 2008; Stelte i in., 2012; Sun, 2011). Wytrzymałość ta, dla granuli w kształcie walca, określana jest z zależności:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi DL}$$

gdzie:

- $F$  – siła niszcząca,
- $D$  – średnica granuli,
- $L$  – długość granuli.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Sun, 2011)

Rys. 2.20. Test brazylijski – rozkład naprężenia

Dostępne są również równania pozwalające określić wytrzymałość na ściskanie granu o innym kształcie (Hiestand i Smith, 1984; Newton i in., 1972; Pitt i in., 1989; Stanley i Newton, 1980). Kompaktowalność jest zatem określana w sposób ilościowy wg różnych metod jak i modeli. Przegląd tych metod i modeli przedstawiono w tabeli 2.12 (Sonnergaard, 2006).

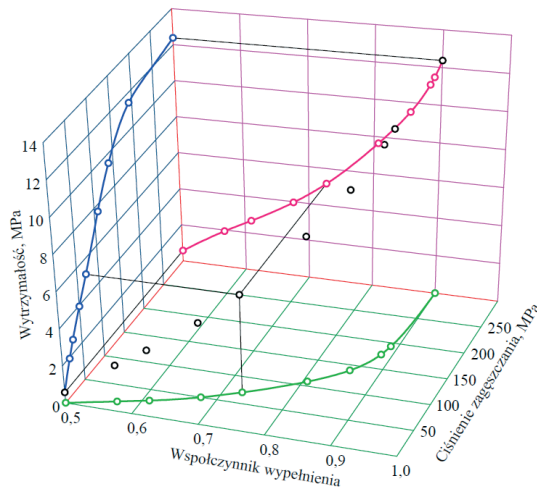
Tabela 2.12.

Zestawienie metod i modeli opisujących kompaktowalność w ujęciu ilościowym

| Rodzaj metody                                                                                                                                                                                                                     | Model                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| jednopunktowa                                                                                                                                                                                                                     | Ciśnienie przy CF = 8 Kp                                    |
|                                                                                                                                                                                                                                   | CS przy ciśnieniu = 150 MPa                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                   | CS przy porowatości = 15%                                   |
| zależność wytrzymałość – ciśnienie                                                                                                                                                                                                | $CS = a \cdot P + b$                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $CS = a \cdot \log(P) + b$                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $\log(CS) = a \cdot \log(P) + b$                            |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $CS = k \cdot P^{1/2}$                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $\ln(-\ln(1 - CS/CS_{\max})) = a \cdot \ln P + b$           |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $F1 = \log(\sqrt{2}) \cdot (CF_i + 2CF_{i+1} + CF_{i+2})/2$ |
| zależność wytrzymałość – porowatość                                                                                                                                                                                               | $H = H_{\max}(1 - \exp(-\gamma \rho P))$                    |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $CS = CS_0 \cdot \exp(-k \cdot \varepsilon)$                |
|                                                                                                                                                                                                                                   | $CS = k(\rho - \rho_c)^{2,7} + CS_0$                        |
| CF siła niszcząca; CS wytrzymałość w tym wytrzymałość na ściskanie; $H$ twardość (Brinella); $P$ maksymalne ciśnienie zagęszczania; $\varepsilon$ porowatość granuli; $\rho$ gęstość granuli; pozostałe symbole są stałymi modeli |                                                             |

Źródło: (Sonnergaard, 2006)

Określenie relacji pomiędzy ciśnieniem zagęszczania, wytrzymałością i współczynnikiem wypełnienia granuli są niezbędne by zrozumieć i scharakteryzować proces ciśnieniowego zagęszczania. Przykład tych relacji przedstawia rysunek 2.21 (Amidon i in., 2016).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Amidon i in., 2016)

Rys. 2.21 Relacje pomiędzy ciśnieniem zagęszczania, wytrzymałością i współczynnikiem wypełnienia granuli



Bazując na relacjach wytrzymałość-ciśnienie dla różnych materiałów można dokonać ich klasyfikacji. Proszki klasyfikowane są na VI kategorii wg roli jaką w trakcie zagęszczania pełnią powierzchnie kontaktu oraz wytrzymałość wiązań pomiędzy cząstkami materiału (Sun, 2011), i tak:

Kategoria I – powierzchnie kontaktu jak i wytrzymałość wiązań przyjmują wysokie wartości zarówno przy niskim ( $< 50$  MPa) i wysokim ( $> 300$  MPa) ciśnieniu zagęszczania. Do tej klasy należą materiały plastyczne o wysokiej energii powierzchniowej. Przykładem takiego materiału jest mikrokrystaliczna celuloza (MCC) a więc materiał biomasowy.

Kategoria II – duża powierzchnia kontaktu i niska wytrzymałość wiązań, która w tej kategorii jest dominującym czynnikiem scalającym. Do tej klasy należą materiały plastyczne ale o bardzo niskiej energii powierzchniowej. Wysoka plastyczność umożliwia generowanie dużego obszaru kontaktu, jednak wytrzymałość granuli pozostaje niska ze względu na niewielką siłę wiązań, zarówno przy niskim jak i wysokim ciśnieniu. Przykładem jest stearynian magnezu.

Kategoria III – niska siła wiązań i duża powierzchnia kontaktu, przy czym w tej kategorii to ten drugi czynnik jest dominujący. Ta klasa materiałów jest wysoce plastyczna i ma niską energię powierzchniową. Dużą powierzchnię kontaktu można łatwo uformować przy niskim ciśnieniu ze względu na wysoką plastyczność materiału. Wytrzymałość granuli wzrasta szybko do maksimum w obszarze niskiego ciśnienia. Dalszy wzrost ciśnienia nie wywołuje już wzrostu wytrzymałości. Do tej kategorii należą miękkie polimery.

Kategoria IV – mała powierzchnia kontaktu ale duża siła wiązań, która jest czynnikiem dominującym. To klasa materiałów twardych wykazujących się wysoką energią powierzchniową. Przy niskim ciśnieniu występują niewielkie odkształcenia plastyczne zatem nawet silne wiązania na niewielkiej powierzchni nie powodują wysokiej wytrzymałości granuli. Dopiero przy wyższym ciśnieniu cząstki ulegają odkształceniom plastycznym, zwiększa się powierzchnia kontaktu a wysoka siła wiązań powoduje uzyskanie wytrzymałej granuli. Przykładem jest powszechnie stosowany w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym dwuwodny wodorofosforan wapnia.

Kategoria V – mała powierzchnia kontaktu, która jest czynnikiem dominującym ale duża siła wiązań. Materiały tej kategorii są bardzo twarde i mają wysoką energię powierzchniową. Ta kategoria różni się od kategorii IV tym, że materiały nie ulegają odkształceniu plastycznemu przy niskim ani wysokim ciśnieniu. Tak więc w całym zakresie ciśnienia cząstki ulegają głównie odwracalnej deformacji sprężystej. W omawianym zakresie ciśnień z tych materiałów nie da się wytworzyć trwałych granul. Przykładem tego typu materiału jest piasek.

Kategoria VI – mała powierzchnia kontaktu i mała siła wiązania. Materiały tej kategorii są elastyczne i nie ulegają znaczącym odkształceniom plastycznym. Po zagęszczeniu, ze względu na odwracalny charakter elastycznych deformacji, powstają tylko nieliczne, słabe wiązania punktowe. Z tego typu materiałów nie da się wytworzyć wytrzymałych granul. Przykładem materiałów tej klasy może być rozdrobniona guma.

Jak już wspomniano, określeń: zagęszczalność, kompaktowalność oraz tabletkowalność używa się powszechnie do charakterystyki surowca w aspekcie procesu ciśnieniowego zagęszczania w przemyśle farmaceutycznym, chemicznym, spożywczym, paszowym. Jednak praktycznie nie występują one w literaturze dotyczącej ciśnieniowego zagęszczania

rozdrobnionej biomasy, zwłaszcza określenie kompaktowalność (zarówno jako zależność wytrzymałości od porowatości jak i wytrzymałości od ciśnienia) występuje sporadycznie.

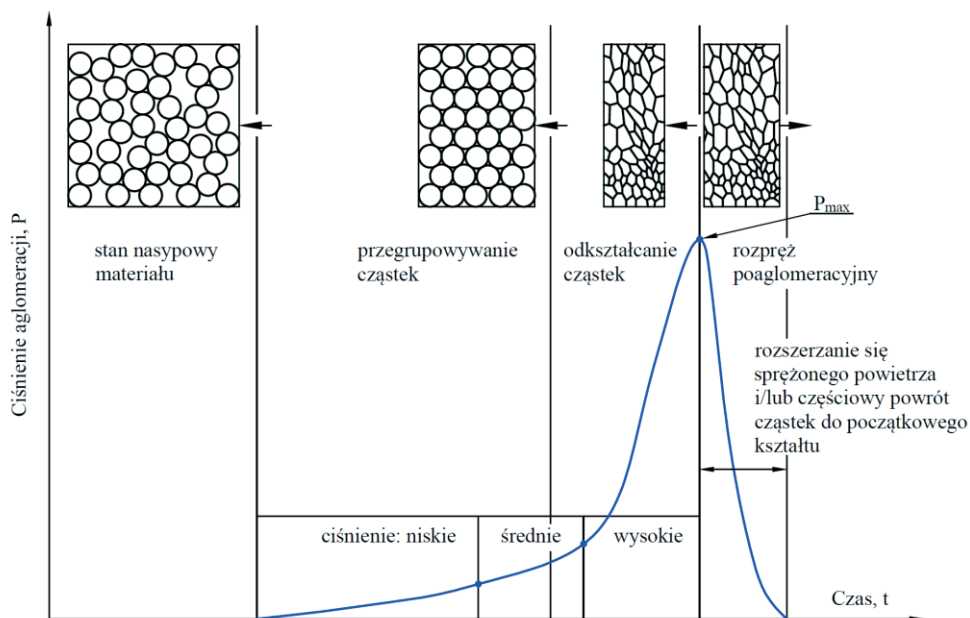
## 2.8. Proces ciśnieniowej aglomeracji

Ciśnieniową aglomerację można ogólnie zdefiniować jako proces zagęszczania złoża materiału ziarnistego wywołany działaniem ciśnienia. Częstki materiału ziarnistego umieszczone w zamkniętej lub niby zamkniętej komorze, poddane działaniu ciśnienia wywołanego np. ruchem tłoka, łączą się w całość tworząc aglomerat o kształcie komory. Na rysunku 2.22 przedstawiono w sposób schematyczny jak w czasie aglomeracji przebiegają zmiany w strukturze zagęszczanego materiału wywołane wzrostem ciśnienia, jak przebiega krzywa ciśnienia oraz jaki stan osiąga materiał na poszczególnych etapach procesu. Schemat zakłada jednostajną w czasie zmianę objętości komory zagęszczania, a tym samym objętości materiału (zmniejszenie objętości do momentu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego i zwiększenie objętości po jego zaniku). W pierwszym etapie luźno upakowane cząstki materiału są przegrupowywane i lepiej dopasowywane do siebie, jednak ze względu na niską wartość ciśnienia nie zmieniają swojego kształtu ani rozmiarów. Początkowy stan luźnego upakowania cząstek zmienia się w stan gęstego upakowania. Wzrasta liczba punktów kontaktu pomiędzy cząstkami materiału. W drugim etapie cząsteczki już nie mogą zmieniać swojego położenia, wzrasta ciśnienie, w wyniku czego następuje odkształcenie cząstek, a następnie zmiana ich rozmiaru. Cząsteczki kruche pękają, a elastyczne odkształcają się. W zależności od materiału w powstającym aglomeracie przeważa jeden lub drugi rodzaj zmian. Po osiągnięciu maksymalnego ciśnienia proces zagęszczania jest przerywany i w idealnych warunkach krzywa ciśnienia powinna natychmiast spaść do zera (linia pionowa). Nie dzieje się tak jednak ze względu na rozpręż poaglomeracyjny, który jest w mniejszym stopniu spowodowany rozszerzaniem się sprężonego pomiędzy cząsteczkami powietrza, a głównie sprężystością odkształconych cząstek zagęszczanego materiału. Pomiedzy przedstawionymi etapami nie ma wyraźnych granic. Cały proces przebiega płynnie, a umowne granice etapów można założyć w punktach przecięć krzywej ciśnienia. Materiał w stanie nasypowym od momentu pojawienia się ciśnienia do uzyskania jego wartości maksymalnej jest materiałem zagęszczonym, a w momencie zaniku ciśnienia i w przypadku, gdy materiał nie wróci do początkowej objętości jest materiałem kompaktowanym.

Ciśnieniowe zagęszczanie rozdrobnionego, ziarnistego materiału wywołuje ruch cząstek i ich odkształcenie. W wyniku tego cząsteczki w początkowej fazie zbliżają się do siebie i stykają się w punktach kontaktu, które po odkształceniu, tworzą powierzchnie styku.

Jednak aby powstała trwała granula (aglomerat), cząstki muszą się ze sobą na trwałe połączyć, właśnie w punktach i powierzchniach kontaktu. Tylko wtedy po zaprzestaniu działania ciśnienia, cząsteczki materiału pozostaną w położeniu i kształcie wywołanym ciśnieniem (nie licząc rozkurczu poaglomeracyjnego). Położenie cząstki w kompaktie determinowane i utrzymywane jest przez cząstki z nią sąsiadujące. W przypadku odkształceń należy wyróżnić odkształcenia sprężyste (nietrwałe – cząstka po ustaniu działania ciśnienia dąży do powrotu do kształtu wyjściowego) i plastyczne (trwałe – ciśnienie wywołało przekroczenie granicy sprężystości materiału i jego uplastycznienie, w wyniku czego cząstka przyjmuje nowy, trwały kształt). Zatem powstające połączenia cząstek na granicy

ich styku muszą być na tyle silne i trwałe by nie tylko utrzymać cząstki w nowym położeniu, ale przede wszystkim przeciwdziałać sprężystości cząstek, która jest głównym czynnikiem niszczącym powstałe połączenia.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Pietsch, 2002)

Rys. 2.22 Mechanizm procesu ciśnieniowej aglomeracji

Jakie zatem mechanizmy powodują łączenie się cząstek surowca rozdrobnionego? Rumpf (1962, 1977) zaproponował 5 kategorii mechanizmów wywołujących połączenia między ziarnami w punktach i powierzchniach kontaktu. Są to:

- Stałe mostki powstające w wyniku wzajemnej dyfuzji molekuł ze stykających się cząstek materiału. Warunki podwyższonej temperatury sprzyjają i intensyfikują powstawanie tego typu połączeń. Ciepło może być doprowadzone z zewnątrz bądź też jest wywołane tarciem towarzyszącym procesowi zagęszczania. Trwałe mostki powstają również w wyniku krzepnięcia, twardnienia lepiszczy. Często powstają też w wyniku krzepnięcia składników stopionych w reakcjach chemicznych lub krystalizacji substancji rozpuszczonych w cieczy.
- Adhezja czyli oddziaływanie powierzchniowe stykających się ziaren, ale i kohezja czyli oddziaływanie międzycząsteczkowe, np. występujące w substancjach wiążących, które ograniczają lub uniemożliwiają swobodne przemieszczanie się cząstek materiału. Najczęściej te oddziaływania występują wspólnie. W przypadku substancji lepkich powstają bardzo cienkie warstwy adsorpcyjne łączące cząstki w podobny sposób jak mostki stałe.

- Mechaniczne połączenia kształtowe blokujące wzajemny ruch połączonych cząstek. Występujące w wyniku deformacji, najczęściej w cząstkach o kształcie nieregularnym, włóknistym, płytkowym. Kształt regularny cząstek – kula, elipsoida – nie wywołuje tego typu wiązań.
- Siły ciśnienia kapilarnego w złożach ziaren przemieszczalnych. Siły te tworzą silne wiązania zarówno w mostkach cieczowych jak i w przestrzeniach kapilarnych. Zanikają jednak wraz z odparowaniem wody i jeśli ich funkcji nie przejmą inne mechanizmy cząstki materiału przestają być ze sobą połączone. Siła tych połączeń związana jest z istnieniem międzyfazowego napięcia powierzchniowego.
- Siły Van der Waalsa czyli siły wzajemnego przyciągania występujące pomiędzy ziarnami. Łączenie ziaren następuje wtedy gdy nastąpi ich wystarczające zbliżenie. Siły te rosną wraz ze zmniejszaniem rozmiarów ziaren.

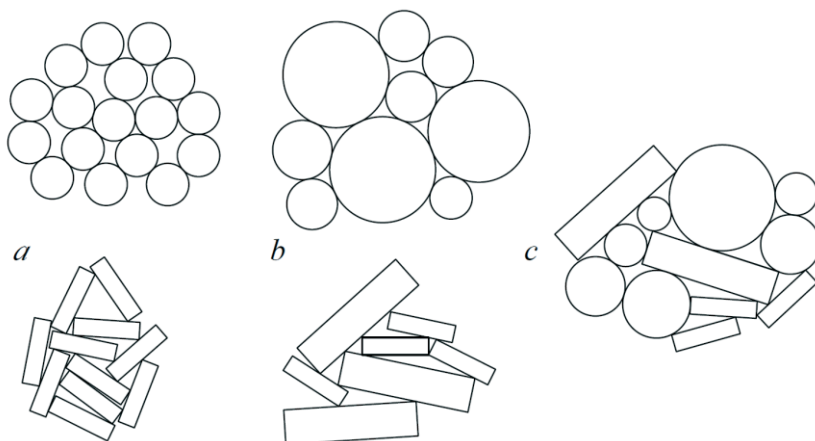
## 2.9. Struktura rozdrobnionego materiału biomasowego

Rozdrobniony materiał biomasowy pochodzenia roślinnego to kompozycja pozostających we wzajemnym kontakcie stałych cząstek materiału (ziaren – faza stała) oraz cieczy i gazu – faza ciekła i gazowa (Križan, 2015). Zarówno faza ciekła jak i gazowa wypełnia puste przestrzenie pomiędzy ziarnami materiału, tzw. pory zewnętrzne. Biomasa lignocelulozowa ze względu na swoją charakterystyczną budowę przestrzenną (patrz podrozdział 2.2) posiada duże ilości porów wewnętrznych. Są to w większości pory otwarte (biomasa ma budowę kapilarną, porowatą struktury plastra miodu), które w żywej roślinie pełniły funkcje przewodzące. Po rozdrobnieniu biomasy pory te również wypełnione są fazą gazową lub cieczą (w zależności od wilgotności surowca). Kapilarna budowa powoduje również to, że biomasa charakteryzuje się wysoką chłonnością fazy ciekłej. Mniejszość stanowią pory wewnętrzne zamknięte, w których znajduje się faza gazowa lub ciekła i z których ruch tych faz jest najbardziej ograniczony. Ilość cieczy w stosunku do gazu zarówno w porach zewnętrznych jak i wewnętrznych może się zmieniać. Dodana woda pokrywa powierzchnię cząstek stałych skąd wnika do wewnętrznych porów samych cząstek, co znacznie zmienia ich geometryczne (pęcznienie) i fizyczne właściwości (np. sprężystość, gęstość). Pory otwarte zwiększają powierzchnię cząstek natomiast liczba, rozmiar i kształt porów (swoisty dla danego typu biomasy) wpływa na gęstość właściwą cząstek oraz ich wytrzymałość.

Właściwości mechaniczne rozdrobnionej biomasy zależne są także od rozmieszczenia cząstek w zajmowanej przestrzeni, które to można określić jako strukturę lub teksturę materiału rozdrobnionego. Strukturę materiału ziarnistego określa geometria ziaren, ich ułożenie przestrzenne i interakcje zachodzące pomiędzy nimi. Interakcje te zachodzą głównie w punktach, gdzie cząsteczki stykają się ze sobą. Liczba tych punktów wynika z rozmiaru, kształtu, chropowatości i wytrzymałości cząstek. Parametry te zależą od typu biomasy oraz w dużym stopniu od zastosowanej techniki rozdrabniania w wyniku której cząstki uzyskują różny kształt i wielkość.

Wszystkie wymienione czynniki powodują, że mieszanina cząstek biomasy ma charakter niejednorodny, heterogeniczny (mimo dokładnego wymieszania można w niej rozróżnić skupiska frakcji drobnych i grubych, cząstki o różnym składzie – kora, drewno oraz kształcie i ułożeniu w przestrzeni) – jest to tzw. tekstura lub makrostruktura materiału ziarnistego.

go. Wyróżnić można rozdrobnione materiały biomasowe składające się z ziaren o zbliżonym do siebie kształcie i wielkości, tzw. monodispersyjne (rys. 2.23a) oraz o zbliżonym do siebie kształcie, jednak zróżnicowane pod względem wielkości, tzw. polidispersyjne (rys. 2.23b). Najbardziej złożoną makrostrukturą i równocześnie najczęściej spotykaną jest mieszanina o cząstkach o różnym kształcie i rozmiarze (rys. 2.23c).



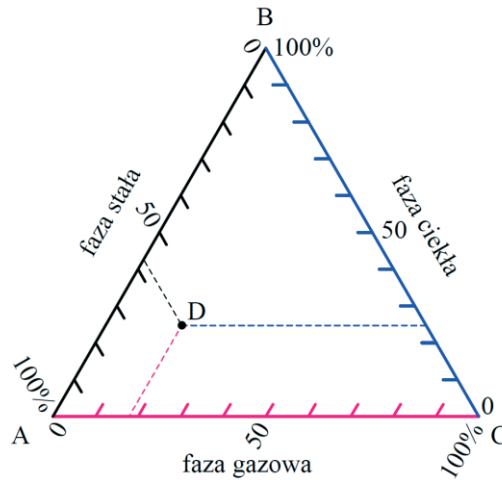
Źródło: opracowanie własne

Rys. 2.23. Rodzaje materiału rozdrobnionego: a – monodispersyjne, b – polidispersyjne, c – mieszane

W aspekcie ciśnieniowej aglomeracji biomasy istotnym jest poznanie więc składu ziarnowego i kształtu cząstek tworzących złożę rozdrobnionej biomasy. Rozmiar cząstek i ich kształt determinują liczbę punktów kontaktu w całym złożu, a tym samym wpływają na mechanizmy wiążące i siłę tych wiązań podczas zagęszczania (co będzie omówione w dalszej części pracy).

Czynniki wpływające na strukturę rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej można podzielić na trzy grupy: I – specyfika samych cząstek, II – przestrzenny rozkład i ułożenie ziaren w złożu, III – interakcje pomiędzy cząsteczkami. Do pierwszej grupy należy zaliczyć zarówno parametry indywidualne jak i grupowe cząstek: gęstość, wilgotność, kształt, rozmiar, zakres wymiarowy i strukturę wymiarową. Najczęściej stosowanym sposobem opisu tych cech jest określenie gęstości właściwej i bezwzględnej, składu granulometrycznego, skumulowanego rozkładu wielkości ziarna oraz środkowej wartości wielkości ziarna  $d_{50}$ . Powyższe parametry bezpośrednio kształtują drugą i trzecią grupę czynników.

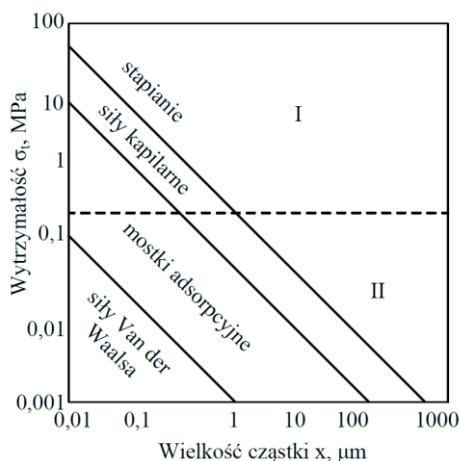
Druga grupa czynników określa ułożenie cząstek w przestrzeni zajmowanej przez złożę. Najprostszy opis tego ułożenia to określenie gęstości nasypowej rozdrobnionego materiału. Bazując na gęstości właściwej, bezwzględnej i nasypowej możliwe jest określenie porowatości złoża, zewnętrznej, wewnętrznej jak i całkowitej. Znając te parametry i uwzględniając wilgotność materiału możliwe jest określenie składu fazowego rozdrobnionego materiału biomasowego (rys. 2.24).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Križan, 2015)

Rys. 2.24. Diagram składu fazowego

Trzecia grupa to punkty kontaktu pomiędzy cząsteczkami tworzącymi złożę. To w tych miejscach w wyniku obciążenia powstawać będą połączenia cząstek. Połączenia te można podzielić na dwa rodzaje: wywołane niewielkim obciążeniem zewnętrznym (np. masą własną materiału), które są określane jako wiązania cienne, oraz połączenia utworzone w wyniku oddziaływania ciśnienia zagęszczania, określane jako wiązania trwałe. Powstają one w wyniku uaktywnienia mechanizmów łączenia cząstek omówionych powyżej. Teoretycznie wyznaczoną wytrzymałość granuli  $\sigma_t$  w zależności do wielkości cząstki  $x$  materiału wyjściowego dla różnych mechanizmów łączenia przedstawiono na rysunku 2.25. Diagram podzielony jest na dwa obszary I i II (przerywana linia pozioma). W obszarze I materiał poddany jest działaniu ciśnienia, które wywołuje odkształcenie cząstek – zatem są one w kontakcie powierzchniowym (Jindra, 1984; Kirsten i in., 2013; Kłassien i Griszajew, 1989). Obszar II, to niższa wartość ciśnienia zagęszczania, przy którym połączenia powstają na granicy punktowych styków między cząstkami. Diagonalne linie wyznaczają regiony, w których działają określone mechanizmy wiążące. Na podstawie tego wykresu można stwierdzić, że w przypadku ciśnieniowej aglomeracji najważniejszym mechanizmem łączącym cząstki jest wytworzenie mostków stałych (różnego typu) na powierzchni styku powstającej w wyniku odkształcenia ziaren. W przypadku aglomeracji biomasy za najważniejsze uznawane są siły ciśnienia kapilarnego (Frączek, 2010). Oczywiście wszystkie przedstawione mechanizmy w mniejszym lub większym stopniu występują podczas procesu ciśnieniowej aglomeracji. Wykres jednoznacznie wskazuje też, że wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia surowca wytrzymałość uzyskanego granulatu wzrasta.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kirsten i in., 2013)

Rys 2.25. Teoretyczna wytrzymałość granuli  $\sigma_t$  w zależności do wielkości cząstki  $x$  materiału wyjściowego dla różnych mechanizmów łączenia

## 2.10. Czynniki aktywujące i wzmacniające mechanizmy tworzenia wiązań

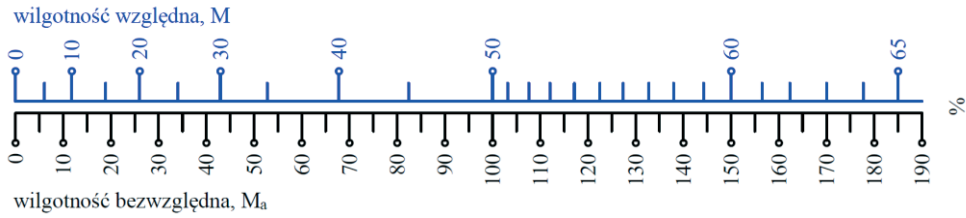
### WILGOTNOŚĆ

Zawartość wody w biomase określana jest mianem wilgotności lub zawartości wilgoci. Rozróżnia się wilgotność bezwzględna  $M_a$  i względną  $M$ . Wilgotność bezwzględna definiowana jest jako masa wody zawarta w biomase w stosunku do masy suchej biomasy. Wilgotność względną natomiast to masa wody w stosunku do wilgotnej biomasy. Obie wyrażane są w procentach. Zależność pomiędzy wilgotnością bezwzględną i względną przedstawiono na rysunku 2.26. Przeliczanie wilgotności bezwzględnej na względną i odwrotnie realizowane jest w oparciu o zależności:

$$M_a = \frac{M}{1 - M}$$

$$M = \frac{M_a}{1 + M_a}$$





Źródło: opracowanie własne na podstawie (Križan, 2015)

Rys. 2.26 Zależność pomiędzy wilgotnością bezwzględną  $M_a$  i względną  $M$

W przypadku biomasy, wodę w niej zawartą można ogólnie podzielić na wodę związaną i wodę wolną. Woda związana to:

- Woda związana chemicznie, która wynika z budowy chemicznej biomasy lignocelulozowej. Polimery holocelulozy, a zwłaszcza wchodzącej w jej skład celulozy, zawierają duże ilości grup wodorotlenowych. Grupy te asocjują poszczególne włókna celulozowe w równolegle ułożone wiązki. Jednocześnie biorą one udział w wiązaniu wody na powierzchni włókien. Jest to woda adsorpcyjna, monomolekularna w postaci cienkiej, monocząsteczkowej, uporządkowanej warstwy pokrywającej powierzchnię ciała stałego (Sarbak, 2000). Woda ta ze względu na silne związanie z powierzchnią ciała stałego nie posiada zdolności zwilżania innych, stykających się ciał. Nie może być ona całkowicie usunięta z materiału metodami fizycznymi np. w wyniku suszenia tylko poprzez prażenie lub spalanie (Pietsch, 2002). Nie ma ona wpływu na właściwości mechaniczne biomasy, a jej zawartość w suchej biomacie wynosi do 4% (Križan, 2015; Prosiński, 1984).
- Drugi typ wody związanej to woda higroskopijna, którą z kolei można podzielić na wodę adsorpcyjną polimolekularną i kapilarną (nasycającą). Woda adsorpcyjna polimolekularna, to cienka warstwa pokrywająca powierzchnię ciała stałego, grubości kilku cząsteczek wody. Tworzy się w wyniku fizycznej adsorpcji wody z powietrza w wyniku oddziaływań międzycząsteczkowych (Van der Waalsa), które determinują proces (Sarbak, 2000). Jej zawartość w biomacie wynosi 5 – 7% i jest trudna do usunięcia w wyniku suszenia nawet w 105°C (Pietsch, 2002; Sarbak, 2000). Woda kapilarna również jest wchłaniana przez biomasę lignocelulozową z powietrza. Wysyca kapilary przestrzennej struktury biomasy o wymiarach  $10^{-8}$  –  $10^{-5}$  cm, (w większości przypadków są to przestrzenie ścian komórkowych) (Berry i Roderick, 2005; Junior i in., 2013; Krzysik, 1961). Maksymalną ilość wody jaką może wchłonać dany rodzaj biomasy wyznacza tzw. punkt nasycenia włókien. Punkt ten odpowiada stanowi równowagi termodynamicznej układu powietrze-materiał przy wilgotności względnej powietrza 100% (Przybysz, 2005). Powyżej tego punktu ustaje wiązanie wilgoci z powietrza. Zakres wilgotności bezwzględnej, odpowiadający punktowi nasycenia włókien dla drewna to 22 – 35% (Scaar, 1988). Przyjmuje się często, że jest to wilgotność  $M_a = 26\%$  (Kollmann i Côté, 1968), a najczęściej 30% (Berry i Roderick, 2005; Hahn, 2004; Krzysik, 1961). Dla gatunków drewna tropikalnego wilgotność ta zawiera się w przedziale 18 – 23% i zależy od gęstości drewna. Praktycznie im wyższa wartość gęstości tym niższy punkt nasycenia włókien (Jankowska i Kozakiewicz, 2016). Zdolność

wchłaniania wody z powietrza przez biomasę lignocelulozową, związana jest z jej przestrzenną kapilarno-porową strukturą omawianą we wcześniejszym rozdziale. Zatem można uznać, że punkt nasycenia włókien niedrzewnej biomasy lignocelulozowej jest zlokalizowany

w podobnym zakresie. Biomasą zawierającą tylko wodę nasycającą nazywamy biomasą wilgotną.

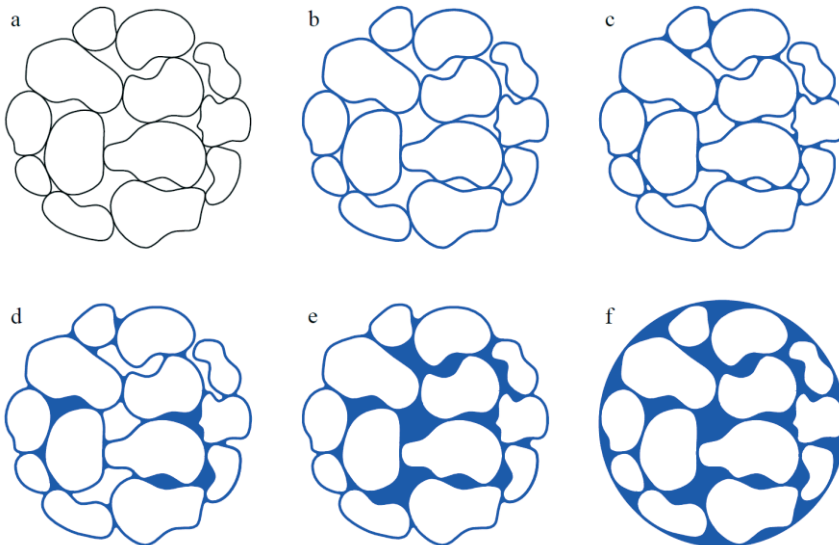
Woda wolna to woda zawarta w kapilarach o średnicy powyżej  $10^{-4}$  cm. Występuje w surowcu po pełnym nasyceniu wodą związaną i jest wchłaniana przez surowiec w postaci fazy ciekłej a nie pary (nawilżanie lub zanurzanie w wodzie). W świeżo pozyskanej biomasie, zwłaszcza biomasie drzewnej, woda wolna występuje powszechnie i stanowi ją woda zawarta w wiązkach przewodzących. Wilgotność bezwzględna świeżo ściętego drewna iglastego wynosi średnio 100 – 150%, drewna liściastego miękkiego 80 – 120%, a twardego 55 – 65% (Krzysik, 1961). W przypadku biomasy zielnej, która pozyskiwana jest po zakończeniu okresu wegetacyjnego wilgotność ta w większości przypadków nie przekracza 50% (Juliszewski i in., 2012; Kwaśniewski i in., 2010; Mudryk i Wróbel, 2010). Biomasą zawierającą wodę wolną określaną jest biomasą mokrą.

Jednym z głównych czynników ułatwiających tworzenie połączeń pomiędzy cząsteczkami rozdrobnionej biomasy, w trakcie ciśnieniowej aglomeracji, jest zawartość wody w surowcu. Dotyczy to zarówno wilgoci zawartej w cząsteczkach jak i wody, którą trzeba dodawać w trakcie zagęszczania lub bezpośrednio przed nim. Liczba i jakość połączeń powstających między cząstkami zależy głównie od nasycenia złoża cieczą. Termin nasycenie cieczą lub saturacja, definiowany jest jako procent pustych przestrzeni w złożu (porów) wypełnionych cieczą (ilość fazy ciekłej, głównie wody, na powierzchni cząstki i pomiędzy nimi). Warunkiem wystąpienia spoistości cząstek stałych wywołanej obecnością cieczy jest zwilżalność ciała stałego przez ciecz. Zgodnie z tym założeniem, możemy rozróżnić następujące stany materiału ziarnistego:

- Stan suchy – nie zawierający fazy ciekłej, puste przestrzenie pomiędzy cząstkami wypełnia tylko faza gazowa, ze względu na wilgotność powietrza stan ten nie występuje w naturalnych warunkach (rys. 2.27a).
- Stan powierzchni adsorpcyjnych – cząsteczki wody w wyniku adsorpcji tworzą na powierzchniach ziaren materiału warstwę tak silnie z nią związaną, że nie wywołują saturacji ani mierzalnej zmiany zawartości wilgoci w cząstkach. Powierzchnie adsorpcyjne powodują wzmożenie oddziaływania sił międzycząsteczkowych (Van der Waalsa), (rys. 2.27b).
- Stan pendularny, w którym już niewielka ilość wody (wywołująca wilgotność kilku dziesiątych procenta i bardzo małą saturację) powoduje, że w punktach kontaktu między cząstkami zaczynają tworzyć się soczewkowate, płynne mostki. Wraz ze wzrostem wilgotności i saturacji mostki te tworzą się we wszystkich punktach kontaktu złoża. Pory w tym stanie w dalszym ciągu wypełnione są fazą gazową. Wytrzymałość tych połączeń determinowana jest przez siły napięcia międzyfazowego na styku fazy ciekłej i gazowej, które wywołują ujemne ciśnienie (rys. 2.27c).
- Stan funikularny – to stan przejściowy, w którym dalszy wzrost nasycenia cieczą powoduje współistnienie zarówno płynnych mostków jak i pewnej liczby porów wypełnionych cieczą. Najczęściej są to pory o najmniejszej objętości. Spójność cząsteczek w tym

stanie wywołuje zarówno napięcie powierzchniowe jak i ciśnienie kapilarne (rys. 2.27d).

- Stan kapilarny, to stan pełnej saturacji, co oznacza, że wszystkie pory całkowicie wypełnione są fazą ciekłą. Spójność aglomeratu wywołana jest w głównej mierze przez ciśnienie kapilarne. Siły napięcia powierzchniowego występują tylko na powierzchni aglomeratu, gdzie ciecz tworzy wklęsłe meniski na końcach porów (rys. 2.27e).
- Stan kropli, w którym objętość cieczy jest większa w porównaniu do początkowej objętości porów. W tym stanie, w kropli cieczy zawarte są ziarna aglomeratu, a spójność wywoływana jest tylko przez napięcie powierzchniowe cieczy otaczającej aglomerat – a raczej „niby” aglomerat (rys. 2.27f).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Pietsch, 2002)

Rys. 2.27. Stany materiału ziarnistego: a – suchy, b – powierzchni adsorpcyjnych, c – pendularny, d – funikularny, e – kapilarny, f – kropli

W przypadku ciśnieniowej aglomeracji biomasy dane literaturowe wskazują, że zakres wilgotności technologicznej surowca powinien zawierać się w przedziale 8 – 18 % (Serrano i in., 2011; Tumuluru i in., 2011). Najczęściej jednak podaje się zakres 10 – 15% (Abdoli i in., 2018; Hu i in., 2015; Tumuluru, 2019). Wspomniane już normy jakościowe wymagają paliwa o wilgotności poniżej 10% (pelet klasy A1) i 12% (brykiet klasy A1). Górna granica wilgotności niższych klas jakości nie przekracza nigdy 15%. Wszystkie przytoczone poziomy dotyczą wilgotności względnej.

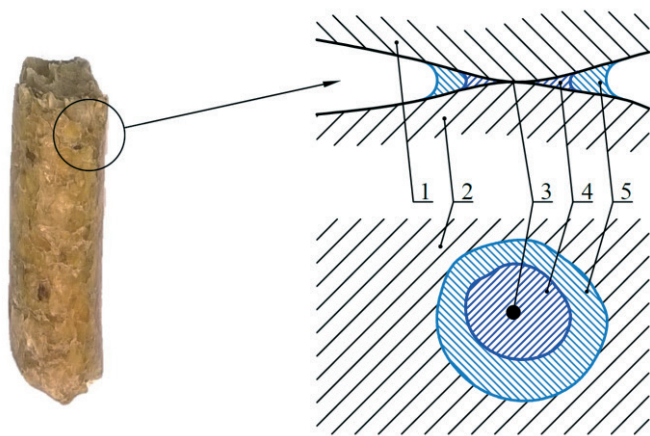
Taka zawartość wody w materiale odpowiada stanowi pendularnemu, który w górnym zakresie wilgotności może przechodzić w stan funikularny. W wyniku działania ciśnienia ciecz zawarta w cząsteczkach jest z nich wyciskana i gromadzi się w punktach kontaktu i powstających powierzchniach kontaktu, gdzie tworzy mostki łączące cząsteczki biomasy.

Często spotykaną praktyką jest dodawanie wody tuż przed procesem aglomeracji. Woda ta nie jest wchłaniana do wnętrza cząsteczki, a jedynie pokrywa jej powierzchnię cienką warstwą, która ma za zadanie wzmocnić siłę łączenia cząstek w mostkach (rys. 2.28). Ciecz dodana w czasie aglomeracji zwilża powierzchnię cząstki, zatem nie musi być z niej wyciskana w wyniku działania ciśnienia.

Wilgoć zawarta w surowcu jak i woda dodana, powodują zmiękczenie jego cząstek, przez co łatwiej ulegają one odkształceniom i wzajemnie dopasowują się do siebie tworząc zwartą granulę z dużą ilością powierzchni kontaktu, na których to cząsteczki łączą się ze sobą. W wyniku odkształceń powstają również połączenia kształtowe pomiędzy cząstkami. Dodatkowo woda obniża opory tarcia surowca względem powierzchni komory zagęszczającej, ale przede wszystkim obniża opory tarcia pomiędzy cząstkami surowca, co ułatwia przemieszczanie dopasowujących się cząstek jak również zwiększa liczbę punktów w których powstają ich połączenia. Natomiast utrata wilgoci powoduje, że uzyskany aglomerat staje się kruchy (Serrano i in., 2011).

Woda rozpuszcza także lub uplastycznia substancje lepiszczowe dodane do zagęszczanego surowca lub zawarte w surowcu.

Podsumowując, woda w odpowiedniej ilości, jest jednym z najistotniejszych czynników aktywujących i wzmacniających praktycznie wszystkie mechanizmy łączenia cząstek.



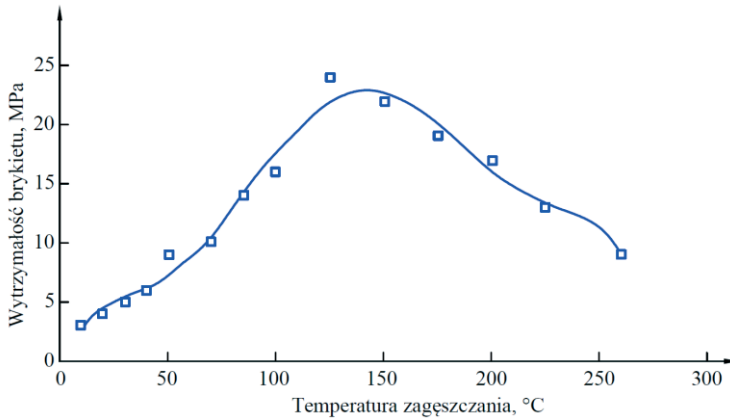
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Friedrich, 1978)

Rys. 2.28. Mechanizm połączenia cząstek biomasy w wyniku działania ciśnienia: 1, 2 – cząstki materiału, 3 – powierzchnia kontaktu cząstek, 4 – ciecz zawarta w cząsteczkach, 5 – ciecz dodana

## TEMPERATURA

W trakcie procesu ciśnieniowej aglomeracji biomasy, w wyniku tarcia, następuje samostny wzrost temperatury lub może być on wywołany przez ciepło dostarczone z zewnątrz. Temperatura na odpowiednim poziomie wpływa pozytywnie na proces. Wzrost temperatu-

ry powoduje uplastycznienie surowca lignocelulozowego poprzez oddziaływanie na jego główny składnik, którym jest lignina. Temperatura powoduje uwalnianie ligniny ze struktury komórkowej i przemieszczenie jej w obszar kontaktu cząstek materiału, gdzie wywołuje silne połączenia adhezyjne. Lignina topi się w temperaturze 130°C (Kaliyan i Morey, 2009; Krzysik, 1975) lub 150°C (Jankowska i Kozakiewicz, 2016; Prosiński, 1984).



*Źródło: opracowanie własne na podstawie (Sitzmann i Buschhart, 2009)*

*Rys. 2.29 Zależność wytrzymałości brykietu od temperatury zagęszczania, ciśnienie zagęszczania  $P = 100$  MPa, wilgotność  $M = 20\%$*

Jak jednak wynika z badań Sitzmanna i Buschharta (2009) aby uzyskać poprawę wytrzymałości aglomeratu, podczas aglomeracji nie jest konieczne uzyskanie temperatury topnienia ligniny (rys. 2.29). Wzrost temperatury do 100°C poprawia jakość aglomeratu i nie powoduje jeszcze nadmiernej utraty wilgotności i części lotnych. Przekroczenie tej temperatury powoduje co prawda dalszy wzrost wytrzymałości ale jednocześnie następuje uwalnianie części lotnych, które są ważne z energetycznego punktu widzenia. Przekroczenie temperatury 150°C wywołuje spadek wytrzymałości. Poprawa wytrzymałości w niższych temperaturach wywołana jest uplastycznieniem ligniny, które ma miejsce na poziomie 120°C (Križan, 2015; Prosiński, 1984). Uplastycznienie to może wystąpić również w niższych temperaturach 75 – 90°C pod warunkiem obecności wody w materiale (Gilbert i in., 2009; Prosiński, 1984) i podwyższonego ciśnienia (Grochowicz, 1996; Hejft, 2002; Kaliyan i Morey, 2010).

Wzrost temperatury powoduje również, że mechanizmy łączenia innych substancji lepiszczowych są aktywowane np.: żelatynizacja skrobi, denaturacja białek, uplastycznienie lub topnienie żywicy (Kaliyan i Morey, 2010; 2009). Temperatura uplastycznia cały surowiec, dzięki czemu ciśnienie aglomeracji wywołuje jego lepsze dopasowanie i powstawanie nowych obszarów kontaktu, w których uplastycznione lepiszcze tworzy bardzo trwałe połączenia. Temperatura powoduje zatem aktywowanie i wzmacnianie wszystkich mechanizmów łączenia cząstek polegających na tworzeniu stałych mostków w obszarze ich

kontaktu. Jest to czynnik niezwykle istotny z punktu widzenia ciśnieniowej aglomeracji biomasy.

## CISNIENIE

Ciśnienie aglomeracji jest podstawowym czynnikiem wywołującym zagęszczenie cząstek materiału i aktywację mechanizmów je łączących. Jak już wspomniano, na początkowym etapie aglomeracji, ciśnienie wywołuje reorganizację struktury ziarnistej, następnie odkształcenia sprężyste cząstek i w końcowym etapie odkształcenia plastyczne. Dalszy wzrost ciśnienia nie wywołuje wzrostu gęstości złoża. Ciśnienie wywołuje więc zbliżenie cząstek, zwiększenie liczby punktów i powierzchni kontaktu, a tym samym spadek porowatości, co utrzuca powstającą strukturę granuli. Wartość ciśnienia wywołująca odkształcenia sprężysto–plastyczne zależy od rodzaju surowca oraz innych czynników takich jak wilgotność surowca, czy temperatura procesu. Krzywa zagęszczania przedstawiająca zależność gęstości aglomeratu od ciśnienia zagęszczania ma postać sigmoidy. Maksymalna wartość gęstości aglomeratu zbliża się do gęstości bezwzględnej surowca.

## LEPISZCZE

W wielu przypadkach, mimo potencjalnej dostępności wszystkich mechanizmów łączących cząstki, oraz zastosowaniu różnych czynników te mechanizmy aktywujących i wzmacniających nie jest możliwe uzyskanie aglomeratu o pożądanej gęstości, a zwłaszcza wytrzymałości. W takim przypadku nieodzowne jest zastosowanie lepiszcza, którego zadaniem jest tworzenie trwałych połączeń w obszarach kontaktu cząstek surowca bazowego.

Rodzaj lepiszcza zależy od aglomerowanego surowca bazowego i przeznaczenia granulatu. W przypadku biomasy przeznaczonej na cele energetyczne normy jakościowe definiują ilość i rodzaj lepiszcza (tab. 2.6 – 2.11). Dodatkami spełniającymi funkcję lepiszcza mogą być tylko naturalne produkty zawierające np. skrobię, tłuszcze, pektyny, ligninę, itp. Ze względu na niewielką ilość dodawanego lepiszcza (do kilku %) muszą one pokryć ziarna materiału bazowego cienką warstwą lub kumulować się w miejscach kontaktu ziaren. Dlatego też stopień rozdrobnienia lepiszczy stałych jest bardzo wysoki. Miesza się je z surowcem bazowym na sucho lub też dodawane są w formie emulsji (Patent nr 175692, 1999). Lepiszczce nie może powodować pogorszenia parametrów energetycznych uzyskanego granulatu oraz nie może powodować przekroczenia dopuszczalnych poziomów pierwiastków, w tym metali ciężkich oraz udziału popiołu (Kuokkanen i in., 2011). Lepiszczce oprócz właściwości technologicznych musi być powszechnie dostępne i tanie – dlatego też najczęściej są to materiały stanowiące produkt uboczny. Do produkcji peletu i brykietu najczęściej stosowane są: lignosulfonian wapnia i sodu oraz skrobia modyfikowana – przeżelatynizowana ([www.foodpol-service.com](http://www.foodpol-service.com)). Inne lepiszcza stosowane w produkcji biopaliw kompaktowanych to: mikroceluloza, dekstryna, lignina, lignit, żywice naturalne, melasa, wycierka ziemniaczana, pektyny itp. (Hu i in., 2015; Pietsch, 2002).

Čzęstym zabiegiem jest tworzenie mieszanek surowców biomasowych zawierających wysoki poziom substancji lepiszczowych (lignina, żywice) z materiałem o ich niższej zawartości np. biomasy drzew iglastych z biomasą drzew liściastych czy biomasą zielną

(Filbakk i in., 2011; Lehmann i in., 2012; Serrano i in., 2011; Wamukonya i Jenkins, 1995; Wenghoefer, 2014), wytłoków lub pofermentu (Kirsten i in., 2013; Ståhl i Berghel, 2011) lub różnej biomasy zielnej (Karbowniczak i in., 2015). Przekłada się to również na poprawę parametrów jakościowych uzyskiwanych granulatów. W przypadku żywicy pamiętać należy, że wyjątek stanowi drewno jodły, które jej nie zawiera i drewno topoli – które ją zawiera wbrew potocznej opinii, że gatunki liściaste nie zawierają żywicy (Krzysik, 1975).

## GEOMETRIA CZĄSTEK I STRUKTURA ZŁOŻA

W wyniku procesów rozdrabniania biomasy otrzymujemy złoże materiału ziarnistego składające się z cząstek o określonym kształcie i wielkości. Te dwie wielkości determinowane są przez rodzaj biomasy oraz zastosowaną technologię rozdrabniania i są uważane za podstawowe parametry surowca wpływające na proces aglomeracji (Hu i in., 2015; Peng i in., 2013; Poddar i in., 2014; Tumuluru i in., 2011). Jak już wspomniano wcześniej struktura uzyskanego materiału ziarnistego determinowana jest przez trzy grupy czynników: I – specyfika pojedynczych cząstek, II – przestrzenny rozkład i ułożenie cząstek w złożu, III – interakcje pomiędzy cząstkami.

Z omawianym zagadnieniem związana jest grupa wielkości których nazwy i definicje są następujące:

- Gęstość bezwzględna  $AD$  – masa fazy stałej biomasy (lignocelulozy) w stosunku do objętości tej fazy bez objętości fazy ciekłej i gazowej.
- Gęstość właściwa  $DE$  – stosunek masy próbki biomasy do jej objętości. Objętość ta to suma objętości fazy stałej, objętości porów wewnętrznych (faza gazowa) i objętości wody w nich zawartej (faza ciekła).
- Gęstość nasypowa  $BD$  – iloraz masy próbki rozdrobnionej biomasy do objętości którą ta próbka zajmuje wraz z objętością pustych przestrzeni pomiędzy cząstkami złoża.
- Porowatość złoża  $\varepsilon$  – procentowy udział porów pomiędzy cząstkami złoża w ogólnej objętości materiału ziarnistego.

### Specyfika pojedynczych cząstek

#### *Rozmiar*

Uzyskany w wyniku rozdrabniania biomasy zakres rozmiarowy ziarna jest jednym z podstawowych parametrów wpływającym na właściwości całego złoża. Wpływa na gęstość nasypową, skład ziarnowy, kąt zsypania, kąt usypu, liczbę koordynacyjną.

Wymiary cząstek definiuje się jako wymiary prostopadłościanu opisanego na danej cząstce, gdzie:

- $c$  – wymiar największy – długość,
- $a$  – wymiar najmniejszy – grubość,
- $b$  – trzeci wymiar – szerokość.

Wielkość cząstki określa wymiar największy  $c$ , tzw. wymiar główny. Wg tego wymiaru, np. są klasyfikowane rozdrobnione paliwa drzewne (porównaj rys. 2.12).



W praktyce oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych realizowane jest jednak wg norm PN-EN ISO 17827-1; PN-EN ISO 17827-2. Oznaczanie to oparte jest na przesiewaniu materiału przez zestaw sit o otworach okrągłych lub kwadratowych, na których rozdział frakcji dokonuje się wg szerokości ziarna  $b$ .

### Kształt

Typ biomasy oraz procesy jej rozdrabniania decydują również o kształcie uzyskanych cząstek. Kształt ten można scharakteryzować opisując go prostymi figurami geometrycznymi oraz wzajemnymi proporcjami wymiarów. W przypadku rozdrobnionej biomasy jej cząstki najbardziej zbliżone są kształtem do czworościanów, sześciątów, prostopadłościaków lub też graniastosłupów. W badaniach spotyka się również sferoidy, elipsoidy czy sferocyndry (Donev i in., 2004; Jia i in., 2007; Li i in., 2014; Li i in., 2010). Współczynniki kształtu opisują wzajemne relacje wymiarów cząstki (Donev i in., 2004; Frączek i Wróbel, 2006; Grochowicz, 1996; Mohsenin, 1986) oraz pozwalają je podzielić na:

- cząstki jednodmiarowe – kuliste, sześciennie czyli cząstki o wymiarach podstawowych zbliżonych do siebie (drobnoziarniste frakcje, pył),
- cząstki owalne lub spłaszczone – dwa wymiary są znacznie większe od trzeciego wymiaru (wióry, płatki),
- cząstki wydłużone, włókna – dwa wymiary są znacznie mniejsze od trzeciego, cząstki o znacznym wydłużeniu w jednym kierunku (włókno, frakcje pyłu o średniej grubości).

Celem uproszczenia opisu kształtu, podejmowane są również próby scharakteryzowania cząstek za pomocą jednego wymiaru, a zatem zastąpienie jej kulą. W przypadku brył wiele ich cech opisywanych jest za pomocą jednej liczby (masa, objętość, pole powierzchni). Określenie któregośkolwiek z tych parametrów pozwala porównać go do tzw. kuli równoważnej i wyznaczyć jej średnicę określaną jako średnicę zastępczą cząstki. Bazując zatem na różnych sposobach pomiaru cząstki można określić tzw. średnicę zastępczą cząstki (tabela 2.13).

Tabela 2.13.

*Wybrane metody wyznaczania średnicy zastępczej cząstki*

| Symbol   | Nazwa                            | Opis                                                                                                                                                                               |
|----------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $d_s$    | rozmiar sitowy                   | Minimalna średnica oczka lub rozmiar boku kwadratowego oczka w sicie, przez które zdołało przejść ziarno. Zastosowanie w analizie sitowej wg PN-EN ISO 17827-1 i PN-EN ISO 17827-2 |
| $d_p$    | rozmiar powierzchniowy           | średnica kuli o takiej samej powierzchni jak rozpatrywane ziarno                                                                                                                   |
| $d_v$    | rozmiar objętościowy             | średnica kuli o takiej samej objętości jak rozpatrywane ziarno                                                                                                                     |
| $d_R$    | rozmiar projekcyjny              | średnica kuli o takiej samej powierzchni przekroju jak powierzchnia rzutu ziarna na płaszczyznę jego stabilnego spoczynku                                                          |
| $d_{sw}$ | rozmiar wg powierzchni właściwej | średnica kuli o takim samym stosunku powierzchni do objętości jak rozpatrywane ziarno                                                                                              |
| $d_F$    | średnica Fereta                  | średnia odległość pomiędzy dwoma równoległymi liniami st stycznymi do rzutu ziarna                                                                                                 |

*Źródło: opracowanie własne na podstawie (Drzymala, 2001)*

### *Gęstość bezwzględna*

W rozdziale omawiającym budowę strukturalną biomasy, wspomniano o gęstości kompozytu lignocelulozowego. Zwrócono uwagę, że gęstość ta, niezależnie od rodzaju biomasy, przyjmuje w przybliżeniu stałą wartość i określa się ją gęstością bezwzględną  $AD$  biomasy. Przyjmuje się, że gęstość bezwzględna biomasy wynosi średnio  $1540 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Prosiński, 1984) i zależy w głównej mierze od udziału holocelulozy i ligniny w biomacie lignocelulozowej. Gęstość celulozy wynosi  $1590 - 1620 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , holocelulozy  $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a ligniny  $1300 - 1490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Krzysik, 1975; Prosiński, 1984; Stamm, 1928). Znając udział składników strukturalnych można więc obliczyć przybliżoną gęstość bezwzględną biomasy. Należy pamiętać również, że wzrost udziału związków ekstrakcyjnych obniża gęstość bezwzględną a wzrost zawartości popiołu ją podnosi (Stamm, 1928). Prosiński (1984) i Krzysik (1975) podają, że  $AD$  biomasy waha się w granicach  $1460 - 1560 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  jednak tylko jej dokładne określenie za pomocą piknometru pozwala na precyzyjne oznaczenie porowatości wewnętrznej surowca niezbędnej do analizy procesu zagęszczania.

Proces zagęszczania wywołuje redukcję objętości porów zewnętrznych złoża i wewnętrznych surowca. Uzyskana gęstość granuli może przewyższać gęstość właściwą surowca i w idealnych warunkach może zrównać się z jego gęstością bezwzględną (ale nigdy jej nie przekroczy). W praktyce granule zawsze uzyskują gęstość właściwą niższą od gęstości bezwzględnej surowca ze względu na rozpręż poaglomeracyjny. Oznaczanie gęstości bezwzględnej realizowane jest najczęściej przy użyciu piknometrów helowych, jednak pomiar ten obarczony jest pewnym błędem. Hel jako czynnik pomiarowy wnika i wypełnia pory wewnętrzne materiału, co pozwala określić objętość struktury przestrzennej biomasy bez objętości porów. Na podstawie masy próbki i oznaczonej objętości obliczana jest gęstość bezwzględna. Jednak ze względu na budowę cząstek biomasy, nie wszystkie pory są dostępne dla molekuł helu – nawet duże rozdrobnienie próbki nie udostępnia wszystkich porów, a co za tym idzie określona gęstość bezwzględna jest zaniżona. Z tego względu zaproponowano inny sposób określenia tej wielkości – omówienie zamieszczono w rozdziale „Metodyka”.

### *Gęstość właściwa*

Pod względem strukturalnym biomasa lignocelulozowa charakteryzuje się dużą i zróżnicowaną porowatością. Zatem o gęstości właściwej danej biomasy decyduje w głównej mierze stopień upakowania kompozytu lignocelulozowego w objętości cząstki materiału biomasowego. Gęstość właściwa biomasy w porównaniu do jej gęstości bezwzględnej charakteryzuje się bardzo szerokim zakresem wartości. Przykładowe wartości gęstości właściwej dla wybranych rodzajów biomasy przedstawia tabela 2.14. Gęstość właściwa wpływa bezpośrednio na gęstość nasypową oraz w pewnym stopniu na gęstość uzyskanego granulatu.

Tabela 2.14.

*Gęstość właściwa DE wybranych rodzajów biomasy*

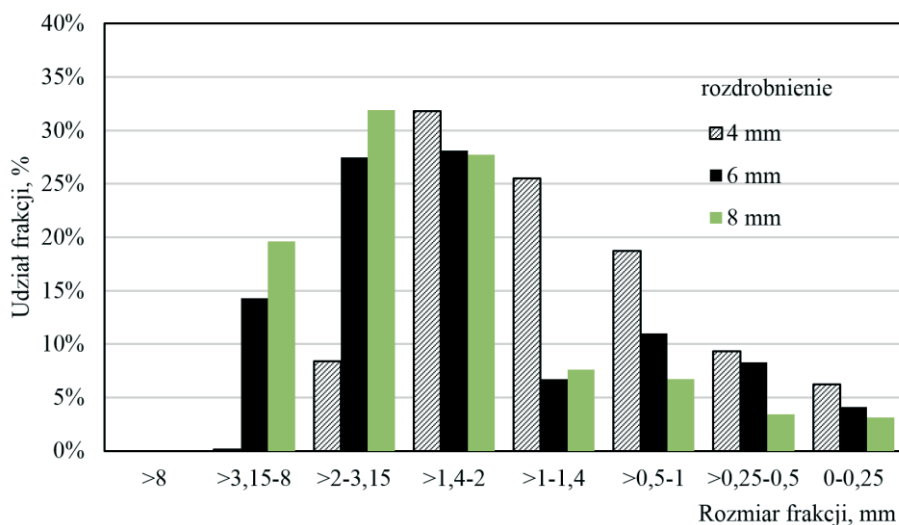
| Materiał               | DE<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Materiał | DE<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
|------------------------|-----------------------------------------|----------|-----------------------------------------|
| Palczatka Gerarda      | 344,6                                   | sosna    | 520                                     |
| Miskant olbrzymi       | 462,8                                   | buk      | 710                                     |
| Ślazowiec pensylwański | 378,8                                   | dąb      | 760                                     |
| Wierzba wiciowa        | 655,3                                   | bukszpan | 1000                                    |

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Mudryk i Wróbel, 2010; Prosiński, 1984)

*Skład ziarnowy*

O rozdrobnieniu materiału ziarnistego decyduje najczęściej rozmiar oczka sita zastosowanego w urządzeniu rozdrabniającym. Rozmiar oczka sita decyduje o górnym (maksymalnym) rozmiarze ziarna, ale w trakcie rozdrabniania powstają także ziarna o rozmiarze mniejszym. Udział poszczególnych klas wymiarowych lub frakcji wymiarowych ziaren w całym złożu materiału ziarnistego określany jest jako skład ziarnowy lub skład granulometryczny. Jego oznaczanie realizowane jest w oparciu o normę PN-EN ISO 17827. Wg wytycznych normy, próbka przesiewana jest przez zestaw sit, a wynik najczęściej przedstawiany jest w postaci wykresu słupkowego, obrazującego procentowy udział poszczególnych frakcji wymiarowych w całym złożu.

Frakcja wymiarowa ziaren to masa cząstek materiału pozostała na sicie o danym rozmiarze oczek i przesiała się przez sito o wyższym rozmiarze oczek. Na rysunku 2.30 przedstawiono skład ziarnowy biomasy robinii akacjowej rozdrobnionej za pomocą rozdrabniacza nożowego z różną wielkością oczek sita umieszczonego pod bębniem.

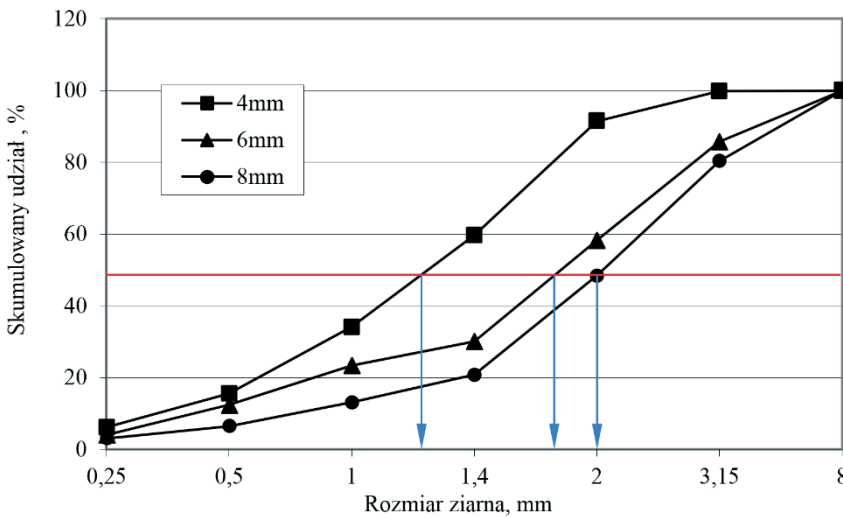


Źródło: (Wróbel i in., 2018)

Rys. 2.30. Skład ziarnowy biomasy robinii akacjowej rozdrobnionej w rozdrabniaczu nożowym z zastosowaniem sita 4, 6 i 8 mm

Skład ziarnowy można przedstawić również w postaci skumulowanego rozkładu wielkości ziarna czyli sumy frakcji wymiarowych pozostałych na kolejnych sitach (rys. 31). Taka forma przedstawienia składu ziarnowego pozwala na łatwe porównanie rozdrobnionych materiałów i określenie, który z nich posiada większy udział frakcji drobnych, a co za tym idzie, który z nich jest bardziej rozdrobniony. Im krzywa rozkładu ziarnowego szybciej

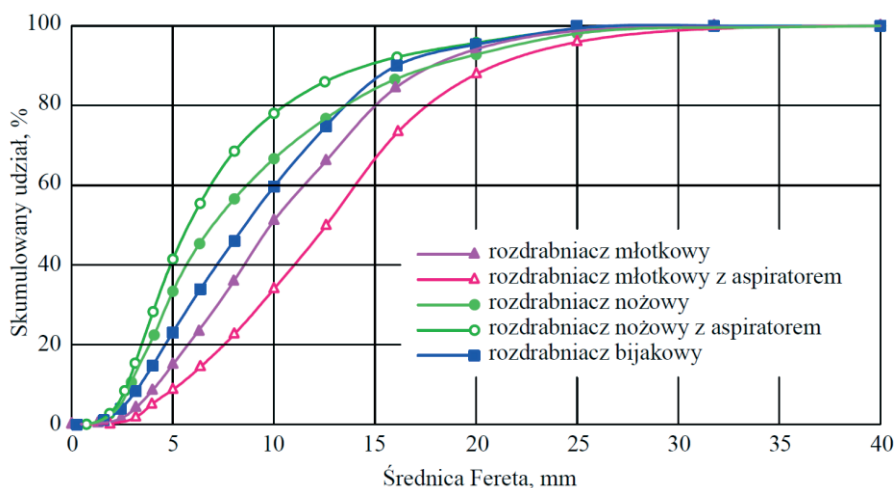
osiąga maksimum, tym materiał jest bardziej rozdrobniony. Dopelnieniem informacji o składzie ziarnowym jest określenie środkowej wartości rozmiaru ziarna  $d_{50}$  definiowanej jako obliczeniowy rozmiar cząstki próbki, który dzieli skumulowany skład ziarnowy na dwie równe części. Graficznie rzecz ujmując  $d_{50}$  to rozmiar ziarna w punkcie przecięcia krzywej rozkładu rozmiaru ziarna z linią poziomą na wysokości 50%. Dla przykładu przedstawionego na rysunku 2.31  $d_{50}$  wynosi 1,2; 1,8 i 2 odpowiednio dla materiału rozdrobnionego na sicie 4; 6 i 8 mm.



Źródło: (Wróbel i in., 2018)

Rys. 2.31. Skumulowany skład ziarnowy biomasy robinii akacjowej rozdrobnionej w rozdrabniaczu nożowym z zastosowaniem sita 4, 6 i 8 mm

Jak już wspomniano skład ziarnowy zależy zarówno od pochodzenia surowca jak i od rodzaju systemu rozdrabniającego (Kirsten i in., 2016; Serrano i in., 2011) Udokumentowano to na rysunku 2.32, na którym przedstawiono skumulowany skład ziarnowy próbki siana rozdrabnianej za pomocą różnych urządzeń rozdrabniających. Urządzenia te posiadały nożowy, młotkowy i uderowy system rozdrabniania i wyposażone były w sito o średnicy otworów 4 mm. Wykres przedstawia również, że zmiana warunków pracy młyna (zastosowanie odciągu ułatwiającego przepływ materiału przez młyn) znajduje swoje odzwierciedlenie w uzyskanym składzie ziarnowym mielonej próbki (Kirsten i in., 2016).



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kirsten i in., 2016)

Rys. 2.32. Porównanie skumulowanych składów ziarnowych próbki siana rozdrabnianego za pomocą różnych urządzeń rozdrabniających wyposażonych w sito o średnicy otworów 4 mm

Skład ziarnowy surowca ma bezpośredni wpływ na parametry jakościowe uzyskanego z niego granulatu. Ogólnie rzecz biorąc wraz ze wzrostem rozdrobnienia surowca i idącymi za tym zmianami składu ziarnowego (obniżenie wartości  $d_{50}$ ) wzrasta gęstość i wytrzymałość uzyskanych granulatów. Trend ten potwierdzają zarówno badania własne (Mudryk i Wróbel, 2011; Wróbel i in., 2013; Wróbel i in., 2018), jak i badania innych autorów (Angulo i in., 1996; Bergström i in., 2008; Jannasch i in., 2001; Kaliyan i Morey, 2009; Mani i in., 2006; Relova i in., 2009; Samson i in., 2000; Serrano i in., 2011; Shaw i in., 2009; Tumuluru i in., 2011; Zafari i Kianmehr, 2014; Hill i Pulkinen, 1988; Kaliyan i Morey, 2005).

W związku z powyższym, zaleca się aby materiał do produkcji peletu rozdrabniany był z zastosowaniem sita o rozmiarze oczek co najwyżej 4 mm (Bergström i in., 2008; Kaliyan i Morey, 2009; Kirsten i in., 2016; Stelte i in., 2011; Tumuluru i in., 2011). Natomiast zalecany rozmiar ziaren  $d_{50}$ , pozwalający uzyskać wysoką wytrzymałość peletu to 0,6 – 0,8 mm (Turner, 1995) lub 0,5 – 0,7 (Franke i Rey, 2006) a nawet 0,2 – 0,4 (Mani i in., 2006).

W przypadku brykietów konieczne rozdrobnienie jest mniejsze, a zalecany rozmiar cząstek to 12 – 6 mm (Tumuluru i in., 2011). Wskazane jest również, aby zagęszczany materiał zawierał cząstki o rozmiarze większym od 6 mm. Tworzą one strukturę brykietu i generują powstawanie połączeń kształtowych, zwiększając wytrzymałość. Jest to szczególnie ważne w przypadku brykietów wytwarzanych przy niskiej temperaturze procesu, która słabo aktywuje mocne połączenia w punktach kontaktu (uplastycznienie ligniny i innych lepiszczy). Wykazano, że w przypadku brykietowania słomy różnej biomasy udział cząstek o długości 19 – 31 mm pozytywnie wpływa na jakość uzyskanego brykietu (Song i in., 2010).

Zgodnie z powyższym Payne (2006) sugeruje, że optymalny skład ziarnowy do produkcji jakościowego peletu z biomasy zawierać powinien głównie cząstki wielkości do 1 mm – około 74%, 1 – 2 mm – około 20%, 2 – 3 mm do 5%, a cząstek większych od 3 mm maksymalnie 1% (tab. 2.15). Oznacza to, że krzywa kumulacyjna rozkładu ziarnowego bardzo szybko osiąga maksimum, a zakres wymiarowy cząstek jest niewielki.

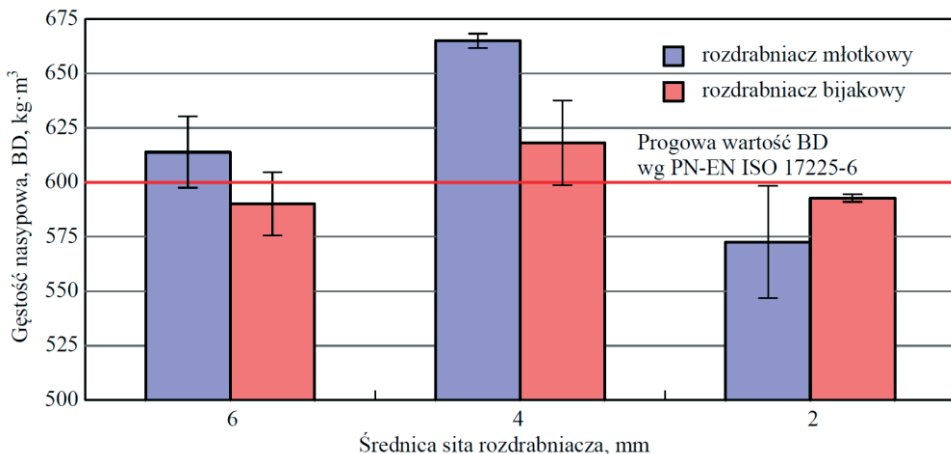
Tabela 2.15.

*Optymalny skład ziarnowy do produkcji jakościowego peletu z biomasy*

| Rozmiar ziarna (mm)   | < 0,25 | > 0,25 – 0,5 | > 0,5 – 1 | > 1 – 2 | > 2 – 3 | > 3 |
|-----------------------|--------|--------------|-----------|---------|---------|-----|
| Udział procentowy (%) | ≥ 20   | ≈ 24         | ≈ 30      | ≈ 20    | ≤ 5     | ≤ 1 |

Źródło: (Payne, 2006)

Wyniki badań innych autorów (Bergström i in., 2008; Kirsten i in., 2016) wskazują jednak, że nie zawsze wysoki stopień rozdrobnienia gwarantuje wyższe parametry jakościowe granulatu. Bergström i inni (2008) zauważyli, że materiał składający się w 100% z cząstek nie przekraczających 1 mm nie gwarantuje uzyskania granulatu o wyższej wytrzymałości w porównaniu do granulatu wytworzonego z materiału, w którym główny rozmiar cząstek wynosi 4 mm i mniej. Natomiast w cytowanej już pracy Kirstena i innych (2016) wykazano, że najlepszymi parametrami jakościowymi (*BD* i *DU*) charakteryzuje się pelet wytworzony z biomasy rozdrobnionej z zastosowaniem sita 4 mm (rys 2.33). Tumuluru (2019) wykazał również, że brykiet wytworzony z biomasy rozdrobnionej przy zastosowanym sicie 12,7 mm charakteryzuje się wyższą wytrzymałością w porównaniu do tego, który został wytworzony przy zastosowaniu sita 4,8 mm. W przypadku gęstości właściwej uzyskanych brykietów trend był odwrotny.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Kirsten i in., 2016)

Rys. 2.33. Gęstość nasypowa peletu wytworzonego z siana o różnym rozdrobnieniu

Podsumowując powyższe informacje można dojść do wniosku, że wąski zakres wymiarowy cząstek nie gwarantuje wysokiej jakości peletu. Cząstki o większym rozmiarze są niezbędne w rozdrobnionym surowcu jako element tworzący jego strukturę, podstawę oraz zwiększający liczbę połączeń kształtowych. Dopiero w tej strukturze cząstki drobne wypełniają wolne przestrzenie i tworzą połączenia w punktach kontaktu cząstek. Zatem z punktu widzenia aglomeracji to nie rozdrobnienie, ale szerszy zakres wymiarowy cząstek we właściwych proporcjach będzie najistotniejszym czynnikiem determinującym proces. Wynika z tego, że proces zagęszczania wymaga odpowiedniego składu ziarnowego (dedykowanego dla danego rodzaju wytwarzanego biopaliwa, typu biomasy itp.). Na razie jednak brak jednoznacznych wytycznych w tej kwestii.

### **Przestrzenny rozkład i ułożenie cząstek w złożu**

Skład ziarnowy wpływa bezpośrednio na drugą grupę czynników determinujących strukturę materiału ziarnistego – a mianowicie przestrzenny rozkład i ułożenie ziaren w złożu.

Przestrzenny rozkład ziaren tworzących złożę materiału ziarnistego możemy określić jako regularny lub przypadkowy (nieregularny). Regularny układ ziaren spotykany jest w przyrodzie bardzo rzadko, i występuje on głównie w strukturach krystalicznych. Aby mógł powstać taki układ, elementy złoża muszą być układane jeden po drugim, warstwa po warstwie, a rozmiar cząstek musi być jednakowy. Przeciwną sytuację mamy w przypadku układu przypadkowego, tutaj złożę tworzone jest przez całą masę ziaren, o różnym kształcie i rozmiarze, które w sposób losowy wypełniają dostępną przestrzeń. Tego typu układ spotykany jest powszechnie i również złoża tworzone przez rozdrobnioną biomasę posiadają taki układ przestrzenny.

#### *Gęstość nasypowa*

Gęstość ta w głównej mierze zależy od gęstości właściwej cząstek tworzących złożę. Z kolei rozdrobnienie materiału, przy założeniu że kształt cząstek pozostał taki sam, nie wpływa na wartość gęstości nasypowej. Natomiast kształt cząstek ma istotny wpływ na gęstość nasypową. Wydłużenie lub spłaszczenie cząstek złoża powoduje spadek gęstości nasypowej w porównaniu do gęstości nasypowej złoża utworzonego przez cząstki kuliste – jednomiarowe (Wróbel, 2006).

Powyższe zależności dotyczą złożów utworzonych z cząstek o zbliżonych rozmiarach. W przypadku rozdrobnionych materiałów biomasowych mamy do czynienia ze złożami utworzonymi z cząstek z pewnego zakresu rozmiarowego (skład ziarnowy) i w tym przypadku o gęstości nasypowej *BD* decydują wzajemne proporcje poszczególnych klas rozmiarowych. Ogólnie rzecz biorąc różny udział frakcji drobnych ziaren w stosunku do frakcji ziaren dużych powodował będzie wzrost (drobne cząstki wypełniają puste przestrzenie pomiędzy cząstkami dużymi) lub spadek (frakcji drobnej jest zbyt dużo i tworzą się dodatkowe puste przestrzenie lub zbyt mało i puste przestrzenie nie są wypełnione) gęstości nasypowej. Przykłady literaturowe wskazują, że w przypadku rozdrobnionej biomasy wraz ze wzrostem rozdrobnienia wartość gęstości nasypowej rośnie (Mudryk, 2010; Shaw i in., 2009). Gęstość nasypowa zmienia się również pod wpływem wilgotności i rodzaju rozdrabnianego materiału (Mudryk, 2010; Shaw i in., 2009; Wróbel i in., 2018).



*Porowatość*

W przypadku rozdrobnionych materiałów biomasowych wyróżniamy trzy rodzaje porowatości. Pierwsza z nich to porowatość zewnętrzna złoży  $\varepsilon_z$ , czyli zależność pomiędzy gęstością właściwą  $SD$  oraz nasypową  $BD$  którą można zapisać w postaci:

$$\varepsilon_z = \frac{SD - BD}{SD} * 100$$

Cząstki biomasy tworzące złoże charakteryzują się ponadto porowatością wewnętrzną  $\varepsilon_w$ , czyli procentowym udziałem objętości pustych przestrzeni zlokalizowanych wewnątrz cząstek (tzw. porów wewnętrznych) w stosunku do objętości cząstek. Zależność pomiędzy porowatością wewnętrzną  $\varepsilon_w$  a gęstością bezwzględną  $AD$  i właściwą  $SD$  można zapisać wzorem:

$$\varepsilon_w = \frac{AD - SD}{AD} * 100$$

Pory zewnętrzne złoży i wewnętrzne cząstek stanowią porowatość całkowitą  $\varepsilon_c$  rozdrobnionego materiału biomasowego. Jest to zatem procentowy udział objętości wszystkich porów w stosunku do objętości materiału ziarnistego. Porowatość całkowita  $\varepsilon_c$  to zależność pomiędzy gęstością bezwzględną  $AD$  i nasypową  $BD$  materiału:

$$\varepsilon_c = \frac{AD - BD}{AD} * 100$$

Porowatość wewnętrzna cząstek jest parametrem swoistym dla danego rodzaju biomasy i zależy bezpośrednio od jej gęstości właściwej. Proces wstępnego przetwarzania biomasy (rozdrabnianie) nie wpływa na jej wartość. Proces zagęszczania natomiast musi być tak prowadzony, aby wywołać jej wyraźną redukcję.

Porowatość zewnętrzna nie zależy od gęstości właściwej surowca, a jedynie od sposobu ułożenia ziaren w złożu. Jeżeli ziarna dwóch materiałów o różnej gęstości właściwej są ułożone w złożach tak samo, to porowatość zewnętrzna tych złoży jest taka sama natomiast ich gęstości nasypowe się różnią. Dlatego, aby porównać stopień w jakim badane materiały ziarniste wypełniają dostępną przestrzeń bez wpływu gęstości właściwej tych materiałów, należy porównać porowatość zewnętrzną badanych złoży. Porowatość ta będzie zależała od kształtu ziaren, ich rozmiaru oraz rozkładu ziarnowego.

*Współczynnik wypełnienia*

Współczynnik wypełnienia złoży  $\phi$  to stosunek objętości cząstek tworzących materiał ziarnisty do objętości zajmowanej przez ten materiał. Jest niejako dopełnieniem porowatości złoży i często jest stosowany zamiennie.

**Interakcje pomiędzy cząstkami***Liczba punktów kontaktu*

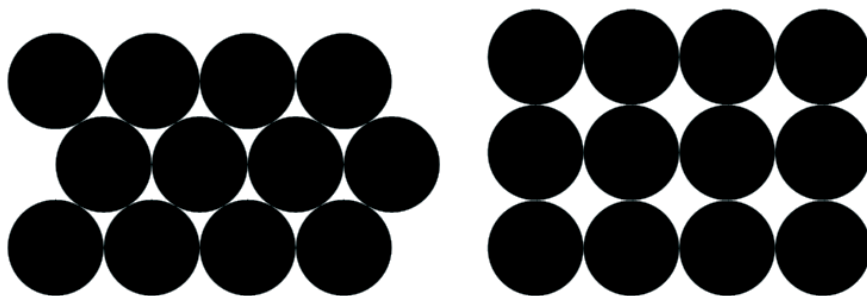
Liczba punktów kontaktu  $k$  (inaczej zwana liczbą Newtona, liczbą koordynacyjną, liczbą punktów styku) mówi o maksymalnej liczbie ziaren, z którymi może stykać się pojedyn-

cze ziarno w złożu. W przypadku układów regularnych liczba ta jest wielkością stałą, jednakową dla każdego pojedynczego ziarna, ściśle powiązaną ze współczynnikiem wypełnienia i porowatością. W układach przypadkowych  $k$  oznacza średnią liczbę punktów styku przypadających na jedno ziarno.

W przypadku ciśnieniowej aglomeracji biomasy, gdzie jak wykazano, wszystkie główne mechanizmy łączące cząstki działają właśnie w punktach kontaktu ziaren, należy dążyć do maksymalizacji tej liczby w zagęszczanym złożu.

W przestrzeni dwuwymiarowej, dla jednakowych okręgów, maksymalna liczba punktów kontaktu wynosi 6 (ułożenie dysków w siatce heksagonalnej,  $\varphi = 0,91$ ,  $\varepsilon_z = 9,3\%$ ), (Rys. 2.34a). Układ kubiczny pozwala na uzyskanie  $k = 4$  ( $\varphi = 0,78$ ,  $\varepsilon_z = 21,5\%$ ), (Rys. 35b).

W przestrzeni trójwymiarowej maksymalna wartość  $k = 12$  dla jednakowych kul w układzie kubicznym powierzchniowo centrowanym fcc (face centered cubic) i heksagonalnym ciasnego upakowania hcp (hexagonal close packing). W obu przypadkach  $\varphi = 0,74$ ,  $\varepsilon_z = 26\%$ . Mniejsze wartości  $k$  uzyskuje układ kubiczny centrowany objętościowo bcc (body centered cubic) i kubiczny prosty sc (simple cubic). Dla tych układów  $k$  wynosi odpowiednio 8 i 6,  $\varphi$  0,6 i 0,52 a  $\varepsilon_z$  40 i 48%.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2.34. Regularny układ dysków na płaszczyźnie: a – heksagonalny, b – kubiczny.

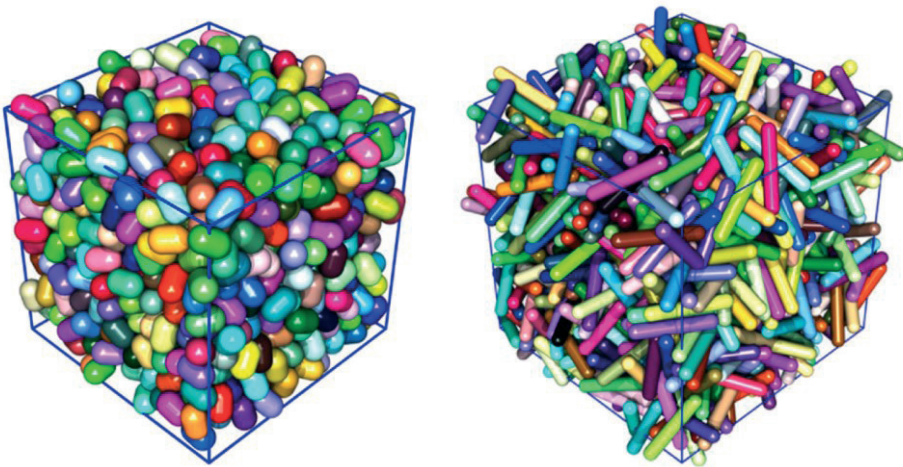
W przypadku jednakowych składników złoża w układzie regularnym, wzrost  $k$  można uzyskać poprzez zmianę kształtu elementów je tworzących. Donev i inni (2004) uzyskali  $k = 14$  dla złożeń zbudowanych ze spłaszczonych i wydłużonych elipsoid. Współczynnik wypełnienia tych złożeń wzrósł do poziomu 0,77 ( $\varepsilon_z = 23\%$ ). Zmieniając układ elipsoid i ich wydłużenie można uzyskać  $k = 14$  przy  $\varphi = 0,758$  ( $\varepsilon_z = 24,2\%$ ) (Jin, et al., 2017). Z przytoczonych przykładów wynika, że można zwiększyć  $k$  odpowiednio wydłużając lub spłaszczając cząstkę tworzącą regularne złoże. Warto również podkreślić, że we wszystkich przytoczonych przykładach wzrost liczby  $k$  powiązany jest ze wzrostem współczynnika wypełnienia  $\varphi$ , co wiąże się też ze spadkiem porowatości  $\varepsilon_z$ .

W złożach utworzonych przez jednakowe kule pozostające w nieregularnym ułożeniu mówimy o średniej liczbie koordynacyjnej  $k_{sr}$ . Liczba ta osiąga wartość maksymalną  $k_{sr} = 6,4$  (maksymalny współczynnik wypełnienia  $\varphi$  zawiera się w przedziale 0,62 – 0,68),

a złożo o tych parametrach nazywamy złożem o przypadkowej ciasnej strukturze upakowania RCP (random close packing). Minimalna wartość  $k_{sr}$  dla złożo o nieregularnym układzie ziaren wynosi 5,5, a  $\varphi$  zawiera się w przedziale 0,57 – 0,6 (Meng i in., 2016; Wróbel, 2006), mówimy wtedy o złożach o przypadkowej luźnej strukturze upakowania RLP (random loose packing).

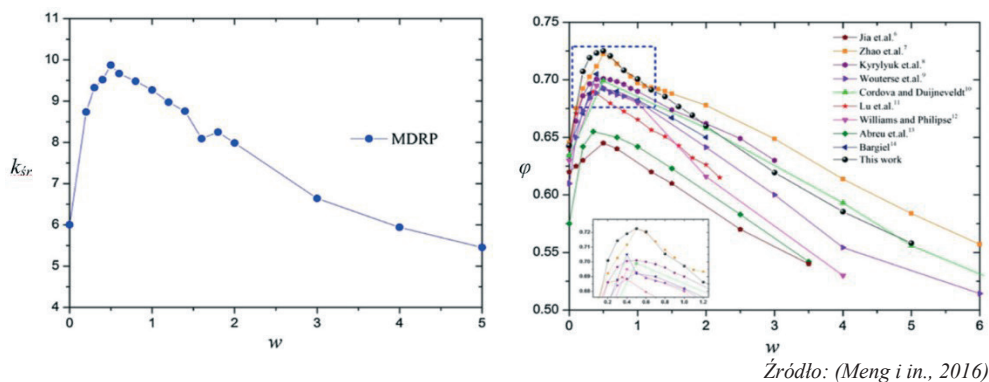
Badania złożo utworzonych z nasion roślin uprawnych, kształtem zbliżonych do elipsoidy wykazały, że wartość  $k_{sr}$  zależy wprawdzie od gatunku ale głównie od kształtu nasion. Wraz z ich wydłużeniem, bądź spłaszczeniem wartość  $k_{sr}$  wzrasta. Ziarna zbliżone kształtem do kuli uzyskały  $k_{sr} = 5,8$ , natomiast  $k_{sr}$  nasion spłaszczonych zawierał się w przedziale 6,4 – 7,7, a wydłużonych 6,6 – 7,7. Podobną zależność zaobserwowano dla współczynnika wypełnienia (Wróbel, 2006).

Zmiana kształtu cząstek tworzących złożo z kul na sferocylinдры wywołuje zmianę  $k_{sr}$  jak i  $\varphi$ . Meng i inni (2016) wykazali, że wydłużenie sferocylinдры do pewnego momentu powoduje wzrost  $k_{sr}$  jak i  $\varphi$ , a po przekroczeniu optymalnej wartości współczynnika kształtu wartość  $k_{sr}$  jak i  $\varphi$  zaczyna spadać. Współczynnik kształtu  $w$  jest tutaj definiowany jako stosunek długości do średnicy cylindrycznej części sferocylinдры. Przykładowe złoża utworzone z sferocylinдры o różnym wydłużeniu przedstawia rysunek 2.35. Maksymalna wartość  $k_{sr} = 9,8$  i  $\varphi = 0,725$  uzyskano dla sferocylinдры o  $w = 0,5$ .



Źródło: (Meng i in., 2016)

Rys. 2.35. Złoża utworzone z sferocylinдры o różnym wydłużeniu: a –  $w = 0,5$ ;  $\varphi = 0,725$ ,  
b –  $w = 5$ ;  $\varphi = 0,561$



Rys. 2.36. Przebieg zmian: a –  $k_{sr}$  w zależności od współczynnika kształtu  $w$ , b –  $\phi$  w zależności od  $w$

Przebieg zmian  $k_{sr}$  w zależności od współczynnika kształtu  $w$  przedstawiono na rysunku 2.36a. Podobny przebieg można zauważyć dla współczynnika wypełnienia  $\phi$  (rys 2.36b). Wykres przedstawia wyniki uzyskane przez zespół Menga oraz wyniki wcześniejszych prac dotyczących sferocylindrów. Niezależnie od uzyskanej początkowej wartości  $\phi$ , wraz ze wzrostem wydłużenia cząstki, wartość współczynnika wypełnienia wzrasta by osiągnąć maksimum, gdy współczynnik kształtu  $w$  zbliża się do wartości 0,5.

Biorąc po uwagę przytoczone powyżej wyniki badań własnych i innych autorów, należy zgodzić się z założeniem Jin i innych (2017), że liczba punktów kontaktu jest zależna od kształtu cząstek tworzących złożę i stopnia jego wypełnienia. Dla cząstek kulistych  $k$  z dużym przybliżeniem można określić z zależności (Pietsch, 2002):

$$k = \frac{\pi}{\varepsilon_z}$$

W przypadku innych kształtów ziaren matematyczne określenie  $k$  jest trudne a proponowane zależności nie zawsze dają zadowalające wyniki (Schaller i in., 2015).

Jak już wykazano liczba punktów kontaktu  $k$  zależy bezpośrednio od współczynnika wypełnienia i pośrednio od kształtu ziaren tworzących złożę, który z kolei wpływa bezpośrednio na współczynnik wypełnienia złoża. Można zatem założyć, że jeśli złożę charakteryzuje się wysokim współczynnikiem wypełnienia  $\phi$  to znaczy, że kształt cząstek je tworzących jest odpowiedni oraz, że liczba punktów kontaktu w tym złożu będzie wysoka. Zatem uzyskanie wysokiej wartości  $\phi$  gwarantuje wysoką wartość  $k$ . Zakładając również, że porowatość zewnętrzna jest dopełnieniem  $\phi$ , to wszelkie zabiegi ją minimalizujące skutkować będą w efekcie uzyskaniem możliwie maksymalnej liczby  $k$ .

$$\varepsilon_z \rightarrow \min, k \rightarrow \max$$

Wiedząc zatem, że mechanizmy łączące cząstki działają w punktach kontaktu, należy uznać, że minimalizacja porowatości zewnętrznej złoża maksymalizuje liczbę i siłę połączeń pomiędzy cząstkami. Otwartym pozostaje kwestia w jaki sposób należy minimalizować porowatość zewnętrzną w złożach rozdrobionych materiałów biomasowych.

### 3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADWCZEGO I CEL PRACY

Jak wykazano w przeglądzie literatury, aby biomasa lignocelulozowa mogła zostać przetworzona do postaci biopaliw kompaktowanych musi charakteryzować się zagęszczalnością, oraz kompaktowalnością. Tylko wtedy ciśnienie zagęszczania przy współdziale pozostałych czynników procesowych pozwoli na wytworzenie z niej biopaliwa stałego o porządnym cechach jakościowych.

Przeprowadzone rozeznanie potwierdza, że do tej pory brak jednolitego sposobu opisu zagęszczalności i kompaktowalności biomasy, co więcej, pojęcia zagęszczalności i kompaktowalności, w literaturze dotyczącej procesu ciśnieniowej aglomeracji biomasy występują sporadycznie. Brak również informacji jaki jest potencjał bazowy zagęszczalności i kompaktowalności biomasy. Wielość gatunków stosowanych do produkcji biopaliw stałych powoduje, że ten potencjał będzie bardzo zróżnicowany.

Głównymi czynnikami wpływającymi na zagęszczalność i kompaktowalność, oprócz rodzaju biomasy są: wilgotność, skład ziarnowy i związana z nim porowatość złoża, ciśnienie aglomeracji i temperatura.

Badania dowodzą, że rodzaj biomasy wpływa na gęstość i wytrzymałość (główne wskaźniki zagęszczalności i kompaktowalności) aglomerowanej biomasy. Badania te przeprowadzane są zawsze przy uwzględnieniu innych czynników – głównie wilgotności i temperatury. Brak natomiast badań pozwalających na stwierdzenie jaki jest bazowy potencjał aglomeracyjny różnego rodzaju biomasy. Nie wiadomo więc jak czynnik, którym praktycznie nie możemy sterować, wpływa na proces zagęszczania. Przeprowadzenie tego rodzaju badań pozwoli poznać ten potencjał, a następnie po stopniowym wprowadzeniu kolejnych czynników, pozwoli określić, które z nich i w jakim stopniu wpływają na zagęszczalność i kompaktowalność danego typu surowca oraz jakie zachodzą między nimi interakcje.

Wpływ wilgotności oraz temperatury jest stosunkowo dobrze poznany. Określone są ich optymalne zakresy i w procesie zagęszczania możemy je dobierać w zależności od surowca czy stosowanej techniki zagęszczania.

Skład ziarnowy to czynnik uznawany za wielu autorów za jeden z podstawowych i decydujących o przebiegu procesu zagęszczania. Co do wagi, zajmuje on miejsce zaraz po wilgotności, temperaturze i ciśnieniu bez którego aglomeracja nie miałaby miejsca (Adapta i in., 2011; Muramatsu i in., 2015; Mani i in., 2006; Relova i in., 2009; Shaw i in., 2009). Co ciekawe, w przeważającej większości autorzy, zwracają wprawdzie uwagę na jego wpływ, ale zazwyczaj podają tylko stopień rozdrobnienia. Zwiększenie rozdrobnienia z reguły poprawia parametry zagęszczania, ale czy w maksymalny możliwy sposób? Z drugiej strony większe rozdrobnienie to zwiększone nakłady ponoszone na proces przygotowania surowca. Brak wyników badań, które dają odpowiedź na pytanie jaki powinien być skład ziarnowy, a nie jakie rozdrobnienie powinien mieć surowiec.

W związku z powyższym należy zadać pytanie: czy jest możliwe określenie potencjału zagęszczalności i kompaktowalności biomasy lignocelulozowej oraz wpływu na ten potencjał każdego innego czynnika procesowego.

Celem głównym badań było zatem określenie zagęszczalności i kompaktowalności biomasy przeznaczonej do produkcji biopaliw stałych. Realizacja celu głównego była możliwa dzięki realizacji celów cząstkowych.

Pierwszym z nich było poznanie relacji pomiędzy rodzajem materiału, ciśnieniem zagęszczania a uzyskanymi głównymi cechami jakościowymi granul, zależącymi od procesu, tj. gęstością właściwą i wytrzymałością mechaniczną (określenie zagęszczalności i kompaktowalności bazowej). Drugim celem cząstkowym było określenie wpływu składu ziarnowego zagęszczanej biomasy na zagęszczalność i kompaktowalność.

Przeprowadzona analiza literatury pozwala założyć, że minimalizacja porowatości złoża maksymalizuje, pożądaną w procesie zagęszczania, liczbę kontaktów pomiędzy ziarnami. Na podstawie tego założenia można postawić następujące hipotezy:

- zagęszczalność i kompaktowalność rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej zależy od jej składu ziarnowego,
- odpowiedni skład ziarnowy powinien zawierać zarówno cząstki duże tworzące strukturę granul oraz cząstki drobne pełniące role wypełniacza,
- maksymalny możliwy udział cząstek dużych w stosunku do udziału cząstek drobnych, pozwala na uzyskanie minimalnej porowatości zewnętrznej złoża.

## 4. METODYKA

### 4.1. Materiał badawczy

#### 4.1.1. Dobór materiału do badań

Zgodnie z przytoczoną w przeglądzie literatury definicją biomasy, na cele energetyczne przeznaczana może być bardzo szeroka grupa materiałów biologicznych zarówno pochodzenia roślinnego jak i zwierzęcego. Jednak bezsprzecznie, wśród surowców biomasowych przeznaczonych do produkcji biopaliw stałych, największy udział stanowi biomasa lignocelulozowa. Pod względem pochodzenia, ten typ biomasy norma PN-EN ISO 17225-1 dzieli na trzy grupy, tj. biomasę: drzewną, zielną i owocową. Norma wyróżnia jeszcze biomasę rosnącą w środowisku wodnym, tzw. biomasę wodną (jednak gatunki tam przypisane to: algi, wodorosty i hiacynt wodny nie stanowiące biomasy lignocelulozowej) oraz

Tabela 4.1.

*Materiał badawczy – kryteria doboru i wybrane gatunki*

| Biomasa lignocelulozowa |        |                |  |                            |  |                                 |  |
|-------------------------|--------|----------------|--|----------------------------|--|---------------------------------|--|
| Owocowa                 | Zielna | Drzewna        |  |                            |  |                                 |  |
| Okrytozależkowe         |        |                |  | Nagozależkowe              |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Szpilkowe                  |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Drewno                     |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Miękkie                    |  |                                 |  |
| Nie zawierające żywicy  |        |                |  | Nie zawierające żywicy     |  | Jodła pospolita                 |  |
|                         |        |                |  | Zawierające żywicę         |  | Sosna pospolita                 |  |
|                         |        |                |  | Nie zawierające żywicy     |  | Topola klon <i>Monviso</i>      |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Olcha szara                     |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Wierzba wiciowa                 |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Brzoza brodawkowata             |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Robinia biała                   |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Buk pospolity                   |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Grab pospolity                  |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Ślazier pensylwański            |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Rożnik przerośnięty syn. Sylfia |  |
|                         |        |                |  |                            |  | Słonecznik wierzbolistny        |  |
|                         |        |                |  | Miskant olbrzymi           |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Mozga trzcinowata          |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Pszemica zwyczajna (słoma) |  |                                 |  |
|                         |        |                |  | Łupiny                     |  |                                 |  |
|                         |        |                |  |                            |  |                                 |  |
| Dwuliścienne            |        | Jednoliścienne |  | Dwuliścienne               |  | Drzewa liściaste                |  |
| Okrywy nasienne         |        | Byliny         |  | Drewno                     |  | Drzewa iglaste                  |  |
| Rośliny jednoroczne     |        | Pędy           |  | Twarde                     |  |                                 |  |

*Źródło: opracowanie własne*



trzciny należące do traw, mające swych reprezentantów w biomase zielnej. W związku z powyższym podczas wyboru materiału do badań biomasa wodna została pominięta. Dal-  
szy podział materiału do badań oparto na systematyce roślin. Uwzględniono podział na  
rośliny nago- i okrytozależkowe, a w tych grupach na rośliny szpilkowe, dwuliścienne  
i jednoliścienne (Szweykowska i Szweykowski, 2006). Ponadto uwzględniono twardość  
drewna gatunków reprezentujących biomasę drzewną, a także zawartość żywicy lub jej  
brak w biomacie. Docelowo tak dobrano gatunki badanych roślin, by reprezentowały one  
wszystkie grupy biomasy wynikające z przyjętego podziału. Dodatkowo, podczas doboru  
kierowano się również tym aby wybrane gatunki stanowiły te, które są stosunkowo często  
wykorzystywane do produkcji biopaliw kompaktowanych lub posiadają taki potencjał (wy-  
sokie wartości parametrów energetycznych). Do badań przeznaczono tylko te części roślin,  
które stanowią najwartościowszy surowiec do produkcji biopaliw (drewno bez kory, pędy  
oraz łupiny). Wybrane do badań gatunki oraz uwzględnione kryteria podziału zawarto  
w tabeli 4.1. Tak dobrany i zróżnicowany materiał badawczy uwzględnia w badaniach  
szeroki zakres zmienności cech wpływających na przebieg procesu ciśnieniowego zagęsz-  
czania biomasy.

#### 4.1.2 Charakterystyka gatunków wybranych do badań

Jodła pospolita *Abies alba* Mill. (jodła biała) – gatunek drzew z rodziny sosnowatych  
(*Pinaceae*), – występujący w stanie dzikim w górach środkowej i południowej Europy.  
W Polsce i we Francji występuje też na nizinach (Seneta i Dolatowski, 2008). Drewno wyko-  
rzystywane głównie w przemyśle budowlanym i celulozowo-papierniczym a pozostałości  
tartaczne są surowcem energetycznym.

Sosna pospolita *Pinus sylvestris* L. – popularny gatunek drzewa z rodziny sosnowatych  
(*Pinaceae*). Naturalnie występuje powszechnie na terenach Europy Północnej i Środkowej  
(również obszarach górskich) oraz Syberii Wschodniej. Jako źródło drewna sosna zwyczaj-  
na introdukowana była poza zasięgiem występowania – w Nowej Zelandii i w chłodnych  
rejonach Ameryki Północnej. Drewno sosny wykorzystywane jest jako materiał budowlany,  
jak również w meblarstwie i stolarstwie. Pozostałości są cenionym surowcem energetycz-  
nym, w związku z czym podejmowano próby plantacyjnej uprawy sosny na cele energe-  
tyczne (Nowakowska i in., 1993).

Topola (*Populus* L.) – rodzaj drzew z rodziny wierzbowatych (*Salicaceae*), rodzime ga-  
tunki to: t. czarna, t. biała i t. osika (Seneta i Dolatowski 2008). Do upraw plantacyjnych,  
na cele energetyczne, przeznaczone są kultywary zestawione w krajowym rejestrze topól,  
który powstał na bazie wieloletnich prac Instytutu Badawczego Leśnictwa. W ostatnich  
latach w uprawach pojawiają się także topole pochodzące z Włoch jak np. topola „Monvi-  
so”.

Olcha szara *Alnus incana* (L.) Moench (olsza szara) – gatunek rośliny należący do  
rodziny brzoźowatych (*Betulaceae*). W Polsce występuje naturalnie przede wszystkim  
w dolinach górskich oraz na nizinach przy brzegach rzek. Roślina pionierska, odporna na  
zanieczyszczenie powietrza, uważana jest za cenny gatunek do rekultywacji terenów po-  
przemysłowych. Drewno przeznaczone głównie na opał, stąd też olcha wymieniana jest  
jako gatunek potencjalnie przydatny do zakładania plantacji energetycznych (Zajęczkowski  
i Załęski, 2007) Po ścięciu wytwarza odrośla, jednak czynnikami ograniczającymi jej wy-

korzystanie w uprawach energetycznych są wysokie wymagania wodne i siedliskowe (Pach i in. 2010).

Wierzba wiciowa *Salix viminalis* L. (w. krzaczasta, w. krzewiasta, witwa, konopianka) – jest rodzimym gatunkiem drzew lub krzewów należących do rodziny wierzbowatych. W ostatnim okresie gatunek ten nazywany też wierzbą energetyczną, zwłaszcza klony wysokowydajne uprawiane na plantacjach odrzutowych o krótkim cyklu (Zajączkowski, 2003). Na plantacjach prowadzona w formie wyniosłych krzewów osiągających wysokość do 5 m i w takiej formie pozyskiwana (Kwaśniewski i in. 2010).

Brzoza brodawkowata *Betula pendula* Roth (zwana też jako b. zwisła, b. gruczołowata, brzezina, b. biała) – gatunek drzewa z rodziny brzozowatych (*Betulaceae*). Występuje w chłodniejszych rejonach Azji i Europy oraz w Afryce Północnej (Maroko), rozprzestrzenia się też w innych rejonach i jest uprawiana w wielu krajach świata. W Polsce jest pospolita na całym niżu i w niższych położeniach górskich. Drewno przetwarzane jest, podczas suchej destylacji, na węgiel drzewny, a surowiec może być pozyskiwany z plantacji o cyklu produkcyjnym 40-60 lat (Drogoszewski i in., 2000; Zajączkowski i Załęski, 2007). Nie polecana do uprawy w krótszym cyklu ze względu na brak siły odrzutowej (Pach i in., 2010).

Robinia biała *Robinia pseudoacacia* L. (r. akacjowa, grochodrzew akacjowy) – gatunek drzew należący do rodziny bobowatych (*Fabaceae*). Pochodzi z Ameryki Północnej, ale rozprzestrzeniła się i zaaklimatyzowała na wszystkich (z wyjątkiem Antarktydy) kontynentach świata. Do Europy sprowadzona została w 1601 roku jako drzewo ozdobne (Bohne i Dietze, 2008). Wysokie wartości paramentów energetycznych drewna i szybki wzrost w początkowym okresie życia powodują, że prowadzone są badania plantacyjnej uprawy robinii (Rédei i Veperdi, 2018), zwłaszcza jej masztowego ekotypu (Wojda i in., 2014; Zajączkowski i Zajączkowski, 2013).

Buk pospolity *Fagus sylvatica* L. (buk zwyczajny) – gatunek należący do rodziny bukowatych (*Fagaceae*). Występuje na przeważającej części kontynentu europejskiego. Pospolity w Polsce, gatunek rodzimy (Seneta i Dolatowski 2008). Drewno twarde, ciężkie i spoiste o szerokim zastosowaniu, przeznaczone na: meble, parkiety, sklejkę i płyty wiórowe, papier. Ze względu na parametry energetyczne pewne sortymenty przeznaczone są na drewno opałowe lub przetwarzane na węgiel drzewny. Pozostałości z przemysłu drzewnego (wióry, trociny) stanowią cenny surowiec do produkcji brykietów lub peletów (Dworecki i in., 2012).

Grab pospolity *Carpinus betulus* L. (g. zwyczajny) – gatunek średniej wielkości drzewa liściastego z rodziny brzozowatych (*Betulaceae*). Występuje w Europie od Francji do Ukrainy. W Polsce częsty na całym niżu i w niższych położeniach górskich. Drewno bardzo twarde, ciężkie, sprężyste i trudne w obróbkę, wykorzystywane głównie na opał. Wykazuje co prawda pewne zdolności tworzenia odrzutowi (Węgorek, 2003), jednak drewno pozyskiwane jest z lasów a nie plantacji energetycznych. Wykorzystywane głównie w formie drewna kawałkowego do kominków. Wartość opałowa drewna – jedna z najwyższych wśród drzew rodzimych.

Ślazier pensylwański *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby. (sida, malwa wirginijska, całkowicie błędnie nazywany też malwą pensylwańską) – jest byliną polikarpiczną o corocznie zamierających pędach, które stanowią surowiec energetyczny. Dzięki obecności pączków wzrostowych na korzeniach w strefie przyłodygowej, odrasta corocznie, zwiększając

liczbę łodyg w zwartej kępie od jednej w pierwszym roku do 20 – 30 w latach następnych, należy do rodziny szlazowatych. Pochodzi z Ameryki Północnej, gdzie występuje w środowisku naturalnym kilku stanów m. in. Wirginia i Pensylwania. W Polsce pojawił się w latach 50. W ostatnich latach propagowany jako roślina energetyczna (Majtkowski, 2007; Mudryk i Wróbel, 2011).

Różnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L. (sylfia) – bylina z rodziny astrowatych (*Asteraceae*), pochodząca z centralnych regionów Ameryki Pn. Uznawana jest za cenną roślinę pszczelarską, leczniczą, paszową a także ozdobną. Ze względu na niewielkie wymagania może być polecana, jako roślina pionierska przy rekultywacji terenów zdegradowanych. Parametry energetyczne predysponują ją także jako cenny surowiec energetyczny (Wróbel i in., 2013). Pędy różnika osiągają wysokość do 3 m. Plantacje energetyczne można zakładać przez wysiew nasion.

Słonecznik wierzbolistny *Helianthus salicifolius* A. Dietr. – gatunek należy do rodziny astrowatych. Pochodzi z suchych terenów Ameryki Północnej: równiny Teksasu i Nebraski. W siedlisku naturalnym najczęściej spotykany jest na poboczach dróg, nieużytkach, skłisłych pagórkach. Jest rośliną wieloletnią, wytwarzającą okazałe kępy z licznymi pędami generatywnymi, osiąga wysokość do 3 m. W Polsce słonecznik uprawiany jako bylina ozdobna w ogrodach. W naszym klimacie kwiatostany rozwijają się bardzo późno i są niewielkie. Roślina w warunkach polskich nie wytwarza nasion w związku z czym jest rozmnażany wegetatywnie przez podział kłaczy ale dzięki temu nie jest rośliną ekspansywną. Ze względu na dobre parametry energetyczne roślina stanowi gatunek potencjalnie przeznaczony na cele energetyczne (Kwaśniewski i in., 2010; Wróbel i in., 2018).

Miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus*, (trzcina chińska, trzcinnik olbrzymi, całkowicie błędnie nazywany również trawą słoniową, która to jest pospolitą trawą afrykańską (*Pennisetum purpureum* Schumacher). Miskant to okazała, wieloletnia trawa kępowa z rodziny wiechlinowatych pochodząca pierwotnie z krajów Azji Południowo-Wschodniej. W środowisku naturalnym występuje na obszarze Japonii, Chin oraz Korei. W Europie uprawiana jest od ok. 50 lat jako roślina ozdobna. Dopiero w 1982 r. w Moser k. Magdeburga została po raz pierwszy w Europie założona plantacja miskanta na cele energetyczne. Miskant olbrzymi jest naturalnym mieszańcem, powstałym ze skrzyżowania Miskanta Chińskiego (*Miscanthus sinensis* Anders.) z Miskantem cukrowym (*Miscanthus sacchariflorus* Maxim.). Roślina o cyklu fotosyntetycznym C4 lepiej wykorzystująca światło w procesie fotosyntezy niż rośliny cyklu C3 (Frühwirth i in., 2006; Majtkowska i Majtkowski, 2007).

Mozga trzcinowata *Phalaris arundinacea* L., rodzimy gatunek rośliny wieloletniej należąca do rodziny wiechlinowatych (trawy). Występuje na całym niżu Polski, zwłaszcza w zbiorowiskach nadwodnych. Wysokość pędów do 3 m, bardzo podobna do trzciny pospolitej. Roślina silnie ulistniona, kwitnie w czerwcu i lipcu. Gatunek nadający się na cele energetyczne oraz paszowe dający do trzech pokosów rocznie. Odporna na suszę i mrozy. Do jej cech charakterystycznych należy szybki odrost po skoszeniu. Uprawiane są głównie dwie odmiany, Feeseey oraz Motycka (Kwaśniewski i in., 2010).

Słoma zbóż jako produkt uboczny produkcji rolniczej, obok dedykowanych upraw energetycznych stanowi jedno z największych źródeł biomasy w Polsce. Szacuje się, że około 3 mln ton rocznie może być przeznaczane na ten cel (Faber i in., 2009). Spośród

roślin zbożowych największy udział w tej grupie przypada na słomę pszenicy zwyczajnej *Triticum aestivum* L.

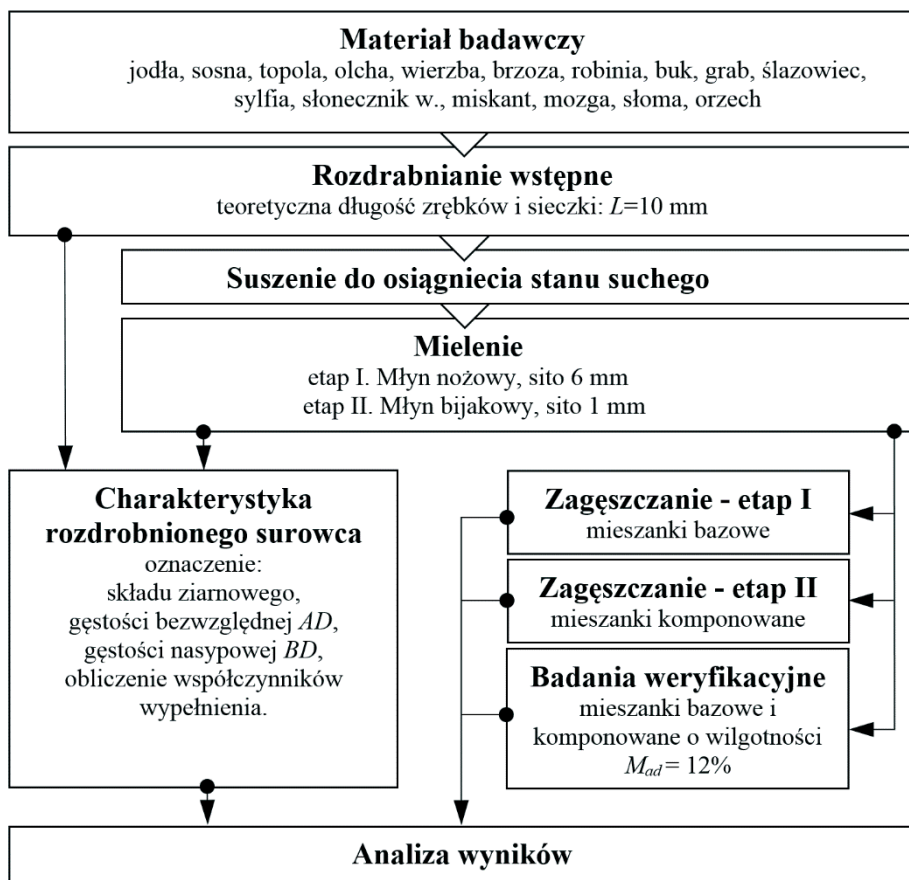
Łupiny, łuski, pestki itp. to kolejna grupa pozostałości z przemysłu rolno-spożywczego, możliwa do wykorzystania na cele energetyczne. Ze względu na wysokie wartości parametrów energetycznych oraz formę naturalnego granulatu mogą one być spalane w systemach zautomatyzowanych (Zajemska i Musiał, 2013). W Polsce rośnie podaż łupin orzecha włoskiego *Juglans regia* L. ze względu na wzrost jego areалу upraw (Zydlík i Zydlík, 2016).

W celu uproszczenia opisu realizacji dalszych etapów pracy, pełne nazwy gatunkowe materiału badawczego zastąpiono nazwami skróconymi:

- jodła pospolita *Abies alba* Mill. – jodła,
- sosna pospolita *Pinus sylvestris* L. – sosna,
- topola klon Monviso *Populus × generosa × Populus nigra* – topola,
- olcha szara *Alnus incana* (L.) Moench – olcha,
- wierzbza wiciowa *Salix viminalis* L. – wierzbza,
- brzoza brodawkowata *Betula pendula* Roth – brzoza,
- robinia biała *Robinia pseudoacacia* L. – robinia,
- buk pospolity *Fagus sylvatica* L. – buk,
- grab pospolity *Carpinus betulus* L. – grab,
- ślazowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby – ślazowiec,
- rożnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L. – sylfia,
- słonecznik wierzbolistny *Helianthus salicifolius* A. Dietr. – słonecznik w.,
- miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus* – miskant,
- mozga trzcinowata *Phalaris arundinacea* L. – mozga,
- pszenica zwyczajna *Triticum aestivum* L. – słoma,
- orzech włoski *Juglans regia* L. – orzech.

## 4.2. Przebieg badań

Przebieg głównych etapów badań przedstawiono schematycznie na rysunku 4.1. Cały proces badawczy – pomiarowy zrealizowano w Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości Biopaliw (LABIOM) Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, które od 11.01.2016 jest Laboratorium Badawczym akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji (nr akredytacji AB 1585). Laboratorium posiada zakres akredytacji w dziedzinie badań właściwości fizycznych paliw stałych wytworzonych z biomasy. Oznaczeń badanych parametrów dokonano w oparciu o metody znormalizowane, metody zalecane przez producentów aparatury badawczej oraz o metody autorskie.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.1. Ogólny schemat badań

#### 4.2.1. Przygotowanie materiału

##### *Rozdrabnianie wstępne*

Biomasa drzewna w postaci pędów oraz drewna kawałkowego wymagała przygotowania wstępnego polegającego na jej okorowaniu. Badania w tym przypadku realizowano na drewnie bez udziału kory. Następnie, pozbawiona kory, biomasa drzewna była rozdrabnianą na rębarkę bębnową zaprojektowanej i wykonanej na potrzeby badań realizowanych w LABIOM. Rębarka jest przeznaczona do zrębkowania biomasy drzew uprawianych w systemie szybkiej rotacji (Frączek i Mudryk, 2007, 2009). Teoretyczna długość zrębkowania  $L$  wynosiła 10 mm.

Rozdrabnianie biomasy zielonej (w postaci całych pędów pozyskanych z plantacji), przeprowadzono na sieczkarni toporowej. W tym przypadku teoretyczna długość zrębkowania  $L$  również wynosiła 10 mm.

Łupin orzecha nie poddawano wstępnemu rozdrabnianiu.

### *Suszenie*

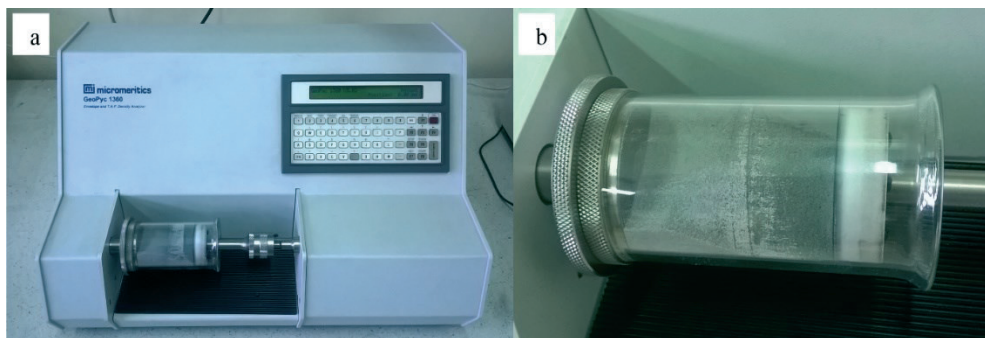
Plan badań zakładał, że ciśnieniowe zagęszczanie biomasy realizowane będzie na materiale pozbawionym wilgoci. W ten sposób określony zostanie wpływ materiału (rodzaju biomasy), ciśnienia i składu ziarnowego na zagęszczalność i kompaktowalność badanej biomasy. W związku z powyższym, wstępnie rozdrobniony materiał poddano suszeniu w suszarce laboratoryjnej SLW 115 firmy Pol-Eko, do momentu całkowitego usunięcia wilgoci, uzyskano w ten sposób materiał badawczy w stanie suchym. Proces suszenia prowadzono w temperaturze 80°C. Taki poziom temperatury suszenia został przyjęty za (Wilén i in., 1996). Temperatury w zakresie 70-80°C, zaleca się na przykład do suszenia liści tytoniu lub drewna. Taki poziom temperatury umożliwia powolne usuwanie wody z biomasy, a jednocześnie zapobiega uwalnianiu innych lotnych składników, które mogą pozytywnie wpływać na proces zagęszczania. Suszenie uznano za zakończone w momencie, gdy pomiędzy kolejnymi pomiarami masy próbki nie odnotowano zmian. Pomiar masy prowadzono w odstępach 2-godzinnych (waga WLC10/A2 firmy RADWAG).

### *Oznaczenie gęstości właściwej*

Z wysuszonego materiału, pobrano próbki zrębków, sieczki oraz łupin do oznaczenia gęstości właściwej  $DE$  materiału badawczego. Oznaczenie przeprowadzono przy użyciu piknometru quasicieczowego GeoPyc 1360 firmy Micromeritics Instrument Corp. (rys. 4.2a). Urządzenie mierzy objętość próbki umieszczonej w wypełnionym proszkiem o uziarnieniu poniżej 250  $\mu\text{m}$ , cylindrze pomiarowym (rys. 4.2b). Wykorzystanie proszku zamiast cieczy pozwala na wyeliminowanie zjawiska zwilżania i wsiąkania cieczy do porów badanego materiału, co pozwala na badanie materiałów wykazujących dużą chłonność.

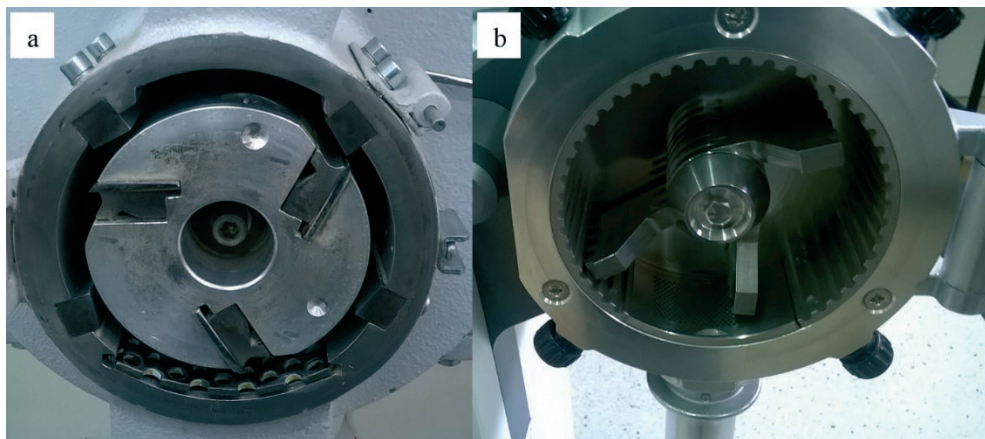
Przed uruchomieniem procedury pomiarowej do pamięci urządzenia wprowadza się dane identyfikacyjne próbki wraz z jej masą. Następnie w uchwycie urządzenia umieszcza się szklany cylinder pomiarowy wypełniony częściowo quasicieczowym proszkiem i uruchamia się procedurę pomiarową. Urządzenie w pierwszym etapie określa objętość proszku w cylindrze w oparciu o jego średnicę i pomiar przesunięcia tłoka. Po zakończeniu pierwszego etapu, do cylindra pomiarowego dodaje się próbkę i rozpoczyna drugi etap pomiaru. Urządzenie na tym etapie określa sumaryczną objętość proszku i dodanego materiału. Po zakończeniu etapu drugiego, z różnicą, określonych w I i II etapie objętości, obliczana jest objętość próbki i na tej podstawie uwzględniając masę próbki wprowadzonej na początku procedury, obliczana jest gęstość właściwa  $DE$  badanej próbki.





Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.2. Piknometr quasieczystowy GeoPyc 1360: a – widok ogólny, b – cylinder pomiarowy



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.3. Młynki laboratoryjne: a – LMN-100 z nożowym systemem rozdrabniania i sitem  $\varnothing$  6 mm, b – PX-MFC 90D z bijakowym systemem rozdrabniania i sitem  $\varnothing$  1 mm

### Mielenie

Wysuszony materiał badawczy zmielono w celu uzyskania surowca o wielkości ziarna poniżej 1 mm, który będzie zagęszczany w kolejnych etapach badań. Mielenie przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie materiał mielono w nożowym młynku laboratoryjnym LMN-100 firmy Testchem (rys. 4.3a), z zastosowaniem sita o średnicy otworów 6 mm. W drugim etapie materiał mielono w młynku laboratoryjnym PX-MFC 90D firmy POLYMIX (rys. 4.3b), w którym zastosowano bijakowy system rozdrabniający i sito o średnicy otworów 1 mm.



Tak przygotowany materiał, określany jako mieszanki bazowe, stanowił bazę surowcową do dalszych etapów badań. Aby materiał nie wchłaniał wilgoci z otaczającego go powietrza, umieszczono go w hermetycznie zamkniętych pojemnikach, z których pobierano próbki zarówno do oznaczeń parametrów charakteryzujących surowiec jak i do wykonania granul.

#### 4.2.2. Charakterystyka rozdrobnionego surowca

Przed przystąpieniem do głównej części badawczej pracy, obejmującej proces ciśnieniowego zagęszczania biomasy, oznaczono podstawowe parametry charakteryzujące rozdrobniony surowiec biomasowy. Oznaczono gęstość bezwzględną i nasypową oraz skład ziarnowy. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono współczynniki wypełnienia złóż. Tak szeroki zakres parametrów charakteryzujących badaną biomasę miał na celu zgromadzenie danych, na podstawie których podjęto próbę jej pogrupowania.

##### *Oznaczenie składu ziarnowego*

Procedury oznaczania składu ziarnowego rozdrobnionej biomasy zawarte są w normach PN-EN ISO 17827-1 i PN-EN ISO 17827-2. Pierwsza z nich przeznaczona jest głównie dla biomasy wstępnie rozdrobnionej do postaci np. zrębków lub sieczonej i wymaga zestawu składającego się z sit o średnicy oczek 63; 45; 31,5; 16; 8; 3,15 mm, druga przeznaczona jest do biomasy w formie pyłu trocin itp. i wymaga zestawu składającego się z sita o otworach okrągłych o średnicy otworów 3,15 mm i sit plecionych #: 2,8; 2; 1,4; 1; 0,5; 0,25 mm.

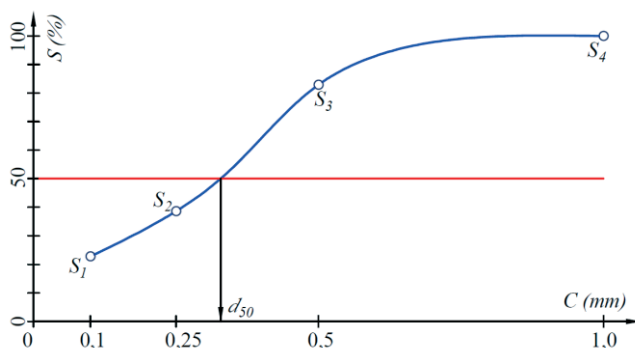
W przypadku normy PN-EN ISO 17827-1, wymagane jest by przesiewanie realizowano na urządzeniu, które zapewnia ruch zestawu sit w płaszczyźnie poziomej w jednym lub dwóch wymiarach. Zalecany czas trwania próby wynosi 15 minut.

Materiał badawczy rozdrobniono do wielkości ziarna  $d < 1$  mm, zatem przesiewanie próbki, zgodnie z PN-EN ISO 17827-2, realizowano na wstrząsarce laboratoryjnej LPzE-4e firmy Morek Multiserw, zestawem składającym się sit plecionych o rozmiarze oczek 1; 0,5; i 0,25 mm. Dodatkowo w zestaw włączono sito plecione o rozmiarze oczek 0,1 mm. W ten sposób próbki materiału badawczego rozdzielono na cztery frakcje wymiarowe zwane klasami sitowymi:

- $C_1$ : 0,1 – średnica ziarna  $d \leq 0,1$  mm,
- $C_2$ : 0,25 – średnica ziarna w zakresie  $0,1 < d \leq 0,25$  mm,
- $C_3$ : 0,5 – średnica ziarna w zakresie  $0,25 < d \leq 0,5$  mm,
- $C_4$ : 1 – średnica ziarna w zakresie  $0,5 < d \leq 1$  mm,

Po zakończeniu próby przesiewania ziarna materiału pozostałe na poszczególnych sitach ważono z dokładnością do 0,1 g (waga WLC 10/A2 firmy RADWAG), a wynik przedstawiono jako procentowy udział poszczególnych klas sitowych w całej próbce.

Na podstawie uzyskanych danych określono skumulowane udziały frakcji  $S$  i tak:  $S_1$  to procentowy udział frakcji  $C_1$  w całej masie próbki,  $S_2$  – sumaryczny udział frakcji  $C_1$  i  $C_2$ ,  $S_3$  – sumaryczny udział frakcji  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , a  $S_4$  – sumaryczny udział frakcji  $C_1$  –  $C_4$ . Obliczone wartości  $S$  posłużyły do wykreślenia wykresu skumulowanego składu ziarnowego (przykład przedstawia rysunek 4.4).



Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 17827

Rys. 4.4. Przykład wykresu skumulowanego składu ziarnowego wraz ze sposobem graficznego wyznaczania  $d_{50}$

Na podstawie wartości  $S$  i  $C$  obliczono środkową wartość rozmiaru ziarna  $d_{50}$ ,

$$d_{50} = C_{<50} + (50 - S_{<50}) \cdot \frac{C_{>50} - C_{<50}}{S_{>50} - S_{<50}}$$

gdzie:

- $S_{<50}$  – najwyższy skumulowany udział frakcji  $S$  jednak nie przekraczający wartości 50%,
- $S_{>50}$  – najniższy skumulowany udział frakcji  $S$  jednak przekraczający wartość 50%,
- $C_{<50}$  – klasa sitowa odpowiadająca  $S_{<50}$ ,
- $C_{>50}$  – klasa sitowa odpowiadająca  $S_{>50}$ .

Graficzny sposób wyznaczania  $d_{50}$  przedstawia rysunek 4.4

#### Oznaczenie gęstości bezwzględnej

Gęstość bezwzględną  $AD$ , zwaną czasem gęstością absolutną, oznaczono z wykorzystaniem piknometru gazowego AccuPyc II 1340 firmy Micromeritics Instrument Corp. (rys. 4.5a). Gęstość bezwzględna, to gęstość materiału bez porów wewnętrznych do których w trakcie pomiaru jest w stanie wnikać gaz pomiarowy. W badaniach jako gaz pomiarowy wykorzystano hel. Urządzenie oznacza objętość i gęstość próbki poprzez pomiar zmiany ciśnienia helu w ramach skalibrowanych objętości komór pomiarowych (komory próbki i komory rozprężeniowej). Urządzenie w pomiarach wykorzystuje zależności wynikające bezpośrednio z prawa Clapeyrona, przy założeniu, że temperatura w obrębie jednego pomiaru nie ulega zmianie.

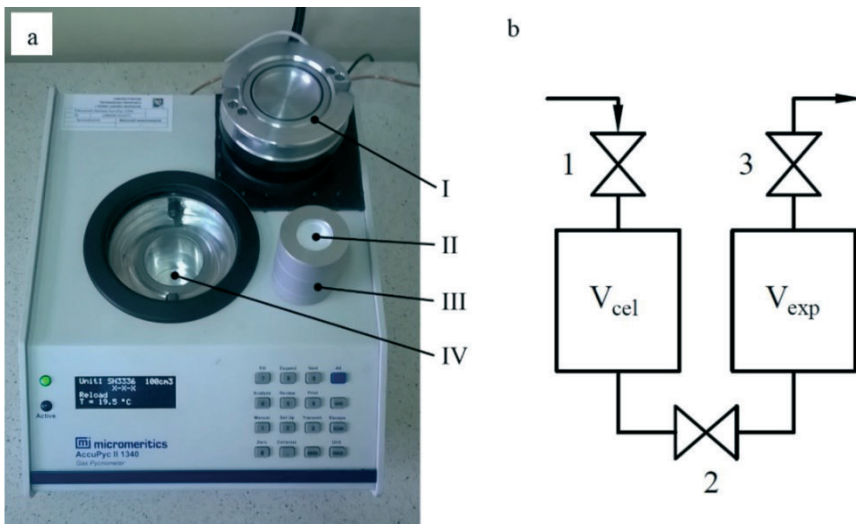
$$V = \frac{V_{cel} - V_{exp}}{\frac{p_1}{p_2} - 1}$$

$$AD = \frac{m}{V}$$

gdzie:

- $V$  – objętość próbki,
- $V_{cel}$  – objętość komory próbki,
- $V_{exp}$  – objętość komory rozprężeniowej,
- $p_1$  – nadciśnienie po napełnieniu komory próbki,
- $p_2$  – nadciśnienie po rozprężeniu.

Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 4.5b. Przed rozpoczęciem serii pomiarowej przeprowadzana jest procedura przedmuchu, mająca na celu usunięcie z komór urządzenia pozostałego powietrza, pary wodnej oraz innych gazów mogących wpłynąć negatywnie na dokładność analizy. Próbka badanego materiału (w postaci rozdrobnionej) po określeniu jej masy, umieszczana jest w zamkniętym pojemniku pomiarowym, a pojemnik umieszczany jest w komorze próbki (rys. 4.5a).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.5. Piknometr gazowy AccuPyc II 1340: a – widok ogólny, I – pokrywa komory próbki, II – membrana, III – pojemnik pomiarowy, IV – komora próbki b – schemat urządzenia, 1 – zawór dolotowy, 2 – zawór łączący komory, 3 – zawór wylotowy

Zamknięcie pojemnika pomiarowego posiada membranę, która uniemożliwia wydmuchanie drobin próbki z pojemnika, ale jednocześnie pozwala na dostanie się gazu pomiarowego do jej wnętrza. Pomiar  $AD$  pojedynczej próbki jest dwuetapowy. W pierwszym etapie komora próbki jest napełniana helem do zadanego nadciśnienia roboczego. Na tym etapie otwarty jest zawór 1, natomiast zawory 2 i 3 są zamknięte (rys 4.5b). W momencie

osiągnięciu zadanego nadciśnienia, zamykany jest zawór 1, po ustaleniu się wartości nadciśnienia, jest ona zapisywana w pamięci urządzenia jako  $p_1$  i następuje przejście do etapu drugiego. Zostaje otwarty zawór 2, gaz rozpręża się wypełniając komorę rozprężeniową, której objętość jest znana. Po ustabilizowaniu się wartości nadciśnienia w obu połączonych komorach zostaje ona zapisana jako  $p_2$ , tak jak miało to miejsce w pierwszym etapie. Następnie zawór 3 zostaje otwarty do momentu wyrównania się ciśnień wewnątrz aparatu względem otoczenia.

#### *Oznaczenie gęstości nasypowej*

Przez gęstość nasypową  $BD$  rozumiemy stosunek masy materiału ziarnistego (zrębki, trociny, pelet, pył drzewny itp.) do zajmowanej przez ten materiał objętości wraz z objętością przestrzeni pomiędzy ziarnami.

Dla rozdrobnionej biomasy, przeznaczonej do produkcji biopaliw stałych, oznaczenie  $BD$  zaleca się przeprowadzać wg wytycznych normy PN-EN ISO 17828. Gęstość nasypowa oznaczana jest w zbiorniku pomiarowym w kształcie walca o pojemności 5 dm<sup>3</sup> lub 50 dm<sup>3</sup> (z dopuszczalną odchyłką wynoszącą 2%). Wybór pojemnika zależy od rozmiaru ziarna oznaczanego materiału. Dla materiału o  $d_{95}$  do 12 mm norma zaleca mniejszy z pojemników, a dla materiału o  $d_{95}$  powyżej 12 mm większy. Średnica wewnętrzna zbiorników to 360 mm i 167 mm, natomiast wysokość odpowiednio 491 i 228 mm. Dopuszcza się odchyłki od tych wymiarów pod warunkiem, że stosunek wysokości zbiornika do jego średnicy zawierał się będzie w przedziale 1,25 – 1,5. Im większe cząstki tworzące złożę, tym konieczny jest większy zbiornik (aby zniwelować tzw. „efekt ścian”, który powoduje zaniżenie określanej wartości  $BD$ ).

Wybrany pojemnik o znanej masie  $m_1$ , napełnia się materiałem z wysokości 200 – 300 mm. Napełniony pojemnik 2 razy upuszcza się z wysokości około 150 mm na drewnianą podstawę, uzupełnia materiał, a nadmiar, pozostający powyżej krawędzi zbiornika, zgarnia. Waży się pojemnik z materiałem, a gęstość nasypową  $BD$  określa z zależności:

$$BD = \frac{(m_2 - m_1)}{V}$$

gdzie:

- $BD$  – gęstość nasypowa (kg·m<sup>-3</sup>),
- $m_1$  – masa pustego pojemnika (kg),
- $m_2$  – masa pojemnika z materiałem (kg),
- $V$  – objętość pojemnika (m<sup>3</sup>).

Z uwagi na fakt, że badane materiały posiadały wielkość ziarna poniżej 1 mm, założono że możliwe będzie użycie pojemnika o mniejszej objętości.

Aby potwierdzić to założenie przeanalizowano inne normy oznaczania gęstości nasypowej, dedykowane dla materiałów o zbliżonej wielkości ziarna co materiał bazowy.

I tak w przypadku ziaren zbóż, oznaczanie gęstości nasypowej, zwanej w tym przypadku gęstością w stanie zsypanym odbywa się w pojemniku o objętości 1 dm<sup>3</sup> (PN-EN ISO 7971-3). Stosunek wysokości do średnicy pojemnika wynosi w tym przypadku 1,86. Zmniejszenie objętości pojemnika związane jest z wielkością ziaren tworzących złożę, która nie przekracza wartości kilku milimetrów. Norma PN-R-74007 dopuszczała nawet pojemnik o objętości 0,25 dm<sup>3</sup>. W tej procedurze nie występuje etap zagęszczania złoża.

W przemyśle farmaceutycznym, gęstość nasypowa proszków o wielkości ziarna poniżej 1 mm, określana jest w pojemnikach o objętości 0,025 dm<sup>3</sup> (EU Pharmacopeia, 2017). W tym przypadku również nie występuje etap zagęszczania złoża a stosunek wysokości do średnicy pojemnika, wynosi 1,18.

Ostatecznie do oznaczania gęstości nasypowej użyto pojemnika o objętości 0,25 dm<sup>3</sup> ( $\pm 2\%$ ). Średnica pojemnika wynosiła 62 mm, a stosunek średnicy do wysokości 1,34. W procedurze oznaczania zachowano etap zagęszczania złoża, jednak napełniony pojemnik upuszczano 2 razy na drewnianą podstawę z wysokości około 30 a nie 150 mm. Pozostałe etapy zachowano zgodne z wytycznymi PN-EN ISO 17828.

Wg tak zmodyfikowanej procedury oznaczano gęstość nasypową mieszanek bazowych poszczególnych frakcji wymiarowych oraz mieszanek komponowanych, o których będzie mowa w dalszej części tego rozdziału.

### *Współczynnik wypełnienia*

Współczynnik wypełnienia  $\varphi$  to ogólnie stosunek objętości cząstek tworzących materiał ziarnisty do objętości zajmowanej przez ten materiał.

W przypadku badanych złóż, oznaczone wartości gęstości nasypowej  $BD$ , właściwej  $SD$  i bezwzględnej  $AD$ , pozwoliły na obliczenie współczynnika wypełnienia zewnętrznego  $\varphi_{zew}$ , wewnętrznego  $\varphi_{wew}$ , oraz całkowitego współczynnika wypełnienia  $\varphi_c$  z zależności:

$$\varphi_{zew} = \frac{BD}{SD}$$

$$\varphi_{wew} = \frac{SD}{AD}$$

$$\varphi_c = \frac{BD}{AD}$$

W kolejnym etapie obliczono udział  $U_z$  współczynnika wypełnienia zewnętrznego  $\varphi_{zew}$  i udział  $U_w$  współczynnika wypełnienia wewnętrznego  $\varphi_{wew}$  w całkowitym współczynniku wypełnienia  $\varphi_c$ . Znajomość tych udziałów pozwoli na etapie analizy wyników, wskazać czy i który z nich ma wpływ na zagęszczalność i kompaktowalność badanych materiałów. Z uwagi na fakt, że  $\varphi_c$  nie jest sumą  $\varphi_{zew}$  i  $\varphi_{wew}$  przyjęto względne współczynniki wypełnienia zewnętrznego  $\varphi_{zew}^*$  i wewnętrznego  $\varphi_{wew}^*$ :

$$\varphi_{zew}^* = \frac{\varphi_{zew}}{\varphi_c}$$

$$\varphi_{wew}^* = \frac{\varphi_{wew}}{\varphi_c}$$

Dzięki temu względny całkowity współczynnik wypełnienia  $\varphi_c^*$  można opisać zależnością w postaci sumy:

$$\varphi_c^* = \varphi_{zew}^* + \varphi_{wew}^* = \frac{\varphi_{zew}}{\varphi_c} + \frac{\varphi_{wew}}{\varphi_c} = \frac{\varphi_{zew} + \varphi_{wew}}{\varphi_c}$$

Zatem udział  $U_z$  współczynnika wypełnienia zewnętrznego  $\varphi_{zew}$  w całkowitym współczynniku wypełnienia  $\varphi_c$  można obliczyć z zależności:

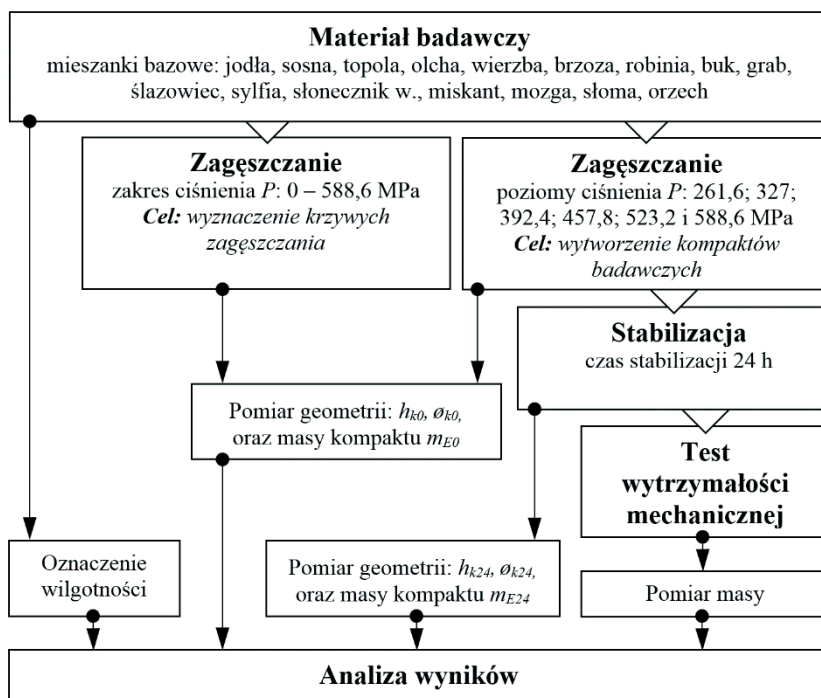
$$U_z = \frac{\varphi_{zew}^*}{\varphi_c^*}$$

A udział  $U_w$  współczynnika wypełnienia wewnętrznego  $\varphi_{wew}$  w całkowitym współczynniku wypełnienia  $\varphi_c$  z zależności:

$$U_w = \frac{\varphi_{wew}^*}{\varphi_c^*}$$

#### 4.2.3. Zagęszczanie ciśnieniowe – etap I

W tym etapie badań materiał badawczy stanowiła rozdrobniona biomasa wszystkich badanych gatunków roślin o składzie ziarnowym uzyskanym w wyniku mielenia – tzw. mieszanki bazowe. Badania realizowano wg schematu przedstawionego na rysunku 4.6.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.6. Schemat badań - etap I

### *Oznaczanie zawartości wilgoci*

Jak już wspomniano, materiał po etapie suszenia i mielenia przechowywany był w hermetycznie zamkniętych pojemnikach. Aby jednak sprawdzić, czy w trakcie przechowywania nie nastąpiła zmiana jego wilgotności, przed ciśnieniową aglomeracją, metodą suszarkową oznaczono zawartość wilgoci w mieszkankach bazowych. Oznaczenie zrealizowano wg wytycznych normy PN-EN ISO 18134-3. Zawartość wilgoci w próbce przygotowanej do prowadzenia badań nazywa się wilgotnością analityczną  $M_{ad}$ . Próbkę materiału o uziarnieniu  $d_{95} \leq 1$  mm umieszczono w naczynkach wagowych i suszono w suszarce laboratoryjnej SLW 115 firmy Pol-Eko. Przed przystąpieniem do oznaczania naczynka wagowe wraz z pokrywami wyprażono i określono ich masę z dokładnością do 0,1 mg (waga AS 160.R2 firmy RADWAG). Następnie po umieszczeniu w nich co najmniej 1 g próbki materiału, naczynka ponownie ważono z dokładnością 0,1 mg. Nie przykryte naczynka wraz z pokrywami umieszczono w suszarce i suszono w temperaturze  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  do momentu ustabilizowania się ich masy (różnica masy nie przekraczająca 1 mg pomiędzy pomiarami kontrolnym w odstępie 60min). W przypadku próbek badanej biomasy czas suszenia nie przekroczył 3 h. Po zakończonym suszeniu przykryto naczynka pokrywami, przeniesiono do eksykatora i pozostawiono do wystudzenia, a następnie ważono z dokładnością do 1 mg. Wilgotność analityczną  $M_{ad}$  określono z zależności:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

gdzie:

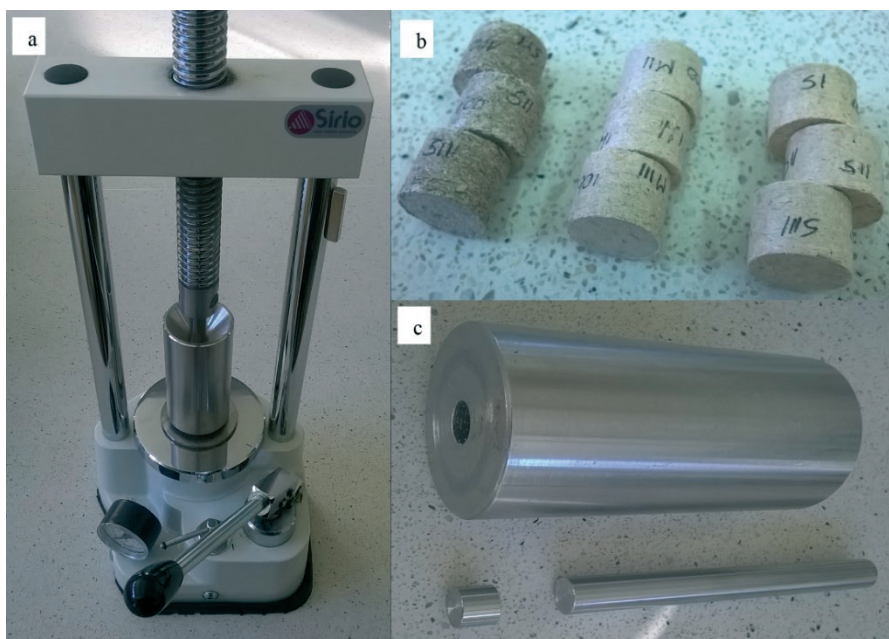
- $M_{ad}$  – zawartość wilgoci analitycznej (%),
- $m_1$  – masa naczynka z pokrywą (g),
- $m_2$  – masa naczynka z pokrywą i próbką przed suszeniem (g),
- $m_3$  – masa naczynka z pokrywą i próbką po suszeniu (g).

Zawartość wilgoci w próbkach zawierała się w przedziale 1 – 1,4%, uznano ten poziom wilgotności za dopuszczalny i dlatego przed procesem wytwarzania granul materiał nie był już dosuszany.

### *Zagęszczanie ciśnieniowe*

Proces ciśnieniowej aglomeracji mieszanek bazowych zrealizowano na prasie hydraulicznej P400 firmy SIRIO, wyposażonej w zestaw zagęszczający umieszczany pomiędzy płaszczyznami górnej i dolnej głowicy prasy (rys. 4.7a). Zestaw zagęszczający składał się z tulei, tłoka i przeciwtłoka (rys. 4.7b). Po złożeniu w całość, tuleja, przeciwtłok i tłok, tworzyły zamkniętą komorę, w której zagęszczana była próbka rozdrobnionego materiału (rys. 4.7c).





Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.7. Stanowisko zagęszczania próbek: a – prasa hydrauliczna, b – przykładowe granule, c – zestaw zagęszczający tuleja – tłok – przeciwtłok

Urządzenie pozwala na określenie ciśnienia jakie będzie wywierane na zagęszczany materiał umieszczony w komorze zagęszczającej. Aby uzyskać informacje jak wzrost ciśnienia zagęszczania wpływa na zmianę gęstości próbki znajdującej się w komorze, w trakcie zagęszczania po uzyskaniu kolejnego poziomu ciśnienia mierzono odległość  $h_p$  pomiędzy płaszczyznami górnej i dolnej głowicy prasy. Znając sumaryczną wysokość tłoka i przeciwtłoka  $h_0$  i odejmując ją od  $h_p$  obliczano wysokość granuli  $h_{k0}$  tworzącej się w komorze, a znając średnicę kanału tulei  $\phi_{k0}$  zagęszczającej i masę  $m_{E0}$  utworzonej granuli określono jej gęstość właściwą  $DE_{k0}$  przy danym ciśnieniu, na podstawie zależności:

$$DE_{k0} = \frac{m_{E0}}{V_{k0}}$$

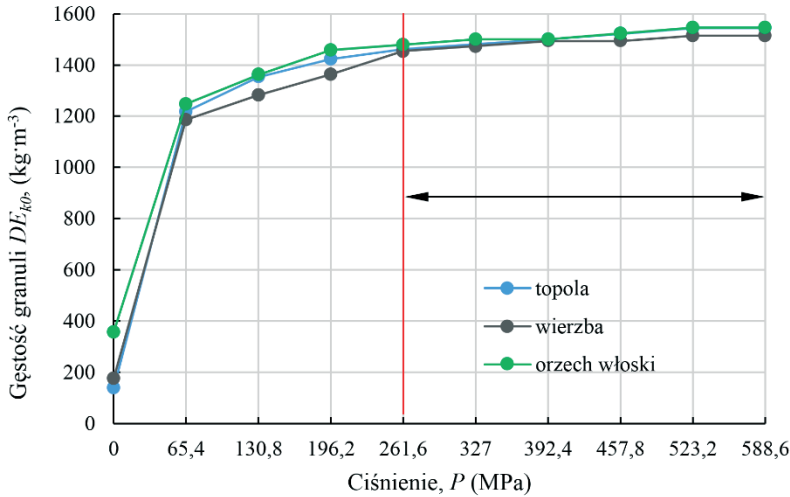
gdzie objętość granuli  $V_{k0}$  :

$$V_{k0} = \pi \cdot \left( \frac{\phi_{k0}}{2} \right)^2 \cdot h_{k0}$$

Pomiar  $h_p$ ,  $h_0$  oraz  $\phi_{k0}$  wykonano za pomocą suwmiarki o rozdzielczości wskazań wyświetlacza 0,01 mm, natomiast masy granuli  $m_{E0}$  za pomocą wagi AS 160.R2 firmy RAD-WAG z dokładnością do 0,1 mg.

W trakcie realizacji badań zauważono, że maksymalna wartość gęstości  $DE_{k0}$  jest zbliżona do wartości gęstości bezwzględnej materiału bazowego  $AD$  uzyskanych na piknometrze helowym. W wielu przypadkach wartość  $DE_{k0}$  przewyższała  $AD$  dlatego ostatecznie maksymalną wartość  $DE_{k0}$  uznano za gęstość bezwzględną materiału  $AD$  i ona posłużyła do obliczeń.

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono krzywe zagęszczania badanych materiałów przedstawiające zmianę gęstości granuli wewnątrz tulei wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania  $P$  w zakresie 0 – 588,6 MPa.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.8. Przykładowe krzywe zagęszczania

Na podstawie analizy krzywych zagęszczania przyjęto, że granule stanowiące materiał badawczy procesu zagęszczania wytwarzane będą przy następujących poziomach ciśnienia: 261,6; 327; 392,4; 457,8; 523,2 oraz 588,6 MPa (obszar w którym następuje stabilizacja przyrostu gęstości granuli).

Wartość średnicy tulei zagęszczania wynosiła 12 mm natomiast masa próbki, ustalona na podstawie testów próbnych, pozwalała na uzyskanie granuli o wysokości w przybliżeniu równej jej średnicy.

Dla każdego poziomu ciśnienia wykonano po 5 sztuk granul z każdej mieszanki bazowej. Podobnie jak w przypadku krzywych zagęszczania, w trakcie zagęszczania określono  $h_p$ ,  $h_o$  oraz  $\phi_{k0}$  i masę granuli  $m_{E0}$  bezpośrednio po wyjęciu jej z tulei. Wytworzone granule przechowywano w hermetycznych pojemnikach, a po upływie 24 h ponownie określano ich geometrię i masę oraz przeprowadzono dalsze analizy. Średnice  $\phi_{k24}$  i wysokości  $h_{k24}$  granul mierzono za pomocą suwmiarki o rozdzielczości wskazań wyświetlacza 0,01 mm a ich masę  $m_{E24}$  oznaczono na wadze laboratoryjnej AS 160.R2 firmy RADWAG z dokładnością do 0,1 mg.

*Rozpręż poaglomeracyjny*

Po upływie 24 h od czasu wytworzenia granuli, na podstawie oznaczonej geometrii granul obliczono wartości rozprężu poaglomeracyjnego  $R_{24}$ . Ze względu na specyfikę surowca charakteryzującego się sprężystością, wartość rozprężu, jako parametr wstępny, wskazuje w jakim stopniu właściwości surowca i warunki procesu zagęszczania wpływają na uzyskiwane granule. Rozkurcz to procentowy wzrost objętości granuli  $V_{k24}$  w stosunku do jej objętości początkowej  $V_k$  (wewnątrz komory zagęszczania przy zadanym poziomie ciśnienia).

$$R_{24} = \frac{(V_{k24} - V_{k0})}{V_{k0}} \cdot 100$$

$$V_{k24} = \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_{k24}}{2}\right)^2 \cdot h_{k24}$$

gdzie:

- $R_{24}$  – rozpręż poaglomeracyjny (%),
- $V_{k0}$  – początkowa objętość granuli ( $\text{mm}^3$ ),
- $V_{k24}$  – objętość granuli po 24 h od wytworzenia ( $\text{mm}^3$ ),
- $\varnothing_{k24}$  – średnica granuli po 24 h (mm),
- $h_{k24}$  – wysokość granuli po 24 h (mm).

Niskie wartości rozkurczu świadczą o tym, że proces zagęszczania i jego parametry nielubują destrukcyjne działanie rozprężającego się materiału, natomiast wysokie wartości wskazują, iż parametry procesu w niedostatecznym stopniu stabilizują granulę, a sprężystość materiału powoduje jej niszczenie.

*Parametry jakościowe uzyskanych granuli*

Normy z serii PN-EN ISO 17225, omówione w rozdziale 2, dla peletów oraz brykietów, jako główne parametry jakościowe wymieniają: zawartość popiołu  $A$ , zawartość części lotnych  $V_d$ , wartość opałową  $q_{p,net}$ , wilgotność  $M$ , wytrzymałość mechaniczną  $DU$ , gęstość nasypową  $BD$  lub właściwą  $DE$ . Wszystkie wymienione parametry są istotne dla odbiorcy finalnego. Część z nich jest istotna z punktu widzenia energetycznego, a część logistycznego. Biorąc pod uwagę proces wytwarzania (zagęszczanie ciśnieniowe) niektóre parametry jakościowe są ściśle od niego zależne, natomiast inne zależą od surowca i proces zagęszczania ich nie zmienia. Przeprowadzono ocenę kryterialną głównych parametrów jakościowych, na podstawie której wybrano te, które reprezentują jakość wytworzonych granuli zależną od procesu wytwarzania.

Zastosowano uproszczoną metodę oceny punktowej (Gendarz i in., 2014). Ocenianymi parametrami była zawartość popiołu w stanie suchym  $A_d$ , wartość opałowa w stanie suchym  $q_{p,net,d}$ , wilgotność robocza  $M_{ar}$ , wytrzymałość mechaniczna  $DU$  i gęstość właściwa  $DE$ . Przyjęto trzy kryteria oceny:

- $K1$  – ważność parametru w aspekcie energetycznym,
- $K2$  – ważność parametru w aspekcie logistycznym,
- $K3$  – oddziaływanie procesu aglomeracji na dany parametr.

W pierwszym etapie oceniono ważność kryteriów porównując je ze sobą na zasadzie, jeśli kryterium jest ważniejsze otrzymuje ocenę 1, jeśli mniej ważne – ocenę 0, jeśli kryteria są równoważne – ocenę 0,5. Ocenę przedstawiono w tabeli 4.2. Najwyższą wagę uzyskało kryterium  $K3$ .

Tabela 4.2.  
*Ocena ważności kryteriów*

|      | $K1$ | $K2$ | $K3$ | Ocena ważności kryterium |
|------|------|------|------|--------------------------|
| $K1$ |      | 0,5  | 0    | 0,5                      |
| $K2$ | 0,5  |      | 0    | 0,5                      |
| $K3$ | 1    | 1    |      | 2                        |

*Źródło: opracowanie własne*

Następnie dokonano oceny poszczególnych parametrów jakościowych pod względem kryteriów. Do oceny przyjęto skalę od 0 do 3. Wyniki oceny parametrów przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3.  
*Ocena parametrów jakościowych względem kryteriów  $K$*

| Parametr      | Kryterium $K1$ |      |       | Kryterium $K2$ |      |       | Kryterium $K3$ |      |       | Ocena końcowa |
|---------------|----------------|------|-------|----------------|------|-------|----------------|------|-------|---------------|
|               | ocena          | waga | wynik | ocena          | waga | wynik | ocena          | waga | wynik |               |
| $A_d$         | 1              | 0,5  | 0,5   | 0              | 0,5  | 0     | 0              | 2    | 0     | 0,5           |
| $q_{p,net,d}$ | 3              | 0,5  | 1,5   | 0              | 0,5  | 0     | 0              | 2    | 0     | 1,5           |
| $M_{ar}$      | 2              | 0,5  | 1     | 1              | 0,5  | 0,5   | 1              | 2    | 2     | 3,5           |
| $BD$          | 1              | 0,5  | 0,5   | 2              | 0,5  | 1     | 3              | 2    | 6     | 7,5           |
| $DU$          | 0              | 0,5  | 0     | 3              | 0,5  | 1,5   | 3              | 2    | 6     | 8             |

*Źródło: opracowanie własne*

W przypadku wilgotności wiadomym jest, że proces ciśnieniowego zagęszczania nie wpływa bezpośrednio na jej wartość. Jednak w czasie procesów aglomeracji (zwłaszcza peletowania) wytwarza się temperatura, która powoduje, że stygnący granulaty tracą część wilgoci i w efekcie gotowy produkt ma wilgotność niższą od surowca. Jest to jednak efekt wywołany temperaturą a nie bezpośrednio zagęszczaniem. Aby jednak uwzględnić te zmiany wilgotność pod względem kryterium  $K3$  oceniono na 1 a nie 0.

Aby parametr był uznany za reprezentujący jakość badanych granul zależną od procesu ciśnieniowej aglomeracji przyjęto, że musi on uzyskać minimum 80% oceny maksymalnej (maksymalna ocena końcowa to 9, więc 80% tej oceny to 7,2). Zatem granule wytworzone w toku realizacji badań oceniane będą pod kątem uzyskanej gęstości właściwej oraz wytrzymałości mechanicznej oznaczonej po 24 h od wytworzenia.

### *Gęstość właściwa*

Na podstawie pomiaru geometrii granuli po upływie 24 h od jej wytworzenia, oraz jego masy, obliczono gęstość właściwą granul  $DE_{k24}$  ze wzoru:

$$DE_{k24} = \frac{m_{E0}}{V_{k24}}$$

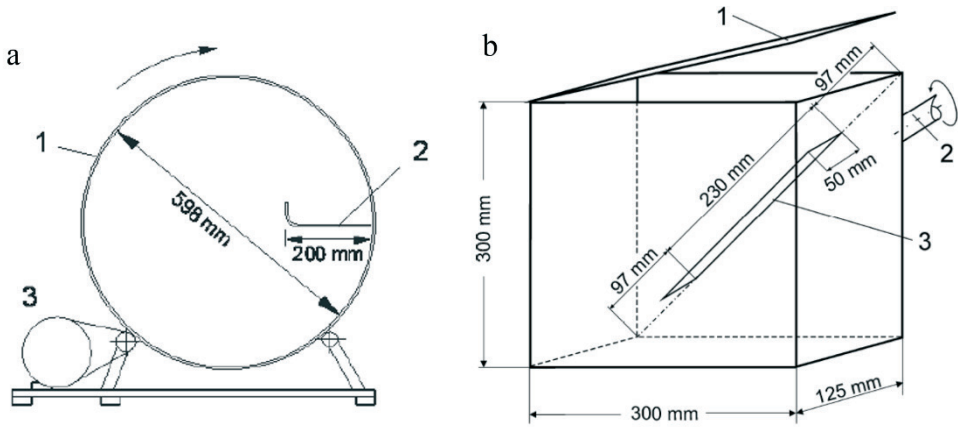
### *Wytrzymałość mechaniczna*

W wielu opracowaniach dotyczących pomiaru wytrzymałości granul, jako jej miarę podaje się wytrzymałość na ściskanie (tzw. test brazylijski – szerszy opis znajduje się w Przeglądzie literatury). W przypadku kompaktowanych biopaliw stałych, w procesach logistycznych pelety i brykiety narażone są co prawda na działanie sił zgniatających, jednak są one na tyle małe, że do tego typu uszkodzeń w czasie przeładunku, składowania itp. prawie nigdy nie dochodzi. Dlatego też wydaje się, że stosowanie testu brazylijskiego w przypadku biopaliw stałych jest bezzasadne. Biopaliwa te częściej, w trakcie operacji logistycznych, narażone są na czynniki destrukcyjne powodujące uszkodzenia w postaci okruszania ich krawędzi i tego typu uszkodzenia powinien symulować test wytrzymałości.

W zawiązku z powyższym do oznaczania wytrzymałości mechanicznej brykietów i peletów opracowano normy PN-EN ISO 17831-1 pelety i PN-EN ISO 17831-2 brykiety. W tym przypadku  $DU$  jest miarą odporności biopaliw na wstrząsy i/lub ścieranie powstające w wyniku transportu, przeładunku i przebiegu innych procesów dystrybucji oraz składowania. W trakcie testu, określona masa biopaliwa w postaci brykietów lub peletów zderza się z sobą nawzajem oraz ze ścianami komory testera. Pomiar dokonywany jest na stanowisku, które musi mieć znormalizowany kształt i wymiary komory (rys. 4.9). W przypadku brykietów jest to komora o objętości 160 dm<sup>3</sup>, w kształcie walca o wewnętrznej średnicy i wysokości  $598 \pm 8$  mm, wykonana z blachy grubości co najmniej 1 mm (rys. 4.9a). Wnętrze komory musi być gładkie bez jakichkolwiek występów i zadziorów. Wewnątrz bębna znajduje się prostokątna przegroda o wymiarach  $598 \pm 8 \times 200 \pm 2 \times 1$  mm umiejscowiona równolegle do jego osi obrotu, dłuższą krawędzią połączona z jego pobocznicą. Płaszczyzna przegrody leży w płaszczyźnie zawierającej oś symetrii bębna. Druga dłuższa krawędź jest łagodnie zagięta tworząc obrzeże prostopadłe do przegrody. Podczas obrotu bębna, testowany materiał jest zabierany przez przegrodę, a po osiągnięciu pewnej wysokości spada z niej zderzając się ze sobą i ściankami bębna.

W przypadku peletów komora ma kształt prostopadłościanu o wymiarach wewnętrznych  $300 \pm 3 \times 300 \pm 3 \times 125 \pm 1,3$  mm i wykonana jest z gładkiego i sztywnego materiału np. stali nierdzewnej (rys. 4.8b). Komora podczas testu obraca się wokół osi prostopadłej do centrum kwadratowej ściany komory. W celu uniknięcia przetaczania granulatu po ściankach, wewnątrz komory testera znajduje się specjalna przegroda (przyspieszająca proces destrukcji peletów). Przegroda o wymiarach  $230 \pm 2,3 \times 50 \pm 1,0$  mm przymocowana dłuższym bokiem, symetrycznie na przekątnej kwadratowej ściany komory. Krawędzie przegrody powinny być zaokrąglone, aby uniknąć efektu skrawania granu. Wszelkie występy wewnątrz komory (nity, śruby) powinny być ograniczone do minimum i zaokrąglone.

W obu przypadkach zamknięcia komór powinny być szczelne, aby podczas wykonywania testów nie wydostawał się z nich pył powstający w trakcie niszczenia biopaliw.



Źródło: opracowanie własne na podstawie PN-EN ISO 17831-1 i PN-EN ISO 17831-2

Rys. 4.9. Wymiary komór testerów: a – brykietów: 1 – bęben, 2 – przegroda, 3 – układ napędowy; b – peletów: 1 – pokrywa, 2 – wał napędowy, 3 – przegroda

Na potrzeby badań prowadzonych przez Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości Biopaliw zgodnie z wytycznymi norm PN-EN ISO 17831, zaprojektowano i wykonano stanowisko do oznaczania wytrzymałości mechanicznej kompaktowanych biopaliw stałych (rys. 4.10).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.10. Tester trwałości brykietu i peletu



Ze względu na średnicę wytworzonych granul, do badania ich wytrzymałości mechanicznej wybrano procedurę przeznaczoną dla peletu realizowaną w komorze prostopadłościenną. Wg wytycznych normy PN-EN ISO 17831-1, zważoną z dokładnością do 0,1 g próbkę peletu o masie  $500 \pm 10$  g należy umieścić w komorze testera. Po zamknięciu komora obraca się z prędkością  $50 \pm 2$  obrotów na minutę przez 10 min. Po zakończeniu próby, pelet należy przesiać przez sito o średnicy otworów 3,15 mm. Przesiewanie dokonywane jest w celu usunięcia drobnych frakcji, które oderwały się od granulatu podczas próby. Materiał pozostały na sicie należy zważyć z dokładnością do 0,1 g, a wytrzymałość mechaniczną próbki obliczyć ze wzoru:

$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100$$

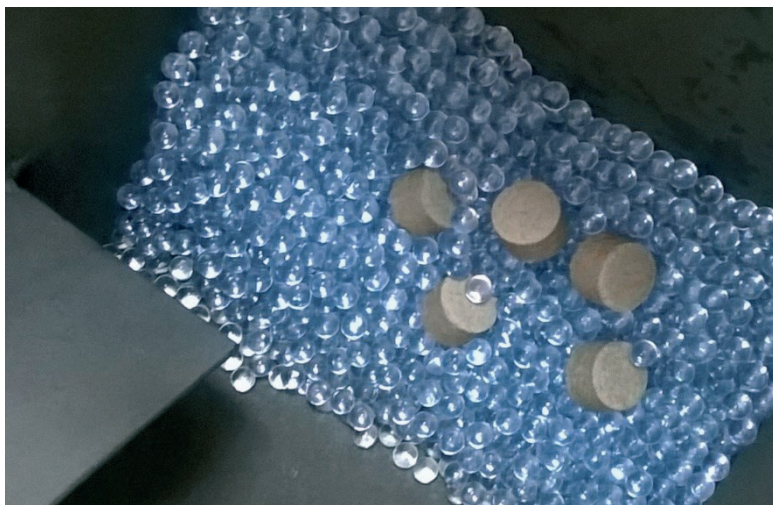
gdzie:

- $DU$  – wytrzymałość mechaniczna peletu (%),
- $m_A$  – masa próbki po teście (g),
- $m_E$  – masa próbki przed testem (g).

Niestety masa granul wytworzonych dla jednego rodzaju materiału i jednego ciśnienia była znacznie mniejsza w porównaniu z wymaganą przez normę. Z tego względu do procedury pomiaru trwałości wprowadzono modyfikację, która polegała na założeniu, że wymagana masa próbki zostanie uzyskana przez zastosowanie materiału balastowego, do którego dodawane będą badane granule. Masa balastu wynosiła 500 g, a masa dodanych do niego granul nie przekraczała 10 g (sumaryczna masa próbki była więc zgodna z wytycznymi normy). Aby również objętość próbki balastowej była porównywalna do próbki klasycznej, materiał balastowy powinien mieć gęstość właściwą zbliżoną do gęstości typowego peletu (ok.  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Zastosowano polistyren, którego gęstość właściwa wynosiła  $1070 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (oznaczenie za pomocą piknometru quasicieczowego GeoPyc 1360). Ziarna tworzące materiał balastowy miały kształt zbliżony do kuli o średnicy 5 mm (rys. 4.11). Zagęszczano materiał suchy co spowodowało, że wytrzymałość niektórych granul była niewielka i dlatego, aby nie powodować całkowitego ich rozpadu w trakcie testu, zdecydowano się na redukcję liczby obrotów. Na podstawie badań wstępnych ustalono, że liczbę obrotów bębna należy zredukować do 250. Wszystkie testy wykonano w tych samych warunkach, dlatego uzyskane wyniki mogą być porównywane.

Kolejną modyfikacją w stosunku do oryginalnej procedury był sposób obliczania trwałości granul. W procedurze normatywnej wynik odnoszony jest do masy próbki jako całości, natomiast w przypadku prowadzonych badań określano trwałość każdej pojedynczej granul, zatem wynik należało odnieść do jej masy. Zauważono, że okruszanie granul mającej formę walca, następuje tylko w rejonie obwodu jej podstaw, natomiast środkowa część pobocznic walca pozostaje nienaruszona (rys. 4.12). Zatem mimo tego, że masa rozkruszu dla dwóch granul o takiej samej średnicy, ale o różnej wysokości jest porównywalna, stosując wzór na  $DU$  obliczona wytrzymałość tych dwóch granul jest różna, ponieważ masa granul dłuższej jest większa od masy granul krótszej. Aby uniezależnić obliczanie  $DU$  od wysokości granul obliczono wytrzymałość mechaniczną granul zastępczej  $DU_{10}$  o stałej wysokości  $h_{k10}$  wynoszącej 10 mm.





*Źródło: opracowanie własne*

*Rys. 4.11. Materiał balastowy wraz z próbką granul umieszczony w komorze testera*



*Źródło: opracowanie własne*

*Rys. 4.12. Granula po teście wytrzymałości z widocznymi strefami w których następuje okruszanie*

Znając rzeczywistą masę granuli  $m_{E24}$  i jej wysokość  $h_{k24}$  obliczono masę granuli zastępczej  $m_{E10}$  o długości  $h_{k10}$  z zależności:

$$m_{E10} = \frac{m_{E24} \cdot h_{k10}}{h_{k24}}$$

Masa rozkruszu  $m_R$  to różnica masy granuli  $m_{E24}$  i masy granuli po teście  $m_A$ :

$$m_R = m_{E24} - m_A$$

Odejmując masę rozkruszu  $m_R$  od masy granuli zastępczej  $m_{E10}$  obliczono masę granuli zastępczej po teście  $m_{A10}$  jako:

$$m_{A10} = m_{E10} - m_R$$

I ostatecznie wytrzymałość mechaniczną granuli zastępczej  $DU_{10}$  z zależności:

$$DU_{10} = \frac{m_{A10}}{m_{E10}} \cdot 100$$

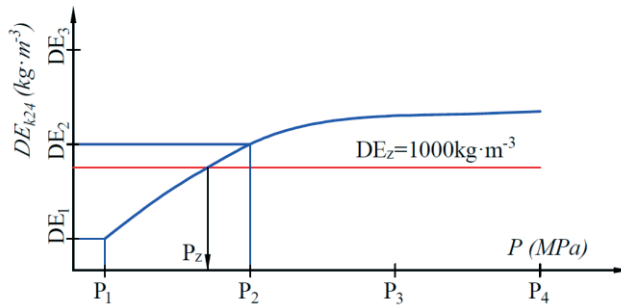
Dzięki zastosowaniu granuli zastępczej uzyskana wartość wytrzymałości mechanicznej nie jest uzależniona z wysokości granul. Pozwala to na porównanie uzyskanych wyników  $DU_{10}$ , niezależnie od tego jaką wysokość uzyskały granule badawcze. Średnica granul zmieniała się nieznacznie. Zmianie tej towarzyszy zmiana objętości i idąca za tym zmiana masy granuli. Jednocześnie zmienia się też masa rozkruszu (okruszanie obszaru na obwodzie średnicy granul). Zatem wpływ zmiany średnicy na wartość rozkruszu a tym samym na  $DU_{10}$  można uznać za nieistotną.

#### *Zagęszczalność i kompaktowalność*

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono przebiegi zmian gęstości właściwej  $DE_{k24}$  i wytrzymałości  $DU_{10}$  granul w zależności od ciśnienia zagęszczania  $P$ . Po przyjęciu progów minimalnej wymaganej gęstości właściwej (przyjęto  $DE_z = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) i wytrzymałości mechanicznej (przyjęto  $DU_k = 90\%$ ), wyznaczono progową zagęszczalność i kompaktowalność uzyskanych granul

Zagęszczalność progowa  $P_z$  to wartość ciśnienia  $P$ , przy której granula uzyskuje progową wartość gęstości właściwej  $DE_z$ . Natomiast kompaktowalność progowa  $P_k$  to wartość ciśnienia  $P$ , przy której granula uzyskuje progową wartość wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ .

Zagęszczalność i kompaktowalność progową można wyznaczyć na dwa sposoby. Pierwszy z nich, to sposób graficzny przedstawiony został na rysunku 4.13 (przykład dla wyznaczania  $P_z$ ). W tym przypadku  $P_z$  to wartość ciśnienia, które odpowiada punktowi przecięcia krzywej zagęszczalności z poziomą linią progu minimalnej gęstości. Analogiczny sposób można zastosować w przypadku  $P_k$ .



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.13. Graficzny sposób wyznaczania zagęszczalności progowej

Drugi sposób to sposób obliczeniowy. Wychodząc z zależności:

$$\frac{P_2 - P_1}{DE_2 - DE_1} = \frac{P_z - P_1}{DE_z - DE_1} = x$$

Można wyznaczyć:

$$P_z = P_1 + (DE_z - DE_1) \cdot x$$

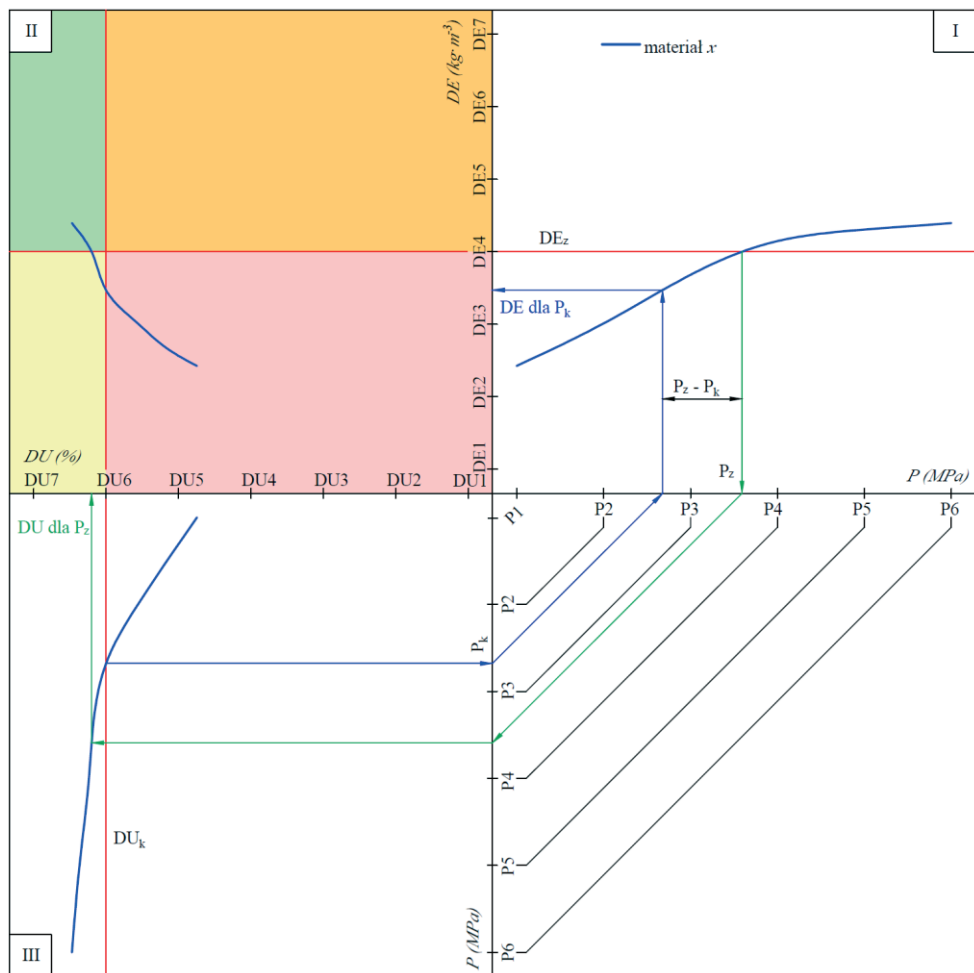
Natomiast  $P_k$  można obliczyć na podstawie analogicznych zależności.

Uzyskane wartości  $P_z$  i  $P_k$  dla danej biomasy zazwyczaj różnią się od siebie. Dlatego też, aby ułatwić analizę zagęszczalności i kompaktowalności połączono ich wykresy tworząc nomogram (rys. 4.14).

#### Nomogram zagęszczalności i kompaktowalności

W wyniku połączenia wykresu zagęszczalności i kompaktowalności powstał nomogram (rys. 4.14), który w pierwszej ćwiartce przedstawia zależność gęstości właściwej  $DE$  granuli od ciśnienia zagęszczania  $P$ . Po określeniu progowej wartości gęstości granuli (która może być dobierana w zależności od potrzeb i rodzaju badań) można określić czy materiał w testowanym zakresie ciśnienia uzyskuje wartość progową, a jeśli tak, to graficznie można wyznaczyć przy jakim ciśnieniu to następuje.

Trzecia ćwiartka nomogramu przedstawia zależności wytrzymałości mechanicznej  $DU$  granuli od ciśnienia zagęszczania  $P$ . Analogicznie do ćwiartki I, po określeniu progowej wartości wytrzymałości, graficznie możemy określić czy materiał w testowanym zakresie ciśnienia uzyskuje wartość progową, a jeśli tak to przy jakim ciśnieniu. Przenosząc uzyskane wartości progowych ciśnień z ćwiartki I do III i odwrotnie, graficznie wskazujemy różnice pomiędzy ciśnieniami progowymi, określając tym samym, który parametr (kompaktowalność czy zagęszczalność progowa) jest trudniejszy do osiągnięcia. Ponadto przenosząc progowe ciśnienie zagęszczalności z ćwiartki I do III możemy wyznaczyć jaka będzie wytrzymałość granuli przy progowej zagęszczalności i odwrotnie.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.14. Nomogram zagęszczalności i kompaktowalności – przykład teoretyczny dla materiału  $x$

W wyniku takiego połączenia wykresów uzyskano dodatkowy wykres (II ćwiartka nomogramu) gęstości właściwej w stosunku do wytrzymałości. Wprowadzenie do tego wykresu obu wartości progowych ( $DE_z$  i  $DU_k$ ) powoduje podział tej ćwiartki na cztery obszary. Każdy z tych obszarów reprezentuje różne właściwości materiału poddanego zagęszczaniu. Dzięki temu, to w tej ćwiartce następuje klasyfikacja zagęszczanego materiału na grupy (rys. 4.14):

- I – materiał zagęszczalny i kompaktowalny – w badanym zakresie ciśnienia można określić ciśnienie zagęszczalności progowej  $P_z$ , które pozwala uzyskać minimalną pro-

gową gęstość właściwą  $DE_z$  oraz ciśnienie kompaktowalności progowej  $P_k$  przy którym granula uzyskuje progową wartość wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ , – obszar zielony w ćwiartce II,

- II – materiał zagęszczalny, ale niekompaktowalny – w badanym zakresie ciśnienia można określić ciśnienie zagęszczalności progowej  $P_z$ , które pozwala uzyskać minimalną progową gęstość właściwą  $DE_z$ , jednak bez możliwości uzyskania progowej wartości wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ , obszar pomarańczowy w ćwiartce II,
- III – materiał kompaktowalny, ale niezagęszczalny – w badanym zakresie ciśnienia można określić ciśnienie kompaktowalności progowej  $P_k$  przy którym granula uzyskuje progową wartość wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ , jednak bez możliwości uzyskania progowej gęstości właściwej  $DE_z$ , obszar żółty w ćwiartce II,
- IV – materiał niezagęszczalny i niekompaktowalny – badany zakres ciśnienia nie pozwala uzyskać progowej gęstości właściwej  $DE_z$ , ani progowej wartości wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ , obszar czerwony w ćwiartce II.

Materiał, w badanym zakresie ciśnienia, może być zaklasyfikowany do jednej z grup lub w zależności od przebiegu zmian gęstości i wytrzymałości do więcej niż jednej grupy tak jak to przedstawia rysunek 4.14).

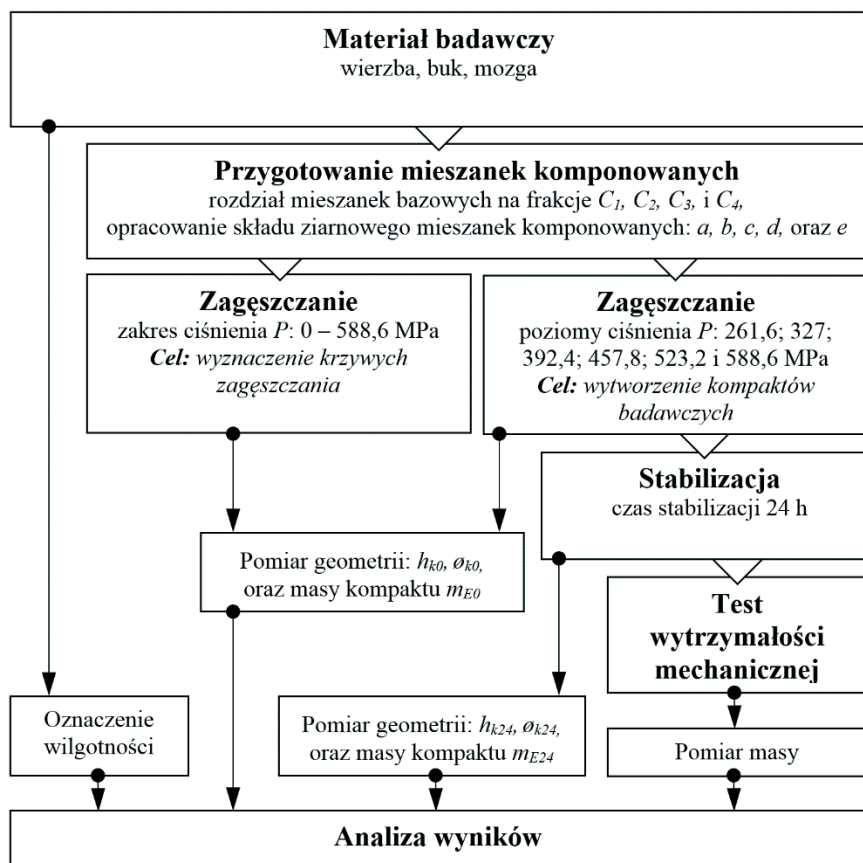
Opracowane nomogramy mogą posłużyć jako uniwersalne narzędzie do analizy zagęszczalności i kompaktowalności danego rodzaju biomasy w zależności od ciśnienia zagęszczania. W momencie wprowadzenia dodatkowych czynników wpływających na proces zagęszczania (zmiana wilgotności, temperatury, itd.) wpływ tych czynników będzie jednoznacznie możliwy do określenia za pomocą nomogramu (zmiana krzywych zagęszczalności i kompaktowalności, zmiana obszaru klasyfikacji). Ponadto, II ćwiartka pozwala na porównanie ze sobą, pod względem parametrów jakościowych ( $BD$  i  $DU$ ), biopaliw kompaktowanych bez konieczności znajomości parametrów procesów, w których zostały one wytworzone. Zaproponowane nomogramy stanowią nowe podejście od opisu procesu ciśnieniowego zagęszczania biomasy.

#### 4.2.4. Zagęszczanie ciśnieniowe – etap II

W tym etapie badań materiał badawczy stanowiła rozdrobniona biomasa wybranych gatunków roślin o komponowanym składzie ziarnowym. Badania realizowano wg schematu przedstawionego na rysunku 4.15.

##### *Komponowanie składu ziarnowego*

Z punktu widzenia procesu zagęszczania, aby w jak największym stopniu aktywować mechanizmy łączące na styku cząstka – cząstka należy dążyć do tego, by cząstki materiału posiadały możliwie najwięcej punktów kontaktu. Jak już wspomniano, liczba punktów styku wzrasta wraz ze wzrostem współczynnika wypełnienia  $\phi$  złoża (lub spadkiem jego porowatości). Zatem złoża poddawane zagęszczaniu powinny cechować się współczynnikiem wypełnienia o jak najwyższej wartości.



Źródło: opracowanie własne

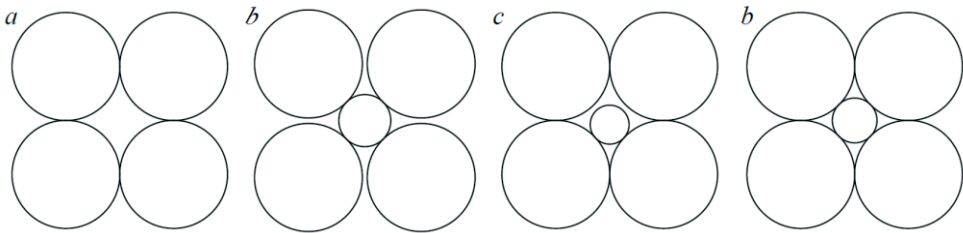
Rys. 4.15. Schemat badań – etap II

Złoża utworzone z regularnie ułożonych kul o tej samej średnicy uzyskują dla danego układu kul charakterystyczne wartości współczynnika wypełnienia, i tak w kolejności rosnącej: układ kubiczny prosty posiada  $\varphi = 0,524$ ; rombowy  $\varphi = 0,605$ ; kubiczny objętościowo centrowany  $\varphi = 0,68$ ; tetragonalny  $\varphi = 0,698$ ; kubiczny powierzchniowo centrowany oraz heksagonalny gęsto upakowany  $\varphi = 0,74$ . W przypadku złożów utworzonych z kul o tej samej średnicy, ale ułożonych przypadkowo, możemy podać tylko zakres  $\varphi$ , który wynosi  $0,57 - 0,68$  i zależy od sposobu tworzenia złoża, kształtu pojemnika, oraz wielkości pojemnika w stosunku do średnicy kul. W stosunku do układu regularnego można stwierdzić, że  $\varphi$  złożów o przypadkowym układzie kul przyjmuje wartości pomiędzy  $\varphi$  układu kubicznego prostego i kubicznego objętościowo centrowanego.

Powyższe wartości  $\varphi$  dla danego układu jednakowych kul są nieprzekraczalne. Zatem, aby zmienić współczynnik wypełnienia należy zmienić kształt cząstek lub zróżnicować ich

wielkość w złożu. W przypadku zmiany kształtu na inny niż kula, w wielu przypadkach wartość współczynnika wypełnienia złoża spada (Jamróży, 2003; Meng i in., 2016; Wróbel, 2006) zwłaszcza, gdy cząstki przyjmują kształt wydłużony. Inna sytuacja następuje w przypadku zmiany rozmiaru cząstek.

Na płaszczyźnie, dla regularnego układu okręgów możemy to zobrazować w ten sposób, że w puste przestrzenie pomiędzy okręgami wstawiamy okręgi o mniejszej średnicy. W zależności od różnicy średnic uzyskujemy różny efekt w postaci zmian wartości  $\varphi$  (rys. 4.16.b – d). W przypadku *b* średnica dodanego okręgu jest zbyt duża i powoduje efekt rozpychania okręgów bazowych, co skutkuje spadkiem wartości  $\varphi$  w stosunku do wartości początkowej. W przypadku *c* dodany okrąg ma średnicę, która nie powoduje rozpychania okręgów bazowych, ale też nie wypełnia dostępnej przestrzeni w sposób maksymalny. Co prawda współczynnik wypełnienia w tym przypadku wzrasta, ale nie do maksymalnej możliwej wartości, tak jak to ma miejsce w przypadku *d*, w którym średnica dodanego okręgu jest tak dobrana, by nie rozpychać okręgów bazowych a jednocześnie maksymalnie wypełniać dostępną przestrzeń. Idąc dalej tym tropem można systematycznie zwiększać wartość  $\varphi$  dodając kolejne okręgi o optymalnej średnicy w powstające mniejsze pory.

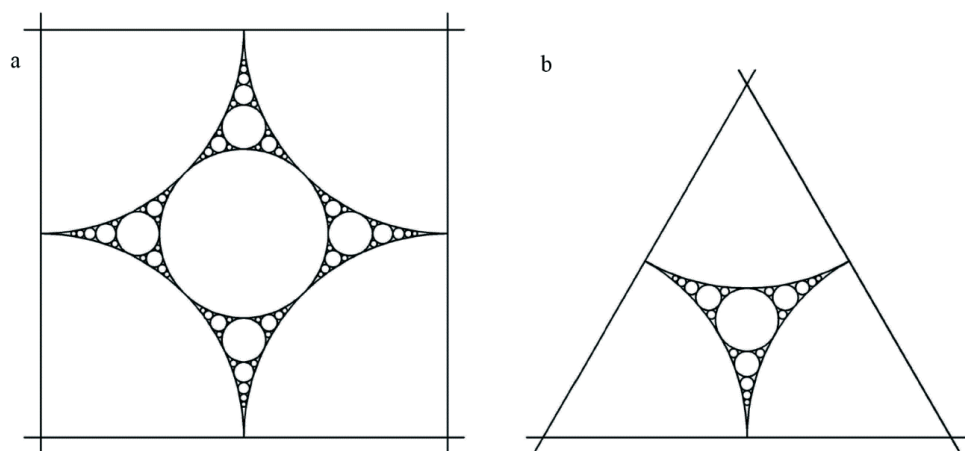


Źródło: opracowanie własne

Rys 4.16. Układ okręgów bazowych po dodaniu okręgów o mniejszej średnicy: *a* – stan początkowy, *b* – stan po dodaniu okręgu o zbyt dużej średnicy, *c* – stan po dodaniu okręgu o zbyt małej średnicy, *d* – stan po dodaniu okręgu o średnicy pozwalającej na maksymalne wypełnienie dostępnej przestrzeni

W zależności od początkowego układu okręgów bazowych, wartość średnic kolejnych okręgów jest determinowana przez ten układ. Przedstawia to rysunek 4.17, na którym zaprezentowano złoża o początkowym układzie okręgów bazowych w siatce kwadratowej i trójkątnej z kolejno dodawanymi okręgami wypełniającymi maksymalnie dostępną przestrzeń.

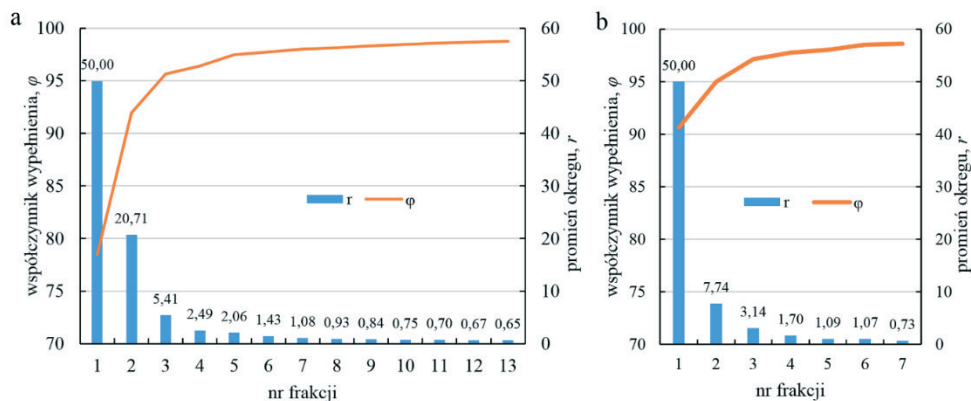




Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.17. Maksymalizacja współczynnika wypełnienia dodatkiem okręgów o mniejszych średnicach: a – układ w siatce kwadratowej, b – układ w siatce heksagonalnej

W obu przypadkach wraz z dodatkiem kolejnej frakcji okręgów wzrasta współczynnik wypełnienia  $\varphi$  dążąc do 100%. Na początku dynamika tego wzrostu jest duża, jednak po dodaniu czwartej i kolejnych frakcji następuje jej spadek (rys. 4.18). Zatem komponowanie układu, w którym współczynnik wypełnienia uzyskuje wartość zbliżoną do maksymalnej praktycznie zawęża się do 4 – 5 frakcji.

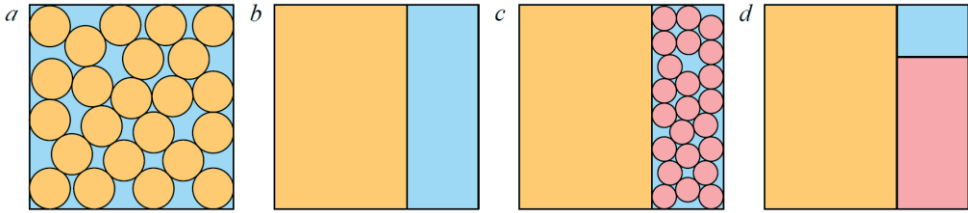


Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.18. Przebieg zmian współczynnika wypełnienia oraz zmian promieni dla regularnego układu okręgów na płaszczyźnie: a – układ w siatce kwadratowej, b – układ w siatce heksagonalnej

W przypadku nieregularnego układu cząstek, zwiększenie wartości  $\varphi$  możliwe jest poprzez dodanie do złoża zbudowanego z jednej frakcji wymiarowej  $A$  odpowiedniej ilości kolejnej mniejszej frakcji wymiarowej  $B$ . Nasuwa się pytanie ile należy tej frakcji dodać?

Zakładając, że znane są współczynniki wypełnienia frakcji  $A$  i  $B$  (dla przykładu przyjęto  $\varphi$  dla układu RCP – przypadkowe ciasne upakowanie – równe 0,65), to frakcja  $A$  wypełnia dostępną przestrzeń w 65% (rys. 4.19a i b). Pozostałą wolną przestrzeń można zatem wypełnić frakcją  $B$  znowu w 65% (rys. 4.19c i d).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.19. Maksymalne teoretyczne wypełnienie dostępnej przestrzeni okręgami frakcji  $A$  i  $B$ : a – złoże okręgów frakcji  $A$  w układzie RCP, b – teoretyczny podział dostępnej przestrzeni na obszar zajmowany przez okręgi frakcji  $A$  i obszar pozostałej wolnej przestrzeni, c – złoże okręgów frakcji  $B$  w układzie RCP zajmujące obszar wolnej przestrzeni pozostawiony przez okręgi frakcji  $A$ , d – teoretyczny podział dostępnej przestrzeni na obszar zajmowany przez okręgi frakcji  $A$ ,  $B$  oraz obszar pozostałej wolnej przestrzeni

Jeśli jak przyjęto, współczynnik wypełnienia frakcji  $A$  wynosi  $\varphi_A = 0,65$ , to maksymalną objętość  $V_A$  w dostępnej przestrzeni całkowitej o objętości  $V_C$  można określić w następujący sposób:

$$V_A = 0,65V_C$$

Natomiast porowatość  $\varepsilon_A$  frakcji  $A$  określa zależność:

$$\varepsilon_A = 1 - \varphi_A = 0,35$$

Zatem objętość porów  $V_{pA}$  frakcji  $A$  wynosi:

$$V_{pA} = \varepsilon_A \cdot V_C = 0,35V_C$$

Maksymalna objętość  $V_B$  frakcji  $B$  to:

$$V_B = \varphi_B \cdot V_{pA} = 0,65 \cdot (0,35V_C) = 0,2275 \cdot V_C$$

gdzie:

$\varphi_B = 0,65$ ; współczynnik wypełnienia frakcji  $B$ .

Objętość porów  $V_{pAB}$  złoża zbudowanego z frakcji  $A$  i  $B$  o objętościach  $V_A$  i  $V_B$  to:

$$V_{pAB} = \varepsilon_B \cdot V_{pA} = \varepsilon_B \cdot \varepsilon_A \cdot V_C = 0,35 \cdot 0,35 V_C$$

gdzie:

$\varepsilon_B$  – porowatość frakcji  $B$  określona jako:

$$\varepsilon_B = 1 - \varphi_B = 0,35$$

Porowatość złoża zbudowanego z frakcji  $A$  i  $B$  to:

$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon_A \cdot \varepsilon_B = 0,35 \cdot 0,35 = 0,1225$$

Sumaryczna objętość  $V_{AB}$  frakcji  $A$  i  $B$  to:

$$V_{AB} = V_A + V_B = 0,65 V_C + 0,2275 V_C = 0,8775 V_C$$

Natomiast maksymalna wartość współczynnika wypełnienia złoża  $\varphi_{AB}$  zbudowanego z frakcji  $A$  i  $B$  to:

$$\varphi_{AB} = 1 - \varepsilon_{AB} = 0,8775$$

Maksymalny teoretyczny współczynnik wypełnienia dla mieszanki frakcji  $A$  z  $B$  wynosi zatem 0,88. O udziale objętościowym frakcji  $A$  w mieszanke decyduje jej współczynnik wypełnienia wynoszący 0,65 i dlatego tej frakcji jest 65%, a o udziale objętościowym frakcji  $B$  decyduje porowatość frakcji  $A$  (0,35) i współczynnik wypełnienia frakcji  $B$  (0,65). Dlatego dostępną przestrzeń porów frakcji  $A$  wypełnia, zgodnie z jej współczynnikiem wypełnienia, frakcja  $B$  dlatego frakcji  $B$  jest 22,7%. Powyższe zależności można zatem zapisać ogólnie jako:

$$V_A = \varphi_A \cdot 100$$

$$V_B = \varphi_B \cdot \varepsilon_A \cdot 100$$

$$V_{AB} = V_A + V_B$$

$$\varepsilon_A = 1 - \varphi_A$$

$$\varepsilon_B = 1 - \varphi_B$$

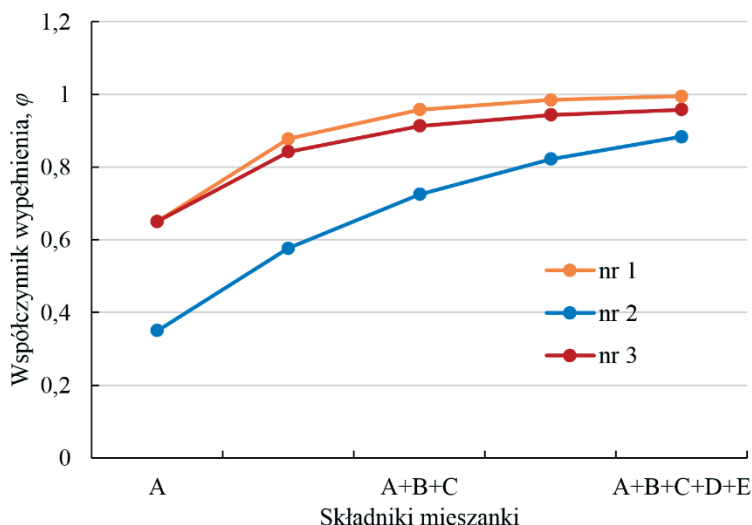
$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon_A \cdot \varepsilon_B$$

$$\varphi_{AB} = 1 - \varepsilon_{AB}$$

Znając zatem współczynniki wypełnienia łączonych frakcji wymiarowych, niezależnie od kształtu cząstek je tworzących, można obliczyć teoretyczny maksymalny współczynnik wypełnienia tych frakcji oraz ich udział w mieszanke. Ponadto, wykorzystując powyższe zależności można obliczyć teoretyczny maksymalny współczynnik wypełnienia mieszanek składających się z dowolnej liczby frakcji. Przebieg zmian współczynnika wypełnienia dla teoretycznych mieszanek utworzonych z pięciu frakcji wymiarowych przedstawiono na rysunku 4.20. Mieszanka nr 1 i nr 2 składa się z frakcji wymiarowych posiadających taki sam (w obrębie mieszanki) współczynnik wypełnienia  $\varphi$  (nr 1 –  $\varphi = 0,65$ , nr 2 –  $\varphi = 0,35$ ). Mieszanka nr 3 składa się z frakcji wymiarowych, których  $\varphi$  wzrasta wraz z rozdrobieniem w zakresie 0,25 – 0,65.

Jak wynika z przedstawionych przebiegów, wraz z dodaniem kolejnej frakcji wzrasta wartość  $\varphi$  całego złoża. Warto zauważyć, że niezależnie od współczynnika wypełnienia poszczególnych frakcji wymiarowych, każde złoże zbudowane już z czterech frakcji uzyskuje wartość  $\varphi > 0,8$ . Dodatek kolejnej frakcji wymiarowej zwiększa współczynnik wy-

pełnienia złoży, ale w coraz mniejszym stopniu (podobna sytuacja miała miejsce w przypadku układu regularnego). Objętość kolejnych frakcji dodawanych do złoży jest również coraz mniejsza. Teoretycznie współczynnik wypełnienia dąży do 1, gdy liczba frakcji dąży do nieskończoności. Jednak już złoży zbudowane z 4 lub 5 frakcji uzyskują bardzo wysokie współczynniki wypełnienia ( $\varphi > 0,8$ ) w porównaniu do współczynnika wypełnienia złoży rzeczywistych, który dla badanych materiałów zawiera się w zakresie 0,3 – 0,6.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.20. Przebieg zmian współczynnika wypełnienia  $\varphi$  dla mieszanki utworzonych z pięciu frakcji A, B, C, D, E. Krzywa nr 1  $\varphi = 0,65$ ; nr 2  $\varphi = 0,35$ ; nr 3  $\varphi$  w zakresie 0,25 – 0,65

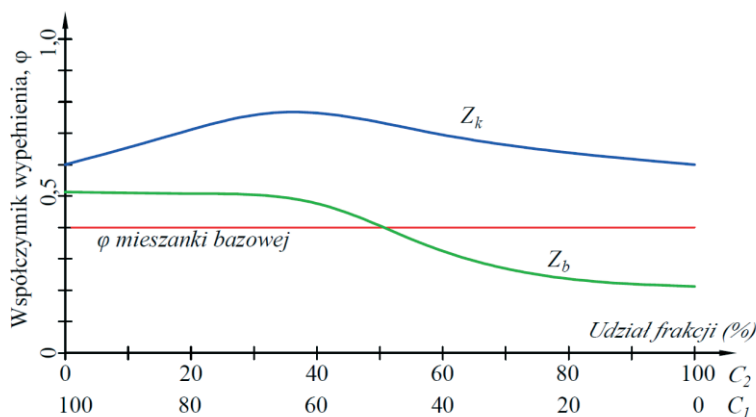
Oczywiście, przedstawione przykłady obrazują przypadki teoretyczne. W przypadku złoży rzeczywistych wzrost współczynnika wypełnienia nie będzie tak duży, jednak na podstawie powyższych rozważań można założyć, że wystąpi. Ponadto w przypadku złoży rzeczywistych o danym rozdrobnieniu, rozkład wielkości ziaren w masie jest ciągły i tylko ilość sit, na których te złoży są rozdzielane, decyduje o ilości wydrebnionych frakcji wymiarowych, zatem ilość frakcji wydzielonych z danego złoży może być dowolna.

Warto zwrócić uwagę na rozmiar ziaren mieszanych frakcji, który w mieszankach teoretycznych nie był uwzględniany. Jak już wspomniano odpowiedni dobór średnic mieszanych cząstek ma istotne znaczenie, by efekt zwiększania wartości  $\varphi$  wystąpił i był maksymalny z możliwych. Dla przykładu, w przypadku tworzenia mieszanki kruszywa do produkcji betonu zaleca się, by minimalna średnica ziarna frakcji grubszej była co najmniej 3 do 4 razy większa od maksymalnej średnicy ziarna frakcji drobnej (Jamroz, 2003). Zachowanie tej zasady pozwala na wpasowanie się ziaren frakcji drobnej w pory frakcji grubej bez rozpychania ziaren tej frakcji. Złoży kruszyw zbudowane są z ziaren o kształcie, w dużym uproszczeniu zbliżonym do kuli co powoduje, że ich współczynnik wypełnienia zawiera się

w przedziale 0,6 – 0,66. Powoduje to, że pojedyncze pory pomiędzy ziarnami mają znacznie mniejszą objętość niż objętość pojedynczego ziarna tworzącego złożę. W przypadku złóż biomasowych brakuje podobnych badań i metod tworzenia mieszanek o maksymalnej możliwej wartości  $\varphi$ . Jednak poprzez analogię, w przeprowadzonych badaniach postanowiono wykorzystać metodę tworzenia komponowanego składu ziarnowego bazującą na sposobie tworzenia mieszanek kruszyw do produkcji betonu. Mieszanka taka powinna charakteryzować się maksymalną możliwą wartością  $\varphi$  przy założeniu, że zawiera maksymalny udział frakcji grubej, której pory stopniowo wypełniane są mniejszymi frakcjami (Jamróży, 2003). W przypadku rozdrobnionej biomasy poddawanej ciśnieniowemu zagęszczaniu założone wymagania były takie same.

W przypadku rozdrobnionej biomasy, pojedyncze frakcje wymiarowe, zwłaszcza te największe, zbudowane są z wydłużonych cząstek co powoduje, że wartość  $\varphi$  tych frakcji jest niska, rzędu 0,5 i mniejsza. Pory takiego złoża są stosunkowo duże i mogą się w nich zmieścić już cząstki frakcji nieznacznie mniejszej. Przyjęto zatem, że mieszane frakcje wymiarowe będą tymi uzyskanymi podczas określania składu ziarnowego badanych materiałów, tj.:  $C_1 < 1 - 0,5$ ;  $C_2 < 0,5 - 0,25$ ;  $C_3 < 0,25 - 0,1$ ;  $C_4 < 0,1$ .

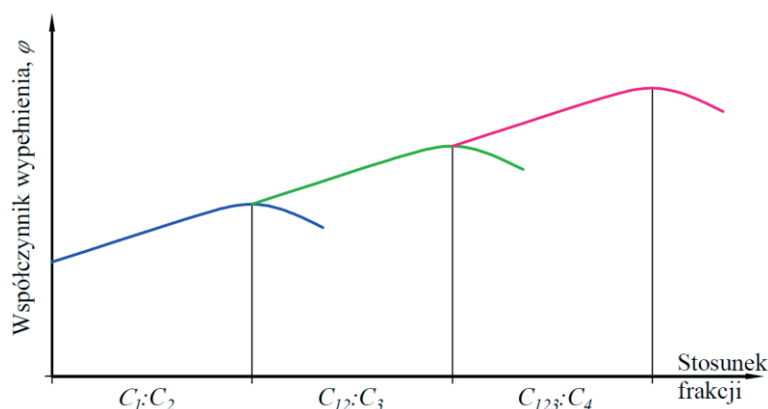
Tok postępowania w tej iteracyjnej metodzie jest następujący. Po przyjęciu jakie frakcje wymiarowe będą tworzyć komponowane złożę, z dwóch największych frakcji wymiarowych  $C_1$  i  $C_2$  tworzy się mieszankę o największym współczynniku wypełnienia. Realizowane jest to poprzez mieszanie frakcji większej  $C_1$  ze stopniowo wzrastającym udziałem frakcji mniejszej  $C_2$ , każdorazowo określając wartość  $\varphi$  uzyskanych mieszanek lub ich gęstość nasypową  $BD$ . Proporcje mieszanych frakcji są najlepsze wtedy, gdy mieszanka osiąga maksymalną wartość  $\varphi$  i najmniejszy udział frakcji mniejszej. Przykład krzywej przebiegu zmian  $\varphi$  mieszanki frakcji  $C_1$  i  $C_2$  przedstawia rys 4.21 (krzywa  $Z_k$  za Jamróży, 2003).



Źródło: opracowanie własne na podstawie badań własnych i (Jamróży, 2003)

Rys. 4.21. Przykładowe krzywe przebiegu zmian  $\varphi$ : krzywa  $Z_k$  odpowiada mieszance frakcji  $C_1$  i  $C_2$  o równym  $\varphi$ , krzywa  $Z_b$  odpowiada mieszance frakcji  $C_1$  i  $C_2$  gdzie  $\varphi$  frakcji  $C_1$  jest wyższe od  $\varphi$  frakcji  $C_2$

Kolejny etap to mieszanie z najlepszą mieszanką  $C_1:C_2$  (posiadająca maksymalną wartość  $\varphi$ ) następnej frakcji wymiarowej  $C_3$ , stopniowo zwiększając jej udział i określając  $\varphi$  do momentu uzyskania jej maksymalnej wartości. Etapy dodawania kolejnych frakcji powtarza się do momentu wykorzystania wszystkich przyjętych frakcji wymiarowych. Zasadę iteracyjnego komponowania złoży o maksymalnym współczynniku wypełnienia przedstawia rysunek 4.22.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Jamróży, 2003)

Rys. 4.22. Zasada iteracyjnego komponowania składu ziarnowego mieszanki mająca na celu uzyskanie maksymalnej wartości  $\varphi$

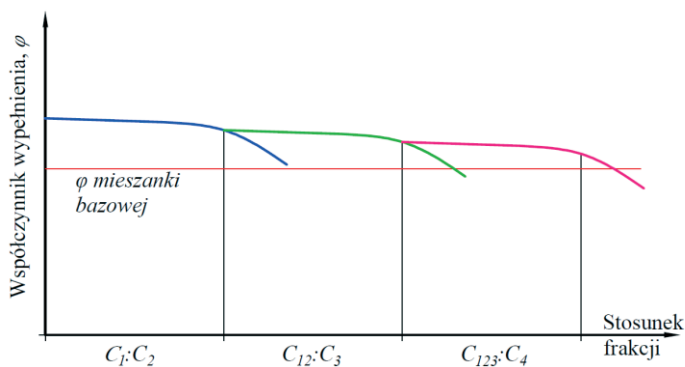
W przypadku biomasy okazało się jednak, że wartości współczynnika wypełnienia poszczególnych frakcji wymiarowych różnią się od siebie. Wraz ze spadkiem rozmiaru ziarna frakcji wartość  $\varphi$  maleje. Warto podkreślić, że frakcja największa  $C_1$  charakteryzowała się wyższą wartością  $\varphi$  w porównaniu do mieszanki bazowej, natomiast pozostałe, mniejsze frakcje uzyskały wartość  $\varphi$  niższą w porównaniu do mieszanki bazowej.

Dla sprawdzenia, w jaki sposób będzie przebiegać zmiana  $\varphi$  mieszanki frakcji biomasowych, mieszano największą frakcję wymiarową  $C_1$  z każdą pozostałą frakcją mniejszą, stopniowo zwiększając udział tej drugiej z 0 do 100%. Oznaczając dla każdego udziału mieszanych frakcji  $\varphi$  uzyskanej mieszanki wyznaczono krzywe przebiegu zmian  $\varphi$  w zależności od udziału frakcji mniejszej w mieszance. Różnice  $\varphi$  frakcji wymiarowych tworzących mieszankę powodują, że krzywa przebiegu zmian  $\varphi$  mieszanki tych dwóch frakcji wymiarowych różni się od krzywej mieszanki dwóch frakcji wymiarowych o takim samym  $\varphi$  (rys. 4.21, krzywa  $Z_b$ ). Nie występuje tu charakterystyczny dla krzywej  $Z_k$  pik najwyższej wartości  $\varphi$ , tylko jak można zauważyć na wykresie krzywa ma postać sigmoidy. Oznacza to, że w początkowym okresie (do około 20 a nawet 40% udziału frakcji mniejszej w mieszance) spadek  $\varphi$  uzyskanej mieszanki jest nieznaczny. Po przekroczeniu tej wartości udziału frakcji mniejszej następuje stopniowy spadek  $\varphi$  mieszanki do poziomu wartości  $\varphi$  frakcji mniejszej.

Ze względu na fakt wystąpienia powyższych różnic nie można było zastosować metody komponowania mieszanek stosowanej w tworzeniu mieszanek bazującej na wykorzystaniu piku największej wartości  $\phi$ .

Wykorzystano jednak zaobserwowaną prawidłowość, wg której wartość współczynnika wypełnienia mieszanek, w których udział frakcji mniejszej wynosi do 40%, jest zawsze wyraźnie wyższa od wartości  $\phi$  mieszanki bazowej uzyskanej w procesie przygotowania surowca (rozdrabnianie i mielenie). Na bazie tej prawidłowości opracowano również iteracyjną procedurę komponowania składu mieszanek bazującą na zasadzie podtrzymania wyższej wartości  $\phi$  mieszanki dwóch frakcji, w stosunku do  $\phi$  mieszanki bazowej. Zasadę tej metody zilustrowano na rys 4.23. Opracowana metoda komponowania składu mieszanek składa się z następujących kroków:

- przygotowanie mieszanki dwóch największych frakcji wymiarowych ( $C_1$  – frakcja większa, składnik podstawowy,  $C_2$  – frakcja mniejsza, składnik dodawany), w której maksymalny udział frakcji mniejszej  $C_2$  może wynosić 40%,
- do uzyskanej mieszanki dwóch frakcji ( $C_{12}$ ) traktowanej jako składnik podstawowy dodaje się kolejną frakcję mniejszą ( $C_3$  – składnik dodawany), której maksymalny udział może znowu wynosić 40%,
- iterację powtarzamy do momentu zmieszania wszystkich frakcji.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 4.23. Zasada autorskiej metody iteracyjnego komponowania składu ziarnowego mieszanki biomasowej

Wykorzystując tę metodę tworzenia mieszanek, zawierających możliwie największy udział frakcji największej  $C_1$  i charakteryzujących się wartością współczynnika wypełnienia  $\phi$ , wyższą do wartości  $\phi$  mieszanek bazowych, opracowano skład pięciu mieszanek komponowanych oznaczonych symbolami  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , i  $e$  (różny udział frakcji  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , i  $C_4$ ). Do dalszego etapu wytypowano trzy gatunki badanej biomasy. Frakcje wymiarowe tych gatunków zmieszano wg opracowanych proporcji. Odważone składniki (frakcje) mieszano w mieszalniku laboratoryjnym celem uzyskania jednorodnej masy a uzyskane mieszanki poddano zagęszczaniu.



Przebieg procesu zagęszczania był taki sam jak w przypadku mieszanek bazowych. Dla uzyskanych granul oznaczono parametry jakościowe ( $SD$  i  $DU_{10}$ ).

W dalszej kolejności określono zagęszczalność i kompaktowalność uzyskanych granul. Korzystając z nomogramów zagęszczalności i kompaktowalności określono jaki wpływ na te parametry mają komponowane składniki mieszanek, oraz która z testowanych mieszanek wywołuje największe pozytywne zmiany gęstości i wytrzymałości uzyskanych granul.

#### 4.2.5. Badania weryfikacyjne

Ostatnim etapem było przeprowadzenie badań weryfikacyjnych mających na celu sprawdzenie, czy poprawa zagęszczalności i kompaktowalności suchego materiału, wywołana komponowanym składem ziarnowym jest na tyle znacząca, że nie zostanie zniwelowana przez główny z czynników wpływających na proces ciśnieniowego zagęszczania – wilgotność surowca.

Badania przeprowadzono na tych gatunkach biomasy, które wykorzystano w etapie II procesu zagęszczania. Dla każdego gatunku zagęszczano mieszkankę bazową i najlepszą mieszkankę komponowaną, przy czym materiał przed zagęszczaniem nawilżono do poziomu około 12% (poziom wilgotności zalecany w technologiach wytwarzania biopaliw kompaktowanych). Do suchej mieszkanki dodawano wodę w ilości pozwalającej uzyskać zadany poziom wilgotności. Pojemnik z mieszkankami i dodaną do nich wodą umieszczano na 24 h w uchwycie mieszalnika laboratoryjnego. Mieszalnik uruchamiany był cyklicznie, co zapewniało równomierne nawilżenie całej masy tworzącej próbkę mieszkanki.

Przebieg procesu zagęszczania tak przygotowanych próbek i oceny uzyskanych granul był taki sam jak w przypadku I i II etapu badań procesu zagęszczania.

## 5. WYNIKI BADAŃ

### 5.1. Parametry rozdrobnionego surowca

W celu sprawdzenia czy możliwe jest ewentualne pogrupowanie tak szerokiej gamy materiału badawczego, określono szereg jego charakterystycznych parametrów. Na podstawie uzyskanych wyników podjęta została próba grupowania lub wyłonienia grup materiałów o wspólnych cechach.

#### *Skład ziarnowy*

Podstawowym parametrem rozdrobnionego surowca badawczego, uznanym za czynnik kluczowy w przebiegu procesu ciśnieniowego zagęszczania biomasy jest skład ziarnowy. Jak to opisano w rozdziale dotyczącym metodyki badań – każdy materiał badawczy został przygotowany wg tej samej procedury, tj. rozdrabnianiu wstępnemu, a następnie mieleniu do uzyskania wielkości ziarna  $d$  poniżej 1 mm. Dla tak przygotowanego materiału określono skład ziarnowy, a uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rysunku 5.1. Jak można zauważyć, pomimo rozdrabniania materiału w tych samych warunkach, uzyskane składy ziarnowe różnią się od siebie. W przypadku najmniejszej frakcji wymiarowej  $C_4$  ( $d \leq 0,1$  mm) można wyróżnić grupę materiałów, dla których udział tej frakcji nie przekracza 4% (jodła, topola, wierzba, brzoza, orzech), grupę zawierającą około 7 – 8% (sosna, olcha, robinia, buk, grab) oraz grupę zawierającą 10 – 12% (ślazowiec, słonecznik wierzbolistny, mozga, słoma pszenicy). Osobnym przypadkiem jest sylfia zawierająca 5,5% frakcji najmniejszej oraz miskant, który zawiera jej najwięcej (aż 15,1%).

W przypadku frakcji  $C_3$  ( $0,1 < d \leq 0,25$  mm) materiały najogólniej można podzielić na trzy grupy:

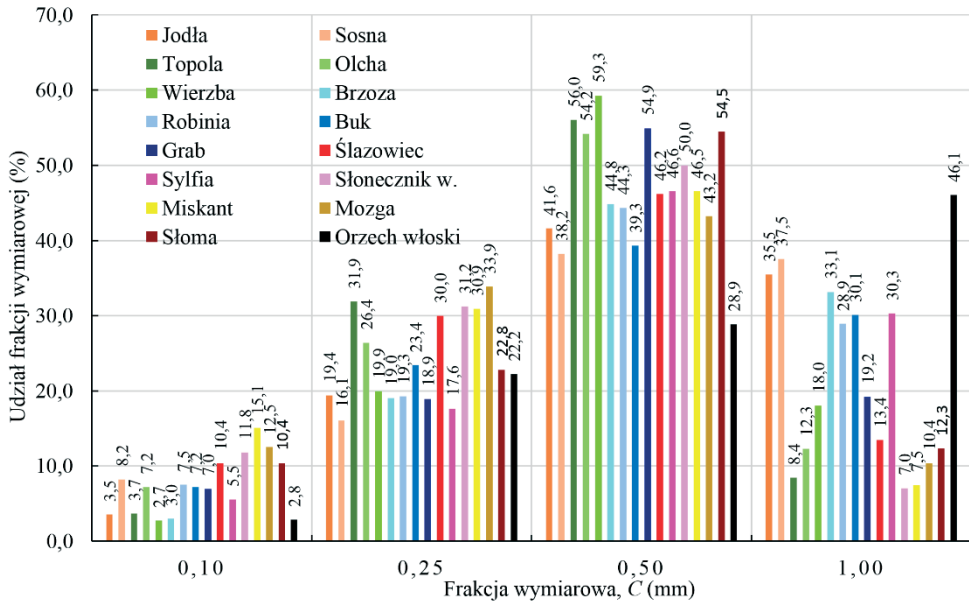
- zawierające 16 – 24% (jodła, sosna, wierzba, brzoza, robinia, buk, grab, sylfia, słoma, orzech),
- zawierające ponad 30% (topola, ślazowiec, słonecznik wierzbolistny, miskant i mozga),
- oraz olchę z zawartością 26,4% tej frakcji.

Jeśli chodzi o frakcję najliczniejszą, tj.  $C_2$  ( $0,25 < d \leq 0,5$  mm) można utworzyć trzy grupy:

- materiały o udziale tej frakcji w przedziale 38-47% (jodła, sosna, brzoza, robinia, buk, ślazowiec, sylfia, miskant, mozga),
- materiały zawierające jej powyżej 50% (topola, olcha, wierzba, grab, słoma),
- łupiny orzecha włoskiego, które zawierają tylko 29% tej frakcji.

Największe zróżnicowanie występuje w przypadku frakcji największej  $C_1$  ( $0,5 < d \leq 1$  mm). Badane materiały zawierają jej od 7% (słonecznik wierzbolistny) do aż 46% (orzech włoski). Można tu wyróżnić grupę zawierającą 7 – 8,4% tej frakcji (topola, słonecznik wierzbolistny, miskant), grupę zawierającą jej 10,4 – 13,4% (olcha, ślazowiec, mozga, słoma), grupę zawierającą 18 – 19% (wierzba, grab), grupę zawierającą 29 – 30% (robinia, buk, sylfia) oraz grupę zawierającą 33 – 37,5% (jodła, sosna, brzoza). Jednak największy udział tej frakcji posiada orzech włoski (46,1%).

Analizując całościowo uzyskane składy ziarnowe trudno jednoznacznie wyróżnić grupy materiałów o podobnym składzie. Analizując je wg frakcji wymiarowych  $C$  można wskazać, że jodła i sosna (jako przedstawiciele drzew iglastych) znajdują się w tych samych grupach dla frakcji  $C_1 - C_3$ . Przedstawiciele traw, tj. miskant, mozga i słoma w zależności od frakcji wymiarowej, występują częściowo razem, ale nigdy wszystkie trzy nie należą do jednej grupy. Podobnie jest w przypadku drewna liściastego miękkiego i twardego. Niewątpliwie orzech włoski wyraźnie składem ziarnowym odróżnia się od pozostałego materiału badawczego.

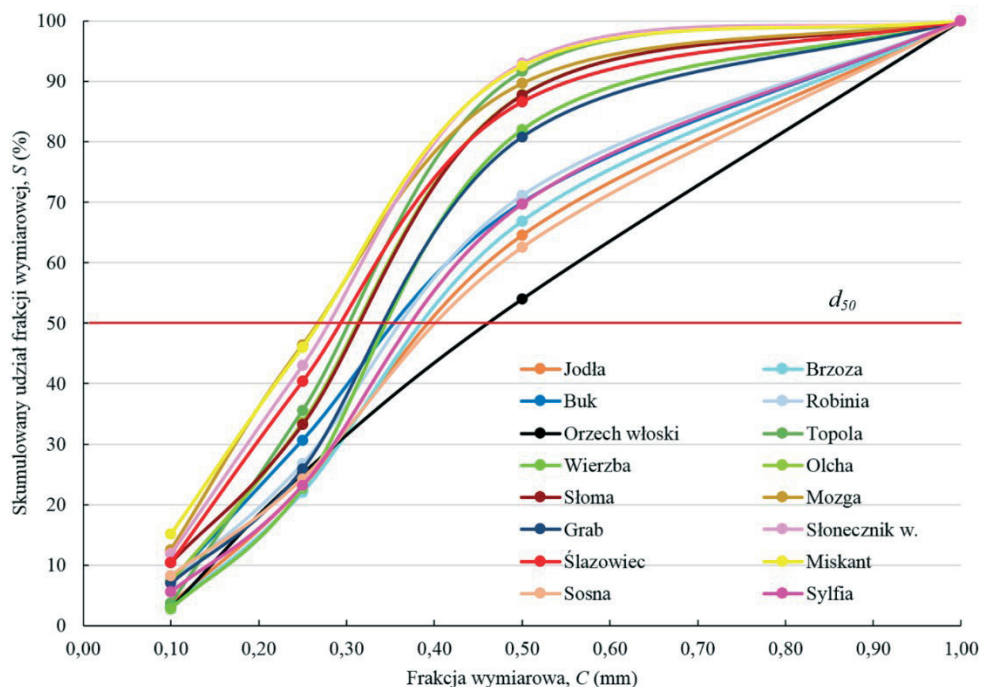


Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.1. Skład ziarnowy materiału badawczego

Powyższą zmienność uzyskanego składu ziarnowego wyraźnie obrazuje wykres składu skumulowanego przedstawiony na rysunku 5.2. Tu wyraźniej widać, że:

- orzech włoski ma wyraźnie inny skład ziarnowy od pozostałych materiałów,
- jodła i sosna stanowią jedną grupę do której zbliżony skład ma jeszcze brzoza,
- buka, robinie i sylfie można uznać za grupę o zbliżonym składzie,
- wyraźną grupę tworzy grab i wierzba,
- pozostała biomasa wykazuje największe zróżnicowanie i trudno z niej utworzyć jednolitą grupę.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.2. Skumulowany skład ziarnowy materiału badawczego

Składy ziarnowe uzyskane w tych samych warunkach rozdrabniania różnią się od siebie, co oznacza, że wpływają na to indywidualne cechy samego materiału. Zatem skład ziarnowy jest cechą charakterystyczną dla danego materiału.

Materiał badawczy dobrany został tak, by reprezentował całe spektrum biomasy lignocelulozowej wykorzystywanej do produkcji kompaktowanych biopaliw stałych. Zatem przedstawione składy ziarnowe również reprezentują szeroki zakres składów ziarnowych możliwych do uzyskania w czasie rozdrabniania biomasy lignocelulozowej i obrazują zmienność tego parametru. W wielu, jeśli nie w większości publikacji dotyczących wpływu stopnia rozdrobnienia na proces zagęszczania, zmienność ta nie jest brana pod uwagę i zastępuje się ją najczęściej podaniem do jakiej wielkości ziarna materiał został rozdrobniony. Takie podejście nakazywało by uznać, że wszystkie badane materiały są pod względem rozdrobnienia takie same, co jak wykazano powyżej nie jest zgodne z prawdą.

Kolejnym etapem analizy składu ziarnowego wskazującym na występowanie różnic pomiędzy badanymi materiałami, było określenie środkowej wartości rozmiaru ziarna  $d_{50}$ . Uzyskane wartości tego parametru w kolejności rosnącej, dla badanych materiałów zawiera tabela 5.1. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować o stopniu rozdrobnienia

badanych materiałów. Im niższa wartość  $d_{50}$  tym materiał bardziej rozdrobniony. Większym rozdrobnieniem charakteryzuje się biomasa traw i bylin ( $d_{50}$  w zakresie 0,27 – 0,33 mm) oraz część biomasy drzew liściastych miękkich (topola, olcha), co jest oczywiste ze względu na ich budowę (porowata struktura o cienkich ściankach komórkowych – podatna na proces rozdrabniania). Gatunki liściaste o drewnie twardym, cechuje wartość  $d_{50}$  w zakresie 0,36 – 0,41 mm. Co ciekawe w tej grupie znalazła się również wierzba zaliczana do gatunków o drewnie miękkim oraz sylfia reprezentująca byliny. W grupie tej najwyższą wartość  $d_{50}$  uzyskała brzoza, a więc gatunek o drewnie nie najtwardszym. Gatunki iglaste, charakteryzujące się drewnem miękkim, uzyskują wartość  $d_{50}$  w zakresie 0,41 – 0,42 mm, czyli wyższe niż w przypadku większości gatunków o drewnie twardym. Najwyższą wartość  $d_{50}$  równą 0,47 mm uzyskały łupiny orzecha włoskiego, co jest wynikiem ich specyficznej budowy (patrz rozdział „Przegląd literatury”).

Tabela 5.1.

*Wartości  $d_{50}$  rozdrobnionego materiału badawczego*

| Materiał                 | Wartość $d_{50}$<br>(mm) | Materiał      | Wartość $d_{50}$<br>(mm) |
|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| Mozga                    | 0,27                     | wierzba       | 0,37                     |
| Miskant                  | 0,27                     | buk           | 0,37                     |
| Słonecznik wierzbolistny | 0,29                     | robinia       | 0,38                     |
| Ślazier                  | 0,30                     | sylfia        | 0,39                     |
| Topola                   | 0,31                     | brzoza        | 0,41                     |
| Olcha                    | 0,33                     | jodła         | 0,41                     |
| Słoma pszenna            | 0,33                     | sosna         | 0,42                     |
| Grab                     | 0,36                     | orzech włoski | 0,47                     |

*Źródło: opracowanie własne*

### ***Gęstość bezwzględna***

Dla wszystkich materiałów badawczych określono gęstość bezwzględną  $AD$  dwoma sposobami: z wykorzystaniem piknometru gazowego AccuPyc II 1340 oraz mierząc objętość i masę granuli w trakcie procesu zagęszczania. Wyniki tych pomiarów przedstawiono w tabeli 5.2. W większości przypadków, wyższe wartości  $AD$  uzyskano bazując na pomiarze geometrii granuli i jej masy w momencie maksymalnego zagęszczania. Większe różnice występują głównie w przypadku materiałów miękkich. Dla materiałów twardych uzyskane wartości są zbliżone. Ich zakres zawiera się w przedziale 1459 – 1561 kg·m<sup>-3</sup> co oznacza, że niezależnie od rodzaju biomasy jej szkielet stanowi kompozyt lignocelulozowy, którego gęstość bezwzględna jest porównywalna dla wszystkich materiałów i nie przekracza wartości 1580 kg·m<sup>-3</sup> (Co omówiono we wcześniejszym rozdziale). W dalszych badaniach wykorzystano wartości  $AD$  uzyskane z pomiaru w trakcie zagęszczania.

Tabela 5.2.

*Gęstość bezwzględna AD materiału badawczego*

| Materiał      | Pomiar w trakcie zagęszczania przy ciśnieniu 588 MPa | Pomiar z wykorzystaniem piknometru gazowego |
|---------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|               | <i>AD</i> (kg·m <sup>-3</sup> )                      |                                             |
| Buk           | 1458,9                                               | 1429,1                                      |
| Grab          | 1487,7                                               | 1467,8                                      |
| Olcha         | 1491,1                                               | 1448,9                                      |
| Robinia       | 1513,9                                               | 1494,3                                      |
| Wierzba       | 1514,5                                               | 1470,1                                      |
| Sosna         | 1520,2                                               | 1471,6                                      |
| Słonecznik w. | 1521,7                                               | 1478,4                                      |
| Brzoza        | 1522,2                                               | 1494,7                                      |
| Topola        | 1543,2                                               | 1485,8                                      |
| Orzech        | 1545,2                                               | 1550,3                                      |
| Mozga         | 1549,9                                               | 1480,9                                      |
| Sylfia        | 1550,3                                               | 1473,8                                      |
| Miskant       | 1554,6                                               | 1518,6                                      |
| Słoma         | 1557,4                                               | 1486,5                                      |
| Ślazowiec     | 1558,1                                               | 1493,6                                      |
| Jodła         | 1561,3                                               | 1510,2                                      |

*Źródło: opracowanie własne****Gęstość właściwa***

Wyniki pomiarów gęstości właściwej *DE* w kolejności rosnącej przedstawiono w tabeli 5.3. W porównaniu do gęstości bezwzględnej *AD* zakres uzyskanych wartości jest dużo szerszy od 235,6 kg·m<sup>-3</sup> dla ślazuwca do 1039,1 kg·m<sup>-3</sup> dla łupin orzecha. Pokazuje to jak bardzo materiał lignocelulozowy, zbudowany z praktycznie tego samego kompozytu strukturalnego, różni się od siebie ze względu na przestrzenną budowę zawierającą w zależności od materiału, mniej lub więcej porów wewnętrznych, których objętość w trakcie zagęszczania musi być zredukowana.

Najniższe wartości gęstości właściwej *DE* uzyskano dla bylin dwuliściennych (ślazowiec, sylfia). Wyjątek stanowi słonecznik wierzbolistny, który charakteryzuje się zdrewniałymi pędami o wysokiej – w porównaniu do innych bylin – gęstości właściwej. Trawy cechuje zróżnicowana gęstość właściwa – od 343 kg·m<sup>-3</sup> dla słomy, poprzez 410,5 kg·m<sup>-3</sup> dla miskanta do 467,2 kg·m<sup>-3</sup> dla mozgi. Podobne zróżnicowanie występuje dla biomasy drzew iglastych (gęstość właściwa jodły wynosi 372,7 kg·m<sup>-3</sup> a sosny 490,3 kg·m<sup>-3</sup>) oraz drewna miękkiego gatunków liściastych (topola – 344,4 kg·m<sup>-3</sup>, olcha – 463,1 kg·m<sup>-3</sup>, wierzba – 563,8 kg·m<sup>-3</sup>). Stosunkowo jednolitą grupę stanowi biomasa drzew liściastych o drewnie twardym (grab, buk i robinia o gęstości właściwej w zakresie 669,3 – 706 kg·m<sup>-3</sup>). Najwyższą wartość gęstości właściwej uzyskano dla łupin orzecha włoskiego.

Tabela 5.3.

*Gęstość właściwa DE i nasypowa BD materiału badawczego*

| Materiał      | DE<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Materiał      | BD<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
|---------------|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------------------|
| Ślazier       | 235,6                                   | jodła         | 108,5                                   |
| Sylfia        | 243,3                                   | ślazier       | 134,2                                   |
| Słoma         | 342,9                                   | sylfia        | 134,7                                   |
| Topola        | 344,4                                   | topola        | 137,9                                   |
| Jodła         | 372,7                                   | słoma         | 138,7                                   |
| Brzoza        | 388,7                                   | miskant       | 141,0                                   |
| Miskant       | 410,5                                   | wierzba       | 176,0                                   |
| Olcha         | 463,1                                   | olcha         | 177,1                                   |
| Mozga         | 467,2                                   | sosna         | 183,5                                   |
| Sosna         | 490,3                                   | brzoza        | 186,6                                   |
| Wierzba       | 563,8                                   | słonecznik w. | 203,3                                   |
| Słonecznik w. | 566,7                                   | mozga         | 207,2                                   |
| Grab          | 669,3                                   | grab          | 246,0                                   |
| Buk           | 701,4                                   | buk           | 275,2                                   |
| Robinia       | 706,0                                   | robinia       | 320,6                                   |
| Orzech        | 1039,1                                  | orzech        | 357,1                                   |

*Źródło: opracowanie własne****Gęstość nasypowa***

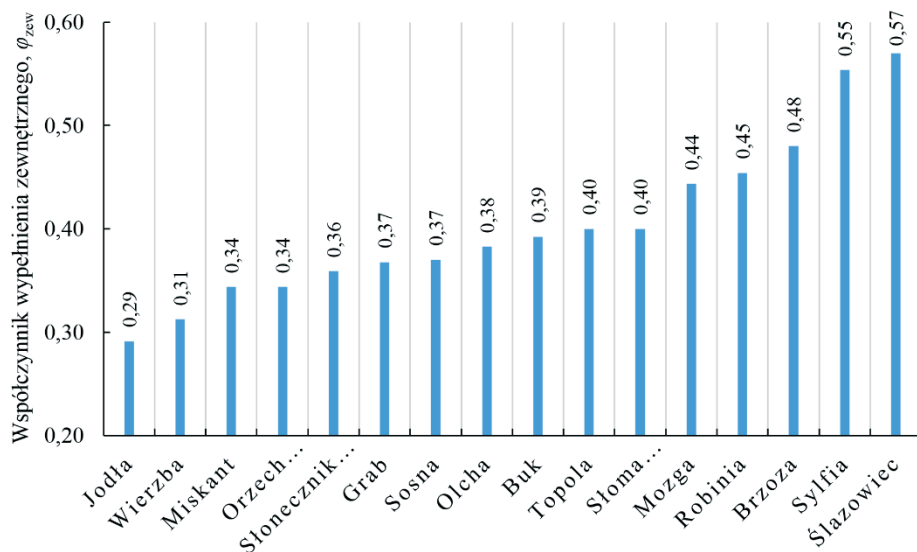
Podobnie jak w przypadku gęstości właściwej, wyniki pomiaru gęstości nasypowej *BD* przedstawiono w tabeli 5.3 w kolejności rosnącej. W tym przypadku łupiny orzecha również charakteryzują się najwyższą wartością tej gęstości ( $357,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Biomasa drzew liściastych o twardym drewnie zajmuje w tabeli te same pozycje co w przypadku gęstości właściwej przyjmując wartości:  $246 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  – grab,  $275,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  – buk i  $320,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  – robinia. Kolejność pozostałych materiałów jest już inna. Wartość najniższą uzyskano dla jodły ( $108,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Do jednej grupy można zaliczyć ślazier, sylfię, topolę, słomę pszeną i miskant (*BD* w zakresie  $134,2 - 141 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), kolejne grupy tworzą wierzba z olchą (około  $177 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), sosna z brzozą ( $183,5 - 186,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) oraz słonecznik wierzbolistny z mozgą ( $203,3 - 207,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

***Współczynnik wypełnienia zewnętrznego***

Gęstość nasypowa zależna jest od gęstości właściwej materiału oraz od wzajemnych oddziaływań pomiędzy cząstkami tworzącymi złożę rozdrobnionego materiału. Aby określić jaki procent zajmowanej przestrzeni stanowią cząstki materiału, a jaki puste przestrzenie pomiędzy nimi, obliczono współczynnik wypełnienia zewnętrznego  $\phi_{zew}$ . Uzyskane wyniki, w kolejności rosnącej, przedstawiono na wykresie (rys. 5.3). Najniższą wartość uzyskano dla jodły (0,29) co oznacza, że w przestrzeni wypełnionej rozdrobnioną biomasą jodły tylko niecałe 30% zajmuje materiał. Pozostałe 70% to puste przestrzenie pomiędzy cząsteczkami biomasy. Sylfia i ślazier tworzą grupę charakteryzującą się najwyższym



współczynnikiem wypełnienia (0,55 – 0,57). Pozostały materiał badawczy charakteryzuje się współczynnikiem z zakresu 0,31 – 0,48 i nie tworzy grup w tym zakresie.



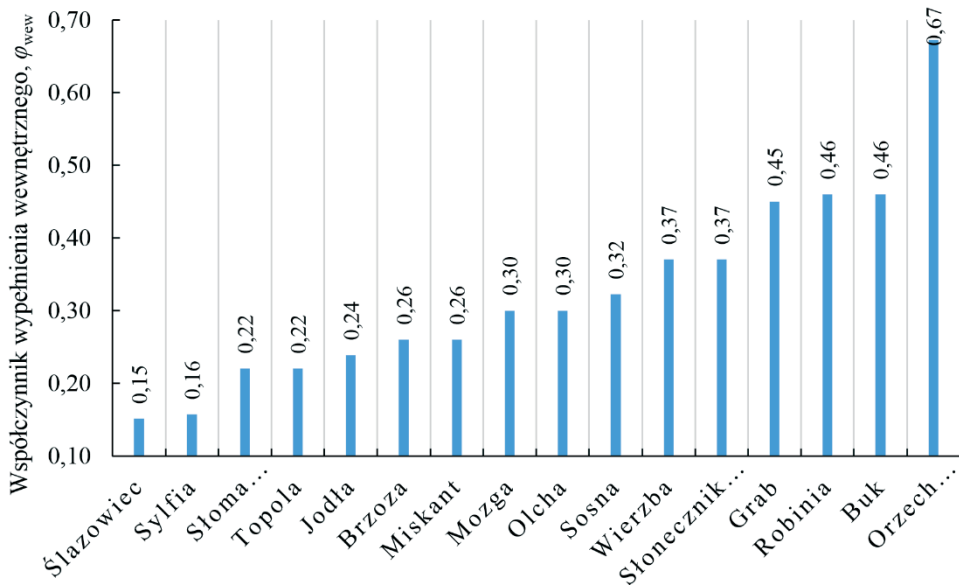
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.3. Współczynniki wypełnienia zewnętrznego  $\phi_{zew}$  materiału badawczego

Niskie wartości współczynnika wypełnienia zewnętrznego wskazują na silne oddziaływanie pomiędzy cząstkami tworzącymi złoże. Oddziaływanie to nie pozwala w trakcie tworzenia złoże (swobodne nasypywanie do pojemnika) na gęste upakowanie cząstek w wyniku działającej na nie siły grawitacji. Odpowiedzialne za to jest tarcie pomiędzy cząstkami oraz duża liczba połączeń kształtowych spowodowanych nieregularnym, strzępiastym kształtem cząstek. Wysoka wartość współczynnika wypełnienia zewnętrznego oznacza zatem mniejszy współczynnik tarcia, a przede wszystkim bardziej regularny kształt cząstek.

#### **Współczynnik wypełnienia wewnętrznego**

Obliczając współczynnik wypełnienia zewnętrznego  $\phi_{zew}$  określono procent zajmowanej przestrzeni przez cząstki rozdrobnionego materiału. Natomiast aby określić jaki procent każdej cząstki materiału stanowi kompozyt lignocelulozowy (szkielet), obliczono współczynnik wypełnienia wewnętrznego  $\phi_{wew}$ . Podobnie jak w przypadku  $\phi_{zew}$ , uzyskane wyniki, w kolejności rosnącej, przedstawiono na wykresie (rys. 5.4).



Źródło: opracowanie własne

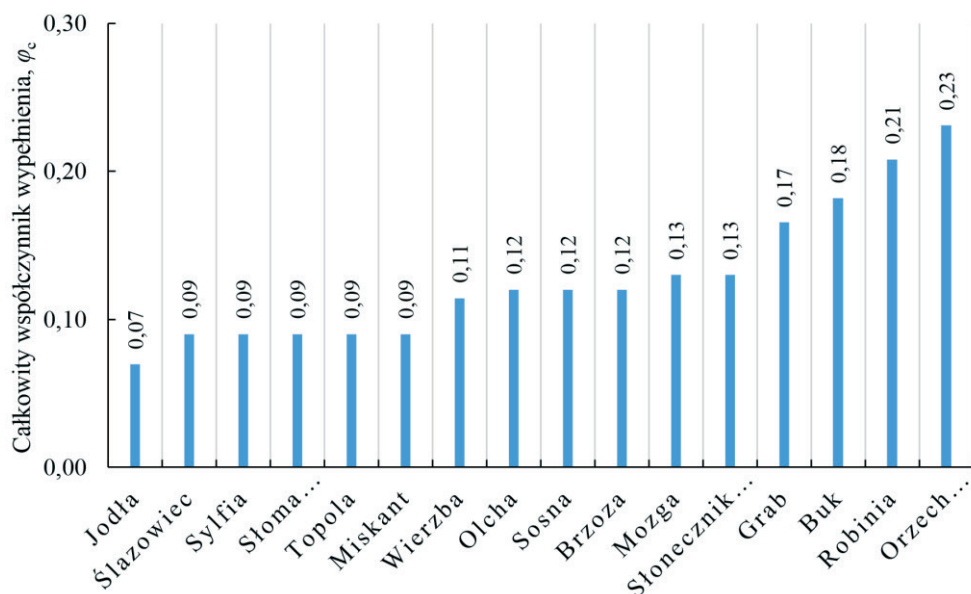
Rys. 5.4. Współczynniki wypełnienia wewnętrznego  $\varphi_{wew}$  materiału badawczego

Kolejność materiałów na wykresie jest taka sama jak w tabeli 5.3. Wyjątek stanowią: olcha zamieniająca się miejscem z mozgą oraz buk z robinią. Najniższą wartość  $\varphi_{wew}$  uzyskano dla ślazowca i sylfii (0,15 – 0,16) co oznacza, że tylko około 15% objętości cząstek tego materiału stanowi lignoceluloza, a pozostałe 85% to puste przestrzenie, które w procesie zagęszczania muszą być w znacznym stopniu trwale zredukowane. Pozostałe materiały charakteryzują się współczynnikiem  $\varphi_{wew}$  w zakresie 0,22 – 0,46. Bardzo wysoką wartością mierzonego współczynnika charakteryzują się łupiny orzecha włoskiego (0,67), co (jak już wspomniano podczas omawiania gęstości bezwzględnej) spowodowane jest specyficzną budową łupin w porównaniu do zdrewniałych pędów.

#### **Całkowity współczynnik wypełnienia**

Aby dokładniej określić jaką objętość zajmuje materiał lignocelulozowy w dostępnej przestrzeni, obliczono całkowity współczynnik wypełnienia  $\varphi_c$ , a uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 5.5). Wartości  $\varphi_c$  wskazują, że w większości przypadków rozdrobnionej biomasy tylko kilkanaście procent stanowi lignoceluloza. Reszta to powietrze pomiędzy cząstkami i w ich wnętrzu. Najniższą wartość uzyskano dla jodły (0,07).

Do jednej grupy, charakteryzującej się  $\varphi_c$  na poziomie 0,09, można zaliczyć ślazowca, sylfię, słomę pszeną, topolę i miskanta. Nieco wyższe wartości współczynnika  $\varphi_c$  0,11 – 0,13 charakteryzują wierzbę, olchę, sosnę, brzozę, mozgę i słonecznik wierzbolistny. Drewno twarde (grab, buk i robinia) cechuje współczynnik z zakresu 0,17 – 0,21. Najwyższą wartość  $\varphi_c$  uzyskały łupiny orzecha włoskiego 0,23.



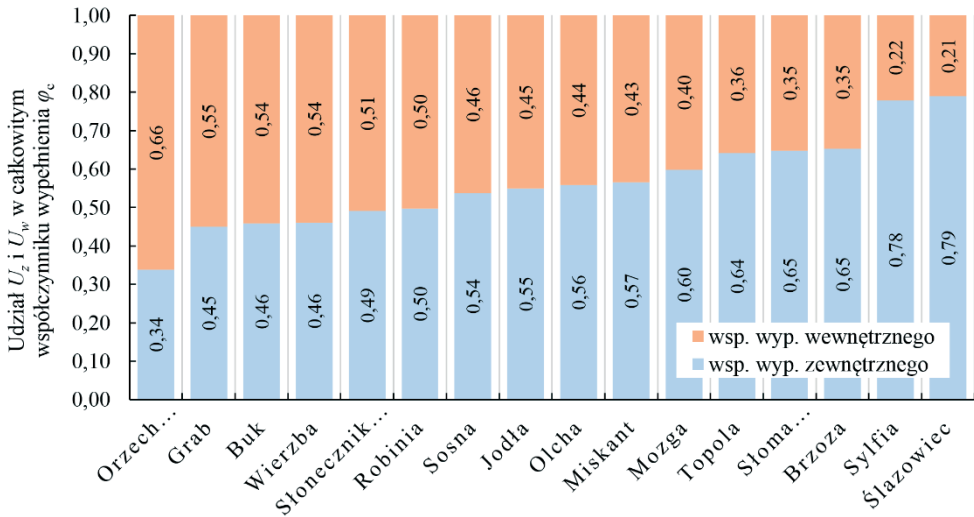
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.5. Całkowity współczynniki wypełnienia  $\varphi_c$  materiału badawczego

Dla zobrazowania udziału współczynnika wypełnienia zewnętrznego  $\varphi_{zew}$  i wewnętrznego  $\varphi_{wew}$  w całkowitym współczynniku wypełnienia  $\varphi_c$  określono ich udziały  $U_z$  i  $U_w$  (rys. 5.6). Na tej podstawie można podzielić materiał badawczy na kilka grup:

- łupiny orzecha włoskiego charakteryzujące się najmniejszym  $U_z$  (0,34),
- grab, buk i wierzba –  $U_z$  w przedziale 0,45 – 0,46,
- słonecznik wierzbolistny wraz z robiną  $U_z$  z zakresu 0,49 – 0,5,
- sosna i jodła –  $U_z$  na poziomie 0,54 – 0,55, do tej grupy można też zaliczyć olchę i miskanta o nieco wyższym  $U_z$  z zakresu 0,56 – 0,57,
- moza charakteryzuje się wartością  $U_z$  na poziomie 0,6,
- topola, słoma i brzoza –  $U_z$  z zakresu 0,64 – 0,65,
- sylfia i ślazier –  $U_z$  z zakresu 0,21 – 0,22.

W powyższym podziale dwie grupy utworzone są z roślin przynależnych do tych samych grup systematycznych, tj. rośliny iglaste (jodła i sosna) oraz byliny dwuliścienne (sylfia ze ślazierem).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.6. Udział współczynnika wypełnienia zewnętrznego  $U_z$  i wewnętrznego  $U_w$  w całkowitym współczynniku wypełnieniu złoża  $\varphi_c$

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie uzyskanych wartości parametrów charakteryzujących materiał badawczy, trudno podzielić materiał na grupy o zbliżonych właściwościach. Wyróżniono co prawda pewne grupy materiałów, tj. sosna z jodłą, sylfia ze ślaziercem oraz łupiny orzecha, jednak pozostałe materiały w zależności od branego pod uwagę parametru znajdowały się w różnych grupach. Podjęto również próbę statystycznego podziału na grupy jednak wyniki przeprowadzonych testów nie przyniosły jednoznacznych i zadawalających efektów. Ze względu na te niejednoznaczności podczas prób utworzenia podziału materiału na grupy i wyłonienia z nich przedstawicieli grupy, I etap badań procesu ciśnieniowego zagęszczania przeprowadzono na wszystkich gatunkach roślin wybranych do badań.

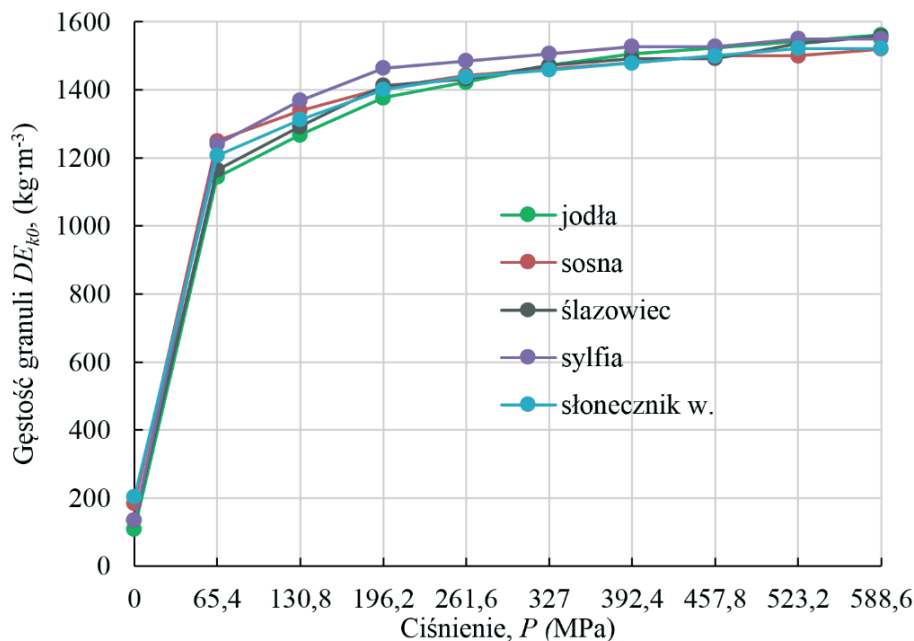
## 5.2. Zagęszczanie mieszanek bazowych

### Krzywe zagęszczania

Materiał badawczy o składzie ziarnowym takim, jaki został uzyskany w procesie mieleńia, poddano zagęszczaniu. Przebieg zmian gęstości granuli  $DE_{k0}$  wewnątrz komory zagęszczania wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania  $P$  przedstawiono w postaci krzywych zagęszczania na czterech wykresach (rys. 5.7 – 5.10). Materiał pogrupowano w oparciu o tabelę 4.1.

Na rysunku 5.7 przedstawiono krzywe zagęszczania biomasy drzew iglastych (jodła, sosna) oraz biomasy bylin dwuliściennych (ślazieriec, sylfia, słonecznik wierzboolistny). Rysunek 5.8 zawiera krzywe zagęszczania traw (miskant, mozga, słoma). Na rysunku 5.9

zamieszczono krzywe zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie miękkim (topola, olcha, wierzba) oraz łupin orzecha włoskiego, natomiast na rysunku 5.10 krzywe zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie twardym (brzoza, buk, grab, robinia).

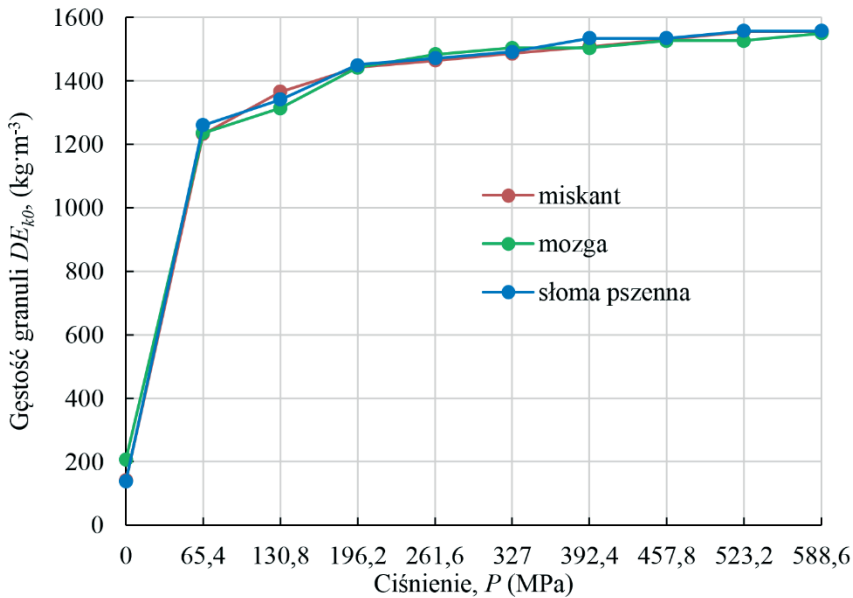


Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.7. Krzywe zagęszczania biomasy drzew iglastych i bylin dwuliściennych

W przypadku biomasy drzew iglastych i bylin dwuliściennych największe różnice w krzywych zagęszczania można zauważyć w przedziale ciśnienia 65,4 – 196,2 MPa. Zakres od 0 do 65,4 MPa nie podlegał analizie – następuje w nim głównie proces reorganizacji cząstek materiału. Po przekroczeniu ciśnienia 196,2 MPa przebieg zmian gęstości dla wszystkich mieszanek jest podobny, a wzrost gęstości  $DE_{k0}$  jest już stosunkowo niewielki.

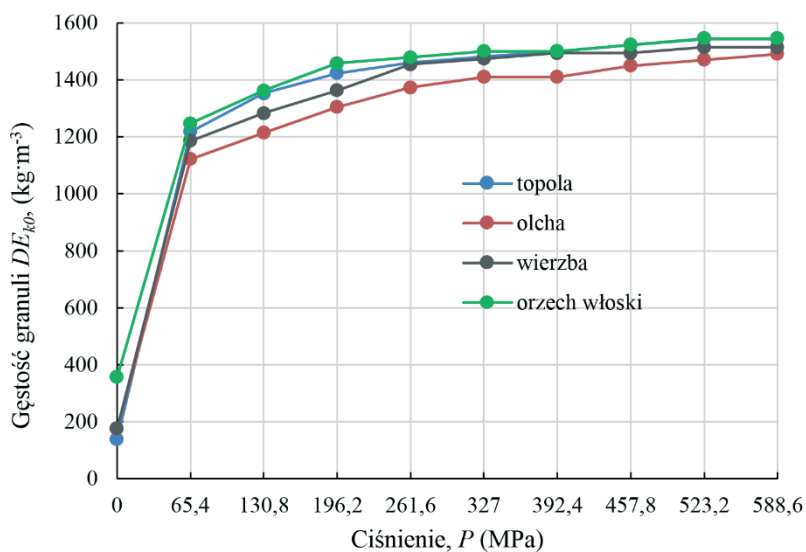
Bardzo podobna sytuacja ma miejsce w przypadku biomasy traw. Krzywe mają bardzo zbliżony kształt i podobnie jak w przypadku drzew iglastych i bylin dwuliściennych, w przedziale ciśnienia 65,4 – 196,2 MPa następuje relatywnie większy przyrost gęstości  $DE_{k0}$  w stosunku do przyrostu ciśnienia  $P$ . Po przekroczeniu tej wartości ciśnienia wzrost gęstości  $DE_{k0}$  jest już stosunkowo niewielki.



Źródło: opracowanie własne

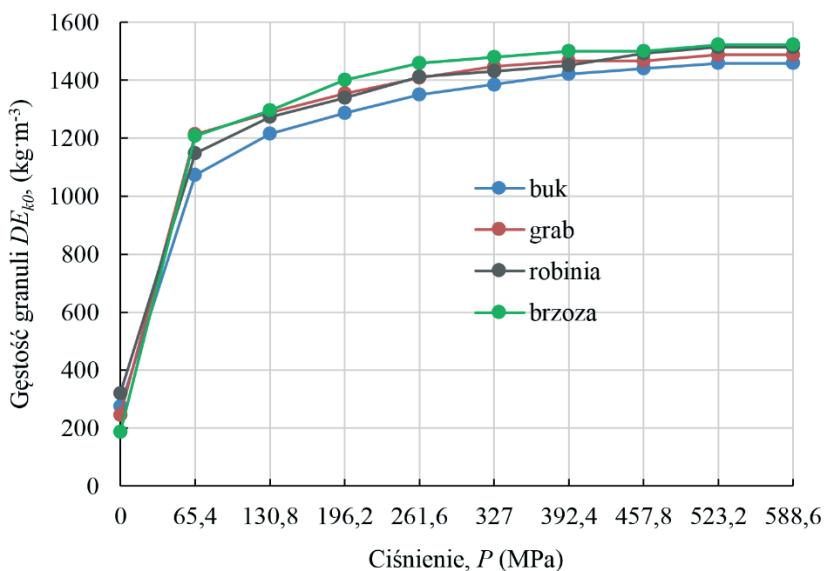
Rys. 5.8. Krzywe zagęszczania biomasy traw

Większe zróżnicowanie obserwujemy w przypadku krzywych zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie miękkim oraz łupin orzecha (rys. 5.9). Olcha uzyskuje wyraźnie niższe wartości  $DE_{k0}$  w porównaniu do pozostałej biomasy. W przedziale ciśnienia 65,4 – 196,2 MPa następuje relatywnie większy przyrost gęstości  $DE_{k0}$  w stosunku do przyrostu ciśnienia  $P$  dla biomasy topoli i orzecha. W przypadku olchy i wierzby zakres ten jest szerszy 65,4 – 261,6 MPa. Po przekroczeniu tych wartości ciśnienia dalszy wzrost gęstości  $DE_{k0}$  jest już stosunkowo niewielki.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.9. Krzywe zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie miękkim oraz łupin orzecha włoskiego



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.10. Krzywe zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie twardym



Krzywe zagęszczania biomasy drzew liściastych o drewnie twardym wykazują największe zróżnicowanie w całym badanym zakresie ciśnienia – przebieg krzywych jest podobny, jednak uzyskiwane wartości  $DE_{k0}$  różnią się, zwłaszcza pomiędzy brzozą i bukiem (rys. 5.10). Można przyjąć, że w przedziale ciśnienia 65,4 – 261,6 MPa występuje nieznacznie większy wzrost wartości  $DE_{k0}$  niż po jego przekroczeniu.

Na podstawie powyższej analizy przyjęto zakres ciśnienia 261,6 – 588,6 MPa jako ten, w którym wykonane zostały granule badawcze.

### **Rozpręż poaglomeracyjny**

Gęstość granul  $DE_{k0}$  wewnątrz komory zagęszczania w momencie ustania działania ciśnienia zagęszczania, ulega zmniejszeniu w wyniku rozprężania się brykietu i częściowego powrotu do kształtu początkowego. Zjawisko takie nazywany rozprężem poaglomeracyjnym. Jest ono niepożądane, ale nieuniknione. Rozpręż powoduje oddalanie się cząstek materiału, a tym samym zmniejszanie się powierzchni kontaktu powstałych podczas zagęszczania i osłabienie powstałych połączeń. W efekcie zmniejsza się gęstość uzyskanej granul oraz jej wytrzymałość. Oczywiście wartość rozprężu można zmniejszać poprzez zmianę wilgotności surowca, wzrost temperatury i wydłużenie czasu zagęszczania. Na jego wartość wpływać też będzie układ cząstek w złożu. Co za tym idzie odpowiedni skład ziarnowy powinien w efekcie wywołać mniejszy rozpręż (rozwiniecie tego założenia omówiono w dalszej części pracy). Jak przedstawiono na wykresach, gęstość materiału w komorze zagęszczania jest wprawdzie wyższa niż wymagana docelowa gęstość granul (wg norm jakości biopaliw stałych gęstość ta powinna wynosić co najmniej  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), ale nie wiadomo jednak czy na tyle wysoka, by wpływ rozprężu nie spowodował zbyt dużego jej spadku. Uzyskane wartości rozprężu  $R_{24}$  (procentowy wzrost objętości granul  $V_{k24}$  po 24 h w stosunku do objętości granul w komorze zagęszczania  $V_{k0}$ ) zamieszczono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4.

*Wartości rozprężu poaglomeracyjnego granul  $R_{24}$  w (%), po 24 h stabilizacji*

| Materiał      | Ciśnienie zagęszczania (MPa) |      |       |       |       |       | Średnia wartość $R_{24}$ |
|---------------|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
|               | 261,6                        | 327  | 392,4 | 457,8 | 523,2 | 588,6 |                          |
| Jodła         | 42,9                         | 41,8 | 41,8  | 40,9  | 39,1  | 40,1  | 41,1                     |
| Sosna         | 35,9                         | 34,6 | 33,4  | 35,1  | 35,3  | 35,7  | 35,0                     |
| Ślazieriec    | 51,9                         | 49,2 | 45,5  | 44,0  | 46,7  | 47,4  | 47,4                     |
| Sylfia        | 54,9                         | 53,7 | 54,7  | 53,5  | 54,3  | 52,4  | 53,9                     |
| Słonecznik w. | 57,2                         | 56,7 | 54,7  | 56,3  | 55,9  | 56,7  | 56,3                     |
| Miskant       | 47,4                         | 45,2 | 44,2  | 46,7  | 48,4  | 48,6  | 46,7                     |
| Mozga         | 62,7                         | 63,3 | 63,9  | 63,4  | 62,2  | 65,2  | 63,4                     |
| Słoma         | 67,5                         | 66,8 | 66,3  | 64,6  | 66,1  | 65,6  | 66,1                     |
| Topola        | 51,0                         | 48,9 | 49,1  | 49,4  | 49,3  | 50,6  | 49,7                     |
| Olcha         | 49,5                         | 49,8 | 50,6  | 49,0  | 48,3  | 48,4  | 49,3                     |
| Wierzba       | 65,2                         | 63,6 | 63,1  | 60,6  | 60,0  | 60,8  | 62,2                     |
| Orzech        | 42,0                         | 38,4 | 37,0  | 38,7  | 40,3  | 39,9  | 39,4                     |
| Buk           | 47,9                         | 47,1 | 46,1  | 43,9  | 44,4  | 44,6  | 45,7                     |
| Grab          | 45,7                         | 43,6 | 41,2  | 40,2  | 41,1  | 40,6  | 42,1                     |
| Robinia       | 44,4                         | 43,8 | 42,2  | 42,7  | 43,7  | 43,7  | 43,4                     |
| Brzoza        | 72,6                         | 69,4 | 69,3  | 68,6  | 67,7  | 67,7  | 69,2                     |

*Źródło: opracowanie własne*

Zakres średnich wartości rozprężu zawiera się w przedziale 35,0 – 69,2%. Zarówno pomiędzy grupami jak i w obrębie grup systematycznych materiału badawczego można zauważyć zmienność tego parametru. Granule z biomasy orzecha i drzew iglastych uzyskały najmniejsze wartości rozprężu (do 41,1%). Natomiast trawy (mozga i słoma) charakteryzują się rozprężem przekraczającym 60% a miskant uzyskał wartość 46,7%. Wysoka wartość rozprężu cechuje również granule wykonane z biomasy wierzby (62,2%) oraz brzozy (69,2%). Dla danego rodzaju biomasy rozpręż wraz ze wzrostem ciśnienia zmienia się w zakresie kilku procent. Biorąc pod uwagę fakt, że gęstość granul w trakcie zagęszczania charakteryzowała się zbliżonymi wartościami (rys. 5.7 – 5.10), należy uznać, że to rozpręż decydował będzie w głównej mierze o gęstości właściwej  $DE_{k24}$  uzyskiwanej przez granule po 24-godzinnej stabilizacji.

### 5.3. Parametry jakościowe uzyskanych granul

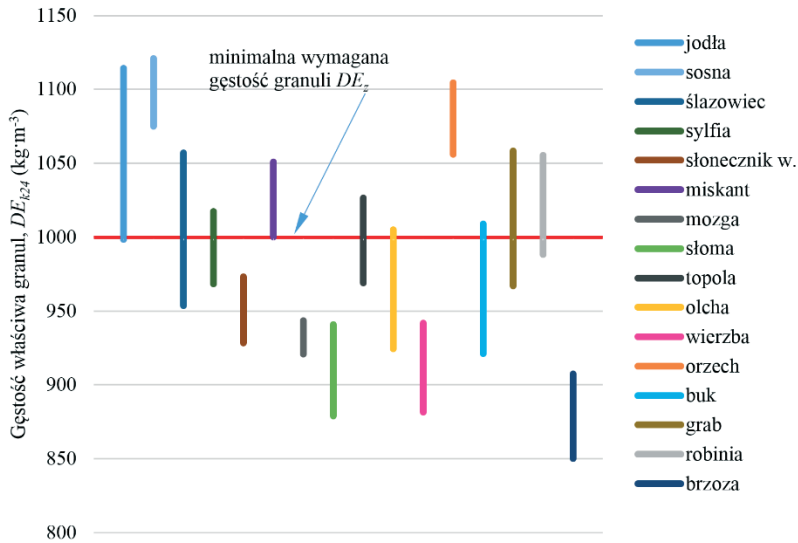
Jak wykazano w rozdziale 4.2.3., parametrami jakościowymi kompaktowanych biopaliw stałych, zależnymi w głównej mierze od procesu ciśnieniowego zagęszczania, jest ich gęstość właściwa lub nasypowa i wytrzymałość mechaniczna. Normy jakościowe cytowane w poprzednich rozdziałach określają zarówno sposób ich oznaczania jak i wymagane wartości minimalne. W przeprowadzonych badaniach jako parametr jakościowy granul przyjęto ich gęstość właściwą  $DE_{k24}$  oraz wytrzymałość mechaniczną  $DU_{10}$  po 24 h stabilizacji. Sposób oznaczania tych wielkości przedstawiono w rozdziale 4.2.3.

#### *Gęstość właściwa*

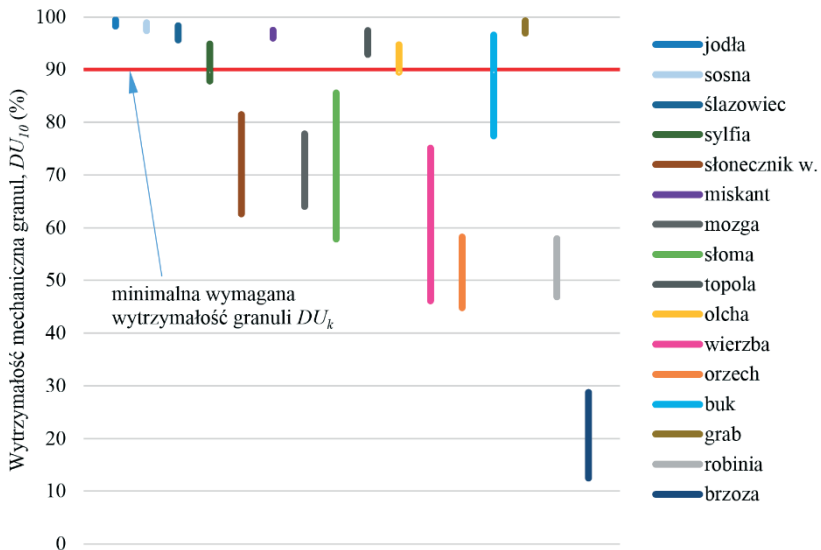
Zakresy wartości gęstości właściwej granul  $DE_{k24}$  w badanym zakresie ciśnienia zagęszczania  $P$  (261,6 – 588,6 MPa) uzyskane dla badanych materiałów przedstawiono na rysunku 5.11. Na rysunku zaznaczono również przyjętą, minimalną wymaganą wartość gęstości granul  $DE_z$  (1000 kg·m<sup>-3</sup>) – czerwona pozioma linia na wykresie. Jak można zauważyć, praktycznie tylko cztery materiały badawcze (jodła, sosna, miskant i orzech), w całym zakresie badanego ciśnienia uzyskały minimalną wartość  $DE_z$  (oprócz jodły, którą zaliczono do tej grupy, chociaż przy ciśnieniu minimalnym osiąga ona wartość  $DE_{k24}$  nieznacznie poniżej  $DE_z$ ). Siedem materiałów (śłazowiec, sylfia, topola, olcha, buk, grab i robinia) uzyskało minimalną wartość  $DE_z$  po przekroczeniu granicznego ciśnienia, którego wartość jest charakterystyczna dla danego materiału. Aż pięć z szesnastu badanych materiałów, nie uzyskało minimalnej wartości  $DE_z$ .

#### *Wytrzymałość mechaniczna granul*

Podobnie jak w przypadku  $DE_{k24}$ , oznaczone zakresy wytrzymałości mechanicznej granul  $DU_{10}$  w badanym zakresie ciśnienia zagęszczania  $P$  (261,6 – 588,6 MPa) uzyskane dla badanych materiałów przedstawiono na wykresie (rys. 5.12) wraz z zaznaczoną minimalną wymaganą wartością wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$  (90%). W tym przypadku aż sześć materiałów (jodła, sosna, śłazowiec, miskant, topola i grab) w całym zakresie badanego ciśnienia uzyskały minimalną wartość  $DU_k$ . Trzy materiały (sylfia, olcha i buk) uzyskały minimalną wartość  $DU_k$  po przekroczeniu granicznego ciśnienia zagęszczania. Natomiast siedem badanych materiałów nie uzyskało minimalnej wartości  $DU_k$ .



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.11. Gęstość właściwa granul  $DE_{k24}$  w odniesieniu do wartości progowej  $DE_z$ 

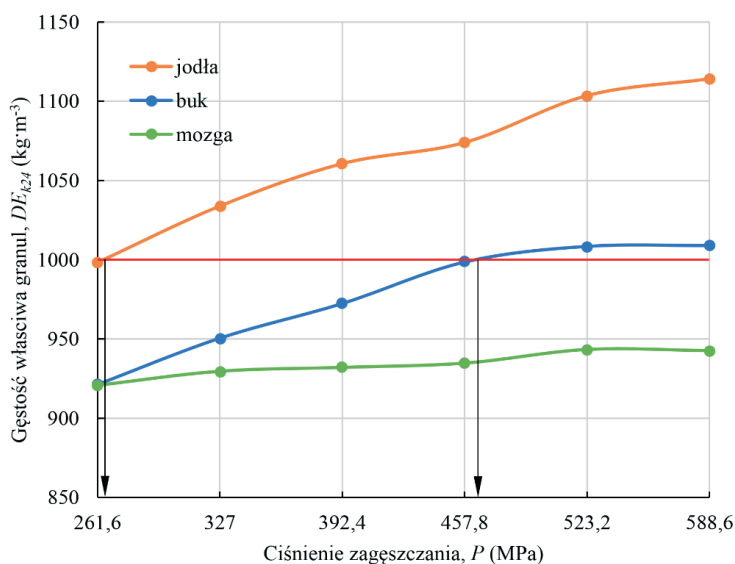
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.12. Wytrzymałość mechaniczna uzyskanych granul  $DU_{10}$  w odniesieniu do wartości progowej  $DU_k$

## 5.4. Zagęszczalność i kompaktowalność

W celu określenia jakie minimalne ciśnienie  $P_z$  (określane w pracy jako ciśnienie zagęszczalności progowej) pozwala na uzyskanie wymaganej progowej gęstości właściwej  $DE_z$ , sporządzono wykres zagęszczalności danego materiału, tzn. wykres przedstawiający zależność gęstości właściwej granuli  $DE_{k24}$  od ciśnienia zagęszczania  $P$ . Przykład takiego wykresu dla jodły, buka oraz mozgi wraz z graficznie wyznaczonymi  $P_z$  przedstawiono na rysunku 5.13.

Jak przedstawiono na rysunku 5.13 i 5.11 dla grupy, którą tworzą: słonecznik wierzbolistny, mózga, słoma, wierzba i brzoza, w badanym zakresie ciśnienia nie istnieje  $P_z$  pozwalające uzyskać progową  $DE_z$ . Wartości ciśnienie zagęszczalności progowej  $P_z$  oznaczone dla pozostałych materiałów przedstawiono w tabeli 5.5.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.13. Zagęszczalność wybranych materiałów badawczych

W kolejnym etapie sporządzono wykresy kompaktowalności badanych materiałów, przedstawiające zależność wytrzymałości mechanicznej granuli  $DU_{10}$  od ciśnienia zagęszczania  $P$ . Przykład takiego wykresu dla jodły, buka oraz mozgi przedstawia rysunek 5.14.

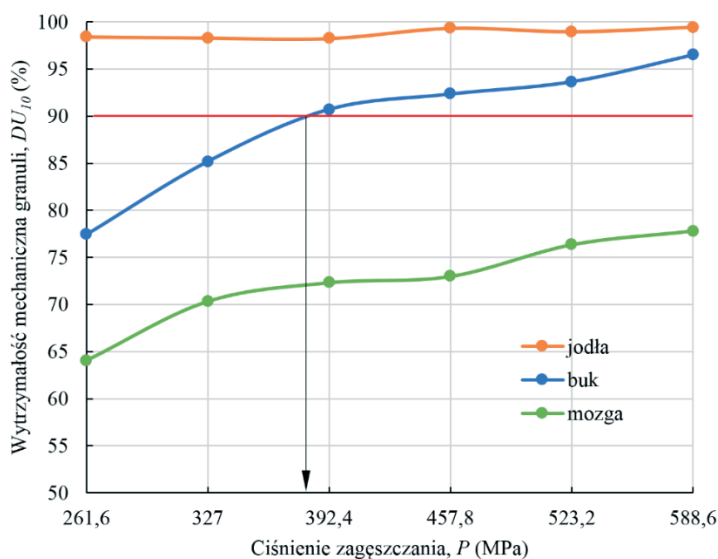
Na podstawie uzyskanych danych można określić, które z badanych materiałów charakteryzują się wymaganą kompaktowalnością progową (wartość ciśnienia kompaktowalności  $P_k$ , przy której granule uzyskują wytrzymałość mechaniczną na poziomie co najmniej 90%). Wartości ciśnienia kompaktowalności progowej  $P_k$  oznaczone dla badanych materiałów przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5.

Wartości ciśnienia zagęszczalności progowej  $P_z$  i kompaktowalności progowej  $P_k$  badanych materiałów

| Materiał      | Ciśnienie (MPa)          |                           |
|---------------|--------------------------|---------------------------|
|               | zagęszczalności progowej | kompaktowalności progowej |
| Jodła         | 264,4                    | poniżej 261,6             |
| Sosna         | poniżej 261,6            | poniżej 261,6             |
| Ślaziwiec     | 343,1                    | poniżej 261,6             |
| Sylfia        | 477,4                    | 354,1                     |
| Słonecznik w. | nie uzyskano             | nie uzyskano              |
| Miskant       | poniżej 261,6            | poniżej 261,6             |
| Mozga         | nie uzyskano             | nie uzyskano              |
| Słoma         | nie uzyskano             | nie uzyskano              |
| Topola        | 345,8                    | poniżej 261,6             |
| Olcha         | 564,2                    | 273,1                     |
| Wierzba       | nie uzyskano             | nie uzyskano              |
| Orzech        | poniżej 261,6            | nie uzyskano              |
| Buk           | 467,1                    | 383,6                     |
| Grab          | 335,8                    | poniżej 261,6             |
| Robinia       | 346,1                    | nie uzyskano              |
| Brzoza        | nie uzyskano             | nie uzyskano              |

Źródło: opracowanie własne

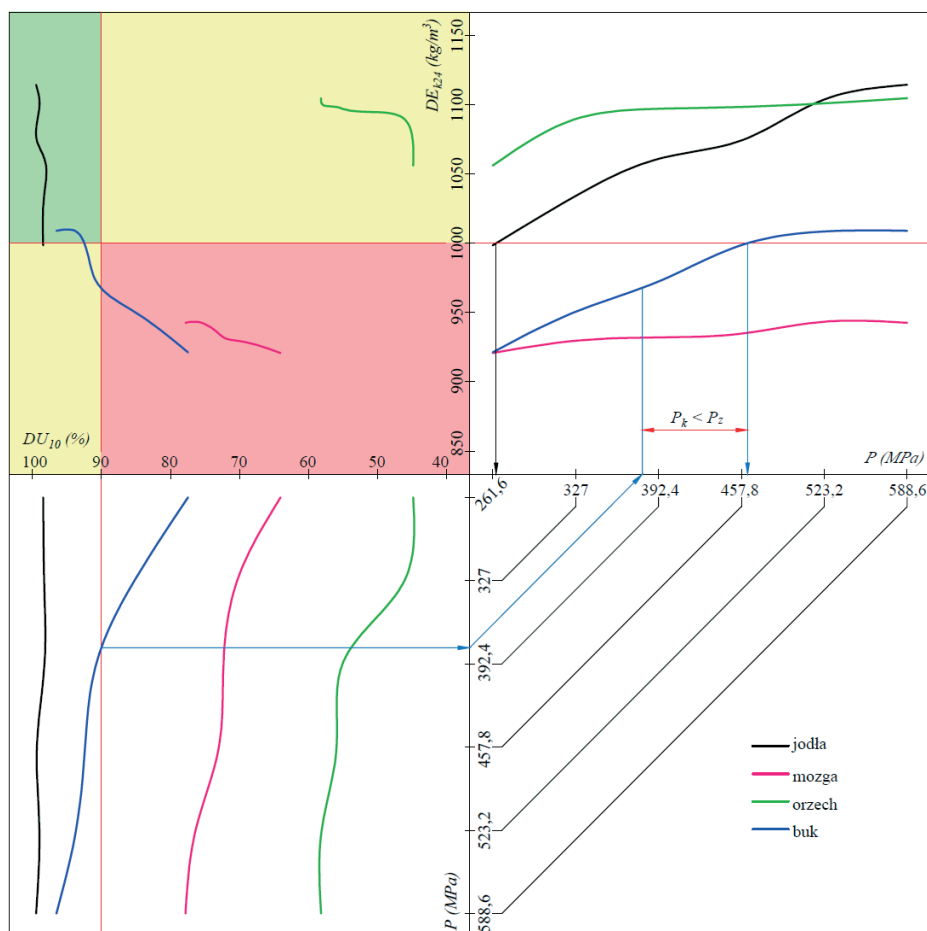


Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.14. Kompaktowalność wybranych materiałów badawczych

### 5.5. Nomogram zagęszczalności i kompaktowalności

W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy zagęszczalności i kompaktowalności badanych materiałów zastosowano metodę nomogramową (opis szczegółowy w rozdziale „Metodyka”). Nomogram, będący połączeniem wykresów zagęszczalności (I ćwiartka) i kompaktowalności (III ćwiartka), pozwala na przedstawienie pełnego przebiegu tych parametrów dla danego rodzaju biomasy w zależności od badanego zakresu ciśnienia zagęszczania  $P$ . Pozwala określić relacje pomiędzy gęstością właściwą granuli  $DE_{k24}$ , a jej wytrzymałością mechaniczną  $DU_{10}$  (ćwiartka II). Przykład nomogramu dla jodły, mozgi, orzecha i buka przedstawiono na rysunku 5.15.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.15. Nomogram zagęszczalności i kompaktowalności biomasy jodły, mozgi, buka i łupin orzecha

W pierwszej ćwiartce nomogramu znajdują się krzywe zależności gęstości właściwej granul  $DE_{k24}$  od ciśnienia zagęszczania  $P$  oraz pozioma linia wyznaczająca progową wartość gęstości właściwej granul. Rzutując punkt przecięcia krzywej zagęszczalności z linią progowej gęstości  $DE_z$  możemy określić ciśnienie zagęszczalności progowej  $P_z$ . W omawianym przypadku w badanym zakresie ciśnienia dla jodły i buka możemy wyznaczyć  $P_z$  graficznie lub obliczeniowo (patrz rozdział 4.2.3. i tabela 5.5). Oznaczone wartości wynoszą odpowiednio: 264,4 i 467,1 MPa. W przypadku orzecha  $P_z$  przyjmuje wartość poniżej 261,6 MPa, a dla mozgi żadna wartość ciśnienia z badanego zakresu nie pozwala na uzyskanie progowej gęstości  $DE_z$ .

Trzecia ćwiartka nomogramu zawiera krzywe zależności wytrzymałości mechanicznej granul  $DU_{10}$  od ciśnienia zagęszczania  $P$  oraz pionową linię wyznaczającą progową wartość wytrzymałości granul. Analogicznie jak w przypadku zagęszczalności, rzutując punkt przecięcia krzywej kompaktowalności z linią progowej wytrzymałości  $DU_k$  możemy określić ciśnienie kompaktowalności progowej  $P_k$ . W przedstawionym przypadku, dla buka możemy wyznaczyć  $P_k$ , które wynosi 383,6 MPa. W przypadku jodły  $P_k$  przyjmuje wartość poniżej 261,6 MPa, a dla mozgi i orzecha żadna wartość ciśnienia z badanego zakresu nie pozwala na osiągnięcie progowej wytrzymałości  $DU_k$ .

Uzyskane wartości  $P_z$  i  $P_k$  danego materiału mogą być ze sobą porównane. Dla przykładu: przenosząc z III ćwiartki wartość  $P_k$  buka do ćwiartki I możemy zauważyć, że  $P_k < P_z$  o ponad 80 MPa, co oznacza, że badana biomasa łatwiej uzyskuje progową kompaktowalność niż zagęszczalność. Analiza zagęszczalności i kompaktowalności pozostałych materiałów jest równie prosta do przeprowadzenia. Dodatkowo, analiza relacji pomiędzy  $DE_{k24}$  a  $DU_{10}$  (II ćwiartka nomogramu) pozwala jednoznacznie określić charakterystykę badanego materiału w aspekcie zagęszczalności i kompaktowalności. Znajdują się w niej obie linie progowe ( $DE_z$  i  $DU_k$ ), co powoduje podział tej ćwiartki na cztery strefy. W zależności od tego, w której strefie zlokalizowana jest krzywa, badany materiał możemy podzielić na cztery grupy (szerszy opis w rozdziale 4.2.3). W omawianym przypadku oznacza to, że mozga należy do grupy IV (czerwona strefa ćwiartki II nomogramu) i klasyfikowana jest jako materiał niezagęszczalny i niekompaktowalny w badanym zakresie ciśnienia. Krzywa orzecha w całości znajduje się w strefie pomarańczowej, co oznacza, że materiał ten należy do grupy II i jest zagęszczalny, ale niekompaktowalny w badanym zakresie ciśnienia. Jodła, której krzywa praktycznie w całości zlokalizowana jest w strefie zielonej, zaliczona będzie do grupy I, co oznacza, że jest materiałem zagęszczalnym i kompaktowalnym. Krzywa buka zlokalizowana jest w trzech strefach, częściowo w strefie czerwonej, żółtej i zielonej, co oznacza, że materiał ten można zaliczyć do grupy IV, III i I. W zakresie ciśnienia 261,6 – 383,6 MPa buk jest niezagęszczalny i niekompaktowalny (grupa IV), w zakresie 383,6 – 467,1 MPa jest kompaktowalny, ale niezagęszczalny (grupa III), a po przekroczeniu ciśnienia 467,1 MPa uzyskuje status materiału zagęszczalnego i kompaktowalnego (grupa I).

Podobne analizy nomogramów przeprowadzono dla wszystkich badanych materiałów, a uzyskane wyniki wraz z klasyfikacją na grupy przedstawiono w tabeli 5.6.



Tabela 5.6.

Zagęszczalność i kompaktowalność badanej biomasy

| Materiał   | Ciśnienie zagęszczalności $P_z$ i kompaktowalności $P_k$ progowej (MPa)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |             |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Sosna      | $P_k$ i $P_z \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |
| Miskant    | $P_k$ i $P_z \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |             |
| Jodła      | $P_k \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $P_z 264,2$ |
| Grab       | $P_k \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $P_z 335,8$ |
| Ślazier    | $P_k \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $P_z 343,1$ |
| Topola     | $P_k \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | $P_z 345,8$ |
| Orzech     | $P_z \downarrow 261,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |
| Olcha      | $P_k 273,1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $P_z 564,2$ |
| Robinia    | $P_z 346,1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |             |
| Sylfia     | $P_k 354,1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $P_z 477,4$ |
| Buk        | $P_k 383,6$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $P_z 467,1$ |
| Słonecznik | $P_k$ i $P_z$ nie uzyskano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |
| Mozga      | $P_k$ i $P_z$ nie uzyskano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |
| Słoma      | $P_k$ i $P_z$ nie uzyskano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |
| Wierzba    | $P_k$ i $P_z$ nie uzyskano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |
| Brzoza     | $P_k$ i $P_z$ nie uzyskano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |
|            | Kolorem oznaczono do jakiej grupy, w zależności od uzyskanych wartości $P_k$ i $P_z$ , materiał można zaklasyfikować: <ul style="list-style-type: none"> <li>• grupa I, materiał zagęszczalny i kompaktowalny – kolor zielony</li> <li>• grupa II, materiał zagęszczalny, ale nie kompaktowalny – kolor pomarańczowy</li> <li>• grupa III, materiał kompaktowalny, ale nie zagęszczalny – kolor żółty</li> <li>• grupa IV, materiał nie zagęszczalny i nie kompaktowalny – kolor czerwony</li> </ul> |             |

Źródło: opracowanie własne

Zagęszczalność i kompaktowalność badanych materiałów zależy od rodzaju materiału oraz od składu ziarnowego, który jak przedstawiono wcześniej, różni się w obrębie badanej biomasy. Pozostałe czynniki (wilgotność, temperatura, geometria komory), mogące wpływać na te przebiegi, były stałe. Badania przeprowadzono w warunkach stosunkowo najtrudniejszych (wilgotność na poziomie około 1%, temperatura około 20°C), co pozwoliło określić niejako potencjalną (graniczną) zagęszczalność i kompaktowalność badanych materiałów. Na podstawie wyników badań własnych i literatury przedmiotu można prognozować, że zmiana tych czynników powinna wywołać poprawę zagęszczalności i kompaktowalności.

## 5.6. Zagęszczanie mieszanek komponowanych

Pośród dwóch czynników, których wpływ na zagęszczalność i kompaktowalność wykazano w poprzednim rozdziale (rodzaj biomasy i skład ziarnowy), możliwa jest zmiana tylko składu ziarnowego. Jeśli zmiana składu ziarnowego pozwoliłaby poprawić zagęszczalność i/lub kompaktowalność danego rodzaju biomasy oznaczałoby to, że jest to kolejny, nie brany dotąd pod uwagę, sterowalny czynnik mogący pozytywnie wpływać na przebieg procesu ciśnieniowego zagęszczania biomasy lignocelulozowej.

### **Charakterystyka frakcji wymiarowych**

Do drugiego etapu badań wybrano tylko trzy materiały badawcze, tj. mózgę, buka i wierzbę.

Mózga reprezentuje biomasę traw. Spośród badanych przedstawicieli tej grupy miskant uzyskał wymagany próg zagęszczalności i kompaktowalności, natomiast słoma pszena i mózga nie. Wybór padł na mózgę, która uznawana jest za trudny materiał do zagęszczania. Świadczy o tym choćby norma PN-EN ISO 17225-6, w której gatunek ten ma własną tabelę wymagań jakościowych – parametry te są niższe w porównaniu do pozostałej biomasy niedrzewnej, której norma dotyczy.

Buk reprezentuje biomasę drzew liściastych o drewnie twardym. Spośród badanych przedstawicieli tej grupy przekroczył progowe wartości zagęszczalności i kompaktowalności, ale nie w całym zakresie ciśnienia. Ze względu na popularność stosowania tego materiału do produkcji paliw kompaktowanych, zwłaszcza brykietów, został wybrany do dalszych badań.

Wierzba, jako klasyczny przykład rośliny uprawianej na cele energetyczne, uzyskała najniższe poziomy zagęszczalności i kompaktowalności w grupie biomasy drzew liściastych o drewnie miękkim. Obydwa przedstawiciele roślin iglastych uzyskały wysokie wartości zagęszczalności i kompaktowalności, dlatego też biomasy tej grupy nie badano w drugim etapie.

Rozdrobniony materiał badawczy (tzw. mieszanki bazowe) rozdzielono na cztery frakcje wymiarowe  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  i  $C_4$ , z których w dalszym etapie komponowano mieszanki testowe. Wydzielone frakcje wymiarowe to:

- $C_1$  – cząstki przechodzące przez sito o otworach o średnicy 1 mm i zatrzymujące się na sicie 0,5 mm ( $0,5 < d \leq 1$  mm),
- $C_2$  – cząstki przechodzące przez sito o otworach o średnicy 0,5 mm i zatrzymujące się na sicie o średnicy otworów 0,25 mm ( $0,25 < d \leq 0,5$  mm),
- $C_3$  – cząstki przechodzące przez sito o otworach o średnicy 0,25 mm i zatrzymujące się na sicie o średnicy otworów 0,1 mm ( $0,1 < d \leq 0,25$  mm),
- $C_4$  – cząstki przechodzące przez sito o otworach o średnicy 0,1 mm ( $d \leq 0,1$  mm).

Dla uzyskanych frakcji wymiarowych badanych materiałów określono ich gęstości nasypowe  $BD$  oraz współczynnik wypełnienia zewnętrznego  $\phi_{zew}$ , a uzyskane wartości zamieszczono w tabeli 5.7. Dla porównania w tabeli zamieszczono również wartości ww. parametrów mieszanek bazowych badanych materiałów.

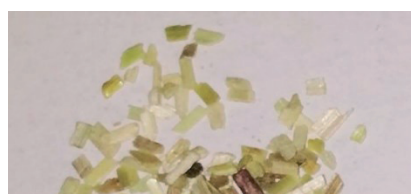
W każdym z badanych przypadków gęstość nasypowa  $BD$  frakcji spada wraz ze spadkiem rozmiarów cząstek. Oznacza to, że coraz mniejsze cząstki tworzą bardziej napowietrzone złoża o mniejszym współczynniku wypełnienia. Spowodowane jest to najprawdopodobniej tym, że im mniejsza cząstka tym bardziej jej kształt jest wydłużony i odbiega od kształtu regularnego (rys. 5.16).

Tabela 5.7.

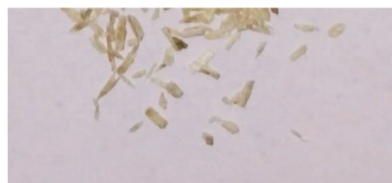
Gęstość nasypowa  $BD$  i współczynnik wypełnienia zewnętrznego  $\phi_{zew}$  frakcji wymiarowych oraz mieszanek bazowych badanych materiałów

| Frakcja<br>wymiarowa (mm) | $BD \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$ |       |         | $\phi_{zew}$ |      |         |
|---------------------------|--------------------------------------------|-------|---------|--------------|------|---------|
|                           | mozga                                      | buk   | wierzba | mozga        | buk  | wierzba |
| $C_1 - 0,5 < d \leq 1$    | 249,6                                      | 294,8 | 255,6   | 0,53         | 0,42 | 0,45    |
| $C_2 - 0,25 < d \leq 0,5$ | 195,0                                      | 255,9 | 172,7   | 0,42         | 0,36 | 0,31    |
| $C_3 - 0,1 < d \leq 0,25$ | 175,5                                      | 223,1 | 165,1   | 0,38         | 0,32 | 0,29    |
| $C_4 - d \leq 0,1$        | 165,2                                      | 197,1 | 163,8   | 0,35         | 0,28 | 0,29    |
| mieszanek bazowa          | 207,2                                      | 275,2 | 176,0   | 0,44         | 0,39 | 0,31    |

Źródło: opracowanie własne

Frakcja  $C_1$ Frakcja  $C_2$ 

Buk



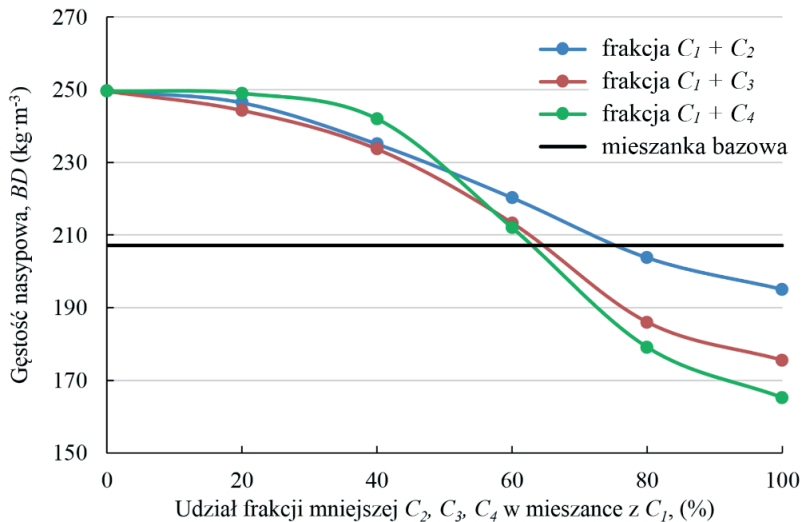
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.16. Różnice w kształcie cząstek w zależności od ich wielkości

Ponadto zwraca uwagę fakt, że pomimo, iż najwyższe wartości gęstości nasypowej  $BD$  zanotowano dla frakcji wymiarowych buka, to najwyższe wartości współczynnika wypełnienia  $\phi_{zew}$  uzyskały frakcje wymiarowe mozgi. Gęstość nasypowa zależy zarówno od ułożenia cząstek w złożu jak i od ich gęstości właściwej, dlatego też, aby porównać intensywność wypełniania dostępnej przestrzeni przez cząstki materiałów o różnych gęstościach, stosuje się współczynnik wypełnienia  $\phi_{zew}$ . Wysokie wartości tego współczynnika, uzyskane przez frakcje wymiarowe mozgi, oznaczają, że jej cząstki wykazują lepsze samozagęszczenie w dostępnej przestrzeni – lepiej dopasowują się do siebie pozostawiając pomiędzy sobą niewielkie przestrzenie. Powodowane to może być zarówno kształtem cząsteczek mozgi, bardziej zbliżonym do regularnego, jak i mniejszym tarcieniem pomiędzy cząstkami w porównaniu do cząstek tworzących złoża biomasy buka i wierzby.

Ze względu na fakt wystąpienia powyższych różnic nie można było zastosować metody komponowania mieszanek stosowanej w przypadku kruszyw do produkcji betonu, którą zamierzano wykorzystać na etapie planowania badań (patrz „Metodyka badań”).

Poszukując innego sposobu komponowania mieszanek, mieszano największą frakcję wymiarową  $C_1$  z każdą frakcją mniejszą, stopniowo zwiększając udział tej drugiej z 0 do 100%. Dla każdego udziału mieszanych frakcji określono gęstość nasypową  $BD$  i obliczano współczynnik wypełnienia uzyskanej mieszanki. Uzyskane wyniki pozwoliły wyznaczyć krzywe przebiegu zmian  $BD$  w zależności od udziału frakcji mniejszej w mieszance. Przykład krzywych uzyskanych dla biomasy mózgi przedstawiono na rysunku 5.17. Krzywe przebiegu zmian gęstości nasypowej  $BD$  mieszanek mają zawsze postać sigmoidy. Bazując na tej prawidłowości oraz na metodzie stosowanej dla mieszanek kruszyw, opracowano metodę autorską komponowania mieszanek biomasowych o gęstości nasypowej  $BD$  wyższej niż dla mieszanek bazowych.



Źródło: opracowanie własne

Rys 5.17. Krzywe przebiegu zmian gęstości nasypowej  $BD$  mieszanek dwóch frakcji wymiarowych biomasy mózgi

### Charakterystyka mieszanek komponowanych

Na potrzeby II etapu badań procesu zagęszczania z frakcji wymiarowych  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  i  $C_4$  przygotowano 5 różnych mieszanek komponowanych, oznaczonych jako:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  i  $e$ . W założeniu uzyskane mieszanki komponowane powinny mieć gęstość nasypową  $BD$  wyższą w stosunku do mieszanek bazowych oraz powinny zawierać największy możliwy udział frakcji  $C_1$  (największy rozmiar ziarna).

Założono, że w I iteracji udział frakcji  $C_2$  (składnik dodawany) w stosunku do frakcji  $C_1$  (składnik podstawowy) wynosił będzie 20 lub 30%. W II i III iteracji wcześniej utworzona mieszanka traktowana była jako składnik podstawowy. Udział frakcji  $C_3$  w II iteracji wynosił 10, 20, 30 i 40%, a udział frakcji  $C_4$  w III iteracji wynosił 10 lub 20%. Udziały składników takich mieszanek zamieszczono w tabeli 5.8.

Tabela 5.8.

Projektowany udział składników mieszanek komponowanych *a*, *b*, *c*, *d*, *e*

| Składnik podstawowy:<br>składnik dodawany | Procentowy udział składników podstawowych<br>w stosunku do udziału składników dodawanych |          |          |          |          |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                                           | <i>a</i>                                                                                 | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> |
| $C_1:C_2$                                 | 80:20                                                                                    | 80:20    | 80:20    | 70:30    | 70:30    |
| $C_{12}:C_3$                              | 90:10                                                                                    | 90:10    | 80:20    | 70:30    | 60:40    |
| $C_{123}:C_4$                             | 90:10                                                                                    | 80:20    | 80:20    | 80:20    | 80:20    |

Źródło: opracowanie własne

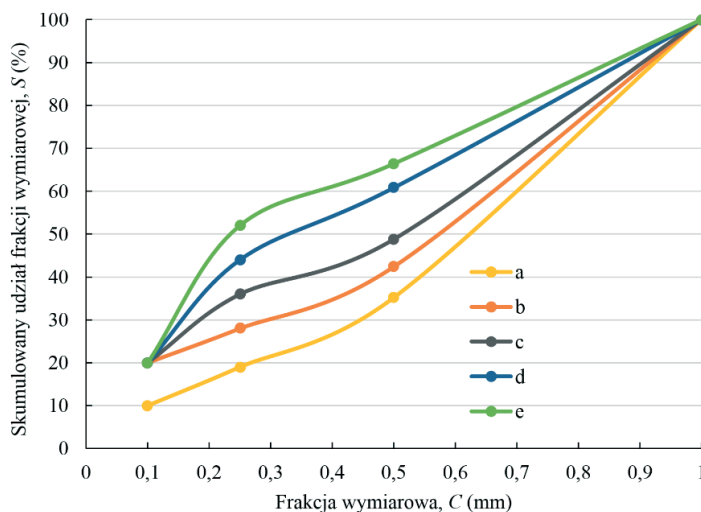
Udział procentowy frakcji wymiarowych  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  i  $C_4$  w uzyskanych mieszkach komponowanych zawarto w tabeli 5.9., natomiast rysunek 5.18. przedstawia krzywe skumulowane tych mieszanek.

Tabela 5.9.

Udział frakcji wymiarowych *C* w mieszkach komponowanych *a*, *b*, *c*, *d*, *e*

| Frakcja wymiarowa | Udział frakcji w mieszkach (%) |          |          |          |          |
|-------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                   | <i>a</i>                       | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> |
| $C_1$             | 64,8                           | 57,6     | 51,2     | 39,2     | 33,6     |
| $C_2$             | 16,2                           | 14,4     | 12,8     | 16,8     | 14,4     |
| $C_3$             | 9                              | 8        | 16       | 24       | 32       |
| $C_4$             | 10                             | 20       | 20       | 20       | 20       |

Źródło: opracowanie własne



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.18. Skumulowany skład ziarnowy mieszanek komponowanych

Komponowane mieszanki zawierają od 64,5 do 33,6% frakcji  $C_1$ . Frakcja ta (największa wielkość ziarna) ma największy udział w komponowanych mieszankach – co odpowiada założeniom wstępnym. Mieszanka  $a$  zawiera tylko 10% frakcji najmniejszej  $C_4$ , a pozostałe zawierają 20% tej frakcji. Krzywe kumulacyjne uzyskanych mieszanek przesuwają się stopniowo w górę wykresu pokrywając równomiernie pole pomiędzy krzywymi kumulacyjnymi mieszanki  $a$  i  $e$ .

Dla uzyskanych mieszanek oznaczono ich gęstości nasypowe  $BD$  i współczynniki wypełnienia wewnętrznego  $\varphi_{zew}$  (tab. 5.10). W każdym przypadku  $BD$  i  $\varphi_{zew}$  mieszanki komponowanej jest wyższa w porównaniu do  $BD$  i  $\varphi_{zew}$  mieszanki bazowej, co również odpowiada przyjętym założeniom. W przypadku mozgi i wierzy najwyższą wartością gęstości nasypowej charakteryzuje się mieszanka  $a$ , natomiast w przypadku buka mieszanka  $c$ , co kolejny raz wskazuje na to, że o gęstości nasypowej decyduje nie tylko skład ziarnowy ale również parametry samych ziaren.

Tabela 5.10.

*Gęstość nasypowa  $BD$  mieszanek komponowanych i bazowych*

| Materiał                                              | Gęstość nasypowa $BD$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |       |       |       |       |           |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                                                       | $a$                                                     | $b$   | $c$   | $d$   | $e$   | m. bazowa |
| Mozga                                                 | 242,87                                                  | 233,5 | 227,5 | 218   | 211,3 | 207,2     |
| Buk                                                   | 285,1                                                   | 305,8 | 311,1 | 289,8 | 286,1 | 275,2     |
| Wierzba                                               | 201,7                                                   | 190,1 | 184,7 | 198,8 | 191,1 | 176       |
| Współczynnik wypełnienia zewnętrznego $\varphi_{zew}$ |                                                         |       |       |       |       |           |
| Mozga                                                 | 0,52                                                    | 0,5   | 0,49  | 0,47  | 0,45  | 0,44      |
| Buk                                                   | 0,41                                                    | 0,43  | 0,44  | 0,41  | 0,41  | 0,39      |
| Wierzba                                               | 0,36                                                    | 0,34  | 0,33  | 0,35  | 0,34  | 0,31      |

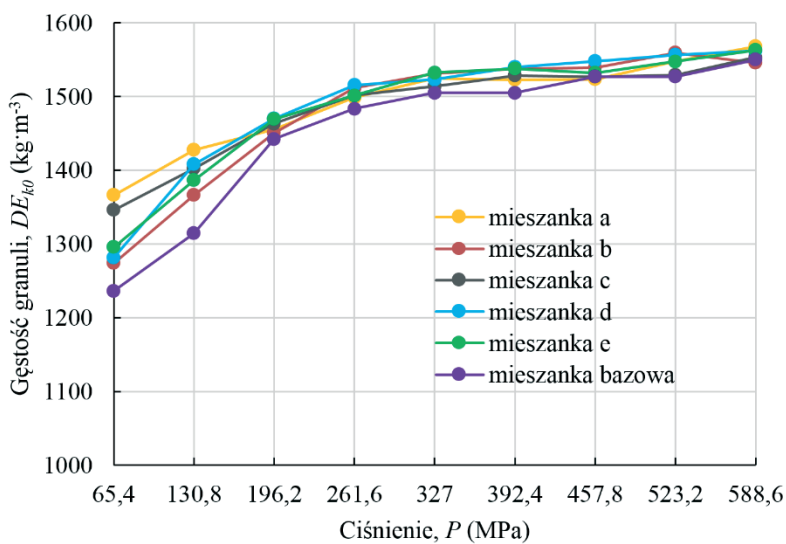
*Źródło: opracowanie własne*

### ***Krzywe zagęszczania mieszanek komponowanych***

Tak wytworzone mieszanki poddano zagęszczaniu, które przebiegało w takich samych warunkach jak proces zagęszczania mieszanek bazowych. Przebieg zmian gęstości  $DE_{k0}$  próbki wewnątrz komory zagęszczania w zależności od ciśnienia zagęszczania  $P$  przedstawiono w postaci krzywych zagęszczania na wykresach (rys. 5.19 – 5.21).

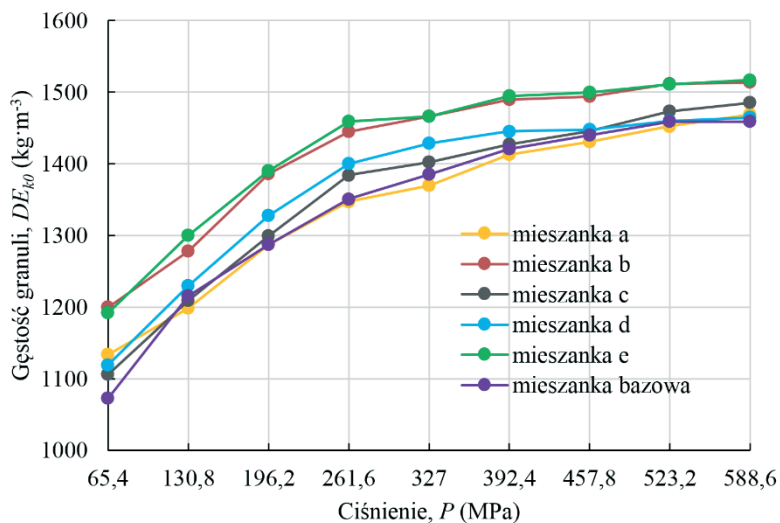
W przypadku mozgi największe różnice w krzywych zagęszczania można zauważyć w przedziale ciśnienia 65,4 – 196,2 MPa. Po przekroczeniu ciśnienia 196,2 MPa przebieg zmian gęstości dla wszystkich mieszanek jest podobny. Do poziomu ciśnienia 261,6 MPa wartość  $DE_{k0}$  wzrasta do średniego poziomu  $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , po przekroczeniu tego ciśnienia wzrost gęstości jest już niewielki.

Mieszanki uzyskane z biomasy buka charakteryzują się zbliżonym przebiegiem krzywych zagęszczania. Największy wzrost gęstości  $DE_{k0}$  w stosunku do ciśnienia  $P$  obserwuje się w zakresie ciśnienia 65,5 – 261,6 MPa. Dynamika wzrostu  $DE_{k0}$  spada w zakresie ciśnienia 261,6 – 392,4 MPa. Po przekroczeniu tej wartości ciśnienia mieszanki  $a$ ,  $c$  oraz bazowa utrzymują podobną dynamikę wzrostu gęstości jak w poprzednim zakresie ciśnienia, natomiast gęstość mieszanek  $b$ ,  $d$  i  $e$  wzrasta w niewielkim stopniu. Uwagę zwraca również fakt, że mieszanki  $b$  i  $e$  charakteryzują się w całym zakresie ciśnienia gęstością  $DE_{k0}$  wyższą w stosunku do pozostałych mieszanek.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.19. Krzywe zagęszczania mieszanek biomasy mozgi

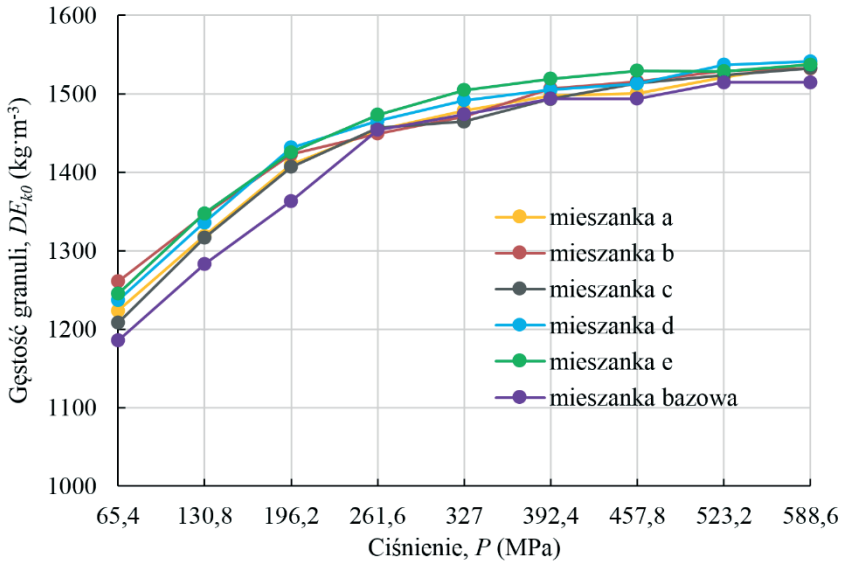


Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.20. Krzywe zagęszczania mieszanek biomasy buka



Mieszanki biomasy wierzby, podobnie jak mieszanki biomasy buka, charakteryzują się zbliżonym przebiegiem krzywych zagęszczania w całym zakresie ciśnienia. Największy wzrost  $DE_{k0}$  w stosunku do  $P$  obserwuje się w zakresie ciśnienia 65,5 – 196,2 MPa (tylko mieszanka bazowa utrzymuje ten trend do poziomu ciśnienia 261,6 MPa). Dynamika wzrostu gęstości spada w zakresie ciśnienia 196,2 – 327 MPa, a po przekroczeniu tej wartości  $P$  gęstość mieszanek wzrasta już w niewielkim stopniu.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.21. Krzywe zagęszczania mieszanek biomasy wierzby

Stabilizacja wzrostu gęstości  $DE_{k0}$  dla badanych gatunków następuje dla mozgi przy ciśnieniu 261,6 MPa, dla wierzby przy 327 MPa, a dla buka dopiero przy 392,4 MPa (i to tylko dla części mieszanek). Jest to prawdopodobnie związane z twardością biomasy – im materiał bardziej miękki (mozga) tym mniejsze ciśnienie konieczne do uzyskania maksymalnego zagęszczenia w komorze prasowania.

### Rozpręż poaglomeracyjny

Podobnie jak dla mieszanek bazowych, określono również rozpręż poaglomeracyjny  $R_{24}$  granul z mieszanek komponowanych. Rozpręż jest zjawiskiem niepożądanym, zatem jeśli uzyskane wartości rozprężu będą niższe od tych, które uzyskano dla mieszanek bazowych można uznać, że odpowiednio dobrany skład ziarnowy pozwolił zmniejszyć to niekorzystne zjawisko. Źle dobrany skład ziarnowy powoduje, że w trakcie zagęszczania cząstki są w dużym stopniu odkształcane. Po ustaniu działania ciśnienia zagęszczania, cząstki w wyniku sprężystości materiału próbują wrócić do początkowego kształtu, niszcząc tym samym strukturę powstałej granuli. Jeśli skład ziarnowy jest odpowiednio dobrany, cząstki są rów-

niez odkształcane jednak w mniejszym stopniu (powinno następować głównie ich zginięcie) co po ustaniu działania ciśnienia wywołuje mniejszy rozpręż. Aby zatem w trakcie zagęszczania zminimalizować zginanie cząstek, należy cząstki duże, a zwłaszcza duże i długie „podeprzeć” innymi cząstkami (najlepiej mniejszymi) w maksymalnie wielu punktach. Spowoduje to zbliżenie do siebie cząstek tworzących złożę, lepsze ich dopasowanie i redukcję pustych przestrzeni, a w efekcie wzrost gęstości nasypowej złoża.

Wartości rozprężu  $R_{24}$  granul uzyskanych z mieszanek komponowanych zamieszczono w tabeli 5.11. Dla porównania w tabeli zamieszczono również wartość rozprężu granul wytworzonych z mieszanek bazowych. Analizując wartości  $R_{24}$  można stwierdzić, że dla mozgi granule wytworzone z mieszanek *c*, *d* i *e* charakteryzują się porównywalną lub nieznacznie niższą wartością tego parametru w stosunku do mieszanki bazowej. Zatem skład ziarnowy tych komponowanych mieszanek nie wywołał spadku wartości  $R_{24}$ . Ponadto w przypadku mieszanki *a* oraz *b* wartość rozprężu wyraźnie wzrosła, odpowiednio do 77,7% oraz 71,2%. Pozwala to stwierdzić, że skład ziarnowy tych dwóch mieszanek jest najmniej korzystny w porównaniu do mieszanki bazowej i raczej nie poprawi zagęszczalności i kompaktowalności tego surowca. W przypadku buka i wierzby sytuacja jest odmienna. Granule wytworzone z mieszanki *a* i *b* charakteryzują się wartością  $R_{24}$  porównywalną do granul z mieszanki bazowej. W pozostałych przypadkach rozpręż jest wyraźnie mniejszy.

Tabela 5.11.

*Rozpręż poaglomeracyjnego  $R_{24}$  granul po 24 h stabilizacji*

| Materiał | mieszanka | Ciśnienie (MPa) |        |       |       |       |       | $R_{24}$<br>średni |
|----------|-----------|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
|          |           | 261,60          | 327,00 | 392,4 | 457,8 | 523,2 | 588,6 |                    |
| Mozga    | <i>a</i>  | 77,8            | 79,2   | 77,1  | 75,2  | 77,7  | 79,3  | 77,7               |
|          | <i>b</i>  | 74,4            | 72,0   | 70,7  | 69,1  | 71,7  | 69,5  | 71,2               |
|          | <i>c</i>  | 65,0            | 64,1   | 63,3  | 62,6  | 61,9  | 64,1  | 63,5               |
|          | <i>d</i>  | 68,0            | 64,7   | 63,8  | 63,2  | 62,6  | 62,8  | 64,2               |
|          | <i>e</i>  | 63,9            | 62,9   | 61,2  | 60,2  | 60,9  | 63,1  | 62,0               |
|          | bazowa    | 62,7            | 63,3   | 63,9  | 63,4  | 62,2  | 65,2  | 63,4               |
| Buk      | <i>a</i>  | 47,5            | 47,6   | 45,5  | 43,7  | 44,1  | 44,4  | 45,5               |
|          | <i>b</i>  | 48,3            | 46,7   | 45,5  | 45,1  | 44,9  | 44,9  | 45,9               |
|          | <i>c</i>  | 42,6            | 40,4   | 39,1  | 39,3  | 41,5  | 41,7  | 40,8               |
|          | <i>d</i>  | 40,5            | 38,3   | 38,1  | 34,7  | 35,2  | 35,2  | 37,0               |
|          | <i>e</i>  | 42,9            | 40,9   | 41,2  | 39,9  | 38,4  | 38,7  | 40,3               |
|          | bazowa    | 47,9            | 47,1   | 46,1  | 43,9  | 44,4  | 44,6  | 45,7               |
| Wierzba  | <i>a</i>  | 67,7            | 66,3   | 67,3  | 64,2  | 63,5  | 64,5  | 65,6               |
|          | <i>b</i>  | 64,8            | 64,0   | 62,3  | 60,5  | 61,6  | 61,0  | 62,3               |
|          | <i>c</i>  | 56,0            | 55,1   | 56,2  | 56,6  | 58,2  | 58,4  | 56,7               |
|          | <i>d</i>  | 49,2            | 48,0   | 48,8  | 48,7  | 49,7  | 49,9  | 49,0               |
|          | <i>e</i>  | 50,0            | 49,7   | 49,3  | 49,2  | 49,3  | 49,0  | 49,4               |
|          | bazowa    | 65,2            | 63,6   | 63,1  | 60,6  | 60,0  | 60,8  | 62,2               |

Źródło: opracowanie własne

Najmniejszym rozprężem charakteryzują się granule bukowe i wierzbowe wytworzone z mieszanki  $d$ , a następnie  $e$ . Ogólnie rzecz ujmując, spośród badanych mieszanek zawsze skład ziarnowy mieszanki  $a$  i  $b$  powoduje dla granul z danej biomasy największy rozpręż  $R_{24}$ . Mieszanki te charakteryzują się najwyższym udziałem największej frakcji ziarnowej  $C_1$  oraz najmniejszym sumarycznym udziałem frakcji drobnych  $C_3$  i  $C_4$ . Można zatem założyć, że wysoki rozpręż spowodowany jest zbyt małym udziałem frakcji  $C_3$  i  $C_4$  w stosunku do frakcji  $C_1$ . Frakcje drobne w niedostatecznym stopniu wypełniają przestrzeń pomiędzy dużymi ziarnami co w efekcie powoduje, że w trakcie zagęszczania duże ziarna są w znacznym stopniu odkształcane, wywołując w powstającym kompacie naprężenia, które po ustaniu działania ciśnienia zagęszczania wywołują rozpręż. Mieszanki  $c$ ,  $d$  i  $e$  charakteryzują się większym udziałem frakcji  $C_3$  i  $C_4$  w stosunku do frakcji  $C_1$  co w efekcie przekłada się na mniejsze wartości rozprężu granul z nich wytworzonych.

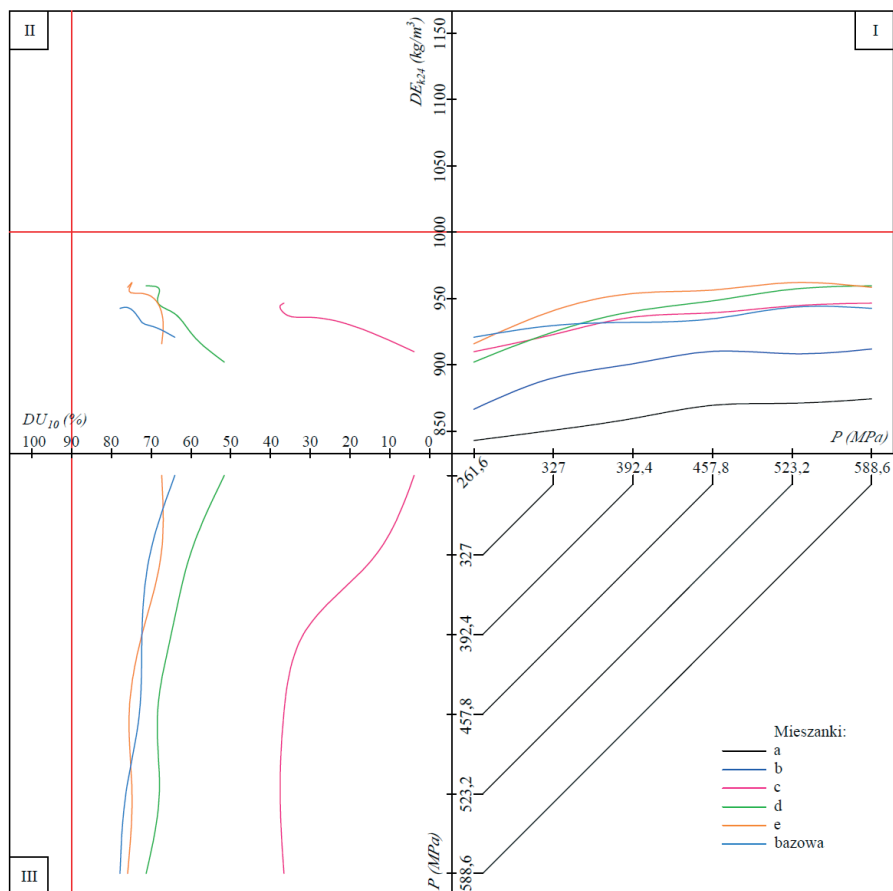
## 5.7. Zagęszczalność i kompaktowalność mieszanek komponowanych

Wyniki przebiegu zmian gęstości właściwej  $DE_{k24}$  i wytrzymałości mechanicznej  $DU_{10}$  granul, przedstawiono na nomogramach zagęszczalności i kompaktowalności (rys. 5.22 – 5.24). Dla porównania na nomogramach zamieszczono również krzywe zagęszczalności i kompaktowalności granul z mieszanek bazowych.

Pierwszy z nomogramów (rys. 5.22) obrazuje zagęszczalność i kompaktowalność mieszanek z biomasy mozgi. Granule wytworzone z mieszanki  $a$  i  $b$  w całym zakresie ciśnienia  $P$ , uzyskały gęstość właściwą  $DE_{k24}$  wyraźnie niższą w porównaniu do granul z mieszanki bazowej. Ma to bezpośredni związek z rozprężem omawianym w poprzednim podrozdziale. Pozostałe mieszanki pozwalają na uzyskanie granul o  $DE_{k24}$  porównywalnej lub nieznacznie wyższej do  $DE_{k24}$  granul bazowych. Spośród tych mieszanek najwyższą gęstość granul, zwłaszcza po przekroczeniu ciśnienia 327 MPa, pozwala uzyskać mieszanka  $e$ . Zatem w badanym zakresie ciśnienia, żadna z testowanych mieszanek komponowanych nie pozwoliła na wyraźną poprawę gęstości właściwej  $DE_{k24}$  granul, a tym bardziej nie pozwoliła na uzyskanie granul o progowej gęstości właściwej  $DE_z$ .

Kompaktowalność testowanych mieszanek wykazuje jeszcze większą zależność od ich składu ziarnowego. Granule wykonane z mieszanki  $a$  i  $b$  charakteryzowały się zerową wytrzymałością mechaniczną  $DU_{10}$ . Mieszanka  $c$  dopiero przy ciśnieniu 392,4 MPa pozwalała na uzyskanie granul o wytrzymałości zaledwie około 40%. Granule wytworzone z mieszanki  $d$  charakteryzują się wytrzymałością mechaniczną o około 10% niższą w porównaniu do granul z mieszanki bazowej i tylko granule z mieszanki  $e$  są pod względem wytrzymałości  $DU_{10}$  do nich podobne. Potwierdza to, że mózga jest materiałem trudnym do zagęszczania i badana zmiana składu ziarnowego nie tylko nie poprawia, ale wręcz pogarsza i tak niską zagęszczalność i kompaktowalność tego materiału (która jest zdecydowanie niższa od przyjętych progów). Jeśli chodzi o badane mieszanki komponowane, to za najlepszą należy uznać mieszankę  $e$ , która utrzymuje kompaktowalność na poziomie bazowym i nieznacznie poprawia zagęszczalność zwłaszcza powyżej ciśnienia zagęszczania 327 MPa. Jednak nadal wszystkie przebiegi krzywych  $DE_{k24} - DU_{10}$  pozostają w czerwonym obszarze II ćwiartki nomogramu co oznacza, że pomimo wprowadzonych zmian do

składu ziarnowego materiał należy nadal zaklasyfikować do IV grupy, czyli jako materiał niezagęszczalny i niekompaktowalny.



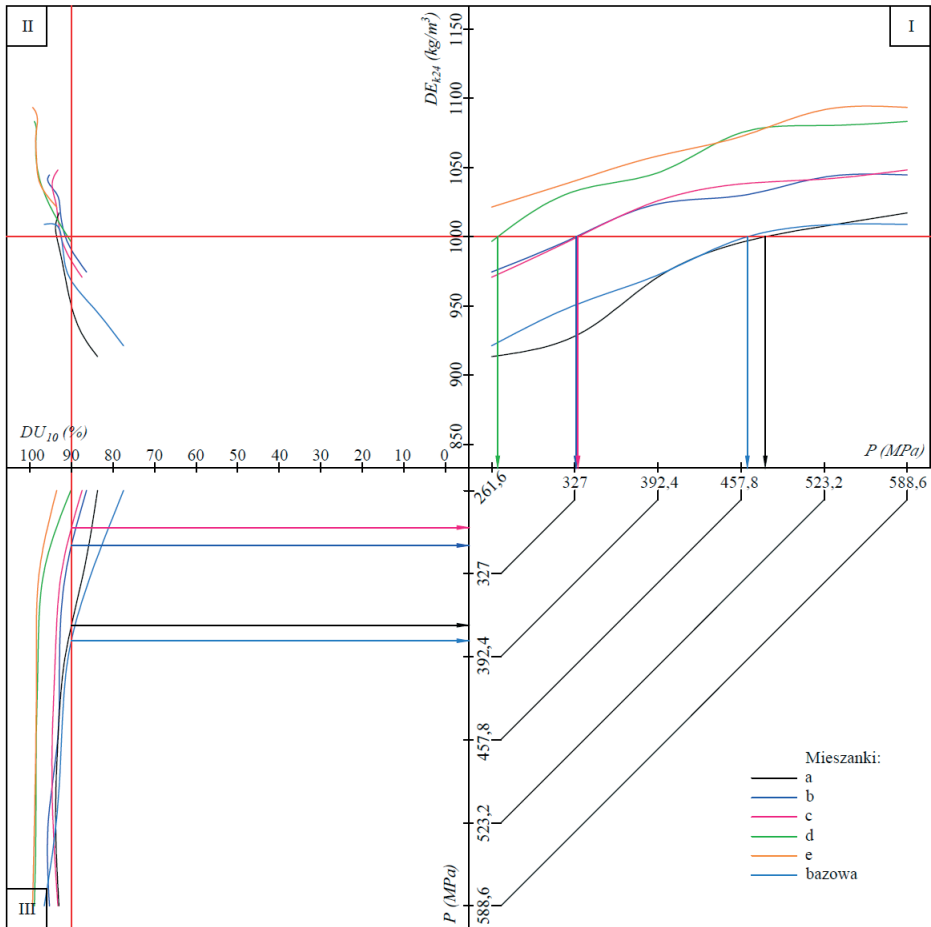
Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.22. Nomogram mieszanek biomasy mozgi

W przypadku buka sytuacja jest inna, mieszanka *a* pozwala na uzyskanie granul o gęstości właściwej  $DE_{k24}$  porównywalnej do uzyskiwanej dla mieszanki bazowej. Natomiast wszystkie pozostałe mieszanki (*b* – *e*) dają możliwość uzyskania wyraźnie wyższych gęstości  $DE_{k24}$ . Na nomogramie obrazuje to przesunięcie krzywych zagęszczalności tych mieszanek w górę (rys. 5.23).

Wszystkie uzyskane granule uzyskują progową wartość gęstości właściwej  $DE_z$ . Im lepsza mieszanka (o dogodniejszym w aspekcie zagęszczania, składzie ziarnowym), tym wartość tą uzyskiwana jest przy niższej wartości ciśnienia zagęszczalności progowej  $P_z$ . Porównując skład ziarnowy do uzyskanych wyników  $P_z$  można stwierdzić, że w przypadku

biomasy buka, wraz ze wzrostem udziału frakcji  $C_3$  i  $C_4$  w stosunku do frakcji  $C_1$  zagęszczalność progowa  $P_z$  spada, przy czym spadek ten jest bardzo wyraźny. Mieszaneczka bazowa i mieszaneczka komponowana  $a$  charakteryzuje się zagęszczalnością progową  $P_z$  około 460 MPa, dla mieszanek  $b$  i  $c$  wartość ta spada do około 330 MPa, mieszaneczka  $d$  to  $P_z$  na poziomie około 270 MPa, natomiast  $P_z$  mieszanek  $e$  jest niższe od 261 MPa, czyli poniżej najniższej wartości badanego zakresu ciśnienia. Zmiany te pokazują jak duży spadek niezbędnego ciśnienia zagęszczania możemy uzyskać poprzez odpowiednio skomponowany skład ziarnowy zagęszczanej mieszanek.



Źródło: opracowanie własne

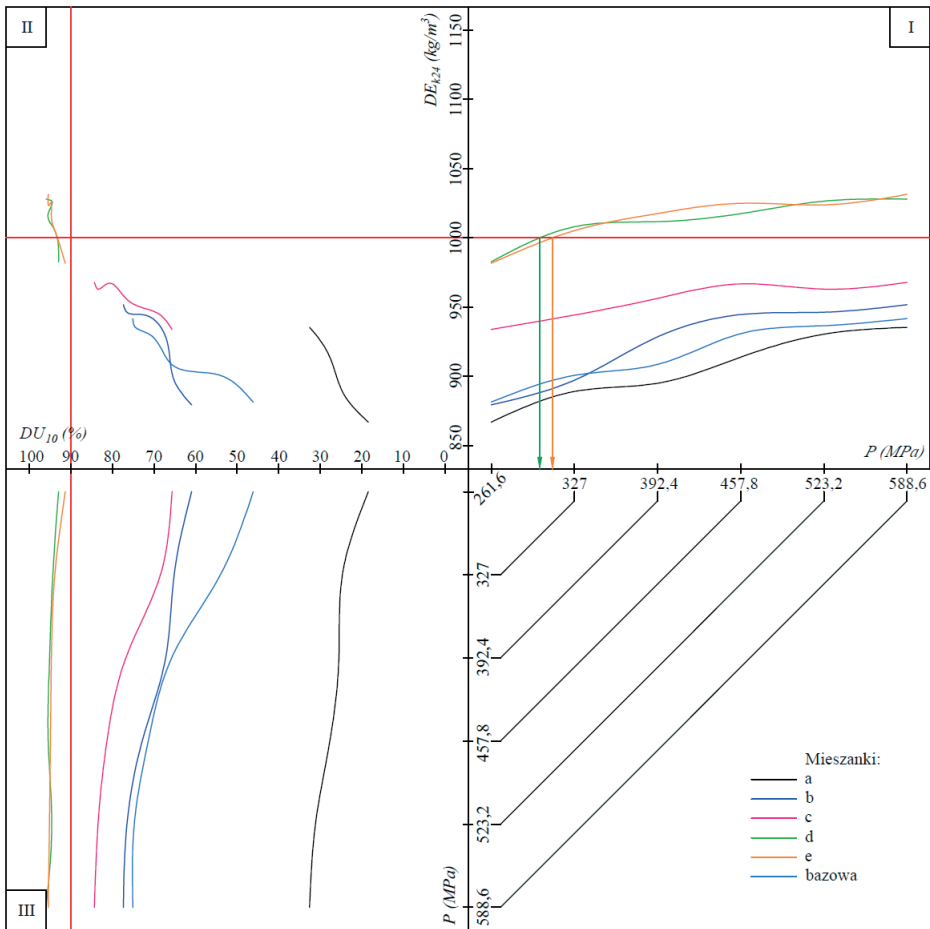
Rys. 5.23. Nomogram mieszanek biomasy buka

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku kompaktowalności mieszanek komponowanych z biomasy buka. Mieszanka *a* i mieszanka bazowa uzyskują porównywalne wartości  $DU_{10}$  (różnice można wskazać tylko w zakresie ciśnienia 261,6 – 327 MPa). Krzywe kompaktowalności mieszanek *b* i *c* w całym zakresie ciśnienia charakteryzują zbliżone do siebie wartości  $DU_{10}$ , a porównując je do krzywej mieszanki bazowej i mieszanki *a* różnią się od nich wyższymi wartościami  $DU_{10}$  w zakresie ciśnienia od 261,6 do około 400 MPa. Mieszanki *d* i *e* cechuje wyższa kompaktowalność w stosunku do pozostałych mieszanek w całym badanym zakresie ciśnienia. Wszystkie badane granule uzyskały progową wartość wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ . Porównując wartości  $P_z$  i  $P_k$  danej mieszanki można zauważyć, iż w każdym przypadku  $P_z > P_k$ , co oznacza, że dla założonych progów łatwiej uzyskać kompaktowalność niż zagęszczalność. Krzywe w II ćwiartce nomogramu, wraz ze zmianą składu ziarnowego mieszanki, przesuwają się ze strefy „czerwonej” poprzez „żółtą” do „zielonej”. Finalnie całe krzywe mieszanki *d* i *e* znalazły się w strefie „zielonej” co oznacza, że te dwie mieszanki przy najniższej wartości ciśnienia z badanego zakresu uzyskały założony próg  $DE_z$  i  $DU_k$ , a tym samym można uznać, że ich skład ziarnowy jest najlepszy.

W przypadku wierzby, mieszanka *a* pozwala na uzyskanie wartości  $DE_{k24}$  nieznacznie niższych w porównaniu do mieszanki bazowej.  $DE_{k24}$  granul wytworzonych z mieszanki *b*, w zakresie ciśnienia od 261,6 do około 330 MPa jest porównywalna do  $DE_{k24}$  granul z mieszanki bazowej, a po przekroczeniu tej wartości ciśnienia nieznacznie wzrasta. Dopiero granule z mieszanki *c* mają wyraźnie wyższe wartości  $DE_{k24}$ . Jednak w żadnym z omawianych przypadków  $DE_{k24}$  granul nie uzyskuje wartości progowej  $DE_z$ . Dopiero mieszanka *e* i *d* (których przebiegi krzywych gęstości właściwej są niemal takie same) pozwala na uzyskanie progu  $DE_z$  przy ciśnieniu zagęszczalności progowej  $P_z$  wynoszącej około 300 MPa. Zatem wpływ składu ziarnowego na zagęszczanie wierzby jest wyraźny. Badane mieszanki (*e* i *d*) pozwalają na uzyskanie progowej wartości  $DE_z$  przy ciśnieniu z badanego zakresu.

W przypadku kompaktowalności w całym zakresie ciśnienia zaobserwowano wyraźny spadek wartości  $DU_{10}$  granul wytworzonych z mieszanki *a* w porównaniu do granul z mieszanki bazowej. Mieszanka *b* w zakresie ciśnienia od 261,6 do około 390 MPa pozwala uzyskać granule o  $DU_{10}$  wyższej w porównaniu do bazowych. W pozostałym, wyższym zakresie ciśnienia poprawy tej już nie zaobserwowano. Podobnie jak w zagęszczalności, kompaktowalność mieszanki *c* jest wprawdzie lepsza w porównaniu do mieszanki bazowej, ale jednak nie uzyskuje założonego progu. Tylko mieszanki komponowane *e* i *d* (charakteryzujące się zbliżonymi przebiegami kompaktowalności) pozwalają na uzyskanie granul o  $DU_{10}$  powyżej założonego progu w całym zakresie badanego ciśnienia.

W omawianym przypadku wyraźnie widoczny jest zróżnicowany wpływ składu ziarnowego mieszanki na jej zagęszczalność i kompaktowalność – skład ziarnowy mieszanki *a* nieznacznie pogarsza zagęszczalność (spadek wartości  $DE_{k24}$  w porównaniu do  $DE_{k24}$  z mieszanki bazowej), jednak jej kompaktowalność wyraźnie się pogarsza. Pozostałe składniki ziarnowe badanych mieszanek powodują w przeważającej części, poprawę zagęszczalności i kompaktowalności.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.24. Nomogram mieszanek biomasy wierzy

Omówione przypadki dla buka i wierzy jednoznacznie wskazują, że odpowiedni skład ziarnowy pozwala uzyskać progowe wartości gęstości właściwej  $DE_z$  i wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$ , przy znacząco niższych wartościach ciśnienia zagęszczalności progowej  $P_z$  i kompaktowalności progowej  $P_k$  niż dla mieszanek bazowych. W przypadku mozgi zmiana składu ziarnowego badanych mieszanek komponowanych również wpływa na proces zagęszczania, jednak wpływ ten jest w różnym stopniu negatywny. Zatem ogólnie rzecz biorąc wykazano wpływ składu ziarnowego na proces ciśnieniowego zagęszczania rozdrobionej biomasy, jednak charakter tego wpływu zależy od swoistych właściwości samego materiału.

Na podstawie nomogramów należy stwierdzić, że najlepszym składem ziarnowym charakteryzuje się mieszanka *e* – w przypadku wierzby i buka spowodowała wyraźną poprawę zagęszczalności i kompaktowalności tych materiałów, a w przypadku mozgi pozwoliła na nieznaczna poprawę zagęszczalności i utrzymanie kompaktowalności na poziomie zbliżonym do mieszanki bazowej. Nieco gorszym składem ziarnowym charakteryzuje się mieszanka *d*. Zatem to mieszankę *e* należy uznać za tę, która z punktu widzenia procesu ciśnieniowego zagęszczania biomasy lignocelulozowej posiada najlepszy skład ziarnowy.

Badania zagęszczalności i kompaktowalności każdego rodzaju biomasy powinny opierać się na tej mieszance i testowaniu czy zmiany w jej składzie ziarnowym wywołują pozytywne zmiany w przebiegu krzywych zagęszczalności i kompaktowalności.

## 5.8. Badania weryfikacyjne

Produkcja paliw stałych z biomasy opiera się najczęściej na zagęszczaniu surowca o wilgotności z zakresu 8 – 15%. Normy jakościowe wymagają, aby wilgotność wytworzonego biopaliwa (w większości przypadków) wynosiła poniżej 10% (seria PN-EN ISO 17225). W celu weryfikacji, czy opracowany skład ziarnowy (mieszanka *e*) powoduje poprawę zagęszczalności i kompaktowalności, również w przypadku, gdy surowiec nawilżymy do poziomu wilgotności technologicznej, przeprowadzono zagęszczanie i określono zagęszczalność i kompaktowalność uzyskanych granul.

Zagęszczano mieszankę bazową i mieszankę *e* uzyskaną z biomasy mozgi, wierzby i buka. Założono, że mieszanki nawilżone zostaną do poziomu 12% poprzez dodanie odpowiedniej ilości wody do suchego surowca. Po nawilżeniu określono wilgotność  $M_{ad}$  mieszanek, a uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 5.12.

Tabela 5.12.

*Poziom wilgotności zagęszczanych mieszanek biomasowych*

| Materiał | Mieszanka | Wilgotność $M_{ad}$ (%) |
|----------|-----------|-------------------------|
| Mozga    | bazowa    | 11,3                    |
|          | e         | 11,5                    |
| Buk      | bazowa    | 11,3                    |
|          | e         | 11,2                    |
| Wierzba  | bazowa    | 11,4                    |
|          | e         | 11,4                    |

*Źródło: opracowanie własne*

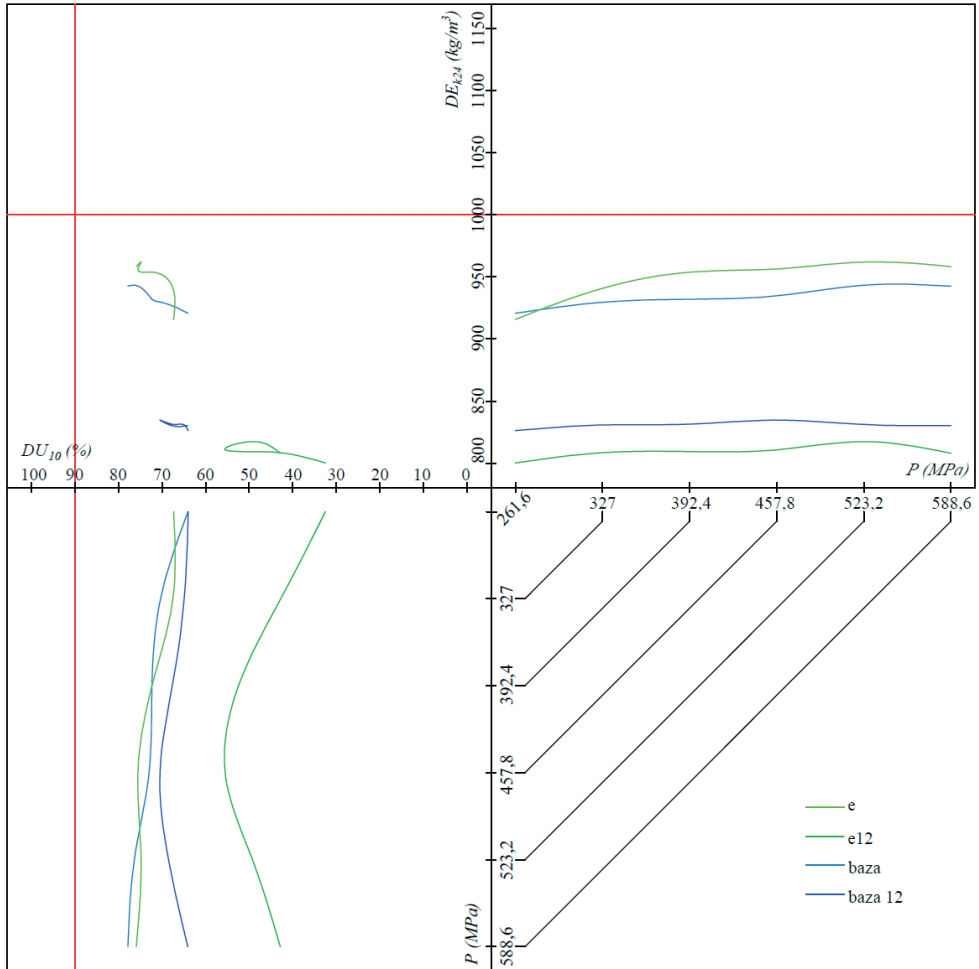
Tak uzyskane mieszanki zagęszczano wg tej samej procedury jak w przypadku mieszanek suchych. Dla uzyskanych granul opracowano nomogramy zagęszczalności i kompaktowalności (rys. 5.25 – 5.27).

W pierwszej ćwiartce nomogramu obserwujemy wyraźny wpływ wzrostu wilgotności na zagęszczalność badanych mieszanek z biomasy mozgi. W tym przypadku wpływ ten jest jednoznacznie negatywny. Granule wytworzone z nawilżonej mieszanki *e* i mieszanki ba-



zowej w całym zakresie ciśnienia uzyskały gęstość właściwą  $DE_{k24}$ , wyraźnie niższą w porównaniu do granul z mieszanek w stanie suchym.

W przypadku kompaktowalności (ćwiartka III nomogramu) sytuacja jest podobna. Wzrost wilgotności w mieszance bazowej spowodował spadek wartości  $DU_{10}$  granul, jednak jest on dużo mniejszy niż spadek  $DU_{10}$  granul z mieszanek  $e$ . W obu przypadkach (kompaktowalność i zagęszczalność) zaobserwowano więc negatywny wpływ wilgoci, a bardziej podatna na ten wpływ jest mieszanka  $e$ .

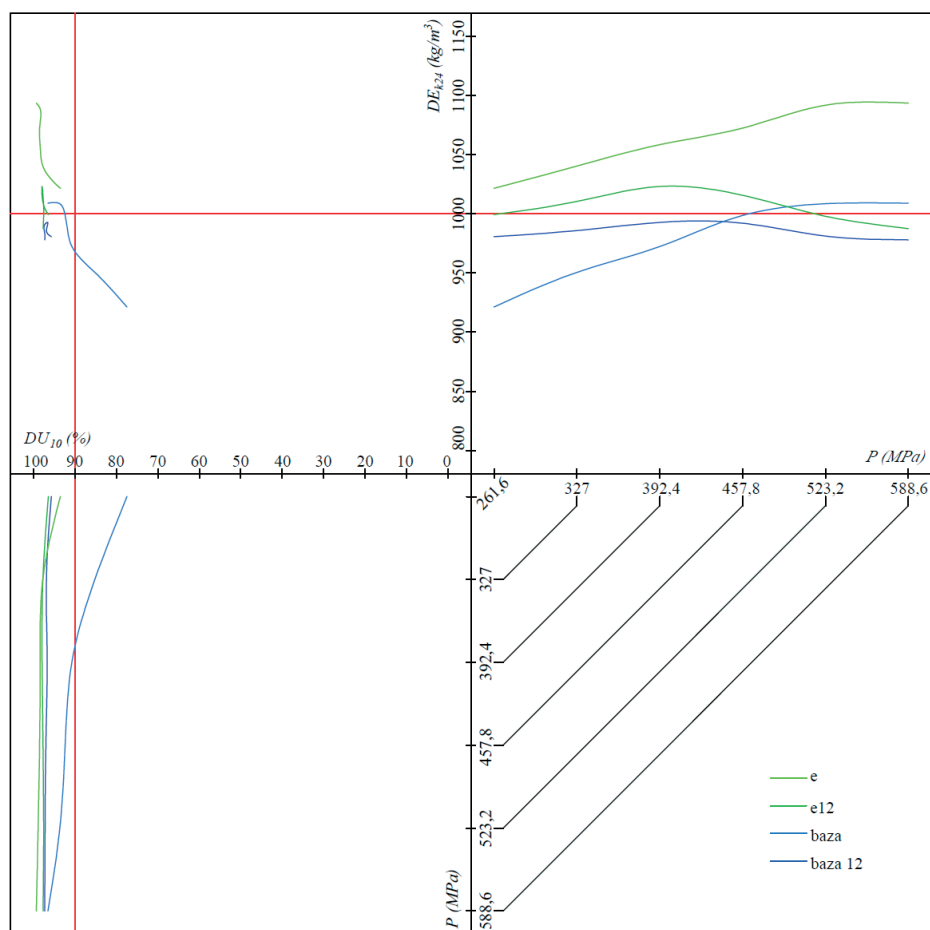


Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.25. Nomogram mieszanek biomasy mozgi

Zatem mimo zmiany składu ziarnowego i wilgoci materiału, krzywe relacji  $DU_{10} - DE_{k24}$  dla wszystkich testowanych wariantów dalej pozostały całkowicie w strefie czerwonej (ćwiartka II nomogramu). Potwierdza to kolejny raz, że biomasa mozgi jest materiałem trudnym do aglomeracji. W badanych warunkach przynależy do grupy IV i klasyfikowana jest jako materiał niezagęszczalny i niekompaktowalny. Poprawę tego stanu może zmienić uwzględnienie innych czynników wpływających na proces (zastosowanie lepiszczy lub wzrost temperatury) jednak nie zostały one brane pod uwagę w przeprowadzonych badaniach.

W przypadku buka krzywe na nomogramie mają inny przebieg w porównaniu do omawianej powyżej mozgi (rys. 5.26). Granule wytworzone z nawilżonej mieszanki  $e$  również uzyskują niższe wartości  $DE_{k24}$  w porównaniu do granul z mieszanki  $e$  w stanie suchym.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.26. Nomogram mieszanek biomasy buka

Jednak ich  $DE_{k24}$  w zakresie ciśnienia od 261,6 do około 510 MPa uzyskują wartość progową  $DE_z$  i wyższą. W przypadku mieszanki bazowej w zakresie ciśnienia od 261,6 do około 450 MPa to granule z mieszanki nawilżonej uzyskują wyższe wartości  $DE_{k24}$  w porównaniu do granul z mieszanki suchej. Sytuacja zmienia się po przekroczeniu ciśnienia 450 MPa. Należy jednak zaznaczyć, że  $DE_{k24}$  granul z wilgotnej mieszanki bazowej nie osiąga nigdy wartości progowej  $DE_z$  i jednocześnie jest zawsze niższa od  $DE_{k24}$  granul z wilgotnej mieszanki  $e$ . Zatem to skład ziarnowy mieszanki  $e$  powoduje, że granule z niej utworzone przy testowanej wilgotności uzyskują lepszą zagęszczalność.

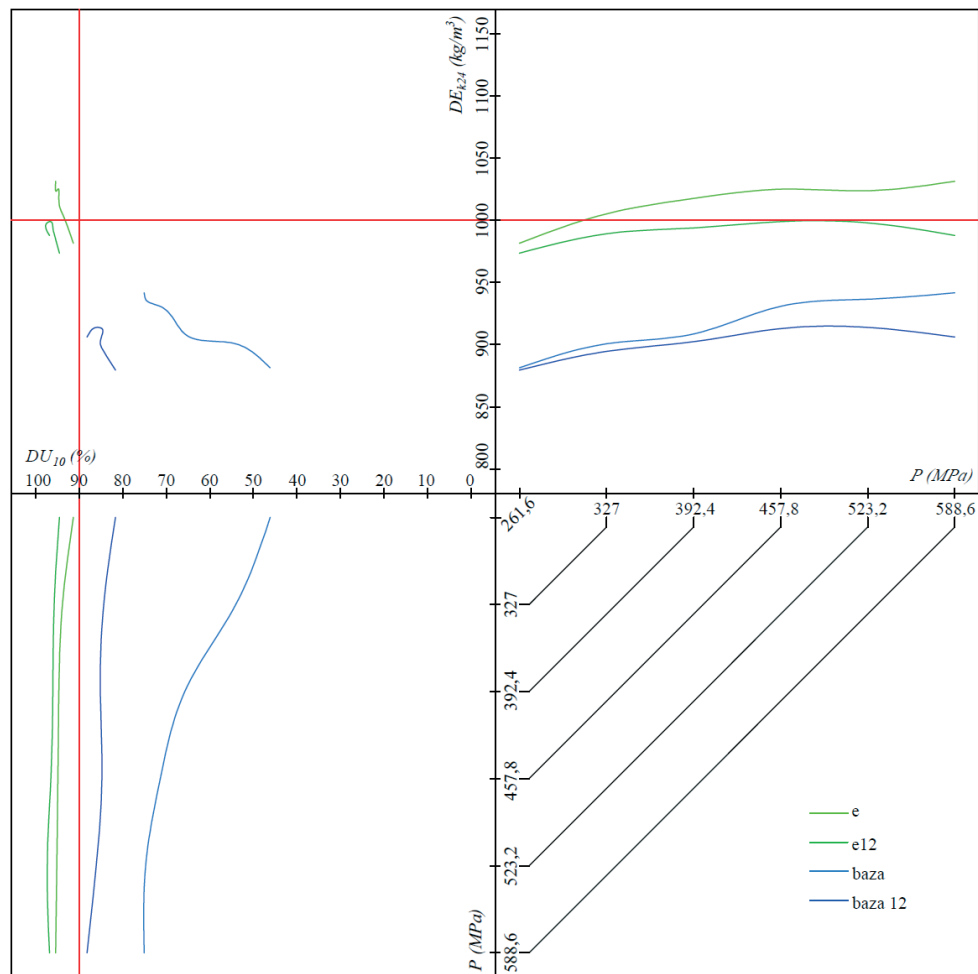
W przypadku polepszenia kompaktowalności wzrost wilgotności mieszanek ma wpływ pozytywny. Potwierdza to zaobserwowany, relatywnie duży (zwłaszcza w zakresie niższych wartości badanego ciśnienia) wzrost  $DU_{10}$  granul wytworzonych z nawilżonej mieszanki bazowej w porównaniu do granul z tej mieszanki w stanie suchym. Zaobserwowano również relatywnie nieznaczny, jeśli nie pomijalny, wzrost  $DU_{10}$  granul z nawilżonej mieszanki  $e$ . W obu przypadkach pozwala to na uzyskanie podobnych granicznych wartości wytrzymałości mechanicznej granul znacznie powyżej wartości progowej  $DU_k$ . W tym przypadku wzrost wilgotności mieszanek poprawia kompaktowalność biomasy buka bez względu na ich skład ziarnowy. Jeśli jednak przejdziemy do II ćwiartki nomogramu to zauważymy, że nawilżając mieszanekę bazową materiał „przesuwa się” tylko do strefy żółtej uzyskując status materiału kompaktowalnego ale niezagęszczalnego. Dopiero nawilżenie mieszanki  $e$  pozwala na uzyskanie, po przekroczeniu ciśnienia zagęszczania około 262 MPa, materiału zagęszczalnego i kompaktowalnego zarazem. Zatem w tym przypadku skład ziarnowy jest wprawdzie nie istotny z punktu widzenia kompaktowalności, jednak bez odpowiedniego składu ziarnowego nie da się uzyskać założonej zagęszczalności.

Jeszcze inny przebieg zagęszczalności i kompaktowalności możemy zaobserwować na nomogramie wierzby (rys. 5.27). Nawilżenie mieszanek spowodowało, że uzyskane z nich granule charakteryzowały się również niższą gęstością właściwą  $DE_{k24}$  w porównaniu do granul z mieszanek suchych. Jednak spadek tej gęstości był relatywnie niewielki (w porównaniu do granul z mozgi czy buka). Oba składy ziarnowe (mieszanka  $e$  i bazowa) w przypadku wierzby wykazują podobną reakcję na wzrost wilgotności. Jednak wyraźne różnice w zagęszczalności tych mieszanek w stanie suchym, zależne od składu ziarnowego, powodują, że o ile granule z nawilżonej mieszanki  $e$  uzyskują  $DE_z$  przy ciśnieniu zagęszczalności progowej  $P_z$  wynoszącym około 480 MPa, to tylko granule z nawilżonej mieszanki bazowej uzyskują maksymalną wartość  $DE_{k24}$  (na poziomie około  $920 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Jak można zauważyć na nomogramie (ćwiartka III), wzrost wilgotności obu testowanych mieszanek wpływa pozytywnie na ich kompaktowalność. Podobnie jak w przypadku buka w zakresie niższych wartości badanego ciśnienia, można zaobserwować relatywnie duży wzrost  $DU_{10}$  granul. Dla mieszanki  $e$  wzrost ten jest niewielki, ale występuje. W tym przypadku (inaczej niż dla buka) znaczny wzrost  $DU_{10}$  granul z mieszanki bazowej nie wystarcza by uzyskały one wartości progowej wytrzymałości  $DU_k$ . Zatem aby wytworzone granule mogły uzyskać założony poziom  $DU_k$  nawilżana mieszanka musi mieć skład ziarnowy  $e$ .

W przypadku wierzby skład ziarnowy mieszanki  $e$  pozwala uzyskać  $DU_k$  w całym badanym zakresie ciśnienia, ale  $DE_z$  dopiero przy ciśnieniu około 480 MPa i wtedy materiał może być zakwalifikowany do grupy I. Nawilżana mieszanka bazowa w całym badanym zakresie ciśnienia przynależy do grupy IV.

Warto jeszcze raz podkreślić, że w przypadku wierzby i buka wyższe wartości  $DU_{10}$  uzyskano dla mieszanek o komponowanym składzie ziarnowym, który tworzone przy założeniu, że zostanie uzyskana maksymalnie możliwa gęstość nasypowa, co z kolei przekłada się bezpośrednio na wzrost liczby punktów styku przypadającej na pojedyncze ziarno, a w konsekwencji na całe złoże. Wzrost liczby punktów styku przekłada się bezpośrednio na wzrost wytrzymałości mechanicznej granuli co potwierdziły badania.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5.27. Nomogram mieszanek biomasy wierzby

Porównując wartości  $P_z$  granul wytworzonych z nawilżanej mieszanki  $e$  buka i wierzby możemy stwierdzić, że buk posiada lepszą zagęszczalność –  $P_z \approx 260$  MPa w porównaniu do  $P_z \approx 480$  MPa wierzby. Wartości  $P_k$  znajdują się poza analizowanym zakresem ciśnienia.

W przypadku mozgi, aby uzyskać wymagane wartości  $DE_z$  i  $DU_k$  należałoby podjąć próbę innego sposobu poprawy zagęszczalności i kompaktowalności (wprowadzenie kolejnego czynnika potencjalnie wspomagającego proces ciśnieniowego zagęszczania – wzrost temperatury, dodatek lepiszczy itp.)

Jak wykazano, nawilżenie nie charakteryzuje się uniwersalnym wpływem na proces zagęszczania – każdy z badanych materiałów zareagował w innym stopniu – jest to więc przesłanka do tego, by dla każdego badanego materiału opracowane zostały nomogramy, z których wyznaczony zostanie wpływ czynników determinujących proces. Tylko takie podejście do zagadnienia da wiarygodną odpowiedź na pytanie w jaki sposób dany materiał reaguje na dany czynnik.

## 6. DYSKUSJA

Zaplanowane i przeprowadzone badania oraz analiza uzyskanych wyników pozwoliły na realizację celu głównego, jakim było określenie zagęszczalności i kompaktowalności biomasy badanych gatunków roślin, reprezentujących biomasę lignocelulozową, przeznaczonych do produkcji kompaktowanych biopaliw stałych. Przyjęto, że zagęszczalność biomasy lignocelulozowej, to jej zdolność zwiększania gęstości, w wyniku działania ciśnienia zagęszczania. Natomiast kompaktowalność biomasy lignocelulozowej, to jej zdolność do tworzenia granuli wytrzymałej mechanicznie. Takie określenia powyższych parametrów stosowane są powszechnie w branży farmaceutycznej, chemicznej czy spożywczej w badaniach dotyczących procesu ciśnieniowego zagęszczania (Feng i in., 2007; Ghorri i Conway, 2016; Huang, 2013; Joiris i in., 1998; Sun, 2011; Changquan i in., 2016), ale i w przypadku biomasy te określenia również pojawiają się w literaturze przedmiotu (Janewicz i Kosturkiewicz, 2016; Krstić i in., 2018; Matúš i in., 2014; Quyen i in., 2017; Quyen i Sándor, 2018; Tabil i in., 2011).

W świetle wyników zrealizowanych badań należy stwierdzić, iż hipotezy postawione w celu pracy zostały potwierdzone:

Hipoteza 1 – zagęszczalność i kompaktowalność rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej zależą od jej składu ziarnowego.

Dla trzech badanych materiałów (mozga, buk, wierzba) opracowano i przetestowano pięć składów ziarnowych mieszanek komponowanych, z których wytworzono granule i określono ich zagęszczalność i kompaktowalność w badanym zakresie ciśnienia zagęszczania. Granule uzyskano również z mieszanek bazowych. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że zmiana składu ziarnowego powoduje zmiany zagęszczalności i kompaktowalności danego materiału. Ponadto zmiany te i ich dynamika zależą od rodzaju badanego materiału. Spośród testowanych składów ziarnowych skład mieszanki komponowanej *e* należy uznać za najlepszy – w przypadku wierzby i buka powodował największy wzrost  $DE_{k24}$  i  $DU_{10}$  uzyskanych granul; w przypadku mozgi wartości  $DE_{k24}$  i  $DU_{10}$  były zbliżone do wartości uzyskanych przez granule wytworzone z mieszanki bazowej.

Hipoteza 2 – odpowiedni skład ziarnowy powinien zawierać zarówno cząstki duże tworzące strukturę granuli oraz cząstki drobne pełniące rolę wypełniacza.

Mieszanka *e*, uznana za najlepszą z testowanych, zawiera 33,6% frakcji  $C_1$  (cząstki duże) i 20% frakcji  $C_4$  (cząstki najmniejsze). Wzrost zawartości frakcji  $C_1$  w mieszance powodował pogorszenie zagęszczalności i kompaktowalności.

Hipoteza 3 – maksymalny możliwy udział cząstek dużych w stosunku do udziału cząstek drobnych, pozwala na uzyskanie minimalnej porowatości zewnętrznej złoża.

Spośród badanych mieszanek największą zawartością frakcji  $C_1$  charakteryzowała się mieszanka *a*. Dla biomasy mozgi i wierzby ta właśnie mieszanka uzyskała minimalną wartość porowatości. Wyjątek stanowi mieszanka *a* biomasy buka, która nie uzyskała minimalnej wartości porowatości (uzyskano ją dla mieszanki *c*).

Do określania zagęszczalności i kompaktowalności badanej biomasy zaproponowano nomogramy. Stanowi to nowe, nie stosowane dotąd podejście do opisu procesu zagęszczania biomasy. Pozwalają one określić zagęszczalność i kompaktowalność badanego materiału oraz pozwalają wykazać i określić wpływ poszczególnych czynników jak i interakcji

między nimi na parametry jakościowe (gęstość właściwą i wytrzymałość mechaniczną) uzyskanych granul.

Wprowadzenie do nomogramów wymaganych progowych wartości gęstości właściwej  $DE_z$  i wytrzymałości mechanicznej  $DU_k$  granul umożliwia odczyt ciśnienia zagęszczalności progowej  $P_z$  i kompaktowalności progowej  $P_k$  oraz porównanie tych wartości.

Nomogram z naniesionymi progowymi wartościami  $DE_z$  i  $DU_k$  umożliwia prostą klasyfikację badanych materiałów na IV grupy:

- I – materiał zagęszczalny i kompaktowalny,
- II – materiał zagęszczalny, ale niekompaktowalny,
- III – materiał kompaktowalny, ale niezagęszczalny,
- IV – materiał niezagęszczalny i niekompaktowalny.

Każda zmiana wywołana przez wprowadzenie dodatkowego czynnika determinującego proces zagęszczania uwidacznia się na nomogramie. Widoczny jest zarówno jego wpływ jak i skala tego wpływu na kompaktowalność oraz zagęszczalność. Zatem można klasyfikować czynniki na prozagęszczalne lub prokompaktowalne, ewentualnie poprawiające jedną lub drugą cechę. Miernikiem wpływu danego czynnika na proces zagęszczania ciśnieniowego jest zmiana wartości zagęszczalności i kompaktowalności progowej ( $P_z$  i  $P_k$ ) w stosunku do wartości początkowej (stan przed zastosowaniem czynnika).

Na podstawie metody nomogramowej określono zagęszczalność i kompaktowalność wszystkich badanych materiałów o składzie ziarnowym bazowym oraz dokonano ich klasyfikacji (tab. 5.6). Do grupy I należy dziewięć z badanych gatunków, (sosna, miskant, jodła, grab, ślazier, topola, buk, sylfia i olcha), do grupy II tylko łupiny orzecha i robinia, natomiast do grupy IV aż pięć gatunków, tj.: słonecznik wierzbolistny, mozga, słoma, wierzba i brzoza.

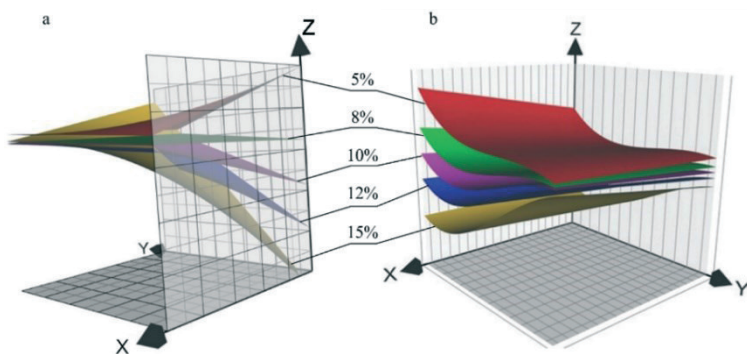
Podobnie postąpiono z mieszkankami komponowanymi oraz nawilżanymi biomasy młodzi, buka i wierzby. Dzięki temu wykazano, że skład ziarnowy (czynnik nie brany dotąd pod uwagę w badaniach procesu zagęszczania biomasy) ma istotny wpływ na zagęszczalność i kompaktowalność. Wielu autorów uważa go za jeden z podstawowych czynników determinujących proces ciśnieniowego zagęszczania (Adapta i in., 2011; Muramatsu i in., 2015; Mani i in., 2006; Relova i in., 2009; Shaw i in., 2009). Jednak w przeważającej większości, w publikacjach, autorzy podają tylko stopień rozdrobnienia surowca. Zazwyczaj zwiększenie rozdrobnienia surowca poprawia parametry jakościowe uzyskanych granul. Potwierdzają to wyniki badań własnych (Mudryk i Wróbel, 2011; Wróbel i in., 2013; Wróbel i in., 2018), jak i innych autorów (Angulo i in., 1996; Jannasch i in., 2001; Kaliyan i Morey, 2009; Mani i in., 2006; Relova i in., 2009; Samson i in., 2000; Serrano i in., 2011; Shaw i in., 2009; Tumulu i in., 2011; Zafari i Kianmehr, 2014; Hill i Pulkinen, 1988; Kaliyan i Morey, 2005; Križan i in., 2015; Matúš i in., 2014). Jednak wyniki badań innych autorów dowodzą, że nie zawsze taka zależność występuje (Bergström i in., 2008; Kirsten i in., 2016). W pracy Kirsten i in. (2016), badano materiał o rozdrobnieniu 6, 4 i 2 mm. Wykazano, że najwyższe wartości gęstości nasypowej uzyskał pelet wytworzony z materiału o rozdrobnieniu 4 mm (rys. 2.33). Co ciekawe, materiał rozdrabniany do takiego samego stopnia rozdrobnienia, ale w różnych urządzeniach rozdrabniających powoduje, że uzyskane pelety charakteryzują się różnymi wartościami  $BD$ . Dzieje się tak dlatego, że rodzaj systemu rozdrabniającego pozwala uzyskać takie samo rozdrobnienie materiału, ale o różnych składach ziarnowych które wpływają na przebieg zagęszczania (rys. 2.32). Payne

(2006) co prawda zasugerował optymalny skład ziarnowy do produkcji jakościowego peletu z biomasy (tab. 2.15) jednak w praktyce nie jest on stosowany.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że skład ziarnowy istotnie wpływa na zagęszczalność i kompaktowalność biomasy. Wykazano, że odpowiedni skład ziarnowy musi zawierać cząstki o większym rozmiarze, które tworzą ośnowę i zwiększają liczbę połączeń kształtowych oraz cząstki drobne, które w tej strukturze wypełniają wolne przestrzenie i tworzą połączenia w punktach kontaktu cząstek.

W przypadku biomasy buka i wierzy jednoznacznie wykazano, że odpowiedni skład ziarnowy mieszanek komponowanych pozwolił uzyskać progowe wartości  $DE_z$  i  $DU_k$ , przy znacząco niższych wartościach  $P_z$  i  $P_k$  niż dla mieszanek bazowych. Jest to istotne z punktu widzenia procesu brykietowania. W przypadku peletowania może to mieć mniejsze znaczenie, ponieważ rolki zagęszczające i właczające materiał do kanałów matrycy w pewnym stopniu dodatkowo rozdrabniają materiał, zmieniając jego skład ziarnowy. W procesie brykietowania ciśnienie zagęszczania jest z reguły niższe niż w przypadku peletowania, zatem obniżenie wartości  $P_z$  i  $P_k$  pozwalające jednocześnie na uzyskanie zakładanej wartości gęstości właściwej i wytrzymałości brykietu, będące efektem odpowiedniego składu ziarnowego jest w tym procesie niezwykle istotne. W wielu przypadkach, w zależności od zastosowanego w brykietciarkach rozwiązania technicznego, dawka zagęszczanego materiału regulowana jest objętością komory wstępnego zagęszczania. Zatem im materiał wsadowy ma wyższą gęstość nasypową (efekt odpowiedniego składu ziarnowego), tym zagęszczana dawka jest większa – zwiększa to finalnie długość pojedynczego brykietu i jednocześnie wydajność procesu brykietowania.

W przypadku wilgotności, przeprowadzone badania wykazały, że jej wzrost w przeważającej większości powodował spadek wartości  $DE_{k24}$  uzyskanych granuli, co znajduje również potwierdzenie w danych literaturowych. Wykres na rysunku 5.28 (Križan i in., 2015), obrazuje zmianę gęstości brykietów (oś Z) wytworzonych z biomasy sosny i dębu w zależności od ciśnienia (oś X) i temperatury (oś Y) zagęszczania.



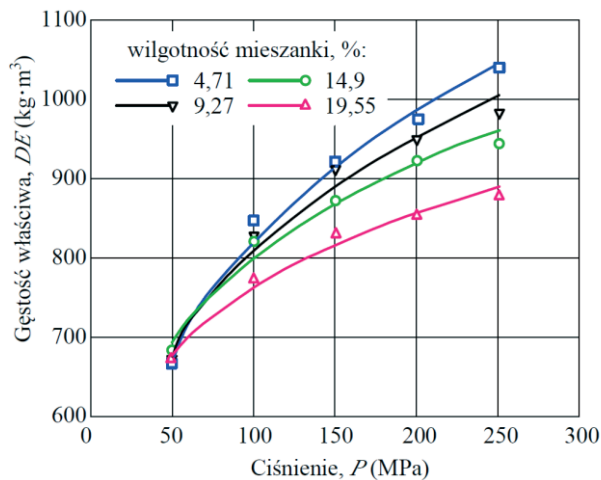
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Križan i in., 2015)

Rys. 5.28. Wykres powierzchniowy gęstości właściwej brykietów wytworzonych z biomasy: a – sosny, b – dębu, stopień rozdrobnienia materiału – 2 mm, oś X – ciśnienie zagęszczania (MPa), oś Y – temperatura zagęszczania ( $^{\circ}\text{C}$ ), oś Z – gęstość DE brykietu ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), wilgotność surowca – 5%, 8%, 10%, 12%, 15%,



Poszczególne powierzchnie reprezentują materiał o różnej wilgotności z zakresu od 5 do 15%. Zarówno dla sosny jak i dębu, w początkowym zakresie temperatury (55°C), wartość gęstości właściwej brykiету spada wraz ze wzrostem wilgotności.

Podobną zależność zaobserwowano dla brykietów z biomasy buka (Quyen i in., 2017). Wraz ze wzrostem wilgotności z poziomu 4,7 do 19,5% gęstość właściwa uzyskanych brykietów spada (rys 5.29). Względny spadek gęstości właściwej zależy od wartości ciśnienia zagęszczania. Badania procesu wytwarzania peletu z biomasy świerka wskazują na podobne zależności (Rhén i in., 2005). Podobne badania przeprowadzone dla biomasy akacji wyniosłej i lodyg tytoniu wykazały jednak odwrotną zależność (Obidziński i in., 2017; Quyen i Sándor, 2018). Oznacza to, że rodzaj materiału ma wpływ na to, jak wilgotność wpływać będzie na zmianę gęstości właściwej.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Quyen i in., 2017)

Rys. 5.29. Przebieg zmian gęstości właściwej w zależności od ciśnienia zagęszczania dla biomasy buka o różnej wilgotności

Najprawdopodobniej jest to spowodowane sprężystością, która najczęściej wzrasta w momencie nawilżenia materiału (do pewnej granicznej wilgotności, po osiągnięciu której w materiale zaczynają dominować cechy plastyczne). Częstki materiału suchego łatwiej ulegają pękaniu pod wpływem ciśnienia, a cząstki nawilżone raczej się odkształcają. Po ustaniu ciśnienia zagęszczającego materiał wilgotny ma zatem większą tendencję do rozprężania wywołanego właściwościami sprężystymi cząstek.

W przypadku kompaktowalności wpływ wzrostu wilgotności był dwójaki. W przypadku mozgi powodował pogorszenie kompaktowalności a w przypadku buka i wierzby wywoływał efekt odwrotny. Wzrost wytrzymałości mechanicznej wywołany wzrostem wilgotności w materiale związany jest, jak wykazano w przeglądzie literatury, z aktywowaniem przez wodę większości typów połączeń na styku ziarno – ziarno. Występuje tu zatem interakcja pomiędzy aktywowaniem przez wilgoć właściwości sprężystych cząstek

i połączeń między nimi. Jeśli zatem wzrost wilgotności powoduje silny wzrost sprężystości, to powstające pomiędzy ziarnami mostki są zbyt słabe, lub są niszczone i granulata charakteryzuje się niską wytrzymałością mechaniczną – taki przypadek zaobserwowano dla mozgi. Jeśli jednak wzrasta sprężystość cząstek a jednocześnie powstaje pomiędzy nimi duża liczba silnych mostków, prowadzi to w efekcie końcowym do wzrostu wytrzymałości mechanicznej powstającej granulaty – taką sytuację zaobserwowano dla biomasy buka i wierzy.

Ponadto wykazano, że wilgotność materiału (uważana za czynnik dominujący w procesie zagęszczania) nie niweluje pozytywnego wpływu składu ziarnowego.

Co więcej wykazano, że bez odpowiedniego składu ziarnowego, samo nawilżenie biomasy nie pozwala na uzyskanie progowych wartości gęstości właściwej i wytrzymałości mechanicznej wytworzonych granulaty (biomasa wierzbowa). Z praktycznego punktu widzenia oznacza to, że w wielu przypadkach odpowiedni skład ziarnowy (łatwy do uzyskania przy niewielkich nakładach), wraz z wilgotnością, powinien wystarczyć do uzyskania wysokiej jakości granulaty. Natomiast bez odpowiedniego składu ziarnowego należy wprowadzać inne czynniki, np. wzrost temperatury procesu, który wiąże się ze zwiększonymi nakładami, a w niektórych przypadkach jest niewskazany (np. aglomeracja ciśnieniowa ziół).

Analiza procesu na bazie nomogramów sprawdziła się w badaniach w skali laboratoryjnej. Jednak może być również przydatna w skali przemysłowej, nawet w przypadku, gdy nie znamy ciśnienia zagęszczania. Taka sytuacja ma miejsce np. w badaniach procesu peletowania, gdzie trudno określić wartość ciśnienia zagęszczania. Można jednak oznaczyć gęstość właściwą i wytrzymałość mechaniczną uzyskanych peletów. Pozwoli to na umiejscowienie badanego peletu w jednej ze stref na II ćwiartce nomogramu (zakwalifikowanie peletu do jednej z czterech grup). Zmieniając warunki procesu peletowania (materiał, lepiszcze, skład ziarnowy itp.) i ponownie oznaczając  $DE$  i  $DU$  uzyskanego peletu określamy jego przynależność do danej strefy. Wystąpienie różnicy względem próbki poprzedniej określa czy zmiana warunków procesu powoduje pozytywną zmianę zagęszczalności lub kompaktowalności albo obu cech jednocześnie. Wskazuje, jak na dany czynnik reaguje jakość wytwarzanego peletu i czy zachodzą interakcje pomiędzy czynnikami (wpływ czynników może np. się niwelować lub wzmacniać). Wpływ wszystkich zmian w parametrach procesu będzie miał odzwierciedlenie na II ćwiartce nomogramu.

W zawiązku z powyższymi, opracowana i sprawdzona w pracy metoda określania zagęszczalności i kompaktowalności na bazie nomogramów, stanowić może uniwersalne narzędzie do analizy procesu zagęszczania zarówno biomasy jak i innych materiałów.

Ze względu na zróżnicowanie materiału badawczego, zarówno pod względem parametrów wejściowych (gęstość nasypowa, właściwa i bezwzględna, współczynniki wypełnienia, skład ziarnowy mieszanek bazowych) jak i zagęszczalności i kompaktowalności, nie podjęto próby opracowania modelu zagęszczania biomasy. Lepszym i bardziej uniwersalnym rozwiązaniem wydaje się opracowanie nomogramów dla danego rodzaju biomasy, uwzględniających wpływ danego czynnika na konkretny rodzaj granulatu z biomasy. Związane jest to z faktem, że w zależności od badanej biomasy, czynnik ten może mieć różny wpływ na proces zagęszczania.

Podobna niejednoznaczność w zależności od rodzaju biomasy może mieć miejsce w przypadku interakcji pomiędzy czynnikami. Ujęcie tak dużej zmienności jest trudne, a nawet niemożliwe w jednym ogólnym modelu.

Na potrzeby badań opracowano również zmodyfikowaną metodę oceny wytrzymałości mechanicznej pojedynczych granul, bazującą na normatywnej metodzie oceny wytrzymałości mechanicznej peletów, wytwarzanych z przeznaczeniem na cele opałowe (PN-EN ISO 17831-1). Metoda ta uwzględnia te same czynniki niszczące pelet jakieg występują podczas operacji logistycznych związanych z transportem, przeładunkiem i składowaniem. Zrezygnowano z testu brazylijskiego, którego wyniki uzyskiwane dla pojedynczych granul trudno porównać do wytrzymałości peletu w masie.

Na potrzeby badań opracowano ponadto sposób komponowania mieszanek z frakcji wymiarowych danej biomasy. Możliwe jest wtedy uzyskiwanie zakładanej cechy – maksymalizacja wartości gęstości nasypowej mieszanki przy maksymalnej możliwej zawartości frakcji wymiarowo największej.

Opracowanie metody nomogramowej określania zagęszczalności i kompaktowalności, zmodyfikowanej metody oznaczania trwałości mechanicznej pojedynczych granul oraz metody komponowania składu ziarnowego należy zaliczyć do metodycznych osiągnięć pracy.

## 7. WNIOSKI

Na podstawie zrealizowanego toku badań i przeprowadzonej analizy uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Zagęszczalność i kompaktowalność biomasy lignocelulozowej można określić za pomocą metody nomogramowej opracowanej na potrzeby pracy, która pozwala uwzględnić wpływ wszystkich czynników wpływających na proces ciśnieniowego zagęszczania biomasy.
2. Biomassę lignocelulozową pod względem zagęszczalności i kompaktowalności można podzielić na IV grupy, tj.: I – biomasa zagęszczalna i kompaktowalna, II – biomasa zagęszczalna, ale niekompaktowalna, III – biomasa kompaktowalna, ale niezagęszczalna i IV – biomasa niezagęszczalna i niekompaktowalna.
3. Miernikiem zagęszczalności jest wartość ciśnienia zagęszczalności progowej, przy której wytworzona granula uzyskuje progową wartość gęstości właściwej.
4. Miernikiem kompaktowalności jest wartość ciśnienia kompaktowalności progowej, przy której wytworzona granula uzyskuje progową wartość wytrzymałości mechanicznej. W większości badanych przypadków wartość ciśnienia zagęszczalności progowej jest większa od wartości ciśnienia kompaktowalności progowej co oznacza, że wymaganą dla tych materiałów kompaktowalność można osiągnąć przy niższym ciśnieniu niż dla wymaganej zagęszczalności.
5. Swoiste cechy materiału (gęstość, porowatość, geometria, chropowatość cząstek, itp.), na które w większości przypadków nie mamy wpływu i których oddziaływanie jest trudne do określenia, w sposób znaczący wpływają na jego zagęszczalność i kompaktowalność. Powoduje to, że dla każdego rodzaju biomasy powinno się określić jej potencjał zagęszczalności i kompaktowalności, a dopiero w dalszej kolejności wpływ innych parametrów, którymi możemy w pewnym zakresie sterować i dostosowywać do specyfiki materiału.
6. W większości badanych przypadków nawilżenie materiału powoduje spadek wartości gęstości właściwej uzyskanych granul (w porównaniu do granul wytworzonych z materiału w stanie suchym).
7. W zależności od rodzaju biomasy nawilżenie materiału powoduje spadek wartości wytrzymałości mechanicznej uzyskanych granul (mozga) lub jej wzrost (buk, wierzba) w odniesieniu do granul wytworzonych z materiału w stanie suchym.
8. Skład ziarnowy rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej zagęszczanej ciśnieniowo wpływa na jej zagęszczalność i kompaktowalność. Zmiana składu ziarnowego mieszanek, w każdym badanym przypadku powodowała zmiany przebiegu krzywych zagęszczalności i kompaktowalności. W przypadku mozgi większość testowanych składów ziarnowych pogarszała jej zagęszczalność i kompaktowalność natomiast w przypadku buka i wierzby sytuacja była odwrotna – większość testowanych składów poprawiała te parametry.
9. Najlepszym składem ziarnowym charakteryzuje się mieszanka komponowana  $e$  o zawartości frakcji  $C_1 = 33,6\%$ ;  $C_2 = 14,4\%$ ;  $C_3 = 32\%$ ;  $C_4 = 20\%$ . Skład ten nie pokrywa się z żadnym składem ziarnowym badanych rodzajów biomasy, uzyskanym w wyniku procesu przygotowania materiału do badań. Najprawdopodobniej więc, taki skład nie

będzie możliwy do uzyskania w praktyce. Proces przygotowania surowca do kompaktowania powinien być zatem zmodyfikowany przez dodanie etapu rozdzielania uzyskanej w wyniku rozdrabniania mieszanki bazowej na frakcje wymiarowe i etapu tworzenia mieszanki komponowanej.

10. Gęstość nasypowa  $BD$  poszczególnych frakcji wymiarowych  $C$  spada wraz z spadkiem wielkości ziarna frakcji.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Abdoli, M. A., Golzary, A., Hosseini, A., Sadeghi, P. (2018). *Wood Pellet as a Renewable Source of Energy From Production to Consumption*. Springer.
- Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G. (2009). Compression characteristics of selected ground agricultural biomass. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*, 11, 1347. Online: <http://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1347>. Dostęp 12.12.2018.
- Adapta, P., Tabil, L. G., Schoenau, G. (2011). A Comprehensive Analysis of the Factors Affecting Densification of Barley, Canola, Oat and Wheat Straw Grinds. In *The Canadian Society for Bioengineering Annual Conference* (p. Paper No. CSBE11-513).
- Al-Hashimi, N., Begg, N., Alany, R. G., Hassanin, H., Elshaer, A. (2018). Oral modified release multiple-unit particulate systems: Compressed pellets, microparticles and nanoparticles. *Pharmaceutics*. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10040176>
- Amidon, G. E., Meyer, P. J., Mudie, D. M. (2016). Particle, powder, and compact characterization. In *Developing Solid Oral Dosage Forms: Pharmaceutical Theory and Practice: Second Edition* (pp. 271–293). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802447-8.00010-8>
- Angulo, E., Brufau, J., Esteve-Garcia, E. (1996). Effect of a sepiolite product on pellet durability in pig diets differing in particle size and in broiler starter and finisher diets. *Animal Feed Science and Technology*, 63(1–4), 25–34. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(96\)01036-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01036-X)
- Aziz, M. G., Yusof, Y. A., Blanchard, C., Saifullah, M., Farahnaky, A., Scheiling, G. (2018). Material Properties and Tableting of Fruit Powders. *Food Engineering Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9175-0>
- Bacher, C., Olsen, P. M., Bertelsen, P., Kristensen, J., Sonnergaard, J. M. (2007). Improving the compaction properties of roller compacted calcium carbonate. *International Journal of Pharmaceutics*, 342(1–2), 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.05.007>
- Bajpai, P. (2016). *Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production*. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6>
- Berent-Kowalska, G. (2018). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2017r*. Warszawa.
- Berent-Kowalska, G., Kacprowska, J., Moskal, I., Piwko, D., Jurgaś, A. (2017). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2016r*. Warszawa.
- Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S. A., Gref, R., Boman, C., Wästerlund, I. (2008). Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1324–1329. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>
- Berna, F., Goldberg, P., Horwitz, L. K., Brink, J., Holt, S., Bamford, M., Chazan, M. (2012). Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(20), E1215–20. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117620109>
- Berry, S. L., Roderick, M. L. (2005). Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168(1), 25–37. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01528.x>
- Boerjan, W., Ralph, J., Baucher, M. (2003). Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 54(1), 519–546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>
- Bohne, B., Dietze, P. (2008). *Rośliny trujące: 170 gatunków roślin ozdobnych i dziko rosnących*. Warszawa: Bellona.
- Bulk density and tapped density of powders (2.9.34). (2017). In *European Pharmacopoeia v.9*. European Pharmacopoeia Commission, Council of Europe European Directorate for the Quality of Medicines (EDQM).
- Bursa, S. (1979). *Chemia fizyczna* (Wyd. 2). Warszawa: PWN.

- Chabannes, M., Ruel, K., Yoshinaga, A., Chabbert, B., Jauneau, A., Joseleau, J.-P., Boudet, A.-M. (2001). In situ analysis of lignins in transgenic tobacco reveals a differential impact of individual transformations on the spatial patterns of lignin deposition at the cellular and subcellular levels. *The Plant Journal*, 28(3), 271–282. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2001.01159.x>
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Traband, L., D., W. (1983). *Fire in forestry - vol.I. Forest fire behavior and effects*. New York: John Wiley & Sons.
- Chantreau, M., Chabbert, B., Billiard, S., Hawkins, S., Neutelings, G. (2015). Functional analyses of cellulose synthase genes in flax (*Linum usitatissimum*) by virus-induced gene silencing. *Plant Biotechnology Journal*, 13(9), 1312–1324. <https://doi.org/10.1111/pbi.12350>
- Cherney, J. H., Johnson, K. D., Volenec, J. J., Anliker, K. S. (1988). Chemical composition of herbaceous grass and legume species grown for maximum biomass production. *Biomass*, 17, 215–238. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0144456588901059> Dostęp 12.12.2018.
- Demirbaş, A. (2017). Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39(6), 592–598. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798>
- Demirbaş, A. (2003). Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources*, 25(7), 629–635. <https://doi.org/10.1080/00908310390212336>
- Demirbaş, A. (2005). Estimating of structural composition of wood and non-wood biomass samples. *Energy Sources*, 27(8), 761–767. <https://doi.org/10.1080/00908310490450971>
- Donev, A., Cisse, I., Sachs, D., Variano, E. A., Stillinger, F. H., Connelly, R., Chaikin, P. M. (2004). Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids. *Science*, 303(5660), 990–993. <https://doi.org/10.1126/science.1093010>
- Donev, A., Stillinger, F. H., Chaikin, P. M., Torquato, S. (2004). Unusually dense crystal packings of ellipsoids. *Physical Review Letters*, 92(25), 255506. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.255506>
- Drogoszewski, B., Kocjan, H., Urbański, K. (2000). Ocena stanu 25-letnich upraw plantacyjnych brzozy brodawkowatej i modrzewia polskiego założonych w różnych więźbach. *Roczniki AR Poznań. Leśnictwo*, 326(38), 11–26.
- Drzymala, J. (2001). *Podstawy metalurgii*. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
- Dworecki, Z., Adamski, M., Fiszer, A., Łoboda, M. (2012). Analiza porównawcza kosztów energii zawartej w paliwach, na podstawie ich cen. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(2), 60–64.
- Dziurzyński, A. (2003). *Zależności między wybranymi właściwościami fizycznymi drewna sosny i buka a zawartością jego strukturalnych składników chemicznych*. Poznań: Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.
- El Bassam, N. (1998). *Energy Plant Species*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315073699>
- Faber, A., Kuś, J., Matyka, M. (2009). *Uprawa roślin na cele energetyczne*. (J. Kuś, Ed.). Warszawa: W&B Wiesław Drzewiński.
- Feng, Y., Grant, D. J. W., Sun, C. C. (2007). Influence of crystal structure on the tableting properties of n-alkyl 4-hydroxybenzoate esters (parabens). *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 96(12), 3324–3333. <https://doi.org/10.1002/jps.20981>
- Fernandes, A. N., Thomas, L. H., Altaner, C. M., Callow, P., Forsyth, V. T., Apperley, D. C., Jarvis, M. C. (2011). Nanostructure of cellulose microfibrils in spruce wood. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(47), E1195–203. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108942108>
- Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., Høibø, O. (2011). The effect of bark content on quality parameters



- of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3342-3349. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.09.011>
- Frączek, J. (Ed.). (2010).** *Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowych wytwarzanych z roślin energetycznych*. Kraków: PTIR.
- Frączek, J. (2010).** Rozwój i technologie produkcji biopaliw stałych. In J. Frączek (Ed.), *Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne*. Kraków: PTIR.
- Frączek, J., Mudryk, K. (2007).** Metoda pomiaru energochłonności procesu zrębkowania pędów wierzb. *Inżynieria Rolnicza*, 95(7), 47–53.
- Frączek, J., Mudryk, K. (2009).** Wpływ wilgotności rozdrabnianych pędów wierzb *Salix viminalis* L. na skład granulometryczny uzyskiwanych zrębków. *Acta Agrophysica*, 14, 49–60.
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2009).** Klon jesionolistny *Acer negundo* L. - Nowy potencjalny gatunek energetyczny. *Acta Agrophysica*, 14(2), 313–322.
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2011a).** Rożnik przerośnięty *silphium perfoliatum* L. - źródło biomasy do produkcji biopaliw stałych. *Inżynieria Rolnicza*, 131(6).
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2011b).** Wybrane właściwości fizyko-mechaniczne topinamburu *helianthus tuberosus* L. *Inżynieria Rolnicza*, 131(6).
- Frączek, J., Wróbel, M. (2006).** Metodyczne aspekty oceny kształtu nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 87(12), 155–163.
- Franke, M., Rey, A. (2006).** Improving Pellet Quality and Efficiency. *Feed Technology*, 10(3), 12–15.
- Friedrich, W. (1978).** Das palletieren von Mischfutter-Grundlagen und Einflussgrößen des Pressprozesses und Wirkung auf die Nährstoffe. *Aufbereitungs--Technik*, 19(9), 401–406.
- Frühwirth, P., Graf, A., Humer, M., Hunger, F., Köppl, H., Liebhard, P., Tumfart, K. (2006).** *Miscanthus sinensis* "Giganteus". *Chinaschilf als nachwachsender Rohstoff. Anbau, Inhaltsstoffe, Kosten, Heiztechnik*. Wien: Landwirtschaftskammer Österreich.
- Fuwape, J. (1989).** Gross heat of combustion of Gmelina (*Gmelina arborea* (Roxb)) chemical components. *Biomass*, 19(4), 281–287.
- Gendarz, P., Salamon, S., Chwastyk, P. (2014).** *Projektowanie inżynierskie i grafika inżynierska*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Ghori, M. U., Conway, B. (2016).** Powder Compaction: Compression Properties of Cellulose Ethers. *British Journal of Pharmacy*, 1, 19–29. <https://doi.org/10.5920/bjpharm.2016.09>
- Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V., Swithenbank, J. (2009).** Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, 88(8), 1491–1497. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>
- Gindl, W., Grabner, M., Wimmer, R. (2000).** The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees*, 14(7), 409–414. <https://doi.org/10.1007/s004680000057>
- Govin, A., Repelin, V., Guyonnet, R., Rolland, M., Duplan, J.-L. (2009).** Effect of torrefaction on grinding energy requirement for thin wood particle production. *Récents Progrès En Génie Des Procédés*, 98(756), 1–6. Online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00462339/> Dostęp 13.12.2018.
- Grochowicz, J. (1996).** *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. Warszawa: PWRiL.
- Günther, B., Gebauer, K., Barkowski, R., Rosenthal, M., Bues, C. T. (2012).** Calorific value of selected wood species and wood products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 755–757. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0613-z>
- Hahn, B. (2004).** *Existing guidelines and quality assurance for fuel pellets*. St. Poelten Austria: UMBERA.
- Heckel, R. W. (1961).** Density-Pressure Relationships in Powder Compaction. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 221, 671–675.



- Hejft, R. (2002).** *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. Białystok: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji.
- Helińska-Raczkowska, L. (1999).** *Leksykon nauki o drewnie*. Poznań: Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.
- Hersey, J. A., Rees, J. E. (1975).** Deformation of Particles during Briquetting. *Nature Physical Science*, 230, 96.
- Hiestand, H. E. N., Smith, D. P. (1984).** Indices of Tableting Performance. *Powder Technology*, 38, 145–159.
- Hill, B., Pulkinen, D. A. (1988).** *A study of the factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets*. Saskatchewan, Canada: Saskatchewan Dehydrators Association.
- Hooper, D., Clarke, F. C. (2016).** A Modern Approach to the Heckel Equation: The Effect of Compaction Pressure on the Yield Pressure of Ibuprofen and its Sodium Salt. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 7(3). <https://doi.org/10.4172/2157-7439.1000381>
- Horvath, B., Peralta, P., Frazier, C., Peszlen, I. M. (2011).** Thermal Softening of Transgenic Aspen. *BioResources*, 6(2), 2125–2134. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.2125-2134>
- Hu, Q., Shao, J., Yang, H., Yao, D., Wang, X., Chen, H. (2015).** Effects of binders on the properties of bio-char pellets. *Applied Energy*, 157, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.019>
- Huang, Y. (2013).** *Biofuel pellets made at low moisture content – influence of water in the binding mechanism of densified biomass*. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Jamroży, Z. (2003).** *Beton i jego technologie*. Warszawa: PWN.
- Janewicz, A., Kosturkiewicz, B. (2016).** Analysis of compressibility and compactibility of lignite and biomass mixture powder. *Przemysł Chemiczny*, 95(8), 1482–1484.
- Jankowska, A., Kozakiewicz, P. (2016).** Determination of fibre saturation point of selected tropical wood species using different methods. *Drewno*, 59(197), 89–97. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.C07.12>
- Jannasch, R., Quan, Y., Samson, R. (2001).** *A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass - Final Report*.
- Jia, X., Gan, M., Williams, R. A., Rhodes, D. (2007).** Validation of a digital packing algorithm in predicting powder packing densities. *Powder Technology*, 174(1–2), 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.10.013>
- Jin, W., Jiao, Y., Liu, L., Yuan, Y., Li, S. (2017).** Dense crystalline packings of ellipsoids. *Physical Review E*, 95(3). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.033003>
- Jindra, V. (1984).** *Mechanické pochody*. Bratislava: Publishing House SVST.
- Joiris, E., Martino, P. Di, Berneron, C., Guyot-Hermann, A. M., Guyoy, J. C. (1998).** Compression Behavior of Orthorhombic Paracetamol. *Pharmaceutical Research*, 15(7), 1122–1130.
- Juliszewski, T., Kwaśniewski, D., Mudryk, K., Wróbel, M. (2012).** Ocena wybranych parametrów biomasy pozyskanej z plantacji drzew szybko rosnących. *Inżynieria Rolnicza*, 136(2), 89–97.
- Junior, C. S., Milagres, A. M. F., Ferraz, A., Carvalho, W. (2013).** The effects of lignin removal and drying on the porosity and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Cellulose*, 20(6), 3165–3177. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0032-2>
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2010).** Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3), 1082–1090. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2005).** *Densification of corn stover* (No. ASAE paper no. 056134).
- Kaliyan, N., Vance Morey, R. (2009).** Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005>

- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (2009). *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren* (2nd ed.). Berlin: Springer.
- Karbowiczak, A., Hamerska, J., Wróbel, M., Jewiarz, M., Nęcka, K. (2018). Evaluation of Selected Species of Woody Plants in Terms of Suitability for Energy Production. In K. Mudryk & S. Werle (Eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer Proceedings in Energy ICORES 2017* (pp. 735–742). Springer Proceedings in Energy. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_72)
- Karbowiczak, A., Wróbel, M., Rymar, J. (2015). Optymalizacja składu mieszanki biomasy rożnika i słonecznika wierzbołistnego na potrzeby procesu aglomeracji. *Episteme*, 26(1), 255–263.
- Katz, J. M., Buckner, I. S. (2017). Full Out-of-Die Compressibility and Compactibility Profiles From Two Tablets. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 106(3), 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2016.11.005>
- Kawakita, K., Ludde, K. H. (1971). Some considerations on powder compression equations. *Powder Technology*, 4(2), 61–68.
- Muramatsu, K., Massuquetto, A., Dahlke, F., Maiorka, A., (2015). Factors that Affect Pellet Quality: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 5(9). <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H. W., Repke, J. U. (2013). Alternative solid biofuels production of high quality mixed pellets from hay and digestate. In *Proceedings of the 21th European Biomass Conference and Exhibition* (pp. 1350–1354). Copenhagen Denmark.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H. W., Repke, J. U. (2016). Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*, 148, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013>
- Klassien, P. W., Griszajew, I. G. (1989). *Podstawy techniki granulacji*. Warszawa: WNT.
- Knox, J. P. (2008). Revealing the structural and functional diversity of plant cell walls. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(3), 308–313. <https://doi.org/10.1016/J.PBI.2008.03.001>
- Kollmann, F. P., Côté, W. A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology I. Solid Wood*. Berlin-Heidelberg-New York.
- Kossakowski, A., Latocha, C., Idzik, J., Spisak, W., Franek, J. (1999). *Lepiszczce do brykietowania i sposób jego wytwarzania Patent NR 175692*. Urząd Patentowy RP Polska.
- Krauss, A., Krauss, H., Waliszewska, B., Piatek, J. (2011). Selected environmental aspects of the introduction into the polish market of exotic wood species on the example of caviuna (*Machaerium scleroxylon* Tul.). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 18(2), 345–349. R
- Križan, P. (2015). *The Densification Process of Wood Waste*. Warsaw/Berlin: De Gruyter Open Ltd.
- Križan, P., Matuš, M., Šooš, L., Beniak, J. (2015). Behavior of beech sawdust during densification into a solid biofuel. *Energies*, 8(7), 6382–6398. <https://doi.org/10.3390/en8076382>
- Križan, P., Šooš, L., Matuš, M., Beniak, J., Svátek, M. (2015). Research of significant densification parameters influence on final briquettes quality. *Wood Research*, 60(2), 301–316.
- Krstic, M., Maksimovic, Z., Ibric, S., Bakic, T., Prodanovic, J., Razic, S. (2018). Lignocellulosic Biomass as a Source of Microcrystalline Cellulose - Chemical and Technological Characterization and Future Perspectives. *Cellulose Chem. Technol* (Vol. 52).
- Krzyśik, F. (1961). Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna. *Ochrona Zabytków*, 14(1–2), 50–65.
- Krzyśik, F. (1975). *Nauka o drewnie*. Warszawa: PWN.
- Kumar, M., Gupta, R. C., Sharma, T. (1992). Effects of Carbonisation Conditions on the Yield and Chemical Composition of Acacia and Eucalyptus. *Biomass and Bioenergy*, 3(6), 411–417. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(92\)90037-Q](https://doi.org/10.1016/0961-9534(92)90037-Q)

- Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., Mohan, S. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. *Journal of Forestry Research*, 21(4), 514–516. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>
- Kuokkanen, M., Vilppo, T., Kuokkanen, T., Stoor, T., Niinimäki, J. (2011). Additives in wood pellet production - A pilot-scale study of binding agent usage. *BioResources*, 6(4), 4331–4355. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.4331-4355>
- Kwaśniewski, D., Mudryk, K., Wróbel, M. (2010). Trawy i byliny. In J. Frączek (Ed.), *Produkcja biomasy na cele energetyczne*. Kraków: PTIR.
- Lehmann, B., Schröder, H. W., Wollenberg, R., Repke, J. U. (2012). Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 44, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.009>
- Leuenberger, H., Rohera, B. D. (1986). Fundamentals of Powder Compression. I. The Compactibility and Compressibility of Pharmaceutical Powders. *Pharmaceutical Research*, 3(1), 12–22.
- Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. Pergamon. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
- Li, J. W., An, X. Z. (2017). Double-action Die Compaction of Fe-Al Composite Powder-A Study by MPFEM Simulation. In *3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering* (pp. 119–128). Atlantis Press. Online: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/ame-17/25876445> Dostęp 12.12.2018.
- Li, S. M., Wei, M. H., Li, S. W., Li, Z. Y., Li, Y. H., Han, Y. C., Li, Y. F. (2014). Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb-Zn-Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications. *Geology in China*, 41(2), 529–539. <https://doi.org/10.1021/ie200862n>
- Li, S. X., Zhao, J., Lu, P., Xie, Y. (2010). Maximum packing densities of basic 3D objects. *Chinese Science Bulletin*, 55(2), 114–119. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0650-0>
- Li, W., Amos, K., Li, M., Pu, Y., Debolt, S., Ragauskas, A. J., Shi, J. (2018). Fractionation and characterization of lignin streams from unique high-lignin content endocarp feedstocks. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 304. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1305-7>
- Magali, E. M. (2006). *Structure and properties of cellulose/NaOH aqueous solutions, gels and regenerated objects*. Ecole des mines de Paris.
- Mahmoodi, F., Klevan, I., Nordström, J., Alderborn, G., Frenning, G. (2013). A comparison between two powder compaction parameters of plasticity: The effective medium  $\mu$  parameter and the Heckel  $1/K$  parameter. *International Journal of Pharmaceutics*, 453(2), 295–299. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.06.040>
- Majtkowska, G., Majtkowski, W. (2007). *Trawy ozdobne*. Warszawa: Wydawnictwo Działkowicz.
- Majtkowski, W. (2007). Rośliny energetyczne napaliwo stałe. *Wieś Jutra*, 16–18.
- Mallick, S. (2014). Rearrangement of particle and compactibility, tabletability and compressibility of pharmaceutical powder: A rational approach. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 73(1), 51–56. Online: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/25427> Dostęp 23.12.2018.
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2003). An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling and Processing*, 15(2), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2007.00533.x>
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2004). Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie Des Biosystems Au Canada*, 46. Retrieved from <http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/47/c0404.pdf>
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654.

- Mansa, R. F., Bridson, R. H., Greenwood, R. W., Barker, H., Seville, J. P. K. (2008). Using intelligent software to predict the effects of formulation and processing parameters on roller compaction. *Powder Technology*, 181(2), 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.02.011>
- Matúš, M., Križan, P., Kováčová, M., Beniák, J. (2014). The influence of size fraction on the compressibility of pine sawdust and the effectiveness criterion for densification. *Acta Polytechnica*, 54(1), 52–58. <https://doi.org/10.14311/AP.2014.54.0052>
- Mendu, V., Harman-Ware, A. E., Crocker, M., Jae, J., Stork, J., Morton, S., Debolt, S. (2011). Identification and thermochemical analysis of high-lignin feedstocks for biofuel and biochemical production. *Biotechnology for Biofuels*, 4(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-43>
- Meng, L., Jiao, Y., Li, S. (2016). Maximally dense random packings of spherocylinders. *Powder Technology*, 292, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.036>
- Minerich, P. L., Labuza, T. P. (2003). Development of a pressure indicator for high hydrostatic pressure processing of foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(3), 235–243. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00023-7)
- Mohsenin, N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials. Physical properties of plant and animal materials*. <https://doi.org/10.1124/mol.105.016220.marker>
- Mottiar, Y., Vanholme, R., Boerjan, W., Ralph, J., Mansfield, S. D. (2016). Designer lignins: Harnessing the plasticity of lignification. *Current Opinion in Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.10.009>
- Mudryk, K. (2010). Mielenie - rozdrabnianie końcowe. In J. Frączek (Ed.), *Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowych wytwarzanych z roślin energetycznych*. Kraków: PTIR.
- Mudryk, K., Frączek, J., Šlípek, Z., Francik, S., Wróbel, M. (2013). Chosen physico-mechanical properties of cutleaf coneflower (*Rudbeckia laciniata* L.) shoots. In *Engineering for Rural Development*. Jelgava. Online: [http://tf.llu.lv/conference/proceedings2013/Papers/122\\_Mudryk\\_K.pdf](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2013/Papers/122_Mudryk_K.pdf) Dostęp 14.12.2018.
- Mudryk, K., Wróbel, M. (2010). Właściwości fizyczne. In J. Frączek (Ed.), *Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowych wytwarzanych z roślin energetycznych*. Kraków: PTIR.
- Mudryk, K., Wróbel, M. (2011). Briquetting and quality of Virginia mallow biomass briquettes. In W. Piekarski (Ed.), *The acquisition and processing of biomass of Virginia mallow for energy purposes*. Warszawa.
- Murakami, H., Yoneyama, T., Nakajima, K., Kobayashi, M. (2001). Compressibility and compactibility of granules produced by wet and dry granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 216(1–2), 69–74. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517308001270> Dostęp 18.01.2019.
- Newton, J. M., Rowley, G., Fell, J. T. (1972). The Tensile Strength of Deep Concave tablets. *Journal of Pharmacy*, 24, 503.
- Niemczyk, M., Kaliszewski, A., Jewiarz, M., Wróbel, M., Mudryk, K. (2018). Productivity and biomass characteristics of selected poplar (*Populus* spp.) cultivars under the climatic conditions of northern Poland. *Biomass and Bioenergy*, 111, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.002>
- Nordström, J., Klevan, I., Alderborn, G. (2012). A protocol for the classification of powder compression characteristics. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 80(1), 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2011.09.006>
- Nowakowska, J., Borecki, T., S., M., Stępień, S., Zielony, R. (1993). Ocena plantacji szybko rosnących gatunków drzew leśnych w Leśnym Zakładzie doświadczalnym w Rogowie. *Sylwan*, 137(1), 43–51.
- Obidziński, S., Joka, M., Luto, E., Bieńczyk, A. (2017). Research of the densification process of post-harvest tobacco waste. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 62(1), 149–154.

- Odeku, O. A. (2016). The Compaction of Pharmaceutical Powders. *Pharmaceutical Information*, (4), 1–17.
- Pach, M., Kolodziej, Z., Bartkiewicz, L., Karczmarski, J. (2010). Zakładanie i utrzymanie plantacji. Rośliny drzewiaste. In J. Frączek (Ed.), *Produkcja biomasy na cele energetyczne*. Kraków: PTIR.
- Pauly, M., Gille, S., Liu, L., Mansoori, N., de Souza, A., Schultink, A., Xiong, G. (2013). Hemicellulose biosynthesis. *Planta*, 238(4), 627–642. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-1921-1>
- Payne, J. D. (2006). *Troubleshooting the pelleting process In: Feed technology technical report series*. Singapore.
- Peciar, P., Eckert, M., Fekete, R., Hrnčiar, V. (2016). Analysis of Pharmaceutical Excipient MCC Avicel PH102 Using Compaction Equations. *Strojnícky Casopis – Journal of Mechanical Engineering*, 66(1). <https://doi.org/10.1515/scjme-2016-0012>
- Peng, J. H., Bi, X. T., Sokhansanj, S., Lim, C. J. (2013). Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, 111, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.048>
- Phanphanich, M., Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Pietsch, W. (2002). *Agglomeration processes. Phenomena, Technologies, Equipment*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Pitt, K. G., Newton, J. M., Richardson, R., Stanley, P. (1989). The Material Tensile Strength of Convex-faced Aspirin Tablets. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 41, 289–292.
- PN-EN ISO 16559:2014-09 *Biopaliwa stałe -- Terminologia, definicje i określenia*.
- PN-EN ISO 17225-1:2014-07 *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 1: Wymagania ogólne*.
- PN-EN ISO 17225-2:2014-07 *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 2: Pelety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych*.
- PN-EN ISO 17225-3:2014-07 *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 3: Brykiety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych*.
- PN-EN ISO 17225-6:2014-08 *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 6: Pelety nie drzewne do zastosowań nieprzemysłowych*.
- PN-EN ISO 17225-7:2014-08 *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 7: Brykiety nie drzewne do zastosowań nieprzemysłowych*.
- PN-EN ISO 17827-1 *Biopaliwa stałe -- Oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych -- Część 1: Metoda przesiewania oscylacyjnego przy użyciu sit o wymiarach oczka 3,15 mm lub większych*.
- PN-EN ISO 17827-2 *Biopaliwa stałe -- Oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych -- Część 2: Metoda przesiewania wibracyjnego przy użyciu sit o wymiarach oczka 3,15 mm lub poniżej*.
- PN-EN ISO 17831-1:2016-02 *Biopaliwa stałe -- Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej peletów i brykietów -- Część 1: Pelety*.
- PN-EN ISO 17831-2:2016-02 *Biopaliwa stałe -- Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej peletów i brykietów -- Część 2: Brykiety*.
- PN-EN ISO 18134-3:2015-11 *Biopaliwa stałe -- Oznaczanie zawartości wilgoci -- Metoda suszarkowa -- Część 3: Wilgoć w próbce do analizy ogólnej*.
- PN-EN ISO 7971-3:2010 *Ziarno zbóż -- Oznaczanie gęstości w stanie zsypanym, zwanej masą hektolitra -- Część 3: Metoda rutynowa*.
- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujun, S., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A., Khanam, M. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.061>



- Popescu, I. N., Vidu, R. (2018). Compaction Behaviour Modelling of Metal-Ceramic Powder Mixtures. A Review. *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, 16(14), 28–37. <https://doi.org/10.1515/bsmm-2018-0006>
- Popper, Z. A., Michel, G., Hervé, C., Domozych, D. S., Willats, W. G., Tuohy, M. G., Stengel, D. B. (2011). Evolution and Diversity of Plant Cell Walls: From Algae to Flowering Plants. *Annual Review of Plant Biology*. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103809>
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1997). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda a.s.
- Prosiński, S. (1984). *Chemia drewna*. Warszawa: PWRiL.
- Przybysz, K. (2005). Klasyfikacja wody zawartej w papierniczych masach włóknistych i wytworach papierniczych. *Przegląd Papierniczy*, 61, 41–44.
- Quyen, T. Van, Nagy, S., Csóke, B.-. (2017). Effect of moisture content and particle size on beech biomass agglomeration. *Advances in Agriculture & Botany*, 9(2), 79–89.
- Quyen, T. Van, Sándor, N. (2018). Agglomeration of Acacia Mangium Biomass. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56(2), 198. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/56/2/9293>
- Rédei, K., Veperdi, I. (2018). The role of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in establishment of short-rotation energy plantations in Hungary. *International Journal of Horticultural Science*, 15(3). <https://doi.org/10.31421/ijhs/15/3/832>
- Relova, I., Vignote, S., Leon, M. A., Ambrosio, Y. (2009). Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. *Biomass and Bioenergy*, 33(10), 1351–1357. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.005>
- Repellin, V., Govin, A., Rolland, M., Guyonnet, R. (2010). Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 923–930. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.039>
- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., Wästerlund, I. (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of NorwaRhén, C., Gref, R., Sjöström, M., & Wästerlund, I. (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some. *Fuel Processing Technology*, 87(1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.03.003>
- Robbins, M. P., Evans, G., Valentine, J., Donnison, I. S., Allison, G. G. (2012). New opportunities for the exploitation of energy crops by thermochemical conversion in northern Europe and the UK. *Progress in Energy and Combustion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2011.08.001>
- Rumpf, H. (1962). The Strength of Granules and Agglomerates. *Agglomeration, Interscience*, 379–413.
- Rumpf, H. (1977). Particle Adhesion, Some Fundamental Aspects of the Selective Agglomeratin of Fine Coal. *Agglomeration*, 97–129.
- Samson, R., Duxbury, P., Drisdelle, M., Lapointe, C. (2000). *Assessment of pelletized biofuels*. Online: [http://www.reap-canada.com/online\\_library/Reports%20and%20Newsletters/Bioenergy/15%20Assessment%20of.PDF](http://www.reap-canada.com/online_library/Reports%20and%20Newsletters/Bioenergy/15%20Assessment%20of.PDF);
- Sanginés, P., Domínguez, M. P., Sánchez, F., San Miguel, G. (2015). Slow pyrolysis of olive stones in a rotary kiln: Chemical and energy characterization of solid, gas, and condensable products. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(4), 043103. <https://doi.org/10.1063/1.4923442>
- Šantl, M., Ilić, I., Vrečer, F., Baumgartner, S. (2011). A compressibility and compactibility study of real tableting mixtures. *International Journal of Pharmaceutics*, 414(1–2), 131–139. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037851731100439X>
- Sarbak, Z. (2000). *Adsorpcja i adsorbenty: Teoria i zastosowanie*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Scaar, C. (1988). *Wood-Water Relations*. Springer-Verlag.

- Schaller, F. M., Neudecker, M., Saadatfar, M., Delaney, G. W., Schröder-Turk, G. E., Schröter, M. (2015). Local origin of global contact numbers in frictional ellipsoid packings. *Physical Review Letters*, 114(15), 158001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.158001>
- Seneta, W., & Dolatowski, J. (2008). *Dendrologia*. Warszawa: PWN.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>
- Shapiro, I. (1971). Compaction of powders 10. Development of a general compaction equation. *Adv Powder Metall Particle Mater*, 3, 229–243.
- Shaw, D. M., Karunakaran, C., Tabil, G. L. (2009). Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystems Engineering*, 2(103), 198–207. Online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511009000671> Dostęp 17.12.2018.
- Sitzmann, W., Buschhart, A. (2009). *Pelleting as prerequisite for the energetic utilization of byproducts of the wood-processing industry*. Oslo: Amandus Kahl GmbH & Co.
- Skonecki, S., Kulig, R., Lysiak, G. (2014). Models of pressure compaction and their application for wheat meal. *International Agrophysics*, 28(1), 125–130. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0035>
- Somerville, C. (2006). Cellulose Synthesis in Higher Plants. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 22(1), 53–78. <https://doi.org/10.1146/annurev.cellbio.22.022206.160206>
- Song, Y., Tumuluru, J., Iroba, K. L., Tabil, L. G., Xin, M., Meda, V. (2010). Material and Operating Variables Affecting the Physical Quality of Biomass Briquettes. In *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*.
- Sonnergaard, J. M. (2006). Quantification of the compactibility of pharmaceutical powders. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 63(3), 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2005.10.012>
- Sorek, N., Yeats, T. H., Szemenyei, H., Youngs, H., Somerville, C. (2014). The implications of lignocellulosic biomass chemical composition for the production of advanced biofuels. *BioScience*, 64(3), 192–201. Retrieved from <https://academic.oup.com/bioscience/article-abstract/64/3/192/224641>
- Stahl, M., Berghel, J. (2011). Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. *Biomass and Bioenergy*, 35(12), 4849–4854. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.003>
- Stamm, A. J. (1928). Density of Wood Substance, Adsorption by Wood, and Permeability of Wood. *The Journal of Physical Chemistry*, 33(3), 398–414. <https://doi.org/10.1021/j150297a008>
- Stanley, P., Newton, J. M. (1980). The Tensile Fracture Stress of Capsule-shaped Tablets. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 32, 852–854.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2011). A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 910–918. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization – a review. *BioResources*, 7(3), 4451–4490. <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.4451-4490>
- Sun, C. C. (2011). Decoding powder tabletability: Roles of particle adhesion and plasticity. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(4–5), 483–499. <https://doi.org/10.1163/016942410X525678>
- Sun, C. C., Kleinebudde, P. (2016). Mini review: Mechanisms to the loss of tabletability by dry granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.04.003>

- Sun, C., Grant, D. J. W. (2001). Influence of elastic deformation of particles on Heckel analysis. *Pharmaceutical Development and Technology*, 6(2), 193–200. <https://doi.org/10.1081/PDT-100000738>
- Szczukowski, S., Tworkowski, J., Stolarski, M., Kwiatkowski, J., Krzyżaniak, M., Lajszner, W., Graban, L. (2012). *Wieloletnie rośliny energetyczne*. Warszawa: MULTICO Oficyna Wydawnicza.
- Szweykowska, A., Szweykowski, J. (2006). *Botanika Tom. Systematyka*. Warszawa: PWN.
- Tabil, L., Adapta, P., Kashaninejad, M. (2011). Biomass Feedstock Pre-Processing – Part 2: Densification. In M. A. D. S. Bernardes (Ed.), *Biofuel's Engineering Process Technology*. InTech.
- Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (1997). Bulk properties of alfalfa grind in relation to its compaction characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*, 13(4), 499–505. <https://doi.org/10.13031/2013.21618>
- Tillman, D. (1978). *Wood as an energy resource*. New York: Academic Press.
- Tumuluru, J. (2019). Effect of Moisture Content and Hammer Mill Screen Size on the Briquetting Characteristics of Woody and Herbaceous Biomass. *KONA Powder and Particle*. Retrieved from [https://www.jstage.jst.go.jp/article/kona/advpub/0/advpub\\_2019009/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kona/advpub/0/advpub_2019009/_article/-char/ja/)
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
- Turner, R. (1995). Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Management*, 46, 30–33.
- van Dam, J. E. . G., van den Oever, M. J. A., Teunissen, W., Keijsers, E. R. P., Peralta, A. G. (2004). Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk: Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. *Industrial Crops and Products*, 19(3), 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.003>
- Vo, L. T. T., Navard, P. (2016). Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125>
- Waliszewska, B., Zborowska, M., Pradzyński, W., Kominek, A. (2006). Chemical composition and gross calorific value of selected *Salix* hybrids. *Wood Structure and Properties*, 171–173.
- Waliszewska, B., Zborowska, M., Pradzyński, W., Robaszyńska, M. (2006). Chemical composition of selected species of exotic trees. In *Wood structure and properties*, 167–169.
- Wamukonya, L., Jenkins, B. (1995). Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass and Bioenergy*, 8(3), 175–179. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00016-Z](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00016-Z)
- Węgorzek, T. (2003). Drzewa. In B. Kościk (Ed.), *Rośliny energetyczne* (pp. 45–55). Lublin: Wydawnictwo AR w Lublinie.
- Welker, C., Balasubramanian, V., Petti, C., Rai, K., DeBolt, S., Mendu, V., Mendu, V. (2015). Engineering Plant Biomass Lignin Content and Composition for Biofuels and Bioproducts. *Engines*, 8(8), 7654–7676. <https://doi.org/10.3390/en8087654>
- Wenghoefer, V. C. (2014). *Entwicklung einer optimierten Produktion von Miscanthus-Mischpellets für Kleinfeuerungsanlagen*. Rheinischen Friedrich- Wilhelms- Universität.
- White, R. H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science*, 19(4), 446–452. <https://doi.org/10.1039/C5PY00656B>
- Wihan, J. (2007). Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. *MSc. University of East London School* (Vol. 44). Online: [https://www.enertech.fr/pdf/45/humidite\\_murs\\_paille.pdf](https://www.enertech.fr/pdf/45/humidite_murs_paille.pdf) Dostęp 11.12.2018.
- Wilen, C., Moilanen, A., Kurkela, E. (1996). *Biomass feedstock analyses*. Technical Research Center of Finland
- Wilson, K., Lee, A. F. (2016). Catalyst design for biorefining. *Philosophical Transactions of the*



- Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0081>
- Wojda, T., Klisz, M., Mionskowski, M. (2014).** Robinia akacyjowa w Polsce – obca, ekspansywna ale nie bez wartości! *Notatnik Naukowy*, 96(1).
- Wróbel, M. (2006).** *Pomiar liczby punktów styku oraz pola powierzchni kontaktu między nasionami*. Praca doktorska. Akademia Rolnicza im. Hugona Kołłątaja w Krakowie.
- Wróbel, M. (2010).** Peletowanie. In J. Frączek (Ed.), *Optimalizacja procesu produkcji paliw kompaktowych wytwarzanych z roślin energetycznych*. Kraków: PTIR.
- Wróbel, M., Frączek, J., Francik, S., Ślipek, Z., Mudryk, K. (2013).** Influence of degree of fragmentation on chosen quality parameters of briquette made from biomass of cup plant *Silphium perfoliatum* L. In *Engineering for Rural Development*. Jelgava. Online: [http://tf.llu.lv/conference/proceedings2013/Papers/121\\_Wrobel\\_M.pdf](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2013/Papers/121_Wrobel_M.pdf) Dostęp: 17.12.2018
- Wróbel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Glowacki, S., Tulej, W. (2018).** Characterization of Selected Plant Species in Terms of Energetic Use. In K. Mudryk & S. Werle (Eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer Proceedings in Energy ICORES 2017* (pp. 671–681). Springer Proceedings in Energy. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_66)
- Wróbel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Knapczyk, A. (2018).** Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. In *Engineering for Rural Development* (pp. 1933–1938). Jelgava. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N542>
- www.foodpol-service.com.** Online: <http://foodpol-service.com/> Dostęp 13.12.2018.
- www.microlabgallery.com.** Online: <http://www.microlabgallery.com/WoodSectionFile.aspx> Dostęp 17.12.2018.
- www.wikiwand.com.** Online: <http://www.wikiwand.com/en/Hardwood> Dostęp 19.12.2018.
- York, P., Pilpel, N. (1972).** The effect of temperature on the mechanical properties of some pharmaceutical powders in relation to tableting. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 24.
- Zafari, A., Kianmehr, M. H. (2014).** Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 35(4), 478–486. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.833639>
- Zajączkowski, K. (2003).** Plantacyjna uprawa drzew i krzewów na terenach porolnych. In S. Zając & W. Gil (Eds.), *Zalesienia w Europie. Doświadczenia i zamierzenia* (pp. 226–239). Warszawa: IBL.
- Zajączkowski, K., Zajączkowski, J. (2013).** *Hodowla lasu. Tom 4. Plantacje drzew szybko rosnących. Zadrzewienia*. Warszawa: PWRiL.
- Zajączkowski, K., Zalewski, A. (2007).** Wytyczne zakładania i prowadzenia plantacyjnych upraw leśnych gatunków drzew szybko rosnących. *Instytut Badawczy Lesnictwa*.
- Zajemska, M., Musiał, D. (2013).** Energetyczne wykorzystanie biomasy z produkcji rolniczej w procesie współspalania. *Problems of Agricultural Engineering*, 82(4), 107–118.
- Zethræus, B. (2012).** The Bioenergy System Planners Handbook - BISYPLAN Chapter 04. Online: <http://bisypplan.bioenarea.eu/html-files-en/02-02.html> Dostęp: 12.12.2018.
- Zydlík, P., Zydlík, Z. (2016).** Horticultural ecological crops in Poland – the dynamics of changes and perspectives for development. *Nauka Przyroda Technologie*, 10(2). <https://doi.org/10.17306/J.NPT.2016.2.25>

## STRESZCZENIE

Prezentowana praca jest pierwszym opracowaniem dotyczącym kompleksowego określenia zagęszczalności i kompaktowalności biomasy lignocelulozowej. Pojęcia zagęszczalność i kompaktowalność stosowane są w przemyśle chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym czy też paszowym. Terminologia ta natomiast praktycznie w ogóle nie pojawia się w przypadku biomasy lignocelulozowej mimo, że w najlepszy sposób może określać jej predyspozycje do produkcji biopaliw stałych. Do określania tej predyspozycji zaproponowano autorską metodę nomogramową. Jest to nowe, dotąd nie stosowane, podejście do opisu procesu zagęszczania biomasy. Metoda pozwala na znalezienie i przedstawienie zależności pomiędzy ciśnieniem zagęszczania a gęstością właściwą i wytrzymałością mechaniczną uzyskanej granuli. Przedstawienie tych zależności w formie nomogramu pozwala w łatwy sposób, dla danego rodzaju biomasy, określić wartość ciśnienia pozwalającą na uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych.

W pracy określono zagęszczalność i kompaktowalność bazową szesnastu rodzajów badanej biomasy. Dobór oparto na źródle pochodzenia biomasy (wg. PN-EN ISO 17225-1) jak i systematyce botanicznej. Przyjęte progowe wartości gęstości właściwej i wytrzymałości mechanicznej umożliwiają klasyfikację badanych materiałów na IV grupy.

Potwierdzono również, metodą nomogramową, że skład ziarnowy zagęszczanego materiału biomasowego ma istotny wpływ na jego zagęszczalność i kompaktowalność. Wykazano, że stosując tę metodę, można określić wpływ każdego czynnika determinującego proces zagęszczania. Na nomogramie widoczny jest wtedy zarówno wpływ czynnika jak i skala tego wpływu, co pozwala klasyfikować czynniki na prozagęszczalne, prokompaktowalne lub poprawiające jedną lub drugą cechę. Miernikiem wpływu danego czynnika na proces zagęszczania ciśnieniowego, jest zmiana wartości ciśnienia zagęszczalności i kompaktowalności progowej w stosunku do jego wartości początkowej.

Opracowano zmodyfikowaną metodę oceny wytrzymałości mechanicznej granul, bazującą na normatywnej metodzie oceny wytrzymałości mechanicznej peletów. Ponadto opracowano metodę komponowania mieszanek z frakcji wymiarowych, pozwalającą na uzyskiwanie zakładanych jej cech tj: maksymalizacja gęstości nasypowej mieszanki przy maksymalnej możliwej zawartości frakcji wymiarowo największej.

Zaproponowany opis zagęszczalności i kompaktowalności może znaleźć szerokie zastosowanie zarówno w laboratoryjnych jak i przemysłowych badaniach, jako uniwersalne narzędzie analizy procesu zagęszczania biomasy, ale i innych surowców. Pozwala określić w/w parametry w sposób jakościowy (klasyfikacja surowca) oraz ilościowy (wartości progowego ciśnienia zagęszczalności i kompaktowalności).

**Słowa kluczowe:** zagęszczalność, kompaktowalność, biomasa, lignoceluloza, biopaliwa

# LIGNOCELLULOSIC BIOMASS COMPRESSIBILITY AND COMPACTIBILITY

## Summary

The presented work is the first study on the comprehensive determination of compactability and compressibility of lignocellulosic biomass. Compaction and compressibility concepts are used in the chemical, food, pharmaceutical or feed industries. This terminology very rarely is used in the case of lignocellulosic biomass, even though it may best determine its predisposition to the production of solid biofuels. To determine this tendency, the original nomogram method was proposed by author. This is a new and never used before approach to describe the process of biomass compaction. The method allows finding and presenting the relationship between the compaction pressure, specific density and mechanical durability of the obtained agglomerates. Presenting these correlations in the form of a nomogram makes it easy to determine the pressure value, for a given type of biomass, that allows to obtain the required quality parameters of the product.

The paper specifies the compactability and compressibility of the basic sixteen types of biomass. The selection of the materials was based on the source of biomass (according to PN-EN ISO 17225-1) as well as plant systematics. The boundary values of specific density and mechanical strength make it possible to classify the tested materials into four groups.

It was also confirmed by the nomogram method that the grain size distribution of the compacted biomass material has a significant impact on its compactability and compressibility. It has been shown that by using this method, the influence of each factor determining the compaction process can be determined. The nomogram shows both the influence of the factor and the scale of this influence, which allows to classify factors for pro-compacting, pro-compressibilizing or improving one or other of the features. The measure of the impact of a given factor on the process of pressure compaction is the change in the value of compactability and compressibility of the threshold in relation to its initial value.

A modified method for assessing the mechanical durability of compacts was developed, based on the normative method for assessing the mechanical durability of pellets. In addition, a method of composing mixtures with dimensional fractions was developed, allowing to obtain assumed features, i.e.: maximizing the bulk density of the mixture at the maximum possible content of the dimensionally largest fraction.

The proposed description of compactability and compressibility may be widely used in both laboratory and industrial research as a universal tool for analyzing the process of biomass compaction, as well as other raw materials. It allows to specify the aforementioned qualitative (raw material classification) and quantitative (threshold values of compactability and compressibility) parameters.

**Key words:** compactability, compressibility, biomass, lignocellulose, biofuels