

ARKADIUSZ GENDEK, JAN MALATÁK, JAN VELEBIL

## Wpływ technologii pozyskania i składu zrębków leśnych na ich wartość opałową i zawartość popiołu

Effect of harvest method and composition of wood chips on their caloric value and ash content

### ABSTRACT

Gendek A., Malaták J., Velebil J. 2018. Wpływ technologii pozyskania i składu zrębków leśnych na ich wartość opałową i zawartość popiołu. Sylwan 162 (3): 248-257.

Wood chips composition and abundance of the impurities affecting the ash content are parameter of the chips quality that is important for the power plants. These parameters may be used as criteria in settlements between the supplier and the chipmaker. The determination of calorific value, ash content and share of individual elements in forest chips was undertaken. The wood chips obtained from the fragmentation of sawmill wastes and forest trees residues with various species compositions (Scots pine, multi-species and bundled Norway spruce residues) were investigated. The linear relationship between the ash content and the calorific value of the chips was determined. In all cases, the largest share (over 87%) in the composition of forest chips is assigned to the clean timber and wood particles with bark. The share of mineral impurities is within the range of 0.6-1.6%. The ash content in wood particles ranges 1.04-3.94% and is close to the values reported in the literature. In terms of ash content, the chips produced from bundled coniferous residues were the worst. The obtained results indicate that the best technology for obtaining high calorific value of dry wood chips (17.89-18.11 MJ/kg) with a low proportion of ash is the chipping of wood residues collected directly from the forest surface or from previously prepared piles. The least advantageous technology is the bundling of residues and their storage for several months (16.29 MJ/kg).

### KEY WORDS

forest biomass, forest residues, composition of chips, share of ash, forest chips

### ADDRESSES

Arkadiusz Gendek <sup>(1)</sup> – e-mail: arkadiusz\_gendek@sggw.pl

Jan Malaták <sup>(2)</sup> – e-mail: malatak@tf.czu.cz

Jan Velebil <sup>(2)</sup> – e-mail: velebil@tf.czu.cz

<sup>(1)</sup> Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa

<sup>(2)</sup> Wydział Techniczny, Czeski Uniwersytet Rolniczy w Pradze; Kamycka 129, 165 21 Praha 6 Suchbát

## Wstęp

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na biomasę leśną i obowiązkiem wywiązywania się z zapisanych w dyrektywach unijnych norm produkcji zielonej energii stosuje się w polskim leśnictwie dedykowane technologie pozyskiwania biomasy leśnej na cele energetyczne. Jak podają Grilli i in. [2015], obecne technologie wykorzystania biomasy leśnej oraz przetwarzania jej na energię cieplną i elektryczną należą do najbardziej przyjaznych środowisku. Biomasę leśną przeznaczaną do pro-

dukcji energii są pozostałości zrębowe, które przetwarzają się do postaci zrębków. Ze względu na strukturę gatunkową są to głównie zrębki z gatunków iglastych – sosny i świerka, jednak stosując w gospodarce leśnej tzw. zarządzanie adaptacyjne, obejmujące m.in. różnicowanie składu gatunkowego [Zajączkowski i in. 2013], można się spodziewać w przyszłości większego udziału gatunków liściastych. Produkcja zrębków z pozostałości zrębowych ma określone mankamenty, do których należy zaliczyć m.in. duży udział części zielonych oraz wysoki stopień zanieczyszczenia. Czynniki te będą w konsekwencji wpływały na jakość zrębków, jak również na proces spalania w zakładach energetycznych.

Właściwości fizyczne, energetyczne i skład chemiczny zrębków z pozostałości zrębowych zależą od wielu czynników, takich jak miejsce powstawania użytych do produkcji surowców oraz warunki i parametry technologiczne prowadzonego procesu produkcji. Ważnym czynnikiem z punktu widzenia zanieczyszczenia zrębków leśnych jest technologia pozyskiwania biomasy przeznaczonej na zrębki, istotne jest też doświadczenie operatora. W trzech podstawowych technologiach zrębkowania pozostałości zrębowe mogą być rozdrabniane bezpośrednio na powierzchni leśnej, mogą być zebrane z powierzchni i ułożone w stosach przy drodze leśnej, gdzie są rozdrabniane, lub mogą być pakietowane (balotowane), a rozdrabnianie pakietów wykonywane jest na placu u odbiorcy [Gendek, Zychowicz 2006; Stampfer, Kanzian 2006; Yoshioka i in. 2006; Zychowicz, Gendek 2009; Eker 2011; Gendek, Nurek 2012; Röser i in. 2012; Moskalik 2013; Moskalik i in. 2016; Zychowicz i in. 2016]. Modyfikacją technologii balotowania może być zrywka pozostałości i składowanie ich przy drodze wywozowej [Spinelli i in. 2012]. We wszystkich przypadkach pozostałości zrębowe mają kontakt z glebą. Ważne jest zatem doświadczenie operatora maszyny, który podejmując pozostałości, nie powinien zagłębiać chwytaka w glebę, żeby nie przetranszować zanieczyszczeń mineralnych (głównie piachu) do gardzieli rębarki.

Jednym z parametrów, które brane są pod uwagę przy ocenie jakości zrębków leśnych przez zakłady energetyczne, jest zawartość popiołu. Jak podają Hałuzo i Musiał [2004], zawartość popiołu w zrębkach, w zależności od tego, z jakiej części drzewa pochodzą, mieści się w granicach 0,5-3%. Gendek i Nurek [2016] na podstawie danych rzeczywistych dotyczących dostaw zrębków do zakładu energetycznego podają, że średni udział popiołu w zrębkach leśnych wynosi 3-4%. W rozpatrywanym przez nich przypadku zakład energetyczny stosuje własne kryteria, według których udział popiołu nie powinien przekraczać 5%, jednak w około 11,5% przypadków wszystkich dostaw do zakładu wartość ta zostaje przekroczona.

Wielu badaczy zajmowało się określeniem właściwości energetycznych biomasy różnej postaci i jej składem elementarnym. Analizy te dotyczyły jednak głównie czystego drewna, odpadów drzewnych [Barontini i in. 2014; Zhao i in. 2014; Sulaiman i in. 2017] czy innego rodzaju biomasy, również tej przetworzonej do postaci paliw uszlachetnionych [Malaták i in. 2008, 2013; Malaták, Passian 2011; Chandrasekaran i in. 2012]. Wiele jest też publikacji dotyczących jakości [Mendel i in. 2016] i rozkładu wielkości cząstek zrębków [Suadicani, Gamborg 1999; Nati i in. 2010]. Niewiele jest jednak badań dotyczących składu zrębków i udziału w nich poszczególnych elementów, takich jak drewno, kora, części zielone czy zanieczyszczenia [Gendek, Zychowicz 2015].

Celem pracy było określenie udziału poszczególnych składowych zrębków leśnych o różnym składzie gatunkowym, określenie wartości opałowej oraz udziału popiołu (jako jednego z kryteriów oceny jakości zrębków leśnych) i odniesienie ich do technologii pozyskania.

## **Materiał i metody**

Materiał badawczy stanowiły cztery grupy zrębków wyprodukowane w różnych technologiach. Wszystkie pozostałości rozdrabniane były tą samą rębarką Bruks 805CT. Pozyskanie prowa-

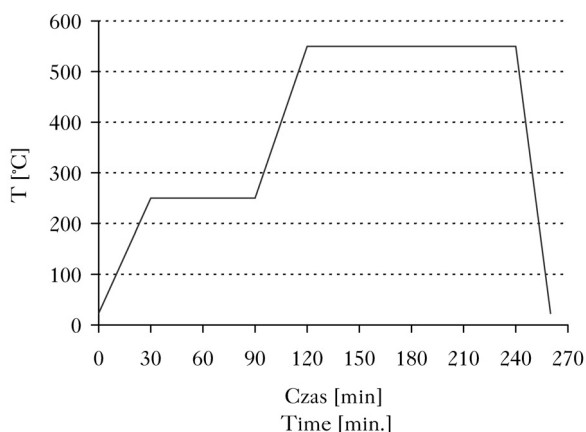
dzone było w drzewostanach rębnych i przedrębnych na terenie nadleśnictw zlokalizowanych w północno-wschodniej części kraju.

Grupę pierwszą (Zrębki 1) stanowiły zrębki z rozdrobnionych sosnowych odpadów tartacznych, w składzie których były zrżyny z drewna średnio- i wielkowymiarowego. Grupa druga (Zrębki 2) to zrębki wytworzone na powierzchni zrębu zupełnego przez rozdrabnianie sosnowych pozostałości zrębowych, w skład których wchodziły gałęzie z igłami, wierzchołki drzew i niewymiarowe kawałki drewna okrągłego. Pozostałości zbierane były forwarderem z powierzchni leśnej i układane w stopy przy drodze wywozowej, gdzie następowało zrębkowanie. Trzecia grupa (Zrębki 3) to zrębki z pozostałości po cięciach pielęgnacyjnych. W ich składzie znajdowały się gałęzie i wierzchołki drzew, jak również krzewy. Skład zrębków był wielogatunkowy, z dużym udziałem gatunków liściastych. Zrębkowanie odbywało się na powierzchni leśnej, a rębarka przemieszczała się po wyznaczonych szlakach technologicznych. Do ostatniej, czwartej grupy (Zrębki 4) należały zrębki z rozdrobnionych pakietów świerkowych. W tej technologii pozostałości po usunięciu drzewostanu świerkowego (gałęzie, wierzchołki drzew) były pakietowane na powierzchni leśnej. Przygotowane pakiety (baloty) były zrywane do drogi wywozowej, a następnie transportowane na plac do odbiorcy. W grupie pierwszej zrębkowanie odbywało się po około 2 miesiącach od dostarczenia zrżynów z tartaku na plac odbiorcy. W drugiej i trzeciej grupie rozdrabnianie wykonywano około 4 miesiące po pozyskaniu. W grupie czwartej rozdrabnianie pakietów prowadzono po około 8 miesiącach sezonowania ich na placu odbiorcy.

Dla każdej grupy zrębków pobrano losowo po około 100 litrów zrębków z różnych miejsc stosu. Zostały one poddane procesowi naturalnego suszenia przez 4 miesiące w pomieszczeniu o stałej temperaturze 22-25°C, do wilgotności 10-12%. Po okresie suszenia z każdego rodzaju zrębków pobrano losowo 10 próbek o objętości około 1,5-2 litra każda.

Wszystkie próbki były ręczne segregowane na składowe charakterystyczne dla danej grupy zrębków. Elementy, które zostały wyodrębnione przy segregacji, to: drewno czyste bez widocznych fragmentów przylegającej do niego kory, drewno z korą (cząstki drewna, do których przylegała kora), kora (czysta kora bez widocznych przylegających cząstek drewna), igły/liście oraz inne zanieczyszczenia. Do określenia masy użyto wagi laboratoryjnej o dokładności 0,01 g.

Zawartość popiołu określona została metodą spopielenia w piecu muflowym w oparciu o normę ISO 18122:2015. Przyjęta metoda została opisana przez Martinka i in. [2017]. Program termiczny oznaczania zawartości popiołu przedstawiono na rycinie 1. Dla każdego rodzaju materiału przygotowano 8 próbek, których masę określono na wadze laboratoryjnej z dokładnością



Ryc. 1.

Program termiczny pieca muflowego do oznaczania popiołu  
Thermal programme of ash content determination

do 0,00001 g. Zawartość popiołu wyznaczono dla wchodzących w skład zrębków leśnych cząstek czystego drewna, drewna z korą, kory i igliwia. Nie określano zawartości popiołu dla „innych” cząstek – głównie zanieczyszczeń mineralnych – wyodrębnionych ze składu zrębków. Pomiar ciepła spalania i obliczenie wartości opałowej wykonano metodą kalorymetryczną zgodnie z normą PN-ISO 1928:2002. Reprezentatywna grupa zrębków z każdej grupy została rozdrobiona do cząstek o wymiarach poniżej 1 mm, a następnie wysuszona w suszarce laboratoryjnej SLW 115 TOP do uzyskania suchej substancji. Zastosowano procedurę pomiaru ciepła spalania i obliczenia wartości opałowej opisaną przez Gendka i Zychowicza [2014].

## Wyniki i dyskusja

Gendek i Nurek [2016] podają, że wartość opałowa zrębków leśnych o wilgotności 28-47% zawiera się w granicach 9-13 MJ/kg, a dla suchej substancji wynosi około 19-19,5 MJ/kg. Zhao i in. [2014] stwierdzili, że wartość opałowa jest różna dla poszczególnych elementów drzewa (drewno z pnia, gałęzie, liście/igliwie) – mieści się w granicach 18,9-20,6 MJ/kg. Z kolei Barontini i in. [2014] stwierdzili, że po okresie przechowywania zrębków iglastych w stosach ich wartość opałowa wynosi około 16 MJ/kg.

W przypadku uzyskanych wyników dla czterech grup zrębków (tab. 1) najwyższą wartość opałową zanotowano dla Zrębków 1 i jest ona najbardziej zbliżona do wartości podawanych przez Gendka i Nurka [2016] oraz Zhao i in. [2014]. W tym przypadku zrębki miały największy udział czystego drewna, niewielki udział zanieczyszczeń i najmniejszy udział popiołu (tab. 2, 3; ryc. 2). Nieco niższą wartość miały Zrębki 2 i Zrębki 3, dla których wykazano brak statystycznie istotnej różnicy pomiędzy średnimi. Najniższą wartość opałową zanotowano dla Zrębków 4. W tym przypadku zrębki były najbardziej zanieczyszczone (tab. 3, ryc. 2) i miały największy udział popiołu. Pakiety świerkowe przed zrębkowaniem magazynowane były przez około 8 miesięcy i po tym okresie zrębki osiągnęły wartość opałową 16,29 MJ/kg, co jest zbliżone do wartości, którą podają Barontini i in. [2014].

Na podstawie uzyskanych wyników udziału procentowego poszczególnych frakcji w zrębkach można stwierdzić, że czyste drewno, drewno z przylegającą do niego korą oraz kora występowały we wszystkich grupach (tab. 2). Zgodnie z oczekiwaniami igliwie występowało tylko w zrębkach nr 2 i 4, gdzie zrębkowane były pozostałości sosnowe i świerkowe. Zanieczyszczenia oznaczone jako „inne” (głównie piach) nie wystąpiły tylko w Zrębkach 3.

Za najlepsze pod względem udziału czystego drewna (82,6%) należy uznać Zrębki 1, w których materiałem bazowym do rozdrabniania były zrżyny z drewna okrągłego. Udział drewna w odpadach z przemysłu, do których zalicza się zrżyny tartaczne, powinien wynosić powyżej 50%

Tabela 1.

Minimum (Min), maksimum (Max), średnia (M), odchylenie standardowe (SD), błąd standardowy (SE) wartości opałowej [MJ/kg] suchych zrębków pozyskanych w różnych technologiach

Minimum (Min), maximum (Max), mean (M), standard deviation (SD), standard error (SE) for calorific value [MJ/kg] of dry chips harvested in different ways

	Min	Max	M ±SD	CI	SE	df	MSE
Zrębki 1	18,11	19,49	18,83 ±0,47a	18,49	19,17	36	0,25
Zrębki 2	17,79	18,61	18,11 ±0,25b	17,93	18,29		
Zrębki 3	17,25	18,36	17,89 ±0,39b	17,61	18,17		
Zrębki 4	15,02	17,35	16,29 ±0,75c	15,75	16,83		

te same litery oznaczają grupy jednorodnie; the same letters indicate homogenous groups (p=0.05)

CI – dolna i górna granica 95-procentowego przedziału ufności dla średniej, MSE – błąd średniokwadratowy

CI – lower and upper end of 95% confidence interval for the mean, MSE – mean root error

Tabela 2.

Minimum (Min), maksimum (Max), średnia (M), odchylenie standardowe (SD), błąd standardowy (SE) udziału [%] frakcji w poszczególnych grupach zrębków

Minimum (Min), maximum (Max), mean (M), standard deviation (SD), standard error (SE) for share [%] of fractions in the selected groups of chips

		Min	Max	M ±SD	CI	SE	df	MSE
Drewno Wood	Zrębki 1	80,40	84,10	82,64 ±1,07a	81,87	83,41	36	2,22
	Zrębki 2	39,80	42,70	41,56 ±0,97b	40,86	42,26		
	Zrębki 3	38,20	44,30	40,54 ±1,71b	39,32	41,76		
	Zrębki 4	50,30	56,30	54,29 ±1,97c	52,88	55,70		
Drewno z korą Wood with bark	Zrębki 1	9,60	11,50	10,23 ±0,54a	9,85	10,61	36	1,76
	Zrębki 2	46,20	50,40	48,80 ±1,17b	47,96	49,64		
	Zrębki 3	53,10	57,20	55,72 ±1,27c	54,81	56,63		
	Zrębki 4	31,20	37,10	33,12 ±1,94d	31,73	34,51		
Kora Bark	Zrębki 1	5,20	7,70	6,52 ±0,80a	5,95	7,09	36	0,31
	Zrębki 2	3,50	4,30	3,83 ±0,24b	3,66	4,00		
	Zrębki 3	2,60	4,70	3,74 ±0,64b	3,28	4,20		
	Zrębki 4	8,40	9,50	8,87 ±0,39c	8,59	9,15		
Igliwie Needles	Zrębki 1	–	–	–	–	–	18	1,01
	Zrębki 2	3,20	7,20	5,18 ±1,37a	4,20	6,16		
	Zrębki 3	–	–	–	–	–		
	Zrębki 4	1,80	3,10	2,19 ±0,38b	1,92	2,46		
Inne Other	Zrębki 1	0,40	0,80	0,61 ±0,13a	0,52	0,70	27	0,02
	Zrębki 2	0,40	0,90	0,63 ±0,14a	0,53	0,73		
	Zrębki 3	–	–	–	–	–		
	Zrębki 4	1,40	1,90	1,63 ±0,15b	1,52	1,74		

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

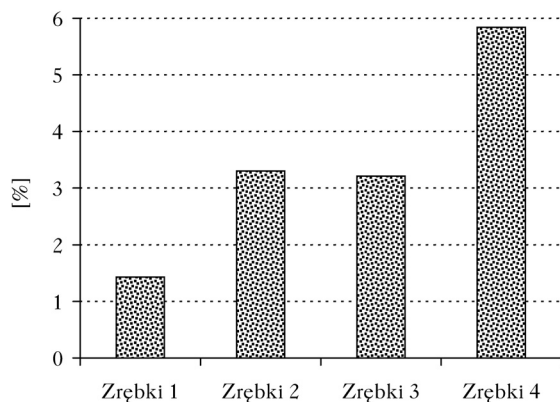
Tabela 3.

Minimum (Min), maksimum (Max), średnia (M), odchylenie standardowe (SD), błąd standardowy (SE) zawartość popiołu [%] we frakcjach w poszczególnych grupach zrębków

Minimum (Min), maximum (Max), mean (M), standard deviation (SD), standard error (SE) for ash content [%] in fractions in the selected groups of chips

		Min	Max	M ±SD	CI	SE	df	MSE
Drewno Wood	Zrębki 1	0,92	1,54	1,14 ±0,22a	0,96	1,32	28	0,06
	Zrębki 2	0,69	1,05	0,86 ±0,14b	0,74	0,97		
	Zrębki 3	0,89	1,32	1,04 ±0,15ab	0,91	1,17		
	Zrębki 4	3,36	4,51	3,94 ±0,40c	3,60	4,27		
Drewno z korą Wood with bark	Zrębki 1	1,38	1,63	1,49 ±0,09a	1,41	1,56	28	0,57
	Zrębki 2	4,37	5,98	5,35 ±0,50b	4,93	5,77		
	Zrębki 3	3,95	5,06	4,45 ±0,37c	4,14	4,76		
	Zrębki 4	5,32	9,46	7,59 ±1,37d	6,45	8,73		
Kora Bark	Zrębki 1	4,76	5,59	5,16 ±0,26a	4,94	5,38	28	0,27
	Zrębki 2	5,03	6,68	5,99 ±0,48b	5,60	6,39		
	Zrębki 3	7,18	9,35	8,22 ±0,67c	7,66	8,78		
	Zrębki 4	10,31	12,28	11,40 ±0,57d	10,92	11,87		
Igliwie	Zrębki 1	–	–	–	–	–	14	0,06
	Zrębki 2	2,53	2,94	2,68 ±0,12a	2,57	2,78		
	Zrębki 3	–	–	–	–	–		
	Zrębki 4	7,63	8,74	8,15 ±0,33b	7,87	8,43		

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1



**Ryc. 2.**  
Średnia zawartość popiołu w grupach zrębków  
Mean ash content in groups of chips

[Altholzverordnung 2002; Kurowska 2016]. Stosunkowo dużo drewna (54,3%) było w rozdrobnionych pakietach świerkowych (Zrębki 4). Najmniejszy udział czystego drewna zanotowano dla Zrębków 2 (41,4%) i Zrębków 3 (40,5%), przy czym analiza ANOVA wykazała, że średni udział drewna w tych dwóch grupach nie różnił się od siebie w sposób statystycznie istotny.

Duży udział w składzie zrębków 2 i Zrębków 3 miało drewno z kawałkami kory – odpowiednio 48,8 i 55,7%. Najmniejszy udział (10,2%) zanotowano dla Zrębków 1 pochodzących z odpadów tartacznych. Biorąc jednak pod uwagę, że czyste drewno, jak również drewno z przylegającą do niego korą stanowią dobry materiał energetyczny, sumaryczny udział w poszczególnych grupach wynosi powyżej 87% (Zrębki 1 – 92,8%; Zrębki 2 – 90,4%; Zrębki 3 – 96,2%, Zrębki 4 – 87,4%).

Udział kory w poszczególnych grupach zawierał się w granicach od 3,7% dla Zrębków 3 do 8,9% dla Zrębków 4. Największy udział kory w Zrębkach 4 można tłumaczyć tym, że pakiety z pozostałościami zrębowymi były sezonowane przez około 8 miesięcy i w tym czasie pod wpływem skurczu drewna kora w sposób naturalny oddzielała się od drewna, a dynamiczny przebieg zrębkowania dodatkowo wzmacniał ten proces. Z kolei najmniejszy udział kory w Zrębkach 3 jest wynikiem rozdrabniania stosunkowo wilgotnych, cienkich i elastycznych pozostałości, głównie liściastych.

Igliwie występujące w Zrębkach 2 oraz w Zrębkach 4 ma niewielki udział w ogólnej masie zrębków – odpowiednio 5,2 i 2,2%. Mniejszy udział igliwia świerkowego związany jest z tym, że w technologii pakietowania pozostałości zrębowych następuje w czasie ich sezonowania naturalne zmniejszanie wilgotności materiału i igliwie samoczynnie odpada, a w czasie operacji przeładunkowych jest dodatkowo wytrąsane. Pewnym zaskoczeniem jest fakt, że w Zrębkach 3 pochodzących z rozdrobnienia wielogatunkowych pozostałości z dużym udziałem gatunków liściastych nie znalazły się części zielone. Można to tłumaczyć tym, że zrębkowanie było prowadzone w okresie jesienno-zimowym, kiedy drzewa są pozbawione liści.

Ostatnią składową zrębków były zanieczyszczenia, które występowały w trzech grupach (Zrębki 1, 2 i 4). Ich udział zawierał się w granicach od 0,6 do 1,6% i był to głównie piach, który dostaje się do zrębków podczas pobierania pozostałości (Zrębki 2 i Zrębki 4), gdy operator zagłębia chwytak w glebę. W przypadku Zrębków 1 (odpady tartaczne) piach najczęściej pochodzi z zanieczyszczonej kory. W Zrębkach 3 nie stwierdzono zanieczyszczeń mineralnych.

Średni udział popiołu (tab. 3) w czystym drewnie zrębków leśnych zawierał się w granicach 0,86-3,94%. Przeprowadzona analiza statystyczna pozwoliła na wyodrębnienie trzech grup jednorodnych. Pierwszą grupę stanowią Zrębki 1 wytworzone z odpadów tartacznych i Zrębki 3

z wielogatunkowych pozostałości zrębowych. Do drugiej grupy zaliczone zostały Zrębki 2 z sosnowych pozostałości zrębowych i Zrębki 3. Średnia zawartość popiołu w Zrębkach 4 statystycznie różni się od pozostałych grup. Zawartość popiołu w czystym drewnie Zrębków 1, Zrębków 2 i Zrębków 3 jest zbliżona do podawanej przez Friedla i in. [2005] zawartości popiołu w drewnie i jego odpadach (1,5-2,9%) oraz zawartości podawanej przez Munalula i Meicken [2009] dla drewna różnych gatunków (0,34-2,79%). Zrębki 4 miały znacznie wyższy udział popiołu w stosunku do pozostałych. Wartość ta odpowiada zawartości popiołu w zrębkach leśnych określonej przez Gendka i Nurka [2016] (3-4%).

Stwierdzono większy udział zawartości popiołu we wszystkich grupach zrębków dla drewna z korą i samej kory. Najmniejszy wzrost zawartości popiołu w stosunku do czystego drewna (0,35%) odnotowano w drewnie z korą dla Zrębków 1. Wynika to z faktu, że pojedyncze zrębki cechował duży udział drewna w stosunku do przylegającej do niej kory oraz tego, że w korze nie było zanieczyszczeń mineralnych. W pozostałych grupach zrębków dla drewna z korą i kory zawartość popiołu mieści się w przedziale 4,45-7,59% i jest zbliżona do granicy maksymalnej dopuszczalnej zawartości popiołu określonej przez zakład energetyczny [Gendek, Nurek 2016]. Oznacza to, że te frakcje są najprawdopodobniej zanieczyszczone cząstkami mineralnymi.

Zawartość popiołu w igliwiu sosnowym (Zrębki 2), wynosząca 2,68%, jest niższa niż podawana dla igieł (4,5%) przez Fonta i in. [2009]. Z kolei zawartość popiołu w igłach z grupy Zrębki 4, wynosząca 8,15%, znacznie przekracza tę wartość.

Analizując zawartość popiołu we wszystkich składowych zrębków leśnych (drewno, drewno z korą, kora, igliwie), można zauważyć, że największy udział odnotowano dla Zrębków 4 wykonanych z rozdrobnionych pakietów świerkowych. Ma to związek z największym zanieczyszczeniem tych zrębków, na co wskazuje największy udział (1,6%) zanieczyszczeń mineralnych (tab. 2).

Najniższą średnią zawartość popiołu zanotowano dla Zrębków 1 (ryc. 2). Pokrywa się to z danymi literaturowymi dotyczącymi zawartości popiołu dla drewna różnych gatunków, mieszczącej się w granicach 0,5-3% [Hałuzo, Musiał 2004]. Zawartość popiołu dla Zrębków 2 i Zrębków 3 jest zgodna z zakresem, który podają Barontini i in. [2014] – 2,7-3,7%. Z kolei średnia zawartość popiołu w Zrębkach 4 (5,84%) przekracza wartości literaturowe oraz jest wyższa niż dopuszczalna graniczna wartość rozliczeniowa określona przez zakład energetyczny [Gendek, Nurek 2016].

Wyznaczono równanie opisujące zależność między zawartością popiołu w suchych zrębkach a wartością opałową:

$$Q_{op} = -0,691 \cdot A + 19,8948$$

gdzie:

$Q_{op}$  – wartość opałowa [MJ/kg],

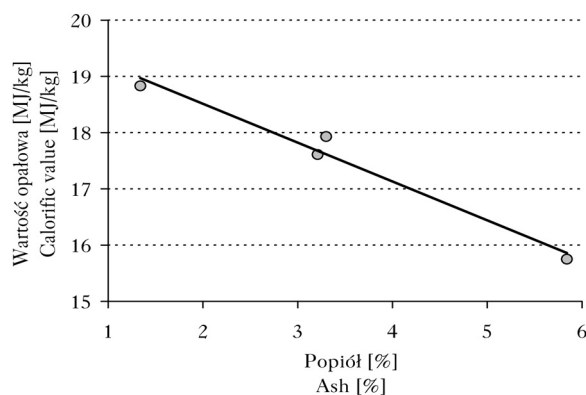
$A$  – zawartość popiołu [%].

Wysoka wartość współczynnika determinacji ( $r^2=0,9731$ ) i współczynnika korelacji ( $r=-0,9865$ ) wskazują na dobre dopasowanie równania regresji liniowej i istotną zależność tych zmiennych (ryc. 3).

## Podsumowanie

Rozpatrując poszczególne technologie wytwarzania zrębków, można stwierdzić, że z energetycznego punktu widzenia najkorzystniejsze jest zrębkowanie odpadów tartacznych. Mają one największy udział czystego drewna, najwyższą wartość opałową i najniższą średnią zawartość popiołu. Jest to związane z tym, że w wielu przypadkach przed umieszczeniem drewna okrągłego w traku jest ono korowane. Technologii tej nie można jednak uznać za typowo leśną, ponieważ rzrzyny





Ryc. 3.

Wartość opałowa zrębków w zależności od zawartości popiołu  
 Net calorific value of wood chips depending on ash content

tartaczne należy klasyfikować jako odpady z przemysłu drzewnego, a nie bezpośrednio z leśnictwa. Zrębkowaniu poddawany jest więc produkt częściowo przetworzony.

W pozostałych przypadkach – związanych bezpośrednio z uprzęciem powierzchni leśnych i rozdrabnianiem pozostałości zrębowych – najlepsze są technologie, w których zrębkowanie pozostałości zrębowych odbywa się bezpośrednio w lesie: zarówno na powierzchni leśnej (Zrębki 2), jak i po wcześniejszym ułożeniu pozostałości w stosach (Zrębki 3). W tych technologiach wytworzone zrębki mają stosunkowo wysoką średnią wartość opałową (17,89-18,11 MJ/kg) oraz stosunkowo niewielką, odpowiadającą danym literaturowym zawartość popiołu (3,21-3,30%), która wynika z ilości zanieczyszczeń i udziału poszczególnych frakcji.

Najmniej korzystna jest technologia pakietowania pozostałości zrębowych, magazynowania ich przez okres kilku miesięcy i rozdrabniania pakietów przed transportem zrębków do odbiorcy. W tym przypadku kontakt z powierzchnią leśną mają zarówno pozostałości zrębowe, jak również wytworzone z nich pakiety. Przepuszczalnie zanieczyszczenia mineralne, które zostały przeniesione do głowicy pakieciarki w czasie podawania gałęzi, pozostają w pakietach do momentu ich rozdrabniania, przez co występuje w nich duża zawartość popiołu (średnio 5,84%). Popiół, jak również deprecjacja drewna w czasie jego magazynowania przyczyniają się do obniżenia wartości opałowej.

We wszystkich technologiach związanych z usuwaniem pozostałości zrębowych z powierzchni leśnych należy zwracać uwagę na pracę operatora. Podstawową przyczyną zanieczyszczenia zrębków jest zagłębianie chwytaka w glebę podczas podejmowania gałęzi i tym samym przeniesienie zanieczyszczeń mineralnych do rębarki czy też pakieciarki.

## Literatura

- Altholzverordnung (Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz) vom 15 August 2002. 2002. BGBl I 2002, 3302.
- Barontini M., Scarfone A., Spinelli R., Gallucci F., Santangelo E., Acampora A., Jirjis R., Civitarese V., Pari L. 2014. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass Bioenergy* 62: 17-25. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.01.022.
- Chandrasekaran S., Hopke P., Rector L., Allen G., Lin L. 2012. Chemical composition of wood chips and wood pellets. *Energy & Fuel*. 26 (8): 4932-4937. DOI: 10.1021/ef300884k.
- Eker M. 2011. Assessment of procurement systems for unutilized logging residues for Britian pine forest of Turkey. *African Journal of Biotechnology* 10 (13): 2455-2468. DOI: 10.5897/AJB10.2059.
- Font R., Conesa J. A., Molto J., Muñoz M. 2009. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 85 (1-2): 276-286. DOI: 10.1016/j.jaap.2008.11.015.
- Friedl A., Padouvas E., Rotter H., Varmuza K. 2005. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta* 544: 191-198. DOI 10.1016/j.aca.2005.01.041.



- Gendek A., Nurek T. 2012. Wykorzystanie pakietu Witness do modelowania przebiegu procesów produkcyjnych w leśnictwie. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 2: 17-20.
- Gendek A., Nurek T. 2016. Variability of energy woodchips and their economic effects. *Folia Forestalia Polonica A* 58 (2): 62-71. DOI: 10.1515/ffp-2016-0007.
- Gendek A., Zychowicz W. 2006. Pozyskiwanie odpadów zrębowych na cele energetyczne w postaci pakietów. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 11: 19-21.
- Gendek A., Zychowicz W. 2014. Investigations on the calorific value of forest chips. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 63: 65-72.
- Gendek A., Zychowicz W. 2015. Analysis of wood chippings fractions utilized for energy purposes. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture* 65: 79-91.
- Grilli G., Garegnani G., Poljanec A., Ficko A., Vettorato D., De Meo I., Paletto A. 2015. Stakeholder analysis in the biomass energy development based on the experts' opinions: the example of Triglav National Park in Slovenia. *Folia Forestalia Polonica A* 57 (3): 173-186. DOI: 10.1515/ffp-2015-0017.
- Hafuzo M., Musiał R. 2004. Ocena zasobów i potencjalnych możliwości pozyskania surowców dla energetyki odnawialnej w województwie pomorskim. *Biuro Planowania Przestrzennego w Słupsku*.
- ISO 18122:2015. Solid biofuels: determination of ash content. International Organization for Standardization, Geneva.
- Kurowska A. 2016. Struktura podaży odpadów drzewnych w Polsce. *Sylwan* 160 (3): 187-196.
- Malaćák J., Bradna J., Kučera M., Černý D., Passian L. 2013. Analysis of selected wood biofuels and evaluation of their thermal emission properties. W: Conference Proceeding – 5<sup>th</sup> International Conference, TAE 2013: Trends in Agricultural Engineering 2013. 402-408.
- Malaćák J., Gurdil G. A., Jevic P., Selvi K. Ç. 2008. Biomass heat-emission characteristics of energy. Biomass heat-emission characteristics of energy plants. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 38 (4): 9-13.
- Malaćák J., Passian L. 2011. Heat-emission analysis of small combustion equipments for biomass. *Research in Agricultural Engineering* 57 (2): 37-50.
- Martinka J., Martinka F., Rantuch P., Hrušovský I., Blinová L., Balog K. 2017. Calorific value and fire risk of selected fast-growing wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. DOI: 10.1007/s10973-017-6660-2.
- Mendel T., Kuptz D., Hartmann H. 2016. Fuel quality changes and dry matter losses during the storage of wood chips. Part 2. Container trials to examine the effects of fuel screening. W: Gendek A., Moskalik T. [red.]. From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering. Proceedings and Abstracts of the 49<sup>th</sup> Symposium on Forest Mechanization. Warsaw, Poland. 139-143.
- Moskalik T. 2013. Techniczne, technologiczne i organizacyjne uwarunkowania pozyskania i transportu drewna energetycznego. W: Gołos P., Kaliszewski A. [red.]. *Biomasa leśna na cele energetyczne*. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary. 107-118.
- Moskalik T., Sadowski J., Zastocki D. 2016. Wybrane technologiczne i ekonomiczne aspekty balotowania pozostałości po zrębowych. *Sylwan* 160 (1): 31-39.
- Munalula F., Meincken M. 2009. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. *Biomass Bioenergy* 33 (3): 415-420. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.011.
- Nati C., Spinelli R., Fabbri P. 2010. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy* 34 (5): 583-587. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.01.005.
- PN-ISO1928:2002. Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metoda spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Röser D., Mola-Yudego B., Prinz R., Emer B., Sikanen L. 2012. Chipping Operations and Efficiency in Different Operational Environments. *Silva Fennica* 46 (2): 275-286.
- Spinelli R., Magagnotti N., Picchi G. 2012. A supply chain evaluation of slash bundling under the conditions of mountain forestry. *Biomass and Bioenergy* 36: 339-345. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.11.001.
- Stampfer K., Kanzian C. 2006. Current state and possibilities of wood chip supply chains in Austria. *Croatian Journal of Forest Engineering* 27 (2): 135-145.
- Suadicani K., Gamborg C. 1999. Fuel quality of whole-tree chips from freshly felled and summer dried Norway spruce on a poor sandy soil and a rich loamy soil. *Biomass and Bioenergy* 17 (3): 199-208. DOI: 10.1016/S0961-9534(99)00039-2.
- Sulaiman S. A., Roslan R., Inayat M., Naz M. Y. 2017. Effect of blending ratio and catalyst loading on co-gasification of wood chips and coconut waste. *Journal of the Energy Institute*. Available online 13 May 2017 1-7. DOI: 10.1016/j.joei.2017.05.003.
- Yoshioka T., Aruga K., Nitami T., Sakai H., Kobayashi H. 2006. A case study on the cost and the fuel consumption of harvesting transporting and chipping chains for logging residues in Japan. *Biomass and Bioenergy* 30 (4): 342-348. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.07.013.
- Zajączkowski J., Brzeziecki B., Perzanowski K., Kozak I. 2013. Wpływ potencjalnych zmian klimatycznych na zdolność konkurencyjną głównych gatunków drzew w Polsce. *Sylwan* 157 (4): 253-261.
- Zhao D., Kane M., Teskey R., Markewitz D., Greene D., Borders B. 2014. Impact of management on nutrients, carbon, and energy in aboveground biomass components of mid-rotation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *Annals of Forest Science* 71 (8): 843-851. DOI: 10.1007/s13595-014-0384-2.

- Zychowicz W., Gendek A. 2009.** Efektywność stosowania samobieżnej rębarki z zasobnikiem do pozyskiwania zrębków na cele energetyczne. Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji rolniczej i leśnej. Konferencja KMRIL, Warszawa. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 543: 417-425.
- Zychowicz W., Moskalik T., Gendek A., Nurek T., Kikulski J. 2016.** Logistic analysis of wood chips procurement chain from forest to power industry plants. W: Gendek A., Moskalik T. [red.]. From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering. Proceedings and Abstracts of the 49<sup>th</sup> Symposium on Forest Mechanization. Warsaw, Poland. 169-170.