

WPŁYW WILGOTNOŚCI ROZDRABNIANYCH
PĘDÓW WIERZBY *SALIX VIMINALIS* L. NA SKŁAD
GRANULOMETRYCZNY UZYSKIWANYCH ZRĘBKÓW

Jarosław Frączek, Krzysztof Mudryk

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 120, 30-149 Kraków
e-mail: fraczek@ar.krakow.pl

Streszczenie. Celem pracy było określenie wpływu zmian wilgotności rozdrobnionych pędów wierzby *Salix viminalis* L. na skład granulometryczny uzyskiwanych zrębków. Materiał do badań pozyskiwany był z plantacji wierzby położonej przy Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki. Przeprowadzone badania wskazują, iż wraz ze wzrostem wilgotności zrębkowanych pędów wzrasta udział frakcji zrębków dłuższych. Analizując wyniki badań oraz wymogi jakościowe stawianych zrębkom opałowym, można stwierdzić, że optymalna wilgotność zrębkowanych pędów, powinna wynosić poniżej 30%.

Słowa kluczowe: skład granulometryczny, biomasa, wierzba

WSTĘP

Wierzba *Salix viminalis* L. źródłem biomasy

Względy ekonomiczne, a przede wszystkim troska o środowisko naturalne sprawiają, że biomasa jako paliwo tzw. odnawialne jest w coraz większym stopniu wykorzystywana w produkcji energii. Należy też podkreślić znaczący wzrost liczby badań naukowych dotyczących technologii przetwarzania oraz procesów produkcji energii z biomasy. Najczęściej jej źródłem są tereny leśne, rolnicze oraz utrzymywane komunalnie (parki, deptaki itp.) (Dreszer i in. 2003). Według wielu prognoz, w celu zwiększenia ilości biomasy wykorzystywanej na potrzeby energetyczne niezbędne jest prowadzenie upraw celowych roślin tzw. energetycznych.

Do najbardziej popularnych roślin wykorzystywanych w uprawach energetycznych w Polsce, należy zaliczyć wierzbę *Salix viminalis* L. Jej uprawa prze-

biega w cyklach 3 lub 4 letnich, a zebrana biomasa może stanowić paliwo zarówno do bezpośredniego spalania jak i do produkcji paliw kompaktowanych.

W Polsce, zebrana masa wierzbowa najczęściej przeznaczana jest do bezpośredniego spalania w formie zrębków. W układach małej mocy (indywidualnych) zrębki spalane są w specjalnych, zautomatyzowanych kotłach. Możliwe jest wówczas okresowe napełnianie zbiornika zasypowego, z którego następnie paliwo podawane jest do paleniska za pomocą przenośników. W układach przemysłowych – gdzie spalana jest większość produkowanej biomasy wierzbowej – najczęściej zrębki mieszane są z miałem węglowym, w udziale do 20% (Kubica 2003a i 2003b, Popowicz 2003).

Aby możliwe było stosowanie zrębków (nie tylko wierzbowych) w nowoczesnych systemach grzewczych, zarówno indywidualnych jak i przemysłowych, niezbędne jest spełnienie wymogów jakościowych. Zautomatyzowane systemy kotłowe, wyposażone w sterowane układy transportowe, wymagają tego aby stosowane paliwo miało określone, powtarzalne właściwości fizykochemiczne oraz geometryczne. Wielkość cząstek paliwa, określana jako skład granulometryczny, w największym stopniu odpowiada za niezawodną pracę urządzeń. Zbyt wielkie cząstki mogą powodować zapychanie, zawieszanie się paliwa w urządzeniach.

W świetle istniejących regulacji prawnych dotyczących zrębków drzewnych-opałowych oraz wymogów stosowanych przez energetykę zawodową, dla tego typu paliw zdefiniowana jest tylko maksymalna długość frakcji głównej (90%), która nie powinna przekraczać 40mm. Tak stosunkowo niewielkie wymagania stawiane zrębkom opałowym, w praktyce prowadzą niejednokrotnie do obniżenia wartości handlowej biopaliwa, a nawet niedopuszczenie jego do spalania. Powodów tej sytuacji można dopatrywać się w braku odpowiedniej wiedzy producentów zrębków opałowych na temat parametrów jakościowych oraz wykorzystywanie materiałów organicznych pochodzących z różnych gałęzi przemysłu, gdzie są traktowane jako odpad (często zawierając wówczas zanieczyszczenia pogarszające jakość biopaliwa). Sytuacja ta z czasem się poprawi, dzięki coraz częstszemu stosowaniu przez odbiorców biomasy energetycznej (elektrociepłownie, producenci paliw kompaktowanych) rygorystycznych wymogów jakościowych oraz pojawianiu się na rynku wysokiej jakości urządzeń specjalistycznych do pozyskiwania zrębków opałowych.

W Polsce, jednym z większych źródeł biomasy na cele energetyczne są plantacje roślin energetycznych. Są one sukcesywnie zwiększane i prowadzone na coraz to wyższym poziomie. Jedną z pierwszych roślin wprowadzonych do upraw energetycznych jest wierzba *Salix viminalis* L. Znalazła ona dużą popularność wśród producentów biomasy i do chwili obecnej jest rośliną energetyczną najbardziej popularną w warunkach polskich.

Biorąc pod uwagę wielkość plantacji, przeznaczenie zebranej masy (dla własnych potrzeb, dla zakładów przemysłowych itp.), jak również lokalizację na terenie kraju

można zauważyć, że technologie produkcji zrębków są mocno zróżnicowane. Najczęściej mamy do czynienia z technologiami jednoetapowymi z wykorzystaniem maszyn do pozyskania zielonek paszowych (duże gospodarstwa, wielkoobszarowe), oraz z wieloetapowymi, w których stosuje się zbiór ręczny z wykorzystaniem pił mechanicznych (małe gospodarstwa rolne, niewielkie plantacje). Biorąc pod uwagę dynamikę zmian właściwości fizycznych wierzby (np. wilgotność w przedziale 50-20%) można stwierdzić, że procesowi rozdrabniania, który ma największy wpływ na jakość uzyskiwanych zrębków, poddawany jest materiał o różnych właściwościach fizycznych. Właściwości te niejednokrotnie determinują ustawienia parametrów roboczych urządzeń przetwarzających, a nawet decydują o stosowanym zespole roboczym (np. tarczowy, bębnowy czy ślimakowy).

Badania prowadzone w USA wykazały, że do zrębkowania pędów wierzby najbardziej wskazany jest system bębnowy (Forest Research 1998). W porównaniu z pozostałymi (tarczowy, ślimakowy) zapewnia on łatwiejszą regulację długości zrębków, a uzyskana rozdrobniona masa charakteryzuje się największą jednorodnością wymiarową cząstek.

Na parametry jakościowe uzyskiwanych zrębków, jak już wcześniej wspomniano, oprócz stosowanych systemów technicznych mają duży wpływ właściwości fizyczne materiału. Do najważniejszych możemy zaliczyć wilgotność materiału. Decyduje ona bowiem o wielu właściwościach fizycznych, a w szczególności mechanicznych materiału, które wpływają bezpośrednio na przebieg procesu rozdrabniania. W zależności od stosowanej technologii (jedno lub wieloetapowa) wilgotność pędów wierzby najczęściej zawiera się w przedziale 50-20%.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy było określenie wpływu wilgotności pędów wierzby *Salix viminalis* L. na skład granulometryczny uzyskiwanych zrębków.

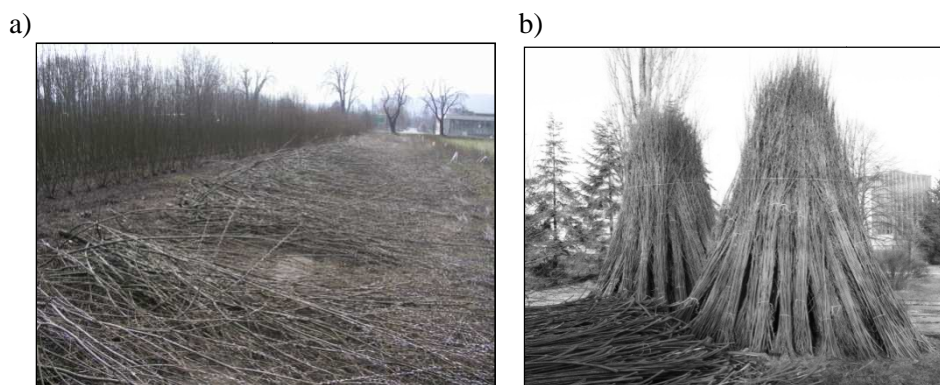
Dla osiągnięcia założonego celu praca była realizowana była w trzech etapach:

- przeprowadzenie procesu rozdrabniania pędów wierzby o wilgotności z przedziału 50-18% (długość cięcia – 30 mm),
- określenie składu granulometrycznego otrzymanych zrębków, dla następujących grup wymiarowych:
 - 0-10 mm,
 - 10-30 mm,
 - 30-50 mm,
 - 50-70 mm,
 - 70-90 mm,
 - > 90 mm,
- analiza wpływu wilgotności pędów na skład granulometryczny zrębków.

METODYKA

Materiał do badań

Materiał do badań pozyskiwany był z plantacji wierzby energetycznej *Salix viminalis* L. położonej przy Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki (fot. 1a). Wierzba uprawiana jest w systemie rzędowym (szerokość międzyrzędzia 75cm, rozstaw roślin w rzędzie 50 cm). Zbiór wierzby odbywał się przy użyciu piły mechanicznej od listopada do marca. Tak zebrane pędy formowane były w wiązki i transportowane do miejsca sezonowania (fot. 1b), gdzie następowało naturalne obniżenie wilgotności.

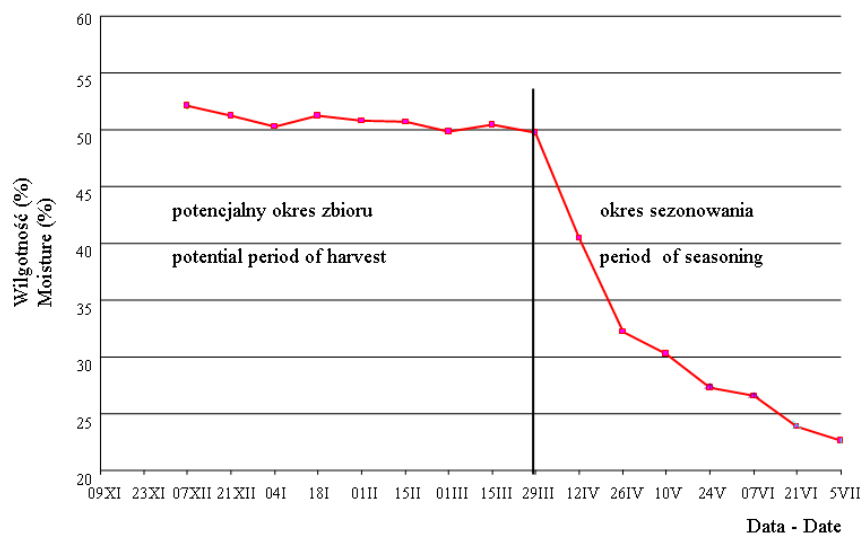


Fot. 1. Materiał badawczy: a – plantacja wierzby, b – sezonowane pędy
Photo. 1. The investigated material: a – willow plantation, b – willow stems in seasoning

Oznaczenie wilgotności pędów

Wilgotność pędów określona była metodą suszarkową według normy PN-77/D-04100 oraz procedury opracowanej przez Frączka i in. (2006). Do oznaczania wilgotności pobierano po 6 pędów z miejsca sezonowania. Były to pędy nieuszkodzone, wolne od widocznych wad i zniekształceń. Badania prowadzone były w odstępach 14-dniowych przez cały okres sezonowania, tj. od listopada do czerwca. Zmiany wilgotności sezonowanych pędów wierzby zostały przedstawione na rysunku 1.

Analizując proces sezonowania pędów zauważono, iż pędy zebrane jesienią, w okresie zimowym (do 15 III) nieznacznie zmniejszyły swą wilgotność z 52,5% do około 50%. W okresie wiosenno-letnim odnotowano większą dynamikę zmian wilgotności. Pod koniec kwietnia wilgotność sezonowanych pędów spadła poniżej 35%, a na przełomie czerwca i lipca osiągnęła wartość poniżej 25%.



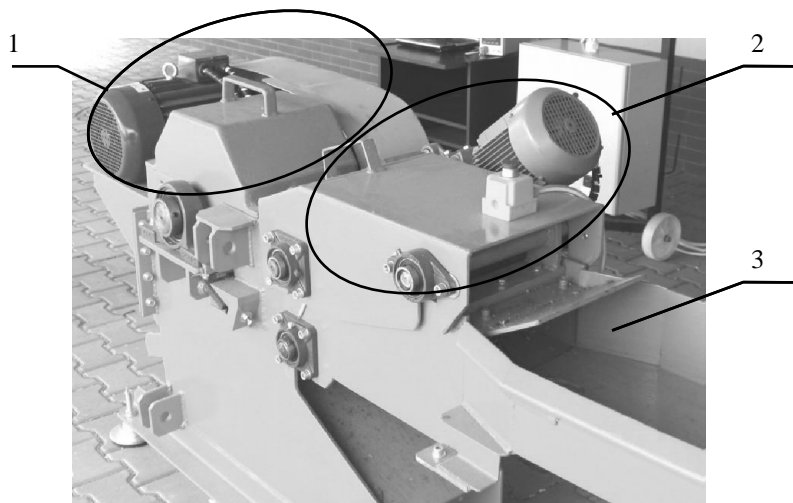
Rys. 1. Dynamika zmian wilgotności pędów wierzby w okresie sezonowania (w latach 2007/2008)
Fig. 1. Dynamics of changes in moisture level of the chipped stems of willow in the seasoning period (in years 2007/2008)

Proces sezonowania przeprowadzony w okresie wiosennym, obejmujący około 4 miesiące, przynosi zadowalający efekt - wilgotność pędów zebranych w okresie zimowym spada poniżej 23%. W świetle powyższych spostrzeżeń wybór terminu zbioru wierzby powinien być podyktowany jedynie warunkami agrotechnicznymi lub innymi i dostępności maszyn przy założeniu, że ścięcie pędów nastąpi do końca marca, a okres sezonowania będzie przebiegał przez minimum 4 kolejne miesiące.

Biorąc pod uwagę wyniki procesu sezonowania pędów można stwierdzić, że ta forma suszenia jest bardzo efektywna. Uwzględniając brak nakładów energetycznych, można uznać, że jej stosowanie jest najbardziej uzasadnioną ekonomicznie.

Rozdrabnianie pędów

Kolejnym etapem badań było rozdrabnianie sezonowanych pędów. Proces ten prowadzony był dla 5-ciu poziomów wilgotności z przedziału 50-18%. Rozdrabnianie prowadzone było na specjalnym stanowisku, które jest na wyposażeniu Katedry Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki (fot. 2) zgodnie z metodyką opracowaną przez autorów (Frączek, Mudryk 2007a). Urządzenie to umożliwia zmianę długości cięcia materiału w przedziale od 0,5 do 5 cm, oraz daje możliwość określania nakładów energetycznych w tym procesie.



Fot. 2. Stanowisko do rozdrabniania materiałów roślinnych, 1 – bębnowy system rozdrabniania, 2 – rolkowy układ podający, 3 – rynna układu podającego

Photo. 2. Station for plant materials chipping, 1 – drum-type chipping system, 2 – roller-type feed system, 3 – trough of the feed system

Oznaczenie składu granulometrycznego

W dalszej kolejności przeprowadzono oznaczenie składu granulometrycznego zrębków uzyskanych w procesie rozdrabniania. Polegała ona na dokonaniu klasyfikacji wymiarowej zrębków (wg. najdłuższego wymiaru cząstki) i określeniu udziałów masowych w poszczególnych grupach (Malczewski 1994). Metodyka pomiaru bazuje na normie PN-91/D-95009 oraz projekcie Klasyfikacji Wymiarowej Paliw Stałych (Hartman i in. 2004).

Najczęściej w tym celu wykorzystywana jest metoda sitowa, która umożliwia rozdział masy wg. grup wymiarowych sit zastosowanych w przesiewaczu. W przypadku zrębków, gdzie głównym wymiarem rozdzielczym jest długość, metody sitowe są obciążone dużym błędem – sięga on nawet 30%.

W związku z tym, opracowana została nowa metoda (Fraczek i Mudryk 2007b) oznaczania składu granulometrycznego zrębków bazująca na komputerowej analizie obrazu. Metoda ta składa się z dwóch etapów, tj. określenia geometrii zrębków wraz z klasyfikacją wymiarową oraz określenia masy zrębków w poszczególnych grupach wymiarowych.

W celu dokonania klasyfikacji wymiarowej zrębków dokonano akwizycji ich obrazów na stanowisku do wizualizacji obrazów firmy LUMENS PS550 (fot. 3).



Fot. 3. Stanowisko do pomiaru geometrii zrębków metodą analizy obrazu, 1 – kamera, 2 – podświetlany stolik z materiałem badawczym, 3 – komputer od archiwizacji i analizy obrazów

Photo. 3. Station for measurement of geometry of chips by DIA method, 1 – camera, 2 – illuminated table with investigated material, 3 – computer for saving and analysis of images

Zrębki umieszczane były na matówce (stolik szklany podświetlany matowym światłem), a obrazy uzyskiwane z kamery zostały poddane analizie w programie Multiscan v.14.96, gdzie możliwe było określenie wymiarów głównych oraz pola powierzchni rzutu na płaszczyznę. Informacje dotyczące długości zrębków wykorzystano następnie do określenia udziałów masowych zgodnie z procedurą w/w metodyki.

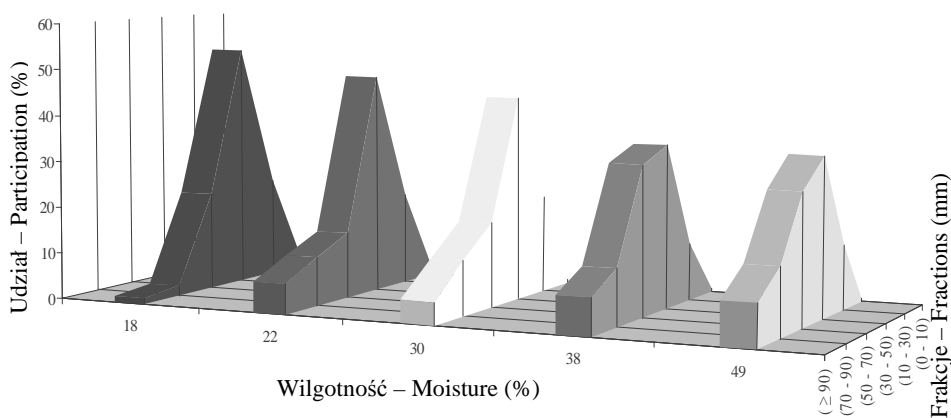
WYNIKI BADAŃ

Wyznaczone składy granulometryczne oraz ich odchylenia standardowe przedstawione zostały w tabeli 1. Analizując wartości odchylenia standardowych składów granulometrycznych możemy zauważyć, że ich wielkość nie przekracza 15%, średnio wynosząc 8%.

Wyniki badań przedstawione na histogramach (rys. 2) wskazują, iż wraz ze wzrostem wilgotności rozdrabnianych pędów rośnie udział frakcji dłuższych w masie zrębków, a histogram ulega spłaszczeniu. Długości zrębków w jednej próbie są mocno zróżnicowane.

Tabela 1. Skład granulometryczny oraz odchylenia standardowe zrębków wierzby
Table 1. Granulometric composition and standard deviation of willow chips

| Frakcje (mm) Fractions (mm) | Wilgotność zrębkowanych pędów – Moisture of chipped stems (%) | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | 18 | | 22 | | 30 | | 38 | | 49 | |
| | Udział (%) Share | Odch. Stand. Dev. | Udział (%) Share | Odch. Stand. Dev. | Udział (%) Share | Odch. Stand. Dev. | Udział (%) Share | Odch. Stand. Dev. | Udział (%) Share | Odch. Stand. Dev. |
| (0-10) | 0,8 | 0,12 | 1,2 | 0,12 | 0,7 | 0,11 | 0,8 | 0,15 | 0,6 | 0,1 |
| (10-30) | 21,8 | 1,8 | 19,9 | 1,1 | 20,9 | 2,2 | 12,2 | 1,1 | 13,8 | 0,85 |
| (30-50) | 52,8 | 5,6 | 47,6 | 3,2 | 43,9 | 6,7 | 35 | 2,4 | 34 | 1,7 |
| (50-70) | 21,1 | 1,9 | 14,2 | 1,2 | 18 | 1,1 | 32 | 2,7 | 28 | 1,3 |
| (70-90) | 2,3 | 0,45 | 10,5 | 0,7 | 11,6 | 0,5 | 12 | 0,9 | 14,5 | 0,8 |
| (≥ 90) | 1,2 | 0,13 | 6,6 | 0,4 | 4,8 | 0,11 | 8 | 0,75 | 9,1 | 0,4 |

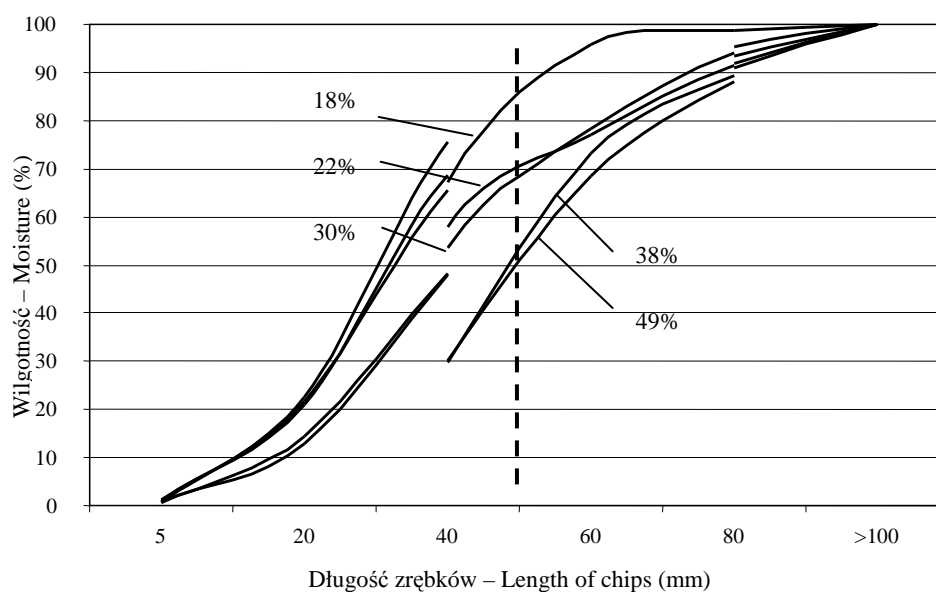


Rys. 2. Skład granulometryczny zrębków wierzby w zależności od wilgotności zrębkowanych pędów
Fig. 2. Granulometric composition of willow chips in dependence on moisture of chipped stems

Analiza dystrybuanty długości zrębków (rys. 3), przy uwzględnieniu granicznej ich długości (50mm) określonej w wymogach jakościowych, pozwala stwierdzić że:

- najlepszą jakością charakteryzowały się zrębki uzyskane z pędów o wilgotności 18% – aż 90% frakcji posiadało długość do 50 mm,

- zrębki uzyskane z pędów o wilgotności 22% i 30% w 76-78% spełniały wspomniane wymogi jakościowe,
- natomiast zrębkowanie pędów o wilgotności 38-40% powoduje, że tylko 65% zrębków spełnia kryterium granicznej długości.

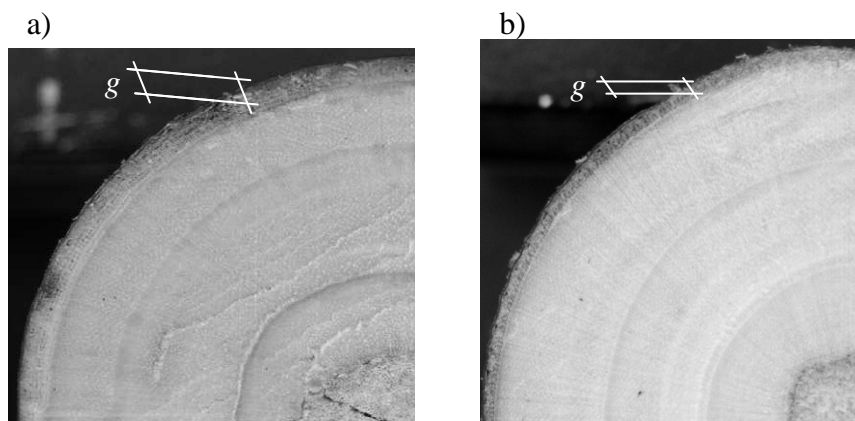


Rys. 3. Dystrybuanta długości zrębków w zależności od wilgotności zrębkowanych pędów

Fig. 3. Cumulative distribution function of the length of chips in dependence on moisture of the chipped stems

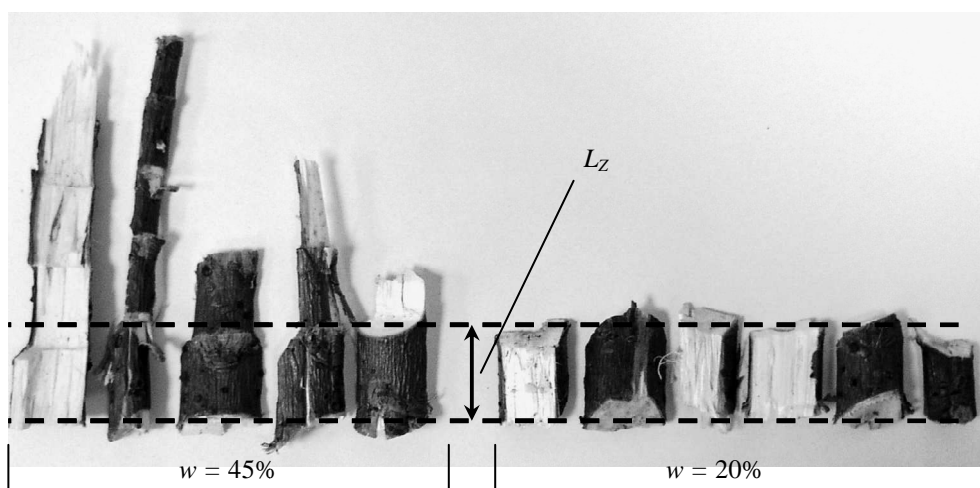
Przyczyn wzrostu udziału zrębków dłuższych, przy wzroście wilgotności rozdrabnianych pędów należy dopatrywać się w zwiększonym udziale kory i łyka w przekroju poprzecznym pędów wilgotnych (Frączek, Mudryk 2008). Udział kory i łyka, w przekroju poprzecznym, wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wilgotności. Przykładowo dla pędów o średnicy 20 mm (rys. 4) grubość kory i łyka g maleje prawie dwukrotnie powodując, że ich udział w przekroju poprzecznym zmienia się w przedziale od 18% (wilgotność 50%) do 10% (wilgotność 22%).

Wzrost wilgotności łyka powoduje zmianę właściwości fizycznych całych pędów w szczególności elastyczności. W efekcie często uzyskujemy zrębki z nie dociętym łykiem, które ulega zerwaniu w odległości większej niż długość zrębkowania L_z . Wilgotne zrębki posiadają więc fragmenty łyka zwiększające ich długość całkowitą (rys. 5).



Rys. 4. Przekrój poprzeczny pędu ($d = 18\text{mm}$) o wilgotności: a – 48 %, b – 20%

Fig. 4. Cross section of willow stem ($d = 18\text{mm}$) with moisture of: a – 48 %, b – 20%



Rys. 5. Przykładowe zrębki wierzby otrzymane z pędów o różnej wilgotności w , L_z – nominalna długość zrębków 25 mm

Fig. 5. Examples of willow chips obtained from stems of various moisture w , L_z – nominal length of chips 25 mm

Dla uniknięcia opisanych zjawisk niezbędne jest opracowanie nowych precyzyjniejszych urządzeń rozdrabniających (zespół tnący) jak również uwzględnienie powyższych wniosków w projektowaniu technologii produkcji zrębków do celów energetycznych. Poddawanie procesowi zrębkowania materiału wcześniej sezonowanego (zbiór wieloetapowy) umożliwia uzyskanie zrębków o wyższej jakości. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że wraz ze spadkiem wilgotności pędów

wzrastają opory cięcia (rozdrabniania) materiału. Konieczne zatem jest prowadzenie kolejnych badań dotyczących optymalizacji procesów produkcji zrębków wierzby minimalizujących nakłady energetyczne przy zachowaniu najwyższej jakości zrębków.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania wskazują, iż wraz ze wzrostem wilgotności zrębkowanych pędów wzrasta udział frakcji zrębków dłuższych, a tym samym histogramy ulegają spłaszczeniu.
2. W świetle istniejących wymogów jakościowych, stawianych zrębkom opałowym, zalecana wilgotność zrębkowanych pędów, powinna wynosić poniżej 30%.
3. Uzyskane wyniki badań dostarczają cennych informacji dla konstruktorów oraz eksploatatorów maszyn rozdrabniających biomasę do celów energetycznych.

PIŚMIENICTWO

- Dreszer K., Michałek R., Roszkowski A., 2003. Energia odnawialna – możliwości jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie. Wyd. PTIR Kraków – Lublin – Warszawa.
- Frączek J., Juliszewski T., Mudryk K., 2006. Pomiar wilgotności pędów i zrębków wierzby energetycznej. *Inżynieria Rolnicza*, 12 (87), 137 -144.
- Frączek J., Mudryk K., 2007a. Metoda pomiaru energochłonności procesu zrębkowania pędów wierzby. *Inżynieria Rolnicza*, 7 (95), 47-53.
- Frączek J., Mudryk K., 2007b. Ocena składu granulometrycznego zrębków wierzby *Salix viminalis* L. 179-188. Rozdział 12 w „Właściwości Geometryczne, Mechaniczne i Strukturalne Surowców Roślinnych i Produktów Spożywczych” (pod red. B. Dobrzański jr i L. Mieszkalski). Komitet Agrofizyki PAN, Wyd. FRNA.
- Frączek J., Mudryk K., 2008. Pomiar powierzchni przekroju pędu wierzby *Salix viminalis* L. z wykorzystaniem DIA. *Inżynieria Rolnicza*, 11(109), 47-54.
- Hartmann H., Böhm T., Daugberg Jensen P., Temmermann M., Rabier F., Golser M., Herzog P., 2004. Size Classification – RTD Results and Status of the Standardisation. Proceedings of the Conference “Standardisation of Solid Biofuels”, Leipzig, Germany, October 6-7, 2004.
- Kubica K., 2003a. Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem. Cz. I. *Biul. Ekologiczny*, 5, 3-5.
- Kubica K., 2003b. Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem. Cz. II. *Biul. Ekologiczny*, 6, 3-5.
- Malczewski J., 1994. *Mechanika materiałów sypkich*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN-77/D-04100, *Drewno. Oznaczanie wilgotności*.
- PN-91/D-95009, *Surowiec drzewny. Zrębki leśne*.
- Popowicz J., 2003. Współspalanie biomasy z węglem w kotłach fluidalnych. *Karbo*, 48 (3), 136-141.
- Woodfuel chipping: field trials. Technical Note 9/98, 3-12. Forest Research.

INFLUENCE OF MOISTURE LEVEL OF CHIPPED STEMS OF WILLOW
SALIX VIMINALIS L. ON THE GRANULOMETRIC COMPOSITION
OF CHIPS OBTAINED

Jarosław Frączek, Krzysztof Mudryk

Department of Mechanical Engineering and Agrophysics, Agricultural University
ul. Balicka 120, 30-149 Cracow
e-mail: fraczek@ar.krakow.pl

Abstract. The main purpose of the study was evaluation of the influence of moisture content of chipped stems of the willow *Salix viminalis* L. on the granulometric composition of chips acquired in the process of stem fragmentation. The statistical material used in analysis was gathered directly from the willow plantation fields of the Faculty of Production and Power Engineering. The study showed that the fraction of longer chips grows with increase in the moisture level of chipped stems. Analysing the results of the study and the requirements concerning willow chips for fuel it can be concluded that the optimum moisture level of chipped stems should be less than 30%.

Key words: granulometric composition, biomass, willow