



Kominy termalne – analiza techniczno-ekonomiczna i ocena możliwości wykorzystania w warunkach polskich

Piotr Pyrka, Zbigniew Rogala

*Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych
E-mail: piotr.pyrka@pwr.edu.pl, zbigniew.rogala@pwr.edu.pl*

STRESZCZENIE

Znane metody konwersji energii pozwalają na przetwarzanie ciepła o temperaturze nie niższej niż 40°C, podczas gdy dysponujemy znacznymi źródłami ciepła na poziomie 30–35°C: powietrze z szybów wydechowych kopalni (w Polsce rzędu gigawatów). W celu wykorzystania tych zasobów zaproponowano adaptację kominu słonecznego i przeprowadzono techniczno-ekonomiczną analizę możliwości zastosowania rozwiązania w warunkach polskich. Przy obecnym stanie techniki możliwa jest rentowna eksploatacja źródeł o wydajnościach powyżej 3500 m³/s. Analiza potencjału zaproponowanej technologii na przykładzie rocznych rozkładów temperatur wykazała, że komin geotermalny nie wywiera negatywnego wpływu na wentylację szybu, co jest kluczowe z punktu widzenia eksploatacji kopalni. Adaptacja rozwiązania kominu słonecznego jest możliwa. Badania w dziedzinie kominów słonecznych i geotermalnych powinny się przede wszystkim skupić na rozwoju alternatywnych konstrukcji lekkich i tanich kominów.

SŁOWA KLUCZOWE: *komin słoneczny, niskotemperaturowe ciepło, wentylacja kopalni*

1. WPROWADZENIE

Obecna polityka energetyczna zmierza do poprawy efektywności wykorzystania energii poprzez zwiększanie sprawności już istniejących rozwiązań oraz zagospodarowanie nowych źródeł ciepła, dotąd traktowanych jako odpadowe. W związku z tym podejmowane są próby wykorzystania źródeł ciepła charakteryzujących się coraz niższym poziomem temperatur. Znanych jest wiele metod konwersji niskotemperaturowego ciepła na efekt użyteczny.

Znane i stosowane są metody adsorpcyjne, które w zależności od technologii umożliwiają konwersję na chłód ciepła o temperaturze nie mniejszej niż 50°C [8] oraz konwersję na chłód lub usunięcie wilgoci ze strumienia gazu z wykorzystaniem ciepła o temperaturze nie mniejszej niż 40°C [3].

Dobrze opanowana i powszechnie stosowana jest metoda konwersji energii cieplnej na energię elektryczną w układach ORC przy temperaturze źródła ciepła przekraczającej 40°C [6].

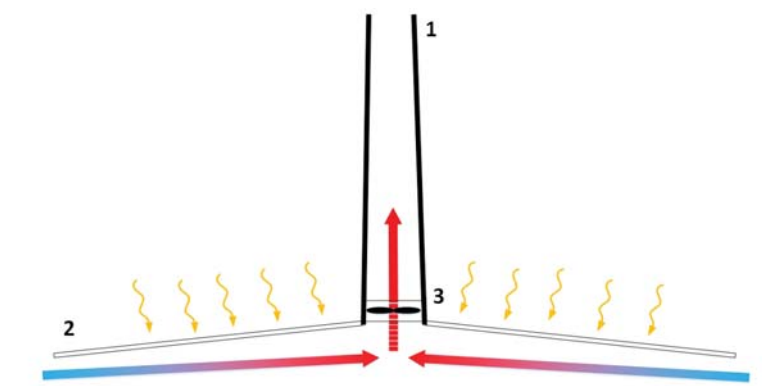
Znana jest także technologia kominów słonecznych, będąca w fazie wdrożenia umożliwiająca konwersję promieniowania słonecznego na energię elektryczną [14]. Rozwiązanie wykorzystuje zjawisko konwekcyjnego przepływu powietrza w pionowych kanałach (np. kominach), wywołane różnicą gęstości powietrza atmosferycznego i powietrza znajdującego się w kanale [14].

Omówione rozwiązania umożliwiają konwersję źródeł ciepła o temperaturze nie mniejszej niż 40°C. Tymczasem dysponujemy ogromnymi zasobami energetycznymi na poziomie 30–35°C tj. ciepłem geotermalnym zawartym w powietrzu wydechowym z szybów kopalni. Potencjał energetyczny tego źródła ciepła w Polsce szacuje się w gigawatach [12]. Metoda konwersji ciepła na tym poziomie temperatur, biorąc pod uwagę potencjał energetyczny źródła, umożliwiłaby znaczącą poprawę efektywności wykorzystania energii na skalę światową.

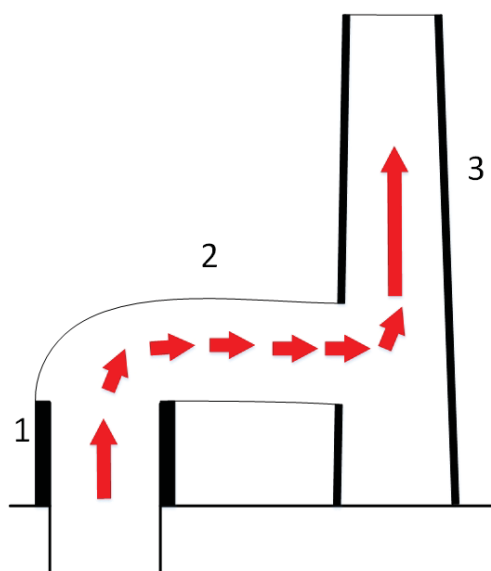
Proponowana jest adaptacja rozwiązania komina słonecznego do odzysku ciepła pochodzenia geotermalnego zawartego w powietrzu wydechowym usuwanym z kopalni. Zasadę działania komina słonecznego przedstawiono na rys. 1 i omówiono szczegółowo w [14]. Adaptacja rozwiązania komina słonecznego polega na wykorzystaniu źródła ciepła, jakim jest powietrze wydechowe kopalni, w miejsce energii słonecznej absorbowanej przez kolektory. Adaptacja komina słonecznego do nowego zastosowania wymaga rozważenia szeregu zagadnień wynikających ze specyfiki pracy kopalni, które zostały omówione w dalszej części artykułu. Możliwa jest, tak jak w przypadku komina słonecznego, instalacja turbiny wiatrowej wewnątrz komina lub wykorzystanie komina jako źródła pasywnej wentylacji kopalni. Schemat koncepcyjny komina geotermalnego został przedstawiony na rys. 2. Celem niniejszej pracy jest ocena możliwości konwersji niskotemperaturowego ciepła z szybów wydechowych kopalni w kominie geotermalnym. Praca komina geotermalnego została analitycznie zamodelowana w celu określenia potencjału rozwiązania w warunkach polskich i możliwości jego praktycznego zastosowania we współpracy z szybami wydechowymi kopalni. Przeprowadzono wstępną analizę ekonomiczną, umożliwiającą ocenę rentowności instalacji w zależności od wydajności szybu wydechowego przy obecnym stanie techniki i określenie kamieni milowych rozwoju technologii.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Rozwiązanie komina geotermalnego jest nowatorskie, ale bazuje na znanym i opisywanym w literaturze rozwiązaniu komina słonecznego. Xinping i Yangyang [14] na podstawie ponad 200 publikacji dotyczących kominów słonecznych opracowali obszerny przegląd aktualnej wiedzy nt. tej technologii. Jako rozważane zastosowania kominów wymienia się produkcję energii elektrycznej, rolnictwo (hodowla roślin, zagospodarowanie nieużytków rolnych), desalinację, uzyskiwanie wody pitnej, efekt chłodniczy, suszenie produktów rolnych. Jako zalety technologii autorzy wymieniają bezpie-



Rys. 1: Budowa i zasada działania komina słonecznego. Komin słoneczny składa się z komina (1), kolektorów słonecznych (2) i turbiny (3). Powietrze z otoczenia jest podsysane pod kolektory słoneczne. Powietrze znajdujące się pod kolektorami nagrzewa się, a następnie jest kierowane do komina. Turbina umieszczona w kominie odbiera energię od przepływającego powietrza



Rys. 2: Schemat koncepcyjny komina geotermalnego. Szyby wydechowe są zwykle zabudowane (1), co uniemożliwia instalację komina (3) bezpośrednio na szybie, ale wymaga połączenia komina i zabudowy szybu kanałem (2). Komin jest umieszczony blisko szybu wydechowego. W przedstawionym przypadku komin zapewnia pasywną wentylację kopalni i nie ma w nim zabudowanej turbiny

czenie, usuwanie odorów i szkodliwych substancji, łatwe sterowanie, wykorzystanie ciepła odpadowego (ciepło pochodzenia przemysłowego, biologicznego, geotermalnego), opłacalność ekonomiczną rozwiązania, korzystny wpływ na wentylację, desalinację.

Kominy słoneczne są obecnie przedmiotem wielu badań naukowych. Wśród analizowanych konstrukcji dominują jednak instalacje nie wyższe niż 10 m (najwyższa 25 m

wysokości) o średnicach mniejszych od 1 m (największa średnica 3 m) wykonane ze szkła lub plastiku. Osiągane podczas badań temperatury powietrza ze względu na niewielkie rozmiary kolektorów nie przekraczają 30°C. Planowana jest realizacja projektów komercyjnych, wśród których dominują instalacje przekraczające moc elektryczną 100 MW (typowa wysokość 1000 m, średnica 100 m i średnica kolektorów 4000 m). Według autorów [13], [14] obecnie dostępne techniki budowlane umożliwiają budowę instalacji o koszcie jednostkowym w granicach 1500–5000 PLN/m² powierzchni bocznej komina. Dogłębnej analizie poddawane są zjawiska przepływowe w kominach słonecznych [2], [4], [7], [10], [11], [15]. W celu redukcji kosztów i poprawy wskaźników ekonomicznych proponowane są alternatywne rozwiązania konstrukcyjne: kominy dmuchane [11] oraz kominy wirowe – komin zastępuje się konwekcyjnym wirem powietrza o znacznej wysokości [9]. Kominy słoneczne analizowano do tej pory głównie pod kątem wykorzystania energii słonecznej. Trwają prace nad wdrożeniem technologii. Proponowane są alternatywne konstrukcje kominów charakteryzujące się niższymi kosztami inwestycyjnymi.

3. POWIETRZE WYDECHOWE I ZABUDOWA SZYBÓW KOPALNI

Ze względu na specyfikę źródła niskotemperaturowego ciepła należy rozważyć kwestie związane z właściwościami powietrza z szybów wydechowych kopalni oraz możliwość zabudowy szybu wydechowego biorąc pod uwagę uwarunkowania techniczne i prawne.

Ciepłe i bardzo wilgotne powietrze usuwane z kopalni zawiera produkty spalania paliw z pracujących tam maszyn (tlenek i dwutlenek węgla, węglowodory) oraz związki uwalniane przez górotwór w czasie prac wydobywczych (siarkowodór etc.). Wysoka, bliska nasyceniu wilgotność może w przypadku ochładzania się powietrza na skutek np. strat ciepła do otoczenia powodować wykraplanie się agresywnych związków chemicznych na powierzchni komina. Z powodu właściwości agresywne i korozyjne powietrza wydechowego do budowy komina powinny być stosowane specjalne materiały. Podobny problem nie występuje w przypadku konstrukcji kominów słonecznych.

Kopalnie muszą być intensywnie wentylowane ze względu na pracujących na dole ludzi. Negatywna ingerencja w pracę systemu wentylacji mogłaby doprowadzić do katastrofy i z punktu widzenia bezpieczeństwa jest wykluczona. Wykorzystana do odzysku energii metoda nie może wywierać niekorzystnego wpływu na pracę systemu wentylacji np. okresowo go zaburzając.

4. METODOLOGIA

Zamodelowano analitycznie pracę komina geotermalnego w celu określenia potencjału rozwiązania oraz na bazie modelu wykonano analizę ekonomiczną. Główną siłą napędową konwekcyjnego przepływu powietrza w kominie jest siła wyporu F_w , wynikająca z różnicy gęstości słupów ciepłego, wilgotnego powietrza wydechowego ρ_w oraz relatywnie zimnego i suchego powietrza atmosferycznego ρ_a :

$$F_w = V \cdot g \cdot (\rho_a - \rho_w) \quad (1)$$

Siła wyporu działająca na powietrze w przekroju poprzecznym komina A wywołuje różnicę ciśnień.

$$F_w = \Delta p \cdot A \quad (2)$$

Objętość kominą V jest wyrażona jako iloczyn pola przekroju poprzecznego i wysokości H :

$$V = H \cdot A \quad (3)$$

Podstawiając równania (2) i (3) do (1) otrzymuje się wyrażenie opisujące spadek ciśnienia w kominie Δp o wysokości H przy pewnej różnicy gęstości powietrza atmosferycznego i powietrza w kominie

$$\Delta p = H \cdot g \cdot (\rho_a - \rho_w) \quad (4)$$

Ze względu na liniowe straty ciśnienia Δp_l^s , różnica ciśnień wynikająca z (4) jedynie w części może zostać użytecznie wykorzystana

$$\Delta p = \Delta p_u + \Delta p_l^s \quad (5)$$

Liniowe straty ciśnienia są odwrotnie proporcjonalne do średnicy D , wprost proporcjonalne do długości kanału (wysokości), prędkości powietrza w kanale w i współczynnika strat liniowych λ przyjętego na podstawie [5]

$$\Delta p_l^s = \lambda \cdot \frac{H}{D} \cdot \frac{\rho_w \cdot w^2}{2} \quad (6)$$

Prędkość strugi powietrza wydechowego jest wyrażona jako iloraz strumienia objętości powietrza wydechowego V przepływającego przez przekrój kołowy o średnicy D

$$w = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (7)$$

Z równań (4)–(7) uzyskano zależność opisującą użyteczny spadek ciśnienia Δp_u w zależności od parametrów konstrukcyjnych kominą i warunków atmosferycznych

$$\Delta p_u = H \cdot \left[g \cdot (\rho_a - \rho_w) - \frac{8\lambda\rho_w V^2}{\pi^2 D^5} \right] \quad (8)$$

Przyjęto, że powietrze wydechowe jest nasycone parą wodną, dlatego jego gęstość ρ_w zależy jedynie od temperatury

$$\rho_w = f(t_w) \quad (9)$$

Gęstość powietrza atmosferycznego ρ_a zależy od temperatury i wilgotności, wyrażonych jako temperatury mokrego i suchego termometru:

$$\rho_a = f(t_m, t_s) \quad (10)$$

Komin, zapewniając część spadku ciśnienia potrzebnego do utrzymania odpowiedniego przepływu powietrza przez wyrobisko górnicze, odciąża wentylatory o równowartość iloczynu użytecznego spadku ciśnienia i przepływu powietrza

$$N_u = \Delta p_u \cdot V \quad (11)$$

Komin, zapewniając pasywną wentylację, pozwala na redukcję w skali roku kosztów eksploatacyjnych związanych z wentylacją kopalni

$$R_k = N_u \cdot t \cdot K_e \quad (12)$$

Nakład inwestycyjny komina jest proporcjonalny do jego wysokości i średnicy

$$K = \pi \cdot K_k \cdot H \cdot D \quad (13)$$

Prosty czas zwrotu inwestycji $SPBT$ wynosi:

$$SPBT = \frac{K}{R_k} \quad (14)$$

W czasie całego okresu eksploatacji komina LT (przyjętego na podstawie [14] jako 30 lat), biorąc pod uwagę czas jego amortyzacji, sumaryczna redukcja kosztów wentylacji kopalni wyniesie

$$Z = R_k \cdot (LT - SPBT) \quad (15)$$

Efektywna stopa zwrotu inwestycji jest wyrażona jako

$$R = \sqrt[LT]{\frac{Z}{K} + 1} - 1 \quad (16)$$

5. WYNIKI

Na podstawie przedstawionej metodologii przeprowadzono analizę potencjału komina geotermalnego i wpływu warunków atmosferycznych na jego pracę oraz wykonano analizę ekonomiczną. W obliczeniach wykorzystano dane zamieszczone w tabeli 1.

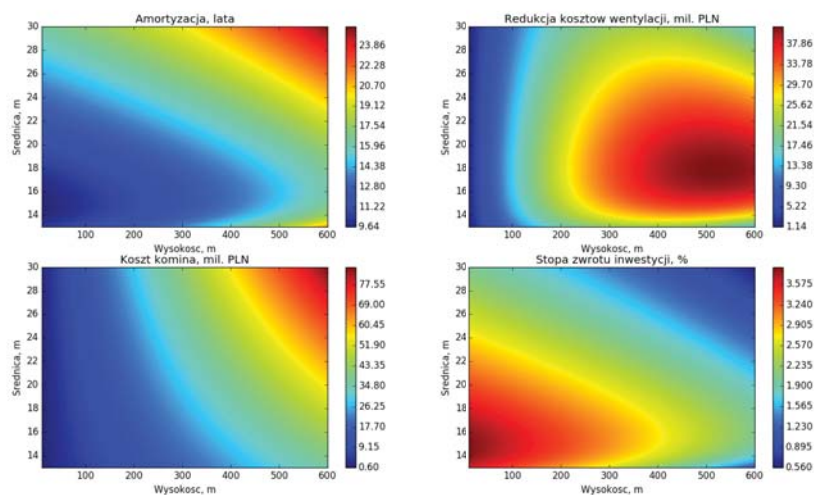
Tabela 1: Dane wykorzystane w obliczeniach z podanymi odnośnikami do literatury

Opis	Symbol	Wartość	Jednostka	Źródło
Temperatura powietrza wydechowego	T_w	35	$^{\circ}\text{C}$	–
Wilgotność powietrza wydechowego	ϕ_w	100	%	–
Jednostkowy koszt komina	K_k	1500	PLN/m ²	[13, 14]
Całkowity czas pracy komina	LT	30	lata	[14]
Koszt jednostkowy energii elektrycznej	K_e	0,3	PLN/kWh	–
Współczynnik liniowych strat ciśnienia	λ	0,01	–	[5]

5.1. Analiza ekonomiczna

Przeanalizowano wydajności szybów wydechowych w zakresie 850-7000 m³/s. Na podstawie przeglądu literatury i wiedzy autorów przyjęto koszt jednostkowy komina odniesiony do jednostki powierzchni, koszt jednostkowy energii elektrycznej i przewidywany czas pracy komina zgodnie z tabelą 1.

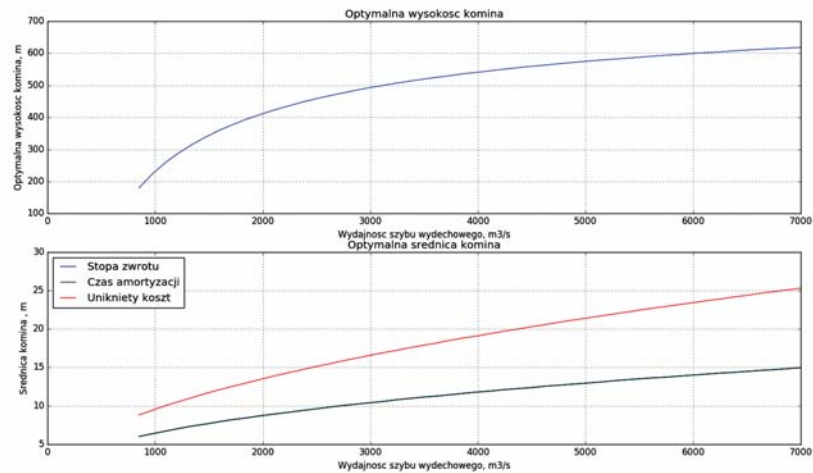
Na rysunku 3 przedstawiono czas amortyzacji, redukcję kosztów wentylacji kopalni, uzyskaną w wyniku eksploatacji komina geotermalnego, szacowany koszt budowy komina i stopę zwrotu inwestycji dla komina zabudowanego na szybie wydechowym o wydajności 3500 m³/s w zależności od wysokości i średnicy komina. Przedstawione zależności dla przykładowej wydajności szybu pokazują, że ze względu na prezentowane kryteria można znaleźć wartości optymalne: ze względu na czas amortyzacji i stopę zwrotu inwestycji istnieje optymalna średnica komina, ze względu na



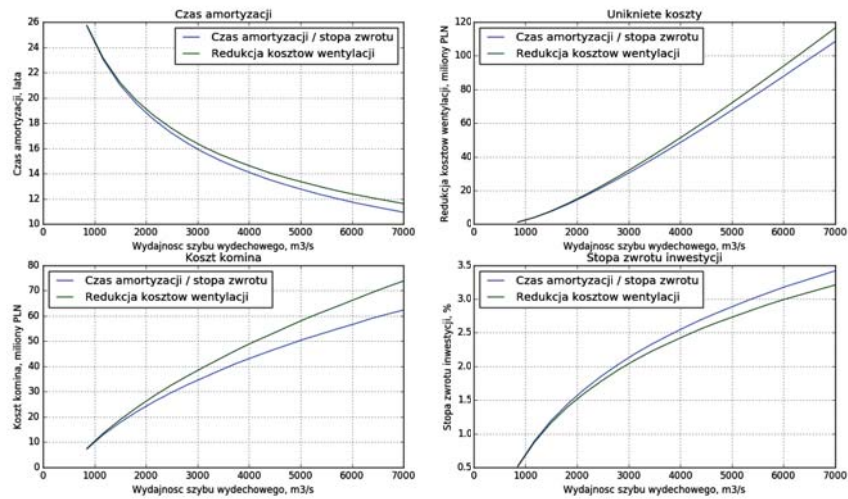
Rys. 3: Czas amortyzacji (u góry, po lewej), redukcja kosztów wentylacji kopalni, uzyskana w wyniku eksploatacji komina geotermalnego (u góry, po prawej), szacowany koszt budowy komina (na dole, po lewej) i stopa zwrotu inwestycji (na dole, po prawej) dla komina zabudowanego na szybie wydechowym o wydajności $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ w zależności od wysokości i średnicy komina. Ze względu na czas amortyzacji, redukcję kosztów wentylacji kopalni i stopę zwrotu inwestycji istnieją optymalne średnice komina. Ponadto istnieje optymalna wysokość komina ze względu na redukcję kosztów wentylacji kopalni

redukcję kosztów wentylacji kopalni istnieje optymalna średnica i wysokość komina. Optymalna średnica komina ze względu na stopę zwrotu jest zbliżona do optymalnej średnicy ze względu na czas amortyzacji, podczas gdy optymalna średnica ze względu na redukcję kosztów wentylacji kopalni jest znacznie większa od dwóch pozostałych. Czas amortyzacji inwestycji maleje i efektywna stopa zwrotu inwestycji rośnie wraz ze spadkiem wysokości komina. Wysokość komina musi być dobierana na zasadzie kompromisu między wysokością redukcji kosztów wentylacji i efektywną stopą zwrotu inwestycji. W analizowanym zakresie wydajności szybów wyznaczono optymalne średnice i wysokość komina. Optymalna wysokość komina rośnie nieliniowo ze wzrostem wydajności szybu wydechowego, co zostało przedstawione na rys. 4 (u góry). Optymalna wysokość komina w analizowanym przedziale zmienia się w zakresie od 200 do 600 m. Wysokość komina rośnie szybciej dla niewielkich wydajności (rzędu $1000 \text{ m}^3/\text{s}$). Przykładowo w zakresie od 1000 do $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ optymalna wysokość komina wzrasta z 200 do 400 m, a w zakresie od 6000 do $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ optymalna wysokość wynosi około 600 m i zmienia się nieznacznie. Na dolnym rys. 4 przedstawiono zależności: optymalną wysokość komina oraz optymalne średnice komina w zależności od wydajności zabudowanego szybu wydechowego przy różnych kryteriach optymalizacji (ze względu na czas amortyzacji i redukcje kosztów wentylacji kopalni). Optymalna średnica komina wzrasta prawie liniowo, niezależnie od przyjętego kryterium optymalizacji. Wpływ przyjętego kryterium optymalizacji wzrasta dla większych wydajności. Dla wydajności szybu wydechowego $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ optymalna średnica, niezależnie od kryterium, wynosi około 7 m, podczas gdy dla wydajności $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ optymalne średnice wynoszą około 22 m i 26 m odpowiednio dla czasu amortyzacji i redukcji kosztów

wentylacji kopalni przyjętych jako kryterium optymalizacji. Dla optymalnych wartości wysokości i średnic komina w zależności od wydajności szybu wydechowego obliczono czas amortyzacji, redukcję kosztów wentylacji kopalni, koszt komina i stopę zwrotu inwestycji, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4: Optymalna wysokość komina (u góry) i optymalne średnice komina ze względu na kryterium optymalizacji: czas amortyzacji/ efektywną stopę zwrotu i redukcję kosztów wentylacji kopalni (na dole) w zakresie wydajności szybu wydechowego 850–7000 m³/s



Rys. 5: Czas amortyzacji, redukcja kosztów wentylacji kopalni, koszt budowy komina i stopa zwrotu inwestycji obliczone dla optymalnej geometrii komina

Czas amortyzacji kominu słonecznego mieści się w zakresie od 11 do 26 lat i spada dla wyższych wydajności szybu wydechowego. Na podstawie przeglądu literaturowego dot. kominów słonecznych przyjęto całkowity czas pracy instalacji 30 lat [14]. Efektem eksploatacji kominu geotermalnego zabudowanego na szybie wydechowym kopalni jest pasywna wentylacja wyrobisk górniczych, która redukuje pobór mocy wentylatorów i koszty z tym związane. Dla niewielkich wydajności szybów eksploatacja kominów przynosi znikomą redukcję kosztów eksploatacyjnych — czas amortyzacji kominów o małych wydajnościach jest zbliżony do przewidywanego czasu pracy instalacji. Dla większych wydajności redukcja kosztów wentylacji kopalni znacząco rośnie osiągając wartość około 110 milionów PLN dla najwyższych analizowanych wydajności. Przykładowo redukcja kosztów wentylacji kopalni w przypadku szybów o wydajnościach 2000 i 6000 m³/s wyniesie odpowiednio niecałe 20 i ponad 80 milionów PLN. Zabudowa 3-krotnie większego szybu prowadzi do 4-krotnie większej redukcji kosztów wentylacji. Koszty budowy kominu geotermalnego mieszczą się w zakresie od 8 do 70 milionów PLN. Koszty rosną niemal liniowo. Przykładowo koszty kominów zabudowanych na szybach 1000 i 6000 m³/s wynoszą odpowiednio 10 i 60 milionów PLN. Zabudowa sześciokrotnie wydajniejszego szybu kosztuje około sześciokrotnie więcej. Wysokie koszty budowy kominu i niewielkie korzyści ekonomiczne osiągnięte przy małych wydajnościach powodują, że stopa zwrotu inwestycji dla kominów małej wydajności (1000 m³/s) wynosi około 0,5%.

Stopa zwrotu inwestycji rośnie wraz z wydajnością szybu. Dla wydajności rzędu 3500 m³/s wynosi 2,2%, natomiast dla 7000 m³/s wynosi 3,2%.

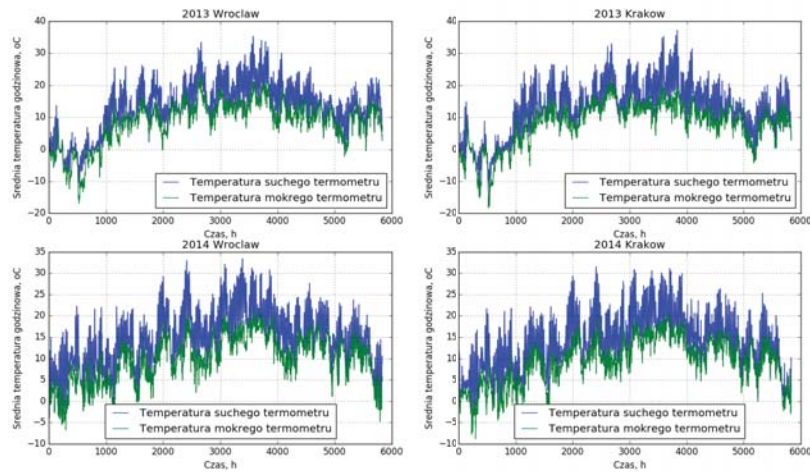
5.2. Wpływ warunków atmosferycznych na pracę kominu geotermalnego

Siłą napędową zjawisk zachodzących w kominie geotermalnym jest różnica gęstości powietrza z szybu wydechowego (którego roczne wahania wilgotności i temperatury są pomijalne) i powietrza atmosferycznego. Przeanalizowano śródroczny potencjał kominu na przykładzie czterech rocznych rozkładów temperatury godzinowej Wrocławia i Krakowa w latach odpowiednio 2013 i 2014 [1], które przedstawiono na rys. 6. Przykładowe obliczenia przeprowadzono w oparciu o przyjęte dane: wydajność szybu wydechowego 3500 m³/s, wysokość kominu 500 m i średnica kominu 16 m.

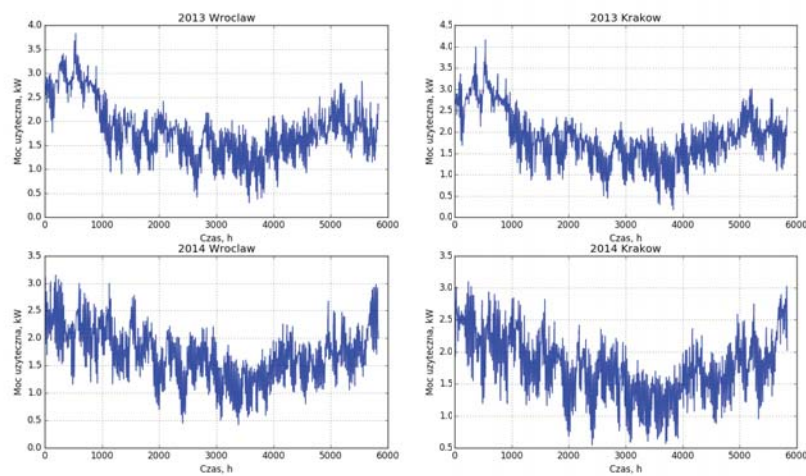
Na podstawie danych meteorologicznych obliczono redukcję zapotrzebowania na moc elektryczną wentylatorów, którą pokazano na rys. 7. Potencjał kominu spada ze wzrostem temperatury powietrza atmosferycznego — dla ujemnych temperatur powietrza komin osiąga moc użyteczną do ponad 3 MW (chwilowo 3,5 MW), a dla temperatur ponad 30°C moc użyteczna spada poniżej 500 kW (chwilowo 200 kW). We wszystkich analizowanych przypadkach komin geotermalny, nawet w przypadku temperatur maksymalnych, nie wywierał negatywnego wpływu na funkcjonowanie źródła.

6. WNIOSKI

Zaproponowano wykorzystanie będącej w fazie wdrożenia technologii kominów słonecznych do zagospodarowania niskotemperaturowego ciepła zawartego w powietrzu wydechowym z szybów kopalni o temperaturze 30–35°C. Przeanalizowano możliwość wykorzystania kominów geotermalnych: obliczono optymalną geometrię kominu ze względu na wybrane wskaźniki finansowe oraz wykonano analizę ekonomiczną dla optymalnej geometrii kominu w zależności od wydajności szybu wydechowego. Po-



Rys. 6: Godzinowe temperatury suchego i mokrego termometru zmierzone w Krakowie i Wrocławiu w latach 2013 i 2014 [1]



Rys. 7: Redukcja kosztów wentylacji kopalni, uzyskana w wyniku eksploatacji komina geotermalnego dla szybu o wydajności $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ obliczona na podstawie danych meteorologicznych przedstawionych na rys. 3

nadto przeprowadzono ocenę potencjału komina geotermalnego na podstawie danych meteorologicznych: wpływ warunków meteorologicznych na pracę instalacji, możliwość wystąpienia negatywnej ingerencji pracy komina na pracę systemu wentylacji

kopalni w warunkach polskich. Analizy przeprowadzono w zakresie wydajności szybów wydechowych od 850 do 7000 m³/s.

7. Dyskusja i perspektywy

Efektywna stopa zwrotu inwestycji w przypadku kominów o optymalnej geometrii zabudowanych na szybach o wydajności około 1000 m³/s wynosi około 0,5% (czas amortyzacji około 26 lat, przy przewidywanym całkowitym czasie pracy instalacji 30 lat). Dla wydajności szybu rzędu 7000 m³/s stopa zwrotu inwestycji wynosi ponad 3% (inwestycja amortyzuje się po około 12 latach). Wpływ wysokości kominu jest dwójaki: z jednej strony komin o optymalnej wysokości oznacza wyższy zysk bezwzględny (wyższą redukcję kosztów wentylacji kopalni), ale niższą stopę zwrotu inwestycji, z drugiej strony komin o wysokości niższej niż optymalna oznacza niższy zysk, lecz wyższe efektywne stopy zwrotu. Aby poprawić ekonomikę eksploatacji szybów wydechowych muszą zostać zaproponowane i rozwinięte technologie lekkich kominów, których cena nie powinna przekraczać 1000 PLN/m² (obecnie: 1500–5000 PLN/m² [13], [14]). Cechami odróżniającymi kominy słoneczne od kominów konwencjonalnych są: duże średnice kanałów, niska temperatura medium w kominie, w przypadku kominów geotermalnych kwestie związane z właściwościami powietrza wydechowego (agresywne chemicznie, wilgotne i silnie korozyjne).

Analiza teoretyczna potencjału kominów geotermalnych w warunkach polskich wykazuje, że eksploatacja takich kominów nie będzie, w sposób długotrwały, wywierać negatywnego wpływu na system wentylacji kopalni. Możliwe są jedynie chwilowe zaburzenia pracy systemu dla temperatur powietrza powyżej 40°C.

Kominy geotermalne są obiecującą metodą konwersji niskotemperaturowego ciepła zawartego w powietrzu wydechowym kopalni. Mogą stanowić również źródło pasywnej wentylacji awaryjnej. Metoda może być także zastosowana do konwersji ciepła innego pochodzenia: ciepła rozpraszanego w chłodniach kominowych elektrowni, ciepła odpadowego z procesów przemysłowych (browarów, hut). Dalsze badania naukowe i projekty wdrożeniowe dotyczące kominów powinny być skoncentrowane na identyfikacji potencjalnych źródeł, możliwości ich wykorzystania i rozwoju technologii konstrukcji odpowiednich kominów.

LITERATURA

- [1] *Synoptic Dispatch Data from Polish Weather Stations*.
- [2] Cao F., Li H., Ma Q., Zhao L., *Design and Simulation of a Geothermal – Solar Combined Chimney Power Plant*, *Energy Conversion and Management*, **84**, 2014.
- [3] Chen C.-H., Schmid G., Chan C.-T., Chiang Y.-C., Chen S.-L., *Application of Silica Gel Fluidised Bed for Air-Conditioning Systems*, *Applied Thermal Engineering*, **89**, 229–238, 2015.
- [4] Fasel H.F., Meng F., Shams E., Gross A., *CFD Analysis for Solar Chimney Power Plants*, *Solar Energy*, **98**, 12–22, 2013.
- [5] Jezowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., *Mechanika Płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2001.
- [6] Kolasinski P., *The Influence of the Heat Source Temperature on the Multivane Expander Output Power in an Organic Rankine Cycle (ORC) System*, *Energy*, 3351–3369, 2015.

-
- [7] Kra Wilfried B., *Computer Simulation and Optimization of Thermo-Fluidmechanical Processes of Solar Updraft Power Plants*, Solar Energy, **98**, 2–11, 2013.
 - [8] Li T.X., Wang R.Z., Li H., *Progress in the Development of Solid E Gas Sorption Refrigeration Thermodynamic Cycle Driven by Low-Grade Thermal Energy*, Progress in Energy and Combustion Science, **40**, 2014.
 - [9] Michaud L., Brian M., *Energy from Convective Vortices*, International Conference on Solar Updraft Tower Power Technology SUTPT2012, 2012.
 - [10] Mohiuddin A., Eray U., *Computational Analysis of a Solar Energy Induced Vortex Generator*, Applied Thermal Engineering, **98**, 1036–1043, 2016.
 - [11] Vakhtang P., Vorobieff P., Mammoli A., Fathi N., *Inflatable Free-Standing Flexible Solar Towers*, Solar Energy, **98**, 85–98, 2013.
 - [12] Rogala Z., *Informacja własna*, 2016.
 - [13] Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., *Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation*, J. Solar Energy Eng. – Trans. ASME, **49**, 1–9, 2005.
 - [14] Xinping Z., Yangyang X., *Solar Updraft Tower Power Generation*, Solar Energy, 2015.
 - [15] Zheng Z., Suoying H., *Modeling and Characteristics Analysis of Hybrid Cooling-Tower-Solar-Chimney System*, Energy Conversion and Management, **95**, 59–68, 2015.