

# UPROSZCZONA METODYKA OBLICZEŃ KOMINA SŁONECZNEGO

Redliński Michał<sup>1</sup>, Zapałowicz Zbigniew<sup>2</sup>

1. Selfa GE SA, Szczecin, Polska

2. Katedra Techniki Ciepłej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin

## STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono metodykę obliczeń komina słonecznego. Metodykę tą opracowano na podstawie literatury przedmiotu. Następnie metodyka ta została zweryfikowana poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych. Do porównania wykorzystano badania doświadczalne opracowane dla jedynej, działającej w latach 1982-1989, kominowej elektrowni słonecznej w Manzanares w Hiszpanii.

## WPROWADZENIE

Komin słoneczny zbudowany jest z dwóch zasadniczych instalacji: powietrznego kolektora słonecznego i komina, w którym umieszczono zespół turbogeneratora. Rys.1. przedstawia schemat kominowej elektrowni słonecznej. W elektrowni tej wykorzystuje się dwa zjawiska fizyczne tj. efekt szklarniowy i ciąg kominowy. Napływające do kolektora słonecznego chłodne powietrze ogrzewa się w trakcie przepływu w przestrzeni utworzonej między gruntem a dachem kolektora. Zmiana temperatury powietrza powoduje zmianę jego gęstości. Dodatkowo zmiana gęstości powietrza wywołana jest różnicą temperatur między wlotem a wylotem z komina. Powstająca różnica ciśnień powietrza jest siłą napędową wywołującą jego ruch. Nagrzany w kolektorze strumień powietrza kierowany jest na łopatki turbiny powietrznej sprzężonej z generatorem elektrycznym. Energia strumienia powietrza jest najpierw zamieniana na pracę mechaniczną, a następnie na energię elektryczną.

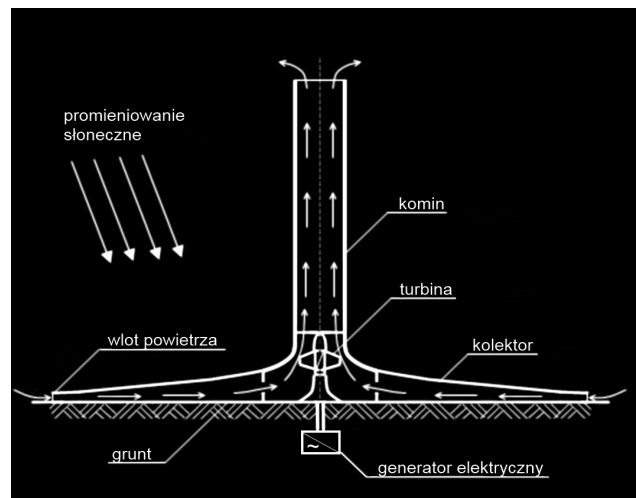
Pomysł na budowę kominowych elektrowni słonecznych zrodził się już na początku dwudziestego wieku (Cabanyes I., 1903), ale dopiero w latach 80-tych ubiegłego stulecia udało się opracować projekt i zbudować pierwszą prototypową instalację (Haaf W., 1984; Haaf W., Friedrich K., Mayr G., Schlaich J., 1983; Schlaich J., 1995). W polskiej literaturze informacje na temat tego rozwiązania technicznego są dość skąpe (Pluta Z., 2007). Historię rozwoju i badań kominów słonecznych na podstawie dostępnej literatury światowej przedstawiono w pracach (Redliński M., 2010, Redliński M., Zapałowicz Z.).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie opracowanej na podstawie literatury przedmiotu metodyki obliczeń komina słonecznego.

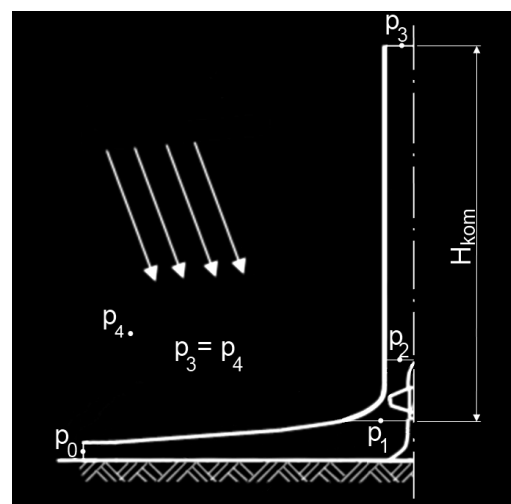
## OBIEG PORÓWNAWCZY KOMINA SŁONECZNEGO

Dla kominowej elektrowni słonecznej jako obieg porównawczy można przyjąć obieg Barytona,

obowiązujący dla siłowni gazowych. Wybór ten wynika z podobieństwa pracy i przemian czynnika roboczego w obu typach siłowni (Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008). Oznaczenia charakterystycznych punktów w kominie słonecznym pokazano na rys.2.



Rys.1. Schemat kominowej elektrowni słonecznej (Nizetic S., Ninic N., Nizetic S., Ninic N., et al., 2008)



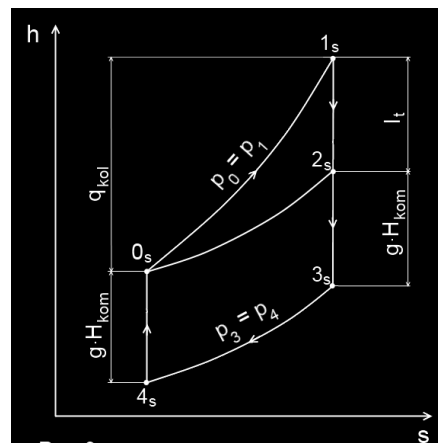
Rys.2. Charakterystyczne punkty w kominie słonecznym

Rysunki 3a i 3b przedstawiają teoretyczny i rzeczywisty cykl przemian powietrza w kominie słonecznym na wykresie entalpia-entropia.

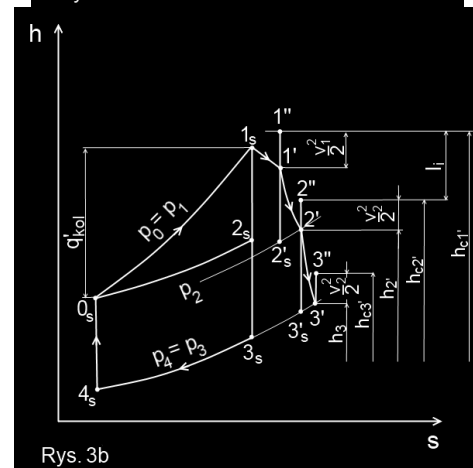
Rysunek 3a przedstawia obieg teoretyczny kominowej elektrowni słonecznej. Powietrze dopływające do kolektora ma entalpię (temperaturę)

$h_{0s}$  i prędkość początkową  $v_0$ . Wskutek promieniowania słonecznego powietrze ogrzewa się izobarycznie zwiększając swoją entalpię (temperaturę) do wartości  $h_{1s}$ . Przepływowi powietrza w kolektorze towarzyszy zmiana jego prędkości spowodowana zmianą kształtu kanału. Prędkość powietrza na wylocie z kolektora wynosi  $v_1$ . Zatem przed wlotem do turbiny powietrznej entalpia całkowita powietrza jest równa sumie jego entalpii i jednostkowej energii kinetycznej  $h_{c1s} = h_{1s} + v_1^2/2$ . W przypadku przepływu powietrza można pominąć zmianę energii potencjalnej wywołaną zmianą wysokości kanału. W turbinie powietrznej następuje zmiana energii całkowitej strumienia powietrza wskutek wykonania pracy mechanicznej  $l_t$ . Wypływający z turbiny strumień powietrza posiada mniejszą entalpię całkowitą  $h_{c2s}$ . Proces rozprężania powietrza w turbinie jest izentropowy. Entalpia wypływającego powietrza wynosi  $h_{2s}$  a jego prędkość jest równa  $v_2$ . Wskutek różnicy gęstości między wlotem a wylotem do komina następuje przepływ strumienia powietrza (ciąg kominowy). Wypływające do otoczenia powietrze posiada entalpię  $h_{3s}$  i prędkość  $v_3$ . Powietrze to schładza się izobarycznie w otoczeniu, a jego parametry końcowe odpowiadają parametrom otoczenia. Przemiana zamykająca obieg to izentropa zwana ciągiem wstecznym niezbędnym do zassania powietrza do wnętrza kolektora. Linia łamana  $0s-1s-2s-3s-4s-0s$  tworzy obieg Barytona.

W obiegu rzeczywistym (rys.3b) w kolektorze występują straty hydrauliczne i wymiana ciepła z otoczeniem. W związku z tym pojawia się spadek ciśnienia i spadek temperatury powietrza w kolektorze, a punktem początkowym ekspansji jest punkt  $1'$ . Proces rozprężania powietrza w turbinie jest procesem politropowym, a rzeczywisty punkt końcowy ekspansji to punkt  $2'$ . Jeśli uwzględnić energię kinetyczną strumienia powietrza, to jego entalpia całkowita jest równa  $h_{c2} = h_{2'} + v_2'^2/2$ . W trakcie przepływu powietrza przez komin występujące straty tarcia powietrza powodują wzrost jego temperatury oraz ciepło jest wymieniane z otoczeniem. Powietrze wypływające z komina posiada więc entalpię  $h_{3'}$  i prędkość  $v_3$ . Strata wylotowa z komina jest równa różnicy entalpii  $\Delta h_{kom} = v_3^2/2 = (h_{c3} - h_{3'})$  (Gannon A. J., von Backström T. W., 2000).



Rys. 3a



Rys. 3b

Rys.3a i b. Obieg teoretyczny i rzeczywisty kominowej elektrowni słonecznej w układzie h-s.

## OPORY PRZEPIYU POWIETRZA W KOMINIE SŁONECZNYM

W kominowej elektrowni słonecznej występują straty hydrauliczne związane głównie z oporami przepływu powietrza przez kolektor oraz komin. Straty te powodują wystąpienie spadku ciśnienia  $\Delta p_u$  w tych elementach siłowni.

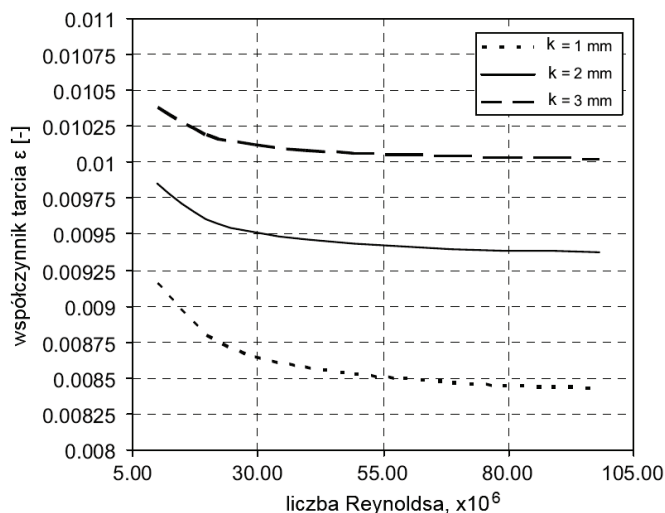
Strata ciśnienia powietrza w kolektorze słonecznym wyrażona jest zależnością (Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008):

$$\Delta p_{kol} = \rho \cdot \varepsilon \frac{(v_0 \cdot r_{kol})^2}{4 \cdot H_{kol}} \cdot \left( \frac{1}{r_{kom}} - \frac{1}{r_{kol}} \right) \quad (1)$$

We wzorze (1) jako  $H_{kol}$  przyjęto średnią wysokość dachu kolektora nad gruntem. Przepływ powietrza w kolektorze ma charakter turbulentny. Współczynnik tarcia ( $\varepsilon$ ) w powyższym równaniu można w wygodny sposób wyznaczyć przy pomocy diagramu (<http://picsdigger.com/image/1848ec15>) Moodyego. Spadek ciśnienia w kolektorze zależy przede wszystkim od prędkości przepływającego powietrza  $v_0$ . W zależności od wielkości komina słonecznego i parametrów fizycznych powietrza, strata związana ze spadkiem ciśnienia w kolektorze wynosi:

$\Delta p_{kol} \leq 4\%$ , a w odniesieniu do całkowitego przyrostu ciśnienia ( $\Delta p_u$ ) osiąga on średnią wartość:  $\Delta p_{kol} \approx 2\%$  (Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008).

Przepływ powietrza w kominie jest także turbulentny. Współczynnik tarcia dla komin ( $\epsilon$ ) można określić na podstawie rys.4, dla znanych wartości liczby Reynoldsa i współczynnika chropowatości bezwzględnej lub obliczyć z zależności znanej Colebrook-White'a.



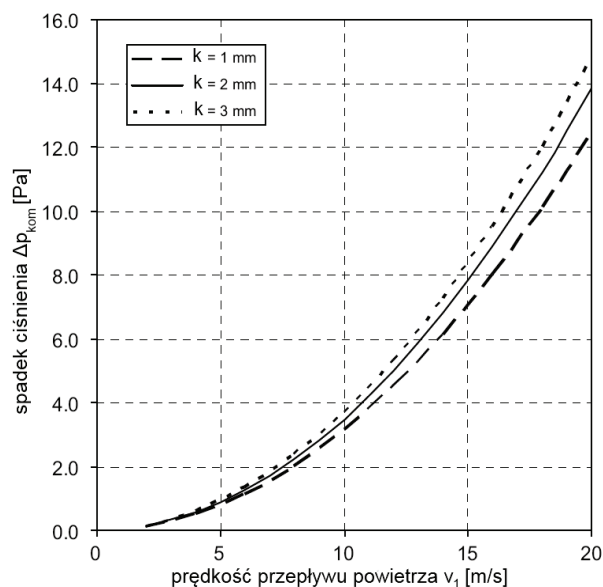
Rys. 4. Współczynnik tarcia ( $\epsilon$ ) w funkcji liczby Reynoldsa, dla różnych wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej ( $k$ )

Spadek ciśnienia związany z przepływem powietrza przez komin jest również zależy od prędkości powietrza na wlocie do komin ( $v_1$ ). Wartości spadków ciśnienia w kominie przedstawiono na rys.5 dla trzech wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej ( $k$ ).

Jeśli obliczoną wartość spadku ciśnienia w kominie przyrównamy do przyrostu ciśnienia ( $\Delta p_u$ ) u jego podstawy, to otrzymana wartość  $\Delta p_{kom}$  jest nie większa niż 3% (Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008).

Podsumowując powyższe rozważania, możemy stwierdzić, iż w kominie słonecznym występują straty związane z oporami przepływu powietrza przez kolektor i komin. Straty te, wyrażone poprzez spadki ciśnienia:  $\Delta p_{kol}$  i  $\Delta p_{kom}$ , osiągają jednak pomijalnie małe wartości, zaledwie  $2 \div 3\%$  w odniesieniu do całkowitego przyrostu ciśnienia u podstawy komin ( $\Delta p_u$ ).

W związku z powyższym, w modelu matematycznym, straty ciśnienia związane z oporami przepływu powietrza w instalacji nie zostały uwzględnione.



Rys. 5. Spadek ciśnienia w kominie w funkcji prędkości powietrza na wlocie do komin ( $v_1$ ) dla trzech wartości współczynnika chropowatości bezwzględnej ( $k$ )

### MODEL MATEMATYCZNY KOMINOWEJ ELEKTROWNI SŁONECZNEJ

Powietrze o temperaturze  $T_0$  zasysane z otoczenia ogrzewa się w kolektorze, osiągając na jego wyjściu temperaturę  $T_1$ . Przyrost temperatury w kolektorze  $\Delta T$  wynosi zazwyczaj  $10 \div 30$  K (Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003). Przyrost ten powoduje zmianę gęstości powietrza pomiędzy wlotem do kolektora -  $\rho_0$  a wlotem do komin (wylotem z kolektora) -  $\rho_1$ . Z kolei zmiana gęstości powietrza powoduje powstanie przyrostu ciśnienia  $\Delta p_u$ , odnoszonego do podstawy komin (Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003):

$$\Delta p_u = g \cdot \int_0^{H_{kom}} (\rho_0 - \rho_1) dH = \rho_1 \cdot g \cdot H_{kom} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (2)$$

przy czym przyjęto, że w badanym zakresie zmian parametrów, powietrze można traktować jak gaz doskonały.

Jednostkowa praca teoretyczna (techniczna) uzyskiwana w wirniku powietrznej turbiny osiowej jest więc równa:

$$l_t = v_1 \cdot \Delta p_u \quad (3)$$

Zatem sprawność teoretyczna komin jest stosunkiem pracy technicznej uzyskanej na wirniku turbiny do całkowitych zysków cieplnych powietrza w kolektorze (rys.3a):

$$\eta_{kom} = \frac{l_t}{q_{kol}} = \frac{h_{1s} - h_{2s}}{h_{1s} - h_0} = \frac{v_1 \cdot \Delta p_u}{c_p (T_1 - T_0)} = \frac{v_1 \cdot \Delta p_u}{c_p \cdot \Delta T} \quad (4)$$

Przy założeniu, że powietrze jest gazem doskonałym, równanie (4) można zapisać w uproszczonej postaci (Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003):

$$\eta_{kom} = \frac{g \cdot H_{kom}}{c_p \cdot T_0} \quad (5)$$

Kolektor w kominowej elektrowni słonecznej przekształca energię promieniowania słonecznego (G) w ciepło strumienia gorącego powietrza ( $\dot{Q}$ ). Sprawność konwersji energii w kolektorze można wyznaczyć z zależności (Pluta Z., 2007):

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{Q}}{A_{kol} \cdot G} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_{kol} \cdot G} = \frac{\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_{kom} \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_{kol} \cdot G} \quad (6)$$

Sprawność kolektora można wyznaczyć także korzystając ze wzorów empirycznych. Zależność pozwalająca obliczyć sprawność kolektora pokrytego szkłem jednowarstwowym, ustalona na podstawie danych z badań prototypu komin słonecznego w Manzanares (Schlaich J., 1995), ma postać:

$$\eta_{kol} = -13,116 \left( \frac{\Delta T}{2G} \right)^2 - 6,3364 \left( \frac{\Delta T}{2G} \right) + 0,72 \quad (7)$$

W kominowych elektrowniach słonecznych stosowane są turbiny osiowe (Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008). Jeśli pominie się straty tarcia wewnątrz turbiny to największą stratą jest strata wylotowa odpowiadająca energii kinetycznej powietrza wylotowego. Stąd sprawność turbiny można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$\eta_T = \frac{P_t - \Delta P_{wyl}}{P_t} = \frac{\dot{Q}_p \cdot \eta_{kom} - \dot{m} \cdot \Delta h_{wyl}}{\dot{Q}_p \cdot \eta_{kom}} \quad (8)$$

Strata wylotowa turbiny we wzorze (8) jest obliczana z zależności (rys. 3b):

$$\Delta h_{wyl} \approx \frac{v_2^2}{2} = h_{c2'} - h_2 \approx \frac{v_1^2}{2} \quad (9)$$

Po podstawieniu zależności (9) do wzoru (8), sprawność turbiny można wyznaczyć z zależności:

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta_{kom} - \frac{1}{2} \dot{m}_1 \cdot v_1^2}{\dot{m}_1 \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta_{kom}} = 1 - \frac{v_1^2}{2 \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta_{kom}} \quad (10)$$

Prędkość powietrza na wlocie do komin ( $v_1$ ) należy założyć na etapie projektowania instalacji, a dokładne jej wyznaczenie możliwe jest jedynie doświadczalnie. Prędkość przepływu powietrza w kominie powinna być możliwie najniższa, gdyż wysokie jej wartości znacznie obniżają efektywność pracy turbiny. Najniższa wartość tej prędkości, umożliwiająca produkcję energii elektrycznej, to około 3m/s dla turbin z regulacją (Haaf W., 1984, Schlaich J., 1995).

Całkowita sprawność komin słonecznego (siłowni) jest iloczynem sprawności jego elementów składowych:

$$\eta_{ks} = \eta_{kol} \cdot \eta_{kom} \cdot \eta_T \quad (11)$$

Reżim pracy kominowej elektrowni słonecznej pozwala na obliczenie maksymalnej generowanej mocy elektrycznej w zależności od natężenia promieniowania słonecznego. Dla danego przyrostu temperatury w kolektorze  $\Delta T$  przyjmuje się, że maksymalna moc siłowni jest uzyskiwana przy wykorzystaniu  $\frac{2}{3} \Delta p_u$  do napędu turbiny. Pozostała część całkowitego spadku ciśnienia (tj.  $\frac{1}{3} \Delta p_u$ ) jest zużywana (w postaci energii kinetycznej) do pokonania oporów przepływu i usunięcia powietrza z komin (Schlaich J., 1995).

Po uwzględnieniu sprawności konwersji energii w generatorze  $\eta_g$ , maksymalną moc elektryczną siłowni można wyznaczyć ze wzoru:

$$P_{el}^{max} = \frac{2}{3} \eta_{kol} \cdot \frac{g}{c_p \cdot T_0} \cdot H_{kom} \cdot A_{kol} \cdot G \cdot \eta_g \quad (12)$$

Natomiast jej rzeczywistą moc, po uwzględnieniu sprawności wszystkich elementów komin słonecznego, z zależności:

$$P_{el} = \dot{Q} \cdot \eta_{ks} \cdot \eta_g = A_{kol} \cdot G \cdot \eta_{kol} \cdot \eta_{kom} \cdot \eta_T \cdot \eta_g \quad (13)$$

### WERYFIKACJA MODELU MATEMATYCZNEGO KOMINA SŁONECZNEGO

Uproszczony model matematyczny kominowej elektrowni słonecznej zweryfikowano poprzez porównanie uzyskanych wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi dla prototypu w Manzanares (Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003). Do obliczeń przyjęto wartości parametrów siłowni podane w tab.1.

Natomiast na rys.6 pokazano zmiany mocy kominowej elektrowni słonecznej w funkcji czasu, dla

typowego dnia pracy, obliczone na podstawie zaproponowanego modelu i uzyskane z pomiarów dla obiektu w Manzanares (Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003).

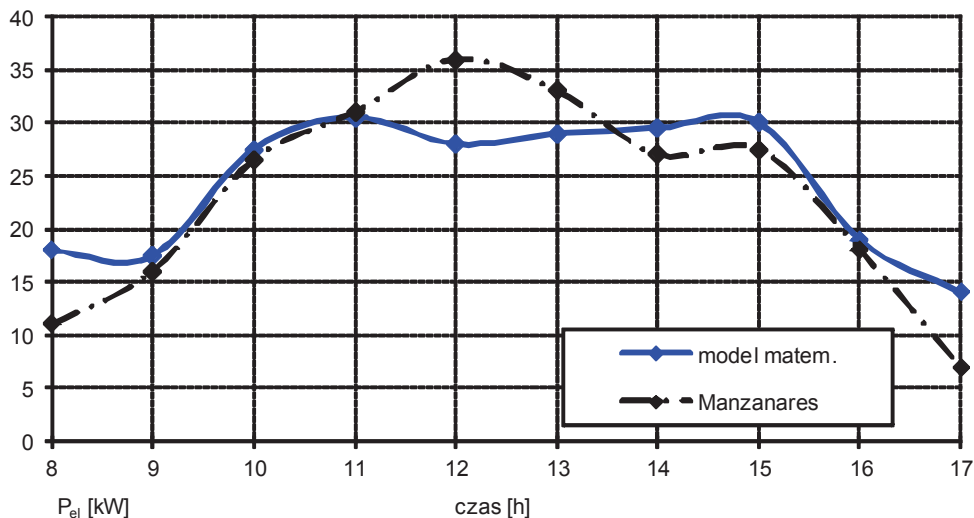
Tab.1. Wartości charakterystycznych parametrów kominia słonecznego

Parametr	Wartość
Wysokość kominia	194,6 m
Średnica kominia	10 m
Promień kolektora	122 m (wartość uśredniona)
Wysokość dachu kolektora	1,85 m (wartość uśredniona)
Średni przyrost temperatury w kolektorze	$\Delta T = 20K$
Moc nominalna	50kW
Powierzchnia kolektora pokryta szkłem jednowarstwowym	46000 m <sup>2</sup>

Z analizy wyników uzyskiwanej mocy siłowni ( $P_{el}$ ) stwierdzono, że opracowany model dość dobrze dopasowuje się do uśrednionych danych

eksperymentalnych. Rozbieżności w uzyskanych wynikach mogą być spowodowane m.in. zastosowaniem do obliczeń uproszczonej zależności (7), która jest prawdziwa dla dachu wykonanego z pojedynczych szyb. Natomiast kolektor w Manzanares był częściowo pokryty poszyciem z tworzywa sztucznego. Największe rozbieżności w generowanej mocy elektrycznej można zaobserwować w godzinach porannych (8:00 – 9:00), późnym popołudniem (16:00 – 17:00) oraz w samo południe (11:00 – 13:00). Rozbieżności te wynikają przede wszystkim z założenia w modelu stałej wartości różnicy temperatur ( $\Delta T$ ). W rzeczywistym obiekcie, w godzinach porannych i późnym popołudniem, założony przyrost temperatury ( $\Delta T$ ) jest wyższy od rzeczywistego, natomiast w godzinach południowych – niższy.

Pomimo, że przedstawiony model matematyczny kominia słonecznego jest uproszczony, to uzyskane średnie wartości mocy elektrycznej w ciągu typowego dnia pracy elektrowni obciążone są błędem nie większym niż 5%. Zatem model ten może być użyty do prowadzenia wstępnych analiz pracy siłowni.



Rys. 6. Moc kominowej elektrowni słonecznej obliczona z modelu matematycznego i uzyskana z pomiarów w instalacji prototypowej w Manzanares

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono uproszczony model matematyczny kominu słonecznego. Następnie model ten zweryfikowano wykorzystując dane doświadczalne uzyskane dla prototypowej kominowej elektrowni słonecznej w Manzanares. Proponowany model kominu słonecznego pozwala ocenić możliwości stosowania tego rozwiązania technicznego w praktyce.

## SPIS SYMBOLI

$A$	- powierzchnia	$m^2$
$c$	- ciepło właściwe	$J/(kg \cdot K)$
$g$	- przyspieszenie ziemskie	$m/s$
$G$	- całkowite natężenie promieniowania słonecznego	$W/m^2$
$h$	- entalpia	$J/kg$
$H$	- wysokość	$m$
$k$	- chropowatość bezwzględna	$m$
$l$	- praca jednostkowa	$J/kg$
$\dot{m}$	- masowy strumień powietrza w kolektorze	$kg/s$
$p$	- ciśnienie	$Pa$
$P$	- moc	$W$
$q$	- ciepło jednostkowe	$J/kg$
$\dot{Q}$	- strumień ciepła pobrany przez powietrze w kolektorze	$W$
$r$	- promień	$m$
$T$	- temperatura	$K$
$v$	- prędkość	$m/s$
$\rho$	- gęstość	$kg/m^3$
$\varepsilon$	- współczynnik tarcia	
$\eta$	- sprawność	
$\Delta$	- przyrost	

## Indeksy

c	- wartość całkowita
el	- elektryczna
g	- generator
kol	- kolektor
kom	- komin
max	- wartość maksymalna
s	- przemiana izentropowa
t	- wartość teoretyczna
T	- turbina
u	- wartość odniesiona do podstawy kominu
wyl	- strata wylotowa
0	- wlot do kolektora
1	- wylot z kolektora
2	- wylot z turbiny
3	- wylot z kominu
4	- otoczenie

## LITERATURA CYTOWANA

- Nizetic S., Ninic N.: *Analysis and possibility of solar chimney power plant implementation on the Dalmatian coast*, University of Split, Split
- Nizetic S., Ninic N., Klarin B., 2008, *Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region*, *Energy*, nr 33, s. 1680-1690
- Cabanyes I., 1903, *Proyecto de Motor Solar. La Energia Eléctrica – Revista General de Electricidad y sus Aplicaciones*, nr 8, s. 61-65
- Haaf W., 1984, *Solar Chimneys. Part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant*, *International Journal of Solar Energy*, nr 2, s. 141-161
- Haaf W., Friedrich K., Mayr G., Schlaich J., 1983, *Solar chimneys. Part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares*, *International Journal of Solar Energy*, nr 2, s. 3-20
- Schlaich J., 1995, *The solar chimney: Electricity from the Sun*. Edition Axel Menges, Stuttgart
- Pluta Z., 2007, *Słoneczne instalacje energetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s.202-203
- Redliński M., 2010, *Metodyka obliczeń kominu słonecznego*. Praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Z. Zapałowicza w Katedrze Techniki Ciepłej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin, rękopis
- Redliński M., Zapałowicz Z.; *Czy komin słoneczny można zbudować w Polsce?* Instal (Praca złożona w redakcji)
- Gannon A. J., von Backström T. W., 2000, *Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance*, *Journal of Solar Energy Engineering*, nr 122, s. 133-137
- Strona internetowa:  
<http://picsdigger.com/image/1848ec15>
- Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinrebe G., 2003, *Design of commercial solar tower systems – Utilization of solar induced convective flows for power generation*, Kohala Coast, Referat z Międzynarodowej Konferencji Energii Słonecznej