

Analiza optymalnej zbieżności stożka komina żelbetowego

Mgr inż. Paweł Kotas, Politechnika Wrocławska, dr hab. inż. Andrzej Ubysz, prof. Politechniki Wrocławskiej

1. Wprowadzenie

W związku z wymogami dotyczącymi ochrony środowiska zdarzają się sytuacje, w których projektowane kominy wznoszone są na coraz większe wysokości. Ma to na celu rozproszenie zanieczyszczeń tak, aby na powierzchni terenu zawartość szkodliwych substancji nie przekraczała dozwolonych norm ekologicznych. Rozpoczynając prace nad projektem komina, należy poznać wymogi technologiczne oraz środowiskowe, które spełnić będzie musiał projektowany obiekt. Najważniejszymi danymi wejściowymi do projektu są: temperatura na wejściu do komina, skład chemiczny gazów, sposób doprowadzenia i odprowadzenia gazów. Na podstawie tych danych określa się siłę ciągu, jaką powinien generować komin, a jest ona zależna głównie od wysokości oraz przekroju drąży kominowej. Na siłę ciągu wpływ mają również straty spowodowane tarciem (zależne od chropowatości wewnętrznych ścian komina) oraz średnia prędkość przepływu gazów spalinowych w kominie (zależna od wysokości komina). Po wyznaczeniu wymaganej siły ciągu (naturalnego lub wspomaganego mechanicznie) można

prześć do wyznaczenia wysokości i szerokości wylotowej komina. Mając te dwie dane można, znając pozostałe uwarunkowania środowiskowe i konstrukcyjne (obciążenie wiatrem, obciążenia termiczne), przejść do obliczeń wytrzymałościowych trzonu komina mających na celu kompletne zaprojektowanie konstrukcji. Na tym etapie należy zacząć szukać najlepszego rozwiązania zarówno, jeśli chodzi o aspekt ekonomiczny jak i bezpieczeństwa oraz niezawodności konstrukcji. Budowa komina niesie ze sobą szereg wyzwań projektowych. Ważnym elementem podczas etapu projektowania komina jest stworzenie projektu montażu konstrukcji i tutaj może pojawić się dylemat związany z konstrukcją szalunku. Rozwiązania konstrukcyjne pozwalają zaprojektować kominy o stałym przekroju lub zbieżne w celu oszczędności materiału. Dla kominów o stałej szerokości przekroju można stosować szalunki ślizgowe, co może znacząco skrócić czas budowy oraz obniżyć koszty montażu. Z drugiej jednak strony, zaprojektowanie takiego komina wiąże się z bardzo dużą powierzchnią, która jest obciążona wiatrem. Obciążenie wiatrem, zwłaszcza dla kominów bardzo wysokich, spowoduje pojawienie się dużych momentów, które niekorzystnie wpływają na ilość materiału niezbędną do zaprojektowania komina. W niniejszej pracy przeanalizowano różne warianty konstrukcji komina, analizując najkorzystniejszą z punktu widzenia zużycia materiału zbieżność tworzącej stożka dla zadanej wysokości komina – 300 m. Przedstawiono problem zbieżności stożka dla różnych wartości średnicy wylotowej komina.



Fot. 1.
Kminy elektrowni Rybnik, 260 oraz 300 metrów wysokości.



Fot. 2
Kminy elektrowni Kozienice. Najwyższy z kominów – 300 metrów, obecnie w trakcie skracania

2. Przedmiot analizy

2.1. Model teoretyczny

Na potrzeby analizy zbieżności zamodelowano kilka kominów o różnej szerokości wylotowej (od 5 do 15 m) dla tych samych założeń wyjściowych (klasa betonu, stali, obciążenie wiatrem itp.). Wyznaczono minimalne możliwe wartości zbieżności komina tak, aby zostały spełnione warunki normowe nośności i użyteczności. Funkcją celu jest minimalne zużycie betonu.

Parametrami zmiennymi poddanymi analizie będą zbieżność i grubość trzonu, które w procesie optymalizacji będą tak zmieniane, aby w każdym z przekrojów

w sposób maksymalny został wykorzystany materiał, ale tak, aby nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości naprężeń w betonie.

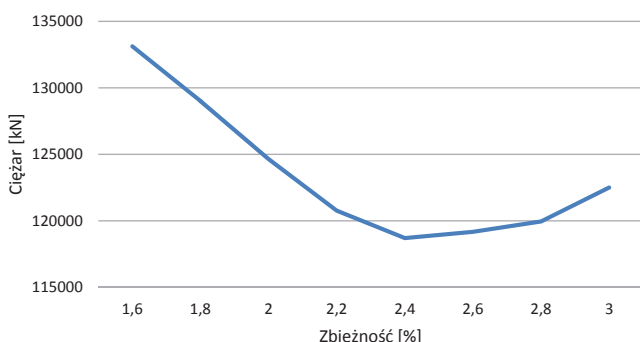
Zgodnie z normą [10] wartość naprężenia w betonie musi spełniać warunek:

$$\sigma_b \leq 0,65 f_{ck} \quad (1.1)$$

gdzie: σ_b – naprężenia w rozpatrywanym przekroju, f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie.

Norma nakazuje również przeprowadzenie obliczeń w stadium realizacji przyjmując graniczne naprężenia równe $0,4 f_{ck}$. Do sformułowania modeli przyjęto jednak taki sposób realizacji konstrukcji, aby w określonych przekrojach przekraczanie wartości granicznych w fazie realizacji następowało już po osiągnięciu przez beton pełnej wytrzymałości.

Założenia konstrukcyjne: wysokość komina 300 m, szerokość wylotowa zmienna od 5 do 15 m, klasa betonu C20/25 (najniższa możliwa zgodnie z [1]) oraz dla porównania C25/30. Zgodnie z [5] minimalna grubość płaszcza wynosi 20 cm. Założono skokową zmianę grubości trzonu co 5 cm.



Rys. 1. Zależność ciężaru komina od zbieżności

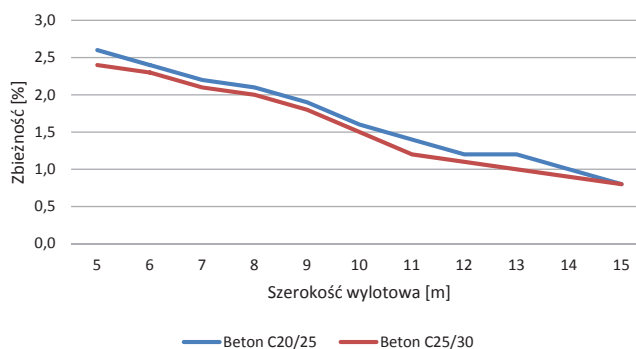
Opracowano algorytm pozwalający wyznaczyć minimalny ciężar komina w zależności od jego szerokości wylotowej. Założono w algorytmie skokową zmianę zbieżności co 0,2% i sprawdzono, jak dla szeregu zamodelowanych konstrukcji zmienia się minimalny ciężar. Za pomocą niniejszego algorytmu pokazano, jak w zależności od średnicy wylotowej zmieniają się zbieżność i grubość ścian trzonu żelbetowego oraz jak grubość ściany wpływa na stateczność trzonu komina i ciężar całej konstrukcji. Wynik analizy zależności ciężaru komina od zbieżności pokazano na rysunku 1. Określono minimum, do którego dąży ta zależność funkcyjna.

2.2. Opis przeprowadzonej analizy

Z wykresu (rys. 1) wynika, że istnieje minimum ciężaru konstrukcji komina dla określonej zbieżności.

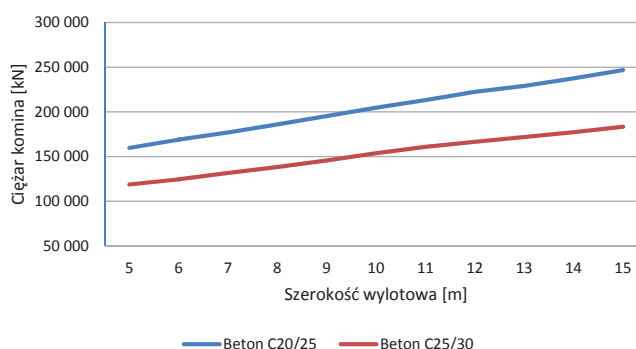
W przypadku komina z betonu C25/30, wysokości 300 m i szerokości wylotowej 5 m najmniejsze zużycie materiału otrzymuje się dla zbieżności 2,4% i jest to zbieżność jednostajna na całej wysokości komina (kryterium ograniczające).

Po przeprowadzeniu analizy dla różnej średnicy otworu wylotowego, w której jako kryterium celu przyjęto również minimalny ciężar całkowity konstrukcji, otrzymano następujące rezultaty:



Rys. 2. Wykres zbieżności tworzącej stożka w zależności od szerokości wylotowej komina

Z wykresu (rys. 2) wynika, że wraz ze wzrostem szerokości wylotowej komina należy zmniejszać zbieżność, aby zachować minimalne zużycie materiału. Dla zadanego zakresu szerokości wylotowych (5–15 m) wykazano, że kominy wykonane z betonu wyższej klasy powinny być konstruowane z mniejszą zbieżnością. Na granicy rozpatrywanego zakresu przy modelach kominów o średnicy wylotowej powyżej 14 metrów optymalna zbieżność ma zbliżoną wartość. W przypadku konstrukcji z beto-



Rys. 3. Wykres ciężaru trzonu komina zależnie od szerokości wylotowej i klasy betonu

nu o niższej klasie przeniesienie obciążeń związane będzie ze zwiększoną grubością ściany trzonu w porównaniu do betonu o większej wytrzymałości.

Przeanalizowano również całkowity ciężar komina dla dwóch klas wytrzymałości betonu, przyjmując, że zbieżność komina jest optymalna dla danej szerokości wylotowej.

Na wykresie (rys. 3) widać, że stosując beton tylko o klasę wyższą można zaoszczędzić ok. 33% materiału, co może znacząco obniżyć koszty wykonania komina. Kolejnym etapem analizy komina są wychylenie oraz stateczność konstrukcji.

2.3. Stateczność komina

Na podstawie wzoru:

$$\varphi_w = \frac{P_{kr}}{N_0} \quad (1.2)$$

Wyznaczono dla każdego z modeli wartość współczynnika stateczności trzonu komina, uwzględniając nadal, że zbieżność komina jest optymalna dla danej szerokości wylotowej.

Zgodnie z [1] wartość współczynnika stateczności nie powinna być mniejsza od 2,5, co w skrajnym przypadku dla szerokości wylotowej 5 m oraz klasy betonu C25/30 nie jest spełnione. Można zatem pośrednio wnioskować, że kolejne zwiększenie klasy betonu dla kominów wysokich o małych średnicach wylotowych i maksymalnym wykorzystaniem materiału może okazać się nieopłacalne właśnie ze względu na brak zapewnienia stateczności konstrukcji przy maksymalnym wykorzystaniu nośności betonu.

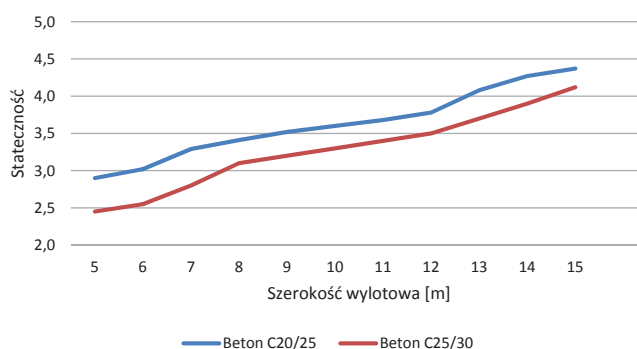
2.4. Wychylenie komina

Do obliczenia wychylenia komina zastosowano metodę Mohra (rys. 5). Dla betonu C25/30 wartość wychylenia równa 1,2 m (dla szerokości wylotowej 5 m) jest już blisko wartości granicznej (równiej $H/200$), różnica wychyleń od pionu o wartość 0,4 m w przypadku zmiany z klasy C20/25 na C25/30 pozwala sądzić, iż wyższa klasa betonu mogłaby spowodować przekroczenie dopuszczalnej wartości wychylenia. Spora różnica w wartości wychylenia dla obu klas grubością ścian, która warunkuje moment bezwładności przekroju trzonu.

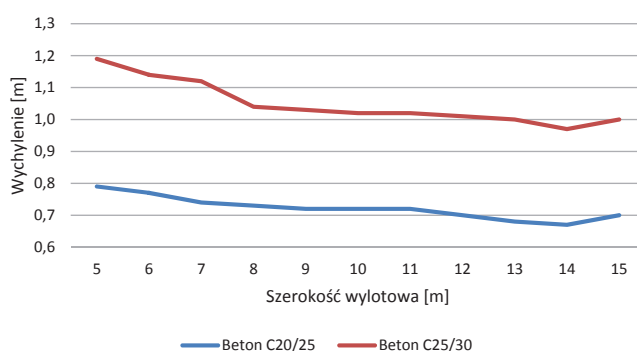
3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę zbieżności tworzącej stożka komina żelbetowego. Porównując kilkanaście modeli kominów o wysokości 300 m dowiedziono, że nie można jednoznacznie stwierdzić, iż zbieżność komina jest wartością, którą na etapie projektowania można przyjąć na podstawie samej tylko wysokości. Warto przeanalizować warianty konstrukcyjne zakładające inną, wyższą niż minimalna, klasę betonu oraz sprawdzić, w jaki sposób wpłynie to na ilość zużytego materiału. W przypadku kominów o niższych wysokościach, często łatwość i koszt montażu dla kominów o stałym przekroju może przeważać nad zwiększonym kosztem dużej ilości materiału. W przypadku jednak rozpatrywanego komina o wysokości 300 m lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie komina zbieżnego.

Artykuł ten jest wstępem do kolejnych analiz, które pomogą opisać zależności zbieżności komina oraz



Rys. 4. Wykres wartości współczynnika stateczności zależnie od szerokości wylotowej i klasy betonu



Rys. 5. Wykres wychylenia wierzchołka komina zależnie od szerokości wylotowej i klasy betonu

np. minimalnego ciężaru od jego wysokości oraz ustalić sposób doboru klasy betonu w zależności od uwarunkowań technologicznych i środowiskowych. Przyszłe analizy modyfikujące warunki ograniczające (np. niejednostajna zbieżność na wysokości) pozwolą na uwzględnienie opłacalności tworzenia konstrukcji o stałym przekroju w wyższych partiach komina, w których to montaż za pomocą deskowania ślizgowego jest szczególnie pożądany. Założenie zmiennej zbieżności na wysokości komina pozwoli w jeszcze lepszy sposób opisać możliwości związane z konstruowaniem kominów wysokich.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Meller M., Pacek M., Kminy przemysłowe. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001
- [2] Włodarczyk W., Kowalski A., Pietrzak K., Projektowanie wybranych konstrukcji przemysłowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995
- [3] Noakowski P., Budownictwo przemysłowe w różnych krajach świata IV Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo w Energetyce, Turów, 2004
- [4] Łodygowski T., Kąkol W., Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich. Biblioteka Alma Mater, <http://www.se.put.poznan.pl/alma Mater/>
- [5] PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem
- [6] PN-88/B-03004 Kminy murowane i żelbetowe – Obliczenia statyczne i projektowanie