



## **Analiza techniczna i strukturalna biomasy typu *Cannabis sativa* L. w stanie surowym oraz po peletyzacji**

**Krystian Machaj, Błażej Skiba**

*Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny*

*E-mail: kryst.machaj@gmail.com*

REKOMENDACJA: *dr hab. inż. Halina-Pawlak Kruczek, prof. nadzw. PWr*

### STRESZCZENIE

W niniejszym artykule dokonano badań określających potencjał energetyczny konopii *Cannabis sativa* L. Przedstawione zostały podstawowe informacje na temat regulacji prawnych, hodowli tej odmiany konopi. Badania, które przeprowadzono obejmują analizę techniczną oraz strukturalną rośliny. Wykonywano je na dwóch frakcjach: włóknach i łodygach. Otrzymane wartości badań (zawartość wilgoci, części lotnych oraz nieorganicznych, wartości kaloryczne) zestawiono z charakterystycznymi wartościami typowych roślin energetycznych: *Salix viminalis* i *Miskhantus giganteus*. Dokonano peletyzacji *Cannabis sativa* L., w stosunku około: 30% włókien i 70% łodyg. Wartość opałowa otrzymanego peletu wynosi 20,3 MJ/kg. Ponadto wykazano, że łodygi są lepszą frakcją pod względem energetycznym do wykorzystania w energetyce. Jest to istotna informacja dla hodowców lub producentów, zajmujących się rozdziałem obu frakcji, w celach przemysłowego wykorzystania wyłącznie jednej z nich. Niniejszy artykuł określa potencjał energetyczny *Cannabis sativa* L. wyhodowanych w Polsce w 2016 roku, który wynosi 0,026 TJ. Stwierdzono, że konopia siewna jest dobrą alternatywą dla tradycyjnych technologii energetycznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *Biomasa, konopia, pelety, TGA*

---

### 1. WPROWADZENIE

Konopie to rośliny od wieków uprawiane na ziemiach Polskich. W gospodarce używane były do produkcji: oleju, lin, tkanin i ubrań. Znajdowały także zastosowanie w lecznictwie. Dzisiaj w przemyśle konopie używane są w: przemyśle spożywczym, budownictwie, medycynie czy włókiennictwie. Wyrabiane są z nich: izolacje cieplne,

oleje, ubrania, liny czy papier. Zawartość wielu związków chemicznych, mających charakter leczniczy, pozwala na wykorzystanie ich z powodzeniem w przemyśle farmaceutycznym jako leki przeciwłękowe, przeciwbólowe, przeciwskurczowe lub antybiotyki.

Konopie siewne są roślinami jednorocznymi, których okres wegetacji trwa około 4 miesięcy. Są roślinami wiatropylnym, które dzielą się na osobniki męskie i żeńskie. Posiadają wiele interesujących cech pod względem ich uprawy. Działają hamująco na wzrost niektórych chwastów, posiadają odporność na choroby, dzięki czemu nie jest konieczne stosowanie środków ochronnych. Ważną zaletą konopi siewnych, w porównaniu do obecnie uprawianych roślin energetycznych jest fakt, że nie jest problematyczne wdrożenie ich do płodozmianu. Mogą zostać zastosowane w celach ulepszenia gleb pod uprawę innych roślin. Istnieje możliwość uprawy konopi w celu szybszej rekultywacji terenów pozostałych po odkrywce węgla brunatnego [1, 2, 3].

W Instytucie Włókien Naturalnych w Poznaniu wyhodowano kilka odmian np. Białobrzeskie czy Silesia, które są odmianami środkowoeuropejskimi przystosowanymi typowo do strefy klimatycznej Polski.

Teoretycznie płodność roślin pozwala na uzyskanie od 7 do 15 t słomy z hektara z czego około 25-30 % to włókna, a 70-75% paździerz (todygi). Do słomy nie wilcza się nasion, których zbiór szacuje się od 0,3 do 1,0 tony z hektara. Zróżnicowanie wynika z technik uprawy, zbioru jak i odmiany roślin. Dla porównania wysokość plonów kenafu wynosi ok. 24 t/ha, a miskantusa ok. 30 t/ha [4]. Jak widać plony konopi są prawie dwa razy mniejsze od plonów tych dwóch roślin przeznaczanych do upraw w celach energetycznych. Warto jednak zauważyć, że wspomniane rośliny wymagają dużych nakładów finansowych w celach uprawy w klimacie, jaki panuje w naszym kraju.

Porównując natomiast plony konopii do roślin energetycznych typowo używanych w Polsce można przyjąć, że:

- wierzba może osiągać zróżnicowane wyniki - od 8 t/ha na glebie, na której nie występuje nadmiar wody, do nawet 30 t/ha na terenach podmokłych. Jednak typowe obszary uprawne należące do gospodarstw prywatnych, czyli docelowej grupy produkującej biomasę, nie leżą na terenach podmokłych [5],
- pszenica między 4 a 7 t/ha. Dokładna liczba z wyników statystycznych na 2016 r. to 4,5 t/ha [6].

Biorąc pod uwagę to, że konopie dostosowują się praktycznie do każdego rodzaju gleby stosowanej w rolnictwie, prezentują się obiecująco. Jednak wyniki teoretyczne (czyli 7-15 t/ha) nie pokrywają się z rocznym plonem słomy konopnej jaki podaje Główny Urząd Statystyczny:

**Tabela 1:** Plony Cannabis sativa L. w roku 2016 [6]

Sektor	Powierzchnia	Plony z 1 ha	Zbiory	Powierzchnia	Plony	Zbiory
	ha	t	t	% względem 2015 roku		
Ogólnie	396	3,3	1 301	68,2	54,9	37,4
Prywatny	387	3,2	1 235	74,6	48,7	36,2
Publiczny	9	7,3	66	14,5	651,8	94,9

Na podstawie tabeli można określić, że w sektorze prywatnym ilość plonów z hektara spadła w ciągu jednego roku o 50 % i wynosi 3,2 t/ha. Ponadto widać, że w sektorze publicznym osiągnięto 7,3 t/ha. Na podstawie przedstawionych w tabeli 1 danych

można wysnuć wnioski, że w sektorze prywatnym z powodu prawdopodobnie małej liczby odbiorców słomy, nie jest opłacalna maksymalizacja plonów, gdyż nie wykorzystuje się odpadu z hodowli. Przyopuszczenie to można poprzeć tym, że prawdopodobnie w sektorze publicznym, w którym całkowita powierzchnia pól uprawnych konopi wynosi 9 ha, rośliny te są hodowane tylko i wyłącznie do celów naukowych, niekomercyjnych, co daje możliwość prowadzenia badań nad konopiami. Wzrost plonów o 650%, w 2016 roku, wskazuje na liczne eksperymenty hodowlane z udziałem tej rośliny.

Przypuszcza się również, że podane wyniki z sektora prywatnego mogą dotyczyć wartości biomasy sprzedanej w celach wykorzystania w przemyśle. Oznacza to, że biomasa byłaby ważona w punkcie skupu. Zazwyczaj w przemyśle stosowane są włókna rośliny, które stanowią 30% części rośliny, co oznaczałoby że całkowite zbiory były na poziomie 10-12 t/ha. Przyopuszczenia wynikają z tego, że w raporcie GUS [6] stwierdza się, że niektóre z roślin przemysłowych szacowano na podstawie wyników skupu.

W Polsce konopie objęte są ustawą o przeciwdziałaniu narkomanii. Konopiami włóknistymi nazywane są konopie siewne, których zawartość delta-9-tetrahydrokannabinolu oraz kwasu tetrahydrokannabinolowego w wierzchołkach roślin wynosi mniej niż 0,20% w przeliczeniu na suchą masę, w myśl ustawy z dnia 29 lipca 2005 roku. Ustawa ta pozwala na uprawę (*Cannabis sativa* L.) na potrzeby następujących przemysłów [7]: włókienniczego, chemicznego, celulozowo-papierniczego, spożywczego, kosmetycznego, farmaceutycznego, budowniczego oraz nasienniczego. Jak widać, spośród wyżej wymienionych brak jest przemysłu energetycznego. Ustawa nie zezwala na uprawy roślin dla przemysłu energetycznego. Możliwe jednak jest wykorzystanie w tych celach odpadów pochodzących z procesu wydobycia włókien [3].

Biomasa jako paliwo posiada wiele wad, a jej bezpośrednie wykorzystanie niesie ze sobą wiele problemów. Duża zawartość wilgoci w biomacie zmniejsza jej wartość opałową, niska gęstość nasypowa zwiększa koszty transportu i składowania. Niska temperatura mięknięcia popiołu wpływa szkodliwie na wymienniki kotła, a włóknista struktura biomasy przeznaczonej do współspalania z węglem, powoduje zwiększenie obciążenia młyna. Wysoka zawartość chloru skutkuje korodowaniem urządzeń; zwiększona produkcja HCl w spalinach wpływa niekorzystnie na elektrofiltry oraz instalacje mokrego odsiarczania spalin. Natomiast organiczny charakter biomasy powoduje jej biodegradację, która może szkodliwie wpływać na zdrowie człowieka [8, 9, 10, 11]. W celu ograniczenia wymienionych wyżej problemów biomasę poddaje się uzdatnianiu. Głównymi sposobami przekształcania biomasy są: suszenie, balotowanie, brykietowanie, płukanie, peletyzacja, karbonizacja oraz piroliza [9, 10].

Peletyzacja jest formą granulacji, polegającą na sprasowaniu cząstek biomasy w bryłki o konkretnym kształcie oraz jednakowych wymiarach. Peletowanie wywodzi się z technologii granulowania w innych przemysłach. Granulat otrzymuje się poprzez zastosowania siły ściskającej, podczas którego dochodzi do zlepiania cząstek, a także przesypania lub przetłaczania materiału przez specjalne otwory. Poddane peletyzacji mogą być łuski, słoma, trociny, wióry oraz zrębki. Proces ten może wymagać dodania lepiszcza do niektórych gatunków materiału. Peletyzacja zwiększa gęstość energetyczną biomasy, wartość opałową oraz zmniejsza zawartość wilgoci. Dodatkowo pelety posiadają lepszą zdolność przemiałową. Główną wadą peletów jest ich wrażliwość na wilgotność otoczenia, ze względu na higroskopijność. Absorbacja zbyt dużej ilości wody prowadzi do puchnięcia, a następnie rozpadu peletów. Wymaga to utrzymywania odpowiednich warunków przechowywania granulatów.

Na podstawie powyższych faktów oraz braku prac naukowych dostarczających wystarczająco informacji na temat cech *Cannabis sativa* L. istotnych w zastosowaniu w przemyśle energetycznym, postanowiono dokonać szeregu badań. Pierwsza część pomiarów obejmowała analizę techniczną oraz elementarną paliwa w stanie surowym, co pozwala na globalny pogląd na temat możliwości zastosowania energetycznego tego typu biomasy. Druga część badań odnosi się do waloryzacji paliwa poprzez peletyzację. Niniejsza praca jest pracą porównawczą między poszczególnymi frakcjami konopi, a charakterystycznymi roślinami energetycznymi oraz ma na celu określenie użyteczności zastosowania *Cannabis sativa* L. w przemyśle energetycznym.

Celem wykonanych badań było oszacowanie potencjału *Cannabis sativa* L. pod względem wykorzystania tego surowca na potrzeby energetyczne. Zatem konieczne było wyznaczenie podstawowych parametrów *Cannabis sativa* L. jako paliwa stałego oraz określenie możliwości jego peletyzacji, która byłaby konieczna ze względów logistycznych (magazynowanie, transport paliwa oraz automatyczne systemy podawania).

## 2. METODYKA BADAŃ I PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Biomasa poddana badaniom dostarczona została w dwóch frakcjach – łodygach i włóknach (rys. 1), które były ze sobą wymieszane w stosunku 70% łodyg i 30% włókien. Jest to statystyczna wartość plonu, którą można odnaleźć w literaturze [1]. Została ona również potwierdzona przez producenta. Do przeprowadzenia badań frakcje zostały rozdzielone ręcznie, w oparciu o procedurę wewnętrzną firmy HemPoland Sp. z o. o. Celem rozdziału było oszacowanie i porównanie wartości energetycznej obu frakcji. Wynika to z faktu, że zarówno włókna, jak i łodygi mogą być formą użyteczną, wykorzystywaną przez konkretne przedsiębiorstwo. Oznacza to, że włókna lub łodygi mogą być odpadem, przeznaczonym na cele energetyczne. Hodowcy i przetwórcy *Cannabis sativa* L. w różnym stopniu bowiem wykorzystują obie frakcje po rozdziale. Wynikiem tego firma HemPoland Sp. z o. o. zainteresowana była informacjami dotyczącymi obu frakcji.

Łodygi, jak i włókna, zostały pocięte i rozdrobnione za pomocą młyna firmy Retsch model SM 100. Podjęte działanie, pozwoliło uzyskać materiał o dostatecznie małym rozmiarze cząstek, by móc przeprowadzić próby peletyzacji.



Rys. 1: Materiał w stanie surowym

W celu określenia rozkładu ziarnowego materiału, poddanego peletyzacji, przeprowadzono analizę sitową produktu mielenia. Przygotowano sita o grubościach oczek: 5 mm; 2 mm; 0,500 mm oraz 0,200 mm. Następnie 50 g rozdrobnionej biomasy przepuszczono przez każde z wymienionych sit. Zdjęcie przykładowego sita użytego podczas badań przedstawia rysunku 2. Na podstawie poniższego wzoru (1) wyznaczono procentową zawartość każdej z badanych frakcji:

$$z_i = \frac{m_{s_i}}{m_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- $z_i$  - procentowa zawartość danej frakcji,
- $m_{s_i}$  - masa pozostała na danym sicie,
- $m_s$  - całkowita masa poddana badaniu.



Rys. 2: Sito użyte podczas badań

Urządzenie, które wykorzystano do peletyzacji, to WKL300B-TP, przedstawione na rysunku 3. Jest to urządzenie typu rotacyjnego z matrycą pierścieniową, napędzane silnikiem trójfazowym o mocy 7,5 kW. Peleciarka pracuje w układzie z ruchomą matrycą. Rolki prasujące przeciskają przez matrycę peletyzowany materiał. Istnieje możliwość wymiany matrycy w celu dobrania odpowiednich średnic otworów.

Peletyzację przeprowadzono z zamontowaną matrycą o średnicy otworów 4 mm. Do procesu wykorzystano obie frakcje, w stosunku około 70% łodyg i 30% włókien. Przed przystąpieniem do procesu peletyzacji materiału docelowego, konieczne było wygrzanie elementów roboczych peleciarki. Zgodnie z zaleceniami producenta, wykorzystano mieszaninę otrębów pszennych, drobnoziarnistego popiołu (w stosunku 5 kg do 1 kg) oraz oleju. Po około 10 minutach przystąpiono do podawania rozdrobnionej kłopi siewnej, którą wcześniej spryskiwano w celu otrzymania odpowiedniej wilgotności materiału, podawanego do komory roboczej. Wilgotność materiału podawanego peletyzacji powinna mieścić się w przedziale od 6 do 15%, w zależności od rodzaju biomasy [12, 13, 14].

W badaniach zawartości wilgoci, popiołu, części lotnych oraz ciepła spalania wykorzystano taką samą liczbę próbek łodyg, jak i włókien. Każde z wymienionych badań przeprowadzono dla czterech próbek, by uzyskać wiarygodne pomiary. W celu oznaczenia zawartości wilgoci, popiołu, części lotnych wykorzystano analizę wagową. W trakcie przeprowadzania pomiarów posłużono się wagą laboratoryjną Radwag AS 310/C/2. Badania zawartości wilgoci przeprowadzono na podstawie normy PN-G-04511:1980 [15]. Próbkę umieszczono w suszarce w temperaturze 110°C na okres około czterech godzin. Dodatkowo zbadano wilgotność przemijającą paliwa. W tym celu próbki umieszczono w temperaturze około 25°C, a pomiary wykonywano w odstępach tygodniowych



**Rys. 3:** Peleciarka WKL300B-TP podczas konserwacji: a) peleciarka ze zdemontowaną górną częścią komory roboczej, z odkręconą matrycą, b) komora robocza z trzpieniem montażowym matrycy, c) matryca z elementem montażowym, d) wałek z rolkami dociskającymi i zsymp pelętów

przez 21 dni. Zawartość wilgoci w stanie analitycznym określono na podstawie różnicy między zawartością wilgoci w stanie roboczym, a zawartością wilgoci przemijającą.

Popiół w biomase został oznaczony metodą spopielenia. Badanie przeprowadzono na podstawie normy PN-8-G-04512 [16]. Próbkę zostały umieszczone w piecu, w temperaturze około 650°C na 30 min dla biomasy nieprzetworzonej, natomiast na 70 min dla pelętów, z narostem 20°C/min. Pomiary zawartości części lotnych przeprowadzane były zgodnie z normą PN - G-04516-1998 [17], w muflowym piecu elektrycznym, a próbki na podstawie wyżej wymienionej normy zostały poddane działaniu temperatury 850°C przez około 7 min. Próbkę w piecu umieszczone były w ceramicznych tyglach z wieczkami, wytrzymałych na wysokie temperatury.

Pirolizę przeprowadzono na stanowisku służącym do odgazowywania paliw stałych. Badanie polegało na umieszczeniu 5 g badanego materiału w koszyczku i powieszeniu go na ramieniu wagi, w taki sposób, by znalazł się w piecu wygrzewającym próbkę. W odróżnieniu od typowych TGA, wykorzystanie stanowiska przedstawionego na rys. 4 pozwala na zastosowanie znacznie większej masy próbki, co w konsekwencji pozwala na sprawdzenie palności gazów pirolitycznych. Atmosferę beztlenową uzyskano przepłukując reaktor podczas trwania pomiaru gazem inertnym, którym był azot techniczny. Piec podłączono do zasilacza, pełniącego rolę regulatora temperatury. Pirolizę przeprowadzono dla czterech próbek: dwóch próbek zawierających same łodygi oraz dwóch kolejnych zawierających same włókna, przy czym dla każdego materiału jedna piroliza wykonana była po wcześniejszym wysuszeniu próbek. Proces odbywał się w atmosferze azotowej w temperaturze 650°C, z narostem temperaturowym zaprogramowanym na 150°C/min. Po dokonaniu pirolizy pozostałość dopalono, celem oszacowania zawartości popiołu w biomacie.

Ciepło spalania ( $Q_S^a$ ) określono za pomocą bomby kalorycznej IKA C2000 basic. Natomiast wartość opałową ( $Q_j^a$ ) obliczono przy pomocy metody bezpośredniej po określeniu  $Q_S^a$  oraz składu elementarnego C, H, N, S, O paliwa. Badania zostały przeprowadzone zgodnie z normą BS EN ISO 16948:2015 [19] na urządzeniu PerkinElmer

CHNS/O Analyzer 2400. Do wyliczenia wartości opałowej posłużono się wzorem (2) [20]:

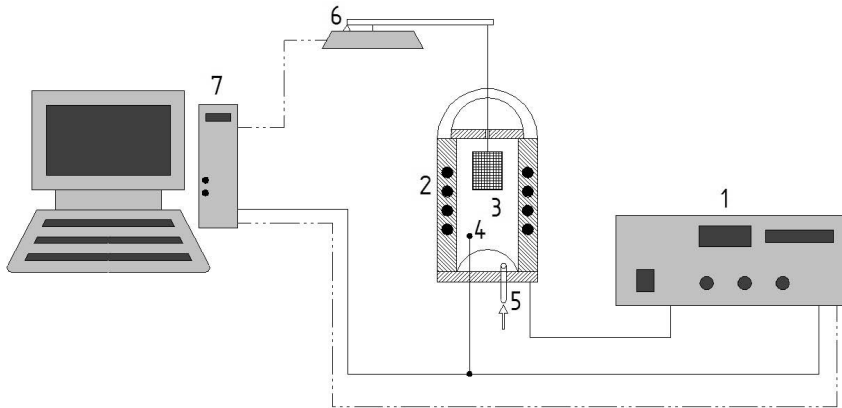
$$Q_i^d = Q_S^d \alpha \beta H^d \quad (2)$$

gdzie:

$\alpha = 24,42$  odpowiada wartości ciepła parowania wody, w temperaturze i pod ciśnieniem standardowym, przypadającemu na % (m/m) wody utworzonej podczas spalania, kJ/kg,

$\beta = 8,94$  jest przelicznikiem zawartości wodoru na wodę,

$H^d$  wyraża procentową zawartość wodoru w stanie suchym.



**Rys. 4:** Schemat stanowiska pomiarowego TGA, na podstawie [18]: 1 – zasilacz pieca, 2 – piec, 3 – koszyk z próbka, 4 – czujnik temperatury, 5 – wlot azotu, 6 – waga, 7 – komputer

Potencjał energetyczny określono na podstawie wzoru (3). Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych dotyczących 2016 roku. Informacje na temat plonów pozyskano na bazie szacunków Głównego Urzędu Statystycznego [6]. Jako kaloryczność paliwa zastosowano wartość opałową w stanie suchym. Wynik potencjału energetycznego reprezentuje energię pierwotną paliwa.

$$E = m Q_i^d \quad (3)$$

gdzie:

$m$  oznacza całkowite plony *Cannabis sativa* L. w 2016 roku [6].

Oszacowano również potencjał energetyczny plantacji konopii siewnej na gruntach marginalnych w Polsce, wykorzystując wzór (4) [21]. Obliczenia przeprowadzono dla dolnej wartości płodności teoretycznej *Cannabis sativa* L., wynoszącej 10 t/ha.

$$P = m_t Q_i^d A \quad (4)$$

gdzie:

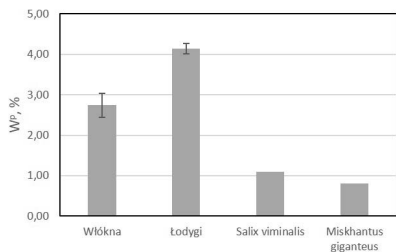
$m_t$  – teoretyczna płodność *Cannabis sativa* L.,

$w$  – współczynnik wykorzystania gruntów pod uprawę roślin energetycznych (dla ziemi klasy V, VI, VI równy 0,1) [21],

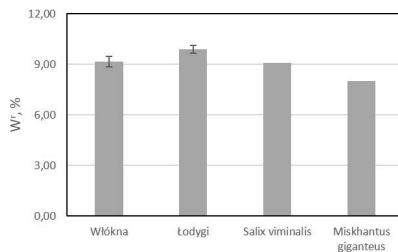
$A$  – powierzchnia gruntów marginalnych pod uprawę roślin energetycznych.

### 3. WYNIKI

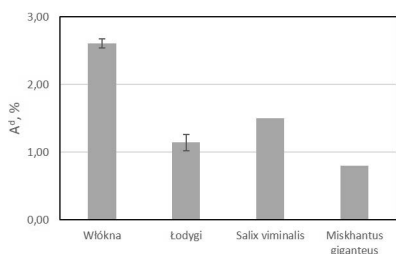
Badanie rozpoczęto pomiarami wilgoci przemijającej biomasy. Rysunek 5 przedstawia uzyskane wartości w przypadku włókien jak i łodyg. Na kolejnym wykresie (rys. 6) przedstawiono średnią zawartość wilgoci w stanie roboczym. Część mineralna paliwa została oznaczona w postaci popiołu i przedstawiona na rys. 7. Zawartość gazów palnych w postaci części lotnych przedstawiono na następnym wykresie (rys. 8). Na wszystkich wymienionych wykresach przedstawiono również wartości dla *Salix viminalis* i *Miskhantus giganteus* [22] w celach porównawczych.



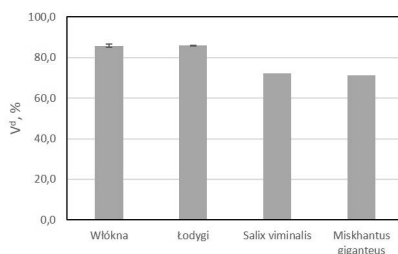
**Rys. 5:** Wyniki oznaczania zawartości wilgoci przemijającej *Cannabis sativa* L., *Salix v.* [22] oraz *Miskhantus g.* [22]



**Rys. 6:** Wyniki oznaczania zawartości wilgoci w stanie roboczym *Cannabis sativa* L., *Salix v.* [22] oraz *Miskhantus g.* [22]



**Rys. 7:** Wyniki oznaczania zawartości popiołu *Cannabis sativa* L., *Salix v.* [22] oraz *Miskhantus g.* [22]



**Rys. 8:** Wyniki oznaczania zawartości części lotnych *Cannabis sativa* L., *Salix v.* [22] oraz *Miskhantus g.* [22]

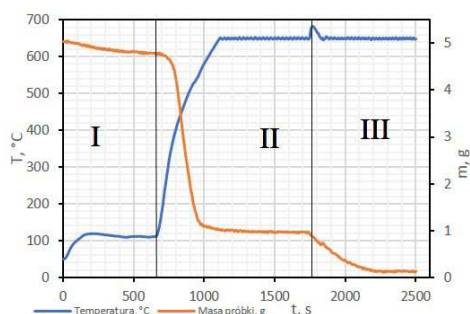
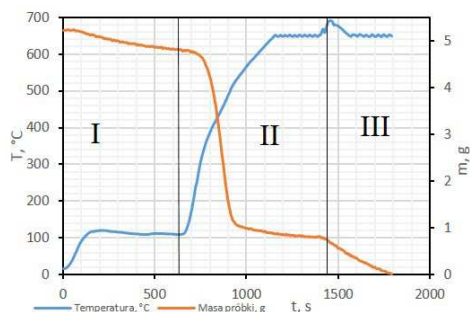
Tabela 2 jest zestawieniem wartości składu pierwiastkowego. Pomiary zawartości pierwiastków C, H, N, S dokonane zostały za pomocą PerkinElmer CHNS/O Analyzer 2400. Zawartość tlenu jest wartością wynikową. Dla łodyg i włókien aparat nie określił zawartości azotu pomimo niejednokrotnej próby.

Na dwóch kolejnych wykresach (rys. 9 i rys. 10) został przedstawiony proces pirolizy w atmosferze azotu, wykonany przy pomocy TGA. Doskonale na nich widać prędkość zmiany masy w zależności od temperatury. Charakterystyki podzielone są na trzy części: I – odparowanie wilgoci, II – uwolnienie części lotnych, III – dopalenie w obecności powietrza. Proces ten może zastąpić klasyczne pomiary zawartości wilgoci, popiołu i części lotnych metodą wagową. Przeprowadzono pomiary pozwalają zbadać dynamikę procesu i określić granicę, w której znajduje się temperatura uwalniania części lotnych.



**Tabela 2:** Analiza elementarna *Cannabis sativa* L., *Salix viminalis* (na podstawie [22]) oraz *Miskhantus giganteus* (na podstawie [22]).

Typ	Węgiel	Wodór	Azot	Siarka	Tlen
	% suchej masy				
Łodygi	43,59	4,14	-	0,41	50,76
Włókna	38,86	5,09	-	0,43	53,02
Salix v.	50,54	5,91	0,80	0,07	41,07
Miskhantus g.	48,28	5,86	0,72	0,13	41,10

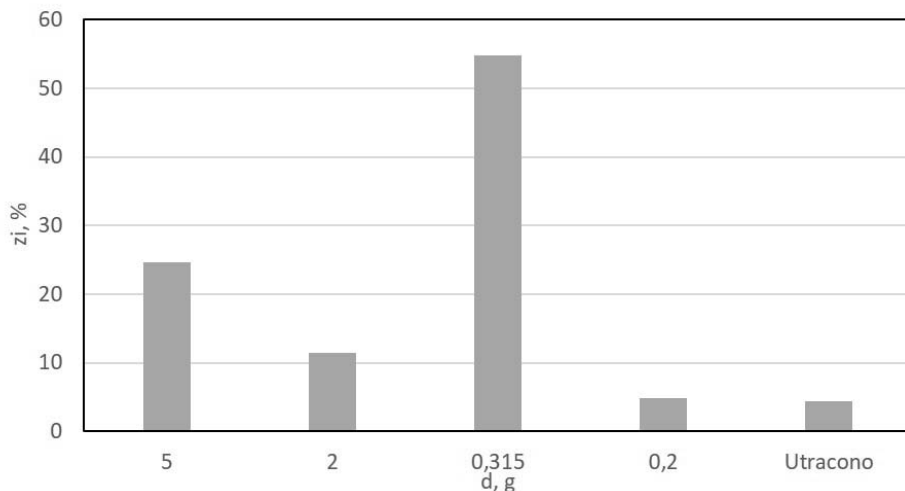
**Rys. 9:** Piroliza łodyg z dopaleniem**Rys. 10:** Piroliza włókien z dopaleniem

Pomiary frakcji paliwa po rozdrabnianiu za pomocą analizy sitowej zestawiono na rysunku 11. Informacje te określają poziom rozdrobnienia oraz skłonność paliwa do akumulacji po procesie mielenia. Mimo użycia sita o grubości 1 mm, paliwo skupia się, tworząc „puszyste” kłęby, widoczne na rys. 12, o wielkości powyżej 5 mm, co może być problemem w przypadku spalania pyłu z biomasy oraz magazynowania konopi.

#### 4. DYSKUSJA WYNIKÓW

Wyniki badań oraz porównawcze wartości dla *Salix v.* i *Miskhantus g.* zebrano w tabeli 3. Ogół otrzymanych wartości stawia *Cannabis sativa* L. w dobrym świetle.

1) Podczas analizy sitowej 24,6% badanej masy pozostało na sicie o wielkości otworów 5 mm. Wynika to ze skłonności rozdrobnionej biomasy do zlepiania się w puszystą, włóknistą strukturę (rys. 12), która składa się ze złączonych drobin, których



Rys. 11: Analiza sitowa rozdrobnionej *Canabis Sativa L.*

przestrzenie wypełnione są powietrzem. Powoduje to zmniejszenie gęstości nasypowej zmielonego materiału, a dodatkowo wzrasta ryzyko samozapłonu składowanej biomasy. Najwięcej materiału zatrzymało się na sicie o rozmiarze oczek 0,315 mm. Jest to spodziewany wynik - podczas mielenia w młynie zamontowane było sito o oczkach 1 mm.

2) Wspomniana analiza sitowa wskazuje na słusność poddania konopi siewnej peletyzacji. Przeprowadzony proces pozwolił na zwiększenie gęstości nasypowej zmielonej konopi. Uzyskane pelety (rys. 13) charakteryzują się jednolitym kształtem oraz zbliżonymi rozmiarami, co jest bardzo korzystne, biorąc pod uwagę powstające kłęby zmielonej konopi (rys. 12). Spodziewa się, że przeprowadzony proces peletyzacji, pozwolił na: ograniczenie kosztów transportu, zmniejszenie ryzyka samozapłonu oraz parametrów wybuchowych materiału. Dodatkowo, uprzednia toryfikacja biomasy może wydać się korzystna w celu ograniczenia zdolności zrodrobnionej konopi do tworzenia aglomeratów.

3) Zawartość wilgoci w surowych roślinach może wydać się duża, gdyż wynosi około 10 %. Jest ona efektem przetrzymywania roślin na otwartej przestrzeni przez dłuższy czas. Konopie były narażone na wilgotną atmosferę oraz deszcz, co prawdopodobnie wpłynęło na wysoką zawartość wody w jej strukturze. Pomiary wilgoci przemijającej dla roślin w stanie surowym potwierdzają te przypuszczenia, gdyż po przetrzymywaniu roślin przez okres 21 dni w warunkach 25°C i wilgotności około 50-60 % wilgoć spadła o 4,1 p.p. dla łodyg oraz 2,7 p. p. dla włókien. W porównaniu do *Salix viminalis* i *Miskantus giganteus*, do konopi trzeba dostarczyć mniej energii, aby uzyskać paliwo w stanie suchym. Efektem tego jest redukcja nakładów finansowych wymaganych do uzdatnienia paliwa. Jednakże trzeba podkreślić, że do produkcji peletu zawartość wilgoci w paliwie powinna mieścić się w zakresie 6–15 % [12, 13, 14], przy czym autorzy niniejszej publikacji, na podstawie własnych doświadczeń, proponują do peletyzacji *Cannabis sativa L.* stosować górne wartości podanego zakresu, gdyż sprzyja to całemu procesowi.

4) Zawartość popiołu w konopiach jest zróżnicowana. Łodygi zawierają mało czę-



Rys. 12: "Kłęby" powstałe po rozdrobieniu *Cannabis sativa* L.

ści mineralnej, natomiast włókna prawie 2,5 razy więcej. Oznacza to, że lodygi są korzystniejsze pod względem energetycznym. Po pierwsze ze względu na większą zawartość części organicznej, a co za tym idzie, również wartości opałowej. Po drugie oznacza to mniejszą ilość części nieorganicznej, odpowiedzialnej za niszczenie powierzchni ogrzewalnych urządzeń cieplnych. Wartość średniej ważonej jest porównywalna do wartości dla *Salix viminalis* oraz dużo mniejsza od zawartości popiołu w *Miskhantus giganteus* (tab. 3, rys. 7). Fakt ten stawia *Cannabis sativa* L. w korzystniejszym świetle, w porównaniu z wymienionymi roślinami.



Rys. 13: Uzyskane pelety z *Cannabis sativa* L.

5) Zawartość części lotnych, w porównaniu do *Salix viminalis* oraz *Miskhantus giganteus*, jest dużo większa w przypadku *Cannabis sativa* L. (tab. 3, rys. 8). Informacja ta sugeruje, że konopie, w porównaniu do wyżej wymienionych roślin, bardziej

nadają się do waloryzacji poprzez gazyfikację - więcej gazów palnych uzyskamy z gazyfikacji konopi. Pozwoliło to przypuścić, że wartość opałowa konopi również będzie wysoka. Duża zawartość części lotnych oznacza dużą zawartość substancji palnych o wysokich wartościach opałowych. Wynik o wartości 86 % jest niespotykany dla roślin energetycznych. Badania TGA pozwoliły na określenie temperatury uwalniania części lotnych, która dla badanej rośliny znajduje się w granicach 340-390°C. Jest to wartość zbliżona do temperatury wydzielania części lotnych węgla brunatnego, który charakteryzuje się największym ich udziałem spośród wszystkich rodzajów węgla [18].

6) Dodatkowo, badania TGA (rys. 9, rys. 10) pozwoliły zwizualizować przebieg procesu suszenia, uwalniania części lotnych oraz dopalenia próbki. W obu przypadkach charakterystyki są podobne. Temperatura suszenia była wykalibrowana na 100°C. Wiadąc, że taka temperatura sprzyja ubytkowi masy, ze względu na odparowanie wilgoci. Nachylenie krzywej ubytku masy w strefie I pokazuje, że jest on wolniejszy niż w strefie II. W obszarze uwolnienia części lotnych temperatura wzrasta w sposób ciągły, do momentu osiągnięcia 650°C. Jest to wartość, która dla większości biomasy typu roślinnej jest górną granicą występowania tego procesu. Dla łodyg (rys. 9) można zauważyć, że krzywa ubytku masy stabilizuje się po czasie około 1100 sekund. Od tego momentu części lotne już się nie wydobywają. W przypadku włókien, ubytek masy, mimo ustabilizowanej temperatury, jest wciąż widoczny, aż do około 1400 sekundy. W momencie ustabilizowania się masy, dla obu przypadków, do komory TGA dostarczono tlen, który spowodował dopalenie próbek. Jest to świadectwem tego, że mimo całkowitej utraty części lotnych w pozostałości po procesie nadal występują pierwiastki, które można utlenić.

7) Dużą zawartość części lotnych w konopiach, na poziomie zbliżonym do zawartości tychże w biomase drzewnej, prowadzi to do wniosku, że najbardziej opłacalną formą pirolizy dla tego materiału jest piroliza błyskawiczna. Produktem tego procesu jest głównie gaz. Dodatkowo, metodą waloryzacji wartą zbadania jest proces gazyfikacji.

8) Wartość opałowa rośliny to średnio 19,6 MJ/kg. Wartość opałowa pelety wynosi 20,3 MJ/kg. Wartości te są dużo większe od wartości opałowych typowych roślin energetycznych *Salix viminalis* oraz *Miskhantus giganteus*, które przedstawiono w tabeli 3 [22]. Wynika z tego, że konopie posiadają średnio 2,5-3,0 MJ więcej energii na każdy kilogram niż typowe rośliny energetyczne, użyte w porównaniu.

**Tabela 3:** Parametry analizy technicznej biomasy: *Cannabis sativa* L. (łodygi, włókna, śr. ważona, pelety), *Salix viminalis* (*Salix v.*) [22], *Miskhantus giganteus* (*Miskhantus g.*) [22].

TYP	$W_{sr}^r, \%$	$W_{sr}^p, \%$	$W_{sr}^a, \%$	$A_{sr}^d, \%$	$V_{sr}^d, \%$	$Q_i^d, \text{kJ/kg}$
Łodygi	9,9	4,1	5,8	1,1	85,9	20216
Włókna	9,2	2,7	6,5	2,6	85,9	18028
Śr. ważona	9,7	3,7	6,0	1,6	85,9	19570
Pelety	-	-	-	-	-	20269
<i>Salix v.</i>	9,1	1,1	8,0	1,5	72,9	16869
<i>Miskhantus g.</i>	8,0	0,8	7,2	3,7	71,3	16357

## 5. PODSUMOWANIE

Z biologicznego oraz energetycznego punktu widzenia *Cannabis sativa* L. jest rośliną idealnie nadającą się do użycia w przemyśle energetycznym. Analiza techniczna wykazała, że w porównaniu z innymi roślinami stosowanymi w tej branży, konopie osiągają podobne lub lepsze wyniki. Dodatkowo, ich dużą zaletą jest to, że są to rośliny jednoroczne, mało wymagające w uprawie, o stosunkowo wysokich plonach (10-15 t/ha). Największym problemem związanym z zastosowaniem konopi są: problemy prawne, przekonania społeczne na ich temat i brak wystarczającego rynku zbytu, co jest powiązane z dwoma poprzednimi problemami. Jednak zastosowanie ich do produkcji energii, zwłaszcza, gdy duża część z plonów to odpady – do badań zostało przekazane za darmo 250 kg *Cannabis sativa* L, która była odpadem nieużytkowym – wydaje się słusznym ekonomicznie wyborem. Korzystniejszą frakcją pod względem energetycznym są łodygi. Natomiast częściej stosowaną frakcją są włókna np. w przemyśle budowlanym (izolacje, liny) czy włókienniczym (tkaniny). Oznacza to, że sektor energetyczny mógłby spożytkować niewykorzystaną frakcję łodyg, które osiągają lepsze wyniki (większa wartość opałowa, mniejsza zawartość popiołu).

W oparciu o wykonane badania można oszacować, że w skali kraju możliwe jest uzyskanie 0,026 TJ, dzięki wykorzystaniu *Cannabis sativa* L., na cele energetyczne. Biorąc pod uwagę 6 312 tys. ha gruntów marginalnych, mogących być wykorzystanych pod uprawę roślin energetycznych, szacowany potencjał energetyczny konopi siewnej wynosi 123,5 PJ. Dla porównania, potencjał hodowli wierzby energetycznej na tych terenach równy jest 99,4 PJ [21].

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że ciekawą alternatywą, w stosunku do tradycyjnych technologii energetycznych, mogłaby być szybka piroliza *Cannabis sativa* L. Wynika to ze stosunkowo wysokiej zawartości części lotnych w konopiach. Konieczne wydają się dalsze badania w tym zakresie, a także w zakresie podstawowych wskaźników pożarowo-wybuchowych, gdyż ze względu na obecność w.w. związków mogą one stanowić pewien czynnik ryzyka w zakresie logistyki paliwowej, dla tego typu substratu.

## LITERATURA

- [1] Burezyk H., Oleszak G., *Knopie oleiste (Cannabis sativa L. var. oleifera) uprawianie na nasiona do produkcji oleju I biogazu.*, Problemy Inżynierii Rolniczej, **4** (94), 109–116, 2016.
- [2] Holland J., *The Pot Book: A Complete Guide to Cannabis*, 2010.
- [3] Mańkowski J., Kołodziej J., Baraniecki P., *Energetyczne wykorzystanie biomasy z konopi uprawianych na terenach zrekultywowanych*, Chemik, **68**(10), 901–904, 2014.
- [4] Densiuk W., *Słoma – potencjał masy i energii*, Inżynieria Rolnicza, **2**(100), 23–30, 2008.
- [5] Jurczuk S., Chrzanowski S., Jaszczyński J., *Plonowanie wierzby energetycznej w różnych warunkach glebowo-wodnych*, Problemy Inżynierii Rolniczej, **2**, 113–123, 2010.
- [6] Główny Urząd Statystyczny, *Wyniki produkcji roślinnej w 2016 r.*
- [7] *Ustawa z dnia 29 lipca 2005 roku o przeciwdziałaniu narkomanii.*, Dz. U. 2005 Nr 179 poz. 1485, 2005.

- [8] Golec T., *Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych*, *Energetyka*, **7-8**, 2004.
- [9] Cocker-Maciejewska A., *Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych*, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, **30**, 133–141, 2007.
- [10] Szufa S., *Sposoby konwersji biomasy w celu poprawy jej właściwości paliwowych*, Centrum Badań i Innowacji PRO-AKADEMIA, Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka, 2010.
- [11] Kopczyński M., Zuwała J., *Toryfikacja biomasy drogą do eliminacji barier technologicznych wielkoskalowego jej współspalania*, *Polityka Energetyczna*, **16(4)**, 271–284, 2013.
- [12] Warajanont S., Soponpongpipat N., *Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard*, *Parameters*, **3**, 7–17, 2013.
- [13] Li Y., Liu H., *High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel.*, *Biomass Bioenergy*, **19(3)**, 177–86, 2000.
- [14] Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S., *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*, *Biomass Bioenergy Biomass Bioenergy*, **30(7)**, 648–54, 2006.
- [15] *PN-G-04511:1980. Paliwa stałe – Oznaczenie zawartości wilgoci. KT 220, Naturalnych Paliw Stałych*, 1980.
- [16] *PN-G-04512:1980/Az1:2002. Paliwa stałe – Oznaczenie zawartości popiołu metodą wagową. KT 220, Naturalnych Paliw Stałych*, 2002.
- [17] *PN-G-04516-1998. Paliwa stałe - Oznaczenie zawartości części lotnych metodą wagową. KT 220, Naturalnych Paliw Stałych*, 1998.
- [18] Kobel P., Wnukowski M., *Piroliza paliw stałych*, instrukcja do zajęć laboratoryjnych Spalania i Paliw. Politechnika Wroclawska. [http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie\\_instrukcje/spalanie\\_labor\\_instr\\_piroliza.pdf](http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_instrukcje/spalanie_labor_instr_piroliza.pdf), 2018.
- [19] *PN-EN ISO 16948:2015-07. Biopaliwa stałe - Oznaczenie całkowitej zawartości węgla, wodoru i azotu. KT 144, Koks i Przetworzonych Paliw Stałych*, 2015.
- [20] R. Porowski, *Analiza metod określania ciepła spalania i wartości opałowej paliw*, *Zeszyty Naukowe SGSP*, **59(3)**, 2016.
- [21] Janiszewska D., *Potencjał energetyczny upraw wierzby na gruntach marginalnych w Polsce*, *Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych Politechniki Koszalińskiej*, **18**, 47–56, 2014.
- [22] Lasek J.A., Kazalskii K., *Sulfur Seld-retention during Cocombustion of Fossil Fuels with Biomass*, *Energy & Fuels*, **28**, 2780–2785, 2014.
- [23] Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., *Charakterystyka wybranych biopaliw z biomasy stałej*, *Problemy Inżynierii Rolniczej*, **4**, 2007.