

Konstrukcja żelbetowego silosu na popiół lotny o pojemności 5500 t

Dr inż. Adam Klimek, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne komory silosowej na popiół lotny, zrealizowanej w 2010 r. w Gdańsku przy ul. Wielopole 6. Silos jest żelbetowy, monolityczny, niesprężony, opróżniany aeracyjnie na dużym mimosroście. Nie względu na głęboko zalegające grunty nienośne, silos posadowiony jest w sposób pośredni na palach. Wymiary silosu pokazano na rysunku 1b. Omówiono podstawowe założenia konstrukcyjne a następnie ich modyfikację, spowodowaną koniecznością ograniczenia kosztów oraz czasu i stopnia trudności wznoszenia konstrukcji, podano również rozwiązania ważniejszych elementów i szczegółów konstrukcyjnych, powstałych w wyniku wykonanej modyfikacji.

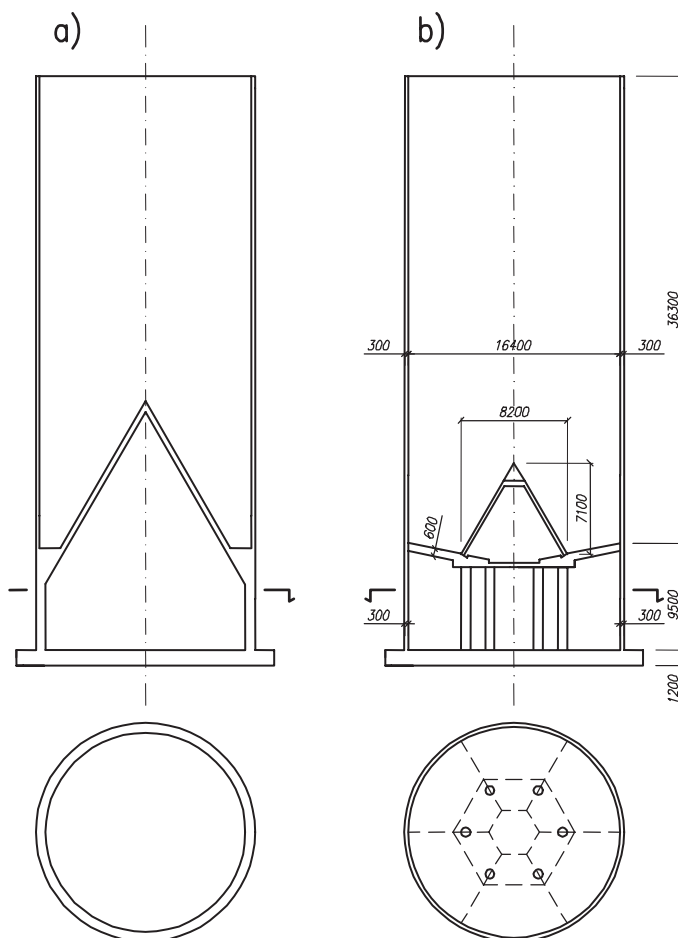
2. Koncepcja i modyfikacja konstrukcji silosu

Założenia odnośnie do geometrii silosu podano na rysunku 1. Na rysunku 1a przedstawiono „klasyczne”, stosowane powszechnie rozwiązanie geometrii silosu na popiół lotny, z pogrubioną ścianą podsilosową oraz z dużym, żelbetowym, prefabrykowanym, odwróconym lejem stożkowym. Rozwiązanie to postanowiono zmodyfikować w taki sposób, aby możliwe było wykonanie całego płaszcza komory silosowej wraz ze ścianą podsilosową w deskowaniu ślizgowym w jednym ciągu, bez przerywania betonowania i bez zmiany grubości ściany na poziomie jej połączenia z lejem.

Opracowano w ten sposób koncepcję projektową, przedstawioną na rys. 1b. W stosunku do rozwiązania „klasycznego” wprowadzono następujące zmiany:

- wprowadzono dodatkowo płaską, monolityczną płytę denną o grubości 600 mm;
- przewidziano obwodowe podparcie w/w płyty na ścianie podsilosowej oraz na 6 okrągłych słupach o średnicy 700 mm zlokalizowanych w przestrzeni pod komorą silosu, wewnątrz ściany podsilosowej;

zastosowano znacznie mniejszy niż w rozwiązaniu „klasycznym” stożek wewnętrzny o lekkiej, prefabrykowanej konstrukcji stalowej (rys. 1b, rys. 9);



Rys. 1. Koncepcje geometrii silosu: a) klasyczne rozwiązanie silosu z dużym prefabrykowanym żelbetowym lejem stożkowym oraz z pogrubioną ścianą podsilosową, bez słupów wewnętrznych; b) przyjęta do realizacji komora silosowa z płaską płytą denną podpartą słupami oraz z małym stożkiem stalowym

- ujednolicono grubości ścian komory oraz ściany podsilosowej: dla obu ścian przyjęto grubość 300 mm;
- w celu uniknięcia kłopotliwego deskowania na dużej wysokości, zrezygnowano ze stosowanego zwykle obwodowego poszerzenia ściany (szerokiego wieńca) na górnej krawędzi komory silosu, mającego na celu usztywnienie komory silosowej na jej górnej krawędzi (przeciwdziałanie owalizacji przekroju komory wskutek niesymetrycznych oddziaływań materiału sypkiego);
- zaplanowano wykonanie lekkiego dachu w postaci dwukierunkowego, ortogonalnego rusztu z typowych profili walcowanych typu IPE; wskutek przyjęcia poprzedniego założenia, zadaniem konstrukcji stalowego dachu będzie również usztywnienie górnej krawędzi żelbetowej ściany silosu.

W stosunku do rozwiązania „klasycznego” zmodyfikowana koncepcja posiada następujące zalety:

- umożliwia wykonanie ściany podsilosowej oraz ściany komory silosu w jednym ślizgu, bez przerywania betonowania w miejscu połączenia tych ścian ze stożkiem wewnętrznym, skraca zatem czas wykonania płaszczu;
- pozwala na znaczne zmniejszenie wymiarów stożka wewnętrznego (rys. 1b, rys. 9), a konsekwencji daje możliwość zrezygnowania z masywnej wewnętrznej prefabrykowanej konstrukcji żelbetowej i wykonania lekkiego stożka stalowego z blach, skręcanych śrubami na budowie;
- pełniej wykorzystuje objętość komory silosowej;
- poprawia przekazanie ciężaru silosu na grunt w warunkach posadowienia pośredniego na palach, ponieważ w sposób bardziej równomierny rozkłada obciążenie na płytę fundamentową, która następnie przekazuje je na pale; projekt palowania nie jest przedmiotem niniejszej publikacji.

Przyjęcie tej koncepcji stawia przed projektantem następujące zadania:

Tabela 1. Dane mechaniczne popiołu lotnego według danych literaturowych oraz badań własnych autora

Pozycja literaturowa	Ciężar objętościowy, kN/m ³	Współczynnik tarcia o beton	Iloraz parcia bocznego
[1]	12,0	0,60	0,58
[2]	14,0	0,45	0,45
[3]	15,0	–	0,55
[4]	15,0	0,72±7%	0,46 ±20%
[5]	13,4	–	–
[6]	13,2–13,5	–	–
[7]	10,3	–	–

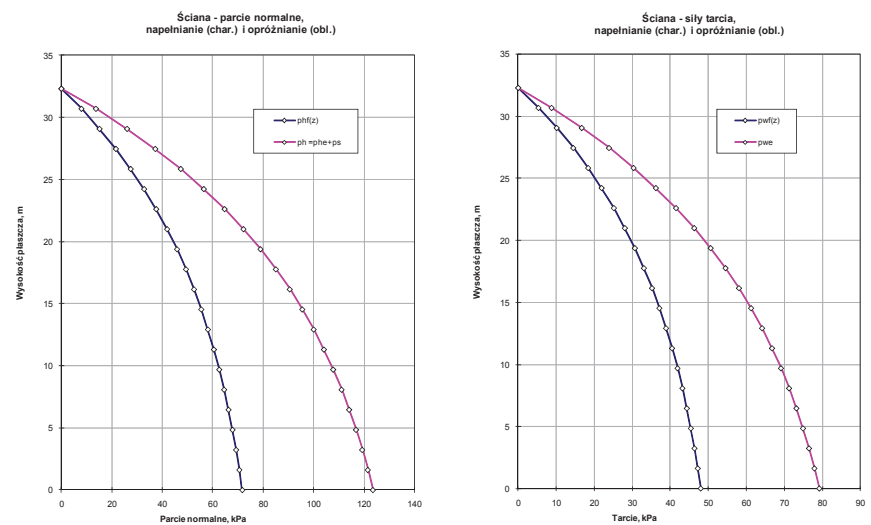
- doprojektowanie płyty dennej (rys. 1b), a zwłaszcza rozwiązanie poddanego znacznym obciążeniom pionowym oparcia płyty dennej na wykonanej wcześniej w całości cylindrycznej ścianie silosu;
- zaprojektowanie słupów podpierających ww. płytę (rys. 1b), które nie istnieją w koncepcji „klasycznej”;
- konieczność szczegółowych uzgodnień oraz dopasowania układu słupów do wymagań, układu i rozmiarów urządzeń technologicznych odbierających popiół z silosu, zlokalizowanych w przestrzeni pod lejem stożkowym, gdyż w tej koncepcji projektowej w stosunku do koncepcji „klasycznej” przestrzeni ta ulegnie ograniczeniu;
- wykonanie specyficznych obliczeń stalowego rusztu dachowego (rys. 4, rys. 5), uwzględniających poza momentami zginającymi od obciążeń pionowych także znacznych sił osiowych, przekazywanych na rygle rusztu ze ściany komory żelbetowej, obciążonej niesymetrycznym parciem popiołu.

Po wykonaniu wstępnych oszacowań wytrzymałościowych stwierdzono, że istnieje możliwość skonstruowania silosu jako żelbetowego, bez sprężenia komory silosowej, i takie założenie przyjęto do projektu wykonawczego.

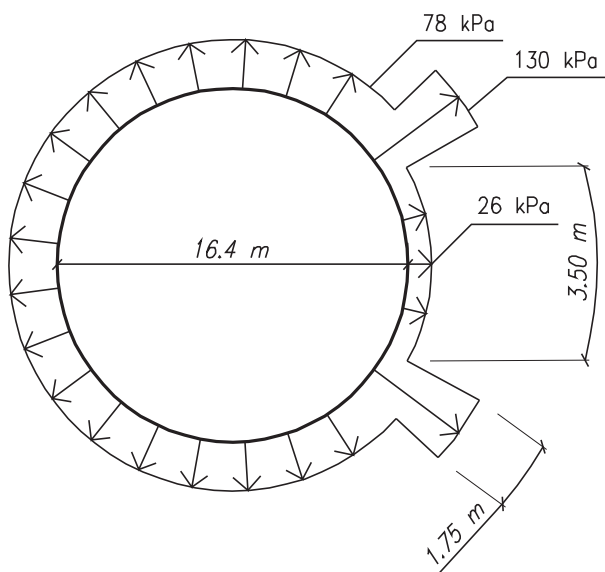
3. Założenia projektowe dotyczące obciążeń

Podstawowe znaczenie dla ustalenia obciążeń od parcia materiału sypkiego mają jego cechy mechaniczne. Dla popiołu lotnego cechy te istotnie różnią się w poszczególnych normach i wynikach badań, co przedstawiono w tabeli 1. Ostatecznie przyjęto:

- ciężar objętościowy γ : 13,5 kN/m³;
- współczynnik tarcia o beton: 0,72±7%;



Rys. 2. Wyznaczone wartości symetrycznych obciążeń ściany komory silosowej



Rys. 3. Wyznaczone maksymalne wartości niesymetrycznych obciążeń ściany komory silosowej w uzupełniającym przypadku obciążenia wg normy [4]

- iloraz parcia bocznego: 0,46 ±20%.
Silos według normy [4] jest silosem średniosmukłym i zalicza się do klasy oceny oddziaływań AAC 2.

4. Ważniejsze wyniki obliczeń

Obciążenia ściany silosu wyznaczone wg normy [4], otrzymane wartości symetrycznych obciążeń normalnych i stycznych przedstawiono na rysunku 2. Nie wyznaczono parcia miejscowego popiołu, ponieważ zgodnie z [4] dla materiałów sypkich, które podczas napełniania ulegają napowietrzeniu, parcia miejscowego nie uwzględnia się. Poza parciem symetrycznym przeanalizowano uzupełniający przypa-

dek obciążenia dla opróżniania silosu na dużym mimośrodzie według p. 5.2.4.3.2 normy [4]. Pomimo, że silos należy do klasy AAC 2, obliczenia wykonano metodą dokładniejszą, jak dla klasy oceny oddziaływań AAC3, która daje w efekcie mniejsze wartości momentów zginających ścianę wskutek uwzględnienia parcia w strefie przepływu. Wyznaczone tą metodą wartości obciążeń w uzupełniającym przypadku obciążenia przedstawiono na rysunku 3. W literaturze dotyczącej obciążeń silosów brak jest wytycznych dla obciążeń odwróconych lejów stożkowych. Obciążenia stożka wewnętrznego przyjęto jako łącznie działające obciążenia poziome i pionowe:

- obciążenie poziome: równe maksymalnemu parciu poziomemu popiołu na ścianę komory podczas opróżniania, działające w odniesieniu do rzutu pionowego powierzchni stożka;
- obciążenie pionowe: równe maksymalnemu parciu pionowemu popiołu na dno komory silosu po napełnieniu, działające w odniesieniu do rzutu poziomego powierzchni stożka.

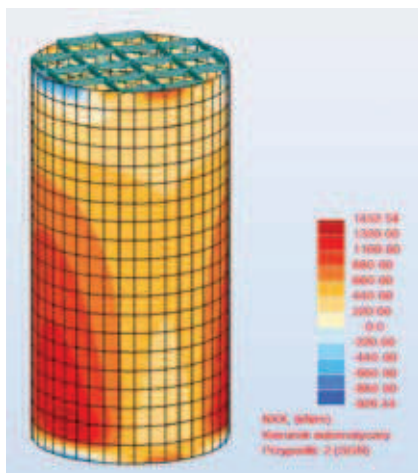
Szczegółowe obliczenia wytrzymałościowe stożka stalowego oraz jego konstrukcja nie są przedmiotem niniejszej publikacji. Ponadto uwzględniono następujące drugorzędne obciążenia komory silosu:

- obciążenie wiatrem;
- obciążenia dachu: technologiczne oraz obciążenie śniegiem;
- obciążenie ściany silosu gradientem temperatury;
- obciążenie ściany silosu dodatkowym parciem wywołanym ochłodzeniem ściany.

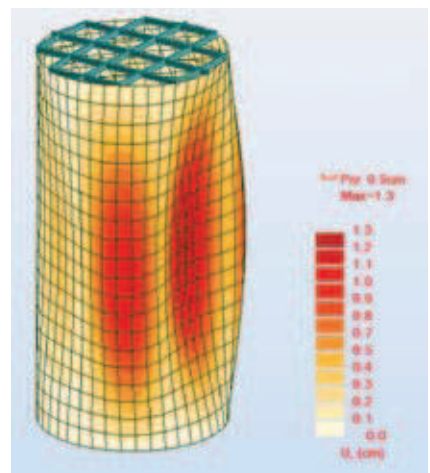
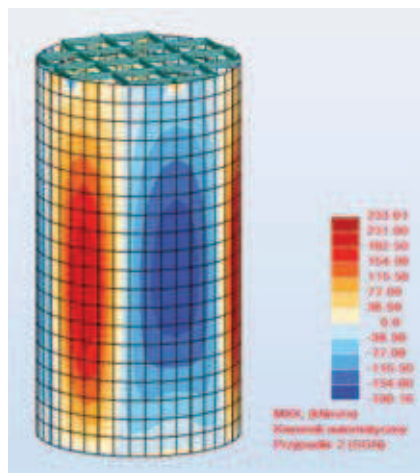
Konstrukcję przeanalizowano w kilku kombinacjach obliczeniowych, z których najbardziej niekorzystną kombinacją obliczeniową tworzą następujące przypadki obciążeń:

- niesymetryczne obciążenie ściany parciem popiołu;
- gradient temperatury;
- obciążenie dachu;
- obciążenie wiatrem.

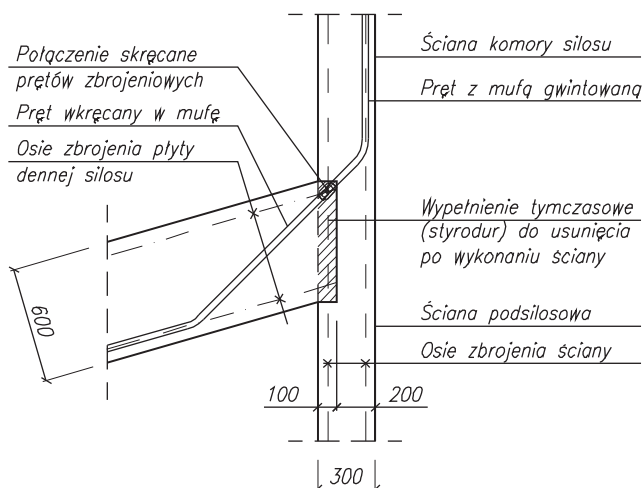
Konstrukcję obliczono poprzez jej



Rys. 4. Obliczone wartości pierścieniowych sił rozciągających oraz poziomych momentów zginających ścianę silosu



Rys. 5. Odształcenia ściany silosu w wariancie obciążenia niesymetrycznego



Rys. 6. Rozwiązanie projektowe połączenia płyty dennej ze ścianą komory silosowej za pomocą prętów skręcanych

rozbitcie na schematy podstawowe. Analizowano kolejno:

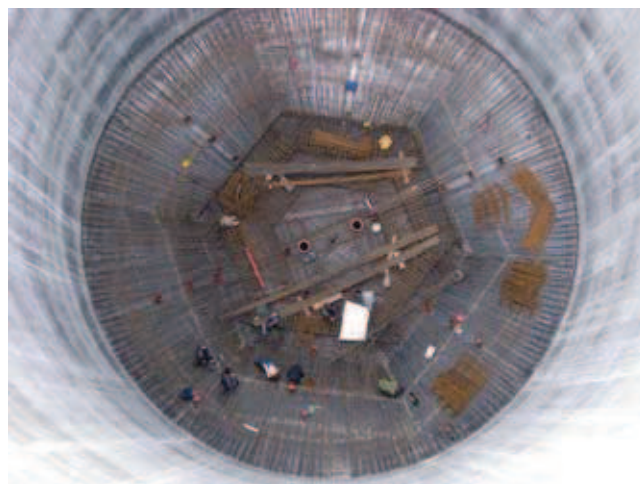
- płaszczyznę komory silosu od poziomu płyty dennej do górnej krawędzi wraz z dachem stalowym (rys. 4);
- stożek stalowy;
- płytę denną o grubości 60 cm;
- ścianę podsilosową;
- płytę fundamentową;
- pale.

Otrzymane wartości pierścieniowych sił rozciągających oraz poziomych momentów zginających w płaszczyźnie komory (bez ściany podsilosowej) przedstawiono na rysunku 4. Jak widać na wykresach, obszary maksymalnego rozciągania nie pokrywają się z obszarami maksymalnego zginania poziomego ściany. W miejscach maksymal-

nych sił ścianę komory silosowej zbrojono poziomo od zewnątrz prętami $\varnothing 20$ co 10 cm, od wewnątrz prętami $\varnothing 16$ co 10 cm, przy czym większa część zastosowanego przekroju zbrojenia wynika z momentu zginającego w niesymetrycznym przypadku obciążenia, a mniejszy wpływ na zbrojenie poziome mają siły rozciągające. Zbrojenie pionowe przyjęto jednakowe na całej wysokości płaszczyzny: $\varnothing 16$ co 20 cm. Zastosowano stal zbrojeniową BSt500 w gatunku AIIIIN oraz obliczeniowo beton C25/30, jednak ze względu na lokalizację silosu w bliskości morza i słone środowisko zwiększono klasę betonu do C35/45. Obliczeniowo rozwarłość rysy ograniczono do szerokości 0,3 mm.

Odkształcenia ściany silosu w wariancie obciążenia niesymetrycznego pokazano na rysunku 5. Jak widać na rysunku, stalowy ruszt dachowy spełnia swoje zadanie – tworząc poziomą tarczę (przeponę) przeciwdziałającą owalizacji komory silosowej na jej górnej krawędzi.

Ze względu na warunki środowiskowe, na całym płaszczyźnie wykonano od zewnątrz powłokę ochronną.



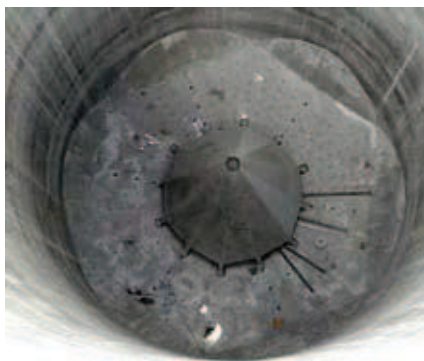
Rys. 7. Wykonana ściana silosu i oczekująca na zabetonowanie płyta denna silosu

5. Rozwiązanie połączenia płyty dennej ze ścianą silosu

Połączenie płyty dennej silosu ze ścianą rozwiązano w projekcie jak na rysunku 6. Zaprojektowano oparcie płyty dennej w gnieździe ściany, wypełnionym tymczasowo styrodurem, przewidzianym do usunięcia po zabetonowaniu ściany. Połączenie zbrojenia płyty dennej ze zbrojeniem ściany zaplanowano jako skręcane – w ścianie zaplanowano osadzenie prętów z mufami gwintowanymi, do których planowano dokręcenie prętów odgiętych płyty. Ze względu na małą szerokość gniazda (100 mm), połączenie skręcane zaprojektowano tak, aby mogło ono przenieść całą siłę poprzeczną w miejscu połączenia. Na budowie zamieniono to połączenie na spawane doczołowe (rys. 7, 8).



Rys. 8. Połączenie spawane prętów odgiętych, łączących płytę denną ze ścianą komory silosowej



Rys. 9. Wykonany silos na popiół lotny: widok zewnętrzny oraz płyta denną ze stożkiem stalowym w widoku z góry

6. Podsumowanie

W publikacji przedstawiono zrealizowaną koncepcję konstrukcji silosu na popiół lotny o pojemności 5500 t. Istotą przyspieszenia i uproszczenia realizacji silosu było wykonanie ściany komory silosu wraz ze ścianą podsilosową w ciągłym ślizgu (rys. 9), bez przerwy roboczej w miejscu połączenia tych elementów z lejem, co pociągnęło za sobą jednak konieczność wprowadzenia dodatkowych elementów konstrukcyjnych: płyty dennej wraz z podpierającymi ją słupami. Korzystnym efektem zastosowanych zmian było

również zmniejszenie wielkości odwróconego leja stożkowego (rys. 9), co umożliwiło jego wykonanie jako lekkiego elementu stalowego. Wprowadzenie słupów było korzystne również z punktu widzenia posadowienia silosu, ponieważ znaczne obciążenia w połączeniu z dużą miąższością gruntów nienośnych wymagały wykonania pali pod większą częścią powierzchni płyty fundamentowej, która wskutek wprowadzenia słupów została obciążona bardziej równomiernie.

Po ponad rocznej eksploatacji silosu stwierdzono poprawne zachowanie się konstrukcji, nienaruszony stan

powłoki ochronnej oraz brak zarysowań konstrukcji żelbetowej. Projekt konstrukcji silosu opracował zespół w składzie: dr inż. Adam Klimek (projektant) we współpracy z dr. inż. Zbigniewem Sacharukiem (sprawdzający) i mgr inż. Łukaszem Koryciakiem (asystent projektanta), prace budowlane wykonała firma Vertex z Siechnic k. Wrocławia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-89/B-03262, Zbiorniki żelbetowe na materiały sypkie i kiszonki, obliczenia statyczne i projektowanie
- [2] PN-B-03262:2002, Silosy żelbetowe na materiały sypkie, obliczenia statyczne i projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja;
- [3] PN-B-03202, Konstrukcje stalowe, silosy na materiały sypkie, obliczenia statyczne i projektowanie
- [4] PN-EN-1991-4: Eurokod 1, Oddziaływania na konstrukcje, część 4: silosy i zbiorniki
- [5] Raport badań nr 28/09/P, dotyczący badania popiołu lotnego wg Proc. Badawczej nr 6 Laboratorium K.J Pollytag S.A., Gdańsk, 2009-10-08, (w posiadaniu autora)
- [6] Badania właściwości fizyko-mechanicznych popiołu lotnego z elektrofiltru bloku energetycznego w elektrowni Pątnów, Sylwester Kobielał, Adam Klimek, Wrocław, Raport z Badań Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, październik 2000 r.
- [7] Badania właściwości fizyko-mechanicznych popiołu lotnego z EC Gdańsk i EC Gdynia, Edward Hutnik, Tadeusz Kiwacz, Adam Klimek, Sylwester Kobielał, Wrocław, grudzień 2008 r. (w posiadaniu autora)

Tytuł: Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na materiały sypkie

Autor: Anna Halicka, Dominika Franczak

Wydawnictwo Naukowe PWN

Warszawa 2011

Żelbetowe zbiorniki i materiały sypkie są obiektami inżynierskimi, a więc ich projektowanie odbiega od części realizowanego projektowania budynków. Kształty, wymiary i wyposażenie zbiorników są podporządkowane technologii. W przypadku silosów jest to technologia składowania materiałów sypkich, w przypadku zbiorników na ciecze, będących elementami ciągów technologicznych w zakładach przemysłowych – technologia produkcji, a w obiektach gospodarki wodno-ściekowej – technologia oczyszczania ścieków lub uzdatniania wody. Podstawą w projektowaniu konstrukcyjnym obiektów budowlanych jest określenie obciążeń i oddziaływań wywieranych na konstrukcję oraz obliczenia na ich podstawie wartości sił wewnętrznych. Pierwszym celem tej publikacji jest zestawienie w sposób współczesny danych dotyczących zbiorników na materiały sypkie i ciecze z uwypukleniem kwestii obciążeń i ich wpływu na powstające siły wewnętrzne. Drugim celem książki jest przybliżenie norm europejskich dotyczących zbiorników na ciecze i materiały sypkie. Trzecim celem jest przedstawienie przykładów obliczeniowych zbiorników o różnorodnej geometrii. Opracowanie przygotowano w dwóch tomach: pierwszy dotyczy zbiorników na materiały sypkie drugi zbiorników na ciecze. W tym tomie podano klasyfikację silosów, zasady określania obciążeń takich zbiorników oraz obliczania sił wewnętrznych metodami tradycyjnymi i za pomocą MES.

