

# Problemy składowania wybranych rodzajów biomasy w silosach z blachy falistej

Dr hab. inż. Eugeniusz Hołała, mgr inż. Mariusz Zambrowicz,  
Politechnika Wroclawska

## 1. Wprowadzenie

Biomasa to podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpadów przemysłowych i komunalnych oraz pozostałości przemysłu rolnego, leśnictwa i związanych nimi gałęzi gospodarki. Stanowi ona naturalne źródło energii, obecnie wykorzystywane w coraz większym stopniu. Główne rodzaje biomasy wykorzystywanej w na cele energetyczne, to: drewno i odpady z przerobu drewna (zrębki, trociny, wióry, kora itp.), rośliny z upraw energetycznych (szybko rosnące wierzby i topole, wieloletnie trawy lub byliny), produkty i odpady rolne (słoma, trzcina cukrowa, rzepak, makuchy, ziarno niskiej jakości), komunalne osady ściekowe i niektóre odpady przemysłowe. Większość rodzajów biomasy to materiały rozdrobnione o wilgotności 10–50%, a więc nadające się do składowania w lekkich, rozbieralnych silosach metalowych. Tymczasem biomasa składowana jest najczęściej w pryzmach w otwartych wiatach, przez co automatyzacja jej załadunku i rozładunku jest utrudniona. W niniejszym artykule przedstawione będą wybrane wyniki eksperymentalnych i numerycznych badań obciążeń silosów z blach falistych i wynikające z nich możliwości składowania w takich silosach niektórych rodzajów biomasy, w tym szczególnie zboża niskiej jakości.

## 2. Silosy z blach falistych jako magazyny biomasy

Silosy metalowe z blach falistych stosowane są od ponad 40 lat. Podstawowe ich zastosowanie związane było głównie ze wzniesieniem lekkich i tanich magazynów do przechowywania nasion zbóż oraz pasz rolniczych (fot. 1). W ostatnich latach silosy z blach falistych znalazły zastosowanie w wielu innych gałęziach przemysłu. Stosowane są z powodzeniem do składowania mielonych odpadów z tworzyw sztucznych, mielonej gumy, trocin i zrębków drzewnych oraz innych rozdrobnionych odpadów przemysłowych. W przypadkach takich materiałów silosy te konkurują skutecznie z silosami z blach gładkich. Ich montaż jest prosty i tani, a możliwość demontażu i szybkiego przeniesienia

w inne miejsce jest dodatkową, ważną zaletą tych konstrukcji.

W silosach z blachy falistej można z powodzeniem składować biomasę w postaci zrębków drzewnych, rozdrobnionej słomy (sieczi) i różnych rozdrobnionych odpadów przemysłowych. Biorąc jednak pod uwagę, wydaną w marcu 2010 r. zgodę władz państwowych na spalanie zbóż w polskich elektrowniach, budowa silosów zbożowych na terenie elektrowni będzie koniecznością, pomimo dość znacznych kontrowersji i oporów etycznych. Ceny zbóż niskiej jakości będą rosły, gdyż elektrownie potrzebują dużych ilości biomasy, a rolnicy oczekują na wzrost opłacalności produkcji rolnej. Nie można wykluczyć, że w najbliższych latach podstawowymi roślinami energetycznymi będzie owies, żyto i kukurydza.



**Fot. 1.**  
*Bateria silosów z blachy falistej z 1978 roku do przechowywania zbóż i pasz rolniczych*



**Fot. 2.** *Wiatła stalowa jako powszechnie stosowany magazyn biomasy*

Dotychczasowe magazyny biomasy w postaci otwartych wiat (fot. 2) nie spełniają podstawowych wymagań, które stawia się nowoczesnym, zautomatyzowanym magazynom materiałów rozdrobnionych. Tym bardziej nie nadają się one do magazynowania zboża, które pomimo przeznaczenia do spalania nie powinno być narażone na bezpośrednie oddziaływania atmosferyczne. W stosowanych wiatkach magazynowych biomasa jest załadowywana do galerii transportowych i instalacji spalania za pomocą prostych ładowarek. Zastąpienie wiat silosami stalowymi umożliwi łatwy i zautomatyzowany pobór biomasy, szczególnie w przypadku magazynowania zbóż energetycznych.

### 3. Badania obciążenia płaszczy i den silosów z blach falistych

Silosy metalowe z blach falistych należą do bardzo chętnie stosowanych obiektów magazynowych w rolnictwie. Dość niespodziewanie rolnictwo i energetyka stają się w pewnym stopniu ważnymi partnerami w produkcji energii, a co za tym idzie w wykorzystywaniu takich obiektów przemysłu rolniczego jak silosy na produkty rolne. Silosy te muszą jednak w przemyśle energetycznym spełniać wyższe standardy w zakresie trwałości i nośności, niż wiele

eksploatowanych silosów zbożowych (fot. 1), w których dochodzi do częstych awarii. Awarie silosów z blach falistych rozpoczynają się na ogół oberwaniem konstrukcji leja, po czym następują kolejne, gwałtowne uszkodzenia dachu i płaszcza silosu. Problematyka ta jest omawiana szczegółowo w pracy [1].

Prowadzone badania obciążeń płaszczy i den silosów z blachy falistej [2], [3] wykazują, że jedną z podstawowych przyczyn obrywania się w nich lejów jest ich znacznie większe obciążenie niż to się powszechnie przyjmuje w projektowaniu, korzystając z norm [4] i [5]. Stopień przeciążenia dna silosu w stosunku do wartości normowych [4], [5] zależy przede wszystkim od pionowej (południkowej) sztywności płaszcza  $K_c$ . Sztywność ta zależy od tego czy płaszczy ten jest uźebrowany, czy jest uźebrowany częściowo (fot. 1) lub czy nie jest w ogóle uźebrowany. Geometria fal i grubość blachy  $t$  mają również istotny wpływ na wartość sztywności płaszcza  $K_c$ . Aby zbadać wpływ podatności południkowej uźebrowanego i nieuźebrowanego płaszcza silosu z blachy falistej na rozdział globalnego obciążenia od materiału wypełniającego pomiędzy płaszczy i dno (lej), przeprowadzono analizy numeryczne oraz wykonano badania doświadczalne w silosach w skali naturalnej. Analizy nume-

ryczne przeprowadzono metodą elementów skończonych, wykorzystując do tego celu program Plaxis 7.2, stosowany głównie w analizach obciążeń konstrukcji geotechnicznych. W badaniach eksperymentalnych zastosowano blachę falistą o wysokości fali  $a = 12$  mm, szerokości  $h = 78$  mm i grubości  $t = 1,0$  mm (rys. 1). Średnica płaszcza silosu wynosiła  $D = 1,8$  m, a poziom napełnienia z był zmienny i nie przekraczał 2,5 średnic  $D$  (por. rys. 3). Badane silosy wypełniano pszenicą o module sprężystości  $E = 2,8$  MPa i ciężarze objętościowym  $\gamma = 7,5$  kN/m<sup>3</sup>.

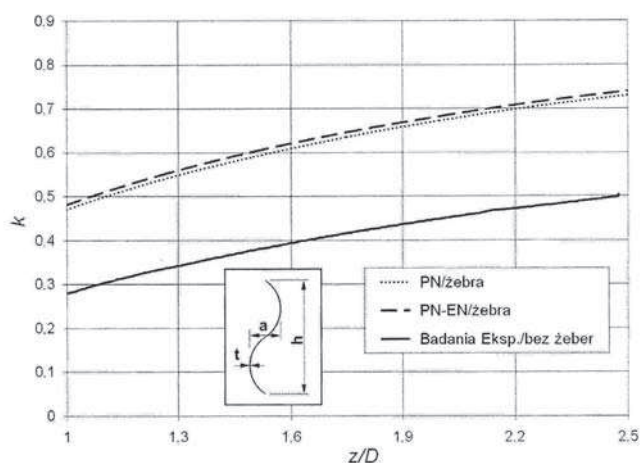
Jeśli oznaczyć ciężar materiału wypełniającego silos do poziomu z (rys. 3) jako  $G$ , to wypadkowe obciążenie południkowe (pionowe) płaszcza  $F_w$  można wyznaczyć z zależności (1), a wypadkowe pionowe obciążenie dna  $F_b$  z zależności (2):

$$F_w = k \times G, \quad (1)$$

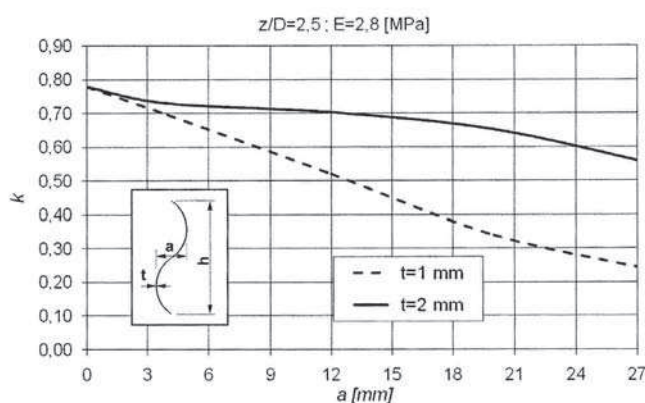
$$F_b = (1 - k) \times G, \quad (2)$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem rozdziału obciążeń w silosie, wyznaczonym doświadczalnie, numerycznie lub z wzorów normowych [4], [5].

Wyniki badań eksperymentalnych (rys. 1) wskazują na to, że nieuźebrowany płaszczy silosu przenosi znacznie mniejszą wartość obciążenia  $F_w$ , a dno silosu znacznie większą wartość obciążenia  $F_b$ , niż to wynika z dotychczasowego stanu wiedzy oraz przepisów normowych [4] i [5]. Gdyby zastosować blachy o większej wysokości fal  $a$ , co z reguły ma miejsce w praktyce, to efekt spadku obciążenia płaszcza silosu z blachy falistej byłby jeszcze większy. Na ten dotychczas nieznan efekt zmiany obciążenia płaszcza  $F_w$ , wywołany zmniejszeniem jego sztywności  $K_c$  wskutek zmiany wysokości fali  $a$  i grubości blach  $t$ , wskazują wyniki analiz numerycznych programem Plaxis (rys. 2). Zgodność wyników analiz numerycznych i badań



**Rys. 1.** Porównanie wartości współczynnika  $k$ , obliczonych wg PN [4], PN-EN [5] oraz wyznaczonego doświadczalnie dla silosu nieuzębrowanego



**Rys. 2.** Wpływ grubości  $t$  i wysokości fali  $a$  w blasze falistej płaszcza na wartość współczynnika  $k$

eksperymentalnych dla badanego silosu ( $a = 12 \text{ mm}$ ,  $t = 1 \text{ mm}$ ) widoczna jest na rysunkach 1 i 2, gdyż dla  $z/D = 2,5$  wartość współczynnika rozdziału obciążeń  $k$ , uzyskanego z analiz numerycznych i badań eksperymentalnych jest jednakowa ( $k \approx 0,5$ ).

Mniejsze, niż spodziewane, rzeczywiste obciążenie płaszczy nieuzębrowanych lub częściowo uzębrowanych płaszczy silosów z blachy falistej oznacza, że obciążenie płaskich den lub stożkowych lejów tych silosów są znacznie większe niż to wynika z dotychczasowego stanu wiedzy i przepisów normowych [4], [5]. Jest to więc jedna z podstawowych przyczyn awarii lejów w takich silosach.

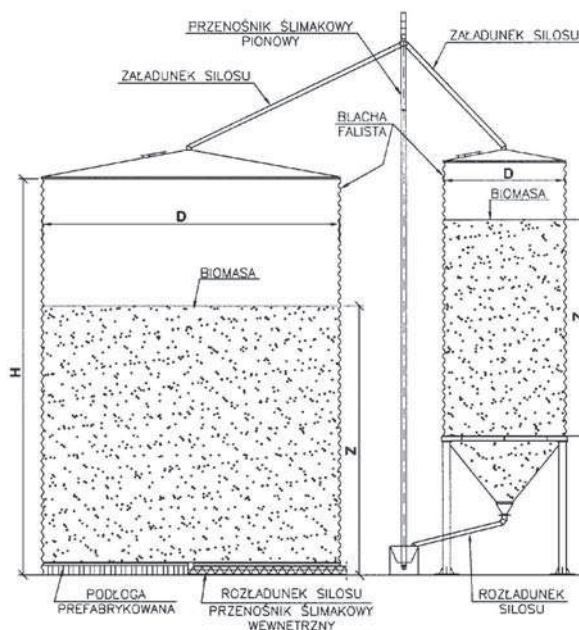
#### 4. Ogólna koncepcja silosów do przechowywania biomasy

Wykazany w punkcie 2 efekt zwiększenia całkowitego obciążenia  $F_b$  płaskiego dna lub lejów silosu, wyznaczonego z zależności (2)

na podstawie współczynnika  $k$  (rys. 1 i 2), nie ma istotnego znaczenia dla silosów z płaskim dnem. W takich silosach dno w większości przypadków wykonane jest w postaci lekkiego rusztu stalowego z paneli korytkowych i oparte

jest bezpośrednio na żelbetowej płycie fundamentowej. Z kolei niewielkie obciążenie  $F_w$  nieuzębrowanego płaszcza silosu z blachy falistej jest korzystne i pozwala na zaprojektowanie prostych i tanich konstrukcji silosów z dnem płaskim do magazynowania różnych rodzajów biomasy (rys. 3). W silosach z płaskimi dnami stosowane są wybieraki ślimakowe, umieszczone w poziomie den, stąd też nadają się one do składowania różnorodnych rodzajów biomasy (odpadowe zboże i pasze, cięta słoma, trociny, ścinki papieru, rozdrobnione łodygi roślin energetycznych, odpady z oczyszczalni ścieków itp.), gdyż wybieranie ślimakowe nawet zbrzylających się materiałów jest bardzo skuteczne. W klasycznych silosach z lejem (rys. 3) można składować głównie zboże i mocno rozdrobnioną biomasę o małej wilgotności, uwzględniając w ich projektowaniu właściwe obciążenie lejów.

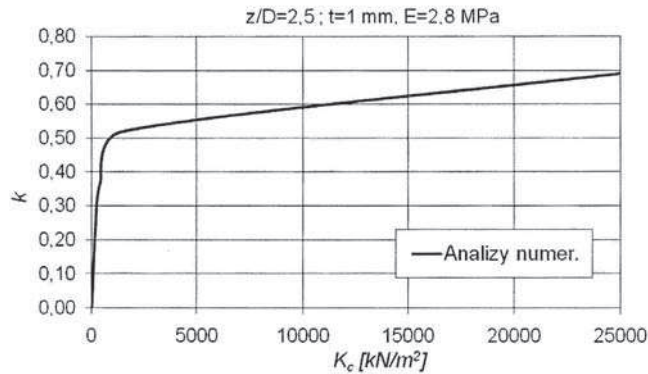
W silosie, w którym wykonywane były badania doświadczalne ( $D = 1,8 \text{ m}$ ,  $a = 12 \text{ mm}$ ,  $t = 1 \text{ mm}$ ), wartość sztywności południkowej wynosiła  $K_c \approx 1400 \text{ kN/m}^2$  i obliczona była dla jednostki obwodu powłoki walcowej o jednostkowej wysokości. Zmniejszanie sztywności płaszcza poniżej tej wartości



**Rys. 3.** Silosy z blach falistych do składowania biomasy



powoduje bardzo wyraźny spadek współczynnika rozdziatu obciążenia  $k$  (rys. 4), a więc wartości południkowego obciążenia  $F_w$ , określonego wg zał. (1). W przypadku całkowitego braku sztywności  $K_c$  (np. tkanina) płaszcz silosu nie przenosi żadnych obciążeń południkowych i występują w nim tylko równoleżnikowe siły rozciągające. Siły takie mogą być przejmowane zarówno przez tkaniny, jak i cienkie blachy faliste.



**Rys. 4.** Wpływ południkowej sztywności płaszcza silosu  $K_c$  na wartość współczynnika  $k$

## 5. Podsumowanie

Wyniki badań rozdziatu obciążeń od materiału wypełniającego (zboża) w silosach z blachy falistej wskazują na pilną potrzebę zmiany normowych przepisów [4], [5] w zakresie ustalania wartości obciążeń ich płaszczy i den (lejów), szczególnie w przypadku braku uźebrowania płaszczy. Badania wykazały również, że w tzw. silosach podłogowych z płaskim dnem, opartym bezpośrednio na płycie

fundamentowej, można z powodzeniem stosować nieuźebrowane płaszcze z blachy falistej. Takie silosy nadają się do magazynowania różnych rodzajów biomasy w elektrowniach, gdyż są one tanie, łatwe w montażu i demontażu oraz umożliwiają łatwe zautomatyzowanie procesów ich załadunku i rozładunku. Silosy takie są stosowane powszechnie do magazynowania zboża, a zboże będzie w najbliższym czasie jednym z podstawowych rodzajów biomasy w elektrowniach.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Hotała E., Awaryjność silosów z blachy falistej. *Materiały Budowlane* 2/2006
- [2] Molenda M., Horabik J., Thompson S. A., Ross I. J., Grain loads on smooth and corrugated-wall model silos. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, Nr 419/2001
- [3] Hotała E., Zambrowicz M., Obciążenia den i lejów silosów o płaszcach z blachy falistej. *Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa*. Olsztyn 2006, s. 173–178
- [4] PN-B-03202:1996 Konstrukcje stalowe. Silosy na materiały sypkie. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [5] PN-EN 1991-4 Eurokod 1. Oddziaływanie na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki

# Analiza porównawcza oddziaływań wiatru na silosy żelbetowe według dotychczasowej normy PN-77/B-02011 i nowych wymagań według PN-EN 1991-1-4:2008

Dr hab. inż. Paweł Lewiński, ITB, Warszawa

## 1. Nowe zasady wyznaczania wpływu wiatru na silosy

Żelbetowe silosy to w większości budowle wieżowe silnie obciążone wiatrem i w tym zakresie zastąpie-

nie normy PN-77/B-02011 [1] normą PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1 Oddziaływanie na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływanie ogólne – Oddziaływanie wiatru [2] zmienia całkowicie dotychczasowe zasady

projektowania. W ostatnim czasie zatwierdzona została w CEN końcowa wersja normy EN-1991-część 4, a także zakończono prace nad polskojęzyczną wersją PN-EN tej normy wraz z Załącznikiem kra-