# **INŻYNIERIA ROLNICZA**

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-37-2

Krzysztof Mudryk

Analiza procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej *Salix viminalis* L.

Komitet Inżynierii Rolniczej Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Kraków 2019

## Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

# Analiza procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej *Salix viminalis* L.

Chipping process analysis of the basket willow Salix viminalis L. shoots

Krzysztof Mudryk

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 (Szwecia) 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 Kukiełka (Polska) Prof. Marek Opielak (Polska) Prof. Jacek Przybył (Polska) Prof. Michele Rinaldi (Włochy) Prof. Spiro E Stefanou (USA) Dr Bernardo Strasbourg (Brazylia) Prof. Bulgakov Vlodymyr (Ukraina)

#### Komitet Redakcyjny

Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń Dr hab. inż. Sławomir Kocira, prof. UP Prof. dr hab. Pavol Findura Prof. dr hab. Leon Kukiełka redaktor naczelny
sekretarz

#### Wydawca:

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

#### **Recenzenci:**

Prof. dr hab. inż. Jerzy Bieniek	<ul> <li>Uniwersytet Przyrodnicze we Wrocławiu</li> </ul>
Dr hab. inż. Krzysztof Słowiński	- Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

ISBN 978-83-64377-37-2

#### Druk i oprawa:

NOVA SANDEC ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz tel. +48 (18) 547 45 45 e-mail: biuro@novasandec.pl; http://www.novasandec.pl Ark. wyd. 8,85 ; ark. druk. 8,00 Nakład: 100 egz.

# Spis treści:

W	YKAZ	NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW	5
1.	WSTE	ξP	7
2.	PRZE	GLĄD LITERATURY	8
	2.1.	Energetyka światowa	8
	2.2	Energetyka w UE i Polsce	14
	2.3.	Perspektywy rozwoju plantacji drzew szybkorosnących	19
	2.4.	Procesy rozdrabniania biomasy	20
		2.4.1. Procesy rozdrabniania biomasy zielnej	21
		2.4.2. Procesy zrębkowania biomasy drzewnej	24
		2.4.3. Procesy zrębkowania biomasy drzew szybkorosnących	30
	2.5.	Parametry rozdrobnionych materiałów roślinnych	34
	2.6.	Magazynowanie, sezonowanie zrębków	37
	2.7.	Suszenie rozdrobnionej biomasy	42
	2.8.	Mielenie zrębków jako element technologii produkcji biopaliw stałych	44
3	GENE	ZA PODJĘCIA TEMATU ORAZ CEL PRACY	46
4	MATI	ERIAŁ I METODYKA	48
	4.1.	Materiał badawczy	48
	4.2.	Metodyka badań	51
		4.2.1. Wilgotność pędów	58
		4.2.2. Współczynnik tarcia drewna wierzby o powierzchnię stalową	59
		4.2.3. Współczynnik sprężystości	60
		4.2.4. Oznaczenie gęstości właściwej	62
		4.2.5. Oznaczenie zawartość popiołu	64
		4.2.6. Oznaczenie naprężenia ścinającego wzdłuż włókien	65
		4.2.7. Oznaczenie jednostkowej siły cięcia $Q_{Cj}$ oraz pracy cięcia $W_{Cj}$	67
		4.2.8. Oznaczenie energochłonności rozdrabniania $E_{rs}$ – metoda quasi-	
		statyczna oraz $E_r$ – metoda dynamiczna	68
		4.2.9. Oznaczenie naprężeń rozłupujących	69
		4.2.10. Oznaczenie gęstości nasypowej zrębków	71
5.	WYN	IKI BADAŃ I ICH ANALIZA	72
	5.1.	Charakterystyka pędów wierzby	72
	5.2.	Charakterystyka mechaniczna pędów wierzby	74
		5.2.1. Współczynnik tarcia	74
		5.2.2. Współczynnik sprężystości	74

5.2.3.	Jednostkowa minimalna praca cięcia W <sub>Cjmin</sub>	75				
5.2.4.	Jednostkowa minimalna siła cięcia	76				
5.2.5.	Naprężenia ścinające wzdłuż włókien $\tau_t$	77				
5.2.6.	Naprężenia rozłupujące σ <sub>z</sub>	79				
5.3. Zrębko	owanie – metoda quasi-statyczna	79				
5.3.1.	Praca cięcia pędów wierzby wiciowej	82				
5.3.2.	Jednostkowe nakłady pracy w procesie cięcia	88				
5.3.3.	Energochłonność rozdrabniania (metoda quasi-statyczna)	91				
5.3.4.	Gęstość właściwa zrębków	95				
5.4. Proces	zrębkowania – metoda dynamiczna	98				
5.4.1.	Skład granulometryczny zrębków	98				
5.4.2.	Gęstość nasypowa zrębków	105				
5.4.3.	Energochłonność procesu zrębkowania	107				
6. PODSUMOW	VANIE	113				
BIBLIOGRAFIA		116				
STRESZCZENIE						
SUMMARY		126				

## WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW

γ	– kąt cięcia, który jest również nazywany kątem natarcia (°),
β	– kąt ostrza noża (°),
$ au_t$	<ul> <li>– naprężenie ścinające wzdłuż włókien (MPa),</li> </ul>
Α	– powierzchnia (m <sup>2</sup> ),
A1, A2	<ul> <li>– klasy zrębków z drewna nietraktowanego chemicznie,</li> </ul>
Aar	– zawartość popiołu w stanie roboczym (%),
$A_d$	– zawartość popiołu w stanie suchym (%),
<i>B1, B2</i>	– klasy zrębków z drewna,
BDar	– gęstość nasypowa (kg·m <sup>-3</sup> ),
Btu	<ul> <li>British thermal unit -brytyjska jednostka ciepła,</li> </ul>
С	– siła kohezji w procesie tarcia (N),
d	– średnica pędów (mm),
$DE_{ar}$	– gęstość właściwa w stanie roboczym (kg·m <sup>-3</sup> ),
Ε	– współczynnik sprężystości (MPa),
$E_C$	– energia zrębkowania pędów (kJ),
$E_r$	– energochłonność rozdrabniania- metoda dynamiczna (kJ·kg <sup>-1</sup> ),
$E_{rs}$	– energochłonność rozdrabniania - metoda quasi-statyczna (kJ·kg <sup>-1</sup> ),
F	– siła (N),
$f_l$	<ul> <li>strzałka ugięcia pędu od siły wstępnej (mm),</li> </ul>
$f_2$	<ul> <li>strzałka ugięcia pędu od siły zasadniczej (mm),</li> </ul>
$F_{RN}$	– siła nacisku zrębka na powierzchnię natarcia noża (N),
$F_{RP}$	<ul> <li>– siła oporów przecinania struktury drewna (N),</li> </ul>
$F_T$	– siła tarcia (N),
GUS	– Główny Urząd Statystyczny,
l	<ul> <li>rozstaw podpór na belce w teście zginania (mm),</li> </ul>
$L_n$	– czynna długość krawędzi ostrza noża (mm),
$l_z$	– długość zrębkowania (mm),
m	– masa (kg),
$M_{ar}$	– wilgotność robocza (%),
Mg	– moment gnący (N·m),
Mtoe	– milion ton ekwiwalentu ropy naftowej,
mz	– masa odcinanego zrębka (kg),
N	– siła nacisku na powierzchnię tarcia (N),
OZE	– odnawialne źródła energii,
$P_1$	– wartosc siły wstępnej podczas testow zginania (N),
P165, P315	$p_{45}$ , $P_{45}$ – klasy zrębkow odnoszących się do geometrii cząstki,
$P_2$	- wartosc siły zasadniczej podczas testow zginania (N),
$Q_{Cj}$	- jednostkowa siła przecinania (N·mm <sup>-1</sup> ),
<i>QCjmin</i>	- jednostkowa minimalna sił cięcia (N·mm <sup>4</sup> ),
$q_{p,net,ar}$	– wartosc opałowa w stanie roboczym (J·g <sup>-1</sup> ),
$r_z$	- promien Zrębkowania (mm),
SKC	– uprawy w szyokim cyklu rotacji (ang. Snort Kotation Crops),

UE	– Unia Europejska,
V	– objętość (m <sup>3</sup> ),
$W_{Ci}$	– jednostkowa praca cięcia (kJ·m <sup>-2</sup> ),
WCjmin	– jednostkowa minimalna praca cięcia (N·mm <sup>-1</sup> ),
$W_P$	– praca sił oporu krawędzi ostrza noża (J),
$W_T$	<ul> <li>– praca sił oporu tarcia o powierzchnie boczne noża (J),</li> </ul>
$\mu_{Sk}$	- współczynnik tarcia ślizgowego materiału o powierzchnię stalową (-),
$\mu_{Ss}$	- współczynnik tarcia statycznego materiału o powierzchnię stalową (-),
$\sigma_{g}$	– naprężenie gnące (Pa),
$\sigma_r$	<ul> <li>– naprężenie rozciągające (Pa),</li> </ul>
$\sigma_z$	<ul> <li>– naprężenie rozłupujące (MPa),</li> </ul>

- α
- kąt przyłożenia (°),
  kąt pochylenia pędów (°). Е

## 1. WSTĘP

Wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii w systemach energetycznych jest procesem zachodzącym w skali globalnej. Jego intensywność jest mocno zróżnicowana i zależna od sytuacji geopolitycznej. Obecnie można uznać, iż decydenci w różnych miejscach na świecie nie odpowiadają na pytanie "czy wdrażać OZE" lecz "co i jak". Analizując rozwój rynku źródeł odnawialnych należy zauważyć, iż w szczególności w początkowym okresie dominującą rolę odgrywało wykorzystanie biomasy w produkcji energii. Biomasa obecnie nadal stanowi jedno z dominujących źródeł energii odnawialnej, gdzie jej wykorzystanie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu zużycia całej energii (BP, 2018; LifeGate, 2017). Dlatego też, niezbędne wydaje się rozwijanie technik i technologii przetwarzania i wykorzystania biomasy w nowoczesnych systemach energetycznych. Biomasa do celów energetycznych w większości poddawana jest procesom rozdrabniania wykorzystując różne metody fizyko-chemiczne. Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest system mechanicznego rozdrabniania z wykorzystaniem ostrych elementów roboczych np. zrębkowania. Procesy te najczęściej stosowane są do biomasy lignocelulozowej, umożliwiając przetworzenie pędów czy też łodyg roślin na surowiec charakteryzujący się sypkością oraz jednorodnością struktury. W zależności od wymogów technologii przetwarzania (produkcja biogazu, biopaliw stałych itp.) stopień rozdrobnienia cząstek zawiera się najczęściej od 2 do 50 mm. W wielu przypadkach procesy rozdrabniania realizowane są etapowo celem minimalizacji nakładów energetycznych. Bardzo często ze względu na stosunkowo wysoką wilgotność biomasy podczas zbioru, procesy rozdrabniania realizowane są naprzemiennie z procesami dosuszania kierując się zasadą, iż wraz ze spadkiem wilgotności wzrasta podatność na rozdrabnianie.

Ze względu na różne właściwości poszczególnych gatunków roślin procesy przetwarzania powinny być dedykowane do danych gatunków lub przynajmniej grup roślin - charakteryzujących się podobnymi właściwościami istotnymi w procesach przetwarzania. Jak wskazują wyniki wielu badań, odpowiednio dobrane właściwości surowców umożliwiają realizację kolejnych procesów przy utrzymaniu najwyższej jakości oraz minimalizacji nakładów energii.

Rosnący popyt w sektorze energetycznym na surowce drzewne spowodował, iż od kilkunastu lat rośnie całkowita powierzchnia celowych upraw drzew szybkorosnących (Niemczyk i in. 2018). Dotychczas najczęściej do przetwarzania zebranych roślin adaptowane były systemy rozdrabniające dedykowane dla innych gatunków roślin (kukurydzy, sorga, drewna wielkogabarytowego). Bardzo często jakość uzyskiwanych zrębków była pewnym kompromisem organizacyjnym procesu zbioru. Dlatego też, opracowanie wytycznych pozwalających na projektowanie urządzeń przeznaczonych dla danej gamy roślin tzw. energetycznych jest pewnym wyzwaniem dla jednostek naukowych. Prace te, przyczynią się do podniesienia jakości wykonywanych procesów jak również w perspektywie podniosą efektywność energetyczną produkowanych biopaliw.

## 2. PRZEGLĄD LITERATURY

Rozwijający się rynek energetyki odnawialnej swoje początki opierał o wykorzystanie biomasy w produkcji paliw stałych, gazowych czy też ciekłych.

Ciągły rozwój technik oraz technologii pozyskania energii ze źródeł odnawialnych sprawił, iż pozyskiwanie jej jest coraz to popularniejsze, i co ważniejsze, mniej kosztochłonne. Najbardziej rozwijającymi się sektorami OZE są te, bazujące na promieniowaniu słonecznym oraz energii wiatru.

## 2.1. Energetyka światowa

Analizując raporty światowych organizacji dotyczących konsumpcji energii (BP, 2017, 2018; International Energy Outlook, 2017) można zauważyć, iż od wielu lat towarzyszy nam ciągły jej wzrost (Tabela 1). Zużycie energii pierwotnej w 2017r. wynosiło około 13511,2 Mtoe i wzrosło w ciągu roku średnio o 2,2%, (w 2016r. odnotowano wzrost w ciągu roku o 1,2%) co stanowi największy wzrost od 2013 roku. W ostatniej dekadzie (2007-2017) wzrost ten wynosił średnio około 1,7% rocznie.

Tabela 1.

Zużycie energii pierwotnej w poszczególnych krajach świata

Milion ton				Stopa wzre	ostu rocznie
ekwiwalentu ropy naftowej	2007	2012	2017	2017	2006-16
USA	2320.8	2161.0	2234.9	0.6%	-0.3%
Canada	321.4	319.9	348.7	3.2%	0.9%
Meksyk	167.3	184.2	189.3	-2.6%	1.6%
Cała pół. AMERYKA	2809.5	2665.1	2772.8	0.7%	-
Argentyna	73.3	81.2	85.9	-0.5%	2.1%
Brazylia	229.6	283.5	294.4	0.8%	3.1%
Chile	32.5	35.3	38.3	2.2%	1.7%
Columbia	30.8	38.3	42.6	1.6%	3.2%
Ekwador	11.3	14.7	16.5	4.3%	4.0%
Peru	15.1	21.2	25.9	2.6%	6.2%
Cała południowa					
i centralna	587.0	676.5	700.6	0.8%	2.1%
Ameryka					
Austria	34.7	35.0	35.9	3.3%	-0.2%
Belgia	66.3	59.5	62.3	0.1%	-0.5%
Czech Republic	45.4	42.2	41.6	5.0%	-1.3%
Finlandia	32.5	28.4	27.6	-2.3%	-1.4%
Francja	260.2	247.4	237.9	-0.1%	-1.0%
Niemcy	331.9	321.3	335.1	2.4%	-0.5%
Grecja	35.0	29.5	27.6	4.3%	-2.6%
Węgry	25.7	21.3	23.2	5.8%	-1.7%

Milion ton				Stopa wzro	ostu rocznie
ekwiwalentu ropy naftowej	2007	2012	2017	2017	2006-16
Włochy	183.4	164.6	156.0	1.8%	-1.9%
Niderlandy	94.7	89.4	86.1	1.3%	-0.9%
Norwegia	45.9	47.6	47.5	0.5%	1.1%
Polska	95.7	97.6	102.1	2.9%	0.4%
Portugalia	25.4	22.5	26.4	-1.4%	0.6%
Rumunia	38.8	33.7	33.9	3.7%	-1.9%
Hiszpania	158.6	143.0	138.8	1.8%	-1.2%
Szwecja	54.0	55.1	54.4	3.3%	-
Szwajcaria	28.9	29.3	26.4	-2.9%	-0.7%
Turcja	100.4	122.3	157.7	9.5%	4.4%
Wielka Brytania	223.1	204.5	191.3	-0.1%	-1.8%
Reszta Europy	161.4	149.7	157.6	2.0%	-0.5%
EUROPA	2041.7	1944.3	1969.5	2.1%	-0.6%
Australia	126.7	132.0	139.4	0.2%	1.1%
Bangladesz	17.8	25.0	33.0	3.6%	6.5%
China	2150.3	2799.1	3132.2	3.1%	4.4%
India	450.4	600.3	753.7	4.6%	5.7%
AZJA - Pacyfik	4195.2	5118.2	5743.6	3.1%	3.5%
ŚWIAT	11588.4	12589.0	13511.2	2.2%	1.7%
W tym: OECD	5693.9	5463.5	5605.0	1.3%	-0.2%
UE	1823.9	1700.8	1689.2	1.6%	-1.0%

Zródło: opracowanie własne na podstawie (BP, 2)	018	;)
---	-----	----

Analizując konsumpcję paliw w skali światowej, wzrost wykorzystania gazu ziemnego był największy. Kolejnymi źródłami energii, w których wzrost był znaczący, są odnawialne źródła oraz ropa naftowa.

Konsumpcja energii ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym (w latach 2016-2017 z wyłączeniem energii wodnej) wzrosła o 17%, nieco więcej niż średnia 10-letnia 16,2%, co stanowi największy przyrost w historii (wzrost o 69 milionów ton ekwiwalentu ropy naftowej - Mtoe) (Tabela 2). Produkcja energii z siłowni wiatrowych zapewniła ponad połowę wzrostu produkcji z odnawialnych źródeł energii, podczas gdy energia słoneczna przyczyniła się do przyrostu o jedną trzecią, mimo że stanowiła zaledwie 21% całkowitej produkcji.

W Chinach kraju, w którym występuje największa konsumpcja energii, zużycie w ostatnim roku wzrosło o 3,1%. Wzrost ten był największy na świecie (85 Mtoe), 17 rok z rzędu. Wzrost pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w ostatnim roku wyniósł 25 Mtoe – co stanowi rekordową wartość w skali świata.

Światowy udział energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym bilansie energetycznym wzrósł z 7,4% do 8,4%, natomiast w Europie z 16,5% do 18,3% co stanowiło również rekordowy wzrost.

Tabela	2.
1 40 014	

Konsumpcja energii ze źródeł odnawialnych w poszczególnych krajach

Milion ton			_	Stopa wzrost	u rocznie
ekwiwalentu	2007	2012	2017	2017	2006-16
ropy naftowej				2017	2000-10
USA	24.8	51.7	94.8	14.3%	13.8%
Canada	2.7	5.2	10.3	8.2%	14.0%
Meksyk	1.9	2.4	4.4	9.0%	9.1%
Cała pół. AMERYKA	29.5	59.3	109.5	13.5%	13.6%
Argentyna	0.4	0.6	0.7	2.3%	6.1%
Brazylia	4.2	9.1	22.2	16.1%	18.9%
Chile	0.6	1.4	3.0	20.5%	22.8%
Columbia	0.1	0.3	0.4	7.9%	9.9%
Peru	0.1	0.2	0.6	-2.4%	21.8%
Cała południowa i cen-	69	14 3	32.6	14 3%	17.7%
tralna Ameryka	0.9	11.5	52.0	11.570	17.770
Austria	1.4	1.7	2.8	14.6%	8.1%
Belgia	0.7	2.3	3.5	12.0%	18.2%
Czech Republic	0.3	1.3	1.7	4.8%	22.6%
Finlandia	2.3	2.6	3.7	13.1%	2.9%
Francja	1.9	5.5	9.4	11.8%	19.9%
Niemcy	15.2	27.4	44.8	17.4%	12.6%
Grecja	0.5	1.3	2.2	5.3%	17.8%
Węgry	0.4	0.6	0.7	10.1%	8.5%
Włochy	3.4	11.4	15.5	4.5%	17.0%
Niderlandy	1.7	2.8	4.0	19.9%	6.3%
Norwegia	0.3	0.4	0.7	32.4%	8.7%
Polska	0.7	3.4	4.8	2.7%	24.8%
Portugalia	1.4	3.1	3.7	0.1%	13.4%
Rumunia	Ť	0.6	2.2	9.5%	111.5%
Hiszpania	7.0	15.0	15.7	2.2%	10.0%
Szwecja	2.5	4.4	6.8	10.4%	11.2%
Szwajcaria	0.3	0.5	0.8	11.4%	10.3%
Turcja	0.2	1.7	6.6	24.0%	51.4%
Wielka Brytania	3.3	8.1	21.0	19.7%	19.1%
Reszta Europy	3.9	7.2	11.0	13.2%	11.5%
EUROPA	47.3	101.4	161.8	12.5%	13.8%
Australia	1.6	3.0	5.7	4.8%	14.5%
Chiny	3.5	29.4	106.7	31.1%	41.9%
Indie	4.3	11.2	21.8	19.7%	18.4%
AZJA - Pacyfik	22.3	61.7	175.1	24.7%	21.9%
ŚWIAT	107.0	238.7	486.8	17.0%	16.2%
W tym: OECD	86.4	174.3	304.9	13.2%	13.6%
UE	45.7	97.6	152.3	12.0%	13.5%

Źródło: opracowanie własne na podstawie (BP, 2018)

Ogólnemu wzrostowi konsumpcji energii towarzyszy również zwiększona emisja dwutlenku węgla, który od roku 2016 do 2017 wzrósł o 1,6%, po niewielkim wzroście w ciągu trzech lat od 2014 do 2016r.

Zużycie gazu ziemnego w 2017r. wrosło o 96 miliardów metrów sześciennych (mld m<sup>3</sup>) co stanowiło 3%. Wzrost ten był największy od 2010 roku. Wzrost konsumpcji gazu uległ zwiększeniu miedzy innymi dzięki konsumpcji przez Chiny (wzrost o 31 mld m<sup>3</sup>), Środkowy Wschód (28 mld m<sup>3</sup>) oraz Europę (26 mld m<sup>3</sup>). Konsumpcja gazu w USA spadła 1,2% - 11 mld m<sup>3</sup> (Tabela 3).

Tabela 3.

2016								2	017			
Milion ton ekwi- walentu ropy naf- towej	Ropa naft.	Gaz	Wę- giel	Hydro- ener- gia	Ener- gia odn.	Razem	Ropa naft.	Gaz	Wę- giel	Hydro- ener- gia	Ener- gia odn.	Razem
USA	907.6	645.1	340.6	59.7	83.1	2228.0	913.3	635.8	332.1	67.1	94.8	2234.9
Kanada	107.0	94.1	18.9	87.6	9.6	339.0	108.6	99.5	18.6	89.8	10.3	348.7
Meksyk	90.1	79.0	12.4	6.9	4.1	194.9	86.8	75.3	13.1	7.2	4.4	189.3
Cała pół. AME- RYKA	1104.6	818.2	371.9	154.2	96.8	2761.9	1108.6	810.7	363.8	164.1	109.5	2772.8
Argentyna	32.7	41.6	1.0	8.7	0.7	86.6	31.6	41.7	1.1	9.4	0.7	85.9
Brazylia	135.7	32.4	15.9	86.2	19.1	293.0	135.6	33.0	16.5	83.6	22.2	294.4
Chile	18.1	5.1	7.4	4.5	2.5	37.6	18.3	5.2	6.7	5.1	3.0	38.3
Cała południowa i centralna Ame- ryka	320.8	150.6	34.9	156.4	28.6	696.8	318.8	149.1	32.7	162.3	32.6	700.6
Austria	13.3	7.1	3.0	9.0	2.5	34.9	13.4	7.7	3.2	8.8	2.8	35.9
Belgia	32.5	13.9	3.0	0.1	3.1	62.4	32.2	14.1	2.9	0.1	3.5	62.3
Czech Republic	8.6	7.0	16.6	0.5	1.7	39.8	9.8	7.2	16.0	0.4	1.7	41.6
Finlandia	10.0	1.7	4.4	3.6	3.3	28.3	9.7	1.6	4.1	3.3	3.7	27.6
Francia	79.2	38.3	8.2	13.6	8.4	238.9	79.7	38.5	9.1	11.1	9.4	237.9
Niemcy	117.3	73.0	75.8	4.6	38.3	328.2	119.8	77.5	71.3	4.5	44.8	335.1
Grecia	15.4	3.4	4.4	1.3	2.1	26.6	15.5	4.1	4.9	0.9	2.2	27.6
Wegry	7.3	8.0	2.3	0.1	0.7	22.0	7.9	8.5	2.3	t	0.7	23.2
Włochy	59.8	58.5	11.0	9.6	14.8	153.8	60.6	62.0	9.8	8.2	15.5	156.0
Niderlandy	41.1	29.7	10.2	t	3.3	85.2	40.8	31.0	9.1	t	4.0	86.1
Norwegia	10.1	3.8	0.8	32.2	0.5	47.3	10.1	3.9	0.8	32.0	0.7	47.5
Polska	29.2	15.7	49.5	0.5	4.7	99.5	31.6	16.5	48.7	0.6	4.8	102.1
Portugalia	12.0	4.4	3.2	3.6	3.7	26.8	12.5	5.3	3.5	1.3	3.7	26.4
Rumunia	9.9	8.9	5.3	4.1	2.0	32.8	10.0	10.2	5.7	3.2	2.2	33.9
Hiszpania	64.2	25.0	10.5	8.2	15.4	136.7	64.8	27.5	13.4	4.2	15.7	138.8
Szwecja	15.5	0.8	2.1	14.0	6.1	52.8	15.6	0.7	1.9	14.6	6.8	54.4
Szwajcaria	10.6	2.7	0.1	7.9	0.7	27.3	10.9	2.7	0.1	7.2	0.8	26.4
Turcja	47.1	38.2	38.5	15.2	5.4	144.4	48.8	44.4	44.6	13.2	6.6	157.7
Wielka Brytania	76.3	69.6	11.2	1.2	17.6	192.2	76.3	67.7	9.0	1.3	21.0	191.3
Reszta Europy	60.0	24.8	35.3	16.8	9.8	155.0	61.2	25.9	36.1	15.2	11.0	157.6
EUROPA	719.3	434.7	295.1	146.1	144.2	1934.6	731.2	457.2	296.4	130.4	161.8	1969.5
Australia	50.5	35.9	43.6	4.0	5.4	139.5	52.4	36.0	42.3	3.1	5.7	139.4
Bangladesz	6.7	22.7	2.2	0.2	0.1	31.9	7.5	22.9	2.3	0.2	0.1	33.0
Chiny	587.2	180.1	1889.1	261.0	81.7	3047.2	608.4	206.7	1892.6	261.5	106.7	3132.2
India	217.1	43.7	405.6	29.0	18.3	722.3	222.1	46.6	424.0	30.7	21.8	753.7

Zużycie poszczególnych źródeł energii pierwotnej w dwóch latach 2016-2017

2016							2017					
Milion ton ekwi- walentu ropy naf- towej	Ropa naft.	Gaz	Wę- giel	Hydro- ener- gia	Ener- gia odn.	Razem	Ropa naft.	Gaz	Wę- giel	Hydro- ener- gia	Ener- gia odn.	Razem
AZJA - Pacyfik	1601.1	625.1	2744.0	368.5	140.8	5585.5	1643.4	661.8	2780.0	371.6	175.1	5743.6
ŚWIAT	4557.3	3073.2	3706.0	913.3	417.4	13258.5	4621.9	3156.0	3731.5	918.6	486.8	13511.2
W tym: OECD	2190.6	1427.3	897.6	318.3	270.1	5549.8	2206.8	1442.5	893.4	314.8	304.9	5605.0
UE	635.5	385.9	239.5	79.2	136.3	1666.4	645.4	401.4	234.3	67.8	152.3	1689.2

Źródło: opracowanie własne na podstawie (BP, 2018)

W przypadku najbardziej kontrowersyjnego surowca paliwowego jakim jest węgiel sytuacja przedstawia się podobnie (Tabela 4). Zużycie węgla w 2017r. wzrosło o 25 milionów ton ekwiwalentu ropy naftowej, czyli 1%, co stanowi pierwszy wzrost od 2013 roku. Wzrost konsumpcji generowany jest głównie przez Indie (18 Mtoe). W Chinach, kraju gdzie potrzeby energetyczne gospodarki ciągle wzrastają, konsumpcja nieznacznie wzrosła (4 Mtoe) po trzech kolejnych latach spadków 2014-2016.

### Tabela 4.

Zużycie węgla w poszczególnych krajach świata

Milion ton				Stopa wzrostu rocznie	
ekwiwalentu ropy naftowej	2007	2012	2017	2017	2006-16
USA	544.6	416.0	332.1	-2.2%	-4.5%
Kanada	30.3	21.1	18.6	-1.4%	-4.2%
Meksyk	11.3	12.8	13.1	5.6%	0.1%
Cała pół. AMERYKA	586.2	449.9	363.8	-1.9%	-4.3%
Argentyna	1.2	1.2	1.1	1.7%	2.1%
Brazylia	13.6	15.3	16.5	4.1%	2.2%
Chile	4.1	6.7	6.7	-9.1%	8.0%
Kolombia	3.2	4.7	4.0	-27.6%	3.9%
Cała południowa					
i centralna Ame-	25.8	31.6	32.7	-5.9%	3.7%
ryka					
Austria	3.9	3.2	3.2	5.0%	-2.9%
Belgia	4.4	3.2	2.9	-1.5%	-5.0%
Czech Republic	21.4	17.4	16.0	-3.0%	-2.4%
Finlandia	7.0	4.5	4.1	-5.6%	-5.1%
Francja	12.8	11.1	9.1	11.4%	-4.1%
Niemcy	86.7	80.5	71.3	-5.8%	-1.1%
Grecja	8.8	8.1	4.9	11.7%	-6.4%
Węgry	3.1	2.6	2.3	1.8%	-3.0%
Włochy	16.3	15.7	9.8	-10.5%	-4.1%
Niderlandy	8.4	8.2	9.1	-10.4%	2.8%
Norwegia	0.7	0.8	0.8	2.3%	2.0%
Polska	55.9	51.2	48.7	-1.4%	-1.5%
Portugalia	2.9	2.9	3.5	10.6%	-0.4%

Milion ton				Stopa wzrostu rocznie	
ekwiwalentu	2007	2012	2017	2017	2006-16
ropy nattowej					
Rumunia	10.1	7.6	5.7	6.8%	-5.6%
Hiszpania	20.0	15.5	13.4	28.5%	-5.2%
Szwecja	2.7	2.2	1.9	-6.2%	-2.7%
Szwajcaria	0.2	0.1	0.1	_	-3.0%
Turcja	29.5	36.5	44.6	16.3%	3.9%
Wielka Brytania	38.4	39.0	9.0	-19.4%	-12.2%
Reszta Europy	39.5	36.9	36.1	2.6%	-1.2%
EUROPA	372.9	347.3	296.4	0.7%	-2.2%
Australia	52.7	45.1	42.3	-2.8%	-1.9%
Bangladesz	0.6	0.9	2.3	7.3%	16.6%
Chiny	1584.2	1927.8	1892.6	0.5%	2.6%
Indie	240.0	330.0	424.0	4.8%	6.3%
Indonezja	36.2	53.0	57.2	7.4%	6.3%
AZJA - Pacyfik	2197.6	2675.5	2780.0	1.6%	3.1%
ŚWIAT	3451.8	3794.5	3731.5	1.0%	1.3%
W tym: OECD	1169.8	1025.5	893.4	-0.2%	-2.4%
UE	328.3	294.3	234.3	-1.9%	-3.1%

Źródło: opracowanie własne na podstawie (BP, 2018)

Popyt na węgiel w krajach OECD spadł czwarty rok z rzędu (-4 Mtoe). Udział węgla w energii pierwotnej spadł do 27,6% (najniższy od 2004r.) natomiast światowa produkcja węgla wzrosła o 105 Mtoe, czyli o 3,2% (najszybszy wzrost od 2011). Wydobycie węgla w Chinach wzrosło o 56 Mtoe natomiast w USA o 23 Mtoe.

Prowadzone szacunki i prognozy wskazują (rys.1), iż konsumpcja energii będzie nadal wzrastała, a światowa produkcja energii wzrośnie o około 25-30% do 2040r. (AEO2016, 2017; BP, 2017, 2018; GUS, 2017; Korzeniewska i in., 2018). Prognozuje się, iż zużycie energii na świecie wzrośnie z 575 quadrillion Btu w 2015r. do 736 quadrillion Btu w 2040r., co stanowi wzrost o 28%. Ponad 60% tego wzrostu do 2040r. prawdopodobnie będzie pochodziło z krajów innych niż OECD-Azja. Dodatkowo szacuje się, że mimo rosnącego popytu w sektorze miesz-kaniowym i transportowym w 2040r. sektor przemysłowy nadal potrzebować będzie ponad 50% dostarczonej energii.

Energia odnawialna będzie najszybciej rosnącym źródłem energii na świecie, zwiększając średnią wartość 2,3% rocznie w latach 2015-2040. Paliwa kopalne pozostają dominujące, dostarczając 77% światowego zużycia energii w 2040r. Natomiast gaz ziemny jest najszybciej rosnącym źródłem energii z paliw kopalnych, a jego globalna konsumpcja według prognoz będzie wzrastać średnio o 1,4% rocznie w latach 2015-2040. W okresie objętym prognozą zużycie węgla pozostaje na stałym poziomie, ponieważ spadki w Chinach są w dużym stopniu zrównoważone wzrostami zużycia w Indiach i innych częściach Azji (International Energy Outlook, 2017). Przewiduje się, że światowe emisje dwutlenku węgla związane z energią wzrosną średnio o 0,6% rocznie w okresie od 2015 do 2040r., znacznie poniżej wzrostu o 1,3% rocznie jaki odnotowano w latach 1990-2015.



Źródło: (International Energy Outlook, 2017)

Rys. 1. Światowe zużycie energii do roku 2040

## 2.2. Energetyka w UE i Polsce

Wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii w większości krajów Europy i nie tylko, kreują odpowiednie zapisy prawne. Ze względu na fakt, iż dotychczasowa infrastruktura energetyczna w większości krajów Europy dostosowana jest do stosowania kopalnych surowców, konieczne jest ponoszenie stosunkowo dużych nakładów inwestycyjnych na budowę nowych lub modernizację istniejących instalacji energetycznych. Te stosunkowo kosztowne zmiany inicjowane są koniecznością spełnienia odpowiednich zapisów prawnych lub chęcią skorzystania z odpowiednich dofinansowań do podejmowanych inwestycji z instytucji danego Państwa lub Unii Europejskiej.

Dlatego też zarówno Unia Europejska jak i wiele innych krajów, wprowadzają sukcesywnie odpowiednie zapisy prawne mające na celu dywersyfikację dotychczasowego systemu energetycznego w kierunku zwiększenia pozyskania ilości energii ze źródeł odnawialnych.

W krajach UE wykorzystywanie energii ze źródeł odnawialnych regulują odpowiednie dokumenty i akty normatywne, ustalające cele ogólne i szczegółowe dotyczące obowiązku osiągania ustalonych wskaźników udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto. Podstawowymi dokumentami i aktami prawnymi UE w tym zakresie są:

- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) NR 1099/2008 z dnia 22 października 2008r. w sprawie statystyki energii (Dz. U. L 304/1 z 14.11.2008, z późn. zm.),
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009r. w sprawie promowania, stosowania energii ze źródeł odnawialnych, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (Dz. U. L 140/16 z 5.6.2009),

- Decyzja Komisji z dnia 1 marca 2013r. ustanawiająca wytyczne dla państw członkowskich dotyczące obliczania energii odnawialnej z pomp ciepła w odniesieniu do różnych technologii pomp ciepła na podstawie art. 5 dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE (Dz.U.L62/27 z 6.3.2013),
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/1513 z dnia 9 września 2015r. zmieniająca dyrektywę 98/70/WE odnoszącą się do jakości benzyny i olejów napędowych oraz zmieniająca dyrektywę 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (Dz. U. L 239/1 z 15.9.2015).

Podobnie polskie prawodawstwo wprowadziło szereg dokumentów dostosowujących wymogi prawne do wytycznych UE. Podstawowymi aktami normatywnymi regulującymi obowiązki z zakresu wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce są:

- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. Prawo energetyczne (Dz. U. z 2012 r. poz. 1059, z późn. zm.),
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dz. U. z dnia 17 lutego 2017r. poz. 285 z późn. zm.),
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii (Dz. U. z 2008r. Nr 156, poz. 969 z późn. zm.),
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2015r. poz.478 i 2365 oraz z 2016 r. poz. 925 z późn. zm.),
- Ustawa z dnia 7 czerwca 2018r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. z dnia 29 czerwca 2018r. poz. 1276).

Zgodnie z dyrektywą 2009/28/WE państwa członkowskie są zobowiązane do zapewnienia określonego udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2020r. Obowiązkowe krajowe cele ogólne składają się na założony, 20% udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto, we Wspólnocie UE. Dla Polski cel ten został ustalony na poziomie 15% (rys. 2). Ponadto, każde państwo członkowskie powinno zapewnić, aby w 2020r. udział energii ze źródeł odnawialnych we wszystkich rodzajach transportu wynosił co najmniej 10% końcowego zużycia energii w transporcie.

Analizując wyniki przedstawione w raporcie GUS, dotyczące udziału odnawialnych żródeł w produkcji energii, można stwierdzić, iż na przestrzeni ostatniej dekady w początkowym okresie w latach 2007-2012 dynamika wzrostu była stosunkowo duża i wynosiła prawie 0,8 punktów procentowych (p.p.). W kolejnych trzech latach 2012-2015 wzrost ten był mniejszy i wyniósł prawie 0,3 p.p.. Kolejne lata według danych GUS to recesja w rozwoju energetyki odnawialnej, odnotowano spadki średnio o 0,38 p.p.



Źródło: (GUS, 2018)

Rys. 2. Udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w latach 2006–2017

Analizując powyższe dane nasuwa się więc pytanie, czy działania podjęte w ostatnich latach pozwolą istotnie zwiększyć produkcję energii ze źródeł odnawialnych tak, aby do roku 2020 ich udział w bilansie energetycznym wynosił 15%. Obecnie różne jednostki struktur państwa wdrażają programy promujące OZE jako jedno z wielu form do walki z zanieczyszczeniem powietrza. Na szeroką skalę wdrażane są projekty społeczne ("Czyste Powietrze - zdrowy wybór!" – program koordynowany przez Ministerstwo Środowiska) (Ministerstwo Środowiska, 2018) jak i współfinansujące modernizację systemów grzewczych oraz termomodernizację obiektów. Prace nad poprawą czystości powietrza Ministerstwo Środowiska podjęło już w 2008r. wdrażając program Ochrony Powietrza, który jest elementem polityki ekologicznej regionu. Stąd zaproponowane działania w poszczególnych regionach kraju mogą mieć inne priorytety.

Program ten wzmacnia działania i intensyfikuje sprawdzone programy, strategie. Innymi słowy rozwija realizację celów mikroskalowych oraz celów regionalnych i lokalnych. Działania te mają wspomóc zarówno zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza jak również ograniczyć wykorzystanie paliw kopalnych na rzecz stosowania odnawialnych źródeł takich jak biopaliwa stałe czy też pompy ciepła.

Analizując dane GUS dotyczące struktury źródeł produkcji energii odnawialnej (rys. 3) można stwierdzić, iż miks energetyczny w Polsce istotnie się różni się od modelu w Unii Europejskiej. W Polsce, w produkcji energii odnawialnej dominują biopaliwa stałe, które w bilansie energetycznym w 2015r. stanowiły 72,18% natomiast 2017r. - 67,87%. Ten stosunkowo niewielki spadek około 4% jest spowodowany wzrostem produkcji energii w oparciu o turbiny wiatrowe (wzrost o 40% - z 10,75% do 14,01%). Dość stabilną pozycję w produkcji energii odnawialnej, utrzymują w ostatnich latach biopaliwa ciekłe. Pozyskiwana energia z tego źródła stanowi około 10% energii OZE. Inne źródła energii odnawialnej stanowią niewielki udział tj. w 2015r. biogaz - 2,6%, energia wody - 1,8%. Dane z GUS wskazują, iż w 2017r. udział tych źródeł wzrósł

średnio o 1-2%. Odnosząc te dane do średnich UE można zauważyć, iż biopaliwa stałe również dominują, ale ich udział wynosi około 45%.



Źródło:(GUS, 2017)

Rys. 3. Struktura pozyskania energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych; a) w UE, b) w Polsce



Źródło:(GUS, 2017)

Rys. 4. Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych w przeliczeniu na 1 mieszkańca w podziale na poszczególne nośniki energii; a) w UE, b) w Polsce

Na uwagę zasługuje znaczące miejsce pozostałych źródeł takich jak energia wody czy też biogazu i energii słonecznej. Różnice te są podyktowane charakterem geograficznym poszczególnych państw UE, jak również gospodarczymi zaszłościami historycznymi.

Analizując dane dotyczące struktury zużycia energii przez statystycznego mieszkańca Polski oraz krajów UE można zauważyć, iż struktura źródeł jest odmienna (rys. 4). W Polsce dominuje węgiel (32%) jako źródło energii dla statystycznego mieszańca, natomiast w krajach UE udział węgla w miksie energetycznym jest minimalny i stanowi niecałe 3%.

W krajach UE dominującymi źródłami są kolejno gaz ziemny, energia elektryczna oraz biopaliwa stałe, które stanowią około 15%.

Biorąc pod uwagę fakt, iż najlepszym zamiennikiem energii z węgla, uwzględniając aspekty techniczne oraz organizacyjnie, jest gaz ziemny oraz biopaliwa stałe należy przypuszczać, iż w perspektywie kolejnych lat, te źródła będą intensywnie się rozwijać.

Rozwój technik spalania biopaliw stałych umożliwia obecnie uzyskanie wysokiego komfortu użytkowania dzięki zautomatyzowaniu procesów technologicznych. Dlatego też, w ostatnich trzech latach sprzedaż urządzeń do spalania biopaliw stałych (peletów, brykietów czy też zrębków) istotnie wzrosła, co świadczy o dużym zainteresowaniu klientów nowych obiektów jak i tych modernizujących istniejące (InstalReporter 2018).

Odnosząc te dane do wyzwań jakie Polska postawiła naszemu systemowi energetycznemu w kolejnych latach wydaje się, iż niezbędne jest rozwijanie niszowych źródeł energetycznych, ale co ważniejsze utrzymanie dominującej roli biopaliw stałych. Doświadczenia jednostek energetycznych zdobytych w ostatnich latach związanych ze spalaniem oraz współspalaniem biomasy w instalacjach dużej mocy sprawiają, iż duża część instalacji jest przygotowana aby kontynuować a nawet istotnie zwiększyć wykorzystanie tych paliw w produkcji ciepła oraz energii elektrycznej.

## 2.3. Perspektywy rozwoju plantacji drzew szybkorosnących

Jedną z metod zwiększenia podaży biomasy na cele energetyczne jest pozyskiwanie biomasy z plantacji energetycznych drzew szybkorosnących. Plantacje drzew pozwalają na cykliczne pozyskanie biomasy drzewnej czyli ekonomicznego, ekologicznego paliwa dla niskoemisyjnej energetyki (Krzyżaniak i in., 2016; Kwaśniewski i in., 2006; Niemczyk i in., 2018; Szczukowsk i in., 2011). Biorąc pod uwagę fakt, iż na terenie całego kraju dostępne są tereny rolne wyłączone z typowej produkcji rolnej, istnieje stosunkowo duży potencjał terenów do uprawy roślin energetycznych. Uprawy tych roślin mogą być prowadzone na terenach zdegradowanych, w wielu przypadkach okresowo zalewanych (uprawy wierzby wiciowej topoli) jak również w bezpośrednim sąsiedztwie uciążliwego przemysłu (ciągi komunikacyjne, duże zakłady przemysłowe- przemysł ciężki) (Rodrigues i in., 2015; Rugani i in., 2015; Staliński, 2016). Jak wskazują specjaliści jedną z najważniejszych barier ograniczającą możliwości pozyskiwania biomasy z upraw energetycznych jest ochrona prawna obszarów cennych przyrodniczo (parki narodowe, rezerwaty, parki krajobrazowe, obszary chronionego krajobrazu, stanowiska dokumentacyjne, użytki ekologiczne, zespoły przyrodniczo-krajobrazowe oraz pomniki przyrody) (Parzych, 2015).

Jak wykazali Szczukowski i in. (2012) w Polsce pod uprawy roślin energetycznych, uwzględniając warunki przyrodnicze oraz gospodarcze, można przeznaczyć około 1 mln ha.

Najwięcej terenów potencjalnie możliwych do przeznaczenia pod uprawy energetyczne znajduje się w województwie zachodniopomorskim i mazowieckim (około 100 tys. ha). Natomiast największy udział upraw na cele energetyczne w strukturze ogólnej użytków rolnych znajduje się w województwie podkarpackim – ponad 10%.

Podobne szacunki oraz prognozy stawia wielu innych autorów podkreślając konieczność ochrony klasycznej produkcji rolnej jak i sektorów przemysłu drzewnego (związanych surowcem z przemysłem leśnym). Uprawy roślin wieloletnich (gatunków drzewnych oraz traw i bylin) w perspektywie kolejnych lat mogą skutecznie stworzyć stabilne źródła biomasy dla sektora energetycznego, nie konkurując z innymi działami gospodarki bazującymi na terenach rolniczych (Krzyżaniak i in., 2016; Niemczyk, 2016).

## 2.4. Procesy rozdrabniania biomasy

Procesy rozdrabniania surowców roślinnych towarzyszyły człowiekowi od bardzo dawna. W wyniku rozwoju rolnictwa, produkcji masowej surowców roślinnych niezbędne było opracowanie systemów technicznych mających na celu między innymi rozdrabnianie materiałów roślinnych. Największy rozwój technik i technologii pomniejszania wielkości cząstek można zaobserwować przy produkcji żywności oraz pasz. Wraz z rozwojem cywilizacji intensywnie rozwija się sektor przetwarzania surowców roślinnych na cele inne niż żywnościowe np. przemysłowe (Bochtis i in., 2019). W zależności od cech jakie chcemy uzyskać w wyniku prowadzenia procesu rozdrabniania (pocięty surowiec, poszarpany, zgnieciony, itd.) dobieramy odpowiednie urządzenie wyposażone w dany system techniczny.

W wyniku konieczności podnoszenia jakości przetwarzanych surowców oraz ograniczania energochłonności procesów, prowadzone są liczne badania obejmujące między innymi problematykę cięcia czy też rozdrabniania surowców roślinnych (Maughan i in., 2012, Azadbakht i in., 2015, Gan i in., 2018).

Procesy te są kluczowe w technologiach przetwarzania surowców roślinnych, gdzie wielkość oraz jakość cząstek jest kluczowa w kolejnych procesach. Jednym z istotniejszych procesów, gdzie jakość cząstki oraz jej właściwości fizyczne mają bardzo ważne znacznie, jest suszenie oraz magazynowanie. Surowce roślinne z biomasy jednorocznych roślin zielnych jak i gatunków drzewiastych bardzo często ze względu na wymogi kolejnych procesów muszą być dosuszone. Na dynamikę tego procesu największe znacznie mają cechy fizyczne surowca do których zaliczamy między innymi wielkość cząstki oraz porowatość masy przetwarzanej.

Procesy rozdrabniania czy też mielenia mają kluczowe znaczenie w odniesieniu do uzyskiwanych parametrów produktu. Niezbędne jest bardzo często optymalizowanie nakładów energetycznych na realizację procesów rozdrabniania przy utrzymaniu lub podnoszeniu odpowiedniej jakości uzyskiwanego produktu. Są to zagadnienia bardzo trudne do jednoznacznego wskazania optymalnych rozwiązań (Krajnc i Dolšak, 2014; Kuljich, i in., 2013; Moradpour i in., 2016).

Rozdrabnianie biomasy stosuje się często przed procesami transportu celem zwiększenia gęstości nasypowej materiału, w celu zastosowania zautomatyzowanych systemów transportu wewnętrznego co w konsekwencji pozwala na obniżenie całkowitych kosztów transportu.

W zależności od struktury tkanek rośliny (zdrewniałe tkanki, pędy roślin jednorocznych) stosowane są sieczkarnie, rozdrabniacze czy też rębarki (Cocker-Maciejewska, 2007; Szymanek i in., 2015).

## 2.4.1. Procesy rozdrabniania biomasy zielnej

Procesy rozdrabniania biomasy zielnej bardzo często realizowane są w technologiach zbioru jednoetapowego lub wieloetapowego. Najbardziej obecnie popularną technologią, gwarantującą zachowanie odpowiedniej jakości przetwarzanego materiału (minimalizacja zanieczyszczeń mineralnych), jest zbiór jednoetapowy tj. połączenie procesu ścinania oraz rozdrabniania (silosokombajny, sieczkarnie samojezdne itp.). Jednakże ze względu na różne właściwości przetwarzanych surowców konstrukcja jak i parametry robocze poszczególnych sekcji wykonawczych są mocno zróżnicowane.

W tabeli 5 przedstawiono wybrane zagadnienia badawcze procesów cięcia i rozdrabniania materiałów roślinnych (jednorocznych) poruszane przez różnych autorów. W większości, w procesach rozdrabniania elementami roboczymi są noże o różnej konstrukcji. Prowadzone badania najczęściej obejmują aspekty oceny jakości pracy, nakładów energetycznych oraz wpływu danego procesu na środowisko. Prowadzone badania jednoznacznie wskazują, iż odpowiednie ukształtowanie noży roboczych (odejście od prostopadłych krawędzi ostrzy noży względem materiału) umożliwia obniżenie nakładów energetycznych jak i zwiększenie jakość powierzchni przecinanego materiału. Dodatkowo bardzo często drugim parametrem współzależnym do katów ostrzy noży jest prędkość robocza. Z jednej strony podniesienie prędkości cięcia wpływa na zwiększenie nakładów energetycznych układu napędowego, jednak odniesienie ich do efektów cięcia (np. w formie jednostkowych nakładów - J·m<sup>-2</sup>) uzyskujemy niejednokrotnie zmniejszenie całkowitej energochłonności procesu. Prędkości robocze przy których uzyskiwano optymalne wyniki zawierały się w przedziałach 30-60 m·s<sup>-1</sup>. Bardzo często parametry robocze oraz rozwiązania konstrukcyjne elementów roboczych są ściśle związane z właściwościami poszczególnych gatunków roślin co wymusza niejednokrotnie zastosowanie spersonalizowanych nastaw i rozwiązań konstrukcyjnych.

Tabela 5.

Prace badawcze dotyczące procesów rozdrabniania materiałów biologicznych niezdrewniałych

Zakres badań	Najważniejsze osiągnięcia	Źródło
Teoretyczne i eksperymentalne bada-	Badania laboratoryjne wykazały, że zużycie	(McRandal
nia procesu cięcia uderzeniowego	energii w grupach tnących łodyg trawy	i McNulty, 1978)
w warunkach wybranych do symulacji	i owsa słomy zmniejszyło się o około 25%,	
koszenia obrotowego źdźbeł traw.	gdy prędkość łopatek wzrosła z 20 do 60	
	$m \cdot s^{-1}$ .	
Celem pracy było sprawdzenie, czy	Wyniki wskazały krytyczną prędkość cięcia	(O'Dogherty
prędkości skrawania mogą być znacz-	w przedziale od 15 do 30 m·s <sup>-1</sup> , poniżej któ-	i Gale, 1986)
nie zmniejszone poniżej 80 do	rej cięcie stało się coraz bardziej nieefek-	
90 m s <sup>-1</sup> , stosowanej w praktyce.	tywne pod względem określonej energii cię-	
	cia. Stosunkowo niskie energie były	
	rejestrowane przy prędkości 5 do 10 m·s <sup>-1</sup> ,	

		/
Zakres badań	Najważniejsze osiągnięcia	Źródło
	ale łodygi pozostały niedocinane,	
	poszarpane.	
Analiza trzech rodzajów noży tnących	Ząbkowane ostrze wymagało mniej energii	(Gan i in., 2018)
pod względem zapotrzebowania na	odpowiednio 18,0 i 24,7% niż ostrze o kącie	
energię cięcia i rozdrabniania podczas	30 i 0°. Ząbkowane ostrze zwiększyło wy-	
zbioru Miscanthus Giganteus.	dajność zbioru z 1,25 do 2,23kg·h <sup>-1</sup>	
Analiza pięciu rodzajów noży kosiarki	Najlepsze wyniki energetyczno-wydajno-	(Kakahy i in.,
rotacyjnej podczas zbioru i rozdrab-	ściowe uzyskano dla interakcji kąt ostrza	2014)
niania części nadziemnych plantacji	noża 30° oraz prędkości 1830 obr min <sup>-1</sup> –	
batatów	pobór mocy 40 J.	
Analizowano proces cięcia buraka	Największą wartość siły uzyskano podczas	(Kusińska
ćwikłowego Beta vulgaris L. w wa-	cięcia nożem o kącie zaostrzenia 17,5°,	i Starek, 2014)
runkach laboratoryjnych. Parametrami	a najmniejsza podczas użycia noża o 2,5°.	
zmiennymi w doświadczeniu były: kat	Wraz ze wzrostem predkości przemieszcze-	
zaostrzenia noża 2,5; 7,5; 12,5 i 17,5°	nia noża siła cięcia malała. Najlepsza jakość	
oraz predkość jego przemieszczania	przecietych próbek otrzymano przy zastoso-	
$0.83, 1.66, 2.49, 4.15 \text{ i } 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .	waniu predkości wynoszacych 2.49	
	i 4.15 mm $\cdot$ s <sup>-1</sup> nożami o kacie zaostrzenia	
	2.5 i 7.5 °.	
Badania obeimowały określenie ener-	Wyniki wykazały, że wpływ wysokości	(Azadbakht i in.
gii potrzebnej do ciecia łodyg rzepaku	i wilgotności na energie ciecia jest znaczny	2015)
na różnych poziomach wysokości	ale ich wzajemne oddziaływanie nie jest	)
koszenia i wilgotności.	znaczące. Najwyższa energia ciecia wyno-	
	siła 1.1 kJ przy wilgotności słomy 25.5 %	
	i 10 cm wysokości ciecia. Minimalna ener-	
	gia ciecia wynosiła 0 76 kI dla wilgotności	
	11.6 % i 30 cm wysokości ciecja Predkość	
	ostrza wynosiła 2 64 m·s <sup>-1</sup> w momencie ciecia	
Badania obeimowały oznaczenie ener-	Wyniki wykazały, że na energie ciecja zna-	(Alizadeh i in
gij ciecja źdźbła ryżu w różnych stre-	czaco wnływaja strefy międzywezłowe i ce-	2011)
fach miedzuwezłowach Wekspery-	chy wymiarowe łodygi ryżu. Wystapiła wy-	2011)
mencie wykorzystano cztery pospolite	soce znacząca i dodatnia korelacia	
irańskie odmiany ryżu	nomiedzy energia ciecia i grubościa ścianki	
nanskie odimany ryzu	źdźbła oraz przekrojem łodygi ryżu Wyniki	
	wykazały również że energia ciecia źdźbła	
	ryżu w drugim międzyweźle została zmniej-	
	szona o średnio 32 5% w porównaniu z trze-	
	cia pozycia miedzyweźla	
Celem badań była ocena	Wykazano iż nachylenie ostrzy noży nowo-	(Toledo i in
jakości zmechanizowanych zbiorów	duie nainiższe zanieczyszczenie łodyg. Ze	2013)
trzciny cukrowej za pomoca pieciu	względu na wysokość cięcia, zabieg przy	2015)
konfiguracji mechanizmu ostrzy noży	użyciu zabkowanych ostrzy i normalnych	
konngaracji meenamzina osuzy nozy.	dysków (FSDN) pozwala uzyskać najlensze	
	efekty	
Badania miały na celu określenie za	Najniższa predkość dla wydajnego cięcia	(Toledo i in
chowania sie źdźbeł trawy i słomy	(nredkość krytyczna) dla trawy i modelu	2013)
nrzy cieciji ostrvmi i tenvmi ostrzemi	źdźbła słomy wynosiła 25-30 m·s <sup>-1</sup> Mini	2013)
przy predkościach od 5 do 35 m·s <sup>-1</sup>	malna energia ciecia na jednostke zawarto-	
pizy pięakościach od 5 do 55 lli 5.	ści suchej masy w trawie o ostrym ostrzu	
	ser sachej masy w nawie o osu ym osuzu	

Zakros hadań	Nojwożniejsza osiegniecja	Źródła
	wynosiła 55 mJ·mm <sup>-1</sup> . Przy prędkościach	210010
	ugięcie łodygi przed zakończeniem cięcia,	
	ska i wysoką energię cięcia do 400-500	
	mJ·mm <sup>-2</sup> dla trawy. Srednia siła maksy-	
	wynosiła 18 N·mm <sup>-1</sup> średnicy łodygi, i była 2,6 razy większa niż przy cięciu słomy.	
Badania obejmowały określenie ener- gii cięcia i siłę potrzebną przy cięciu łodyg grochu Pigeon z wykorzysta- niem dwóch ostrzy o różnych kątach.	Badania wykazały, że energia cięcia i siła skrawania były wprost proporcjonalne do przekroju poprzecznego i zawartości wilgoci w momencie zbioru pędów grochu. Energia	(Dange i in. 2011)
	cięcia była minimalna przy prędkościach około 2,28 i 2,91 m·s <sup>-1</sup> Dla odpowiednio 30 i 45°. Energia gwałtownie wzrosła gdy pręd- kość przekroczyła wartość 3,98 m·s <sup>-1</sup> .	
W tym badaniu materiałem badaw- czym były pędy róży. Po raz pierwszy oznaczono współczynnik odporności na zgniatanie, moduł gęstości masy i skuteczność cięcia.	Wyniki pokazały istotną zależność pomię- dzy kątem cięcia i modułem gęstości masy, współczynnikiem odporności na zgniatanie i wydajnością cięcia.	(Rabbani i in. 2015)
W tym badaniu zbadano wpływ pręd- kości skrawania, kąta ostrza i zamoco- wania noża w ustawieniu polowym. Aby zbadać ich wpływ na zużycie energii przy zbiorze miscanthusa, opracowano pojedynczą platformę głowicy tnącej.	Wyniki wskazują, że prędkość skrawania i ukośny kąt ostrza są bezpośrednio zwią- zane z wymaganiami mocy i wydajnością maszyn do zbioru miskanta. Ostrze noża pod kątem 40°, pracujący z prędkością 31,5 m·s <sup>-1</sup> miał najniższe zużycie energii, średnio 9,1 MJ ha <sup>-1</sup> . Podobnie, kąt pochyle- nia 30° pochłonął 16,9 MJ ha <sup>-1</sup> , natomiast ostrze proste 0° pochłonęło 23,1 MJ ha <sup>-1</sup> .	(Maughan i in. 2012)

Źródło: opracowanie własne

Dlatego też, w trosce o środowisko, minimalizację start procesowych konieczne jest prowadzenie prac projektowych oraz badań weryfikacyjnych mających na celu odpowiednią optymalizację procesu dla poszczególnych grup roślin.

Zrębkowanie (rozdrabnianie) jest podstawowym procesem w większości technologii przetwarzania biomasy drzewnej na cele energetyczne (Abdallah i in., 2011, 2014; Bello i Onilude, 2011; Gunayi in., 2006; Hellström i in., 2011; Hellstrom i in., 2009; Krajnc i Dolšak, 2014; Kuljich i in., 2013; Moradpour i in., 2016; Luigi Pari i in., 2013; Savoie i in., 2014; Szymanek i in., 2015; Uhmeier, 1995). Proces ten ma za zadanie zmniejszyć objętość jednostkową cząstek materiału wsadowego, jego wymiarów liniowych oraz zwiększyć powierzchnię właściwą. Procesy te realizowane są na skutek przyłożenia poprzez odpowiednie elementy robocze określonego układu sił, powodujących zniszczenie struktury materiału pokonując wiązania międzycząsteczkowe. Destrukcja materiału podczas rozdrabniania jest procesem dynamicznym, zależnym od wielu zmiennych związanych z aspektami technicznymi rozdrabniacza (rozwiązania konstrukcyjne urządzenia), zastosowaną technologią oraz w największym stopniu z właściwościami materiałów poddawanych procesowi podziału (Kuljich i in., 2013; Moradpour i in., 2016; Luigi Pari i in., 2013).

### 2.4.2. Procesy zrębkowania biomasy drzewnej

Procesy rozdrabniania, skrawania surowców drzewnych ze względu na ich znaczenie w procesach technologicznych były od bardzo dawna przedmiotem eksperymentów oraz różnych doświadczeń naukowych. Należy jednak pamiętać, iż początek związany jest z doświadczeniem i zebraną wiedzą w obróbce metali (Dresselhaus, 1966; Merchant, 1945a, 1945b). Prace naukowe oraz zdobyte doświadczenie okresu I i II wojny światowej dały mocne podstawy rozwoju sektora obróbki i przetwarzania drewna (Jędrzejewski, i in., 1966; Pachlewski, 1964). Analizując doniesienia naukowe z ostatnich lat z zakresu teorii rozdrabniania jak i obróbki drewna należy zauważyć, iż bazują oni na teoriach opracowanych w zagadnieniach dotyczących obróbki metali (Ghodki i Goswami, 2019; Gigler i in., 2000; Kanakabandi i Goswami, 2019; McRandal i McNulty, 1978). W szczególności osiągnięcia obróbki skrawaniem dały mocne podstawy do rozwoju maszynoznawstwa przemysłu drzewnego (Jędrzejewski i in., 1966; Pachlewski, 1964), co umożliwiło uzyskanie wysokiego stopnia automatyzacji procesów produkcji.

Dlatego też sam proces zrębkowania drewna wielkowymiarowego jest już stosunkowo dobrze poznany. Obecnie problematyka w badaniach związana jest między innymi z doborem materiałów elementów roboczych (dobór stopu metali, obróbka cieplnochemiczna itp.) oraz uzyskiwanie w większym zakresie powtarzalnych jakościowo zrębków. Rozwijający się przemysł papierniczy jak również sektor produkcji płyt drewnopochodnych, wymusza realizację prac optymalizacyjnych, uszczegółowienia parametrów zrębków określając między innymi stosunek grubości do ich długości (od 1:4 do 1:10). Dlatego też prowadzone prace badawcze oraz doświadczenia praktyczne ukierunkowane są na poszukiwanie czynników wpływających na prawidłowy przebieg procesu (minimalizacja stanów pracy poza zakresem). Wiele prezentowanych prac wskazuje, iż największy wpływ na energochłonność procesu, geometrię zrębków ma ustawienie elementów skrawających w procesie zrębkowania (Reczulski, 2015, 2016). Odpowiednie ustalenie szczeliny roboczej, kątów natarcia oraz przyłożenia, geometria ostrza noża jak i sama prędkość skrawania mają istotny wpływ na parametry procesu i produktu.

Obecnie do zrębkowania biomasy leśnej wykorzystywane są głównie dwa systemy techniczne (rys. 5). Pierwszy z nich oparty jest o toporowy układ skrawania zwany tarczowym. Natomiast drugi to bębnowy z usytułowanymi nożami na obwodzie walca roboczego. Układ tarczowy charakteryzuje się stosunkowo prostą konstrukcją i jest stosowany w małych oraz średnich urządzeniach. System bębnowy charakteryzuje się wysoką jakością pracy i jest stosowany w średnich i dużych maszynach do zrębkowania drewna.



Źródło:(Frączek i in., 2014)

Rys. 5. Rębaki, a) z systemem tarczowym, b) z systemem bębnowym

Należy zwrócić uwage, iż oba te systemy bazuja na nożowym systemie roboczym wraz z towarzyszacymi zjawiskami (pekanie, rozłupywanie itp.). Zrebkowanie nożowe, bedace wynikiem współpracy noża ruchomego oraz nieruchomego zwanego stalnica, może przebiegać w kilku wariantach. Proces ciecia materiału drzewnego odbywa sie w wyniku oddziaływania szeregu sił. Wartość i kierunek oddziaływania tych sił jest zależny od usytuowania noży tnących, wzajemnego położenia i kształtu krawędzi tnących noży ruchomych i nieruchomych, szczeliny miedzy nożami oraz od dynamiki ruchu elementów czynnych (rys. 6). Predkość obrotowa wirnika czy też liniowa elementów roboczych ma bardzo duży wpływ na wartość siły deformująco-tnącej materiał nadawy, który znajdzie się pomiędzy nożami tnącymi. Sposób deformacji zależy od wartości kąta ostrza noża ruchomego ( $\beta$ ), przy małej jego wartości siły  $(F_{RN})$  oraz napreżenia deformujace przyjmuja niższe wartości. Dynamika tego oddziaływania zależy także od predkości samego cięcia. Analizując przebieg rozdzielania nadawy, można także wyróżnić siłę tarcia zrębka ( $F_T$ ) o powierzchnię natarcia noża ruchomego, której wartość zależy od współczynnika tarcia (nóź-materiał) oraz od właściwości mechanicznych rozdrabnianego materiału. Ważne znaczenie dla określenia siły wypadkowej ma siła rozdzielająca (przecinająca strukturę drewna), potrzebna do podziału tego materiału, który znajdzie się pod krawędzią noża tnącego (siła pokonująca opory przecinania materiału –  $F_{RP}$ ). Jej wartość zależy od rodzaju materiału, głównie jego sztywności i odporności na udarowe pękanie. Wspomniane siły zależą w największym stopniu od właściwości przetwarzanego materiału, ale ich proporcje są uwarunkowane od geometrii układu zrębkującego.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 6. Schemat procesu zrębkowania z widocznymi siłami reakcji materiału względem noża zrębkującego;  $F_{RP}$  – siła oporów przecinania struktury drewna,  $F_T$  – siła tarcia układu materiał – nóż,  $F_{RN}$  – siła nacisku zrębka na powierzchnię natarcia noża,  $\gamma$  – kąt natarcia,  $\beta$  – kąt ostrza noża,  $\alpha$  – kąt przyłożenia,  $\varepsilon$  – kąt pochylenia pędów

Typowy układ zrębkujący, przedstawiony na rysunku 6, jest opisany następującymi kątami:

- $\beta$  kątem ostrza noża,
- $\alpha$  kąt przyłożenia.

Suma tych trzech kątów równa jest 90°. Wartości tych kątów (z zalecanego zakresu), w prowadzonych doświadczeniach naukowych jak również w istniejących rynkowych rozwiązaniach, uzależnione są w największym stopniu od oczekiwanych właściwości zrębków. Z przeprowadzonej analizy literaturowej wynika, iż w największym zakresie ulega zmianom kat  $\beta$  (ostrza noża), którego wartość zawiera się w przedziale 29 - 45°. Kąt  $\alpha$  (natarcia) przyjmuje najmniejsze wartości od 0 do11°. Jego wartość jest związana z charakterem procesu. W przypadku intensywnej pracy przy zrębkowaniu drewna na długie zrębki, wartość kąta przyjmuje wyższe wartości. Wartość tego kąta można wstępnie obliczyć z zależności:

$$\alpha_{min} = arctg \frac{z \cdot l_z}{2\pi \cdot r_z}$$

gdzie:

liczba noży zrębkujących (-),

- *lz* długość zrębkowania (odległość między płaszczyznami cięcia) (mm),
- *rz* promień zrębkowania (w rębarkach tarczowych odległość od osi obrotu dysku do połowy długości krawędzi tnącej, w rębarkach bębnowych- odległość krawędzi tnącej od osi obrotu) (mm).

Odchylenie płaszczyzny noża od powierzchni cięcia o kąt  $\alpha$  pozwala zminimalizować siły tarcia w trakcie efektywnego cięcia. Natomiast wartość kąta  $\gamma$  jest różnicą kąta 90° oraz kąta  $\beta$  i  $\alpha$ . Wraz ze spadkiem wartości kąta natarcia wzrasta wartość sił oddziaływania materiału na powierzchnię boczną noża  $F_{RN}$ . Uzyskiwanie drobnej zrębki podczas zrębkowania jest w największym stopniu zasługą zmniejszonej wartości kąta  $\gamma$  ( $\gamma = 90 - \beta - \alpha$ ) (Abdallah i in., 2011, 2014, Savoie i in., 2014; Szymanek i in., 2015).

Dodatkowo w celu zwiększenia skuteczności procesu cięcia (zmniejszenie nakładów energetycznych, zwiększenie stopnia rozdrobnienia zrębków) kierunek podawania materiału może być zmodyfikowany. Najczęściej definiujemy go dwoma kątami:

- ε kąt na pionowej płaszczyźnie między poziomą płaszczyzną, a osią główna zrębkowanego materiału (kierunkiem podawania materiału).

Zwiększenie wartości kąta  $\varepsilon$  oraz zmniejszenie  $\rho$  wpływa na redukcję wypadkowej siły cięcia, a kształt uzyskiwanych zrębków, w rzucie na płaszczyznę, przypomina rąb. Najczęściej w urządzeniach rynkowych zastosowanie znajduje zmiana kąta  $\varepsilon$  pochylenia podawania materiału w płaszczyźnie pionowej, który przyjmuje wartości z przedziału 0-45°. Wartość kąta  $\rho$  ustalona jest najczęściej na 90°.

Procesy rozdrabniania biomasy drzewnej są od wielu lat przedmiotem badań naukowych jak i wyzwaniem dla inżynierów i konstruktorów. Analizując literaturę przedmiotu można zauważyć, iż niektóre prace koncepcyjne z przed wielu lat doczekały się niedawno wdrożeń do praktyki (Eriksson, i in., 2013). Na uwagę zasługują rozwiązania zestawione poniżej, które w większości tworzone były do rozdrabniania drewna małowymiarowego (kilkuletnie pędy drzew) eliminując wysokoudarowe oddziaływanie elementów roboczych na rzecz precyzyjnego przecinania czy też rozłupywania. Przedstawione rozwiązania opracowane były w latach 1960-1988 (rys. 7).



Źródło: na podstawie (Eriksson, i in., 2013)

Rys. 7. Schematy rozwiązań koncepcyjnych do rozdrabniania biomasy drzewnej; a) układ bębnowy, b) ślimakowy, c) podwójnie wstęgowy, d) sierpowy, e) recykler nożowy, f) walcowo-nożowy

Bardzo ciekawą koncepcję opracował zespół badaczy pod kierownictwem Rodgera Aroli (Arola i in., 1983; Arolai in., 1991) (rys. 8 i 9). Prezentowane rozwiązanie pozwala na pozyskiwanie rozdrobnionego drewna, które może być bezpośrednio wykorzystywane w systemach energetycznych. Należy jednak zaznaczyć, iż wielkość uzyskiwanych cząstek drewna jest znaczna i zawiera się w przedziale 50-110 mm. Najważniejszą cechą tego rozwiązania jest niska energochłonność procesu rozdrabniania dzięki odcinaniu bezudarowemu fragmentów materiału (brak uderzeń krawędzi ostrza o przetwarzany materiał). Według przedstawionych wyników testów, energochłonność procesu zawiera się w przedziale 0,65–3,3 kWh·t<sup>-1</sup> dla drzew gatunków miękkich (osika, topola) oraz średnich (klon). Rozwiązanie to testowano na drewnie o średnicach 15-25 cm jak i na pędach kilkuletnich 2-6 cm (rys. 9). Klasyczne rozwiązania oparte o typowe układy zrębkujące charakteryzują się energochłonnością na poziomie 37-40 kWh·t<sup>-1</sup> (Różański i Jabłoński, 2012). Rozwiązanie to wskazuje na możliwość uzyskania maszyn przetwarzania biomasy, które charakteryzują się niską energochłonnością. Należy jednak pamiętać, aby nakłady energetyczne zawsze powiązać z jakością uzyskiwanych zrębków w celu prowadzenia oceny całościowej danej technologii.



Źródło: opracowanie własne na podstawie (Arola i in., 1991)

Rys. 8. Schemat rębarki kawałkującej z tarczowym systemem tnącym wyposażonym w noże wstęgowe 1 – tarcza, 2 – ogranicznik, 3 – nóż wstęgowy, 4 – rolki podające, 5 – stalnica, 6 – zrębkowany materiał



Źródło:(Arola i in., 1991)

Rys. 9. Widok rębarki kawałkującej z nożami wstęgowymi

Bardzo ciekawe badania prowadzone były przez zespół szwedzki (Nyström, i in., 2018), który analizie poddał proces zrębkowania drewna iglastego w warunkach laboratoryjnych metodą quasi-statycznej oraz w układzie dynamicznym na prototypowej rębarce tarczowej. Materiałem w badaniach było drewno sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). W prowadzonych testach zastosowano cztery zmienne ostrza noży o kątach 34°, 39°, 44° oraz 49°. Badania te wykazały, iż istnieje silne powiązanie i zbieżność pomiędzy energochłonnością procesu zrębkowania metodami quasi-statycznymi oraz dynamicznymi. Wykazano, iż średnie zapotrzebowanie energetyczne wzrastało wraz ze wzrostem wartości kąta ostrza ( $\beta$ ) i zawierało się w przedziale od 62 do 128 kJ·m<sup>-2</sup> dla kątów ostrza ( $\beta$ ) od 34 do 49°. Zmiany energochłonności dla kątów w przedziale 34-39° są niewielkie, dopiero wartości powyżej 44° powodują gwałtowny wzrost zapotrzebowania energetycznego.

Wyniki tych badań upoważniają do postawienia założeń, iż podobnie jak w przypadku drewna klasycznych gatunków, przy zrębkowaniu pędów drzew szybkorosnących (w tym wierzby) zachodzić będą podobne relacje między wynikami badań quasi-statycznych oraz dynamicznych.

### 2.4.3. Procesy zrębkowania biomasy drzew szybkorosnących

Proces przetwarzania biomasy drzew szybkorosnących, ze względu na swoją złożoność techniczno-surowcową, jest od wielu lat przedmiotem badań naukowych. W przypadku gatunków drzew szybkorosnących, obecnie coraz to szerzej wykorzystywanych w energetyce, badania procesu rozdrabniania oparte zostały na dotychczasowych osiągnięciach technicznych sektora przemysłu drzewnego oraz rolnego.

W większości badań zaproponowano dwa podejścia metodyczne: pierwsze związane było z zastosowaniem technik oraz technologii stosowanych przy produkcji zrębków przemysłowych, drugie - zastosowanie rozwiązań stosowanych do pozyskiwania rozdrobnionej masy zielonej na cele paszowe lub dla sektora biogazowego.

Dlatego też, dotychczas prowadzone badania dotyczą problematyki przebiegu procesu rozdrabniania w oparciu o wspomniane techniki. W tabeli 6 przedstawiono problematykę badawczą związaną z rozdrabnianiem drzew szybkorosnących dla celów energetycznych.

Badania procesu zrębkowania materiału małowymiarowego są dopiero wstępnie rozpoznane (Adamczyk i in., 2007; Frączek i Mudryk, 2006, 2007; Frączek i in., 2009). W pracach realizowanych przez Frączka i in. (2009) podjęto próby zrębkowania wierzby na sieczkarni toporowej. Rozdrabniano pędy wierzby o średniej średnicy przy podstawie 24 mm oraz o wilgotności w przedziale12-51%. Uzyskiwane zrębki charakteryzowały się dużą jednorodnością, a określone zapotrzebowanie energetyczne wyrażone w nakładach energii na jednostkę masy zrębków wynosiło 0,65 kWh·t<sup>-1</sup> dla wilgotności 51% oraz 2,7 kWh·t<sup>-1</sup> dla 12%. Wykazano, iż możliwe jest wykorzystanie tych urządzeń lub o podobnej konstrukcji do zrębkowania pędów wierzby, dzięki czemu uzyskujemy wysoką jakość cięcia oraz obniżenie nakładów energetycznych. Tabela 6.

Prace badawcze dotyczące procesów rozdrabniania drzew szybkorosnących na cele energetyczne

Zakres badań	Najważniejsze osiągnięcia	Źródło
Celem badań było określenie ob- ciążenia energetycznego prototy- powej rębarki RD w czasie roz- drabnia drewna sumaka octowego <i>Rhus typhina</i> L. Wyznaczono pobór mocy i obciążenie momen- towe badanej rębarki, a także cha- rakterystyczne parametry rozdrab- nianego surowca drzewnego.	Pomiary momentu na wale napędowym wyka- zały iż obciążenie na biegu jałowym wynosi 40 Nm. Wzrost momentu obrotowego podczas zrębkowania był proporcjonalny do wielkości przekroju zrębkowanych pędów. Dla gałęzi o grubościach do 40 mm maksymalny pobór momentu wyniósł 250 Nm, dla gałęzi o grubo- ści średniej 45 mm - 380 Nm, dla 75 mm - 750 Nm a dla gałęzi o grubości około 120 mm - 1400 Nm. Moc jaką należy dostarczyć jest pro- porcjonalna do momentu obrotowego i dla ga- łęzi średnicy do 40 mm pobór mocy wyniósł 2,6 kW, a dla najgrubszych konarów -120 mm - pobór mocy wyniósł 29,8 kW.	(Adamczyk i in. 2007)
Zakres przedstawionych wyników związany jest z zagadnieniami obejmujące problematykę techno- logii zbioru biomasy pozyskiwanej z roślin energetycznych.	Scharakteryzowano drzewa i krzewy krótkiej rotacji, trawy i byliny, których uprawa jest ukierunkowana na potrzeby energetyczne. Prze- analizowano stan wiedzy z zakresu dostępnych technologii zbioru oraz specyficzne cechy kon- strukcyjne maszyn do ścinania roślin i rozdrab- niania materiału przeznaczanego do produkcji paliw formowanych. Na tle światowej oferty maszyn do zbioru roślin energetycznych w pracy zaprezentowano autorskie rozwiązanie konstrukcyjne ciągnikowej sieczkarni, które zgłoszono do Urzędu Patentowego	(Lisowski, 2010)
Zakres badań – analiza eksploata- cyjna typowych dostępnych tech- nik i technologii do zbioru wierzby z plantacji celowej – 3 letniej.	Wierzba uprawiana w krótkiej rotacji zbierana powinna być od listopada do kwietnia. W przy- padku małej skali wierzba może być zbierana jako całe pędy i rozdrabniana po suszeniu la- tem. W przypadku dużych plantacji najlepiej jest zastosować zbiór jednoetapowy z procesem zrębkowania a materiał dostarczać prosto do odbiorcy. Maszyny do zbioru na dużą skalę po- winny być wyposażone w gąsienice, zwłaszcza na plantacjach podatnych na uszkodzenie gleby.	(Pieter, 2012)
W pracy przedstawiono wyniki doświadczeń związanych z metodą zrębkowania topoli oraz sezono- wania zrębków.	Zawartość wilgoci i rozkład wielkości cząstek są ważnymi cechami paliwa drzewnego. Ana- liza regresji czasu przechowywania i wilgotno- ści wykazała, że temperatura powietrza jest głównym czynnikiem wpływającym na proces suszenia. Zbiór dwuetapowy i rozdrabniacz bębnowy zapewniały najlepszą jakość paliwa.	(Luigi Pari i in. 2013)

Zakres badań	Najważniejsze osiągnięcia	Źródło
Badania obejmowały testy stan- dardowego rozdrabniacza bębno- wego w którym poddawano zrabo- waniu rośliny topoli (same pędy oraz gałęzie) w celu określenia wpływu wielkości zrębka i części drzewa na wydajność maszyny.	Rozdrabnianie pędów wymagało dostarczenie do rozdrabniacza zwiększonej mocy na pozio- mie 231 kW, podczas gdy zrębkowanie gałęzi wymagało około 120 kW. Wydajność przy zrębkowaniu samych pędów też była dwukrot- nie większa w porównaniu do gałęzi -odpo- wiednio 25 i 11t·h <sup>-1</sup> drewna suchego. W konse- kwencji, jednostkowe zużycie paliwa na jednostkę zrębki z gałęzi było o 15% niższe w porównaniu ze zrębkami z pędów tj. odpowied- nio 0,61 i 0,72 1·m <sup>-3</sup> . W przypadku zrębkowania dużych ilości gałęzi zaleca się modyfikację układu podawania (szersza gardziel oraz dodat- kowe rolki minimalizujące siły tarcia na ścian- kach bocznych).	(Assirelli i in. 2013)
W pracy przeprowadzono do- świadczenia zbioru topoli różnymi urządzeniami zaliczanymi do dwóch technologii.	Przedstawiono zalety i wady dwóch systemów wraz z analizą efektywności wskazując ewolu- cję maszyn na przyszłość. Scharakteryzowano również nowe systemy, które wykazują intere- sujący potencjał przyszłościowy, jak produkcja bel lub rozwój małych maszyn do zbioru agre- gatowanych z ciągnikami rolniczymi.	(Santangelo i in. 2015)
Celem tej pracy było określenie energii i emisji CO <sub>2</sub> podczas pracy różnych typów rębaków używanych w rozdrabnianiu bio- masy z plantacji topoli. Wszystkie maszyny zostały przetestowane na dwóch różnych surowcach: gałę- ziach (wierzchołkach drzew i bio- masy produkowanych przez vSRC) i całych drzewach (bio- masa produkowana przez SRC).	Przeprowadzone prace pozwoliły określić zuży- cie paliwa które mieściło się w przedziale od 14,36 do 59,52 l·godz. <sup>-1</sup> , a zużycie energii zmieniało się odpowiednio od 0,92 do 0,62 MJ·Mg DM <sup>-1</sup> . Ponadto, średnie wartości emisji wynosiły16.40 – 10,80 kgCO <sub>2</sub> ·Mg <sub>DM</sub> <sup>-1</sup> . Bada- nia wykazały również, iż bardziej efektywną technologią jest zbiór jednoetapowy.	(Manzone, 2015)
Zakres prac obejmował analizę procesu zębkowania surowca świeżego oraz sezonowanego 12 miesięcy.	Wydajność rozdrabniacza, przy zmniejszeniu wilgotności, spadła z 72 do 56 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> dla pędów a dla gałęzi z 30 do 21 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> . Jakość zrębek uległa degradacji wraz z okresem przechowy- wania pędów. Udział cząstek drobnych < 3,15 mm wzrósł czterokrotnie, osiągając udział 11% i 23% masy odpowiednio dla zręb- kowanych pędów i gałęzi.	(Pochi, i in. 2015)
W pracy dokonano oceny produk- tywności i jakości pracy różnych typów maszyn do rozdrabniania biomasy z plantacyjnych upraw topoli. Maszyny były testowane przy użyciu tylko jednego gatunku drzewa (topoli) i dwóch różnych	Badania te wykazały, iż wydajność urządzeń jest podobna wg. przyjętej metodologii obli- czeń. Jednakże uzyskano różne wyniki dla jako- ści zrębków. Rozdrabnianie całych drzew umożliwiło uzyskać lepszej zrębki. Dodatkowo typowe rębaki pozwoliły na uzyskanie lepszej jakości zrębki w stosunku do rozdrabniaczy.	(Manzone i Balsari, 2015)

Zakres badań	Najważniejsze osiągnięcia	Źródło
sortymentów: gałęzi i całych drzew.	Uzyskane wyniki wskazują, że wydajność urzą- dzenia jest powiązana z mocą silnika, a średnica pędów surowca może mieć istotny wpływ na ja- kość rozdrobnionej biomasy.	
W tezie badawczej założono że odpowiednie dostosowanie sys- temu podawania jak i odbioru roz- drobnionej masy przyniesie zna- czące efekty pod względem wydajności, zużycia oleju napędo- wego oraz jakości zrębków.	Badanie potwierdziło przyjęte założenia pod- czas testu w kontrolowanym eksperymencie. Badania wykazały, że rodzaj materiału (topola, kasztan) ma dominujący wpływ na wszystkie badane parametry, podczas gdy sposób podawa- nia nie miał żadnego wpływu na parametry. Na- tomiast ustawienie układu odbioru zrębków ma znaczący wpływ i oferuje duży potencjał dla zwiększenia efektywności przetwarzania bio- masy drzewnej.	(Spinelli i in. 2016)
Celem badania była ocena produk- cji ośmiu różnych gatunków roślin z plantacji oraz jakości uzyska- nych zrębków z pędów świeżych oraz sezonowanych.	Wykazano plon badanych roślin (suchej bio- masy) na poziomie 4,97 - 14,38 Mg·ha <sup>-1.</sup> rok <sup>-1</sup> , średnia wydajność 9 Mg·ha <sup>-1.</sup> rok <sup>-1</sup> . Analiza roz- kładu wielkości cząstek wykazała że niezależ- nie od gatunku i systemu zbioru, najbardziej re- prezentowany rozmiar analizowanych zrębków wynosił od 45 do 3 mm. Rozdrabnianie podsu- szonych roślin prowadzi do zmniejszenia ilości zrębków w tej frakcji i wzrost większego roz- miaru i ponadwymiarowego.	(Faugno i in., 2017)
Badania dotyczyły określenia wskaźników eksploatacyjnych maszyny do zbioru pędów topoli wraz z analizą ekonomiczną	Zbieracz pędów Stemster osiągnął średnią wydajność 26 Mg·h <sup>-1</sup> . Koszt zbioru wahał się od 7 do 22 €·Mg <sup>-1</sup> . Ograniczona zwrotność na uwrociach znacznie zmniejsza wydajność urzą- dzenia. Obsada plantacji była ujemnie skorelo- wane z kosztami zbiorów. Różnice między genotypami topolowymi znacząco wpłynęły na wydajność procesu zbioru.	(Vanbeveren i in. 2018)

Źródło: opracowanie własne

Zrębki z plantacji drzew szybkorosnących charakteryzują się niekorzystną, wysoką wilgotnością na poziomie 50-55%. Najczęściej uzyskane zrębki charakteryzują się długością w przedziale 20-40 mm co powoduje, iż w procesach magazynowania w formie pryzm dochodzi do powstawania procesów zagrzewania i rozwoju niekorzystnych grzybów i bakterii. W związku z powyższym, podjęte zostały prace nad maszynami, które pozwalają zrębkować (kawałkować) przetwarzany materiał na długość ponad 40 mm. Zrębki o takiej długości tworzą masę o dużej porowatości, a tym samym ułatwiają transport ciepła oraz wody na zewnątrz w okresie magazynowania, co w konsekwencji zapobiega przed procesami samozagrzewania, a tym samym przed rozwojem grzybów, bakterii. Jedne z pierwszych prac dotyczących takich rębarek podjęto już w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Opracowany prototyp rębarki testowano między innymi na cienkich pędach topoli formowanej w wiązki (Arola i in., 1991). Maszyna ta, podobnie jak wcześniej prezentowana sieczkarnia toporowa, charakteryzuje się dobrą jakością cięcia (elementy robocze nóż – stalnica pracują w tzw. kontakcie bezpośrednim). Przykładowo nakłady energetyczne przy zrębkowaniu pędów topoli wynoszą 0,6 kWh·t<sup>-1</sup>, i są porównywalne do nakładów przy zrębkowaniu wierzby na sieczkarni toporowej 0,65 kWh·t<sup>-1</sup>.

Biorąc pod uwagę znaczenie cech fizycznych zrębków biomasy w procesach technologicznych związanych z produkcją biopaliw stałych czy też ich przetwarzaniem termicznym wydaje się być konieczne lepsze poznanie procesu zrębkowania.

Sterowanie jakością uzyskiwanych zrębków w procesie wstępnego rozdrabniania, jako zbioru cech preferowanych w danym procesie technologicznym, wymaga znajomości podstaw procesu cięcia tego rodzaju materiałów. Pędy drzew uprawianych w szybkiej rotacji charakteryzują się odmiennymi właściwościami fizycznymi (w szczególności mechanicznymi) w stosunku do drewna wielkowymiarowego.

Tak więc, w celu poznania oraz opisania procesu rozdrabniania (poprzez cięcie materiału) oraz interakcji występujących pomiędzy różnymi czynnikami (związanymi z materiałem oraz procesem), niezbędne jest przeprowadzenie badań ujmujących problem w skali "mikro" tzn. analizy procesu cięcia pojedynczych pędów drzew (badania w skali quasi-statycznych) jak również weryfikacji w skali makro (metoda dynamiczna- rębarka).

## 2.5. Parametry rozdrobnionych materiałów roślinnych

Jakość zrębków opisana została wieloma parametrami fizycznymi oraz chemicznymi. Do najważniejszych należy zaliczyć geometrię zrębków oraz ich udział w poszczególnych przedziałach wymiarowych, zawartość wody oraz popiołu. Parametry energetyczne są traktowane jako cecha informacyjna i wynika z jakości biomasy opisanej w/w parametrami. Według dokumentu normatywnego PN-EN ISO 17225-4 (Tabela 7) zaproponowane zostały cztery klasy jakościowe zrębków dla energetyki, dwie klasy A (A1, A2) oraz dwie B (B1 i B2) (EN ISO 17225-4, 2014).

Zrębki klasy A1 i A2 oznaczają drewno pierwotne i nietraktowane chemicznie. Klasa A1 oznacza paliwa o mniejszej zawartości popiołu, wskazującej na brak kory lub niewielką jej ilość i niższą zawartość wilgoci. Natomiast klasa A2 ma nieco wyższą zawartość popiołu i często wyższą zawartość wilgoci.

Klasa zrębków drzewnych B1 rozszerza pochodzenie i źródło biomasy w stosunku do klasy A. Obejmuje szerszy wachlarz surowców, między innymi uprawy energetyczne prowadzone w krótkiej rotacji, drewno z ogrodów i plantacji itp. oraz chemicznie nietraktowane pozostałości przemysłowe. Klasa zrębków B2 obejmuje również chemicznie obrabiane przemysłowe produkty uboczne i pozostałości oraz chemicznie nieobrobione poużytkowe drewno.

Analizując zapisy dokumentów normatywnych dotyczących jakości zrębków należy podkreślić, iż wytyczne te stanowią podstawę przy projektowaniu systemów technicznych układów energetycznych. Dlatego też spełnienie tych wymogów wydaje się niezbędne, aby wytwarzane zrębki mogły trafić na rynek, spełniając oczekiwania jakościowe użytkowników. Tabela 7.

Specyfikacja jakości zrębków (Tabela 2 w normie PN-EN ISO 17225-4)

Klasv jakości.		Α		В	
Metoda oznaczania	Jednostka	1	2	1	2
Rozmiar frakcji, P ISO 17827-1	mm	do wyboru	z Tabeli 1	do wyboru z Tabeli 1	
Wilgotność, Mc, ISO 18134-1, ISO 18134-2	W-%	$\begin{array}{l} M10 \leq 10 \\ M25 \leq 25 \end{array}$	$M35 \leq 35$	Maksymalna podar	wartość do nia
Popiół, A, ISO 18122	w-% w stanie su- chym	$A1.0 \le 1,0$	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤	3,0
Gęstość nasypowa, BD, ISO 17828	kg·m⁻³ w stanie roboczym	$BD150 \ge 150$ $BD200 \ge 200$ $BD250 \ge 250$	$\begin{array}{l} BD150 \geq 150 \\ BD200 \geq 200 \\ BD250 \geq 250 \\ BD300 \geq 300 \end{array}$	Minimalna do poda	wartość ania
, N, ISO 16948	w-% w stanie su- chym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	N1.0 ≤	1,0
S, ISO 16994	w-% w stanie su- chym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	S0.1 ≤	0,1
Cl, ISO 16994	w-% w stanie su- chym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	C10.05 ≤	0,05
As, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	$\leq 1$	
Cd, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	$\leq 2,$	0
Cr, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	≤ 10	)
Cu, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	≤ 10	)
Pb, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	≤ 10	)
Hg, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	$\leq 0,$	1
Ni, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	≤ 1 <b>(</b>	)
Zn, ISO 16968	mg/kg w stanie suchym	Nie dotyczy	Nie dotyczy	≤ 100	
Wartość opa- łowa, ISO 18125	MJ/kg, kWh/kg stan roboczy	Minimalna wartość do podania Minimalna wartość do ania		rtość do po- a	

Źródło: opracowanie według (EN ISO 17225-4, 2014)

Dość istotne wydają się zapisy dotyczące składów granulometrycznych masy zrębków. Do systemów energetycznych zaproponowano trzy klasy zrębków odnoszących się do geometrii cząstki (Tabela 8). Na szczególną uwagę zasługuje udział frakcji drobnych poniżej 3,15 mm, który nie może być większy niż 15% w przypadku najniższej klasy P16S oraz 10% dla klas
P31S oraz P45S. Wszystkie trzy klasy mają określoną maksymalną długość cząstek oraz największy przekrój. Spełnienie tych wymogów jest obecnie możliwe dzięki zastosowaniu procesów przesiewania, a frakcje nie spełniające wymogów są poddawane procesom domielenia (cząstki zbyt długie) lub w przypadku frakcji drobnych (długość cząstek poniżej 3,15 mm) przeznaczone np. do produkcji paliw kompaktowanych.

Działania takie powodują, iż w wyniku wykonywania dodatkowych operacji technologiczno-organizacyjnych, ponoszone są zwiększone nakłady energetyczne. Dlatego też proces zrębkowania powinien być realizowany w oparciu o wytyczne jakościowe produktu. W większości przypadków należy dołożyć starań, aby proces zrębkowania przebiegał bez występowania istotnych poślizgów w układzie podawania drewna (poślizg jest przyczyną zmniejszenia długości zrębka), a także utrzymania układu tnącego w odpowiednim stanie technicznym (ostrość układów tnących i odpowiednio mała szczelina robocza między układem nóż –stalnica zapewnia minimalizację występowania długich cząstek, tzw. niedocięć).

Wymiar (mm), ISO 17827-1					
Główna frakcja (mini. 60 %), mm	Frakcja drobna (%) (≤3,15 mm)	Frakcja ponadwymiarowa (%)	Max. długość cząstek (mm)	Max. pole prze- kroju poprzecz- nego frakcji grubej (cm <sup>2</sup> )	
P16S 3,15 mm $< P \le 16$ mm	$\leq$ 15 %	$\leq$ 6 % (>31,5 mm)	$\leq$ 45 mm	$\leq 2 \text{ cm}^2$	
P31S 3,15 mm $< P \le 31,5$ mm	$\leq 10 \%$	$\leq$ 6 % (>45 mm)	$\leq 150 \text{ mm}$	$\leq 4 \text{ cm}^2$	
P45S 3,15 mm $< P \le 45$ mm	$\leq$ 10 %	$\leq 10 \%$ (>63 mm)	$\leq$ 200 mm	$\leq 6 \text{ cm}^2$	

Tabela 8. Wielkość cząstek jakościowych zrębków (Tabela 1 w normie PN-EN ISO 17225-4)

Źródło: opracowanie własne na podstawie (EN ISO 17225-4, 2014)

#### Tabela 9.

Zakres	gęstości	nasypowych	zrębków w	v zależności	od v	wilgotności	(Tabela A	.1 w	normie	PN-
EN ISO	17225-4	4)								

Wilgotność	w-%	8 - 18	18 - 25	25 - 35	35 - 45
Gęstość nasypowa zrębków	kg∙m <sup>-3</sup> luźno usypanej	160 - 180	180 - 200	200 - 225	225 - 270
drewna iglastego	Klasy jakości	BD150	BD150	BD200	BD200
Gęstość nasypowa zrębków	kg∙m <sup>-3</sup> luźno usypanej	225 - 250	250 - 280	280 - 320	320 - 380
drewna liściastego	Klasy jakości	BD200	BD250	BD250	BD300

Źródło: opracowanie własne na podstawie (EN ISO 17225-4, 2014)

Dodatkowo, we wspomnianym dokumencie normatywnym PN-EN ISO 17225-4 określono dla celów informacyjnych zakres gęstości nasypowych zrębków drzew liściastych oraz iglastych w zależności od wilgotności w zakresie 8-45%. Te szacunkowe wartości gęstości umożliwiają w zadowalającym zakresie planować procesy logistyczne (transport, magazynowanie) (Tabela 9).

## 2.6. Magazynowanie, sezonowanie zrębków

Przechowywanie rozdrobnionej biomasy przy niekorzystnych parametrach surowca oraz warunkach magazynowania może mieć negatywne skutki jakościowe. Ze względu na podwyższoną aktywność mikrobiologiczną surowca, która skutkuje utratą suchej masy, emisjami gazów cieplarnianych (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) i nagrzewaniem się hałdy. W skrajnych przypadkach może istotnie obniżyć jakość zrębków a nawet doprowadzić do zjawiska samozapłonu (Wihersaari, 2005).

Wiele jednostek naukowych w ostatnich latach podejmuje w swoich badaniach bardzo istotne problemy związane z przebiegiem procesów magazynowania biomasy drzew szybko-rosnących.

Od kilku lat wiele zespołów badawczych w Europie jak również w Kanadzie oraz Stanach Zjednoczonych (Ebadian i in., 2018; Eisenbies i in., 2016; Eisenbies i in., 2014; Eisenbies i in., 2015) prowadzi badania związane z procesami logistycznymi, w tym magazynowaniem zrębków drzew szybkorosnących (w szczególności wierzby i topoli).

Ze względu na fakt, iż pozyskanie biomasy odbywa się w cyklach kilkuletnich najczęściej od 3 do 5 lat, to ilość pozyskiwanej świeżej biomasy jest dość duża i wynosi średnio 50-80 Mg·ha<sup>-1</sup> (Indira i in., 2017; Niemczyk i in., 2018; Wang i MacFarlane, 2012). W przypadku plantacji przemysłowych, o powierzchni kilkuset hektarów, po dokonanym zbiorze konieczne jest gromadzenie w wyznaczonych miejscach setek ton biomasy o niekorzystnych właściwościach fizycznych oraz mikrobiologicznych (ze względu na procesy zachodzące podczas składowania). Biomasa drzew szybkorosnących w okresie zbioru tj. w miesiącach zimowych (listopad-marzec) charakteryzuje się wilgotnością na poziomie 50-60% (Gejdoš, i in., 2015; Jirjis, 1995; Lenz i in., 2017; Pecenka, i in., 2018). Składowanie takiego rozdrobnionego materiału, w postaci zrębków i trocin, sprzyja powstaniu dogodnych warunków do rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za wzrost temperatury oraz stratę masy biodegradowalnej. Jak wskazują liczne badania podczas składowania zrębków drzewnych temperatura wzrasta nawet do 60°C (Eisenbies i in., 2016; Gejdoš i in., 2015; Jirjis, 2005; Lenz i in., 2017; Whittaker, i in., 2018).

Zagadnienia badawcze związane z przebiegiem procesu magazynowania świeżych zrębków drzew szybkorosnących (w szczególności wierzby i topoli) były prowadzone przez wiele zespołów badawczych z uwzględnieniem wielu aspektów techniczno-technologicznych. Do najważniejszych można zaliczyć określenie optymalnych wymiarów pryzmy, odpowiedniego usytuowania pryzm względem kierunków geograficznych oraz określenie dynamiki zmian parametrów procesu magazynowania w poszczególnych miesiącach roku (w szczególności miesiące wiosenne oraz letnie) (Mendel i in., 2016) (rys. 10).



Źródło: (Mendel i in., 2016)



Analizując wyniki badań, związanych z magazynowaniem zrębków drzew szybkorosnących prowadzonych w ostatnich latach można zauważyć, iż związane są w szczególności z przebiegiem samego procesu w aspekcie jakości zrębków. W tabeli 10 przedstawiono wyniki badań kilku zespołów badawczych zajmujących się biomasą drzew szybkorosnących. Zestawiono wybrane wyniki dotyczące dynamiki obniżenia utraty suchej masy jak również obniżenia wilgotności. W prezentowanych badaniach dominowały zrębki klasyfikowane jako P31 oraz P45. Różnice w uzyskiwanych wynikach są prawdopodobnie spowodowane miejscem zlokalizowania doświadczenia (różne lokalizacje w Europie) oraz odmienną metodyką prowadzenia doświadczeń głównie związaną z miejscem pobierania próbki jak i jej wielkością.

Autorzy wskazują na stosunkowo duże rozbieżności w uzyskiwanych wynikach. Świadczy to o tym, iż biomasa drzew szybkorosnących charakteryzuje się dużą zmiennością właściwości. W szczególności zawartość popiołu, na podstawie której podjęto próby określenia spadku suchej masy, charakteryzuje się dużą zmiennością. Zwiększona zawartość frakcji mineralnych występuje w szczególności w korze, pędach o małej średnicy oraz liściach. Dodatkowo kora jest ogólnie niepożądanym składnikiem biomasy, ponieważ zawiera znacznie więcej azotu, siarki oraz popiołu w stosunku do struktury drewna (Lenz i in., 2016). Rozmieszczenie tych frakcji w masie jest bardzo zróżnicowane co owocuje dużymi rozbieżnościami w badaniach laboratoryjnych. Dlatego też, w przypadku badań właściwości biomasy pozyskanej z produkcji przemysłowej zalecana jest zwiększona ilość próbek, najczęściej powyżej n-30 (Lenz i in., 2017).

Tabela 10.

Zestawienie wyników badań procesu magazynowania świeżych zrębków i trocin biomasy drzewnej

Rodzaj surowca	Utrata suchej masy (%·m-c <sup>-1</sup> )	Wilgotność M <sub>in</sub> -M <sub>out</sub> (%)	Okres magazynowania (dni)	Źródło
Topola P31	1,4	54-31	189	(Barontini et al., 2014)
Topola P63	1,6	39-25	170	(Manzone, Balsari, & Spinelli, 2013)
Topola (frakcja drobna)	1,8	62-26	120	(L. Pari et al., 2015)
Topola P31	2,3	60-34	271	(Lenz, Idler, Hartung, & Pecenka, 2015)
Topola P45	2,3	59-29	284	(Lenz et al., 2015)
Topola P31	3,2	62-33	223	(Pecenka, Lenz, Idler, Daries, & Ehlert, 2014)
Topola P45	3,6	60-34	223	(Pecenka et al., 2014)
Wierzba (frakcja drobna)	2,6	54-39	210	(Whittaker, Yates, Powers, Misselbrook, & Shield, 2016a)
Wierzba P16	3,3	56,4-44	208	(Whittaker et al., 2018)
Świerk (frakcja drobna)	1,6	55-43	258	(Heinek et al., 2013)
Świerk (frakcja 2- 35,5)	0,9	56,7-51	450	(Gejdoš et al., 2015)

Źródło: opracowanie własne

Doświadczenia Pecenki i zespołu (2018) prowadzone nad magazynowaniem zrębków topoli wykazały między innymi, iż na przebieg procesu magazynowania/sezonowania istotny wpływ ma wielkość cząstek zrębków. W badaniach wykorzystano zrębki uzyskane bezpośrednio z plantacji topoli. Ich wilgotność zawierała się w przedziale 56-60%. Badania wykazały (rys. 11), iż w przypadku najmniejszych zrębków zakwalifikowanych jako P31, temperatura wewnątrz pryzmy w początkowym okresie wzrosła do około 62°C, natomiast w przypadku większych zrębków P45 oraz P63 wzrost temperatury był znacznie niższy. Dla zrębków średnich P45, temperatura wzrosła prawie do 50°C, a dla zrębków P63 temperatura maksymalna wynosiła około 45°C.

Wyniki te jednoznacznie wskazują, iż granulacja cząstek zrębków ma bardzo duże znaczenie na przebieg sezonowania. Temperatura składowanych zrębków jest parametrem informującym o aktywności biologicznej magazynowanych surowców, a tym samym o intensywności narastania strat w magazynowanym surowcu. Wykazano również istotne różnice w emisji CO<sub>2</sub> w okresie sezonowania w zależności od granulacji sezonowanych zrębków. Największą emisją charakteryzowały się zrębki o najmniejszej frakcji P31. Różna porowatość masy związana z wielkością zrębków jest wskazywana przez autorów jako główna przyczyna zaobserwowanych zmian.

Podobne wyniki związane z emisją CO<sub>2</sub> zaobserwował podczas przechowywania zrębków wierzby zespół Whittakera (Whittaker i in., 2016b). Podczas badań wykazano, iż straty suchej masy są na poziomie 18 i 19% w dwóch badanych pryzmach po odpowiednio 210 i 97 dniach przechowywania. W tym czasie zrębki dosuszone zostały od 54 do 39% zawartości wilgoci w pierwszej pryzmie (210 dni magazynowania) i od 50 do 43% w drugiej (97 dni magazynowania). Po ustabilizowaniu pryzm, temperatura gwałtownie wzrosła, co korelowało z wartościami maksymalnej emisji dla dwutlenku węgla. Szczyt stężenia metanu (CH<sub>4</sub>) został wykryty po około 55 dniach. W obu przypadkach wystąpił gdy stężenie CO<sub>2</sub> spadło, co sugeruje, że po aktywnym okresie aerobowego rozkładu w pierwszych 2 miesiącach przechowywania zręb-ków, warunki w pryzmach zbliżyły się do beztlenowych. Wyniki tych badań potwierdzają, że zewnętrzne przechowywanie wilgotnych zrębków drzewnych nie jest wydajną metodą (chociaż intensywność zaobserwowanych zjawisk może mieć charakter lokalny, silnie związany z mikroklimatem regionu).



Rys. 11. Przebieg warunków atmosferycznych oraz temperatura pryzmy zrębków (małych -P31, średnich - P45 i dużych - P63) w okresie sezonowania

Podobne doświadczenia dotyczące magazynowania zrębków topoli prowadzone były przez zespół Lenza (2016). Oprócz podobnych pomiarów związanych z rejestracją przebiegu zmian temperatury oraz wilgotności, dokonano wnikliwej analizy zawartości popiołu w całym okresie magazynowania (prawie 8 miesięcy) zarówno dla całych zrębków jak i dla poszczególnych

frakcji, tj. kory oraz drewna. Wykazano, iż największe zmiany zawartości popiołu podczas magazynowania w okresie 7 miesięcy zachodzą we frakcji kory. Zawartość ta uległa zwiększeniu z prawie 6% do 9%. W przypadku frakcji drzewnej wzrost ten był mniejszy i zmieniał się w zakresie od 0,7% do 0,9%. Autorzy jednoznacznie wskazali, iż w procesie magazynowania świeżych zrębków topoli zachodzą procesy straty frakcji biodegradowalnej, tym samym jakość zrębków w aspekcie energetycznym maleje. Wskazano również, iż procesy te zachodzą szybciej i w większym zakresie dla zrębków klasyfikowanych jako P31. Autorzy wnioskują także, iż biomasa z upraw drzew szybkorosnących bardzo często nie będzie spełniać wymogów jakościowych opisanych w normie EN ISO 17225-4 ponieważ przekroczony zostaje udział frakcji mineralnej powyżej 3% (rys. 12).



Źródło: (Lenz et al., 2016)

# Rys. 12. Przebieg zmian zawartości popiołu podczas magazynowania zrębków topoli dla dwóch frakcji zrębków (P31, P45)

Podejmowane są również badania obejmujące zakresem wpływ okresu, sposobu przechowywania biomasy na wymywanie pierwiastków stanowiących zagrożenie dla środowiska (Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn). W literaturze przedmiotu jak i w dobrej praktyce rekultywacji terenów zdegradowanych, uprawa drzew szybkorosnących takich jak wierzba wiciowa czy też topola były zalecane na terenach, które były skażone czynnikami przemysłowymi (tereny poprzemysłowe poddawane rekultywacji biologicznej) lub przez celowe dawkowanie osadów czy też ścieków (ekologiczne strefy rozsączania i neutralizacji ścieków) (Dimitriou i Rosenqvist, 2011; Guidi Nissim i in., 2018; Kubová i in. Medved', 2008; Wahsha i in. Bini, 2014; Zárubová i in., 2015).

Badania podjęte w warunkach półlaboratoryjnych dotyczące wymywania skumulowanych pierwiastków (wysokiego ryzyka) w strukturze poszczególnych części roślin (liście, kora, drewno) wykazały, iż zarówno woda jak i roztwory symulujące kwaśne deszcze, w istotnym stopniu obniżają zawartość analizowanych pierwiastków w biomasie. Intensywność procesu zwiększa rozdrobnienie materiału zarówno wierzby jak i topoli (Břendová, i in., 2018; Guidi Nissim i in., 2018). Rozdrobnienie pędów do postaci zrębków o średniej długości 2 cm spowodowało istotny wzrost procesu wymywania w szczególności biomasy świeżej. Autorzy tych badań jednoznacznie wskazują, iż uwalnianie analizowanych pierwiastków związane było z wilgotnością materiału (maksymalna w przypadku surowca świeżego) oraz wielkością czą-stek biomasy (najmniejsze w przypadku całych pędów). W przypadku żelaza, proces wymywania zachodził równie intensywnie w materiale świeżym oraz suchym. Wyniki badań wskazują według autorów na konieczność opracowania wytycznych obejmujących zasady postępowania (rozdrabnianie, składowanie, suszenie) w procesie pozyskania biomasy z plantacji oraz obszarów zawierających zwiększone stężenie pierwiastków stanowiących zagrożenie dla środowiska.

Biorąc pod uwagę powyższe analizy wyników badań można założyć, iż należy unikać stosowania technologii zbioru jednoetapowego z bezpośrednim rozdrobnieniem - celem jak najdłuższego zachowania całych pędów w okresie magazynowania. Dodatkowo, proces sezonowania pędów obniża wilgotność co pozytywnie wpływa na obniżenie ryzyka skażenia. W przypadku konieczności prowadzenia procesu rozdrabniania świeżych pędów jak i sezonowanych zalecane jest uzyskiwanie możliwie największych cząstek materiału. Może to skutkować obniżeniem dynamiki procesu wymywania pierwiastków i związków niebezpiecznych dla środowiska.

## 2.7. Suszenie rozdrobnionej biomasy

Oprócz konieczności magazynowania dużych ilości zebranej biomasy w formie zrębków, bardzo często niezbędne jest obniżenie zawartości wody z poziomu 45 – 60% do poziomu poniżej 25%. Przy tej wilgotności możliwe jest efektywne spalanie, czy też wykorzystanie jako surowce do produkcji biopaliw stałych (pelety, brykiety) (Juliszewski i in., 2012; Mudryk, 2011; Wróbel i in., 2016; Wróbel i in., 2017; Wrobel i in., 2018).

Procesy suszenia biomasy w formie zrębków realizowane są z zastosowaniem różnych technik oraz technologii. Rozwiązania te różnią się aspektami technicznymi jednakże proces obniżenia wilgotności zachodzi w oparciu o dyfuzję wody w cząstkach materiału.

Dotychczasowe wyniki prac badawczych materiałów roślinnych jednoznacznie wskazują, iż współczynnik dyfuzji zależy miedzy innymi od geometrii suszonych cząstek jak również od temperatury procesu (Fernando i in., 2011; Gebreegziabher i in., 2013; Gottschalk i Scholz, 2008; Mendel i in., 2016; Porciuncula i in., 2013; Sander, 2007). Dlatego też większość suszarni do biomasy projektowana jest do suszenia cząstek zwanych trocinami (<10 mm) oraz zrębków (<45mm) (Tabela 11). Wydajność tych urządzeń określana jest w pewnym zakresie, który zależy w największym stopniu od wilgotności początkowej surowca, rodzaju suszonego materiału (drewno miękkie, twarde, materiał słomiasty itd.), a także od rozmiaru cząstek surowca. To właśnie wymiar cząstek (np. trociny) sprawia, iż czynna powierzchnia oddawania wilgoci jest istotnie większa niż w przypadku zrębków (Mattsson, 1990). Tym samym kinetyka procesu suszenia cząstek większych będzie wolniejsza, a koszty suszenia ulegną zwiększeniu.

Tabela 11.

Rodzaj urządzenia	Suszarka taśmowa	Suszarka bębnowa	Suszarka bęb- nowa - parowa	Suszarka ciśnie- niowa fluidalna	Pneumatyczna suszarka parowa
Surowce	Trociny, wióry, zrębki	Trociny, zrębki, kora	Trociny, ob- róbka drewna	Trociny	Trociny, kora, pozostałości leśne
Wydajność (t h <sup>-1</sup> ) (stan wyjściowy)	8–9	6–7	5-6	9	25
Wilgotność początkowa (%)	50-60	50-60	50-60	50-60	50–60
Wilgotność końcowa (%)	10–15	10-15	10-15	10-15	10–15
Środek suszący	Powietrze, spaliny 90 – 120 (°C)	Powietrze, spa- liny 250–400 (°C)	Para (ciśnienie otoczenia)	Para odzyski- wana (0,3-0,4 MPa),	Para odzyskiwana (0,3-0,4 MPa),
Zdolność odpa- rowania (Mg h <sup>-1</sup> ) H <sub>2</sub> O	10	7–8	6–7	5–40	25
Zapotrzebowa- nie na energię odparowania, (MJ kg <sup>-1</sup> ) H <sub>2</sub> O	4–5	4–5	3–4 0,8–1- odzysk. energii		2–3 0,5–0,7- odzysk. energii

Typowy zakres parametrów konstrukcyjnych oraz wydajności dla różnych suszarek

Źródło: (Fagernäs i in., 2010; Li i in., 2012)

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie nowoczesnymi suszarkami solarnymi do suszenia produktów rolnych. Powstało wiele koncepcji oraz rozwiązań handlowych (Li i in., 2012; Phadke i in., 2015; Yahya i in., 2018).

W Polsce jedną z firm oferujących takie suszarnie jest firma RenCraft. Są to urządzenia pozwalające na dosuszanie zrębków w oparciu o energię solarną. Typowe obiekty budowane w oparciu o wspomnianą technologię suszenia charakteryzują się parametrami (według wydajności): 500 metrów przestrzennych – 24 m<sup>2</sup> powierzchni kolektorów, 1000 metrów przestrzennych – 48 m<sup>2</sup> powierzchni kolektorów, 2000 metrów przestrzennych – 96 m<sup>2</sup> powierzchni kolektorów, 4000 metrów przestrzennych – 192 m<sup>2</sup> powierzchni kolektorów.



Źródło: (RenCraft, 2019)

Rys. 13. Widok suszarni solarnych dla zrębków drzewnych firmy CONA; a) suszarnia wieloboksowa- strona RenCraft, b) suszarnia w Złoczewie

Według danych przedstawianych przez firmę, proces suszenia jest realizowany przy stosunkowo małym ciśnieniu przepływu powietrza (moc wentylatorów osiowych od 0,2 do 0,4 kW). Średnie zapotrzebowanie energetyczne do wysuszenia 1 m<sup>3</sup> zrębków, z wilgotności początkowej 50% do 15%, wynosi jedynie 2 do 3 kWh energii elektrycznej. W prezentowanych rozwiązaniach bardzo ważne jest utrzymanie wysokiej porowatości oraz stosunkowo dużej powierzchni czynnej cząstek.

Te założenia spełnić mogą między innymi zrębki o średniej wielkości powyżej 30 mm charakteryzujące się zniszczoną strukturą. Możliwość uzyskiwania zrębków o pożądanych cechach jakościowych wydaje się być kluczowe w optymalizacji energetycznej procesów technologicznych produkcji jakościowych biopaliw stałych.

## 2.8. Mielenie zrębków w technologii produkcji biopaliw stałych

Jednym z istotniejszych procesów w technologii produkcji biopaliw stałych w oparciu o surowce drzewne jest proces mielenia. Najczęściej jest realizowany w urządzeniach, gdzie pomniejszenie cząstek realizowane jest poprzez mechniczno-udarowe oddziaływanie elementów roboczych. Procesy mielenia powinny być prowadzone na materiałach o stosunkowo niskim poziomie wilgotności. Materiały biologiczne przy podwyższonej wilgotności tracą właściwości przemiałowe (spadek kruchości na rzecz wzrostu plastyczności oraz lepkości). Granulacja uzyskiwanego materiału jest najczęściej regulowana poprzez zastosowanie odpowiedniego sita współpracującego z wirującymi nożami/bijakami roboczymi (Mudryk, 2010; Urbaniak i in., 2013; Wróbel i in., 2017). Sita robocze o odpowiedniej perforacji (wielkości oczek) decydują przy jakiej wielkości cząstki materiału opuszczają komorę mielenia. W technologiach przetwarzania biomasy na cele energetyczne dominują dwa rozwiązania mielące, pierwszy system bijakowy oraz nożowy (rys. 13). Szczegółowe rozwiązania rynkowe są bardzo zróżnicowane, często wyposażone w szereg rozwiązań wspomagających proces mielenia (układy zadawania i odbioru materiału, dodatkowe elementy wspomagające rozdrabnianie itp.).



Źródło: (Macko, 2013)

*Rys. 14. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne młynów do biomasy, a) młyn bijakowy, b) młyn nożowy* 

Prowadzone dotychczas badania procesu rozdrabniania w tym mielenia wskazują, iż na przebieg tego procesu najważniejszy wpływ mają (Lisowski i in., 2009; Mroziński i in., 2016; Tomporowski i Opielak, 2012):

- właściwości materiału do których można zaliczyć spójności (dekohezja, destrukcja, podział), plastyczność (odkształcenia trwałe) oraz sprężystość (odkształcenia odwracalne),
- stopień rozdrobnienia rozumiany jako wymiar cząstek materiału przed i po rozdrobnieniu (lub masa, objętość, powierzchnia, rozmiar liniowy). Kluczowe znaczenie ma tzw. wartość energii powierzchni swobodnej materiału oraz odporność materiału na dekohezję.
- sposób rozdrabniania, wykorzystanie różnych zjawisk towarzyszących i powstających podczas rozdrabniania (np. łamanie, ścieranie, miażdżenie, cięcie, uderzanie),
- warunki rozdrabniania związane w szczególności z oddziaływaniem środowiska (warunki naturalne): temperatura, wilgotność. Te parametry często decydują o finalnym rozwiązaniu jakie możemy zastosować w danym miejscu pracy.

Analiza doniesień naukowych przedmiotowo związanych z procesami mielenia wskazuje, iż jednym z ważniejszych czynników decydujących o przebiegu procesu, w tym jego energochłonności, są właściwości geometryczne surowca oraz jego podatność na rozdrabnianie (odporność na dekohezję).

W świetle przedstawionych zależności w procesie mielenia, właściwości fizyczne zrębków drzew szybkorosnących (geometria cząstki, stopień dekompozycji struktury) powinny mieć istotne znaczenie w oznaczaniu ich jakości. Na szczególną uwagę zasługuje podatność na rozdrabnianie, która jest związana z właściwościami mechanicznymi samego zrębka. Dlatego też wydaje się być wysoce celowe poznanie mechanizmów mogących istotnie wpływać na cechy uzyskiwanych zrębków w procesie rozdrabniania wstępnego.

## 3. GENEZA PODJĘCIA TEMATU ORAZ CEL PRACY

Produkcja biopaliw stałych w oparciu o surowce drzewne wymaga zastosowania szeregu operacji technologicznych. Surowce do ich produkcji najczęściej pozyskiwane są z przemysłu drzewnego jako pozostałości produkcyjne (z terenów leśnych, podmiotów sektora drzewnego). W ostatnich latach rozwija się również dynamicznie pozyskiwanie biomasy drzewnej z plantacji roślin szybkorosnących. Plantacje takie są bardzo istotnym elementem sektora surowców drzewnych gwarantując między innymi stabilizację dostaw oraz odpowiednią jakość. Dominującym gatunkiem stosowanym na takich plantacjach jest wierzba wiciowa *Salix viminalis* L. Tak jak wykazano w przedstawionym przeglądzie literatury, zbiór roślin drzewiastych takich jak wierzba czy też topola odbywa się w okresie zimowym (po zakończeniu wegetacji) w rotacji co 3-5 lat. Zebrane pędy poddawane są wstępnemu rozdrobnieniu celem uzyskania frakcji zwanej zrębkami. Zrębki drzewne mogą być stosowane bezpośrednio w systemach energetycznych jak również stanowić źródło surowca do produkcji biopaliw stałych takich jak pelety czy też brykiety. Ze względu na fakt, iż okres zbioru biomasy wierzby jest stosunkowo krótki, jest ona bardzo często magazynowana w formie pryzm.

Niekorzystne właściwości zrębków wierzby (związane w szczególności z dużą ich wilgotnością) sprawiają, iż procesy magazynowania są bardzo często źródłem strat jakościowych surowca. Dotychczas prowadzone badania wskazują przyczyny tych zjawisk jak również możliwości ograniczenia niekorzystnych procesów występujących podczas okresu składowania. Wydaje się, iż jedną z istotniejszych właściwości surowca w aspekcie przebiegu procesu przechowywania jest jego granulacja. Prowadzone badania nad procesem składowania wilgotnych zrębków wskazują jednoznacznie, iż zwiększenie granulacji cząstek obniża dynamikę niekorzystnych procesów (wzrostu temperatury, rozwoju mikroorganizmów, utraty suchej masy, emisji gazów cieplarnianych itp.) tym samym ograniczenia strat jakościowych. Dlatego też wydaje się być niezbędne poznanie mechanizmów pozwalających na uzyskiwanie zrębków o cechach predysponujących ich do składowania. Zrębki te powinny charakteryzować się stosunkowo dużymi cząstkami a zarazem strukturą wstępnie zniszczoną. Większe cząstki zrębków zapewniają występowanie proporcjonalnych przestrzeni międzycząsteczkowych (porów) co sprzyja obniżeniu oporów przepływu czynników suszących jak również zwiększa dynamikę samoistnych procesów suszenia (lepsze wentylowanie złoża- lepsze odprowadzenie ciepła i masy). Uzyskiwanie zrębków o pożądanej, zwiększonej granulacji, a zarazem o strukturze przekroju z licznymi pęknięciami (zwiększona powierzchnia czynna oraz obniżona wytrzymałość mechaniczna cząstki) jest wysoce zasadne z punktu widzenia kolejnych procesów przetwarzania. Taka struktura zrębka jest bardzo pożądana w procesach suszenia jak również przy domielaniu surowca do oczekiwanej granulacji technologicznej.

Drugim bardzo ważnym czynnikiem towarzyszącym procesom rozdrabniania jest jego energochłonność. W przypadku biopaliw stałych wielkość nakładów energetycznych w procesach przetwarzania jest kluczowa przy określeniu ich efektywności energetycznej. Analizując doniesienia literaturowe oraz uwzględniając dotychczasowe doświadczenia badawcze autora, wydaje się wysoce prawdopodobne prowadzenie procesu zrębkowania pędów wierzby przy istotnie niższych nakładach energetycznych.

Kluczem do opracowania przedstawionych założeń jest szersze i dogłębne poznanie przebiegu procesu zrębkowania pędów wierzby. W świetle przeprowadzonego rozeznania literaturowego brak jest opracowań obejmujących przedstawioną problematykę. Dlatego też podjęcie badań mających na celu poznanie przebiegu procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej (kluczowego gatunku stosowanego na plantacjach energetycznych) z uwzględnieniem aspektów jakościowych i energetycznych procesu, wydaje się być niezbędne i uzasadnione potrzebami tzw. praktyki.

Dlatego też głównym celem podjętych badań było poznanie oraz opisanie parametryczne przebiegu procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej *Salix viminalis L*. Przebieg tego procesu zależy od wielu czynników. Przeprowadzona analiza literatury wykazała, iż do najważniejszych, mających istotny wpływ na przebieg procesu zrębkowania zarówno w aspekcie jakości uzyskiwanych zrębków jak również na jego energochłonność, można zaliczyć:

- kąty natarcia płaszczyzny noża zrębkującego  $\beta$ ,
- kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$  względem płaszczyzny prostopadłej do powierzchni cięcia noży zrębkujących,
- długość zrębkowania  $l_z$ ,
- średnica zrębkowanych pędów d.

Powyższe parametry zostały uwzględnione w planie badań celem wykazania ich wpływu na cechy jakościowe zrębków oraz na parametry eskalacyjne procesu.

Zaproponowano dwie hipotezy badawcze kluczowo związane z celem pracy:

#### Hipoteza I:

#### Zmniejszenie kąta ostrza noża zrębkującego $\beta$ (kąta powierzchni natarcia) oraz zwiększenie kąta podawania pędów $\varepsilon$ , w procesie zrębkowania pędów wierzby wiciowej, umożliwi uzyskanie zrębków o większej granulacji (długość do 45 mm) oraz porowatości.

Tak uzyskane zrębki charakteryzować się będą wybranymi parametrami istotnie wpływającymi na poprawę ich właściwości przy dłuższych okresach składowania. Struktura masy tych zrębków charakteryzować się będzie porowatością o zwiększonych porach, co ma kluczowe znaczenie w procesach suszenia. Same zrębki posiadać będą wstępnie zniszczoną strukturę co jest bardzo ważne w dalszych procesach mechanicznego pomniejszania wielkości cząstek biomasy (np. mielenie) jak również w procesach wymuszonego dosuszania.

#### **Hipoteza II:**

W wyniku zastosowania noża zrębkującego o kącie ostrza  $\beta$  poniżej 30 (°) i pochylenia pędów o kąt  $\varepsilon$  oraz ustalenia warunków współpracy noża ruchomego i stałego (stalnicy) w tzw. kontakcie, możliwe będzie obniżenie nakładów energetycznych procesu (kJ·kg<sup>-1</sup>). Spodziewane jest również uzyskanie zrębków o znacznie wyższej jakości docinania wierzchniej warstwy pędów (kory i łyka) tym samym zmniejszenie ilości cząstek ponadwymiarowych (w szczególności tych o małym przekroju).

## 4. MATERIAŁ I METODYKA

## 4.1. Materiał badawczy

W prezentowanej pracy materiałem badawczym były pędy wierzby wiciowej, tzw. energetycznej *Salix viminalis* L. Roślina ta jest uprawiana na cele energetyczne na plantacjach wieloletnich (Kwaśniewski i in., 2006a; Szczukowsk i in., 2011a). Wierzba wiciowa pozyskiwana była z poletek doświadczalnych Kolekcji Roślin Energetycznych położonej przy Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki UR w Krakowie (rys. 15).



Źródło: foto autor

Rys. 15. Widok plantacji wierzby wiciowej przy Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki UR w Krakowie

**Wierzba wiciowa -** *Salix viminalis* L., (w. krzaczasta, w. krzewiasta, witwa, konopianka) – jest gatunkiem drzew lub krzewów należących do rodziny wierzbowatych. W ostatnim okresie gatunek ten nazywany też wierzbą energetyczną. Pospolity gatunek euroazjatycki. Bardzo często spotykane są, różniące się od typowej formy, trudne do oznaczenia mieszańce z: wierzbą iwą, wierzbą kruchą, wierzbą migdałową i innymi gatunkami wierzby. Systematykę rośliny zawarto w tabeli 12, natomiast na rysunku 16 przedstawiono jej morfologię zgodnie ze systematyką Szweykowskich (2006).

Królestwo	jądrowe	Eukaryota
Podkrólestwo	rośliny	Phytobionta
Gromada	rośliny telomowe	Telomophyta
Podgromada	okrytozalążkowe	Angiospermae
Klasa	dwuliścienne	Dicotyledones
Podklasa	ukęślowe	Dilleniidae
Nadrząd	fiołkopodobne	Violanae
Rząd	wierzbowce	Salicaes
Rodzina	wierzbowate	Salicaceae
Rodzaj	wierzba	Salix
Gatunek	wierzba wiciowa	Salix viminalis L.

Tabela 12. Wierzba wiciowa Salix viminalis L. - systematyka

Źródło: opracowanie własne wg (Szweykowska & Szweykowski, 2006)

Ogólna charakterystyka:

*Pokrój* - najczęściej wyniosły krzew o licznych pędach lub rzadziej drzewo osiągające wysokość ponad 5 m.

*Pędy* - smukłe i wiotkie o szarym lub zielonawym kolorze kory, młode gałązki są owłosione.

*Liście* - krótkoogonkowe o kształcie lancetowatym lub równowąskim, całobrzegie. Długość liści 8-25 cm natomiast szerokość 6-12 mm. Charakterystycznie podwinięte na brzegach, strona wierzchnia ciemna, żywozielona, z żółtą żyłką pośrodku, spód jedwabiście owłosiony połyskujący.

*Kwiaty* - roślina dwupienna, owadopylna. Kwiaty zebrane w kwiatostany, zwane kotkami, kształtu walcowatego. Kwiaty męskie składają się z dwóch pręcików, żeńskie z jednego słupka, skupione są na szczytach pędów. Rozwijają się wczesną wiosną przed rozwojem liści, a czasem równocześnie z nimi. Okres kwitnienia od marca nawet do maja.

*Owoce* - wielonasienna torebka pękająca dwoma klapami. Nasiona drobne, opatrzone puchem.

*Rozmnażanie* - w warunkach naturalnych rozmnażanie generatywne. W uprawach – wegetatywnie z sadzonek zwanych sztobrami lub zrzezami.

*Wymagania* - popularna na terenie całego kraju, najczęściej w miejscach wilgotnych nad rzekami i strumieniami. Gatunek odporny na skrajne warunki klimatyczne i choroby, posiada małe wymagania glebowe przy dużej dynamice wzrostu w kolejnych sezonach wegetacyjnych. Przydatna do nasadzeń nadwodnych, nieodpowiednia na gleby suche.

**Zbiór** - na plantacjach energetycznych pozyskanie biomasy stosuje się najczęściej co trzy, cztery lata. Zbiór można rozpocząć po opadnięciu z pędów liści. Może on być prowadzony aż do początku nowego okresu wegetacyjnego. Wysokość cięcia powinna się mieścić w zakresie 5-10 cm nad powierzchnią gleby. Zbiór możemy przeprowadzić jednoetapowo tzn. ścinanie z jednoczesnym rozdrabnianiem pędów na polu. Wykonywany jest najczęściej kombajnem do zbioru zielonek wyposażonym w specjalne przystawki. Zbiór dwuetapowy polega na ścięciu pędów w pierwszym etapie, które następnie poddawane są sezonowaniu w celu obniżenia wilgotności i w drugim etapie na ich zrębkowaniu.



Źródło: foto M. Wróbel

Rys. 16. Wierzba wiciowa Salix viminalis L.; 1- ukorzeniona sadzonka z odrostami, 2 – pędy z kwiatami, 3 –pędy wierzby z liśćmi, 4 –liść, 5 – przekrój poprzeczny pędu

Uprawy wierzby *Salix viminalis* L. mogą być prowadzone w wielu różnych celach. Do najważniejszych można zaliczyć:

- produkcja drewna dla celów gospodarczych i energetycznych,
- ochrona brzegów różnych zbiorników wodnych, potoków i rzek przed falą powodziową, opóźnianie jej spływu,
- ochrona upraw przed wiatrami oraz gleb przed erozją,
- regulacja stosunków wodnych terenów podmokłych i bagiennych,
- materiał na faszynę do utrwalania brzegów zbiorników wodnych, rzek jak również do stabilizacji podłoża pod drogi,
- oczyszczalnie ścieków komunalnych.

Z związku z tym, że jest to roślina wodolubna, jej naturalnym siedliskiem są tereny najczęściej sąsiadujące ze zbiornikami wodnymi i wykorzystywana jest w celach ochronnych wód, gruntów oraz roślin. Właściwości pędów, w szczególności możliwość formowania i dopasowywania do terenu oraz łatwość ukorzeniania sprawiły, że technologie związane ze stabilizacją zboczy rzek oraz innych zbiorników wodnych oparte są w większości o wykorzystanie wiązek (faszyn) dwu- i trzyletniej wierzby.

Technologia produkcji biomasy z wierzby energetycznej opiera się najczęściej o zbiór pędów w rotacji trzy- i czteroletniej. Należy jednak pamiętać, że w pierwszym roku po założeniu plantacji należy ściąć pędy w celu zwiększenia rozkrzewienia. Pędy w trzecim, czwartym roku wegetacji osiągają wysokość dochodzącą niekiedy do 7 m (Bressler i in., 2017; Indira i in., 2017; Szczukowsk i in., 2011).

Wybór technologii zbioru najczęściej jest uzależniony od wielkości plantacji oraz przeznaczania zebranego materiału. W sytuacji, gdy prowadzona plantacja jest niewielka i traktowana jako źródło biomasy dla własnego gospodarstwa, najczęściej technologia zbioru oparta jest o ręczne piły mechaniczne (Kwaśniewski i in., 2006). Możliwość wyboru dogodnego terminu (tak, aby warunki atmosferyczne były sprzyjające) oraz względnie długi okres potencjalnego zbioru sprawia, że metoda ta cieszy się dość dużym powodzeniem.

## 4.2. Metodyka badań

Na potrzeby realizacji celu pracy zaplanowano szereg doświadczeń oraz analiz. Uwzględniono zarówno doświadczenia laboratoryjne jak i te w skali półprzemysłowej. Doświadczenia poprzedzone zostały wykonaniem analiz oraz oznaczeń właściwości fizyko-chemicznych mających znaczenie w opisie przebiegu procesu zrębkowania.

Plan badań przedstawiony został na schemacie (rys. 17) i został podzielony na cztery etapy. Pierwszy etap obejmuje oznaczenie i pomiar wielkości charakteryzujących sam materiał oraz jego właściwości mechaniczne. Parametry te niezbędne są do prawidłowego scharakteryzowania badanego materiału oraz do późniejszej interpretacji zaobserwowanych zjawisk. Informacje te są również niezbędne przy opisie materiału jako surowca w procesach produkcji i ocenie jakościowej biopaliw stałych.

Dla badanych pędów wierzby oznaczono w pierwszej kolejności parametry charakteryzujące biomasę na tle innych gatunków drzewiastych:

 ogólna geometria pędów – długość całkowita, średnica przy podstawie oraz masa świeżych pędów,

- $M_{ar}$  wilgotność robocza bezpośrednio po zbiorze (%),
- $A_{ar}$  zawartość popiołu w stanie roboczym (%),
- $A_d$  zawartość popiołu w stanie suchym (%),
- $q_{p,net,ar}$  wartość opałowa w stanie roboczym (MJ·kg<sup>-1</sup>),
- $DE_{ar}$  gęstość właściwa w stanie roboczym (kg·m<sup>-3</sup>),



Źródło: opracowanie własne

Rys. 17. Schemat przeprowadzonych doświadczeń

Kolejnym etapem było oznaczenie właściwości mechanicznych umożliwiających poznanie mechanizmów zachodzących w wybranych etapach procesu zrębkowania np. etap przecinania struktury drewna czy też odłupywania fragmentów odciętego drewna itd. W tym celu oznaczono następujące wielkości:

- E=f(d) (MPa)- współczynnik sprężystości badanych materiałów,
- $-\tau_t = f(d)$  (MPa) naprężenie ścinające wzdłuż włókien,
- $\sigma_r = f(d)$  (MPa) naprężenie rozłupujące,
- $Q_{Pj} = f(d) (N \cdot mm^{-1})$  opory jednostkowe przecinania krawędzią ostrza noża,
- $\mu_S = f(M)$  (-) współczynnik tarcia materiału o powierzchnię stalową (drewno nie rozdrobnione).

Informacje o właściwościach mechanicznych są kluczowe przy poprawnym opisie procesu zrębkowania, jak również przy prowadzeniu analizy zaobserwowanych zjawisk.

Biorąc pod uwagę wyniki prac badawczych dotyczących rozdrabniania drewna wielkowymiarowego, jak również założenia przedstawione w hipotezach badawczych dotyczące przebiegu procesu oraz jakość uzyskiwanych zrębków, zaproponowano w dalszych badaniach szereg doświadczeń mających na celu poznanie wpływu parametrów procesu na cechy jakościowe uzyskiwanych zrębków.

Kolejne etapy badań (II, III) dotyczyły zrębkowania w warunkach quasi-statycznych (stanowisko badawcze do analizy procesów cięcia materiałów roślinnych) (rys. 19 i 20) oraz na stanowisku dynamicznym.

Zaplanowane doświadczenia w II etapie dotyczące procesu zrębkowania w warunkach quasi-statycznych miało również na celu zweryfikowanie czy uzyskane wyniki (nakłady energii oraz ocena jakościowa zrębków) są powiązane parametrycznie z uzyskanymi w metodzie dynamicznej. Pozytywna walidacja powiązań między tymi metodami umożliwi wykorzystanie testów cięcia w warunkach quasi-statycznych jako szybkiej metody doboru parametrów zrębkowania w skali przemysłowej.

W celu zweryfikowania hipotezy I zaplanowane doświadczenia uwzględniają szeroki zakres zmienności głównych kątów układu zrębkującego. Zakres ten został tak dobrany, aby proces zrębkowania przebiegał zarówno w warunkach klasycznych (odcinanie oraz intensywne rozłupywanie otrzymywanych zrębków) jak również z widocznym, niedokończonym zjawiskiem rozłupywania materiału (zrębek utrzymujący stosunkowo duże rozmiary ze spękaną strukturą). Przeprowadzona analiza literaturowa jak również wyniki prowadzonych dotychczas badań wskazują na trzy główne czynniki mające wpływ na właściwości uzyskiwanych zrębków. Jednym z najistotniejszych jest kąt ostrza noża zrębkującego ( $\beta$ ) następnie kąt podawania materiału do układu zrębkującego ( $\varepsilon$ ) oraz długość zrębkowania ( $l_z$ ) czyli odległość między płaszczyznami cięcia zrębka.

Na rysunku 4 przedstawiono schematy wspomnianych różnych mechanizmów powstawania zrębków występujące przy różnych parametrach procesu.

Zrębkowanie łodyg z niepełnym rozłupaniem (zrębki z widocznymi pęknięciami struktury) (rys. 18. a, b, e, h) umożliwia uzyskanie surowca o zwiększonej granulacji, przy istotnym zmniejszeniu gęstości usypowej oraz - co ważniejsze - zwiększonej powierzchni czynnej oraz porowatości. Jak wskazuje analizowana literatura, to te właśnie parametry, w największym stopniu decydują o prawidłowym przebiegu procesów magazynowania oraz sezonowania zrębków drzewnych (przy zminimalizowanych stratach).



 $\beta$  =const,  $\varepsilon$  =const,  $\alpha$  =const,  $l_{z_q} > l_{z_h} > l_{z_i}$ 

Źródło: opracowanie własne

Rys. 18. Warianty powstawania zrębków o różnych (ustalonych) właściwościach fizycznych: a, b, c – sterowanie kątem pochylenia zrębkowanych pędów; d, e, f – sterowanie zmianą kąta ostrza noża; g, h, i – sterownie długością zrębkowania,  $\beta$  - kąt ostrza,  $\varepsilon$  – kąt pochylenia pędów,  $l_z$  – długość zrębkowania Zakres badań procesu cięcia w skali quasi-statycznej umożliwił oznaczenie głównych sił procesu cięcia, nakładów energii oraz ocenę jakościową uzyskiwanych cząstek. Testy zrębkowania metodą quasi-statyczną przeprowadzono na stanowisku badawczym bazującym na maszynie wytrzymałościowej Insight 2 firmy MTS. W przystawce do ścinania wykorzystano mechanizm firmy Fiskars, lidera w produkcji urządzeń do cięcia drewna. Szczegółowy opis zaprojektowanej przystawki przedstawiony został w publikacji Frączeka i Mudryka (2006, 2007).



Źródło: (Frączek i Mudryk, 2007)

Rys. 19. Schemat przystawki do cięcia pędów w warunkach quasi-stycznych; a) geometria układu wymuszenia ruchu, b) charakterystyczne położenia ostrza noża, 1 – ostrze noża, 2 – stalnica, krawędź przeciwtnąca, F – siła cięcia ostrza noża, P – siła w cięgnie maszyny wytrzymałościowej, A – punkt obrotu noża tnącego, L – długość czynna ostrza noża

Na potrzeby zaplanowanych badań dokonano modyfikacji przystawki umożliwiającej realizowanie testów cięcia z dodatkowymi nożami o kątach  $\beta$  20°, 25° oraz 30° oraz pochyleniu pędów pod kątem  $\varepsilon$  w zakresie 0 - 40° (rys. 20).



Źródło: opracowanie własne

## Rys. 20. Widok zmodyfikowanej przystawki wraz z zamocowanym pędem wierzby, oznaczenie głównych parametrów procesu, $\beta$ - kąt ostrza, $\varepsilon$ – kąt pochylenia pędów, $l_z$ – długość zrębkowania

Na bazie wyników z badań procesu zrębkowania w warunkach quasi-statycznych ustalono warunki brzegowe parametrów procesu metody dynamicznej (etap III). W oparciu o dokonane obserwacje oraz zdobyte doświadczenie w dotychczasowym rozdrabnianiu pędów drzew (Frączek i Mudryk, 2006, 2007; Frączek i in., 2009), zaproponowano zastosowanie noża zrębkującego o kącie przyłożenia ostrza noża  $\alpha$ = 6° oraz niższym efektywnym kącie ostrza noża  $\beta$  w zakresie 15-25°. Dodatkowo stanowisko umożliwiło wprowadzanie materiału do zrębkowania pod kątem  $\varepsilon$  w płaszczyźnie pionowej, który może przyjmować wartości z zakresu  $0-40^{\circ}$  - podobnie jak w przypadku badań przy cięciu statycznym. W prowadzonych testach zastosowano  $\varepsilon = 0, 20$  oraz 40°. Dodatkowo, krawędź ostrza noża została zbliżona do krawędzi noża nieruchomego (stalnicy) – do granicy kontaktu bezpośredniego. Zaproponowane rozwiązanie, podobnie jak w przypadku sieczkarni do materiałów wysokouwodnionych, zwiększa skuteczność docinania wszystkich części zrębków (w szczególności kory i łyka), które przy zwiększonej wilgotności charakteryzują się dużą elastycznością oraz wytrzymałością (rys. 21) (Frączek i Mudryk, 2006; Frączek i in., 2009).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 21. Przykładowe zrębki wierzby z niedociętą korą i łykiem

W trakcie procesu zrębkowania pędów wierzby mierzono nakłady energetyczne przypadające na masę uzyskanych zrębków. Wykorzystano w tym celu analizator parametrów sieci LUMEL ND1. W celu zarejestrowania rzeczywistych nakładów energii, pomiar rozpoczynał się w momencie ustabilizowania parametrów roboczych urządzenia (obroty silnika). W pierwszej kolejności, w celu określenia zużycia energii na pokonanie oporów własnych granulatorów, pomiar realizowany był podczas pracy bez obciążenia. Następnym etapem był pomiar energochłonności brutto procesu, na podstawie, którego po odjęciu energii oporów własnych maszyny, określono energochłonność netto procesu.

Stanowisko badawcze zostało zbudowane w oparciu o rozdrabniacz toporowy do rozdrabniania materiałów roślinnych. Urządzenie to umożliwia prowadzenie procesu zrębkowania biomasy zielnej pędów drzew (gatunków o małej gęstości do 550 kg·m<sup>-3</sup>) o średnicy do 50 mm. Stanowisko wyposażone jest w dwa noże o kształcie łukowym. Na potrzeby prowadzonych doświadczeń zastosowane były noże o kącie ostrza  $\beta = 17^{\circ}$ , 25° oraz 30°. Ostrze noży zrębkujących było tak ustawione, aby uzyskać efekt kontaktu krawędzi ze stalnicą. Układ podawania pędów do procesu zrębkowania został zmodyfikowany tak, aby umożliwić uzyskanie regulacji kąta pochylenia pędów  $\varepsilon = 0-40^{\circ}$ .



Źródło: opracowanie własne

Rys. 22. Sieczkarnia toporowa, a – widok ogólny, b – geometria zespołu tnącego, 1 – nóż, 2 – rolkowy układ podający, 3 – rynna podająca, 4 – przekładnia pasowa napędu sieczkarni, 5 – silnik napędowy, α – kąt przyłożenia, β – kąt ostrza noża, γ – kąt natarcia

#### Metodyka testów laboratoryjnych

#### 4.2.1.Wilgotność pędów

Wilgotność badanych pędów została oznaczona metodą suszarkową według normy PN-EN ISO 18134-1:2015-11. Do oznaczania wilgotności pędu pobierano po trzy próbki o długości około 0,15 m pochodzące z dolnej, środkowej i górnej części pędu, które następnie rozdrabniano sekatorem na plastry o długości około 2 cm. Przygotowany materiał umieszczano w naczynkach wagowych i suszono w suszarce konwekcyjnej firmy POL-EKO w temperaturze 105°C. Suszenie próbek uznawano za zakończone, gdy różnica między pomiarami masy w odstępach półgodzinnych nie przekraczała 0,01 g. Badanie przeprowadzone było w trzech powtórzeniach. Wilgotność względną  $M_{ar}$  wyznaczono jako stosunek masy wody zawartej w drewnie do masy drewna wilgotnego:

$$M_{ar} = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{s}m}} \cdot 100 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

gdzie:

 $M_{ar}$  – wilgotność materiału (%),  $m_1$  – masa próbki przed suszeniem (g),  $m_2$  – masa wysuszonej próbki (g).

Zgodnie z przedstawioną procedurą oznaczono również wilgotność analityczną  $M_{ad}$  (próbki powietrznie suchej) - wielkość niezbędna do oznaczenia zawartości popiołu oraz parametrów energetycznych.

#### 4.2.2. Współczynnik tarcia drewna wierzby o powierzchnię stalową

Współczynnik tarcia drewna wierzby o powierzchnię stalową określono na stanowisku badawczym do oznaczania współczynnika tarcia statycznego oraz kinematycznego.

Procedura pomiaru została opisana w pracy doktorskiej (Mudryk, 2007). Do badań przygotowano próbki w kształcie walca. Były one umieszczane w kasetce, której konstrukcja pozwala na zmianę siły nacisku próbek na powierzchnię roboczą. W prowadzonych badaniach współczynnik tarcia określano przy zmiennej sile nacisku w przedziale 4-64 N.

W trakcie prowadzonych testów rejestrowano opory tarcia materiału o badane powierzchnie. Program sterujący umożliwia określenie maksymalnej siły tarcia (moment zerwania kontaktu statycznego próbki z powierzchnią poślizgu) oraz obliczenie średniej wartości oporu z określonego odcinka pomiarowego  $l_p$  (50 mm) (rys. 23). Na podstawie maksymalnej wartości siły tarcia ( $F_1$ ) oznaczony został statyczny współczynnik tarcia, natomiast siła średnia ( $F_{sr}$ ) posłużyła do wyznaczenia kinematycznego współczynnika tarcia.

Współczynnik tarcia zrębków o powierzchnie robocze wyznaczono ze wzoru Coulomba:

$$F = \mu_s N + C$$

gdzie:

- $\mu_s$  współczynnik tarcia (-),
- *F* siła tarcia rejestrowana w cięgnie (N),
- N nacisk na powierzchnię tarcia (N),
- C siła kohezji (N).



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 23. Przykładowy wykres oporów tarcia:  $F_1$  – maksymalna siła tarcia,  $F_{sr}$  – średnia siła tarcia na odcinku pomiarowym  $l_p$ 

#### 4.2.3. Współczynnik sprężystości

Współczynnik sprężystości dla pędów został wyznaczony metodą statyczną, przy wykorzystaniu przystawki służącej do wykonania próby zginania 3-punktowego, którą zamocowano na maszynie wytrzymałościowej Insight 2 firmy MTS (rys. 24). Metodykę pomiaru oparto o normy PN-63/D-04117 oraz PN-75/D-04123. Procedura oznaczenia współczynnika sprężystości wymaga określenia strzałki ugięcia powstającej pod działaniem dwóch sił: wstępnej -  $P_1$ i zasadniczej -  $P_2$  (rys. 24).

Zakładając, że przekrój pędu jest kołowy, współczynnik sprężystości można wówczas wyznaczyć z następującej zależności:

$$E = \frac{(P_2 - P_1) \cdot l^3 \cdot 0,4244}{(f_2 - f_1) \cdot d^4}$$

gdzie:

- *E* współczynnik sprężystości,
- $P_1$  wartość siły wstępnej,
- $P_2$  wartość siły zasadniczej,
- $f_l$  strzałka ugięcia pędu od siły wstępnej,
- $f_2$  strzałka ugięcia pędu od siły zasadniczej,
- *l* rozstaw podpór na belce,
- d średnica pędu.



Źródło: opracowanie własne



Pomiar średnicy oraz wilgotności pędu wykonywano bezpośrednio przed pomiarem współczynnika sprężystości. Średnicę określano jako średnią z dwóch pomiarów w środkowej części pędu, natomiast wilgotność oznaczono według procedury przedstawionej w niniejszym rozdziale.

Przebieg testu pomiarowego jest półautomatyczny, procedura pomiarowa obejmująca parametry procesu oraz wstępne obliczenia jest realizowana w specjalistycznym oprogramowaniu TestWorks 4. Maszynę wytrzymałościową zaprogramowano tak, aby następowało automatyczne wyszukiwanie i umiejscowienie charakterystycznych punktów K (siła wstępna) oraz M(siła zasadnicza) na wykresie (rys. 25). Użytkownik akceptuje wstępnie wskazane punkty lub dokonuje korekty ich umiejscowienia, a następnie uruchamia analizę obliczeniową zapisaną w formie makroprocedury. Wyniki obliczeń, a także dane dotyczące przebiegu testu (prędkość obciążania, itp.) oraz informacje dotyczące pędów wierzby (średnica, wilgotność) przedstawione są w formie raportu jako plik txt.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 25. Przebieg zmian siły nacisku P w zależności od strzałki ugięcia f pędu wierzby; K, M – charakterystyczne punkty na odcinku prostoliniowym,  $\Delta P$ - przyrost siły,  $\Delta f$ - strzałka ugięcia pędu

#### 4.2.4. Oznaczenie gęstości właściwej

Badanie gęstości właściwej (pozornej) DE (kg·m<sup>-3</sup>) przeprowadzono na stanowisku badawczym wyposażonym miedzy innymi w aparat GeoPyc 1360 firmy Micromeritics służący do pomiaru gęstości (obwiedniowej) metodą piknometrii quasi-cieczowej oraz wagi laboratoryjnej Sartorius ED224S. Aparat GeoPyc pozwala określić objętość pozorną materiału stałego umieszczonego w komorze pomiarowej. Standardowo w urządzeniu stosowany jest specjalny proszek o uziarnieniu poniżej 250  $\mu$ m (niska sprężystość, brak zbrylania, cechy ciała cieczowego). Wykorzystanie proszku zamiast cieczy pozwala na wyeliminowanie zjawiska zwilżania materiału badanego (wsiąkania), co pozwala na badanie materiałów wykazujących dużą chłonność (higroskopijność). Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 26.



Źródło: foto autor



W zaplanowanych badaniach niezbędne było oznaczenie gęstości pozornej zrębków bez uwzględniania porów powstałych w wyniku pęknięć struktury (przyrost porów a tym samym spadek gęstości zrębków, jest czynnikiem oceny procesu zrębkowania). Zastosowanie wspomnianego proszku nie spełniało jednak przyjętych założeń. Dlatego też podjęto szereg badań mających na celu wskazanie materiału sypkiego pozwalającego na oznaczenie objętości cząstek nie uwzględniając celowo powstałych porów. Najlepsze efekty powtarzalności uzyskano przy zastosowaniu kulek szklanych o średnicy 1,5 mm (rys. 27).



Źródło: foto autor

Rys. 27. Widok a) komora pomiarowa w trakcie pomiaru wypełniona kulkami szklanymi, b) kulki szklane wykorzystywane do pomiarów

Materiał ten nie wnika w powstałe mikro i mako pory oraz wykazywał cechy materiałów quasi-cieczowych (niska ściśliwość, brak zbrylania itp.). Przeprowadzono kalibrację tej metody na ciałach o znanej gęstości i regularnym kształcie (walce stalowe o znanej geometrii). Wykazano, iż błąd pomiaru względem metody opartej na proszku wynosił średnio  $1,7 \pm 0,2\%$ .

Uzyskiwane wyniki pomiaru gęstości, biorąc pod uwagę trudność w oszacowaniu objętości ciała nieregularnego, uznano za wynik zadowalający i możliwy do wykorzystania w zaplanowanych badaniach.

Pomiar własciwy gestości zrębków przebiegał w dwóch etapach. W pierwszym wyznaczano objętość masy kulek szklanych umieszczonych w komorze (rys. 27) o znanej średnicy w oparciu o pomiar przesunięcia tłoka (pomiar i obliczenia wykonywane w aplikacji urządzenia). W drugim etapie, po umieszczeniu badanej próbki w cylindrze z kulkami, wyznaczano objętość sumaryczną – kulek i badanego materiału, a następnie objętość pozorną materiału jako różnica objętości sumarycznej i objętości kulek.

Gęstość pozorna określana jest w oparciu o klasyczną zależność:

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

gdzie:

DE – gęstość objętościowa (kg·m<sup>-3</sup>), m – masa próbki, zrębki (kg),

V – objętość pozorna (m<sup>3</sup>).

#### 4.2.5. Oznaczenie zawartość popiołu

Oznaczenie zawartości popiołu w pędach wierzby wykonano na stanowisku badawczym wyposażonym w piec muflowy firmy CZYLOK (rys. 28) o temperaturze maksymalnej 1300°C i mocy 4,5kW. Zgodnie z normą PN-EN ISO 18122:2016-01 oznaczanie zawartości popiołu polega na spaleniu próbki analitycznej paliwa o masie 1g ±0,005 w temperaturze 550°C.

Próbka do badań musiała być rozdrobniona do wielkości cząstek poniżej 1 mm i posiadać wilgotność tzw. analityczną. Przed rozpoczęciem oznaczenia popiołu określono masę wcześniej wyprażonych naczyń, następnie naważono odpowiednią ilość materiału - po 3 powtórzenia. Czas badania wraz z okresem schładzania próbki to 12 h. Po upływie tego czasu próbki zostały zważone ponownie.

Zawartość popiołu w stanie powietrznie suchym (analitycznym) wyznaczono ze wzoru:

$$A_{ar} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100$$

gdzie:

 $A_{ar}$ - zawartość popiołu w próbce powietrznie suchej (%), $m_1$ - masa tygla (g), $m_2$ - masa tygla z materiałem przed badaniem (g), $m_3$ - masa tygla z pozostałością po wyprażeniu (g).



Źródło: foto autor

#### Rys. 28 Piec muflowy firmy CZYLOK

Natomiast zawartość popiołu w stanie suchym wyznaczono ze wzoru:

$$A_d = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

gdzie:

 $A_d$  – zawartość popiołu w próbce w stanie suchym (%),

 $M_{ad}$  – wilgotność materiału w stanie analitycznym (%).

Uzyskane dane przedstawiono tabelarycznie jako cechy charakteryzujące materiał.

## 4.2.6. Oznaczenie naprężenia ścinającego wzdłuż włókien

Oznaczenie naprężeń ścinających wzdłuż włókien wykonano zgodnie ze zmodyfikowaną metodą według wytycznych normy francuskiej NF B 51-011 (rys. 29).



Źródło: (Eyma i in., 2004b, 2004a)

Rys. 29. Próbka do badań ścinania; a) kształt, wymiary próbki, b) sposób mocowania podczas testu, N – siły niszczące o przeciwnych zwrotach, a, b – elementy przystawki, c – możliwa płaszczyzna zniszczenia

Próbka pędów wierzby do badań posiadała geometrię zgodną z wymiarami przedstawionymi na rysunku 29 przy zachowaniu przekroju naturalnego. Próbka umieszczona była w przystawce zamontowanej w maszynie wytrzymałościowej Insight 2 firmy MTS (rys. 30).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 30. Schemat przystawki do ścinania wzdłuż włókien, a – uchwyt główny przystawki, b – przysłony robocze, c – możliwa powierzchnia ścinania wzdłuż włókien, d – próbka pędu wierzby, e –przekrój próbki, F<sub>t</sub> – siła ścinająca

Test ścinania realizowany był z prędkością charakterystyczną dla prób quasi-statycznych – 50 mm·min.<sup>-1</sup>. Podczas ścinania rejestrowane były (z częstotliwością 5 Hz) dwa kanały danych tj. siły w N oraz przemieszczenia w mm. Po przeprowadzeniu testu, wykorzystując suwmiarkę, określano geometrię przekroju ścięcia tj. dwóch długości boków prostokąta. Zarejestrowane wyniki, po przeprowadzonych testach, zapisywane były przez maszynę wytrzymałościową w formie raportu jako plik txt.



*Rys. 31. Przykładowe próbki pędów wierzby; a) przed testem, b) po teście ścinania z widoczną płaszczyzną ścinania* 

Wartość naprężenia ścinającego obliczono jako iloraz siły niszczącej i powierzchni ścinanej:

 $\tau_t = \frac{F_{max.}}{A}$ 

gdzie:

 $\tau_t$  – naprężenie ścinające (MPa),  $F_{max}$  – siła niszczaca (N),

A – powierzchnia ścinana (m<sup>2</sup>).

#### 4.2.7. Oznaczenie jednostkowej siły cięcia QCj oraz pracy cięcia WCj

Nakłady energii w procesach rozdrabniania są kluczowym parametrem wykorzystywanym do porównania różnych technologii między sobą jak również są często przedmiotem działań optymalizacyjnych. Dlatego też, uzyskane dane dotyczące nakładów pracy poddano dalszej analizie celem uzyskania mierników energochłonności analizowanego procesu. Analiza literatury wskazuje jednoznacznie (Abdallah i in., 2011; Nyström i in., 2018), iż odniesienie nakładów pracy do wielkości powierzchni cięcia pędów A wyrażonej w m<sup>2</sup> oraz długości krawędzi ostrza noża L<sub>n</sub> wyrażonej w mm umożliwi uzyskanie tzw. jednostkowych parametrów.

W celu określenia jednostkowej siły oraz pracy cięcia przeprowadzono cięcie pędów w dwóch przypadkach. Pierwszy prowadzono dla zminimalizowanej długości zrębka tj. około 1 mm (rys. 32) celem oznaczenia jednostkowych minimalnych sił cięcia  $Q_{Cjmin}$  oraz pracy  $W_{Cjmin}$ .



Źródło: opracowanie własne

Rys. 32. Widok przecinanych pędów w pierwszym wariancie testów cięcia, minimalna grubość zrębka ≈1,0 mm W takich warunkach siły oddziaływania odcinanej warstwy materiału na powierzchnię boczną noża są bardzo małe ( $F_T$  i  $F_{RN} \approx 0$ ) co pozwala założyć, iż zarejestrowane siły oporu procesu odnoszą się jedynie do przecinania struktury pędu przez krawędź ostrza. Poznanie tych wielkości umożliwi określenie przyrostu sił oraz pracy na pokonanie sił tarcia układu nóżmateriał w procesach zrębkowania tj. odcinania fragmentów pędów o długości >> 1 mm (10, 20, 30 i 40 mm). W drugim wariancie przeprowadzono testy cięcia przy założonych długościach zrębkowania według planu badań.

Wartość jednostkowej siły cięcia  $Q_{Cj}$  określono jako iloraz wartości siły cięcia oraz czynnej długości ostrza noża:

$$Q_{Cj} = \frac{F_{RP}}{L_n}$$

gdzie:

 $Q_{Cj}$  – jednostkowa siła przecinania (N·mm<sup>-1</sup>),  $F_{RP}$  – wartość siły przecinania (N),  $L_n$  – czynna długość krawędzi ostrza noża (mm).

Natomiast jednostkowa praca cięcia  $W_{Cj}$  obliczona została jako iloraz pracy przecinania  $W_C$  (kJ) oraz powierzchni przecinanego pędu A (m<sup>2</sup>):

$$W_{Cj} = \frac{W_C}{A} = \frac{1}{A} \int_{a}^{b} F_c(x) dx$$

gdzie:

 $W_{Cj}$  – jednostkowa praca cięcia (kJ·m<sup>-2</sup>),

*W*<sub>C</sub> – praca cięcia poprzecznego pędu (kJ),

A – powierzchnia przekroju poprzecznego przecinanego pędu (m<sup>-2</sup>),

Fc(x) – przebieg siły cięcia pędu,

*a, b* – początek oraz koniec procesu cięcia pędu wierzby.

#### 4.2.8.Oznaczenie energochłonności rozdrabniania Ers – metoda quasi-statyczna oraz Er – metoda dynamiczna

Kolejnym ważnym parametrem wykorzystywanym do oceny procesów przetwarzania jest tzw. energochłonność procesu rozumiana jako nakład energii na jednostkę produktu. W przypadku cięcia metodą quasi-statyczną nakłady pracy  $W_C$  odniesiono do masy uzyskiwanych zrębków  $m_z$  obliczając:

$$E_{rs} = \frac{W_c}{m_z}$$

gdzie:

 $E_{rs}$  – energochłonność rozdrabniania (kJ·kg<sup>-1</sup>),  $W_C$  – praca cięcia poszczególnych pędów (kJ),  $m_z$  – masa odcinanego zrębka (kg). Parametr ten zostanie odniesiony do nakładów energii na proces rozdrabniania w warunkach dynamicznych celem zweryfikowania czy istnieje możliwość powiazania energochłonności procesu rozdrabniania w warunkach laboratoryjnych (quasi-statycznych) z metodami dynamicznymi.

W przypadku cięcia metodą dynamiczną nakłady energii  $E_C$  odniesiono do masy uzyskiwanych zrębków  $m_z$  obliczając:

$$E_r = \frac{E_c}{m_z}$$

gdzie:

 $E_r$  – energochłonność rozdrabniania (kJ·kg<sup>-1</sup>),

 $E_C$  – energia zrębkowania poszczególnych pędów (kJ),

 $m_z$  – masa zrębków (kg).

#### 4.2.9. Oznaczenie naprężeń rozłupujących

Głównym celem wykonywania testów rozłupywania próbek pędów wierzby było poznanie naprężeń krytycznych rozłupujących zrębki.

W tym celu przeprowadzono testy na próbkach pędów o długości 50 mm (lz+2e) przygotowanych zgodnie z rysunkiem (rys. 33). Przebieg testu został oparty na normie PN-54 D-04106 – *Badanie łupliwości* oraz wytycznych literaturowych (Fortino i in., 2012). Testy rozłupywania przeprowadzono na stanowisku badawczym, wykorzystując uniwersalną maszynę wytrzymałościową Insight 2 firmy MTS. Próbki do badań przygotowane zostały z wykorzystaniem urządzeń do obróbki drewna. Materiał mocowany za pomocą specjalnych uchwytów poddano procesowi rozciągania siłami  $F_1$  i  $F_1$ ' doprowadzając do zniszczenia - pęknięcie zrębka w środkowej części (rys. 34).

Wielkość naprężenia niszczącego  $\sigma_z$ , badanego fragmentu pędu, obliczono z zależności:

$$\sigma_{z} = \sigma_{g} + \sigma_{r} = \frac{M_{g}}{W_{g}} + \frac{F_{1}}{A} = \frac{F_{1} \cdot (\frac{l_{z}}{2} + e) \cdot 6}{d \cdot l_{z}^{2}} + \frac{F_{1}}{d \cdot l_{z}}$$

gdzie:

$\sigma_{g}$	_	naprężenie gnące (Pa),
$\sigma_r$	_	naprężenie rozciągające (Pa),
$M_g$	_	moment gnący w płaszczyźnie środkowej zrębka (Nm),
$W_g$	_	wskaźnik przekroju na zginanie (m <sup>3</sup> ),
$F_{I}$	_	siła max. w teście rozłupywania (N),
А	_	powierzchnia płaszczyzny rozłupania (m <sup>2</sup> )
$l_z$	_	długość zrębka (m),
е	_	przesunięcie punktu przyłożenia siły względem teoretycznej krawędzi zrębka
		(mm),
d	_	średnica zrębka (m).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 33. Schemat próbki pędu poddawanej testom rozłupywania wraz z oznaczeniem sił,  $l_z$ - długość zrębka, e – przesunięcie przyłożenia sił rozłupujących od teoretycznej krawędzi zrębka,  $F_1$ ,  $F_1$ ' – siły rozłupujące



Źródło: opracowanie własne

Rys. 34. Widok próbek pędów po teście rozłupywania

## 4.2.10. Oznaczenie gęstości nasypowej zrębków

Gęstość nasypową uzyskanych granulatów oznaczono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 15103:2010. Pojemnik o znanej masie  $m_i$ , został napełniony z wysokości 200 – 300 mm. Następnie wstrząsano go (2 razy upuszczano z wysokości 12-15 cm), a nadmiar materiału pozostający powyżej krawędzi zbiornika usuwano (poprzez zgarnięcie drewnianą listwą). Dla tak napełnionego pojemnika określano jego masę. Obliczenia gęstości nasypowej  $BD_{ar}$  (bulk density) przy wilgotności  $M_{ar}$ , określano z zależności:

$$BD_{ar} = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

gdzie:

 $\begin{array}{ll} BD_{ar} & - \operatorname{gestość nasypowa}\left(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}\right), \\ m_2 & - \operatorname{masa} \operatorname{pojemnika} \operatorname{wraz} z \operatorname{materiałem}\left(\mathrm{kg}\right), \\ m_1 & - \operatorname{masa} \operatorname{pustego} \operatorname{pojemnika}\left(\mathrm{kg}\right), \\ V & - \operatorname{objętość pojemnika}\left(\mathrm{m}^3\right). \end{array}$ 

Do badań wykorzystano pojemnik znormalizowany (rys. 35) o objętości  $V = 0.02 \text{ m}^3$ .



Źródło: opracowanie własne

*Rys. 35. Stanowisko do oznaczania gęstości nasypowej granulatu (waga, pojemnik miarowy oraz listwa zgarniająca)*
# 5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

## 5.1. Charakterystyka pędów wierzby

Przeprowadzone analizy w pierwszej kolejności dotyczyły charakterystyki fizycznej pędów 3-letniej wierzby. Jak wspomniano wcześniej materiał do badań pozyskiwany był z plantacji roślin energetycznych położonej przy Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki UR w Krakowie (rys. 36). Wierzba uprawiana jest w systemie rzędowym (rozstaw rzędów 75 cm), natomiast odległość roślin w rzędzie wynosi 50 cm. Zbiór wierzby z plantacji odbywał się przy użyciu piły mechanicznej od listopada do marca. Tak zebrane pędy formowane były w wiązki i transportowane do miejsca składowania (zacieniona wiata).



Źródło: foto autor

*Rys. 36. Pędy wierzby wiciowej, a) widok plantacji, b) ścięte i uformowane pędy, c) pędy składowane przed badaniami* 

Dla zebranych pędów dokonano oznaczenia podstawowych parametrów geometrycznych. Dokonano ich przy wykorzystaniu bezpośrednich urządzeń pomiarowych (suwmiarka elektroniczna firmy Limit – określenie średnicy, przymiar liniowy – określenie długości pędów) (rys. 37).



Źródło: foto autor



Dokonano również oznaczenia liczby pędów w karpie oraz oznaczono wielkość plonu. jako masę pędów (bezpośrednio po zbiorze) zebranych z oznaczonej powierzchni. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej w celu określenia wartości średnich oraz odchylenia standardowego. Rezultaty przedstawiono w tabeli 13.

Uzyskane wyniki mogą zostać uwzględnione przy projektowaniu elementów urządzeń do przetwarzania pędów tj. wielkości gardzieli urządzeń zrębkujących, systemów wspomagania podawania materiału itp. Zarówno wielkość plonu (ok. 70 t·ha<sup>-1</sup>) jak i wartości pozostałych parametrów charakteryzujących plon przewyższają wartości podawane w literaturze (ok. 60 t·ha<sup>-1</sup>) (Szczukowski i inni 2004; Rosenquist, Dawson 2005).

Parametr	średnia	max./min.	odch. stand.
Liczba pędów w karpie (szt.)	9,9	28,0 / 2,0	4,6
Wysokość pędów (m)	4,40	6,55 / 1,85	0,74
Średnica przy podstawie (mm)	27	41 / 15	6,4
Wilgotność (%)	51,5	53,2 / 50,1	1,5
Plon (t·ha <sup>-1</sup> )	72 * 36 **	-	-
Zawartość popiołu w stanie suchym (%)	0,73	-	0,014
Zawartość popiołu w stanie roboczym (%)	1,52	-	0,03
Wartość opałowa w stanie suchym $(J \cdot g^{-1})$	18200	-	162
Wartość opałowa w stanie roboczym (J·g <sup>-1</sup> )	7672	-	75,2
Gęstość właściwa (kg·m <sup>-3</sup> )	0,881	-	0,009

### Tabela 13. *Wybrane właściwości wierzby wiciowej*

\*- plon świeżej masy po 3 latach,

\*\*- plon suchej masy po 3 latach

Źródło: opracowanie własne

## 5.2. Charakterystyka mechaniczna pędów wierzby

Przeprowadzone testy laboratoryjne umożliwiły określenie parametrów mechanicznych badanego materiału. Informacje te są kluczowe do opisu przebiegu zmian parametrów procesu zrębkowania.

## 5.2.1. Współczynnik tarcia

Przeprowadzone badania zgodnie z przedstawioną metodyką umożliwiły oznaczenie współczynnika tarcia statycznego  $\mu_{Ss}$  oraz ślizgowego  $\mu_{Sk}$ .

 $\frac{M_{ar} (\%)}{M_{ar} (\%)} \frac{Układ drewno wierzby - stal}{\mu_{Ss} (-)} \frac{C (N)}{S1} \frac{\mu_{Sk} (-)}{0,48 \pm 0,02} \frac{3,37 \pm 0,32}{3,37 \pm 0,32} \frac{0,36 \pm 0,03}{0,36 \pm 0,03}$ 

Tabela 14. Współczvnnik tarcia statycznego, ślizgowego oraz siła kohezji

Źródło: opracowanie własne

Uzyskane wyniki zawierają się w przedziałach wartości uzyskiwanych przez innych badaczy. W badaniach, które przeprowadzili Bujang i Safuan (2011) wykazano, iż współczynnik tarcia rozdrobnionej biomasy kukurydzy istotnie ulega zmianie w zależności od powierzchni tarcia. Największymi współczynnikami tarcia charakteryzowały się układy biomasa kukurydzy-powierzchnia drewna (0,41-0,44) oraz biomasa kukurydzy-powierzchnia stali ocynkowanej (0,66). Współczynniki tarcia dynamicznego były o około 42-45% niższe.

Uzyskane wyniki wskazują, iż współczynnik tarcia statycznego, który wynosi 0,48, jest około 33% większy od współczynnika ślizgowego. Jak wskazuje literatura (Płaza i in., 2005) może to mieć znaczenie przy procesach charakteryzujących się niewielką prędkością roboczą. Dochodzi często do powstawania zjawiska "stick-slip" ( $\mu_S >> \mu_k$ ), które ma istotne znaczenie na warunki eksploatacyjne urządzeń.

## 5.2.2. Współczynnik sprężystości

Kolejnym parametrem wyznaczonym dla badanych pędów wierzby był współczynnik sprężystości. Według literatury jest to wielkość niezbędna do pełnego opisania właściwości mechanicznych roślin, istotnie wpływająca na szereg ich właściwości (Frączek, 1996; Ślipek, 1987). Jak wskazano w metodyce, badania obejmowały pędy o wilgotności 51% i średnicy w zakresie 20-40 mm. Uzyskane wyniki przedstawione na poniższym wykresie (rys. 38) wskazują, iż wraz ze wzrostem średnicy współczynnik sprężystości maleje. Największą wartość współczynnika zarejestrowano dla pędów o najmniejszej badanej średnicy 6980 MPa, natomiast najmniejszy dla pędów o największej badanej średnicy 3440 MPa. Przebieg tych zmian najlepiej opisuje funkcja kwadratowa  $E=-4,21 \cdot d^2-88,87 \cdot d-6826,8$  dla której dopasowanie do punktów pomiarowych, opisane współczynnikiem  $\mathbb{R}^2$ , wynosi 0,98.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 38. Zależność współczynnika sprężystości E od średnicy pędów wierzby

#### 5.2.3. Jednostkowa minimalna praca cięcia W<sub>Cjmin</sub>

Pracę cięcia określono przy prowadzeniu testów przecinania dla minimalnej długości zrębka równej 1 mm. Przeprowadzana analiza statystyczna wykazała brak istotnych różnic w wartości  $W_{Cjmin}$  zarówno w zależności od średnicy pędów (w zakresie średnic 20-40 mm) przy wilgotności 51% jak i kąta ostrza noża  $\beta$  w zakresie 15-30°. Analizując wyniki przedstawione na poniższym wykresie (rys. 39) można jednak zauważyć trend spadkowy wartości jednostkowej minimalnej pracy cięcia wraz ze wzrostem średnicy pędu. Wartość średnia  $W_{Cjmin}$  wynosi 33,41 kJ·m<sup>-2</sup>, a odchylenie standardowe 4,57 kJ·m<sup>-2</sup> (co stanowi około 13% wartości średniej).

Znajomość wartości pracy cięcia  $W_{Cjmin}$  ostrza noża umożliwi określenie wzrostu wartości pracy jednostkowej przy zrębkowaniu ( $l_z$ =10-40 mm), gdzie oprócz oporów przecinania struktury materiału występują znaczne siły tarcia układu materiał-nóż.



*Rys.* 39. Zależność jednostkowej pracy cięcia  $W_{Cimin}$  od średnicy pędu wierzby

## 5.2.4. Jednostkowa minimalna siła cięcia

Analiza uzyskanych danych wykazała, iż minimalna jednostkowa siła przecinania krawędzi ostrza noża  $Q_{Cjmin}$  wynosi średnio 34,34 N·mm<sup>-1</sup>, a odchylenie standardowe 3,60 N·mm<sup>-1</sup>.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 40. Zależność jednostkowej minimalnej siły cięcia Q<sub>Cjmin.</sub> od średnicy pędu wierzby

Analiza statystyczna wykazała brak istotnych różnic dla  $Q_{Cjmin}$  w zależności od średnicy pędu w zakresie 20-40 mm oraz kąta ostrza noża  $\beta$  15-30°.

Wartości jednostkowe minimalnej siły przecinania są bardzo istotne przy definiowaniu obciążenia układu tnącego w zależności od czynnej długości ostrza noża. Dodatkowo możliwe jest również określenie przyrostu siły jednostkowej przecinania w zależności od geometrii uzyskiwanych zrębków (dł. zrębka  $l_Z$ , średnicy pędu d) oraz od parametrów procesu przecinania (kąt ostrza noża  $\beta$ , kąt pochylenia pędu  $\varepsilon$ ).

#### 5.2.5. Naprężenia ścinające wzdłuż włókien $\tau_i$

Wartość naprężeń ścinających wzdłuż włókien oznaczona została dla pędów wierzby o średnicy 20-44 mm i wilgotności 51,5%.



Źródło: opracowanie własne



Zaobserwowano zmiany wartości naprężenia ścinającego w zależności od średnicy badanego pędu (rys. 41). W badanym przedziale średnic 20-40 mm zmiana wartości naprężenia wynosiła średnio 1,2 MPa (od 1,3 do 2,5 MPa). Analiza statystyczna wykazała, iż przebieg tych zmian najlepiej opisuje wielomian 2-stopnia ( $\tau_i=0,0015d^2+0,054d+1,76$ ), dla którego współczynnik determinacji R<sup>2</sup> wynosi 0,95. Odnosząc uzyskane wyniki do danych literaturowych przedstawionych w tabeli 4 można zauważyć, iż wartości te są stosunkowo niskie. Badania prowadzone były na próbkach drewna o wilgotności około 51% co sprawia, iż wartości naprężeń są znacznie niższe niż dla drewna powietrznie suchego (Tabela 15).

Przedstawione wyniki w tabeli 15 poddano dalszej analizie wykazując, iż istnieje duża korelacja pomiędzy naprężeniami ścinającymi, a ich gęstością właściwą (rys. 42).

Tabela 15.

	Gatunek drewna	Gęstość właściwa (g·cm <sup>-3</sup> )	Krytyczne naprężenie niszczące (MPa)
Fromager	Ceiba pentandra Gaertn.	0.204	1.30
Ayous	Triplochiton scleroxylon K.Schum.	0.315	2.48
Virola	Virola spp.	0.418	4.64
Niangon	Tarrietia densiflora Aubrev.	0.47	5.15
Grignon franc	Ocotea rubra Mez.	0.485	5.43
Dodomissinga	Parkia nitida Miq.	0.499	6.70
Frake	Terminalia superba Engl. Et Diels	0.554	5.96
Beech	Fagus sylvatica	0.573	7.67
Bagasse	Bagassa guianensis Aubl.	0.689	5.64
Eucalyptus	Eucalyptus globulus Labill.	0.705	6.20
Moabi	Baillonella toxisperma	0.714	6.48
Wacapou	Vouacapoua americana Aubl.	0.755	7.76
Ipé	<i>Tabebuia</i> sp.	0.851	8.26
Boco	Bocoa prouacensis Aubl.	1.109	8.78

Gęstość właściwa oraz naprężenie ścinające drewna egzotycznych gatunków (w - 12%)

Źródło: na podstawie (Eyma et al., 2004a, 2004b)



Źródło: opracowanie własne

Rys. 42. Naprężenie ścinające drewna wzdłuż włókien w zależności od jego gęstości właściwej

Biorąc pod uwagę gęstość drewna wierzby przy wilgotności 12%, która wynosi około 0,42-0,44 g·cm<sup>-3</sup> (Spława-Neyman i Owczarzak, 2019), można założyć, iż charakteryzuje się podobnym naprężeniem ścinającym jak gatunki drewna Viroli, Niangonu czy też Grignona franc.

#### 5.2.6. Naprężenia rozłupujące $\sigma_z$

W celu pełniejszego opisu czynników mających wpływ na proces zrębkowania niezbędne wydaje się oznaczenie krytycznych naprężeń rozłupujących wzdłuż włókien. Analizując zarejestrowane wyniki (rys. 43) można stwierdzić, iż wartość naprężeń ulega zmianie wraz ze wzrostem średnicy pędu wierzby. Wykazano, iż zmiany naprężeń krytycznych w zależności od średnicy próbki, zachodzą zgodnie z funkcją liniową opisaną zależnością:

$$\sigma_z = 0.03 \cdot d + 0.66$$

dla której dopasowanie do punktów pomiarowych było dość dobre (R<sup>2</sup>=0,91). Wartość naprężenia, w badanym przedziale średnic pędów, zawiera się od 1,2 do 1,9 MPa.



Źródło: opracowanie własne

*Rys. 43. Przebieg zmian naprężenia krytycznego na rozłupywanie*  $\sigma_z$  w zależności od średnicy pędu d

## 5.3. Zrębkowanie – metoda quasi-statyczna

Badania procesu zrębkowania pędów wierzby przeprowadzono w pierwszej kolejności metodą quasi-statyczną. Doświadczenia te pozwoliły na uzyskanie informacji o przebiegu procesu, a w szczególności o zmianach wartości sił, nakładów energii oraz parametrów jakościowych uzyskiwanych zrębków. Jak już wspomniano w rozdziale Metodyka badań, zakres zmiennych obejmował różne średnice pędów (w przedziale 20-44 mm), długości odcinanych zrębków (0-40 mm) oraz kąty ostrza noża (15°, 20°, 25° i 30°) i pochylenia podawania materiału (0°, 20°, 30°, 40°).

Analiza zarejestrowanych przebiegów zmian siły podczas przecinania pędów wykazała, iż można je podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- pierwsza obejmuje przebiegi sił, w których uzyskany zrębek nie posiada widocznych pęknięć struktury wzdłuż włókien (rys. 44.a). Przebiegi siły cięcia w czasie przecinania pędu przypomina klasyczny rozkład normalny, w którym wzrost oraz spadek siły jest proporcjonalny do czynnej długości krawędzi przecinającej pęd wierzby. Po przecięciu połowy przekroju pędu można zauważyć, iż wartość siły ulega cyklicznym zmianom o niewielkiej amplitudzie, co może być spowodowane zwiększeniem powierzchni tarcia materiału o powierzchnię boczną noża. Proces ten przypomina zjawisko opisane przez trybologów jako "stick-slip". Jak wskazuje literatura (Płaza i in., 2005) występuje ono często przy stosunkowo małych prędkościach, zwiększonej sile nacisku między materiałami, jak również przy zwiększonej wilgotności. Prawdopodobnie, ze względu na to, iż wartość współczynnika tarcia spoczynkowego jest znacznie większa od współczynnika tarcia ślizgowego, następuje cykliczne zrywanie spoczynkowych połączeń na rzecz krótkotrwałego ruchu. Zjawisko to traci na znaczeniu w przypadku procesu zachodzacego przy dużych predkościach.
- druga grupa to przypadki w których uzyskany zrębek posiadał jedno widoczne pęknięcie struktury wzdłuż włókien (rys. 44.b). Wartość siły przecinania w początkowym okresie (do około połowy przekroju pędu) przebiega podobnie jak w pierwszym przypadku. Siła narasta proporcjonalnie do zwiększającej się długości krawędzi tnącej, a następnie po przekroczeniu naprężeń krytycznych (ścinających oraz rozrywających), w strukturze zrębka następuje gwałtowny jej spadek (dochodzący do 65% siły maksymalnej). W dalszej części procesu przecinania wartości siły ulegają pewnej stabilizacji. Na niektórych przebiegach można było również zaobserwować występowanie tętnienia siły (zjawisko związane z stick-slip-em), ale w dużo mniejszym zakresie. Zrębki uzyskane w wyniku przecięcia charakteryzowały się zwartą budową z widocznym pęknięciem wzdłużnym. Tego typu przebiegi występowały najczęściej gdy długość cięcia (zrębkowania) wynosiła 30 oraz 40 mm.
- trzecią odrębną grupę przebiegów zmian siły przecinania pędów wierzby stanowią przypadki, w których uzyskiwane zrębki posiadają liczne, widoczne wzdłużne pęknięcia struktury (rys. 44.c). Przebiegi charakteryzują się gwałtownymi spadkami wartości siły, które odpowiadają występowaniu pęknięcia struktury zrębka. Zmianom wartości siły przecinania towarzyszyły niekiedy zjawiska tętnienia zaobserwowane we wcześniejszych przebiegach. Występowanie tego zjawiska było silnie powiązane ze średnicą pędu oraz długością zrębkowania (*lz*). Przy przecinaniu pędów o średnicy 33-40 mm na zrębki o długości 30-40 mm zarejestrowano wspomniane tętnienie oraz towarzyszące mu efekty akustyczne – moment zerwania połączenia spoczynkowego powiązany był z charakterystycznym dźwiękiem przesuwu materiału (drewna) po powierzchni bocznej noża.

Na podstawie przebiegów zmian siły przecinania wskazano charakterystyczne krzywe obrazujące wspomniane powyżej grupy (rys. 45). W przypadku przebiegu przedstawionego na rysuku 44.a mamy do czynienia z przecinaniem pędu, w którym nie dochodzi do przekroczenia naprężeń krytycznych związanych ze ścinaniem oraz rozłupywaniem. Takie przebiegi występują najczęściej podczas zrębkowania pędów wierzby z zastosowaniem stosunkowo małych katów geometrycznych układu tnacego ( $\beta$  i  $\varepsilon$ ) oraz gdy długość zrebka jest wieksza od średnicy pedu (lz > d).



Przemieszczenie krawędzi noża I (mm)

### Rys. 44. Zestawienie przykładowych, charakterystycznych przebiegów zmiany siły przecinania F (N) w zależności od przemieszczenia ostrza noża na przekroju pędu l (mm)

W przypadku przecinania pędów, w których dochodzi do przekroczenia naprężeń krytycznych, z widocznym zjawiskiem pęknięcia zrębka wzdłuż włókien, przebieg siły cięcia jest dość charakterystyczny. Rejestrowana siła, najczęściej po przecięciu połowy przekroju, ulega gwałtownemu spadkowi.

Taki przebieg procesu cięcia wskazuje na istnienie granicy interakcji między parametrami układu zrębkowania a właściwościami fizycznymi materiału, gdzie dochodzi do przekroczenia naprężeń krytycznych. Jest to typowe dla zrębkowania - jednoczesne odcinanie oraz rozłupywanie uzyskiwanego zrębka. Tego rodzaju przebiegi najczęściej występowały gdy zastosowane były "pośrednie" warianty zmiennych parametrów badanych podczas testów. Możliwość

Źródło: opracowanie własne

uchwycenia wskazanej granicy pozwoli na prowadzenie procesu zrębkowania, w którym uzyskane zrębki będą się charakteryzować oczekiwanymi właściwościami.

Trzeci rodzaj przebiegów sił przecinania obrazuje zjawiska charakterystyczne przy zrębkowaniu drewna wielkowymiarowego. Rejestrowane siły układu zrębkującego (siły oporów przecinania krawędzi noża oraz tarcia) ulegają dynamicznym zmianom w środkowej części przebiegu. Gwałtowne spadki sił obrazują moment przekroczenia naprężeń krytycznych i występowania widocznych pęknięć zrębka. Taki charakter przebiegu procesu cięcia występuje najczęściej wtedy gdy geometria układu zrębkowania ma wartości z górnego przedziału ( $\beta$  i  $\varepsilon$ ) oraz gdy długość uzyskiwanych zrębków jest zbliżona lub mniejsza od średnicy pędów ( $lz \leq d$ ).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 45. Widok typowych przebiegów zmiany wartości siły w procesie przecinania pędów wierzby, a) bez widocznych pęknięć wzdłużnych uzyskiwanego zrębka, b) z jednym głównym pęknięciem wzdłużnym zrębka, c) z wieloma widocznymi pęknięciami wzdłużnymi zrębka

#### 5.3.1. Praca cięcia pędów wierzby wiciowej

Testy przecinania pędów wierzby, zgodnie z przedstawioną metodyką, pozwoliły na określenie nakładów pracy na proces cięcia. Dla zaplanowanych wariantów testów (charakterystyczne kąty  $\beta$ ,  $\varepsilon$  i , długości zrębkowania  $l_z$  oraz geometrią materiału - średnica d) dokonano pomiarów nakładów pracy W (J). Na rysunku 46 zestawiono uzyskane wyniki w zależności od długości zrębka (odległość między powierzchniami cięcia). Pokazane zostały wartości pracy przecinania W dla kąta ostrza noża  $\beta$  - 15°, 20° i 30° oraz kąta  $\varepsilon$  – 0°, 20°, 30° i 40°. Ze względu na ograniczenia wielkości rysunku (zachowanie czytelności) nie przedstawiono danych dla kąta  $\beta$  – 25°.

Analizując uzyskane wartości potwierdzono, iż największy wpływ na pracę przecinania *W* ma średnica pędu (czyli też powierzchnia przekroju poprzecznego pędu w miejscu cięcia), niezależnie od zastosowanych kombinacji zmiennych doświadczenia. Dość oczywistym wydaje

się również, iż praca przecinania ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem kąta ostrza noża  $\beta$ . Podobne tendencje, związane z wpływem kąta ostrza noża na nakłady energetyczne procesu przecinania, wykazano w badaniach rozdrabniania drewna sosnowego (Nyström i in., 2018).

Największe nakłady energii, około 160 J, odnotowano w przypadku pędów o średnicy d=40 mm przy długości zrębka  $l_z=40 \text{ mm}$  z zastosowaniem noża o kącie ostrza  $\beta=30^{\circ}$  przy kącie pochylenia pędów  $\varepsilon=0^{\circ}$ . Natomiast najmniejsze nakłady energii (100-105 J) zarejestrowano dla pędów o średnicy i długości zrębkowania równej 40 mm przy zastosowaniu noża o kącie ostrza  $\beta=15^{\circ}$  oraz pochyleniu pędów  $\varepsilon=30$  i 40°.

W przypadku pozostałych pędów, wartość pracy cięcia ulegała zmianom podobnie do tych o średnicy 40 mm. Praca cięcia pędów z zastosowaniem noża o kącie ostrza 30 ° była bardzo wyrównana. Zmniejszenie wartości kąta ostrza noża  $\beta$  spowodowało zmniejszenie nakładów energetycznych dla wszystkich założonych długości zrębka.

Należy podkreślić, iż w przypadku zwiększenia kąta nachylenia podawania materiału  $\varepsilon$  wzrasta również rzeczywista powierzchnia cięcia. Dla kąta  $\varepsilon$ =0° powierzchnią cięcia jest przekrój kołowy, natomiast wraz ze wzrostem kąta pochylenia powierzchnia cięcia zmienia się w elipsę o polu przekroju większym od koła ( $\Delta A$ =0-30%) (rys. 48). Wzrost powierzchni cięcia powoduje zwieszenie drogi roboczej krawędzi tnącej (rys. 49) (d – średnica pędu w przypadku powierzchni cięcia w kształcie koła, b – dłuższa średnica w przypadku powierzchni elipsy). Sytuacja ta powinna spowodować zwiększenie pracy cięcia ostrza noża  $W_C$ . Uzyskane wyniki wskazują jednak, iż wzrost powierzchni cięcia nie powoduje wzrostu nakładów energetycznych (a nawet ich spadek). Można to tłumaczyć tym, iż pozostałe składowe sił roboczych ulegają istotnemu zmniejszaniu.

Jak wskazano w metodyce, pracę procesu cięcia Wc obliczono jako całkę oznaczoną (między punktami początku cięcia *a* oraz końca *b*) z przebiegu siły przecinania  $F_C$  -  $W_C = \int_a^b f(lx) dx$ . Analizując składowe sił roboczych występujących podczas przecinania możemy wyróżnić dwie kategorie sił;

- siły oporu krawędzi ostrza noża,
- siły oporu tarcia o powierzchnię boczną noża.



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 46. Zestawienie danych przebiegu zmiany pracy przecinania W w zależności od głównych kątów cięcia β i ε oraz długości zrębkowania l<sub>z</sub>

Pracę całkowitą cięcia można więc zapisać:

$$W_{C} = W_{P} + W_{T} = \int_{a}^{b} f_{P}(lx)dx + \int_{a}^{b} f_{T}(lx)dx$$

gdzie:

 $W_C$  – całkowita praca przecinania (J),

- $W_P$  praca sił pokonujących opory krawędzi ostrza noża (J),
- $W_T$  praca sił pokonujących opory tarcia o powierzchnie boczne noża (J),
- $f_P(lx)$  funkcja przebiegu sił pokonujących opory krawędzi ostrza podczas przecinania pędów,
- $f_T(lx)$  funkcja przebiegu całkowitych sił pokonujących opory tarcia podczas przecinania pędów.

Przy zwiększeniu powierzchni cięcia w przypadku pędów przecinanych pod zadanym kątem  $\varepsilon$  wartość pracy przecinania wzrasta  $W_P$ <sup>↑</sup>. Zakładając, iż praca całkowita przecinania pędów wierzby utrzymuje podobną wartość lub ulega niewielkiemu zmniejszeniu  $W_C$ <sup>↑</sup> przy zwiększaniu wartości kąta  $\varepsilon$ , to wartość pracy sił oporów tarcia  $W_T$  musi ulec istotnemu zmniejszeniu ( $W_T$ <sup>↓</sup> =  $W_C$ <sup>↑</sup>- $W_P$ <sup>↑</sup>).

Na poniższym rysunku (rys. 47) przedstawiono graficznie wzrost powierzchni przekroju cięcia wraz ze wzrostem kąta pochylenia pędu *ε*.



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 47. Schemat procesu zrębkowania przy różnych pochyleniach pędu (kąt ε) wraz z przedstawieniem powierzchni przekroju cięcia i ich różnic; a), b) powierzchnia w kształcie elipsy, c) powierzchnia w kształcie koła



Wzrost powierzchni cięcia pędów wierzby (dla badanych średnic) w zależności od kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$  przedstawiono na rysunku 48.

*Rys.* 48. Wykres powierzchni rzeczywistej cięcia A w zależności od kąta pochylenia pędów ε w procesie cięcia

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej celem opracowania modelu opisującego przebieg zmian pracy cięcia  $W_C$  w zależności od analizowanych parametrów tj.  $\beta$ ,  $\varepsilon$ ,  $l_z$ , d. Przeprowadzona analiza wariancji jak i proces modelowania wykazał brak statystycznie istotnych zależności pracy cięcia od kąta  $\varepsilon$ . Zmiana kąta podawania pędów nie wpływa na całkowite nakłady energetyczne co wstępnie wykazano w powyższej analizie. Wzrost powierzchni cięcia w przypadku pędów pochylonych o wartość kąta  $\varepsilon$  nie powoduje istotnych zmian nakładów energetycznych. Jednakże zaobserwowano jego wpływ na jakość uzyskiwanych zrębków (geometrie i strukturę zrębków).

Przeprowadzona estymacja nieliniowa w programie Statistica v.13 umożliwiła uzyskanie modelu trzech wspomnianych zmiennych, który przyjął następującą postać:

$$W_C = (\beta \cdot d \cdot l_z)^a + b \cdot \beta + c \cdot d + e \cdot l_z + g$$

gdzie:

 $W_C$ - nakłady pracy w procesie cięcia (J), $\beta$ - kąt ostrza noża (°), $l_z$ - długość zrębkowania (mm),d- średnica pędu (mm),

*a*, *b*, *c*, *e*, *g* – stałe modelu.

Źródło: opracowanie własne

Wyniki tej estymacji przedstawiono w tabeli 16.

Stała	Wartość	Błąd stand.	Poziom p	Dolna gr. ufności	Górna gr. ufności	$\mathbb{R}^2$
а	0,476	0,0055	0,0000	0,465	0,487	
b	-0,771	0,153	0,0000	-1,072	-0,469	0.05
С	2,748	0,115	0,0000	2,520	2,975	0,95
е	-1,377	0,131	0,0000	-1,635	-1,118	
g	-60,959	4,694	0,0000	-70,185	-51,733	

Tabela 16. Wyniki estymacji nieliniowej dla modelu  $W_C = (\beta \cdot d \cdot lz)^a + b \cdot \beta + c \cdot d + e \cdot lz + g$ 

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie tak opracowanego modelu możliwe będzie określenie nakładów pracy w procesie cięcia pędów wierzby. Model ograniczony jest granicami wartości parametrów wejściowych analizowanych w pracy.

O możliwości stosowania ustalonego modelu do prognozowania jednostkowych nakładów pracy w procesie cięcia pędów wierzby świadczy zależność zamieszczona na rysunku 49, na której przedstawiono rozrzut wartości obserwowanych względem przewidywanych. Informacje te, potwierdzają wizualnie (wysokie  $R^2 = 0.95$ ) dobre dopasowanie opracowanego modelu do danych eksperymentalnych.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 49. Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych dla opracowanego modelu

#### 5.3.2. Jednostkowe nakłady pracy w procesie cięcia

Przeprowadzona analiza wykazała, iż na wartość jednostkowych nakładów energetycznych  $W_{Cj}$  istotny wpływ mają analizowany kąt  $\beta$  oraz długość zrębkowania  $l_z$ . Na rysunku 50 przedstawiono wyniki  $W_{Cj}$  dla skrajnych przypadków. Pierwszy dotyczy wariantu przecinania pędów wierzby z zastosowaniem kąta noża  $\beta=15^{\circ}$  oraz nachylenia pędów  $\varepsilon=40^{\circ}$ . Zarejestrowane parametry wskazują, iż proces charakteryzuje się najmniejszymi nakładami energetycznymi. Linią poziomą oznaczone zostały minimalne jednostkowe nakłady energetyczne ponoszone na przecinanie pędów przez samą krawędź ostrza noża  $W_{Cjmin}$ . (34 kJ·m<sup>-2</sup>) przy minimalnej długości zrębka  $l_z=1$  mm. Można zauważyć, iż wraz ze wzrostem długości zrębkowania  $l_z$  następuje wzrost jednostkowych nakładów energetycznych, który w przypadku  $l_z=40$  mm wynosi średnio 65 kJ·m<sup>-2</sup> – wzrost o około 85%.





Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 50. Przebieg zmian jednostkowych nakładów pracy w procesie przecinania, a) wartości najmniejsze dla wariantu  $\beta=15^\circ$ ,  $\varepsilon=40^\circ$ , b) wartości największe dla wariantu  $\beta=30^\circ$ ,  $\varepsilon=0^\circ$ 

Podobne zjawisko zaobserwowano w przypadku zrębkowania pędów z zastosowaniem ostrza noża o kącie  $\beta$ =30° i pochyleniu pędów  $\varepsilon$ =0° (rys. 50.b). W tym przypadku wzrost jednostkowych nakładów cięcia  $W_{Cj}$  wraz ze wzrostem długości zrębkowania  $l_z$  był bardziej dynamiczny i dla wartości lz = 40 mm jednostkowe nakłady wynosiły średnio  $W_{Cj}$ = 115 kJ·m<sup>-2</sup>. Odnosząc te wartości  $W_{Cj}$  do minimalnych jednostkowych nakładów cięcia  $W_{Cjmin}$  zauważmy, iż wzrost ten wynosi około 228%. Ten znaczny wzrost spowodowany jest głównie zwiekszeniem sił oporu tarcia układu materiał-nóż. Można jednak zauważyć, iż wzrost jednostkowych nakładów procesu cięcia  $W_{Cj}$  ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem długości zrębkowania  $l_z$  oraz kąta  $\beta$ . Analiza wyników wykazała, iż wzrost wartości kąta ostrza noża  $\beta$  w badanym zakresie 15-30° powoduje zwiększenie jednostkowych nakładów pracy  $W_{Cj}$ .

Powyższe stwierdzenia potwierdził test analizy wariancji wykonany w programie Statistica v. 13. Analiza statystyczna wykazała również istnienie interakcji drugiego rzędu pomiędzy badanymi czynnikami. W związku z tym przeprowadzono estymację nieliniową, dzięki której określono model opisujący relację między kątem ostrza noża  $\beta$  oraz długością zrębkowania  $l_z$  a jednostkowymi nakładami energetycznymi  $W_{Cj}$ .

Ma on następującą postać:

$$W_{Cj} = (l_z \cdot \beta)^a + b \cdot \beta + c$$

gdzie:

 $W_{Cj}$  – jednostkowe nakłady pracy w procesie cięcia (kJ·m<sup>-2</sup>),

 $\beta$  – kąt ostrza noża (°),

 $l_z$  – długość zrębkowania (mm),

a, b, c – stałe modelu.

Wyniki tej estymacji przedstawiono w tabeli 17.

Tabela 17. Wyniki estymacji nieliniowej dla modelu  $W_{Cj} = (lz \cdot \beta)^a + b \cdot \beta + c$ 

Stała	Wartość	Błąd stan d.	Poziom p	Dolna gr. uf- ności	Górna gr. ufności	R <sup>2</sup>
а	0,544	0,004	0,00	0,534	0,554	
b	0,868	0,064	0,00	0,742	0,994	0,83
c	30,56	1,31	0,00	27,98	33,15	
				4		

Źródło: opracowanie własne

Na wykresie (rys. 51) przedstawiono wpływ analizowanych parametrów na wartość jednostkowych nakładów energetycznych cięcia.



Rys. 51. Wykres wpływu kąta ostrza noża  $\beta$  oraz długości zrębkowania lz na wartość jednostkowych nakładów energetycznych cięcia  $W_{Cj}$ 

Na podstawie tak opracowanego modelu możliwe jest określenie jednostkowych nakładów pracy w procesie cięcia pędów wierzby w przedziale średnic od 20 do 40 mm, wilgotności 51% oraz długości zrębkowania lz od 10 do 40 mm przy zastosowaniu kąta ostrza noża  $\beta$ =15-30°.

O możliwości stosowania ustalonego modelu do prognozowania jednostkowych nakładów pracy w procesie cięcia pędów wierzby świadczy wykres zamieszczony na rysunku 52, na którym przedstawiono analizę reszt.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 52. Wykres normalności wartości resztowych

#### 5.3.3. Energochłonność rozdrabniania (metoda quasi-statyczna)

Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników wykazała, iż na energochłonność rozdrabniania  $E_{rs}$  istotny wpływ mają jedynie kąt ostrza noża  $\beta$  oraz długość zrębkowania lz. Na rysunku 53 przedstawiono przykładowe wyniki energochłonności  $E_{rs}$  dla analizowanych pędów dla dwóch skrajnych wartości kąta ostrza noża.



Rys. 53. Przebieg zmian energochłonności w procesie przecinania  $E_{rs}$ , a – wartości najmniejsze dla wariantu: kąt ostrza  $\beta=15^{\circ}$ , kąt nachylenia pędów  $\varepsilon=40^{\circ}$ , b – wartości największe dla wariantu kąt ostrza  $\beta=30^{\circ}$ , kąt nachylenia pędów  $\varepsilon=40^{\circ}$ 

Pierwszy dotyczy wariantu przecinania pędów wierzby z zastosowaniem kąta ostrza  $\beta$ =15° oraz nachylenia pędów  $\varepsilon$ =40°, gdzie zarejestrowane parametry wskazują, iż proces charakteryzuje się najmniejszymi nakładami energetycznymi. Energochłonność procesu była najmniejsza (1,7 kJ·kg<sup>-1</sup>) przy zrębkowaniu na długość 40 mm. Zmniejszenie długości zrębkowania powodowało wzrost energochłonności procesu zrębkowania i dla długości cięcia  $l_z$ =10 mm nakłady wynosiły średnio  $E_{rs}$ = 5,5 kJ·kg<sup>-1</sup>.

Podobny przebieg zmian zaobserwowano w przypadku zrębkowania pędów z zastosowaniem ostrza noża o kącie  $\beta$ =30° i pochyleniu pędów  $\varepsilon$ =0° (rys. 53.b). Energochłonność tego testu była największa i przy cięciu zrębków na długość  $l_z$ =40 mm wzrosła o około 58-63% (2,8 kJ·kg<sup>-1</sup>) w odniesieniu do wcześniej przedstawionego przykładu. Natomiast wraz ze zmniejszeniem długości zrębkowania różnice były mniejsze i dla długości cięcia  $l_z$ =10 mm wynosiły jedynie 12-14% (6,4 kJ·kg<sup>-1</sup>). Pośrednie wartości energochłonności rozdrabniania (przy zastosowaniu noży o kącie ostrza 20 i 25°) charakteryzowały się zmianami podobnymi do przebiegów funkcji liniowych.

Powyższe stwierdzenia wpływu analizowanych czynników potwierdzono testami analizy wariancji wykonanych w programie Statistica v.13. Wykluczono istotny wpływ średnicy pędów *d* oraz kąta podawania pędów  $\varepsilon$ . Brak statystycznie istotnego wpływu wspomnianych parametrów wydaje się być logiczny. W przypadku wzrostu średnicy pędów następował prawie proporcjonalny wzrost nakładów energetycznych, który niwelował istotny wpływ zmian średnicy na rejestrowane parametry. W przypadku zwiększenia kąta podawania pędów  $\varepsilon$ , nakłady jednostkowe energii ulegały zmniejszeniu, ale następował równoczesny wzrost powierzchni cięcia, który kompensował spadki energochłonności co w konsekwencji powodowało brak istotnego wpływu na analizowane parametry. Należy jednak pamiętać, iż kąt pochylenia  $\varepsilon$  ma kluczowy wpływ na stopień rozdrobnienia uzyskiwanych zrębków.

Następnie dla tak zebranych danych przeprowadzono estymację nieliniową, dzięki której określono model opisujący relację między kątem ostrza noża  $\beta$  i długością zrębkowania  $l_z$ , a energochłonnością rozdrabniania  $E_{rs}$ . Opracowany model przyjął następującą postać:

$$E_{rs} = a \cdot l_z^{b} + c \cdot \beta + d$$

gdzie:

 $E_{rs}$  – energochłonność procesu rozdrabniania (metoda quasi-statyczna) (kJ·kg<sup>-1</sup>),

 $\beta$  – kąt ostrza noża (°),

*lz* – długość zrębkowania (mm),

a, b, c, d – stałe modelu.

Wyniki tej estymacji przedstawiono w tabeli 18.

Tabela	18.					
Wyniki	estymacji	nieliniowej	dla modelu	$E_{rs} =$	$a \cdot l_z^{b} + c \cdot j_z^{b}$	$\beta + d$

Stała	Wartość	Błąd stand.	Poziom p	Dolna gr. ufności	Górna gr. ufności	R <sup>2</sup>
а	23,79	1,35	0,000	21,12	26,45	
b	-0,482	0,067	0,000	-0,614	-0,349	0.02
С	0,045	0,003	0,000	0,039	0,052	0,92
d	-2,86	0,80	0,000	-4,43	-1,28	

Źródło: opracowanie własne



Na wykresie powierzchniowym (rys. 54) przedstawiono przebieg zmian energochłonności rozdrabniania  $E_{rs}$  w zależności od długości zrębkowania lz oraz kąta ostrza noża  $\beta$ .

Źródło: opracowanie własne



Opracowany model może umożliwić określenie energochłonności procesu rozdrabniania w testach laboratoryjnych pędów wierzby w przedziale średnic od 20-40 mm, wilgotności 51% oraz długości zrębkowania  $l_z$  od 10 do 40 mm przy zastosowaniu charakterystycznych kątów układu zrębkowania z przedziału wartości  $\beta$ =15-30° i  $\varepsilon$ =0-40°.

Potwierdzeniem poprawności opracowanego modelu świadczy wykres zamieszczony na rysunku 55, na którym przedstawiono analizę wartości resztowych.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 55. Wykres normalności wartości resztowych

#### 5.3.4. Gęstość właściwa zrębków

Kolejnym etapem analizy procesu rozdrabniania była ocena jakościowa uzyskiwanych zrębków. Analiza przebiegu testów cięcia jak również wstępne wyniki pomiaru gęstości zrębków wykazały, iż gęstość jest silnie związana z widocznymi pęknięciami struktury zrębka (rys. 59). Na rysunku 56 przedstawiono przykładowe zrębki z widocznymi pęknięciami struktury uzyskane w procesie zrębkowania z zastosowaniem kąta pochylenia pędów  $\varepsilon = 40^{\circ}$ .

Analiza uzyskanych wyników wskazała, iż wraz ze wzrostem długości zrębkowania  $l_z$  liczba pęknięć ulega zmniejszeniu. Na rysunki 57 przedstawiono trend zmian liczby pęknięć (na podstawie średnich) w zależności od długości zrębkowania. Przedstawiona zależność związana jest z faktem, iż zrębki o zwiększonej długości wykazują większą wytrzymałość na czynniki destrukcyjne. Jednym z rozwiązań pozwalającym na zwiększenie liczby pęknięć struktury, a tym samym ich porowatości, jest zwiększenie kąta  $\varepsilon$  podawania pędów do układu zrębkowania. Na rysunku 58 przedstawiono wpływ wartości kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$  na liczbę pęknięć struktury zrębka. Odnosząc te informacje do gęstości pozornej, która jak już wspominano istotnie zależy od liczby pęknięć, możliwe staje się sterowanie właściwościami uzyskiwanych zrębków istotnych w procesach magazynowania jak i w dalszym przetwarzaniu (np. mielenia czy też suszenia).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 56. Przykładowe zrębki z widocznymi pęknięciami struktury



Źródło: opracowanie własne

Rys. 57. Przebieg zmian liczby pęknięć struktury zrębka w zależności od długości zrębkowania lz



Źródło: opracowanie własne

Rys. 58. Przebieg zmian liczby pęknięć struktury zrębka w zależności od kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$ 



Źródło: opracowanie własne

Rys. 59. Przebieg zmian gęstości pozornej zrębków w zależności od liczby pęknięć

Przeprowadzone badania wykazały, iż zmiana gęstości właściwej  $DE_{ar}$  uzyskiwanych zrębków (oznaczona zgodnie z przedstawioną metodyką) uległa zmianom w zakresie 0,89 -0,69 g·cm<sup>-3</sup> (co stanowi około 28%) przy wilgotności materiału równej 51% (rys. 59). Możliwość wpływu na właściwości zrębków (geometrie, gęstość cząstek, ilość pęknięć struktury) stwarza możliwości i przestrzeń dla działań optymalizacyjnych mających na celu ograniczenie nakładów energetycznych czy też maksymalizację jakościową produktu końcowego.

## 5.4. Proces zrębkowania – metoda dynamiczna

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie testów procesu zrębkowania w warunkach dynamicznych. Testy te przeprowadzono na stanowisku do rozdrabniania materiałów biologicznych zgodnie z procedurą przedstawioną w metodyce. Badania, te obejmowały przeprowadzenie zrębkowania pędów wierzby o wilgotności 51% przy zastosowaniu następujących zmiennych procesowych:

- długość zrębkowania  $l_z$ –15, 25 oraz 35 mm,
- kąt ostrza noża  $\beta$  17, 25 oraz 30°,
- kąt pochylenia pędów  $\varepsilon = 0$ , 20 oraz 40°.

#### 5.4.1.Skład granulometryczny zrębków

Uzyskane zrębki w pierwszej kolejności poddano analizie składu granulometrycznego celem wykazania jakościowych zmian w zależności od zastosowanych wariantów badawczych. Analiza ta oparta była o przesiewanie sitowe, które pozwoliło na określenie stopnia rozdrobnienia uzyskiwanych zrębków dla poszczególnych wariantów badawczych. Zrębki wierzby analizowano z zastosowaniem siedmiu sit laboratoryjnych (63; 45; 31,5; 16; 8; 6; 3,15 mm), zgodnie z procedurą przedstawioną w metodyce. Analizie poddanych zostało 9 rodzajów zrębków uzyskanych z procesu zrębkowania pędów wierzby z zastosowaniem różnych wariantów procesowych ( $\beta x \varepsilon x lz$ ).

Na rysunku 60 przedstawiono przykładowe zrębki poddane analizie sitowej. Na kolejnych zdjęciach (rys. 60: a, b, c) uwidocznione zostały podziały sitowe zrębków uzyskanych w procesie zrębkowania przy różnym kącie pochylenia pędów  $\varepsilon$ . Można zauważyć, iż największy udział we wszystkich wariantach mają zrębki zatrzymane na sicie 31,5 mm. Wzrost wartości kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$  od 0 do 40° powodował zmniejszenie udziału masy zrębków na sitach poniżej 31,5 mm.

Szczegółowe wyniki analizy sitowej badanych zrębków przedstawione zostały na kolejnych trzech rysunkach (rys. 61, 62, 63). Dla poszczególnych trzech grup zrębków, uzyskanych przy różnej długości zrębkowania (lz - 15, 25 oraz 35 mm), wykazano jakościowy wpływ badanych kątów ostrza noża  $\beta$  oraz pochylenia pędów  $\varepsilon$ . Analiza szczegółowa poszczególnych histogramów wykazała, iż we wszystkich wariantach badawczych zwiększenie kąta ostrza noża  $\beta$  powoduje wzrost frakcji tzw. drobnej (poniżej 31,5 mm). Natomiast w przypadku wzrostu kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$  obserwujemy wzrost ilości frakcji powyżej 31,5 mm tzw. grubej. W celu wskazania ilościowych zmian dotyczących geometrii uzyskiwanych zrębków dokonano podziału na dwie zasadnicze frakcje - powyżej oraz poniżej 31,5 mm (wielkości cząstek mające istotne znaczenie w procesach magazynowania czy też w ich dalszym przetwarzaniu). Wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 19. Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, iż udział drobnej czy też grubej frakcji zrębków istotnie zależy od parametrów procesu zarówno od kąta ostrza noża  $\beta$  (co było spodziewanym efektem, potwierdzonym w literaturze) jak i od kąta podawania pędów  $\varepsilon$  w procesie zrębkowania.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 60. Przykładowe zrębki wierzby uzyskane na stanowisku dynamicznym; długość zrębkowania lz – 15 mm, kąt ostrza noża  $\beta$  – 17°, a) kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$  = 0°, b) kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$  = 20°, c) kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$  = 40°



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 61. Składy granulometryczne zrębków pędów wierzby, długość zrębkowania lz = 15 mm, kąta ostrza noża: a)  $\beta = 17^{\circ}$ , b)  $\beta = 25^{\circ}$ , c)  $\beta = 30^{\circ}$ 



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 62. Składy granulometryczne zrębków pędów wierzby, długość zrębkowania lz = 25 mm, kąta ostrza noża: a)  $\beta = 17^{\circ}$ , b)  $\beta = 25^{\circ}$ , c)  $\beta = 30^{\circ}$ 



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 63. Składy granulometryczne zrębków pędów wierzby, długość zrębkowania lz = 35 mm, kąta ostrza noża: a)  $\beta=17^{\circ}$ , b)  $\beta=25^{\circ}$ , c)  $\beta=30^{\circ}$ 

## Tabela 19.

Udziały procentowe zrębków powyżej i poniżej 31,5 mm z oznaczeniem trendów zmian

_		Udział (%) cząst	ek powyżej 31,5 (mm)			
_		<i>ε</i> = 0 (°)	ε= 20 (°)	<i>ε</i> = 40 (°)		
	β=30 (°)	20,0	36,0	55,0		
vania	β=25 (°)	28,0	42,0	67,0		
ębkov (mm	β=17 (°)	37,1	56,0	83,7		
sść zr z= 15		udział % cząst	ek poniżej 31,5 mm			
długo		<i>ε</i> = 0 (°)	ε= 20 (°)	<i>ε</i> = 40 (°)		
	β=30 (°)	80,0	64,0	45,0		
_	β=25 (°)	72,0	58,0	33,0		
	β=17 (°)	62,9	44,0	16,3		
		udział (%) cząste	ek powyżej 31,5 (mm)			
		<i>ε</i> = 0 (°)	ε= 20 (°)	ε= 40 (°)		
	β=30 (°)	24,0	42,0	61,0		
ębkowania (mm)	β=25 (°)	40,0	50,0	81,5		
	β=17 (°)	44,0	73,5	90,0		
ość zr <i>lz</i> = 25	udział (%) cząstek poniżej 31,5 (mm)					
dług		ε= 0 (°)	ε= 20 (°)	ε= 40 (°)		
_	β=30 (°)	76,0	58,0	39,0		
_	β=25 (°)	60,0	50,0	18,5		
	β=17 (°)	56,0	26,5	10,0		
_		udział (%) cząste	ek powyżej 31,5 (mm)			
_		<i>ε</i> =0 (°)	ε= 20 (°)	<i>ε</i> = 40 (°)		
_	β=30 (°)	42,0	57,0	71,0		
vania	β=25 (°)	47,0	58,5	81,0		
ębkov	β=17 (°)	56,0	81,0	92,0		
ść zr == 35		udział (%) cząs	tek poniżej 31,5(mm)			
długo		<i>ε</i> =0 (°)	ε= 20 (°)	ε= 40 (°)		
	β=30 (°)	58,0	43,0	29,0		
	β=25 (°)	53,0	41,5	19,0		
_	β=17 (°)	44,0	19,0	8,0		

Źródło: opracowanie własne

Największą grupę zrębków tzw. grubych czyli powyżej 31,5 mm stanowiącą około 92% zarejestrowano przy zrębkowaniu pędów przy zastosowaniu następujących parametrów:  $l_z = 35 \text{ mm}, \beta = 17^{\circ}, \varepsilon = 40^{\circ}$ . Natomiast największy udział około 80% frakcji tzw. drobnej (poniżej 31,5 mm), przypadł dla zrębków uzyskanych podczas rozdrabniania pędów na długość  $l_z = 15 \text{ mm}, \beta = 30^{\circ}, \varepsilon = 0^{\circ}$ .

Powyższe spostrzeżenia potwierdzają założenia badawcze dotyczące wpływu przyjętych zmiennych procesu na parametry jakościowe zrębków. W oparciu o przedstawione wyniki możliwe jest sterowanie jakością zrębków, która powinna wynikać z wymogów kolejnych etapów technologii przetwarzania. Przykładowo, zrębki które bezpośrednio po procesie zrębkowania będą poddane kolejnym procesom przetwarzania (np. suszenia czy też mielenia), powinny charakteryzować się stosunkowo drobną strukturą umożliwiającą stosunkowo szybkie suszenie oraz zmniejszenie czasu i energii procesu mielenia.

Natomiast w przypadku gdy zrębki po procesie rozdrabniania będą sezonowane czy też magazynowane, zgodnie z zaleceniami literaturowymi (Břendová i in., 2018; Ebadian i in., 2018; Eisenbies i in., 2016; Jylhä, i in., 2017; Pecenka i in., 2014; Whittaker i in., 2016a, 2018), struktura zrębków powinna być jak największa, pozbawiona frakcji drobnej. Masa zrębków, składająca się z większych cząstek, charakteryzuje się porowatością o wielkości przestrzeni międzycząsteczkowych proporcjonalnych do rozmiarów samych cząstek. Wzrost wielkości cząstek w masie (najczęściej opisywany poprzez średnicę zastępczą -  $d_z$ ) wpływa odwrotnie proporcjonalnie na spadek ciśnienia ( $\Delta p$ ) podczas przepływu strumienia powietrza. Zależność tą w ujęciu ogólnym opisuje wzór Leva:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d_z} \frac{u_{p\rho}^2}{2} \left( \frac{(1-\varepsilon)^{3-n}}{\varepsilon^3} \varphi^{3-n} \right)$$

Powyższe stwierdzenia potwierdzają liczne badania nad dynamiką przepływu powietrza przez warstwę roślinnych materiałów ziarnistych (Kaniewska i in., 2013; Karaj i in., 2013; Kristensen i Kofman, 2000; Łukaszuk i in., 2007; Suggs i Lanier, 1985). Badania prowadzone przez zespół Łukaszuka (Łukaszuk i in., 2007) wykazały jednoznacznie, iż wielkość i kształt nasion (nasiona rzepaku, żyta), mają istotny wpływ na spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez warstwę materiału. Podobnie, prowadzone badania nad zrębkami drzewnymi wykazały, iż największym ciśnienim przepływu powietrza 39 Pa·m<sup>-1</sup> (przy prędkości 0,1 m·s<sup>-1</sup>) charakteryzowały się zrębki o średniej wielkości cząstki 28 mm, natomiast najmniejszym równym 2 Pa·m<sup>-1</sup> - zrębki o wielkości 200 mm (Kristensen i Kofman, 2000). Autorzy wskazują również, iż geometria cząstek bardzo istotnie wpływa na dynamikę ruchu powietrza w złożu zarówno w przepływie laminarnym oraz turbulentnym.

Podsumowując spadek oporów przepływu czynników suszących ma kluczowe znaczenie w procesach dosuszania czy też magazynowania zrębków. Dlatego też, struktura masy o dominującym udziale frakcji grubej sprzyja zwiększeniu dynamiki procesów naturalnego suszenia, czy też utrzymania warunków nie powodujących utraty jakości masy (zminimalizowanie aktywności biologicznej – rozwoju grzybów i bakterii).

Dodatkowo ustawienie elementów roboczych podczas zrębkowania - noża ruchomego oraz stalnicy- w tzw. kontakcie bezpośrednim umożliwiło uzyskanie większej skuteczności docinania wierzchniej warstwy pędów (kory wraz z łykiem) (rys. 64). To właśnie te części pędów,

przy wilgotności powyżej 40%, powodują w klasycznych rębarkach zwiększenie długości zrębka poprzez niedocięcia (zrywanie fragmentów kory itp.) (rys. 21).





Rys. 64. Widok przykładowych zrębków uzyskanych przy zastosowaniu kąta pochylenia pędów  $\varepsilon = 40^{\circ} - brak niedocięć kory wraz z łykiem$ 

## 5.4.2. Gęstość nasypowa zrębków

Po przeprowadzeniu oceny składu granulometrycznego dokonano oznaczenia gęstości nasypowej zrębków  $BD_{ar}$  zgodnie z procedurą przedstawioną w metodyce. Przeprowadzone testy wykazały, iż gęstość otrzymanych zrębków nie zależy istotnie od analizowanych czynników procesowych. Wyniki średnie uzyskanych gęstości przedstawiono w tabeli 20. Dla analizowanych zrębków średnia gęstość wynosiła 309,7 ± 14,7 kg·m<sup>-3</sup>. Najniższą gęstością, około 281 kg·m<sup>-3</sup>, charakteryzowały się zrębki o największym stopniu rozdrobnienia (uzyskane przy parametrach: długość zrębków  $l_z$ =15 mm, kąt ostrza noża  $\beta$  =30°, kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$  =0°. Natomiast największą gęstością 333 kg·m<sup>-3</sup>, charakteryzowały się zrębki o największym udziale frakcji grubej, które uzyskano przy zastosowaniu następujących parametrów:  $l_z$ = 35 mm,  $\beta$  =17°,  $\varepsilon$  =40°.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, iż zwiększenie długości zrębków wierzby przy zastosowaniu do zrębkowania noży o małym kącie ostrza, nie powoduje proporcjonalnego wzrostu gęstości nasypowej. Według wielu badań, dotyczących zrębkowania drewna wielkowymiarowego, wzrost wielkości zrębków powoduje wzrost gęstości nasypowej . Należy jednak pamiętać, iż klasyczne systemy zrębkowania najczęściej umożliwiają regulację wielkości zrębków jedynie przez zmianę długości zrębkowania oraz niekiedy poprzez zastosowanie noży o innych kątach natarcia (34-45°). Zrębki te charakteryzują się większymi wymiarami, jednakże ich struktura jest nadal zwarta i podobna do gęstości właściwej zrębkowanego drewna (rys. 65).

	lz = 15 (r	nm)	
	<i>ε</i> =0 (°)	ε= 20 (°)	<i>ε</i> =40 (°)
β=17 (°)	294,6	297,6	320,6
β=25 (°)	288,6	293,6	316,4
β= 30 (°)	281,1	291,6	315,6
	lz = 25 (r	nm)	
	ε= 0 (°)	<i>ε</i> =20 (°)	<i>ε</i> = 40 (°)
β=17 (°)	304,1	318,3	326,1
β=25 (°)	295,2	317,9	317,8
β= 30 (°)	291,5	318,8	317,3
	lz = 25 (r	nm)	
	<i>ε</i> =0 (°)	<i>ε</i> =20 (°)	<i>ε</i> = 40 (°)
β=17 (°)	305,9	332,0	333,2
β=25 (°)	301,6	323,3	324,2
β= 30 (°)	293,5	318,8	322,8

Tabela 20.

Średnia gęstość nasypowa BDar zrębków

Źródło: opracowanie własne



Źródło: www.greenhousegrower.com

Rys. 65. Widok zrębków drewna iglastego o różnej strukturze – drobno- oraz gruboziarnistej

W przypadku analizowanych zrębków wierzby wiciowej brak istotnego zwiększenia gęstości wraz ze wzrostem granulacji jest prawdopodobnie spowodowany występowaniem licznych pęknięć struktury zrębka, co w konsekwencji zwiększa porowatość masy, tym samym redukuje wzrost gęstości nasypowej.

#### 5.4.3. Energochłonność procesu zrębkowania

Jednym z ważniejszych parametrów procesów przetwarzania biomasy jest jego energochłonność. Jak wspomniano w rozdziale Metodyka, w trakcie testów rozdrabniania określano nakłady energetyczne oraz masę uzyskiwanych zrębków. Na tej podstawie możliwe było określenie energochłonności procesu  $E_r$  kJ·kg<sup>-1</sup>. Przeprowadzona analiza wykazała statystyczną istotność analizowanych zmiennych. Następnie przeprowadzono estymację nieliniową, dzięki której określono model opisujący relację między kątami: ostrza noża  $\beta$  oraz kątem pochylenia pędów  $\varepsilon$ , długością zrębkowania  $l_z$ , a energochłonnością rozdrabniania  $E_r$ . Opracowany model przyjął następującą postać:

$$E_r = a \cdot l_z^{\ b} + c \cdot \beta + d \cdot \epsilon$$

gdzie:

 $E_r$  – energochłonność procesu rozdrabniania (metoda dynamiczna) (kJ·kg<sup>-1</sup>),

 $\beta$  – kąt ostrza noża (°),

 $\varepsilon$  – kat pochylenia pędów (°),

*lz* – długość zrębkowania (mm),

a, b, c, d – stałe modelu.

Wyniki tej estymacji przedstawiono w tabeli 21.

#### Tabela 21.

*Wyniki estymacji nieliniowej dla modelu*  $Er = a \cdot lz^b + c \cdot \beta + d \cdot \varepsilon$ 

Stała	Wartość	Błąd stand.	Poziom p	Dolna gr. uf- ności	Górna gr. ufności	$\mathbb{R}^2$
а	25,63	1,60	0,000000	22,40	28,85	
b	-0,418	0,024	0,000000	-0,467	-0,369	0.04
С	0,118	0,009	0,000000	0,100	0,137	0,94
d	-0,036	0,003	0,000000	-0,042	-0,030	

Źródło: opracowanie własne

Analizując przedstawiony model można zauważyć, iż największy wpływ na wartość energochłonności rozdrabniania ma długość zrębkowania oraz w drugiej kolejności kąt ostrza noża. Natomiast najmniejszy oraz odwrotnie proporcjonalny ma kąt pochylenia pędów  $\varepsilon$ . W przypadku długości zrębkowania jej wzrost powoduje oczywisty spadek energochłonności procesu.

Na wykresie 66 przedstawiono wyniki obliczeń w oparciu o zaproponowany model odniesione do danych eksperymentalnych tzn. zestawienie wartości obserwowanych względem przewidywanych. Wyniki te, jak również współczynnik determinacji R<sup>2</sup>=0,94 potwierdzają możliwość stosowania opracowanego modelu do szacowania energochłonności procesu.


W celu ukazania zakresu zmienności energochłonności procesu zrębkowania  $E_r$ , uzyskane wyniki przedstawiono na dwóch kolejnych wykresach powierzchniowych (rys. 67, 68).

*Rys.* 66. *Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych dla opracowanego modelu* 



Źródło: opracowanie własne

Rys. 67. Przebieg zmian energoch<br/>łonności procesu zrębkowania Er w zależności od długości zrębkowania l<br/>z oraz kąta ostrza noża  $\beta$ 

Źródło: opracowanie własne



Źródło: opracowanie własne

*Rys.* 68. Przebieg zmian energochłonności procesu zrębkowania  $E_r$  w zależności od długości zrębkowania  $l_z$  oraz kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$ 

Jednym z cząstkowych celów postawionych w niniejszej pracy było wykazanie możliwości prognozowania energochłonności procesu rozdrabniania pędów wierzby w metodzie dynamicznej  $E_r^*$  w oparciu o wyniki uzyskane z testów cięcia metodą quasi-statyczną  $E_{rs}$ . Przeprowadzono szereg analiz mających na celu wykazanie zależności  $E_r^* = f(E_{rs})$ .

Przeprowadzone analizy potwierdziły między innymi, iż do właściwego opisu zmian energochłonności w metodzie dynamicznej niezbędne jest uwzględnienie kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$ . Jego wzrost wpływa na zmniejszenie energochłonności procesu zrębkowania. Ostatecznie model opisujący energochłonność zrębkowania w warunkach dynamicznych na podstawie testów statycznych przyjął postać:

$$E_r^* = a \cdot (E_{rs}) + b \cdot \varepsilon + c$$

Po uwzględnieniu postaci modelu energochłonności  $E_{rs}$ , opracowany model przyjmuje ostatecznie następującą postać:

$$E_r^* = a \cdot (23, 79 \cdot l_z^{-0, 482} + 0, 045 \cdot \beta - 2, 86) + b \cdot \varepsilon + c$$

gdzie:

 $E_r^*$  – energochłonność procesu rozdrabniania (kJ·kg<sup>-1</sup>),  $\beta$  – kąt ostrza noża (°),  $\varepsilon$  – kat pochylenia pędów (°),  $l_z$  – długość zrębkowania (mm), a, b, c – stałe modelu. Wyniki tej estymacji przedstawiono w tabeli 22.

Tabela 22.

<i>Wyniki estymacji nieliniowej ala modelu EF</i> $= a \cdot (23, 79 \cdot iz^{0,102} + 0,043 \cdot \beta - 2,80) + b \cdot \varepsilon + c$						
Stała	Wartość	Błąd stand.	Poziom p	Dolna gr. ufności	Górna gr. uf- ności	R <sup>2</sup>
а	1,23	0,07	0,000000	1,08	1,38	
b	-0,036	0,004	0,000000	-0,045	-0,028	0,91
С	5,45	0,27	0,000000	4,88	6,01	

vniki estvmacii nieliniowei dla modelu  $Er^{*}=a \cdot (23.79 \cdot lz^{-0.482}+0.045 \cdot \beta -2.86)+b \cdot \varepsilon + c$ 

Źródło: opracowanie własne

Opracowany model uzyskał dobre dopasowanie do punktów pomiarowych, które wyrażone zostało współczynnikiem determinacji R<sup>2</sup>=0,91. Na poniższym rysunku (rys. 69) przedstawiono również odniesienie wartości obserwowanych do przewidywanych potwierdzając dobre opracowanie modelu.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 69. Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych dla opracowanego modelu

Opracowany model pozwala z jednej strony na prognozowanie nakładów energetycznych procesu rozdrabniania świeżych pędów wierzby, a z drugiej, ukazuje kolejne pola do kontynuowania badań w zakresie zrębkowania pędów wierzby i nie tylko przy niższych poziomach wilgotności.

Odnosząc uzyskane wyniki do postawionych hipotez badawczych można stwierdzić, iż założenia jakie zostały tam postawione zostały pozytywnie zweryfikowane.

Uzyskane wyniki dotyczące składu granulometrycznego zrębków wskazują jednoznacznie, iż zmiana kąta podawania pędów  $\varepsilon$  w zakresie od 0 do 40° oraz kąta ostrza noża  $\beta$  w zakresie 17-30° istotnie wpływają na granulację uzyskiwanych zrębków we wszystkich badanych długościach zrębkowania *lz* (15, 25, 35 mm). Zaobserwowane zależności zostały potwierdzone zarówno podczas badań w warunkach quasi-statycznych jak również dynamicznych. Zmniejszenie wartości kąta ostrza noża  $\beta$  z 30° do 17° spowodowało wzrost udziału cząstek o wielkości powyżej 31,5 mm (tzw. frakcji grubej) w zakresie 15-30%. Największy wzrost następował dla zrębków uzyskiwanych przy zastosowaniu kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$ =40°. Natomiast wzrost wspomnianego kąta pochylenia pędów  $\varepsilon$  w zakresie 0-40° spowodował wzrost udziału grubej frakcji zrębków w zakresie 35-45%. Tym samym odpowiednie zastosowanie wspomnianych kątów umożliwia uzyskanie, dla tej samej długości zrębkowania (np. *lz* = 25 mm), masy zrębków o udziałe frakcji grubej (powyżej 31,5 mm) w zakresie od 24 do 90%.

Możliwość wpływania, w procesie zrębkowania, na granulację uzyskiwanych zrębków w tak dużym zakresie wydaje się być kluczowe w optymalizacji technologii produkcji biopaliw stałych w oparciu o surowce pozyskane z plantacji wierzby wiciowej.

Dodatkowo wzrost kąta podawania pędów powoduje występowanie licznych pęknięć struktury uzyskiwanych zrębków, a ich gęstość właściwa dzięki temu ulega zmniejszeniu nawet o 20% (na rzecz porowatości). Taka masa zrębków charakteryzuje się pożądanymi właściwościami w aspekcie jej magazynowania oraz przetwarzania mechanicznego.

Struktura gruboziarnista masy zrębków z uwzględnieniem ich mikro – i makropęknięć sprawia, iż procesy długiego składowania nie powodują istotnych strat jakościowych zrębków a późniejsze ich przetwarzanie realizowane jest przy niższych nakładach energetycznych.

Uwzględniając przedstawioną argumentację w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż postawiona pierwsza hipoteza badawcza została pozytywnie potwierdzona.

Analizując uzyskane wyniki dotyczące nakładów energetycznych można stwierdzić, iż wszystkie przyjęte w planie badań zmienne charakteryzowały się istotnym wpływem na nakłady procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej. Zarówno badania w skali quasi-statycznej jak i dynamicznej wykazały, iż w największym stopniu na energochłonność procesu ma wpływ kąt ostrza noża zrębkującego. W prowadzonych badaniach założono, iż zmniejszenie jego wartości w przedziale 30-15° obniży nakłady energetyczne procesu zrębkowania. Uzyskane wyniki potwierdziły wstępne założenia wskazując, iż zmniejszenie wartości kąta ostrza noża  $\beta$  w badanym przedziale powoduje proporcjonalny spadek nakładów energetycznych. Tą zależność potwierdziły wyniki testów cięcia w warunkach quasi-statycznych jak również dynamicznych. Poddając weryfikacji założenia drugiej hipotezy badawczej w oparciu o wyniki badań procesu zrębkowania metodą dynamiczną można stwierdzić, iż zmniejszenie kąta ostrza noża  $\beta$  z 30° do 17° powoduje spadek energochłonności średnio o 2-2,4 kJ·kg<sup>-1</sup> co stanowi zmniejszenie o około 20-30% w zależności od długości zrębkowania. W przypadku zmiany kąta podawania pędów ɛ, zarejestrowano odwrotny wpływ na energochłonność procesu. Zwiększenie wartości ε powodowało stosunkowo niewielki spadek energochłonności procesu zrębkowania dodatkowo zmniejszając, co ważniejsze, wartości maksymalne sił zrębkowania, które bezpośrednio wpływają na układ zrębkujący (noże, przeciwostrze -stalnica, łożyska).

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki można jednoznacznie stwierdzić, iż w przypadku zrębkowania pędów wierzby wiciowej, obniżenie wartości kąta ostrza noża  $\beta$  oraz zwiększenie kąta podawania pędów  $\varepsilon$  powoduje istotne obniżenie energochłonności procesu. Tym samym,

biorąc pod uwagę możliwość podniesienia efektywności energetycznej biopaliw stałych, wydaje się być kluczowe uwzględnienie powyższych informacji w projektowaniu urządzeń dedykowanych do rozdrabniania pędów wierzby wiciowej z celowych plantacji energetycznych.

## 6. PODSUMOWANIE

Procesy rozdrabniania biomasy w technologiach produkcji biopaliw stałych są jednym z podstawowych procesów mających wpływ na efektywność energetyczną produktu końcowego oraz jego parametry jakościowe. Procesy zrębkowania, jako jedne z pierwszych w technologii produkcji biopaliw stałych, nadają cechy surowcom, które determinują przebiegi kolejnych procesów takich jak suszenie (wraz z magazynowaniem) czy też mielenie. Przedstawiona analiza literatury dotycząca przedmiotowo wspomnianych procesów wskazuje różne, istotnie różniące się w przebiegu, warianty technologii przetwarzania biomasy drzewnej na biopaliwa stałe. Największe znaczenie w procesach technologicznych, wśród właściwości surowców drzewnych, dotyczą granulacji oraz jej równomierności geometrycznej. W zależności od docelowego zastosowania danego surowca biomasy (produkcja zrębków opałowychj, brykietów czy też peletów) jej oczekiwane właściwości mogą się bardzo różnić. Przykładowo, do produkcji najprostszej formy biopaliw jakim jest zrębka energetyczna, wykorzystywane są surowce drzewne oraz technologie jej zrębkowania, które umożliwiają uzyskanie równomiernej masy zrębków o frakcji głównej (powyżej 60 %) zawierającej się najczęściej w granicach 3,15-31,5 mm (klasa P31S) oraz 3,15-45 (klasa P45S). Udział frakcji poniżej 3,15 mm oraz powyżej 45 mm nie powinien przekraczać kilku procent (szczegółowe wytyczne ujęte w normie). Dotychczas prowadzone badania wskazują jednak, iż udział frakcji głównej powinien być jak największy (powyżej 80 %) i o wąskim zakresie geometrycznym. Te właściwości zrębków powinny determinować wybór technik oraz technologii przetwarzania tak, aby realizowane procesy były efektywne oraz jakość uzyskiwanych produktów była najwyższa.

Jak wykazano w przeglądzie literatury, o jakości końcowej wytwarzanych biopaliw stałych musimy pamiętać już na etapie wstępnych procesów przetwarzania surowca. Procesy magazynowania zrębków mają fundamentalne znaczenie w utrzymaniu odpowiedniej ich jakości. Źle prowadzony proces składowania i dosuszania zrębków może powodować spadek frakcji organicznej (obniżenie potencjału energetycznego) co skutkuje dodatkowo wzrostem zawartości frakcji mineralnej (przekroczenie normatywnych poziomów może dyskwalifikować dane biopaliwo do określonego przeznaczenia). Dodatkowo duża aktywność mikrobiologiczna (w przypadku wystąpienia skrajnych warunków – wzrost temperatury przy dużej wilgotności) może spowodować rozwój grzybów i bakterii, które ograniczą ich dalsze wykorzystanie.

Zrębki w tych procesach powinny charakteryzować się stosunkowo dużymi cząstkami a zarazem strukturą wstępnie zniszczoną. Większe cząstki zrębków zapewniają występowanie proporcjonalnych przestrzeni międzycząsteczkowych (porów) co sprzyja obniżeniu oporów przepływu czynników suszących jak również zwiększa dynamikę samoistnych procesów suszenia (lepsze wentylowanie złoża- lepsze odprowadzenie ciepła i masy). Uzyskiwanie zrębków o pożądanej, zwiększonej granulacji, a zarazem o strukturze przekroju z licznymi pęknięciami (zwiększona powierzchnia czynna oraz obniżona wytrzymałość mechaniczna cząstki) jest wysoce zasadne z punktu widzenia kolejnych procesów przetwarzania.

Biorąc pod uwagę znaczenie energochłonności procesu rozdrabniania jak również jakość uzyskiwanych zrębków wierzby wiciowej, podjęto badania mające na celu między innymi poznanie mechanizmów decydujących o przebiegu procesu zrębkowania wierzby wiciowej. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły opracowanie szeregu modeli opisujących przebiegi zmian najważniejszych parametrów procesu. Testy procesu zrębkowania poprzedzone zostały badaniami mającymi na celu opisanie właściwości badanych pędów. Dokonano oznaczeń następujących parametrów:

- wilgotność robocza 51,2±1,5%,
- liczebność pędów w karpie 9,9±4,6 szt.,
- wielkość plonu świeżej masy 72 Mg·ha<sup>-1</sup> oraz suchej 36 Mg·ha<sup>-1</sup>,
- długość pędów 4,4 $\pm$ 0,74 m i ich średnica na wysokości cięcia 27 $\pm$ 6,4 mm,
- zawartość popiołu w stanie suchym 0,73±0,014% oraz roboczym -1,52±0,03%,
- gęstość właściwa 0,881±0,009 g·cm<sup>-3</sup>
- wartość opałowa w stanie suchym 18200±162 J·g<sup>-1</sup>.

Informacje te, umożliwiają dokonanie pełniejszej oceny potencjału energetycznego wierzby wiciowej jako surowca dla sektora biopaliwowego.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, iż biomasa wierzby wiciowej pozyskana z upraw celowych jest bardzo dobrą alternatywa dla biomasy leśnej. Należy tu nadmienić, iż stosunkowo duża wilgotność przy zbiorze (około 50-55%) wymusza zastosowanie dodatkowych zabiegów technologicznych (dosuszanie) celem utrzymania odpowiedniej jakości przetwarzanej biomasy. Drugim czynnikiem obniżającym jej jakość jest zwiększona zawartość kory oraz pędów o małej średnicy co skutkuje zwiększoną zawartością popiołu. Pędy pozbawione drobnych gałęzi oraz liści charakteryzują się zawartością popiołu na poziomie 0,7-1% (Tabela 13), natomiast w przypadku biomasy zebranej z plantacji w formie całych roślin zawartość popiołu wzrasta do 2-3%.

Procesy rozdrabniania, w tym zrębkowania, zaliczane są do procesów mechanicznego przetwarzania. Dlatego też, nieodzownym jest poznanie podstawowych właściwości mechanicznych pędów wierzby wiciowej. Przeprowadzono stosowne badania, które niejednokrotnie wymagały opracowania autorskich procedur badawczych (np. metoda oznaczenia naprężeń rozłupujących, naprężeń ścinających wzdłuż włókien). Wyniki tych badań stanowią bazę cennych informacji niezbędnych w projektowaniu i eksploatacji maszyn do przetwarzania biomasy wierzby wiciowej. Do najważniejszych właściwości, w aspekcie mechanicznego zrębkowania, należy zaliczyć:

- współczynnik tarcia o powierzchnię stalową (Tabela 14),
- współczynnik sprężystości (rys. 38) opisany następującą zależnością E=-4,21·d<sup>2</sup>-88,87·d-6826,8 (MPa),
- naprężenia ścinające wzdłuż włókien (rys. 41) opisane zależnością τ<sub>i</sub>=0,0015d<sup>2</sup>+0,054d+1,76 (MPa),
- naprężenia rozłupujące (rys. 43) opisane zależnością  $\sigma_z = 0.03 \cdot d + 0.66$  (MPa),
- jednostkowa minimalna praca cięcia wartość średnia W<sub>Cjmin</sub>. 33,41 ±4,57 kJ·m<sup>-2</sup> (rys. 39),
- jednostkowa minimalna siła cięcia - wartość średnia Q<sub>Cjmin</sub>. 34,34 ±3,6 kJ⋅m<sup>-2</sup> (rys. 40). Informacje te z uwagi na złożoność procesów rozdrabniania wydają się być niezbędne do

właściwego wnioskowania jak również opisu zaobserwowanych zależności.

Głównym celem podjętym w niniejszym opracowaniu było poznanie przebiegu procesu zrębkowania pędów przy zastosowaniu zmiennych parametrów procesu. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych doświadczeń zgodnie z przedstawionym planem badawczym (rys. 17) umożliwiły określenie parametrycznych modeli opisujących zmiany analizowanych właściwości. Dodatkowo szczegółowa analiza przebiegów sił cięcia metodą quasi-statyczną wykazała, iż istnieją trzy zasadnicze grupy przebiegów. Obrazują one geometryczne właściwości uzyskiwanych zrębków (rys. 44) wskazując na intensywność występowania pęknięć struktury zrębka. Opracowanie to stanowi bazę informacji, wytycznych przy analizowaniu przebiegów sił cięcia innych materiałów roślinnych poddawanych rozdrabnianiu.

Najważniejszymi osiągnięciami z testów zrębkowania metodą quasi-statyczną było sformułowanie następujących zależności:

nakłady pracy w procesie cięcia:

 $W_C = (\beta \cdot d \cdot l_z)^{0,476} - 0,771 \cdot \beta + 2,748 \cdot d - 1,377 \cdot l_z - 60,95 \text{ (J)},$ 

- jednostkowe nakłady pracy w procesie cięcia:

 $W_{Cj} = (l_z \cdot \beta)^{0.544} + 0.868 \cdot \beta + 30.56 \text{ (kJ} \cdot \text{m}^{-2}),$ 

- energochłonność procesu rozdrabniania:

 $E_{rs} = 23,79 \cdot lz^{-0,482} + 0,045 \cdot \beta - 2,86 \text{ (kJ·kg}^{-1}),$ 

 wykazanie wpływu parametrów procesu na liczbę pęknięć struktury zrębka oraz zmiany gęstości właściwej (opracowanie nowej procedury pomiarowej gęstości właściwej – z pominięciem widocznych porów).

Na podstawie testów rozdrabniania metodą dynamiczną oznaczono i opracowano:

- składy granulometryczne uzyskiwanych zrębków wraz ze wskazaniem trendów zmian w zależności od wariantów testu badawczego. Wykazano wpływ charakterystycznych kątów ostrza noża  $\beta$  i podawania pędów  $\varepsilon$  oraz długości zrębkowania lz na udział frakcji głównych istotnych w aspekcie kolejnych procesów przetwarzania.
- gęstości usypowe uzyskiwanych zrębków wraz ze wskazaniem trendów zmian,
- energochłonność procesu rozdrabniania opisane modelem:

$$E_r = 25,63 \cdot lz^{-0,418} + 0,118 \cdot \beta - 0,036 \cdot \varepsilon \text{ (kJ·kg^{-1})}.$$

Przedstawione wyniki oraz opracowane modele jednoznacznie wskazują na możliwości sterowania jakością uzyskiwanych zrębków w zależności od potrzeb rynkowych i wymogów kolejnych procesów przetwarzania. Wykazano również, iż odpowiednie dobranie geometrii układu zrębkowania umożliwia istotne obniżenie energochłonności procesu.

Dodatkowo wykazano parametryczne powiązanie wyników testów cięcia pędów metodą quasi-statyczną a zrębkowaniem dynamicznym. Opracowany model przyjął następującą postać:

$$E_r^* = 1,23 \cdot (23,79 \cdot l_z^{-0,482} + 0,045 \cdot \beta - 2,86) - 0,036 \cdot \varepsilon + 5,45 \text{ (kJ·kg}^{-1)}.$$

Opracowany model umożliwia wstępne szacowanie energochłonności procesu w oparciu o prostsze i szybsze badania laboratoryjne w warunkach quasi-statycznych jak również wskazuje na możliwości opracowania podobnych zależności dla innych materiałów roślinnych.

Podsumowując, niniejsze opracowanie umożliwia poznanie procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej oraz wpływu najważniejszych czynników procesu na jego przebieg oraz jakość uzyskanych zrębków. Potwierdzono pozytywnie przyjęte hipotezy badawcze, wskazując kierunek dalszych prac dotyczących tego zagadnienia. Opracowanie to stanowi podstawę do podejmowania kolejnych badań obejmujących między innymi zagadnienia konstrukcji systemów zrębkujących - dobór materiałów oraz szczegółowych rozwiązań technicznych.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Abdallah, R., Auchet, S., Méausoone, P. J. (2011). Experimental study about the effects of disc chipper settings on the distribution of wood chip size. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.009
- Abdallah, R., Auchet, S., Méausoone, P. J. (2014). A dynamic measurement of a disc chipper cutting forces. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.033
- Adamczyk, F., Frąckowiak, P., Jankowiak, S., Mac, J., Michalec, K. (2007). Wpływ grubości drewna (gałęzi) sumaka octowca Rhus typhina L. na parametry energetyczne jego zrębkowania prototypową rębarką RD. Retrieved from http://www.pimr.poznan.pl/trol4\_2007/AD4\_2007.pdf
- AEO2016, A. E. O. 2016. (2017). International Energy Outlook 2017. Retrieved from www.eia.gov
- Alizadeh, M. R., Rahimi-Ajdadi, F., Dabbaghi, A. (2011). Cutting energy of rice stem as influenced by internodes position and dimensional characteristics of different varieties. *Australian Journal of Crop Science*
- Arola, R. A., Radcliffe, R. C., Winsauer, S. A. (1983). Prototype wood chunker used on Populus "Tristis." In: Hansen, Edward A., Ed. Intensive Plantation Culture: 12 Years Research. Gen. Tech. Rep. NC-91. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station: 125-130., 91. Retrieved from https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/18851
- Arola, R. A., Sturos, J. B., Radcliffe, R. C. (1991). U.S. Chunkwood Machines. North Central Forest Experiment Station, Forest Service -U.S. Department of Agriculture. Manuscript Approved for Publication June 6, 1991. Retrieved from https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr nc145.pdf
- Assirelli, A., Civitarese, V., Fanigliulo, R., Pari, L., Pochi, D., Santangelo, E., Spinelli, R. (2013). Effect of piece size and tree part on chipper performance. *Biomass and Bioenergy*, 54, 77–82. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2013.03.029
- Azadbakht, M., Esmaeilzadeh, E., Esmaeili-Shayan, M. (2015). Energy consumption during impact cutting of canola stalk as a function of moisture content and cutting height. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2), 147–152. https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2013.10.002
- Barontini, M., Scarfone, A., Spinelli, R., Gallucci, F., Santangelo, E., Acampora, A., Pari, L. (2014). Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.022
- Bello, S. R., Onilude, M. A. (2011). Force relations and dynamics of cutting knife in a vertical disc mobile wood chipper. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*
- Bochtis, D., Sørensen, C. A. G., Kateris, D., Bochtis, D., Sørensen, C. A. G., Kateris, D. (2019). Agricultural Production Through Technological Evolution. *Operations Management in Agriculture*, 1–18. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809786-1.00001-1
- **BP.** (2017). Statistical Review of World Energy June 2017. Retrieved from https://www.bp.com /content/dam/bp-country/de ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf
- BP. (2018). BP Statistical Review of World Energy 2018. Retrieved from https://www.bp.com/content/ dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf
- Břendová, K., Kubátová, P., Száková, J., Tlustoš, P. (2018). Trace element leaching from contaminated willow and poplar biomass – A laboratory study of potential risks. *Biomass and Bioenergy*, 112, 11–18. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2018.02.012
- Bressler, A., Vidon, P., Hirsch, P., Volk, T. (2017). Valuation of ecosystem services of commercial shrub willow (Salix spp.) woody biomass crops. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4). https://doi.org/10.1007/s10661-017-5841-6
- Bujang, B., Safuan, A. (2011). Properties and bulk drying of biomass. Retrieved from https://lib.dr.iastate.edu/etd

- **Cocker-Maciejewska, A. (2007).** Obróbka wstępna biomasy na potrzeby systemów energetycznych. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 30,* 133–142. Retrieved from http://yadda.icm. edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-article-d3a6e1bb-9518-4df6-a414-e68961566626
- Dange, A. R., Thakare, S. K., Rao, I. B., Bhaskara Rao, I. (2011). Cutting energy and force as required for Pigeon pea stems. Journal of Agricultural Technology (Vol. 7). Retrieved from http://www.ijataatsea.com
- Dimitriou, I., & Rosenqvist, H. (2011). Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production-Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.010
- Dresselhaus, M. S. (1966). Solid State Physics Part II: Optical Properties of Solids. *Proceedings of the International School of Physics*. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41084-9.50005-9
- **Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE** z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania, stosowania energii ze źródeł odnawialnych, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, Dz. U. L 140/16 z 5.6.2009
- **Decyzja Komisji z dnia 1 marca 2013 r.** ustanawiająca wytyczne dla państw członkowskich dotyczące obliczania energii odnawialnej z pomp ciepła w odniesieniu do różnych technologii pomp ciepła na podstawie art. 5 dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE, Dz.U.L62/27 z 6.3.2013
- **Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/1513** z dnia 9 września 2015 r. zmieniająca dyrektywę 98/70/WE odnoszącą się do jakości benzyny i olejów napędowych oraz zmieniająca dyrektywę 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, Dz. U. L 239/1 z 15.9.2015
- Ebadian, M., Shedden, M. E., Webb, E., Sokhansanj, S., Eisenbies, M., Volk, T., Hallen, K. (2018). Impact of Parcel Size, Field Shape, Crop Yield, Storage Location, and Collection Equipment on the Performance of Single-Pass Cut-and-Chip Harvest System in Commercial Shrub Willow Fields. *Bioenergy Research*. https://doi.org/10.1007/s12155-018-9902-7
- Eisenbies, M. H., Volk, T. A., Patel, A. (2016). Changes in feedstock quality in willow chip piles created in winter from a commercial scale harvest. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/ j.biombioe.2016.02.004
- Eisenbies, M. H., Volk, T. A., Posselius, J., Foster, C., Shi, S., Karapetyan, S. (2014). Evaluation of a Single-Pass, Cut and Chip Harvest System on Commercial-Scale, Short-Rotation Shrub Willow Biomass Crops. *Bioenergy Research*, 7(4), 1506–1518. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9482-0
- Eisenbies, M. H., Volk, T. A., Posselius, J., Shi, S., Patel, A. (2015). Quality and Variability of Commercial-Scale Short Rotation Willow Biomass Harvested Using a Single-Pass Cut-and-Chip Forage Harvester. *Bioenergy Research*. https://doi.org/10.1007/s12155-014-9540-7
- EN ISO 17225-4. (2014). PN-EN ISO 17225-4:2014-07 Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy Część 4: Klasy zrębków drzewnych. Retrieved from http://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-17225-4-2014-07e.html
- Eriksson, G., Bergström, D., Nordfjell, T. (2013). The state of the art in woody biomass comminution and sorting in Northern Europe. *International Journal of Forest Engineering*, 24(3), 194–215. https://doi.org/10.1080/14942119.2013.852391
- Eyma, F., Méausoone, P.-J., Martin, P. (2004a). Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), 220–225. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00880-X
- **Eyma, F., Méausoone, P.-J., Martin, P. (2004b).** Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B. *Annals of Forest Science*, *61*(1), 55–64. https://doi.org/10.1051/forest:2003084
- Fagernäs, L., Brammer, J., Wilén, C., Lauer, M., Verhoeff, F. (2010). Drying of biomass for second generation synfuel production. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1267–1277. https://doi.org/10 .1016/j.biombioe.2010.04.005

- Faugno, S., Civitarese, V., Assirelli, A., Sperandio, G., Saulino, L., Crimaldi, M., Sannino, M. (2017). Chip quality as a function of harvesting methodology. *Chemical Engineering Transactions*. https://doi.org/10.3303/CET1758046
- Fernando, W. J. N., Low, H. C., Ahmad, A. L. (2011). Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 102(4), 310–316. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2010.09.004
- Fortino, S., Zagari, G., Mendicino, A. L., Dill-Langer, G. (2012). A simple approach for FEM simulation of Mode I cohesive crack growth in glued laminated timber under short-term loading. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*
- Frączek, J. (1996). Wytrzymałość ziarna zbóż obciążanego w masie. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln., 446, 375–384
- Frączek, J., Cieslikowski, B., Kuboń, M., Mudryk, K., Sikora, J., Szeląg-Sikora, A., Wcisło, G., Wróbel, M. (2014). *Produkcja biopaliw problemy wybrane*. Kraków: PTIR
- Frączek, J., Mudryk, K. (2006). Metoda określenia oporów cięcia pędów wierzby energetycznej. Inżynieria Rolnicza, R. 10, 91–98. Retrieved from http://yadda.icm.edu.pl/baztech /element/bwmetal.element.baztech-article-BAR0-0054-0072
- Frączek, J., Mudryk, K. (2007). Metoda pomiaru energochłonności procesu zrębkowania pędów wierzby. *Inżynieria Rolnicza* (Vol. 7). Retrieved from http://ir.ptir.org/artykuly/pl/95/IR(95) \_1902\_pl.pdf
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2009). Zapotrzebowanie mocy jednostkowej do rozdrabniania pędów wierzby na rębarce toporowej. *Inżynieria Rolnicza* (Vol. 6). Retrieved from http://ir.ptir.org/artykuly/pl/115/IR(115)\_2533\_pl.pdf
- Gan, H., Mathanker, S., Momin, M. A., Kuhns, B., Stoffel, N., Hansen, A., Grift, T. (2018). Effects of three cutting blade designs on energy consumption during mowing-conditioning of Miscanthus Giganteus. *Biomass and Bioenergy*, 109, 166–171. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE .2017.12.033
- Gebreegziabher, T., Oyedun, A. O., Hui, C. W. (2013). Optimum biomass drying for combustion A modeling approach. *Energy*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.004
- Gejdoš, M., Lieskovský, M., Slančík, M., Němec, M., Danihelová, Z. (2015). Storage and fuel quality of coniferous wood chips. *BioResources*, 10(3), 5544–5553. https://doi.org/10.15376 /biores.10.3.5544-5553
- **Ghodki, B. M., Goswami, T. K. (2019).** Modeling of granular heat transfer in cryogenic grinding system: Black pepper seeds. *Chemical Engineering Research and Design*, *141*, 302–316. https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2018.11.008
- Gigler, J. K., Van Loon, W. K. P., Vissers, M. M., Bot, G. P. A. (2000). Forced convective drying of willow chips. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00037-4
- Gottschalk, K., Scholz, V. (2008). Experimental and theoretic investigations on the drying behavior of wood chips. *Agricultural Engineering: Land-Technik 2008*.
- Guidi Nissim, W., Palm, E., Mancuso, S., Azzarello, E. (2018). Trace element phytoextraction from contaminated soil: a case study under Mediterranean climate. *Environmental Science and Pollution Research*. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1197-x
- Gunay, M., Seker, U., Sur, G. (2006). Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. *Materials and Design*. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.003
- GUS, (2017). Energia 2017. Retrieved from https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny /pl/defaultaktualnosci/5485/1/5/1/energia\_2017.pdf
- GUS. (2018). Energia ze źródeł odnawialnych w 2017 roku. Retrieved January 3, 2019, from http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2017-roku,3,12.html

- Heinek, S., Polanz, S., Huber, M. B., Hofmann, A., Monthaler, G., Fuchs, H. P., Giovannini, A. (2013). Biomass Conditioning - Degradation of Biomass during the Storage of Woodchips. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, 11–20. https://doi.org/10.5071/21 steubce2013-1ao.3.5
- Hellström, L. M., Gradin, P. A., Gulliksson, M., Carlberg, T. (2011). A Laboratory Wood Chipper for Chipping Under Realistic Conditions. *Experimental Mechanics*. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9452-1
- Hellstrom, L. M., Isaksson, P., Gradin, P. A., Eriksson, K. (2009). An analytical and numerical study of some aspects of the wood chipping process. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. https://doi.org/10.3183/NPPRJ-2009-24-02-p225-230
- Indira K, M., Dani N, S., Jan, W., Jaroslav, B. (2017). Comparison of the growth of fast-growing poplar and willow in two sites of Central Kazakhstan. *Journal of Forest Science*, 63(No. 5), 239–244. https://doi.org/10.17221/101/2016-JFS
- InstalReporter (2018), Rynek kotłów na paliwa stałe pelet, biomasa czy węgiel. https://instalreporter.pl/ogolna/rynek-kotlow-na-paliwa-stale-pelet-biomasa-czy-wegiel/
- Jędrzejewski, H., Mucha, T., Szczubelek, S. (1966). Technologia obróbki metali i drewna. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1966
- Jirjis, R. (1995). Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00090-9
- Jirjis, R. (2005). Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted Salix viminalis. In *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.08.014
- Juliszewski, T., Kwaśniewski, D., Mudryk, K., Wróbel, M. (2012). Ocena wybranych parametrów biomasy pozyskanej z plantacji drzew szybkorosnących. *Inżynieria Rolnicza*.
- Jylhä, P., Hytönen, J., Alm, J. (2017). CO2 release and dry matter loss of Scots pine forest chips stockpiled from late summer to winter. *Biomass and Bioenergy*, 104, 36–44. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.06.003
- Kakahy, A. N. N., Ahmad, D., Akhir, M. D., Sulaiman, S., Ishak, A. (2014). Effects of Rotary Mower Blade Cutting Angles on the Pulverization of Sweet Potato Vine. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 95–101. https://doi.org/10.1016/J.AASPRO.2014.11.014
- Kanakabandi, C. K., Goswami, T. K. (2019). Determination of properties of black pepper to use in discrete element modeling. *Journal of Food Engineering*, 246, 111–118. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2018.11.005
- Kaniewska, J., Domoradzki, M., Poćwiardowski, W. (2013). Suszarka wibracyjna. Opory przepływu powietrza przez warstwę nasion. *Inżynieria I Aparatura Chemiczna*, 52, 191–193. https://doi.org/10.1080/07373930008917789
- Karaj, S., Barfuss, I., Schalk, J., Reisinger, G., Pude, R., Müller, J. (2013). Modelling of air resistance during drying of wood-chips. *InProceedings, CIGR International Symposium on Sustainable Bioproduction - Water, Energy and Food.* Retrieved from http://opus.unihohenheim.de/volltexte/2013/820/
- Korzeniewska, E., Drzymała, A., Szczęsny, A., Zawiślak, R., Seme, S. (2018). Aspekty prawnoekonomiczne i ekologiczne dla elektrowni fotowoltaicznych. https://doi.org/10.15199/48.2018.12.28
- Krajnc, M., Dolšak, B. (2014). The influence of drum chipper configuration on the quality of wood chips. *Biomass and Bioenergy*, 64, 133–139. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.03.011
- Kristensen, E. F., Kofman, P. D. (2000). Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 175–180. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00089-6
- Krzyżaniak, M., Stolarski, M. J., Niksa, D., Tworkowski, J., & Szczukowski, S. (2016). Effect of storage methods on willow chips quality. *Biomass and Bioenergy*, 92, 61–69. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2016.06.007

- Kubová, J., Matúš, P., Bujdoš, M., Hagarová, I., Medved', J. (2008). Utilization of optimized BCR three-step sequential and dilute HCl single extraction procedures for soil-plant metal transfer predictions in contaminated lands. *Talanta*. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.01.002
- Kuljich, S., Hernández, R., Llavé, A., Koubaa, A. (2013). Effects of cutting direction, rake angle, and depth of cut on cutting forces and surface quality during machining of balsam fir. *Wood and Fiber Science.*
- Kusińska, E., Starek, A. (2014). Assessment of variability of the maximum cutting force in relation to the beetroot pulp structure. *Agricultural Engineering*, 1(149), 91–100. https://doi.org/10.14654 /ir.2014.149.010
- Kwaśniewski, D., Mudryk, K., Wróbel, M. (2006b). Zbiór wierzby energetycznej z użyciem piły łańcuchowej. *Inżynieria Rolnicza*, *13*, 271–277
- Lenz, H., Idler, C., Hartung, E., Pecenka, R. (2015). Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.018
- Lenz, H., Pecenka, R., Hartung, E., Idler, C. (2016). Development and test of a simplified method to calculate dry matter loss during open-air storage of poplar wood chips by analysing ash contents. *Biomass and Bioenergy*, 94, 258–267. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2016.09.011
- Lenz, H., Pecenka, R., Idler, C., Dumfort, S., Whittaker, C., Ammon, C., Hartung, E. (2017). Continuous weighing of a pile of poplar wood chips – A comparison of methods to determine the dry matter losses during storage. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe .2016.11.011
- Li, H., Chen, Q., Zhang, X., Finney, K. N., Sharifi, V. N., Swithenbank, J. (2012). Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 35, 71–80. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.009
- LifeGate (2017). Germania. Il 35% dell'elettricità viene da rinnovabili. LifeGate. Retrieved March 14, 2019, from https://www.lifegate.it/persone/stile-di-vita/germania-elettricita-rinnovabili
- Lisowski, A. (2010). Technologie zbioru roślin energetycznych. (Lisowski A., Ed.). Warszawa: Wydawnictwo SGGW. Retrieved from https://docplayer.pl/15924988-Technologie-zbioru-roslinenergetycznych-pod-redakcja-aleksandra-lisowskiego.html
- Lisowski, A., Kostyra, K., Klonowski, J., Chlebowski, J., Nowakowski, T., Sypuła, M., ... Świątek, K. (2009). Efekty działania elementów wspomagających rozdrabnianie roślin kukurydzy a jakość kiszonki. (A. Lisowski, Ed.). Warszawa: Wydawnictwo SGGW. Retrieved from www.wydawnictwosggw.pl
- Łukaszuk, J., Molenda, M., & Horabik, J. (2007). Wpływ upakowania i kształtu nasion na opór przepływu powietrza w złożu żyta i rzepaku. Acta Agrophysica (Vol. 10). Retrieved from http://www.old.acta-agrophysica.org/artykuly/acta\_agrophysica/ActaAgr\_153\_2007\_10\_3\_593.pdf
- Macko, M. (2013). Konstrukcja rozdrabniaczy do biomasy. http://naszaenergia.kujawskopomorskie.pl/fileadmin/doc/artykuly/nowe/konstrukcja\_rozdrabniaczy\_do\_biomasy.pdf
- Manzone, M. (2015). Energy consumption and CO2 analysis of different types of chippers used in wood biomass plantations. *Applied Energy*, 156, 686–692. https://doi.org/10.1016/J .APENERGY.2015.07.049
- Manzone, M., Balsari, P. (2015). Productivity and woodchip quality of different chippers during poplar plantation harvesting. *Biomass and Bioenergy*, *83*, 278–283. https://doi.org/10.1016/J .BIOMBIOE.2015.10.010
- Manzone, M., Balsari, P., Spinelli, R. (2013). Small-scale storage techniques for fuel chips from short rotation forestry. *Fuel*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.006
- Mattsson, J. E. (1990). Basic handling characteristics of wood fuels: Angle of repose, friction against surfaces and tendency to bridge for different assortments. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 5(1–4), 583–597. https://doi.org/10.1080/02827589009382641

- Maughan, J. D., Mathanker, S. K., Fehrenbacher, B. M., Grift, T. E., Hansen, A. C. (2012). Impact of Cutting Speed, Blade Type, and Blade Angle on Miscanthus Harvesting Energy Requirement. In ASABE
- McRandal, D. M., & McNulty, P. B. (1978). Impact cutting behaviour of forage crops I. Mathematical models and laboratory tests. *Journal of Agricultural Engineering Research*. https://doi.org/10.1016/0021-8634(78)90104-X
- Mendel, T., Hofmann, N., Schulmeyer, F., Borchert, H., Kuptz, D., Hartmann, H. (2016). Fuel Quality Changes during the Storage of Wood Chips in Large Piles. *European Biomass Conference* and Exhibition Proceedings, 53–59. https://doi.org/10.5071/24theubce2016-1bo.1.2
- Merchant, M. E. (1945a). Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*. https://doi.org/10.1063/1.1707586
- Merchant, M. E. (1945b). Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting. *Journal of Applied Physics*, 16(6), 318–324. https://doi.org/10.1063/1.1707596
- Ministerstwo Środowiska. (2018). Czyste Powietrze zdrowy wybór. Retrieved from https://www.gov.pl/web/srodowisko/czyste-powietrze
- Moradpour, P., Scholz, F., Doosthoseini, K., Tarmian, A. (2016). Measurement of Wood Cutting Forces during Bandsawing Using Piezoelectric Dynamometer. *Drvna Industrija*. https://doi.org/10.5552/drind.2016.1433
- Mroziński, A., Flizikowski, J., Macko, M. (2016). Inżynieria rozdrabniania biomasy. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- **Mudryk, K. (2010).** Mielenie rozdrabnianie końcowe. In J. Frączek (Ed.), *Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowych wytwarzanych z roślin energetycznych*. Kraków: PTIR.
- Mudryk, K. (2011). Quality assessment for briquettes made of biomass from maple [*Acer negundo* L.] and black locust [*Robinia pseudoacacia* L.]. *Agricultural Engineering*. 7(132), 115-121. http://ir.ptir.org/artykuly/en/132/IR(132)\_3107\_en.pdf
- Niemczyk, M. (2016). Przydatność hodowlana wybranych odmian topoli w plantacjach energetycznych o krótkim cyklu produkcji. Sylwan, 160, 292–298.
- 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
- Nyström, J. L., Gradin, P. A., & Thörnberg, B. (2018). An experimental study of the chipping process with focus on energy consumption and chipping angles. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 33(3), 460–467. https://doi.org/10.1515/npprj-2018-3055
- O'Dogherty, M. J., Gale, G. E. (1986). Laboratory studies of the cutting of grass stems. *Journal of Agricultural Engineering Research*. https://doi.org/10.1016/0021-8634(86)90033-8
- Pachlewski, M. P. (1964). Projektowanie zakładów mechanicznej obróbki drewna. Wydawnictwo Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 1964 r, 399
- Pari, L., Brambilla, M., Bisaglia, C., Del Giudice, A., Croce, S., Salerno, M., Gallucci, F. (2015). Poplar wood chip storage: Effect of particle size and breathable covering on drying dynamics and biofuel quality. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.001
- Pari, L., Civitarese, V., Giudice, A. del, Assirelli, A., Spinelli, R., Santangelo, E. (2013). Influence of chipping device and storage method on the quality of SRC poplar biomass. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.019
- Parzych, S. (2015). Potencjalne możliwości wykorzystania biomasy drzewnej do celów energetycznych. Leśne Prace Badawcze, 76, 3, 256–264. https://doi.org/10.1515-frp-2015-0025
- Pecenka, R., Lenz, H., Idler, C. (2018). Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.005

- Pecenka, R., Lenz, H., Idler, C., Daries, W., Ehlert, D. (2014). Development of bio-physical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.017
- Phadke, P. C., Walke, P. V., Kriplani, V. M. (2015). A review on indirect solar dryers. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052815
- Pieter, K. (2012). Harvesting short rotation coppice willow Background. *Harvesting / Transport*, *No.* 29. Retrieved from http://www.coford.ie
- Plaza, S., Margielewski, L., Celichowski, G. (2005). Wstęp do tribologii i tribochemia. ŁÓDŹ. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/260133013
- Pochi, D., Civitarese, V., Fanigliulo, R., Spinelli, R., Pari, L. (2015). Effect of poplar fuel wood storage on chipping performance. *Fuel Processing Technology*, 134, 116–121. https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2015.01.023
- Porciuncula, B. D. A., Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., Laurindo, J. B. (2013). Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 490–496. https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.06.011
- PN-EN ISO 17225-4 Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 4: Klasy zrębków drzewnych
- PN-EN ISO 18134-1:2015-11- Biopaliwa stałe -- Oznaczanie zawartości wilgoci -- Metoda suszarkowa -- Część 1: Wilgoć całkowita -- Metoda referencyjna
- PN-EN ISO 18122:2016-01- Biopaliwa stałe -- Oznaczanie zawartości popiołu
- PN-EN 15103:2010 Biopaliwa stałe -- Określanie gęstości nasypowej
- Rabbani, H., Sohraby, N., Gholami, R., Jaliliantabar, F., Waismorady, A. (2015). Determination of mass density module, crush resistance coefficient and cutting efficiency of rose (Rosa Damascene Mill). *Scientia Horticulturae*. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.009
- **Reczulski, M. (2015).** Analysis of the construction and operation of system wood chipping and transfer chips. Retrieved from http://www.centrumdp.sk/wr/201504/15.pdf
- **Reczulski, M. (2016).** The system wood chipping in disc chipper-problems of uniformity of chips length. Retrieved from http://www.centrumdp.sk/wr/201603/09.pdf
- **RenCraft.** (2019). Suszarnie solarne firmy CONA. Retrieved from http://www.rencraft.eu/technika/suszarnie-solarne-cona/
- Rodrigues, A., Bordado, J., Mateus, M. (2015). An evaluation of SRCs as a potential carbon neutral source of biomass for energy and chemicals. *International Journal of Energy, Environment and Economics*.
- **Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) NR 1099/2008** z dnia 22 października 2008 r. w sprawie statystyki energii, Dz. U. L 304/1 z 14.11.2008, z późn. zm.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii, Dz. U. z 2008 r. Nr 156, poz. 969 z późn. zm.
- Różański, H., & Jabloński, K. (2012). Optymalne technologie pozyskiwania drewna energetycznego z cięć rębnych. Część I. Zrębki energetyczne. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, Nr 6. Retrieved from http://www1.up.poznan.pl/ktl/?q=pl/node/19
- Rugani, B., Golkowska, K., Vázquez-Rowe, I., Koster, D., Benetto, E., & Verdonckt, P. (2015). Simulation of environmental impact scores within the life cycle of mixed wood chips from alternative short rotation coppice systems in Flanders (Belgium). *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.032

- Sander, A. (2007). Thin-layer drying of porous materials: Selection of the appropriate mathematical model and relationships between thin-layer models parameters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(12), 1324–1331. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.11.001
- Santangelo, E., Scarfone, A., Giudice, A. Del, Acampora, A., Alfano, V., Suardi, A., Pari, L. (2015). Harvesting systems for poplar short rotation coppice. *Industrial Crops and Products*, 75, 85–92. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.07.013
- Savoie, P., Hébert, P. L., & Robert, F. S. (2014). Novel willow header adapted to a pull-type forage harvester: Development and field experiments. *Applied Engineering in Agriculture*. https://doi.org/10.13031/aea.30.10697
- Ślipek, Z. (1987). Ocena właściwości fizycznych pszenicy dla potrzeb zbioru kombajnowego. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, 117, 23–39.
- Spinelli, R., Eliasson, L., Magagnotti, N. (2016). Increasing wood fuel processing efficiency by finetuning chipper settings. *Fuel Processing Technology*, 151, 126–130. https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2016.05.026
- Splawa-Neyman, S., Owczarzak, Z. (2019). Wierzba (Salix alba L.). Retrieved February 26, 2019, from https://www.itd.poznan.pl/pl/vademecum/wierzba
- Staliński, A. (2016). Perspektywy dla inwestowania w biomasę wykorzystywaną do produkcji energii elektrycznej w polsce-problem dostępności ziemi na przykładzie uprawy wierzby wiciowej. STUDIA OECONOMICA POSNANIENSIA, 4, no. 6, 97–114. https://doi.org/10.18559/SOEP.2016.6.6
- Suggs, C. W., Lanier, A. (1985). Resistance of Wood Chips and Sawdust to Airflow. Transactions of the ASAE, 28(1), 293–295. https://doi.org/10.13031/2013.32244
- Szczukowsk, S., Stolarski, M., Tworkowsk, J. (2011b). Plon biomasy wierzby produkowanej systemem eko-salix. *Fragm. Agron*, 28(4), 104–115.
- Szczukowski, S., Tworkowski, J., Stolarski, M., Kwiatkowski, J., Krzyżaniak, M., Lajszner, W., Graban, Ł. (2012). Wieloletnie rośliny energetyczne. MULTICO Oficyna Wydawnicza.
- Szweykowska, A., Szweykowski, J. (2006). Botanika T.1 Morfologia. PWN 2006
- Szymanek, M., Tanaś, W., Kassar, F. H., Kachel-Jakubowska, M., Prus, A. (2015). Energochłonność przetwarzania materiałów roślinnych na cele energetyczne. *Logistyka-Nauka Logistyka*, 5/2015, 603– 611. Retrieved from https://www.czasopismologistyka.pl/artykuly-naukowe/send/342-artykuly-naplycie-cd-1/8590-szymanek-tanas-kassar-energochlonnosc-przetwarzania-materialow
- Toledo, A. de, Silva, R. P. da, Furlani, C. E. A. (2013). Quality of cut and basecutter blade configuration for the mechanized harvest of green sugarcane. *Scientia Agricola*, 70(6), 384–389. https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600002
- **Tomporowski, A., Opielak, M. (2012).** *Eksploatacja i niezawodność Maintenance and reliability. Eksploatacja i Niezawodność* (Vol. Vol. 14, No. 3). Retrieved from http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAT1-0041-0066
- Uhmeier, A. (1995). Some Fundamental-Aspects of Wood Chipping. Tappi Journal.
- Urbaniak, D., Wylecial, T., Zajemska, M. (2013). Prognozowanie uziarnienia produktu rozdrobnienia biomasy. *Inz. Ap. Chem*, 52, 3, 266–267. Retrieved from http://inzynieria-aparaturachemiczna.pl/pdf/2013/2013-3/InzApChem\_2013\_3\_266-267.pdf
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. Dz. U. z 2012 r. poz. 1059, z późn. zm.
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych. Dz. U. z dnia 17 lutego 2017 r. poz. 285 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. Dz. U. z 2015 r. poz.478 i 2365 oraz z 2016 r. poz. 925 z późn. zm.
- Ustawa z dnia 7 czerwca 2018 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw. Dz. U. z dnia 29 czerwca 2018 r. poz. 1276

- Vanbeveren, S. P. P., De Francesco, F., Ceulemans, R., Spinelli, R. (2018). Productivity of mechanized whip harvesting with the Stemster MkIII in a short-rotation coppice established on farmland. *Biomass and Bioenergy*, 108, 323–329. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE .2017.11.024
- Wahsha, M., Fontana, S., Nadimi-Goki, M., Bini, C. (2014). Potentially toxic elements in foodcrops (Triticum aestivum L., Zea mays L.) grown on contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.07.009
- Wang, Z., MacFarlane, D. W. (2012). Evaluating the biomass production of coppiced willow and poplar clones in Michigan, USA, over multiple rotations and different growing conditions. *Biomass and Bioenergy*, 46, 380–388. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.08.003
- Whittaker, C., Yates, N. E., Powers, S. J., Misselbrook, T., Shield, I. (2016a). Dry Matter Losses and Greenhouse Gas Emissions From Outside Storage of Short Rotation Coppice Willow Chip. *Bioenergy Research*. https://doi.org/10.1007/s12155-015-9686-y
- Whittaker, C., Yates, N. E., Powers, S. J., Misselbrook, T., Shield, I. (2016b). Dry Matter Losses and Greenhouse Gas Emissions From Outside Storage of Short Rotation Coppice Willow Chip. *BioEnergy Research*, 9(1), 288–302. https://doi.org/10.1007/s12155-015-9686-y
- Whittaker, C., Yates, N. E., Powers, S. J., Misselbrook, T., Shield, I. (2018). Dry matter losses and quality changes during short rotation coppice willow storage in chip or rod form. *Biomass and Bioenergy*, 112, 29–36. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2018.02.005
- Wihersaari, M. (2005). Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. Biomass and Bioenergy, 28(5), 444–453. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.011
- Wróbel, M., Frączek, J., Jewiarz, M., Mudryk, K., Dziedzic, K. (2016). Impact of Selected Properties of Raw Material on Quality Features of Granular Fertilizers Obtained from Digestates and ASH Mixtures. *Agricultural Engineering*. https://doi.org/10.1515/agriceng-2016-0078
- Wróbel, M., Mudryk, K., Gąsiorski, A., Posyłek, Z., Dróżdż, T. (2017). Nakłady energetyczne podczas mielenia biomasy przygotowywanej do procesu peletowania. *Przeglad Elektrotechniczny*. https://doi.org/10.15199/48.2017.01.56
- Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Knapczyk, A. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parmeters of granulates obtained from willow and black locust biomass. In *Engineering for Rural Development*. https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N542
- Yahya, M., Fahmi, H., Fudholi, A., Sopian, K. (2018). Performance and economic analyses on solarassisted heat pump fluidised bed dryer integrated with biomass furnace for rice drying. *Solar Energy*, 174, 1058–1067. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.10.002
- Zárubová, P., Hejcman, M., Vondráčková, S., Mrnka, L., Száková, J., Tlustoš, P. (2015). Distribution of P, K, Ca, Mg, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in wood and bark age classes of willows and poplars used for phytoextraction on soils contaminated by risk elements. *Environmental Science* and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5043-0

# STRESZCZENIE

Produkcja biopaliw stałych w oparciu o surowce drzewne wymaga zastosowania szeregu operacji technologicznych. Surowce do ich produkcji najczęściej pozyskiwane są z przemysłu drzewnego jako pozostałości produkcyjne (z terenów leśnych jak i od podmiotów sektora drzewnego). W ostatnich latach rozwija się również dynamicznie pozyskiwanie biomasy drzewnej z plantacji roślin szybkorosnących. Plantacje takie są bardzo istotnym elementem sektora surowców drzewnych gwarantując między innymi stabilizację dostaw oraz odpowiednią jakość. Dominującym gatunkiem stosowanym na takich plantacjach jest wierzba wiciowa *Salix viminalis* L. i jej liczne klony.

Zebrane pędy poddawane są wstępnemu rozdrobnieniu celem uzyskania frakcji zwanej zrębkami. Zrębki drzewne mogą być stosowane bezpośrednio w systemach energetycznych jak również stanowić źródło surowca do produkcji biopaliw stałych takich jak pelety czy też brykiety.

Zrębki te powinny charakteryzować się stosunkowo dużymi cząstkami a zarazem strukturą wstępnie zniszczoną. Większe cząstki zrębków zapewniają występowanie proporcjonalnych przestrzeni międzycząsteczkowych (porów) co sprzyja obniżeniu oporów przepływu czynników suszących jak również zwiększa dynamikę samoistnych procesów suszenia (lepsze wentylowanie złoża- lepsze odprowadzenie ciepła i masy). Uzyskiwanie zrębków o pożądanej, zwiększonej granulacji, a zarazem o strukturze przekroju z licznymi pęknięciami (zwiększona powierzchnia czynna oraz obniżona wytrzymałość mechaniczna cząstki) jest wysoce zasadne z punktu widzenia kolejnych procesów przetwarzania.

Drugim bardzo ważnym czynnikiem towarzyszącym procesom rozdrabniania jest jego energochłonność. W przypadku biopaliw stałych wielkość nakładów energetycznych w procesach przetwarzania jest kluczowa przy określeniu ich efektywności energetycznej. Biorąc pod uwagę znaczenie energochłonności procesu rozdrabniania jak również jakość uzyskiwanych zrębków, podjęto badania mające na celu między innymi poznanie mechanizmów decydujących o przebiegu procesu zrębkowania wierzby wiciowej. Przyjęto dwie hipotezy badawcze odnoszące się do obniżenia energochłonności procesu oraz uzyskania jakościowych zrębków.

Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły opracowanie szeregu modeli opisujących przebiegi zmian najważniejszych parametrów procesu. Przedstawione wyniki oraz opracowane modele jednoznacznie wskazują na możliwości sterowania jakością uzyskiwanych zrębków w zależności od potrzeb rynkowych i wymogów kolejnych procesów przetwarzania. Wykazano również, iż odpowiednie dobranie geometrii układu zrębkowania umożliwia istotne obniżenie energochłonności procesu. Dodatkowo wykazano parametryczne powiazanie wyników testów cięcia pędów metodą quasi-statyczną a zrębkowaniem dynamicznym.

Podsumowując, niniejsze opracowanie umożliwia poznanie przebiegu procesu zrębkowania pędów wierzby wiciowej oraz wpływu najważniejszych czynników na jego przebieg oraz jakość uzyskanych zrębków. Potwierdzono pozytywnie przyjęte hipotezy badawcze, wskazując kierunek dalszych prac dotyczących tego zagadnienia. Opracowanie to stanowi podstawę do podejmowania kolejnych badań obejmujących między innymi zagadnienia konstrukcji systemów zrębkujących - dobór materiałów oraz szczegółowych rozwiązań technicznych.

Slowa kluczowe: zrębkowanie, wierzba wiciowa Salix viminalis L., zrębki, energochłonność

# CHIPPING PROCESS ANALYSIS OF THE BASKET WILLOW, *SALIX VIMINALIS* L. SHOOTS

#### Summary

The production of solid biofuels based on wood raw materials, requires a numerous unit operations. Raw materials for their production are most often obtained from the timber industry as by-products (from forest areas and from entities from the wood sector). In recent years, sourcing of wood biomass from fast-growing spices plantations has also been dynamically developing. Such plantations are very important part of the woody raw material sector guaranteeing stabilization of supplies and appropriate quality. The dominant specie used on such plantations is the basket willow *Salix viminalis L*. and its numerous clones.

The collected shoots are chipped to obtain a fraction called wood chips. This form of biomass can be used directly in energy systems as well as could be a raw material for the production of solid biofuels such as pellets or briquettes.

Wood chips should be characterized by relatively large particles and, at the same time, a pre-destroyed structure. Larger particles of wood chips ensure the occurrence of proportional intermolecular spaces (pores), which helps reduce the flow resistance of drying agents as well as increases the dynamics of spontaneous drying processes (better ventilation of deposit- better heat and mass transfer). Obtaining willow chips with the desired granulation, and also the structure of the cross-section with numerous cracks (increased active surface and reduced mechanical strength of the particle) is highly relevant forthcoming unit operations. Such structure is very desirable in drying processes as well as in the preparation of the raw material for the granulation.

The second very important factor accompanying the processes of chipping is energy consumption. In the case of solid biofuels, the amount of energy inputs in the processing processes is important in determining their energy efficiency.

Taking into account the importance of energy consumption of the chipping as well as the quality of the obtained chips, the aim of the study was to describe the mechanisms influencing the willow chipping process. Two research hypotheses, regarding the reduction of energy consumption in the process and obtaining of quality chips were stated.

The results of the conducted research, resulted in a several models describing the changes of the most important process parameters. The presented results and developed models clearly indicates the possibility of controlling the quality of the chips obtained, depending on market demand and the feedstock requirement for other processes. It was also shown that proper selection of the geometry of the chipping system makes it possible to significantly reduce the energy consumption of the process. In addition, a parametric linkage of the cutting of shoots using the quasi-static method and dynamic chipping was elaborated.

Summing up, this paper allows to understand the chipping of willow shoots and the influence of the most important factors on its course and the quality of obtained product (wood chips). The proposed research hypotheses were positively confirmed, what indicates the direction of further work on this issue. This study is the contribution for further research including the construction of chip systems - the selection of materials and detailed technical solutions.

Key words: chipping, basket willow Salix viminalis L., wood chips, energy consumption

