

## WPLYW TEMPERATURY WYGRZEWANIA PELETÓW SOSNOWYCH NA ICH WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE

*Marek Rynkiewicz*

*Katedra Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zależność wytrzymałości mechanicznej, długości, średnicy i pęknięć peletów, od temperatury ich wygrzewania. Badane pelety zostały wytworzone z trocin sosnowych w matrycy pelecarki o średnicy otworów 6 mm. Badania polegały na wygrzewaniu peletów w temperaturze od 20 do 70°C ze skokiem co 10°C. Maksymalną wartość średniej wytrzymałości mechanicznej (97,59%) uzyskano w temperaturze 30°C, natomiast średnią wartość minimalną (96,99%) uzyskały pelety wygrzane w temperaturze 70°C. Przeprowadzona analiza statystyczna nie wykazała statystycznie istotnego wpływu temperatury wygrzewania peletów na wyniki wytrzymałości mechanicznej oraz ich średnice. Statystycznie istotny wpływ stwierdzono dla zależności pomiędzy temperaturą wygrzewania a długością i gęstością peletów.

**Słowa kluczowe:** biomasa, pelety, wytrzymałość mechaniczna

### Wprowadzenie

Produkcja peletów z biomasy może być realizowana przez cały rok kalendarzowy w zależności od możliwości pozyskania surowca przez producenta.

W chwili obecnej obowiązują normy europejskie, które szczegółowo określają wymagania stawiane biopaliwom aglomerowanym, niezależnie od pory roku. Wśród parametrów fizycznych i mechanicznych norma EN 14961-6 wymienia między innymi: długość, średnicę, wytrzymałość mechaniczną i gęstość. Hejft (2002) i Tumuluru i in. (2011) twierdzą, że fizyczna i mechaniczna jakość peletów jest bardzo ważna, a w szczególności trwałość mechaniczna. Im wyższa trwałość mechaniczna, tym większa odporność na rozpadanie się peletów w trakcie transportu i dłuższy czas ich spalania. Im większa gęstość, tym więcej energii można uzyskać z danej objętości peletów. Grzybek (2005) uważa, że biomasa w najbliższym ćwierćwieczu będzie najważniejszym odnawialnym źródłem energii. Z tego

względu, że w Polsce wg składu gatunkowego lasy sosnowe zajmują 5461 tys. ha – 59,95% powierzchni lasów (GUS, 2012), to w zakładach drzewnych jest to najczęściej spotykany gatunek drewna. W trakcie procesów przetwórczych sosny powstają odpady drzewne, które z powodzeniem mogą być stosowane do produkcji aglomerowanych biopaliw łącznie z korą (Filbakk i in., 2011).

Celem badań było określenie wpływu temperatury wygrzewania peletów wytworzonych z trocin sosnowych w pelearce z matrycą o średnicy otworów 6 mm na wybrane parametry fizyczne i mechaniczne.

## Metodyka badań

Badania przeprowadzono dla peletów drzewnych, które wytwarzano z trocin sosnowych w pelearce o wydajności  $4 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ , wyposażonej w matrycę o średnicy otworów 6 mm.

Parametry fizyczne i mechaniczne określono dla peletów, które wcześniej wygrzewano w suszarce laboratoryjnej HZ, wyprodukowanej w Wytwórni Aparatów Termoelektrycznych w Krakowie. Proces wygrzewania dla każdej próbki peletów, po ustabilizowaniu temperatury w suszarce, był prowadzony przez 210 min. Badania przeprowadzono dla temperatur: 20, 30, 40, 50, 60 i  $70^\circ\text{C}$ .

Do pomiaru wytrzymałości mechanicznej peletów wykorzystano tester mechaniczny ZU-05, którego budowa i zasada działania jest zgodna z normą europejską EN 15210-1:2009. Z pobranej próbki peletu drzewnego o masie ok. 3 kg odsiewano rozkruszone części na sicie o średnicy otworów 3,15 mm. Następnie z peletu pozostałego na sicie przygotowano trzy próbki, każda o masie 500 g. Próbki umieszczano w komorze, którą wirowano przez 10 min z prędkością  $50 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ . Po zatrzymaniu testera próbki odsiewano na sicie o średnicy otworów 3,15 mm, a pozostałość na sicie ważono. Obliczenia wytrzymałości mechanicznej peletu drzewnego dokonano wg wzoru (1) określonego przez normę EN 15210:2009:

$$D_U = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \quad (1)$$

- $D_U$  – wytrzymałość mechaniczna peletu (%),
- $m_E$  – masa próbki laboratoryjnej badanego peletu – 500 g,
- $m_A$  – masa peletu pozostałego na sicie po próbie wytrzymałości mechanicznej (g).

Pomiar średnicy i długości peletów wykonywano zgodnie z normą EN 16127:2012. Mierzono 10 losowo wybranych peletów z próbki o masie 100 g.

Określano również liczbę peletów z pęknięciami wzdłużnymi, poprzecznymi i mieszanymi (wzdłużne i poprzeczne). Badanie polegało na losowym wybraniu 100 peletów z próbki laboratoryjnej o masie 500 g. Następnie z wyselekcjonowanej próbki wybrano pelety z widocznymi pęknięciami i podzielono je na trzy grupy, w zależności od rodzaju pęknięcia. Na podstawie liczby uszkodzonych peletów określano ich procentowy udział w danej próbce.

Gęstość peletów określono na podstawie normy EN 15150:2011. Dla 10 peletów wyznaczono gęstość na podstawie wzoru (2):

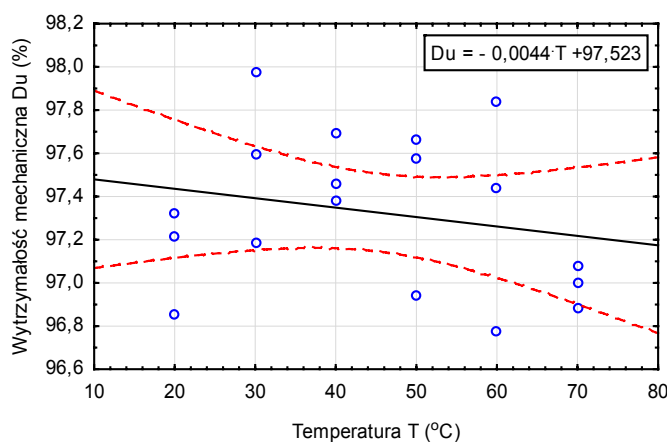
$$\rho = \frac{m}{V_p} \quad (2)$$

- $\rho$  – gęstość peletu ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  
 $m$  – masa próbki (kg),  
 $V_p$  – objętość peletu ( $\text{m}^3$ ).

Analizę statystyczną przeprowadzono za pomocą programu Statistica i Excel. Dla badanych parametrów sprawdzono ich zgodność z rozkładem normalnym. Badania rozkładu przeprowadzono testem W Shapiro-Wilka. Krytyczny poziom istotności przyjęto dla  $p=0,05$ . Istotność różnic wartości średnich w więcej niż dwóch populacjach sprawdzono analizą wariancji ANOVA. Dla parametrów o rozkładach normalnych współczynnik korelacji obliczano metodą Pearsona (Stanisz, 1998).

## Wyniki badań

Na rysunku 1 przedstawiono uzyskane wyniki badań wytrzymałości mechanicznej peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania.

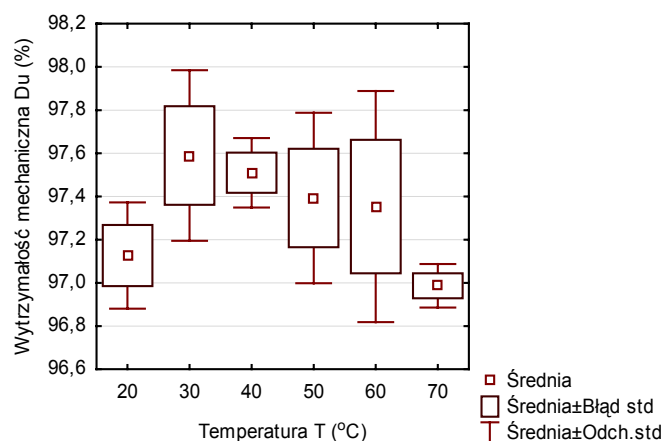


Rysunek 1. Rozrzut wytrzymałości mechanicznej peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania z prostą regresji oraz przedziałem ufności

Figure 1. Spread of mechanical strength of pellets depending on their soaking heat with a regression line and confidence interval

Dla uzyskanych wyników badań pomiędzy temperaturą a wytrzymałością mechaniczną peletów funkcja regresji przyjęła postać:  $D_u = -0,0044 \cdot T + 97,523$  i ze względu na ujemny współczynnik kierunkowy ma charakter malejący (rys. 1). Wartość współczynnika korela-

cji Pearsona pomiędzy wytrzymałością mechaniczną a temperaturą wynosi  $r = -0,2140$ , jednak jest on statystycznie nieistotny.



Rysunek 2. Średnie wartości wytrzymałości mechanicznej peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania

Figure 2. Average values of mechanical strength of pellets in relation to their soaking heat

Najmniejszą średnią wartość wytrzymałości mechanicznej uzyskano w przypadku peletów wygrzanych w temperaturze 70°C i wyniosła ona 96,99%. Wraz ze wzrostem temperatury, począwszy od 30 do 70°C, można zaobserwować spadek wytrzymałości mechanicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pelety transportowane lub przechowywane w wyższych temperaturach mogą charakteryzować się niższą wytrzymałością mechaniczną (rys. 2).

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 1 można stwierdzić, że najwyższą średnią wartość długości badanych peletów uzyskano w temperaturze 50°C (23,99 mm), natomiast najmniejszą średnią wartość długości uzyskano w temperaturze 20°C (17,66 mm). Najbardziej jednorodne długości peletów zaobserwowano w temperaturze 60°C, dla której wartość odchylenia standardowego wyniosła 4,17 mm, natomiast najbardziej zróżnicowane długości peletów były w próbce wygrzewanej w temperaturze 40°C.

Na podstawie rysunku 3 można wyróżnić dwie grupy długości peletów w zależności od temperatury wygrzewania. Do pierwszej grupy zaliczono pelety wygrzewane w temperaturach: 20, 30 i 40°C, dla których średnie długości wynosiły od 17,66 do 19,85 mm. Do drugiej grupy zaliczono pelety wygrzewane w temperaturach: 50, 60 i 70°C, dla których długości były większe niż w grupie pierwszej. Przeprowadzona analiza wariancji potwierdziła statystycznie istotne różnice średnich długości badanych peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania dla  $p = 0,0186$ .

Tabela 1

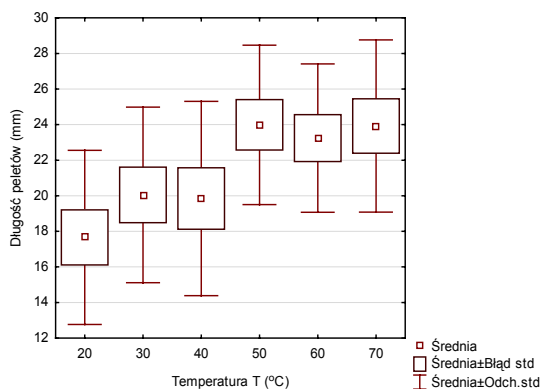
Wyniki badań długości peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania

Table 1

Research results on the length of pellets in relation to their soaking heat

Temperatura (°C)	Długość peletów (mm)			
	średnia	min.	max.	OS
20	17,66	10,26	23,56	4,89
30	20,05	12,32	26,28	4,94
40	19,85	10,83	28,88	5,46
50	23,99	17,84	31,06	4,48
60	23,24	16,34	29,56	4,17
70	23,92	16,75	32,47	4,84

OS – odchylenie standardowe



Rysunek 3. Średnie długości peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania

Figure 3. Average length of pellets in relation to their soaking heat

Tabela 2

Wyniki badań średnicy peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania

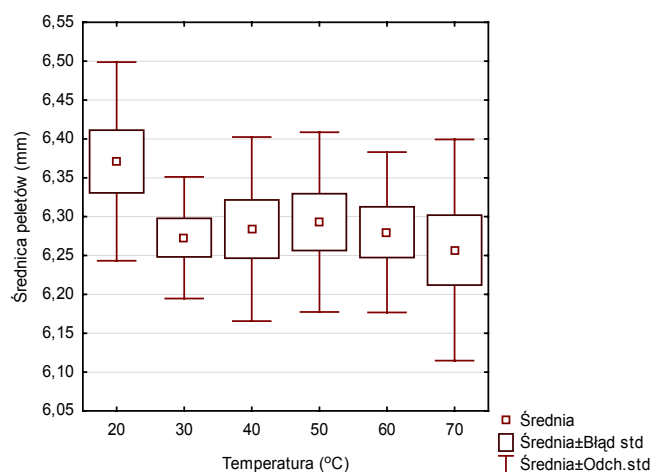
Table 2

Research results on the diameter of pellets in relation to their soaking heat

Temperatura (°C)	Średnica peletów (mm)			
	średnia	min.	max.	OS
20	6,37	6,18	6,54	0,13
30	6,27	6,14	6,41	0,08
40	6,28	6,03	6,42	0,12
50	6,29	6,12	6,47	0,12
60	6,28	6,13	6,45	0,10
70	6,26	6,00	6,49	0,14

OS – odchylenie standardowe

Na rysunku 4 przedstawiono zależności wartości średnicy peletów od temperatury ich wygrzewania. Przeprowadzona analiza statystyczna nie wykazała statystycznie istotnych różnic wartości średnich. Wartość współczynnika istotności wynosiła  $p > 0,05$ .



Rysunek 4. Uzyskane wartości średnicy peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania

Figure 4. The obtained values of diameter of pellets in relation to their soaking heat

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 3 można stwierdzić, że dla zależności pomiędzy średnicą a temperaturą peletów korelacje były zarówno ujemne, jak i dodatnie. Największą bezwzględną wartość współczynnika korelacji ( $r = -0,68$ ) stwierdzono dla peletów wygrzewanych w temperaturze 70°C, co świadczy o wysokiej korelacji ujemnej.

Tabela 3

Wartość współczynnika korelacji pomiędzy długością a średnicą w zależności od temperatury wygrzewania peletów

Table 3

The value of correlation coefficient between length and diameter in relation to the soaking heat of pellets

Temperatura (°C)	Wartość współczynnika korelacji $r$
20	0,22
30	0,3
40	-0,59
50	-0,13
60	0,01
70	-0,68

Na podstawie tabeli 4 można stwierdzić, że największym wskaźnikiem pęknięć (57%) charakteryzowały się pelety wygrzewane w temperaturze 20°C, natomiast najmniejszym pelety wygrzewane w temperaturze 60°C. Współczynnik korelacji Pearsona dla zależności pomiędzy temperaturą wygrzewania peletów a ilością pęknięć okazał się nieistotny, a jego wartość  $r = -0,2098$ .

Tabela 4

*Ilość pęknięć w zależności od temperatury wygrzewania peletów*

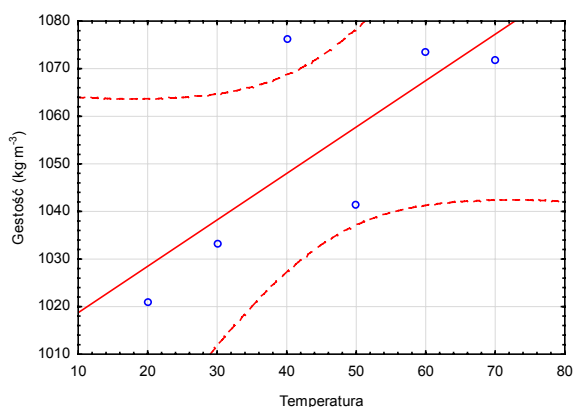
Table 4

*Number of fractures depending on the soaking heat of pellets*

Temperatura (°C)	Rodzaj pęknięć (%)			
	wzdłużne	poprzeczne	mieszane	razem
20	20	23	14	57
30	16	15	20	51
40	6	19	29	54
50	3	21	25	49
60	3	17	30	50
70	4	32	20	56

Na podstawie rysunku 5 można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury następuje wzrost gęstości peletów. Dla uzyskanych wyników funkcja regresji przyjęła postać:

$\rho = 1008,9637 + 0,9754 \cdot T$  i ze względu na dodatni współczynnik kierunkowy ma charakter rosnący. Wartość współczynnika korelacji Pearsona pomiędzy gęstością peletów a temperaturą wygrzewania uzyskała wartość  $r=0,7590$ , co świadczy o bardzo wysokiej korelacji dodatniej.



Rysunek 5. Rozrzut gęstości peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania z prostą regresji oraz przedziałem ufności

Figure 5. Spread of density of pellets depending on their soaking heat with a regression line and confidence interval

## Wnioski

1. Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania od 30 do 70°C, można zaobserwować nieznaczny spadek wytrzymałości mechanicznej badanych peletów. Świadczy o tym niska wartość współczynnika korelacji Pearsona ( $r=-0,214$ ).
2. Przeprowadzona analiza wariancji wykazała statystycznie istotne różnice w przypadku średnich wartości długości badanych peletów w zależności od temperatury ich wygrzewania, natomiast nie miała wpływu na średnie wartości ich średnic.
3. Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania peletów rosła ich gęstość z 1020,86 kg·m<sup>-3</sup> (dla 20°C) do 1071,87 kg·m<sup>-3</sup> dla (70°C), co potwierdziła analiza statystyczna ( $r=0,759$ ).
4. Zaobserwowany wskaźnik pęknięć peletów wahał się od 50 do 57%. Natomiast przeprowadzona analiza statystyczna nie wykazała statystycznie istotnej korelacji pomiędzy wskaźnikiem pęknięć a temperaturą wygrzewania.

## Literatura

- Filbakk, T.; Raida, J.; Nurmi, J.; Høibø, O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3342-3349.
- Grzybek, A. (2005). Wykorzystanie pelet jako paliwa. *Czysta Energia*, 6, 32.
- Hejft, R. (2002). *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. Wyd. ITE w Radomiu. ISBN 83-7204-251-9.
- Stanisz, A. (1998). *Przystępny kurs statystyki w oparciu o program Statistica PL*. Statsoft Polska Kraków, ISBN 83-904735-4-2.
- Tumuluru, J. S.; Sokhansanj, S.; Lim, C. J.; Bi, T.; Lau, A.; Melin, S.; Sowlati, T.; Oveisi, E. (2011). Quality of wood pellets produced in British Columbia for export. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(6), 1013-1020.
- EN 14961-2:2011. *Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use*.
- EN 15150:2011. *Solid biofuels – Determination of particle density*.
- EN 15210-1:2009. *Solid biofuels – Determination of mechanical of pellets and briquettes – Part 1: Pellets*.
- EN 16127:2012. *Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets*.
- Główny Urząd Statystyczny. (2012). *Leśnictwo 2012*. ISSN 1230-574X. Pozyskano z: [http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/rl\\_lesnictwo\\_2012.pdf](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/rl_lesnictwo_2012.pdf)



## IMPACT OF SOAKING HEAT OF PINE TREE SAWDUST ON THEIR SELECTED PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

**Abstract.** The paper presents a relation between mechanical strength, length, diameter and pellets fractures and their soaking heat. The researched pellets were produced of pine tree sawdust in the pelleting machine matrix of 6- mm diameter openings. The research consisted in soaking pellets in the temperature from 20 to 70°C with a jump every 10°C. The maximum value of the average mechanical strength (97.59%) was obtained in the temperature of 30°C while the average minimum value (96.99%) was obtained by pellets fired in the temperature of 70°C. Statistical analysis which was carried out did not prove statistically significant impact of soaking temperature of pellets on the results of mechanical strength and their diameters. Statistically significant impact was reported for relations between soaking heat and the length and density of pellets.

**Key words:** biomass, pellets, mechanical strength

**Adres do korespondencji:**

Marek Rynkiewicz; e-mail: [marek.rynkiewicz@zut.edu.pl](mailto:marek.rynkiewicz@zut.edu.pl)  
Katedra Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
ul. Papieża Pawła VI/3  
71-459 Szczecin



*Dofinansowanie ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Opolu*