

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWr*
mgr inż. Mateusz Kuśnierek*

Badania laboratoryjne wybranych właściwości biomas składowanych w silosach

Laboratory test upon chosen properties of biomass stored in silos

Wyraźny wzrost zapotrzebowania elektrowni konwencjonalnych na różne rodzaje biomasy spowodował konieczność budowy dużych magazynów do jej składowania. W wielu przypadkach biomasa dostarczana jest w postaci tzw. peletu drzewnego, słonecznikowego, słomianego itp., który jest sprasowanym materiałem odpadowym w kształcie kulek lub walców średnicy 6 – 25 mm i długości kilku centymetrów. Jest on często składowany w zadaszonych magazynach podłogowych, ograniczonych ścianami oporowymi. Ze względów technologicznych dobrym rozwiązaniem jest składowanie w silosach [1], [2], podobnie jak w przypadku różnego rodzaju materiałów sypkich. Dotychczasowe próby składowania biomasy w silosach przyniosły różne niekorzystne efekty, w tym związane z utrudnieniami w opróżnianiu silosów, a nawet z ich awariami.

Podstawowym problemem w projektowaniu silosów na biomasę jest właściwe ustalenie jej właściwości oraz dobre rozpoznanie procesów zachodzących podczas składowania. W załączniku E normy PN-EN 1991-4:2008 [4] nie występują zdefiniowane właściwości żadnego rodzaju biomasy, co jest dużym utrudnieniem w projektowaniu silosów. Norma [4] podaje w załączniku C metody badań różnych właściwości materiałów rozdrobnionych składowanych w silosach. Procedury te są jednak dość żmudne, a zważywszy na bardzo dużą zmienność właściwości różnych rodzajów biomasy, trudno uznać wyniki pojedynczych pomiarów za reprezentatywne. Właściwości biomasy zależą przecież od miejsca jej wytworzenia, rodzaju transportu, wilgotności oraz sposobu i czasu składowania. Pozostaje też pytanie, czy wyniki uzyskane w małych aparatach badawczych, stosowanych w laboratoriach, odpowiadają realnym właściwościom materiałów składowanych w dużo większych silosach.

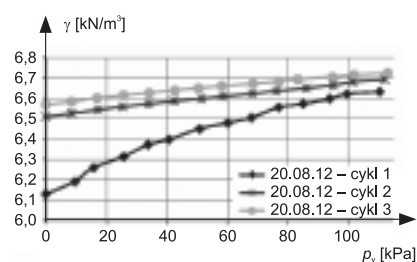
W celu rozwiania tych wątpliwości wykonaliśmy badania wybranych właściwości trzech rodzajów biomasy (pelet ze słomy, pelet drzewny i pelet z łusek słonecznika) oraz kontrolne badania właściwości piasku i rzepaku. Uzyskane wyniki wskazują na bardzo zmienne właściwości tych materiałów, dość znacznie różniące się od spodziewanych, szczególnie w przypadku wartości ilorazu parcia bocznego K_o . Ponadto wartości parametru K_o w normowym aparacie badawczym jednoosiowego ściskania i w realnym silosie stalowym wyraźnie się różniły.

Badania właściwości biomasy w normowym aparacie jednoosiowego ściskania

W przeprowadzonych badaniach próbek wybranych rodzajów biomasy określano wartość ciężaru objętościowego γ , ilorazu parcia bocznego K_o oraz efektywne moduły sprężystości przy obciążaniu, stosując procedury podane w załączniku C normy [4]. Badania prowadzono przy różnych wartościach naprężeń wzorcowych w badanym materiale, osiągając zalecane przez normę [4] wzorcowe parcie pionowe $\sigma_r = p_v = 100$ kPa w aparacie badawczym jednoosiowego ściskania o średnicy $D = 30$ cm i wysokości $H = 40$ cm. Tak duża wartość pionowego parcia p_v w materiale, którym jest lekka biomasa, nie wystąpi w realnych silosach (tabela 1), dlatego też badano jej właściwości

również przy niższej wartości $p_v = 8 - 100$ kPa. Wartości parcia pionowego p_{vf} nad płaskim dnem silosu o średnicy d_c i wysokości h_c obliczono wg procedur normy [4], stosując uzyskane w prezentowanych badaniach własności biomasy, a więc z aparatu jednoosiowego ściskania i z modelu silosu.

Wyniki badań wybranych właściwości peletu drzewnego oraz innych rodzajów peletów, uzyskane w laboratoryjnym aparacie badawczym jednoosiowego ściskania, przedstawiono na rysunkach 1, 2 oraz w tabeli 2. Badania dotyczyły materiału świeżo nasypanego, zgodnie z wymaganiami zał. E normy [4] i oznaczono je jako „cykl 1”. Po zakończeniu tego cyklu badano ponownie skompresowany w cyklu 1 materiał, oznaczając kolejne próby jako „cykl 2”, „cykl 3” itd. Na rysunkach 1 i 2 wyraźnie widać, że właściwości skompresowanego peletu drzewnego (cykle 2, 3) różnią się znacznie od właści-

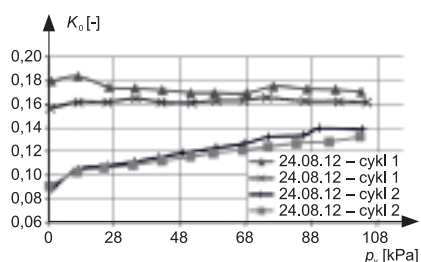


Rys. 1. Ciężar objętościowy γ peletu drzewnego uzyskany w aparacie jednoosiowego ściskania

Tabela 1. Maksymalne parcie pionowe p_{vf} wg normy [4] przy napełnianiu w silosie stalowym o średnicy $d_c = 6$ m i wysokości h_c

h_c [m]	6,0	12,0	18,0	30,0	48,0	60,0
Pelet drzewny ($K_m = 0,18$; $\gamma = 6,7$ kN/m ³ – z aparatu badawczego), $\mu = 0,34$						
p_{vf} [kPa]	35,7	63,6	85,4	116,0	141,1	150,0
Pelet drzewny ($K_m = 0,31$; $\gamma = 6,6$ kN/m ³ – z badanego silosu), $\mu = 0,34$						
p_{vf} [kPa]	32,3	53,5	67,4	82,5	90,7	92,5
Pelet ze słomy ($K_m = 0,16$; $\gamma = 5,0$ kN/m ³ – z aparatu badawczego), $\mu = 0,32$						
p_{vf} [kPa]	27,1	49,2	67,2	93,9	118,0	127,6
Pelet ze słomy ($K_m = 0,30$; $\gamma = 4,9$ kN/m ³ – z badanego silosu), $\mu = 0,32$						
p_{vf} [kPa]	24,4	41,0	52,4	65,3	73,0	74,9

* Politechnika Wrocławska



Rys. 2. Iloraz parcia bocznego K_o peletu drzewnego uzyskany w aparacie jednoosiowego ściskania

wości peletu świeżo nasypanego. Przedstawione wyniki dotyczą wartości parcia pionowego w zakresie $p_v = 8 - 100$ kPa.

Przedstawione w tabeli 2 wartości ilorazu parcia bocznego K_o , uzyskane w badaniach w aparacie jednoosiowego ściskania, są znacznie niższe od oczekiwanych na podstawie porównania z innymi podobnymi materiałami, wymienionymi w tabeli E1 normy [4]. Wartości K_o zależą jednak w bardzo dużym stopniu od wilgotności badanego materiału. Wykazano to m.in. w pracy [3], gdzie w przypadku rzepaku o wilgotności 15% uzyskano wartość 1,1 $K_o = 0,24$, a przy wilgotności 6% wartość ta wynosiła 1,1 $K_o = 0,46$.

Tabela 2. Wartości K_o oraz γ uzyskane dla różnych materiałów w badaniach w aparacie jednoosiowego ściskania przy wartości $p_v = 8 - 100$ kPa

Materiał	Data	Cykl	Iloraz parcia bocznego K_o [-]	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]
Pelet drzewny	20.08.12	cykl 1	0,12 – 0,15	6,13 – 6,63
		cykl 2	0,09 – 0,12	6,51 – 6,69
		cykl 3	0,09 – 0,12	6,57 – 6,72
	24.08.12	cykl 1	0,15 – 0,18	6,06 – 6,65
		cykl 2	0,09 – 0,14	6,51 – 6,71
		cykl 3	0,09 – 0,12	6,57 – 6,72
Pelet ze słomy	20.08.12	cykl 1	0,13 – 0,16	3,28 – 4,77
		cykl 2	0,06 – 0,12	4,40 – 4,83
		cykl 3	0,04 – 0,11	4,66 – 5,03
	24.08.12	cykl 1	0,11 – 0,20	3,28 – 4,65
		cykl 2	0,06 – 0,12	4,36 – 4,78
		cykl 3	0,06 – 0,11	5,53 – 5,99
Pelet z łuski słonecznika	20.08.12	cykl 1	0,15 – 0,18	5,53 – 5,99
		cykl 2	0,07 – 0,12	5,84 – 6,03
		cykl 3	0,06 – 0,11	5,88 – 6,05
	24.08.12	cykl 1	0,12 – 0,17	5,15 – 5,75
		cykl 2	0,08 – 0,13	5,58 – 5,79
		cykl 3	0,08 – 0,13	5,58 – 5,79
Rzepak	22.08.12	cykl 1	0,20 – 0,24	6,87 – 7,06
		cykl 2	0,09 – 0,17	6,99 – 7,09
		cykl 3	0,17 – 0,19	7,06 – 7,18
	24.08.12	cykl 1	0,20 – 0,24	6,90 – 7,08
		cykl 2	0,11 – 0,19	7,00 – 7,10
		cykl 3	0,12 – 0,19	7,03 – 7,12
Piasek (wilgotny)	20.08.12	cykl 1	0,10 – 0,16	13,96 – 14,14
		cykl 2	0,10 – 0,14	13,92 – 14,13

Z wilgotnego piasku można przecież stworzyć samostateczny walec (tzw. babkę), gdzie $K_o \approx 0$. W badaniach własnych wykorzystywano pelet biomasy z regularnych dostaw do jednej z elektrowni, pakowany do dużych worków.

Badania właściwości biomasy w modelu silosu

W prowadzonych badaniach podjęto próbę oszacowania wartości K_o wybranych rodzajów peletu biomasy, podczas jego składowania w silosach. Można bowiem postawić pytanie, czy nie występuje wyraźny efekt skali, jeśli w obliczeniach parcia materiału w silosach o dużej średnicy wykorzystywane są wartości K_o , uzyskane w aparatach jednoosiowego ściskania o wielokrotnie mniejszej średnicy. Ścianki realnych silosów stalowych mają poza tym znacznie mniejszą sztywność obwodową niż aparaty badawcze. Przeprowadzono więc stosowne badania w modelu silosu z blachy falistej o średnicy $d_c = 1,8$ m i grubości $t = 1$ mm (fotografia), wywierając ciśnienie p_v za pomocą tłoka. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 3. Wartości ilorazu parcia bocznego K_o uzyskane w badanym

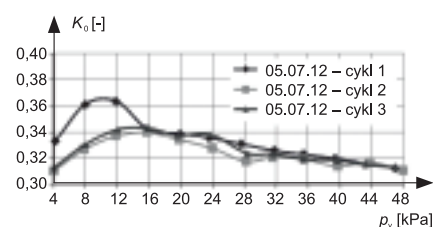
silosie dla peletu drzewnego przedstawione na rysunku 3 różnią się wyraźnie od wartości K_o , uzyskanych w aparacie badawczym (rysunek 2, tabela 2). Różnice mogą wynikać z różnej wilgotności peletu drzewnego w poszczególnych dniach oraz z efektu skali – silos miał 6 razy większą średnicę niż aparat jednoosiowego ściskania. Zagadnienia te są przedmiotem prowadzonych badań.

Wnioski

Właściwości różnych rodzajów biomasy zależą od jej wilgotności i ciśnienia pionowego p_v podczas składowania w silosie. Rozkruszone granulki peletu biomasy podczas transportu przenośnikami mają właściwości różne od pierwotnych. Podstawowa właściwość materiałów sypkich, jaką jest współczynnik parcia bocznego K_o , zależy bardzo wyraźnie od wilgotności materiału [3]. Biomasa, jako materiał odpadowy, może mieć bardzo zróżnicowaną wilgotność, stąd w wyznaczaniu obciążeń w silosach wg [4] trzeba by uwzględnić bardzo małe dolne wartości K_o przy wyznaczaniu parcia pionowego p_v , na co wskazują uży-



Ogólny widok modelu badanego silosu stalowego o średnicy $d_c = 1,8$ m i $t = 1$ mm



Rys. 3. Iloraz parcia bocznego K_o peletu drzewnego uzyskany w badanym silosie

skane wyniki badań (tabela 2). Stosując wartość współczynnika K_o , zbliżone do normowych wartości [4] dla tzw. materiału brakującego ($K_m = 0,50$), uzyskuje się mocno zaniżone wartości obciążeń den silosów (tabela 1), co może skutkować ich przeciążeniem i poważnymi awariami konstrukcji silosów. Istnieje potrzeba dalszych badań właściwości biomasy, aby można było bezpiecznie projektować konstrukcje silosów do ich składowania.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego NCN nr 0998/B/T02/2011/40.

Abstract

A major problem in the design of silos for storage of biomass is the lack of code data, related to their properties. Any kind of biomass is a waste material that has a change-able properties during transportation and storage. The results and conclusions of laboratory tests of chosen properties for some kinds of biomass have been introduced.

Literatura

- [1] Hotała E., Pawłowski K.: Badania stalowych silosów do składowania biomasy. Przegląd Budowlany, nr 5/2012.
- [2] Hotała E., Zambrowicz M.: Problemy składowania wybranych rodzajów biomasy w silosach z blachy falistej. Przegląd Budowlany, nr 5/2010.
- [3] Stasiak M., Molenda M., Rusinek R., Horabik J.: Właściwości mechaniczne złoża nasion rzepaku wyznaczane w teście jednoosiowego ściskania. Acta Agrophysica, 2001, nr 46.
- [4] PN-EN 1991-4:2008: Oddziaływania na konstrukcję. Część 4: Silosy i zbiorniki.