

mgr inż. Marcin Midro^{1*)}mgr inż. Marcin Kot¹⁾

Analiza uszkodzeń i wzmocnienie kopuły wydzielonej komory fermentacyjnej

Analysis of damages and strengthening of separated digester chamber RC dome

DOI: 10.15199/33.2015.09.26

(Studium przypadku)

Streszczenie. W artykule opisano uszkodzenia żelbetowej kopuły zbiornika wydzielonej komory fermentacyjnej oraz przedstawiono propozycję jej naprawy (wzmocnienia konstrukcji) przez zewnętrzne sprężenie. Wyniki otrzymane z analizy numerycznej wykazały zbyt małą nośność w charakterystycznych przekrojach kopuły i przekroczenie dopuszczalnej szerokości rys. Dla istniejącej konstrukcji dobrano zewnętrzne sprężenie i dewiatory. Ponadto przeprowadzono analizę naprężeń w betonie kopuły zbiornika w wyniku sprężenia, uwzględniając pracę zbiornika w sytuacji awaryjnej (chwilowe przepełnienie).

Słowa kluczowe: ciągną bez przyczepności, kopuła żelbetowa, stan naprężenia, wzmocnienie kopuły, zbiornik WKF.

Abstract. The paper concerns the damages of digester chamber RC dome. The proposition of tank's repair by post-tensioning the dome with external unbonded tendons is presented. The results of FEM numerical analysis indicated deficiencies of bearing capacity in characteristic section of RC dome. Calculated cracks' widths exceeded allowable values. Therefore, post-tensioning with external unbonded tendons is proposed as a method of dome strengthening. The influence of the suggested repair method on the stress state in the dome (during operation and emergency situation – tank overflow) is analyzed.

Keywords: digestion chamber, dome strengthening, reinforced dome, stress state, unbonded tendons.

Analizowany zbiornik powstał w okresie IX 1997 – V 1999 r. i jest jednym z dwóch zbiorników na terenie oczyszczalni ścieków (fotografia). Został wykonany w technologii tradycyjnej jako monolityczny, żelbetowy zbiornik cylindryczny o promieniu wewnętrznym 7,5 m. Jego ścianę (wysokość 11,0 m, grubość 0,6 m) monolitycznie połączono z kopułą stożkową grubości 0,25 m o nachyleniu $\alpha = 30^\circ$, która stanowi przekrycie komory fermentacyjnej. Mieszanka betonowa B30 (C25/30) została zaprojektowana na łamanym kruszywie bazaltowym i cementie portlandzkiem z dodatkami. Ścianę zbiornika betonowano w 5 etapach, obwodowymi pasmami o wysokości 2,0 m. Zimą betonowano ostatni segment ściany o wysokości pa-

sma 1,0 m wraz z analizowaną powłoką stożkową. Zbrojenie kopuły zbiornika stanowiły dwie siatki z prętów żebrowanych A-III (34GS) ułożone po jej stronie wewnętrznej i zewnętrznej. Zbrojenie obwodowe wykonano z prętów $\phi 10$ mm w rozstawie co 150 mm, zaś zbrojenie promieniowe kopuły – z prętów $\phi 10$ mm ułożono o rozstawie 200 mm w dolnej części kopuły, a w miejscu maksymalnego naprężenia rozciągającego – co 130 mm. Kopuła ocieplona jest warstwą styropianu grubości zaledwie 50 mm. Powierzchnię kopuły wykończono wyprawą cementową.

Od momentu oddania obiektu do użytkowania, zbiornik przez ponad 11 lat stanowił najważniejszy element inwestycji. Powódź w maju 2010 r. spowodowała długotrwały przestój obiektu, doprowadzając do sedimentacji osadu. Po powodzi przeprowadzono prace naprawcze polegające na wymianie rurociągów technologicznych, usunięciu starej wewnętrznej powłoki ochronnej oraz położeniu nowej, dwukomponentowej żywicy. Po zakończeniu prac remontowych rozpoczęto napełnianie zbiornika. Gdy ciecz osiągnęła poziom eksploatacyjny, pojawiły się wycieki z dolnej części kopuły. Po odsłonięciu ocieplenia zauważono liczne rysy na kopule. Zaistniała sytuacja zmusiła zarządcę do podjęcia decyzji o ponownym wyłączeniu zbiornika z eksploatacji.

Inwentaryzacja i badania doświadczalne kopuły

W celu określenia przyczyn uszkodzeń oraz sposobu naprawy kopuły przeprowadzono badania doświadczalne. Zakres prac obejmował: inwentaryzację zarysowania, badania nieniszczące betonu i pobranie materiału do analizy chemicznej. Na powierzchni kopuły znajdowały się dwie główne rysy obwodowe: pierwsza szerokości 0,3 – 0,6 mm była w miejscu połączenia ściany z kopułą, druga zaś w odległości ok. 2,40 m od zewnętrznej krawędzi ściany, a jej rozwarcie wynosiło średnio 1,6 mm, choć lokalnie osiągało 2,5 mm. Ponadto, w kopule zinventaryzowano 40 rys promienistych, szerokości $0,2 \div 1,1$ mm. Za pomocą sklerometru określono średnią wytrzymałość na ściskanie betonu kopuły, która wynosiła 31,98 MPa, przy odchyleniu standardowym $s = 3,56$ MPa. Pobrany materiał w formie odkuwek betonu poddano analizie chemicznej, zgodnie z [3]. Uzyskane wyniki wskazały, że pH betonu wynosi $11,30 \div 12,00$ i jest większe od minimalnego ($\text{pH} = 10,80$), zapewniającego właściwości ochronne stali zbrojeniowej [8]. Dodatkowo wykonano analizę statyczną kopuły. Uwzględniono wszystkie istotne sytuacje występujące w okresie eksploatacji zbiornika, w tym chwilowe przepełnienie. Analiza wykazała możliwość wystąpienia



Widok dwóch zbiorników WKF

View of two separated digester chambers

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: mmidro@pk.edu.pl

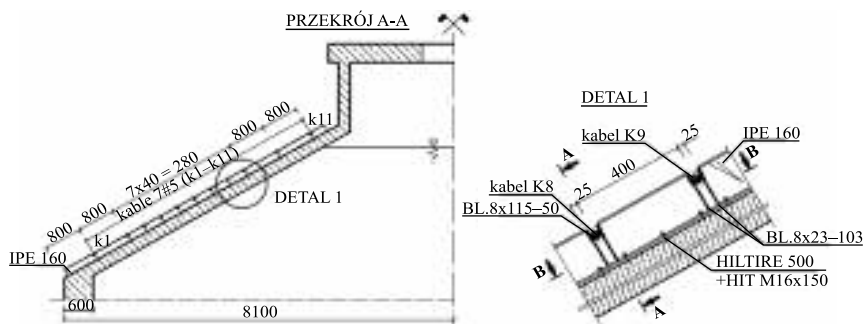
nia naprężeń rozciągających przekraczających średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe ($f_{ctm} = 2,6$ MPa dla C25/30). W analizie maksymalne naprężenia rozciągające na kierunku południkowym ($\sigma_{ct} = 3,10$ MPa) pokrywają się z główną rysą obwodową na kopule. Naprężenia rozciągające w kierunku równoleżnikowym są również większe od dopuszczalnych.

Koncepcja naprawy i wzmocnienia kopuły

W artykule przedstawiono koncepcję przywrócenia przydatności użytkowej zbiornika. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń sprawdzających i analiz studialnych [4, 5, 7] zaproponowano rozwiązanie obejmujące iniekcję rys na kopule zbiornika oraz wykonanie zewnętrznego sprężenia. Przyjęto, że konstrukcja przekrycia zostanie uszczelniona. W przypadku głównych rys obwodowych i promieniastych zaproponowano zainiektowanie kompozycjami żywicy epoksydowych z regulowanym czasem wiązania do 10 min. W obliczeniach wykazano, że powierzchnia zbrojenia kopuły nie spełnia warunku minimalnego zbrojenia zbiorników na ciecze. Zaproponowano wzmocnienie przez zewnętrzne sprężenie, które obejmuje dobór siły sprężającej, wyznaczenie strat siły sprężającej, obliczenie liczby kabli i ich rozmieszczenie na wysokości kopuły oraz sprawdzenie dopuszczalnych naprężeń w żelbetowej kopule. Przyjęto, iż żelbetowa kopuła zostanie obwodowo sprężona zewnętrznymi cięgnami bez przyczepności. Zastosowano kable siedmiodrutowe typu $7\phi 5$ mm o polu powierzchni $A_p = 150$ mm² [2]. Założono, że całość obciążenia od parcia cieczy na kopułę zbiornika przejmuje zbrojenie sprężające. Przyjęto naciąg każdego kabla z siłą 220 kN. Do przekazania sprężenia na konstrukcję zaprojektowano dewiatory stalowe w postaci 12 dwuteowników IPE160 oraz 4 stalowe belki o przekroju skrzynkowym, pełniące również funkcję pilastrów. Elementy zamocowano do żelbetowej konstrukcji kopuły za pomocą kotew (rysunek 1).

Siła sprężająca została zamodelowana w programie MES jako obciążenie zastępcze. W analizie stanu naprężeń w betonie kopuły rozważono sytuację:

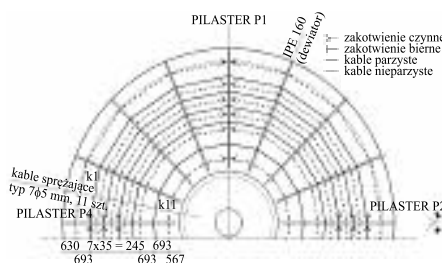
- początkową – zbiornik pusty, zimą;
- użytkową – zbiornik użytkowany, wypełniony cieczą w okresie zimowym;
- awaryjną – zbiornik przepełniony w okresie zimowym.



Rys. 1. Przekrój kopuły i szczegół ułożenia kabli sprężających

Fig. 1. Cross-section of the dome and prestressed cables placement detail

W strefie środkowej kopuły zastosowano kable sprężające w rozstawie co 400 mm, natomiast w pozostałych pasmach – kable co 800 mm. Ze względu na straty siły sprężającej założono w dolnej części kopuły dwa kable na każdym obwodzie, kotwione naprzemiennie w 4 pilastrach stalowych. W górnej części kopuły zastosowano kable o długości równej obwodowi kopuły, kotwione naprzemiennie w 2 pilastrach (rysunek 2). W analizie naprężeń [6] wykazano,



Rys. 2. Rozmieszczenie kabli sprężających, pilastrów i dewiatorów na kopule zbiornika

Fig. 2. Location of tendons, pilasters and deviators on the tank dome

że największe naprężenie rozciągające w kierunku południowym występuje w przypadku sytuacji awaryjnej na zewnętrznej powierzchni kopuły i wynosi $\sigma_{ct} = 2,02$ MPa. Tym samym wykazano, że sprężenie uniemożliwiło powtórne zarysowanie przekroju kopuły, a zatem spełnione jest kryterium szczelności [1].

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań i obliczeń stwierdzono, że:

- przyjęta przed naprawą powierzchnia zbrojenia zwykłego kopuły nie spełniała obowiązujących normowych warunków minimalnego zbrojenia, tj. kryterium wod szczelności. Niezbędne było wzmocnienie kopuły. Zainiektowanie rys nie byłoby rozwiązaniem wystarczającym;
- przedstawione rozwiązanie wzmocnienia kopuły przez zewnętrzne sprężenie spełnia kryterium szczelności. Odpowiednio dobrane zbrojenie sprężające pozwala ograni-

czyć naprężenia rozciągające w betonie, zapewniając spełnienie stanu granicznego użyteczności również w przypadku sytuacji awaryjnej pracy (przepełnienie);

■ w sytuacjach, gdy szybkie przywrócenie przydatności eksploatacyjnej zbiornika jest priorytetem inwestora (niska wydajność pozostałych zbiorników, znaczne koszty wyłączenia zbiornika) należy dokonać naprawy przez sprężenie kopuły. Takie rozwiązanie jest szybsze w realizacji od tradycyjnego rozwiązania polegającego na zastosowaniu dodatkowej żelbetowej powłoki. Należy podkreślić, że wersja sprężona może okazać się rozwiązaniem tańszym, w sytuacji uwzględnienia w zestawieniu kosztów krótszego okresu wyłączenia obiektu z eksploatacji.

Literatura

- [1] PN-EN 1992-3, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze, listopad 2008.
- [2] Ajdukiewicz A., Mames J., Konstrukcje z betonu sprężonego, Polski Cement, Kraków, 2008.
- [3] Czarniecki L., Emmons P. H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [4] Dyduch K., Płachecki M., Sieńko R., Wzmocnienie żelbetowej komory fermentacyjnej i odbudowa jej przekrycia stożkowego po wybuchu, Inżynieria i Budownictwo nr 12/2013, s. 642 – 654.
- [5] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na ciecze. PWN, Warszawa, 2013.
- [6] Kot M., Design for dome strengthening of separated digester tank, Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, Kraków, 2015.
- [7] Seruga A., Seruga T., Midro M., Modernizacja Wydzielonych Komór Fermentacyjnych po czterdziestu pięciu latach eksploatacji, Czasopismo Techniczne, seria: Budownictwo, 2-B/2011, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.
- [8] Wieczorek G., Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2002.

Przyjęto do druku: 12.08.2015 r.