

## ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE VARIABILITY OF INPUT PARAMETERS ON THE BRIQUETTING PROCESS OF NOT CHOPPED STRAW WITH THE METHOD OF CURLING AND ON THE FIRMNESS OF OBTAINED BRIQUETTES

### Summary

*Straw is mostly briquetted already chopped using piston or screw briquette presses. Another method consists in briquetting of whole stalks, in which cylindrical (curling) presses are used. The straw compaction with this method is carried on with a number of twisted or tapered cylindrical rollers, arranged at an angle and rotating in one direction. Paper included an analysis of the impact of variability of raw material control and interfering factors on run and briquetting process parameters with the method of the curling of not chopped straw and obtained briquettes.*

**Key words:** cereals, straw, briquette presses, method of rolling up, briquettes, technical parameters, experimentation

## ANALIZA WPŁYWU ZMIENNOŚCI PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH NA PRZEBIEG PROCESU BRYKIETOWANIA NIEPOCIĘTEJ SŁOMY METODĄ ZWIJANIA ORAZ NA TRWAŁOŚĆ UZYSKIWANYCH BRYKIETÓW

### Streszczenie

*Słomę najczęściej brykietuje się jako pociętą na sieczkę używając brykieciarek tłokowych bądź ślimakowych. Inną metodą jest brykietowanie całych źdźbeł, do którego używa się brykieciarek walcowych (zwijających). Zagęszczanie tą metodą polega na skręcaniu słomy kilkoma cylindrycznymi lub stożkowymi walcami, ustawionymi pod kątem i obracającymi się w jednym kierunku. W pracy zawarta została analiza wpływu zmienności cech surowca, czynników sterujących i zakłócających na przebieg i parametry procesu brykietowania niepociętej słomy metodą zwijania oraz uzyskiwanych w efekcie brykietów.*

**Słowa kluczowe:** zboża, słoma, brykieciarki, metoda zwijania, brykiety, parametry techniczne, badania

### 1. Wstęp

Słomę zbóż, jak i inne materiały źdźbłowe, można brykietować pociętą na sieczkę używając brykieciarek tłokowych bądź ślimakowych, co jest procesem energochłonnym lub w postaci całych, pozostałych po kombajnowym omłocie zboża, źdźbeł używając brykieciarek walcowych (zwijających) o znacznie mniejszej energochłonności [5, 14].

Zagęszczanie niepociętych materiałów metodą zwijania polega na skręcaniu ich kilkoma (w analizowanym przypadku – czterema) walcami cylindrycznymi lub walcami w kształcie stożka, ustawionymi pod kątem i obracającymi się w jednym kierunku. Komora prasująca w tym przypadku to przestrzeń utworzona przez te walce, do której materiał podawany jest przez szczelinę utworzoną między jedną parą walców. W początkowym momencie warstwa materiału skręca się w rulon za pomocą stożkowego trzpienia umiejscowionego wzdłuż osi komory brykietowania. Proces odbywa się jak walcowanie warstwy między pracującymi walcami, a obracającym się, zwijanym rulonem. Jednocześnie tworzący się brykiet jest wysuwany z komory brykietowania na zewnątrz w wyniku działania składowych sił osiowych. Po wyjściu z komory brykietowania brykiet jest dzielony na odcinki za pomocą mechanizmu odcinającego.

Brykiet utrzymuje swoją spójność jedynie wtedy, gdy wytrzymałość zewnętrznej warstwy rulonu na rozciąganie jest większa od sił ją rozciągających, wywołanych rozprężaniem materiału znajdującego się wewnątrz rulonu. Z kolei wytrzymałość warstwy rulonu na rozciąganie jest zależ-

na z jednej strony od wytrzymałości samych włókien, z drugiej strony – od sił tarcia między włóknami, które to siły są większe, gdy ciśnienie działające wewnątrz rulonu wzrasta. W przypadku zielonek, motylkowych i siana wytrzymałość wierzchniej warstwy jest na tyle duża, że nie powoduje większej utraty spójności wykonanego brykietu. Dla słomy zbóż wytrzymałość zewnętrznej warstwy jest mniejsza niż dla wspomnianych wcześniej materiałów, co powoduje jej szybsze rozwijanie i utratę uzyskanego zagęszczenia oraz kształtu brykietu. Dlatego też dotychczas nie prowadzono zbyt wielu prac badawczych nad wykorzystaniem metody zwijania dla słomy zbóż. Z tego powodu brak jest zarówno krajowych, jak i zagranicznych pozycji literaturowych. Jedyne informacje o możliwości wykorzystania maszyn tego typu do zagęszczania słomy można znaleźć w wielu opisach patentowych maszyn polowych, wyposażonych w zespoły brykietujące materiały na zasadzie zwijania. W nielicznych pracach można znaleźć obszerną analizę tych konstrukcji [10, 11, 13, 15, 16].

Z tego powodu uprawnione jest stwierdzenie, że brykietowanie niepociętej słomy zbożowej metodą zwijania jest niezbadane, mimo istniejących rozwiązań teoretycznych.

Najważniejsze zadania do rozwiązania to uzyskanie odpowiedniej trwałości i pożądanej gęstości właściwej (objętościowej) brykietów tworzonych metodą zwijania ze słomy zbóż pozostającej na ściernisku po zbiorze kombajnowym przy jak najniższym jednostkowym zużyciu energii oraz określenie cech jakościowych słomy (materiału wejściowego) w celu uzyskiwania brykietów o najlepszych właściwościach użytkowych.

## 2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza wpływu zmienności cech surowca, czynników sterujących i zakłócających na przebieg i parametry procesu brykietowania niepociętej słomy metodą zwijania oraz uzyskiwanego produktu końcowego, czyli brykietów.

Na przebieg analizowanego procesu brykietowania niepociętej słomy metodą zwijania w różny sposób wpływa wiele zmiennych czynników. Dla jasnego i precyzyjnego określenia sposobu ich wpływu na przebieg tego procesu najlepiej będzie posłużyć się schematem opartym na cybernetycznej zasadzie „czarnej skrzynki”. Tak przygotowany schemat opisujący zmienne wpływające na przebieg procesu brykietowania słomy metodą zwijania i zmienne opisujące efekty tego procesu przedstawia rys. 1.

Przedstawione na schemacie zmienne niezależne (cechy surowca) to:

$x$  – gatunek słomy (odmiana zboża),  
 $\gamma_{sb}$  – gęstość właściwa słomy w beli, [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $w$  – wilgotność słomy, [%],  
 $\Delta_0$  – stopień zagęszczenia słomy w beli,  
 $W_u$  – wartość opałowa słomy, [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ].

Będące efektem brykietowania zmienne zależne, czyli cechy produktu to:

$\Psi$  – współczynnik trwałości brykietu,  
 $\Delta_b$  – stopień zagęszczenia brykietu,  
 $\gamma$  – gęstość właściwa brykietu, [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $W_{ge}$  – gęstość energetyczna brykietu, [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $E_{jo}$  – energia jednostkowa, [ $\text{kWh}^{-1}\cdot\text{kg}$ ], [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ].

Na przebieg procesu brykietowania i jakość uzyskiwanych brykietów (produktu) mają wpływ następujące czynniki sterujące:

$n_w$  – prędkość obrotowa walców brykietujących, [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $n_p$  – prędkość liniowa przenośników podających, [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $\beta$  – kąt skreślenia płyty walców brykietujących, [ $^\circ$ ],

Na badany proces wpływają także czynniki zakłócające, które mogą być mierzalne, lecz niesterowalne lub nie mierzalne i nie sterowalne [12]. Do tej grupy czynników zaliczyć można:

$y_1$  – długość źdźbeł, [mm],  
 $y_2$  – nierównomierność podawania,  
 $y_3$  – naturalna zmienność wilgotności brykietowanej słomy.

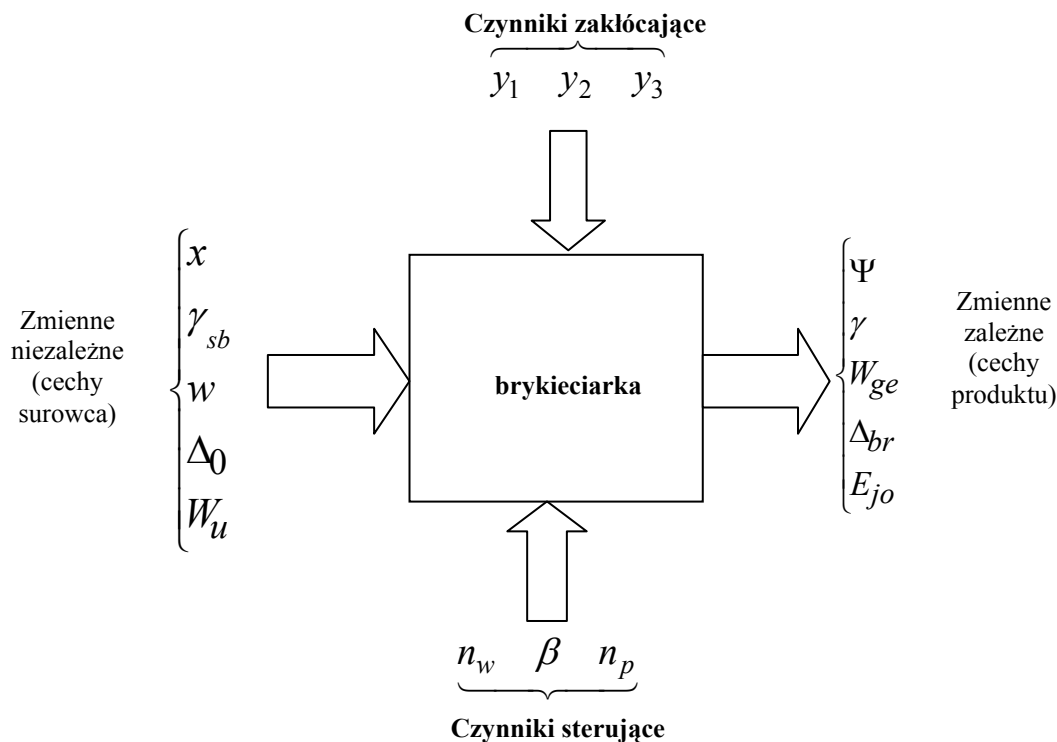
## 3. Założenia badawcze i metodyka badań

Badania prowadzono według metodyki opisanej w pracach [1, 2, 3, 4].

Do prowadzenia badań przyjęto następujące założenia badawcze:

1. Badania będą prowadzone na słomie pszenicznej pobieranej z beli zwijanej.
2. W badaniach zostanie wykorzystana słoma tylko jednej odmiany pszenicy, która została zebrana prasą rolującą z jednego pola równomiernie porośniętego zbożem.

Badania eksperymentalne zrealizowano na stanowisku laboratoryjnym, zaprojektowanym i wykonanym w ramach realizacji własnego tematu badawczego PIMR nr 4T07C 021 27. Do przeprowadzania zmian prędkości obrotowych walców brykietujących w układ napędowy stanowiska laboratoryjnego została włączona przetwornica częstotliwości typu „pDRIVE” MX BASIC 22/30 3x400 V. Pracą przetwornicy sterował program Matrix 2.0 (rys. 2) [1, 2, 3, 4, 6, 7].



Rys. 1. Ideowy schemat badań  
 Fig. 1. Scheme of the test



Rys. 2. Stanowisko badawcze do badania procesu brykietowania słomy metodą zwijania  
 Fig. 2. The test stand to research the process of briquetting of the straw with the method of curling

W celu uzyskania większego zróżnicowania prędkości obrotowych walców brykietujących w ich układzie napędowym zastosowano przekładnię pasową składającą się z dwóch, o różnych średnicach, wymiennych kół pasowych. Stosowane w czasie prób koła (rys. 3a i 3b) pozwalały na uzyskanie, przy wykorzystaniu przetwornicy częstotliwości, wykorzystywanych w czasie badań prędkości obrotowych walców brykietujących 125, 250  $\text{min}^{-1}$  i 375  $\text{min}^{-1}$ . Prędkość walców brykietujących 250  $\text{min}^{-1}$  była maksymalną możliwą do uzyskania, przy nominalnej prędkości obrotowej silnika, dla koła na rys. 3a. Dla koła na rys. 3b była to prędkość 375  $\text{min}^{-1}$ .

Zmiany kąta skręcenia osi walców brykietujących względem osi komory brykietowania realizowano poprzez zmianę kąta ustawienia obrotowej płyty, do której zamocowano walce brykietujące, zgodnie z założeniami podanymi w pracy [2]. Badania prowadzono dla kątów skręcenia walców brykietujących 5 i 10°.

Trwałość brykietu określano przez ubytek masy po cyklu badań na stanowisku badawczym zgodnym z normami: ASAE S269.3 i GOST 23513-79 [8, 9] opisanymi szczegółowo w pracy [2]. Badania rozpoczęto przed opracowaniem

i wejściem w życie obecnie obowiązującej normy PN-EN 15210-2:2011 [17] wprowadzającej bębnowy typ stanowiska badawczego i dlatego postanowiono, w celach porównawczych, kontynuować je na posiadanym stanowisku. Zgodnie z założeniami wspomnianych norm, badania prowadzono w czasie 5 min, przy prędkości obrotowej bębna stanowiska 20  $\text{min}^{-1}$ .

## 4. Wyniki badań i ich dyskusja

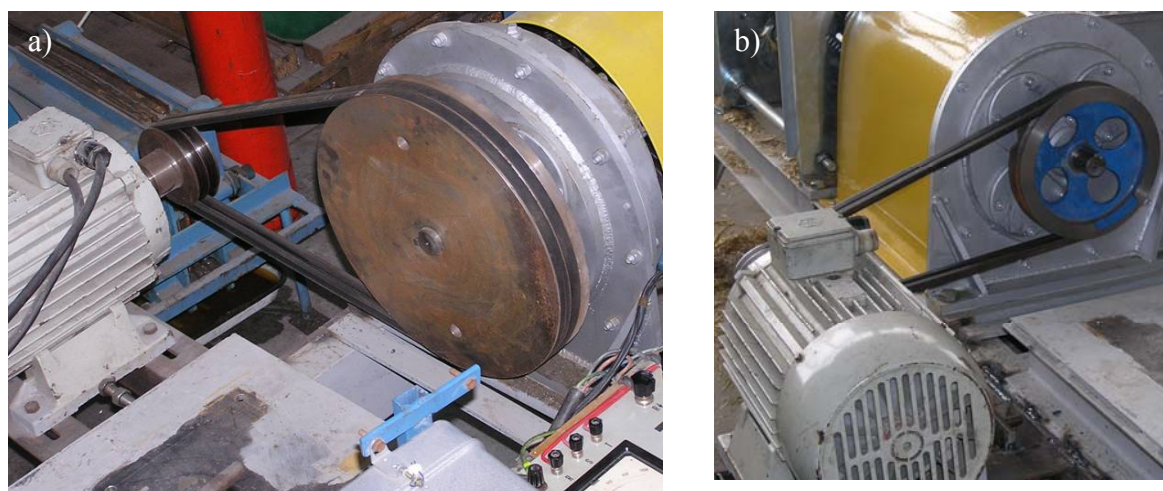
### 4.1. Gęstość właściwa tworzonych brykietów

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących brykiet bez względu na jego późniejsze przeznaczenie i zastosowaną metodę brykietowania jest jego gęstość właściwa (gęstość objętościowa)  $\gamma$ . Była ona wyznaczana poprzez pomiar masy brykietu na wadze laboratoryjnej WS – 21 i określenie jego wymiarów geometrycznych.

Gęstość właściwa brykietu jest w różnym stopniu uzależniona od wielu zmiennych i ogólnie można ją zapisać w postaci następującej zależności funkcyjnej (1):

$$\gamma = f(\gamma_b, w, \Delta_0, \beta, n_w, y_1, y_2) \quad (1)$$

gdzie oznaczenia symboli jak na rys. 1.



Rys. 3. Koła napędowe zastosowane dla uzyskiwania różnych prędkości obrotowych walców brykietujących: a) 125 i 250  $\text{min}^{-1}$ , b) 375  $\text{min}^{-1}$

Fig. 3. Driving wheels used to obtain different roller briquetting speeds: a) 125 and 250  $\text{min}^{-1}$ , b) 375  $\text{min}^{-1}$

Pierwszym problemem przy tak rozbudowanej funkcji, jest zniwelowanie lub wykluczenie wpływu na badaną wielkość jak największej liczby zmiennych. Ich wpływ na końcową gęstość właściwą brykietu jest zróżnicowany i ma różną wagę. Najprostszą metodą zawężenia ilości zmiennych czynników wpływających na gęstość właściwą brykietów  $\gamma$  jest przeprowadzenie badań na słomie jednej odmiany pszenicy. W prowadzonych badaniach wykorzystano słomę pszeniczną z pszenicy ozimej odmiany Roma.

Dla przyjętych założeń badawczych następujące cechy surowca przyjmą stałe wartości: gęstość właściwa słomy poddawanej brykietowaniu  $\gamma_{sb}$ , bezpośrednio z nią powiązany stopień zagęszczenia słomy w beli  $\Delta_0$  oraz wartość opałowa słomy  $W_u$ .

Przyjęte założenia badawcze pozwalają także na wyeliminowanie wpływu niektórych „czynników zakłócających” na uzyskiwaną gęstość właściwą brykietów  $\gamma$ . Pobierając słomę do badań z jednej beli można przyjąć jako stałą, a więc pomijalny w dalszych rozważaniach, wpływ długości źdźbeł  $y_1$ . Również naturalna zmienność wilgotności brykietowanej słomy  $y_2$ , dla jednej beli zawierała się w niewielkim zakresie 17-20 %, nie wpływając znacząco na uzyskiwaną gęstość właściwą brykietów  $\gamma$ . Potwierdziły to także inne badania [3, 6, 7].

Wytwarzany metodą zwijania brykiet jest wałkiem bez końca, który w celu dalszego wykorzystania i przeprowadzenia badań należy dzielić na odpowiednie, najlepiej o jednakowej długości, odcinki (brykiety). Przyjęcie wybierania do badań odcinków (brykietów) tylko ze środkowej części tworzonego w określonych warunkach i dla określonych, wejściowych parametrów wałka brykieta, pozwala na pominięcie wpływu nierównomierności podawania  $y_3$  słomy do zespołu brykietującego. Występująca naturalna nierównomierność podawania  $y_3$  będąca efektem różnej grubości warstwy podawanego materiału oraz różnej wielkości jednorazowo podawanych porcji, w wyniku ciągłej pracy zespołu podającego i brykietującego po pewnym czasie zostaje kompensowana.

W wyniku przyjętych założeń badawczych zależność (1) została uproszczona do następującej postaci (2):

$$\gamma = f(\beta, n_w) \quad (2)$$

Z przedstawionej zależności wynika, że zmiennymi czynnikami wpływającymi na przebieg oraz parametry procesu brykietowania i uzyskiwanego brykieta są: kąt skreślenia płyty walców brykietujących  $\beta$  i prędkość obrotowa walców brykietujących  $n_w$ .

Wyniki badań wpływu kąta skreślenia płyty walców brykietujących i ich prędkości obrotowej przedstawiono w tab. 1.

Większe wartości gęstości właściwej uzyskiwano, niezależnie od prędkości walców brykietujących dla brykietowania

przy kącie ustawienia płyty walców brykietujących  $\beta=5^\circ$ .

Spośród badanych wariantów największą średnią wartość gęstości właściwej brykietów  $500,86 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  uzyskano dla kąta skreślenia płyty walców brykietujących  $\beta=5^\circ$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w=125 \text{ min}^{-1}$ , a najmniejszą  $248,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  dla kąta  $\beta=10^\circ$  i prędkości walców brykietujących  $n_w=375 \text{ min}^{-1}$ . Taka tendencja została potwierdzona w innych badaniach [2, 3, 4, 10, 11, 13, 15, 16]. Należy jednak zwrócić uwagę, że większość tych badań prowadzono na sianie i zielonkach, czyli na materiale o innych parametrach wejściowych. Analiza wariancji testem F (Fischera-Sendocora) wykazała, przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ , statystycznie istotne różnice pomiędzy wartościami gęstości właściwej dla obydwu kątów skreślenia walców brykietujących.

Do prędkości obrotowej  $n_w=375 \text{ min}^{-1}$  występowały ponadto trudności z właściwym zainicjowaniem procesu brykietowania oraz większe niż w przypadku pozostałych, niższych prędkości, szczególnie dla kąta  $\beta=5^\circ$ , straty w wyniku kruszenia i łamania się źdźbeł.

## 4.2. Gęstość energetyczna tworzonych brykietów

Z gęstością właściwą jest bardzo mocno powiązana inna cecha charakterystyczna powstałego brykieta, czyli jego gęstość energetyczna  $W_{uo}$ . Jest to odniesienie wartości opałowej materiału do jego jednostki objętości. Dla uzyskanej w czasie badań najniższej gęstości właściwej brykietów  $247 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $\beta=10^\circ$  i  $n_w=375 \text{ min}^{-1}$ ) i stałej wartości opałowej ( $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) gęstość energetyczna będzie wynosiła  $W_{uo} \approx 4200 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ , a dla najwyższej gęstości właściwej brykietów  $501 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $\beta=5^\circ$  i  $n_w=125 \text{ min}^{-1}$ ) -  $W_{uo} \approx 8515 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 4.3. Energia jednostkowa dla różnych wariantów procesu brykietowania metodą zwijania

Analizując jakikolwiek proces zagęszczania słomy z przeznaczeniem powstających aglomeratów do spalania, ważne jest określenie energochłonności tego procesu. Parametrem dobrze opisującym energochłonność jest energia jednostkowa procesu  $E_{jo}$ .

W prowadzonych badaniach brykietowania niepociętej słomy metodą zwijania dokonywano pomiaru zużycia energii elektrycznej przez silniki napędowe stanowiska laboratoryjnego, potrzebnej do brykietowania określonej, zważonej masy słomy. Następnie odnosząc ją do przerobionej masy słomy wyznaczano energię jednostkową  $E_{jo}$  procesu brykietowania niepociętej słomy metodą zwijania (tab. 2).

Tab. 1. Zależność gęstości właściwej brykietów  $\gamma$  od kąta skreślenia płyty walców brykietujących  $\beta$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w$ .

Table 1. Dependence of density of the briquettes  $\gamma$  on the angle of rotation plates of briquetting rollers  $\beta$  and briquetting rollers rotational speed  $n_w$ .

Kąt skreślenia płyty walców brykietujących $\beta$	Prędkość obrotowa walców brykietujących $n_w$	Gęstość właściwa brykietów $\gamma$			
		Minimum	Maksimum	Średnia	Odchylenie standardowe
°	$\text{min}^{-1}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$			
5	125	499,64	502,42	500,86	1,19
	250	489,34	500,09	495,54	4,55
	375	484,09	497,03	489,75	4,65
10	125	249,98	266,37	256,05	6,91
	250	290,47	303,60	296,06	5,47
	375	247,12	250,01	248,72	1,16

Źródło: opracowanie własne

Tab. 2. Energia jednostkowa  $E_{jo}$  w czasie brykietowania słomy metodą zwijania dla kąta skreńcenia płyty walców brykietujących  $\beta$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w$

Fig. 2. Elementary energy  $E_{jo}$  during briquetting of the straw with the method of the curling for the angle of rotation plates of briquetting rollers  $\beta$  and briquetting rollers rotational speed  $n_w$ .

Kąt skreńcenia płyty walców brykietujących $\beta$	Prędkość obrotowa walców brykietujących $n_w$	Jednostkowe zużycie energii $E_{jo}$			
		Minimum	Maksimum	Średnia	Odchylenie standardowe
°	<b>min<sup>-1</sup></b>	<b>kWh·kg<sup>-1</sup></b>			
5	125	0,1025	0,1100	0,11	0,0029
	250	0,0825	0,0883	0,08	0,0023
	375	0,0900	0,0925	0,09	0,010
10	125	0,0492	0,0575	0,05	0,0027
	250	0,0408	0,0467	0,04	0,0026
	375	0,0558	0,0583	0,06	0,0011

Źródło: opracowanie własne

Podobnie jak w przypadku gęstości właściwej, (objętościowej) dla prowadzenia brykietownia przy kącie  $\beta=5^\circ$  energia jednostkowa  $E_{jo}$ , niezależnie od wykorzystywanej prędkości obrotowej, była większa niż dla brykietowani przy kącie  $\beta=10^\circ$

Spośród badanych wariantów największą średnią wartość jednostkowego zużycia energii 0,1100 kWh·kg<sup>-1</sup> uzyskano dla kąta skreńcenia płyty walców brykietujących  $\beta=5^\circ$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w=125$  min<sup>-1</sup>, a najmniejszą 0,0408 kWh·kg<sup>-1</sup> dla kąta  $\beta=10^\circ$  i prędkości walców brykietujących  $n_w=250$  min<sup>-1</sup>.

Analiza wariancji wykonana testem F (Fischera-Sendocora) dla tej zmiennej, nie wykazała przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ , istnienia statystycznie istotnych różnic pomiędzy wartościami jednostkowego zużycia energii dla poszczególnych badanych wariantów prędkości walców brykietujących i kąta ich skreńcenia.

Uzyskane jednostkowe zużycie energii  $E_{jo}$  w czasie procesu brykietownia niepociętej słomy metodą zwijania jest nawet kilkakrotnie niższe, aniżeli dla procesów brykietowania pociętej słomy prasami tłokowymi bądź hydraulicznymi. W procesach tych zużycie energii jest jeszcze potęgowane poprzez konieczność stosowania wymagających dużych mocy napędowych urządzeń rozdrabniających [5].

#### 4.4. Trwałość tworzonych brykietów

Istotnym parametrem określającym jakość wytworzonych brykietów, oprócz gęstości właściwej, jest ich trwałość wyrażona przez współczynnik trwałości  $\Psi$ .

Wielkością opisującą trwałość brykietów jest współczynnik trwałości brykietów  $\Psi$  wyznaczany z następującej zależności (3) [8, 9, 15]:

$$\Psi = \frac{G_{bt}}{G_b} \quad (3)$$

gdzie:

$G_{bt}$  – masa brykietu po próbie trwałości, w [kg],

$G_b$  – masa brykietu przed próbą trwałości, w [kg].

Wyniki badań wpływu kąta skreńcenia płyty walców brykietujących i ich prędkości obrotowej na trwałość brykietów przedstawiono w tab. 3.

Należy zauważyć, że dla wszystkich rozpatrywanych przypadków trwałość brykietów opisana wartością współczynnika trwałości była bardzo wysoka, oscylując wokół wartości 0,9 (90 %). Podobne wartości współczynnika trwałości brykietów, ale tworzonych z zielonki osiągnął w swojej pracy Olszewski [15]. Taka uzyskiwana wysoka trwałość tworzonych brykietów pozwala minimalizować zmiany jakości brykietów powstające podczas przeładunku i transportu tym samym ograniczają powstające straty. Występujące, pozornie niewielkie, około 3 %, różnice pomiędzy wartością współczynnika trwałości brykietów wytworzonych dla kąta  $\beta=5^\circ$  i  $\beta=10^\circ$  mogą jednak znacząco wpływać na wielkość strat występujących podczas czynności transportowych i przeładunkowych.

Tab. 3. Współczynniki trwałości  $\Psi$  brykietów wykonanych dla kąta skreńcenia płyty walców brykietujących  $\beta$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w$

Table 3. Coefficients of the durability  $\Psi$  of made briquettes for the angle of rotation plates of briquetting rollers  $\beta$  and briquetting rollers rotational speed  $n_w$

Kąt skreńcenia płyty walców brykietujących $\beta$	Prędkość obrotowa walców brykietujących $n_w$	Współczynnik trwałości brykietów $\Psi$			
		Minimum	Maksimum	Średnia	Odchylenie standardowe
°	<b>min<sup>-1</sup></b>	<b>-</b>			
5	125	0,91	0,93	0,92	0,01
	250	0,90	0,95	0,92	0,02
	375	0,89	0,93	0,91	0,02
10	125	0,88	0,90	0,89	0,01
	250	0,88	0,89	0,89	0,01
	375	0,87	0,89	0,88	0,01

Źródło: opracowanie własne

Największą średnią wartość współczynnika trwałości brykietów 0,92 uzyskano dla kąta skrócenia płyty walców brykietujących  $\beta=5^\circ$  i prędkości obrotowej walców brykietujących  $n_w=125 \text{ min}^{-1}$  i  $250 \text{ min}^{-1}$ , a najmniejszą 0,88 dla kąta  $\beta=10^\circ$  i prędkości walców brykietujących  $n_w=125 \text{ min}^{-1}$ .

Analiza wariancji wykonana testem F (Fischera-Sendocora), dla tej zmiennej nie wykazała, dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$ , istnienia statystycznie istotnych różnic pomiędzy wartościami współczynnika trwałości brykietu dla prędkości obrotowych walców brykietujących i wykazała istnienie statystycznie istotnych różnic dla kątów skrócenia płyty walców brykietujących  $\beta=5^\circ$  i  $\beta=10^\circ$ .

## 5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonych pierwszych pełnych badań brykietowania niepociętej słomy zbóż metodą zwijania pozwalają stwierdzić, iż możliwe jest wykorzystanie tej metody do zagęszczania niepociętej słomy zbóż, w efekcie uzyskując brykiety o powtarzalnej, wysokiej (dla odpowiednich parametrów pracy zespołu brykietującego) gęstości właściwej (objętościowej) i gęstości energetycznej. Badania potwierdziły także, iż powstające brykiety utrzymują wysokie współczynniki trwałości. Przedstawione wyniki badań upoważniają do wysnucia następujących wniosków i stwierdzeń:

1. Zmiana kąta skrócenia płyty walców brykietujących z  $\beta=5^\circ$  na  $\beta=10^\circ$  powoduje dla każdej z badanych z prędkości obrotowej walców brykietujących spadek gęstości właściwej (objętościowej) tworzonych brykietów, np. porównując uzyskane wartości średnie dla  $n_w=250 \text{ min}^{-1}$  odnotowano spadek z  $\gamma=495,54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  przy  $\beta=5^\circ$  do  $\gamma=296,06 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  przy  $\beta=10^\circ$ .

2. Spadek gęstości właściwej (objętościowej) brykietów wraz ze zwiększeniem kąta  $\beta$  skrócenia płyty walców brykietujących pociąga za sobą równoczesny spadek trwałości brykietów, jednostkowego zużycia energii i ich gęstości energetycznej,

3. Niewielkie jednostkowe zużycie energii, średnio od  $E_{jo}=0,04$  do  $E_{jo}=0,11 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$  w zależności od kąta skrócenia płyty walców brykietujących  $\beta$  i ich prędkości obrotowej  $n_w$  wskazuje na energooszczędność tego sposobu brykietowania w odniesieniu do innych znanych sposobów brykietowania, np. tłokowego.

4. Wysokie średnie wartości współczynnika trwałości brykietów dla wszystkich badanych wariantów wskazują na wysoką jakość brykietów wytwarzanych tym sposobem brykietowania słomy.

5. Brykiety o mniejszej gęstości właściwej, a co za tym idzie o mniejszej trwałości będą mniej odporne na manipulowanie nimi przy transporcie i przeładunku, a przez to bardziej podatne na zniszczenie.

6. Analiza wariancji testem F wykazała, że różnice pomiędzy średnimi wartościami gęstości właściwej dla badanych kątów są statystycznie istotne, różnice w jednostkowym zużyciu energii są statystycznie nieistotne, a w przypadku

współczynnika trwałości nie istotne są różnice pomiędzy jego wartościami dla różnych prędkości obrotowych, a istotne dla kątów skrócenia płyty walców brykietujących.

## 6. Bibliografia

- [1] Adamczyk F., Frąckowiak P., Kośmicki Z., Mielec K.: Problematyka badawcza w procesie zagęszczania słomy przeznaczonej na opał. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2005, Vol. 50(4), s. 5-8.
- [2] Adamczyk F., Frąckowiak P., Kośmicki Z., Mielec K.: Trwałość brykietów ze słomy przeznaczonej na opał, uzyskanych metodą zwijania *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2006, Vol. 51(1), s. 33-36.
- [3] Adamczyk F., Frąckowiak P., Kośmicki Z., Mielec K., Zielnica M.: Badania eksperymentalne procesu zagęszczania słomy metodą zwijania. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2006, Vol. 51(3), s. 5-10.
- [4] Adamczyk F., Frąckowiak P., Kośmicki Z., Mielec K., Zielnica M.: Wpływ geometrii komory zagęszczającej słomę metodą zwijania na zagęszczenie uzyskiwanych brykietów. Wybrane zagadnienia ekologiczne we współczesnym rolnictwie. Monografia t. 3. Praca zbiorowa pod red. Z. Zbytka, PIMR Poznań, 2006, s.156-163.
- [5] Adamczyk F., Frąckowiak P.: The energy-consuming of the process of straw compaction by the method of curling. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 2009, 7(1)/2009, s. 41-50.
- [6] Adamczyk F.: Wpływ wilgotności słomy zbożowej na stopień zagęszczenia uzyskiwanych brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 2010, nr 1 (119), s. 7-13.
- [7] Adamczyk F.: Wpływ prędkości walców brykietujących na zagęszczenie tworzonego brykietu. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2010, Vol. 55(3), s. 07-10.
- [8] ASAE S269.3: Wafers, pellets, and crumbles – definitions and methods for determining density, durability and moisture content, ASAE Standard, 1989, 346.
- [9] GOST 23513-79 - Feeds in cakes pellets. Specifications, Brikiety i granuly kormovye. *Tekhnicheskije uslovija*.
- [10] Kaczmarek J., Małuszyński M., Liska M.: Stan techniki w dziedzinie brykieciarek pracujących na zasadzie zwijania. *Maszynopis Nr PIMR-3717*, Poznań, 1974.
- [11] Kobr Z., Čermak A., Lanča J.: Poznatky z výzkumu briketovani píče svinovacim způsobem v ČSR. *Zemledelska Technika*, 1970, nr 10, 621-633.
- [12] Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002. ISBN -83-0113749-5.
- [13] Lanča J., Čermak A.: Dalsi poznatky z výzkumu briketovani píče a nektere fyzikalne - mechanicke hodnoty briket vytvorených svinovanim. *Zemledelska Technika*, 1971, nr 10, 649-662.
- [14] O'Dogherty M.J.: A review of the mechanical behaviour of straw when compressed to high densities. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1989, Vol. 44 (4), 241-265.
- [15] Olszewski T.: Dobór optymalnych parametrów zespołu brykietującego zielonki metodą zwijania. Praca doktorska. *Akademia Rolnicza w Poznaniu*, 1973.
- [16] Osobow W. I., Wasiljew G. K., Golianowskij A. W.: Masziny i oborudowanie dla uplotnienia sieno-solomistych materialow. *Maszinstrojenje*, Moskwa, 1974.
- [17] PN-EN 15210-2:2011 Biopaliwa stałe – Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej brykietów i peletów – Część 2: Brykiety.