

Analiza statyczna żelbetowego zbiornika fermentacyjnego w oczyszczalni ścieków

Dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel, mgr inż. Kamil Kuczyński, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

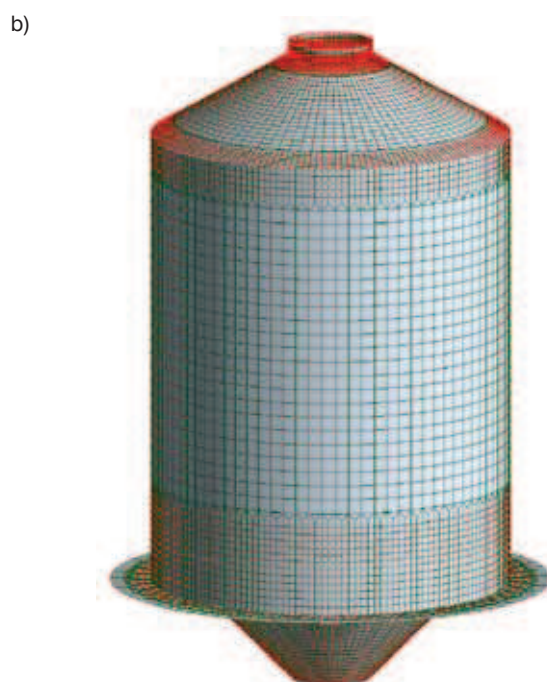
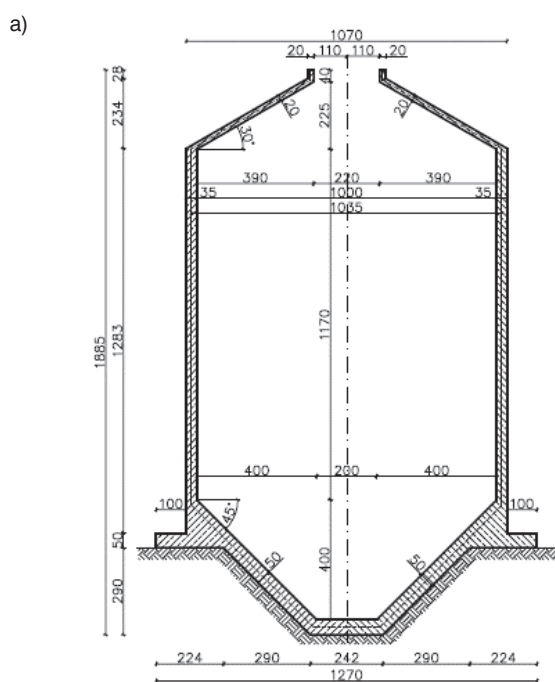
Zmniejszanie się zasobów energetycznych oraz postępująca degradacja środowiska naturalnego wymusiły na społeczeństwie konieczność poszukiwania nowych, alternatywnych źródeł energii. Jednym z takich źródeł jest biogaz – gaz palny powstały w wyniku fermentacji odpadów organicznych, z którego można otrzymać energię elektryczną i ciepłą. Biogaz może być produkowany w biogazowniach rolniczych nastawionych na produkcję biogazu z biomasy roślinnej, odchodów zwierzęcych lub odpadów organicznych albo, jako produkt uboczny w oczyszczalniach ścieków. Na szczególną uwagę zasługuje sposób pozyskiwania biogazu w wyniku fermentacji substancji organicznych zawartych w odpadach komunalnych przetwarzanych w miejskich oczyszczalniach ścieków. Do tego celu buduje się tzw. wydzielone komory fermentacyjne (WKF), w których zachodzi beztlenowa fermentacja osadów. Wydzielone komory fermentacyjne w oczyszczalni ścieków projektowane są jako zbiorniki żelbetowe i sprężone, jedno- lub wielokomorowe o różnych kształtach przekrojów poziomych i pionowych, otwarte lub zamknięte [1, 2]. Częściej stosuje się

komory zamknięte, które umożliwiają podgrzewanie i mieszanie fermentującego osadu, a także pozyskiwanie i wstępne magazynowanie wydzielającego się biogazu. Skróceniu ulega okres fermentacji, co redukuje nakłady inwestycyjne oraz pozwala stosować komory o mniejszej objętości.

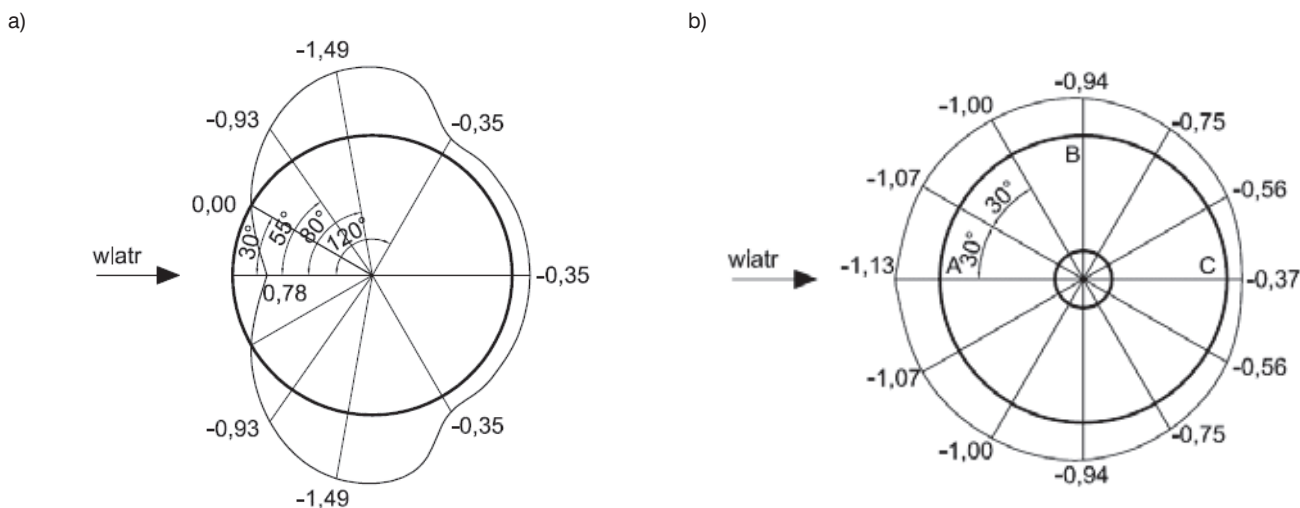
W artykule omówiono wyniki analizy statycznej przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego żelbetowego zamkniętego zbiornika WKF na ścieki. Obliczenia statyczne zbiornika przeprowadzono metodą elementów skończonych dla dwóch wariantów modelu podłoża gruntowego – podłoże nieodkształcalne i sprężyste.

2. Charakterystyka zbiornika WKF

Kształt zamkniętych komór fermentacyjnych powinien być tak dobrany, aby zapewnione były optymalne warunki fermentacji oraz zminimalizowane straty ciepła przez obudowę komory. W przypadku zbiornika o przekroju kołowym zaleca się, aby stosunek wysokości (h) do średnicy komory (d) wynosił od 1:1 do 1,25:1 [1]. Odpowiedni stosunek h/d ma na celu umożliwienie maksymalnego wykorzystania naturalnego mieszania



Rys. 1. Monolityczny żelbetowy zbiornik fermentacyjny na ścieki: a) przekrój pionowy zbiornika, b) model obliczeniowy zbiornika przyjęty do analizy statycznej (MES)



Rys. 2. Rozkład ciśnienia wiatru (wartości obliczeniowe w kN/m²) na powierzchni zewnętrznej zbiornika [3]: a) w przekroju poziomym ściany, b) w przekroju poziomym powłoki przekrycia

się zawartości komory wskutek wyphywania ku górze wydzielającego się gazu fermentacyjnego. Przekrycie komory powinno mieć kształt stożka ściętego lub kopuły o pochyleniu 30–45°. Utworzona w ten sposób przestrzeń w górnej części komory umożliwi gromadzenie wydzielającego się biogazu, skąd jest on następnie odprowadzany do zbiorników magazynujących.

Uwzględniając zalecenia technologiczne do analizy statycznej, przyjęto żelbetowy zbiornik fermentacyjny składający się z trzech powłok połączonych monolitycznie (rys. 1a). Komora cylindryczna zbiornika o grubości ściany 35 cm ma średnicę wewnętrzną 10 m i wysokość 12,83 m. Przekrycie stanowi powłoka stożkowa nachylona pod kątem 30° o wysokości 2,34 m i grubości ściany 20 cm. W przekryciu przewidziano otwór technologiczny o średnicy 2,20 m wzmocniony dodatkowym wieńcem o wysokości 40 cm i szerokości 20 cm. Dno zbiornika wykonano w postaci odwróconego stożka ściętego grubości 50 cm, nachylonego pod kątem 45° i wysokości 2,90 m. Całkowita objętość zbiornika fermentacyjnego wynosi 1124 m³.

Przyjęto lokalizację zbiornika WKF w Białymstoku na terenie oczyszczalni ścieków (IV strefa obciążenia śniegiem [4] i I strefa obciążenia wiatrem [5]). W obliczeniach założono beton klasy C30/37, stal gatunku 34GS oraz izolację cieplną zbiornika z wełny mineralnej (ściana) i styroduru (przekrycie stożkowe). Pokrywą otworu technologicznego w przekryciu zaprojektowano jako konstrukcję stalową, do której przymocowano mieszadło oraz urządzenia pomocnicze. Zbiornik zaprojektowano na klasę szczelności „1” wg PN-EN 1992–3 [6], w której maksymalna dopuszczalna szerokość rysy wynosi 0,2 mm.

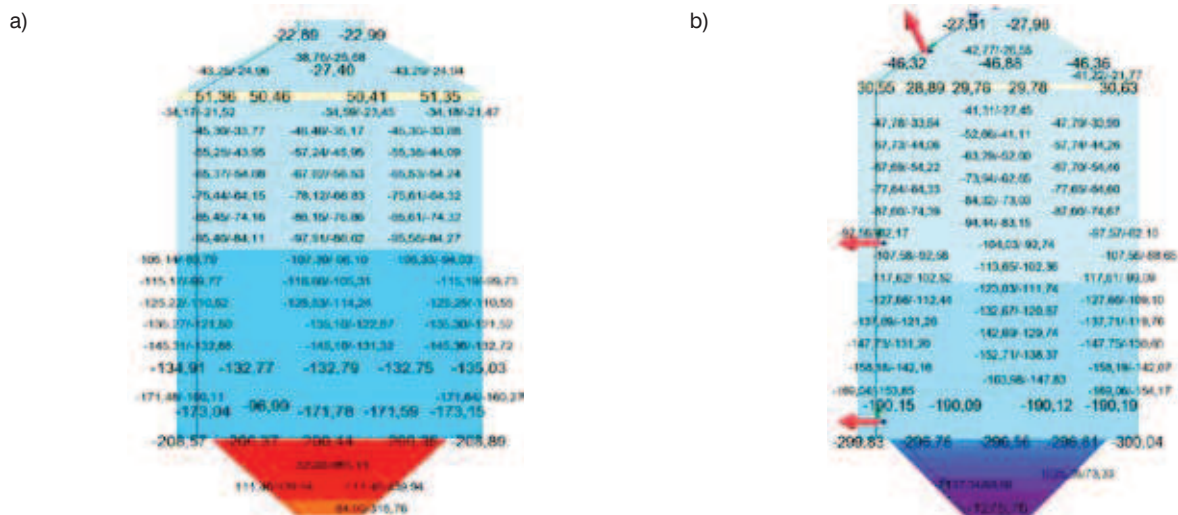
W celu zminimalizowania naprężeń termiczno-skurczowych we wczesnym okresie dojrzewania betonu przewidziano zastosowanie taśm uszczelniających z tworzywa sztucznego na obwodzie całego zbiornika w miejscu styku ścian z dnem oraz przekryciem (przerwy robocze), a także w pionowych połączeniach segmentów betonowanych w różnych okresach czasu.

3. Analiza statyczna zbiornika (MES)

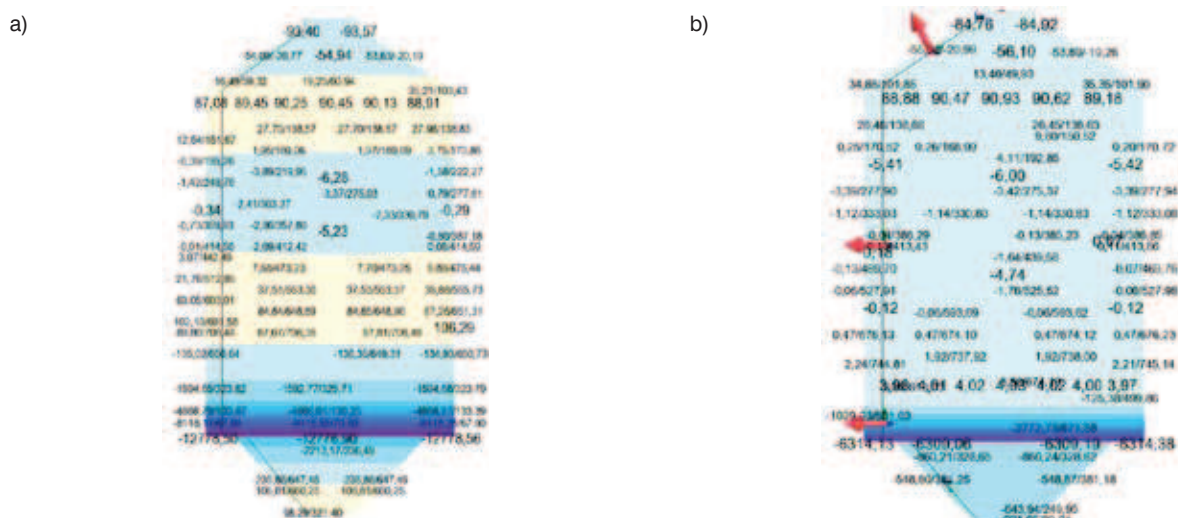
Obliczenia statyczne metodą elementów skończonych zbiornika WKF przeprowadzono przy użyciu programu Autodesk – Robot Structural Analysis Professional [7]. Model obliczeniowy zbiornika pokazany na rysunku 1b zbudowano z elementów powłokowych o nazwie „panel”. Poszczególnym „panelom” przypisano założone grubości przekrojów elementów oraz charakterystyki materiałowe (podane w pkt. 2). Przyjęto następującą dyskretyzację zbiornika:

- powłokę stożkową przekrycia podzielono po obwodzie na 86 odcinków oraz 23 pasma poziome o szerokości 20 cm;
- powłokę cylindryczną ściany podzielono na elementy skończone o wymiarach 38×41 cm i połączono z pierścieniową ławą fundamentową, którą zamodelowano jako panel o grubości 50 cm;
- powłokę stożkową dna podzielono na 76 odcinków oraz 21 pasm poziomych w rozstawie co 20 cm;
- płaską płytę denną podzielono na 76 odcinków i 13 pasm pierścieniowych;
- siatkę elementów skończonych dodatkowo zagęszczono w miejscach monolitycznego połączenia elementów zbiornika, tj. w strefach zaburzeń brzegowych powłok (rys. 1b).

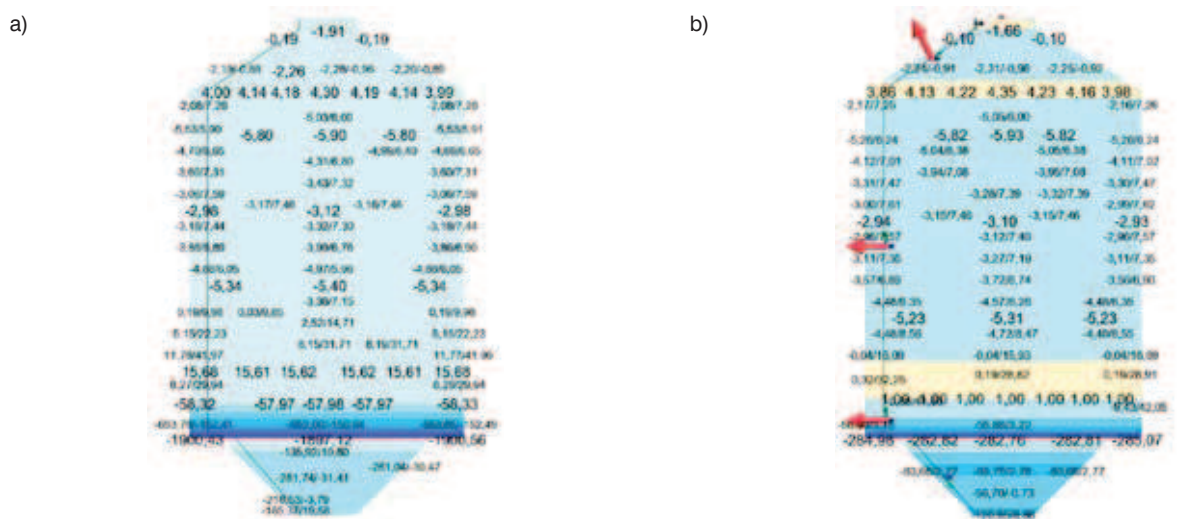
Siły wewnętrzne w żelbetowym zbiorniku WKF obliczono dla kombinacji obciążeń stałych i zmiennych, w sytuacji obliczeniowej trwałej i przejściowej, sporządzonej wg norm [8, 9]. Uwzględniono następujące obciążenia zmienne: parcie ścieków na ścianę i dno zbiornika [9, 10], użytkowe [10], dopuszczalne ciśnienie gazu w zbiorniku (ciśnienie gazu w zbiorniku kontrolowane przez zawory bezpieczeństwa) [1], śnieg [4], wiatr [5], oddziaływanie termiczne [11]. Uwzględnione w obliczeniach zbiornika oddziaływania termiczne (latem i zimą) wynikają z różnicy temperatury między wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnią elementu oraz różnicy między średnią temperaturą elementu a temperaturą montażu konstrukcji. Założono, że w zbiorniku będzie zachodzić proces fermentacji mezofilowej, dla której przyjęto temperaturę $T=37^{\circ}$. Oddziaływanie wiatru na konstrukcję zbiornika wyznaczone w I strefie



Rys. 3. Mapy sił południkowych w zbiorniku, kN/m: a) wariant I, b) wariant II [3]



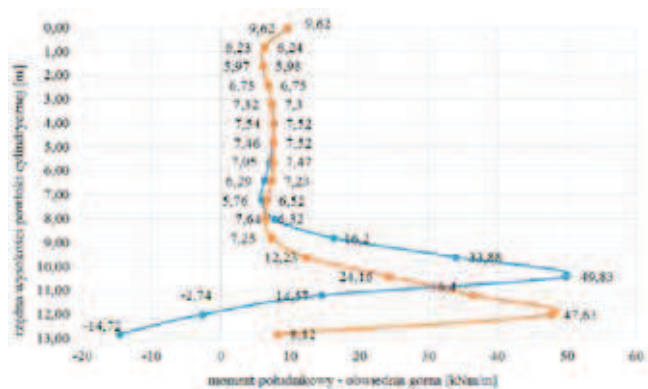
Rys. 4. Mapy sił równoleżnikowych w zbiorniku, kN/m: a) wariant I, b) wariant II [3]



Rys. 5. Mapy momentów południkowych w zbiorniku, kNm/m: a) wariant I, b) wariant II [3]



Rys. 6. Siła równoleżnikowa w cylindrycznej ścianie zbiornika, kN/m (wariant I – kolor niebieski, wariant II – kolor brązowy)



Rys. 7. Moment południkowy w cylindrycznej ścianie zbiornika, kNm/m (wariant I – kolor niebieski, wariant II – kolor brązowy)

obciążenia wiatrem pokazano na rysunku 2. Szczegółową analizę obciążeń w rozpatrywanym zbiorniku zamieszczono w pracy [3].

Analizę statyczną MES żelbetowego zbiornika fermentacyjnego wypełnionego ściekami wykonano numerycznie w dwóch wariantach posadowienia: **wariant I** – model obliczeniowy zbiornika na podłożu nieodkształcalnym, **wariant II** – model obliczeniowy zbiornika na podłożu sprężystym (model Winklera). W wariantcie II do obliczeń statycznych przyjęto następujące warunki gruntowo-wodne: poziom wód gruntowych znajduje się na głębokości 7,80 m poniżej poziomu terenu; na głębokości do 6,5 m występuje piasek średni o $I_d = 0,34$, a poniżej tego poziomu występuje glina pylasta o $I_l = 0,33$. Dla obliczonego obciążenia dna zbiornika (fundamentu) $49,07 \text{ kN/m}^2$ i warunków gruntowo-wodnych określono współczynnik sprężystości podłoża $K_z = 66978 \text{ kN/m}^3$, przyjęty w obliczeniach numerycznych.

4. Wyniki obliczeń numerycznych

Uzyskane rezultaty z obliczeń numerycznych MES przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5 w postaci map wybranych sił wewnętrznych w konstrukcji zbiornika, porównując dwa warianty obliczeniowe: a) **wariant I** – zbiornik na podłożu sztywnym, b) **wariant II** – zbiornik na podłożu sprężystym.

Maksymalne wartości siły równoleżnikowej i momentu południkowego w przekroju pionowym ściany zbiornika dla wariantu I i II porównano na rysunkach 6 i 7. Na wykresach (rys. 6 i 7) w miejscu połączenia ściany z dnem opartym na podłożu gruntowym widać wyraźnie wpływ modelu podłoża na wartości sił wewnętrznych w ścianie. W przypadku sił południkowych uzyskano bardzo dobrą zbieżność, w strefie zamocowania ściany różnice wyniosły do 5%.

5. Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników z analizy statycznej MES żelbetowego zbiornika fermentacyjnego w oczyszczalni ścieków sformułowano poniższe wnioski.

- W powłoce stożkowej przekrycia dla wariantu I (podłożo nieodkształcalne) i wariantu II (podłożo sprężyste) wartości sił

wewnętrznych są porównywalne. Model podłoża gruntowego nie wpływa znacząco na wartości sił wewnętrznych w przekroju zbiornika.

- W cylindrycznej ścianie w najbardziej wyężonym przekroju otrzymano 4-procentowy przyrost wartości siły równoleżnikowej: wariant I – siła $707,35 \text{ kN/m}$, wariant II – siła $735,61 \text{ kN/m}$. Natomiast znaczące różnice w wartościach sił wewnętrznych (nawet do kilkuset procent) występują w miejscu monolitycznego połączenia ściany z pierścieniową ławą fundamentową i dnem stożkowym, czyli w strefie zaburzeń stanu błonowego elementów powłokowych zbiornika.
- W powłoce stożkowej dna zbiornika wystąpiły największe różnice w wartościach sił wewnętrznych w obu wariantach. Z porównania obu wariantów obliczeń statycznych zbiornika wynika, że na rozkład sił wewnętrznych w elementach powłokowych zbiornika ma wpływ nie tylko przyjęty w modelu obliczeniowym rodzaj podłoża gruntowego (model sztywny czy sprężysty model Winklera), ale również zaobserwowano znaczący wpływ oddziaływania termicznego.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WBiłŚ/2/2017 i sfinansowane ze środków MNiSW.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na ciecze, PWN, Warszawa, 2013
- [2] Płaskowski Z., Roman M., Konstrukcje budowlane w oczyszczalniach ścieków, Arkady, Warszawa, 1975
- [3] Kuczyński K., Cylindryczny zbiornik fermentacyjny w biogazowni. Praca dyplomowa magisterska, WBiłŚ, Politechnika Białostocka, Białystok, 2016
- [4] PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- [5] PN-EN 1991-1-4:2005 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- [6] PN-EN 1992-3 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecze
- [7] Autodesk – Robot Structural Analysis Professional 2015
- [8] PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji
- [9] PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki
- [10] PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1 – Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [11] PN-EN 1991-1-5:2005 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-5: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania termiczne