



Badania eksperymentalne kondensacyjnego wymiennika ciepła

Krzysztof Polko^{a*}, Janusz Lichota^a

^a Zakład Mechaniki i Systemów Energetycznych, Politechnika Wroclawska

* Adres do korespondencji: krzysztof.polko@pwr.edu.pl, tel. 44 85

STRESZCZENIE

Przedmiotem artykułu jest odzysk niskotemperaturowego ciepła odpadowego spalin wylotowych z kondensacją. Przeprowadzono badania eksperymentalne kondensacyjnego wymiennika ciepła typu spaliny-woda na istniejącym stanowisku badawczym Politechniki Wrocławskiej. Wymiennik ciepła był płaszczowo-rurowy, o przepływie krzyżowo-przeciwprądowym i maksymalnej mocy cieplnej 46,4 kW. Eksperymentalnie wykazano, że zaproponowany wcześniej przez autorów model matematyczny kondensacyjnego wymiennika ciepła jest poprawny. Porównanie wyników obliczeń numerycznych za pomocą powyższego modelu z wynikami badań laboratoryjnych przedstawiono w formie charakterystyk wraz ze szczegółową analizą.

SŁOWA KLUCZOWE: *wymiennik ciepła, kondensacja, spaliny*

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem badań był odzysk niskotemperaturowego ciepła odpadowego ze spalin wylotowych bloku energetycznego węglowego. Zagadnienie to w ostatnich dziesięcioleciach budzi zainteresowanie ze względu na wzrost sprawności elektrowni związany z odzyskiwanym ciepłem [1]. W ostatnim dwudziestoleciu zaczęto rozwijać komercyjną technikę odzysku ciepła odpadowego spalin oraz opracowywać sposoby jak najlepszego jego wykorzystania [2]. Zgodnie z wiedzą autorów, dotychczas w żadnej elektrowni węglowej nie obniżano temperatury spalin poniżej punktu rosy. W celu odzysku większego strumienia ciepła zachodzi potrzeba zainstalowania wymiennika ciepła z kondensacją pary wodnej zawartej w spalinach. Kondensacyjny wymiennik ciepła ma wiele zalet: odzyskuje dodatkowe ciepło utajone, powoduje redukcję emisji CO₂ oraz SO₂, a także poprawia proces odsiarczania spalin w IOS.

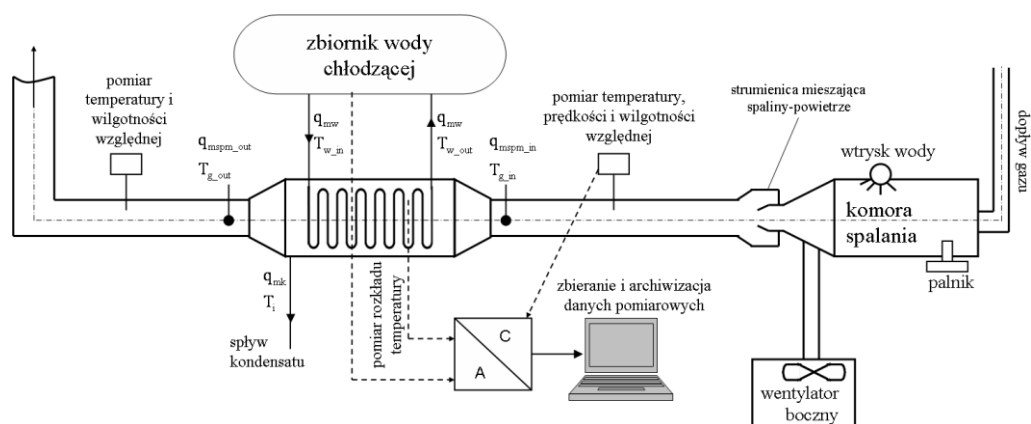
Celem artykułu jest teoretyczne i eksperymentalne zbadanie procesu schładzania spalin z kondensacją pary wodnej w nich zawartej. Badania eksperymentalne przeprowadzono na istniejącym stanowisku badawczym Politechniki Wrocławskiej. Stanowisko to za-

wiera płaszczowo-rurowy, krzyżowo-przeciwprądowy wymiennik ciepła typu spaliny-woda, o maksymalnej mocy cieplnej równej 46,4 kW. Najważniejszym celem badań było porównanie wyników obliczeń numerycznych kondensacyjnego wymiennika ciepła, przedstawionych w pracach [3, 4], z wynikami badań eksperymentalnych i tym samym zweryfikowanie zmodyfikowanego modelu matematycznego Colburna–Hougena kondensacyjnego wymiennika ciepła. Model ten opisano w pracach [3, 4, 5].

Całkowity proces wymiany ciepła spaliny-woda składa się z dwóch podprocesów: schładzania spalin bez kondensacji, a następnie, po osiągnięciu przez spaliny punktu rosy, wymiany ciepła z kondensacją. W ostatnim procesie strumień ciepła oddanego wodzie chłodzącej zawiera strumień ciepła jawnego (na skutek różnicy temperatur między spalinami a wodą) oraz strumień ciepła utajonego (na skutek dyfuzji pary wodnej, której motorem jest różnica udziałów molowych pary w rdzeniu strumienia i przy powierzchni kondensatu). Spaliny w wymienniku powstawały na skutek spalania gazu ziemnego GZ 50, dlatego w obliczeniach wymiennika ciepła pominięto udział molowy SO_2 , natomiast kondensat zawierał jedynie wodę. Według prac [3, 4, 5, 6, 7] spaliny zawierały jedynie dwutlenek węgla, azot oraz parę wodną.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1: Schemat stanowiska badawczego

Stanowisko składa się z: komory spalania, kanału spalin z wmontowanym kondensacyjnym wymiennikiem ciepła, układu chłodzenia wymiennika oraz sekcji pomiarowej. Spaliny powstają w wyniku spalania gazu GZ 50 w komorze spalania wyposażonej w modułowany palnik gazowy. Żądany skład spalin mokrych został otrzymany przez zmieszanie spalin gazowych z powietrzem wlotowym, dostarczanym przez wentylator boczny oraz wtrysk wody do komory spalania przez dyszę mgłową. Przez zadanie odpowiedniego strumienia masy wody wtryskowej, która w temperaturze spalin powyżej 100 °C ulega odparowaniu, regulowany jest np. współczynnik zawilżenia spalin na wlocie wymiennika. Spaliny o zadanym składzie kierowane są do kondensacyjnego wymiennika ciepła, gdzie następuje ich schładzanie wraz z kondensacją, po czym odprowadzane są do kanału kominowego. Czynnikiem chłodzącym spaliny jest

woda, płynąca w układzie otwarto-zamkniętym. Jej stała temperatura w zbiorniku utrzymywana jest przez zmieszanie z zimną wodą z sieci. Obieg wody wymuszony jest przez pompę wodną z falownikiem.

Stanowisko badawcze podłączone jest do szafy sterowniczej wyposażonej w układy regulacji i archiwizacji danych. Cztery niezależne układy regulacji służą do utrzymywania: stałej temperatury i strumienia masy spalin na wlocie wymiennika ciepła, stałej wilgotności względnej spalin oraz stałej temperatury wody chłodzącej wpływającej do wymiennika ciepła. Wyniki pomiarów zbierane oraz archiwizowane są przez komputer za pomocą programu LabView.

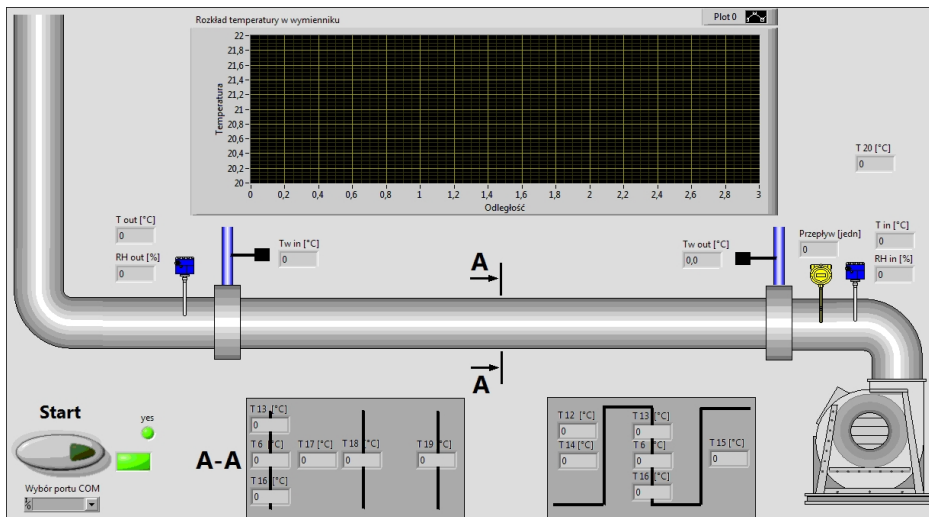
Rury kondensacyjnego wymiennika ciepła, o średnicy 10 mm i grubości ścianki 1 mm, wykonane są ze stali węglowej i pokryte są warstwą PTFE grubości 0,5 mm. Kanał spalin oraz konstrukcję nośną wykonano ze stali odpornej na korozję.

Wymiennik, w celu możliwości obserwacji oraz wizualizacji zjawiska skraplania pary wodnej, wyposażony jest w okienko inspekcyjne, wykonane ze szkła żaroodpornego. Okienko to otwierane jest tylko na czas obserwacji, poza tym całkowicie jest zaizolowane tak jak pozostała część wymiennika ciepła w celu zmniejszenia strat ciepła do otoczenia.

Kondensat, powstały w wyniku skraplania pary wodnej, odprowadzany jest do leja znajdującego się poniżej części wylotowej wymiennika ciepła.

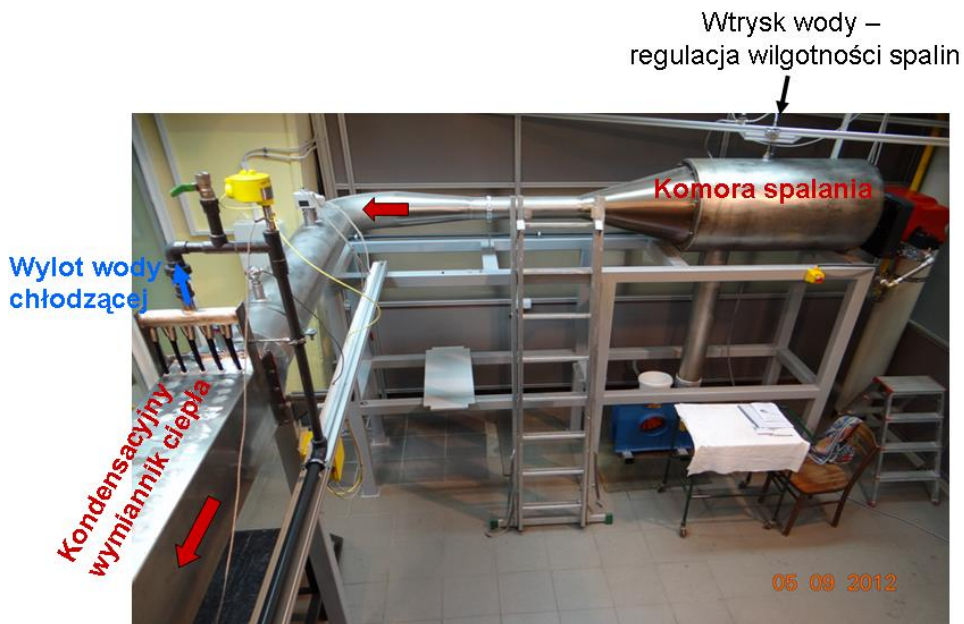
Dodatkowo za pomocą czujników temperatury w wybranych punktach wymiennika ciepła istnieje możliwość pomiaru lokalnej temperatury w poszczególnych sekcjach urządzenia. Termopary zamontowane są na rurach wewnątrz wymiennika oraz w wybranych przestrzeniach pomiędzy rurkami. Układ czujników podłączony jest do systemu akwizycji i wizualizacji wyników oraz do komputera, co umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatur wzdłuż wymiennika ciepła oraz w wybranych przekrojach poprzecznych.

W celu obserwacji wartości zmierzonych oraz rejestracji danych pomiarowych wykorzystano graficzny interfejs użytkownika umożliwiający sterowanie programem LabView. Główną częścią interfejsu jest schematyczny rysunek fragmentu instalacji badawczej. Nad wymiennikiem ciepła znajduje się wykres przedstawiający rozkład temperatur w wybranych przekrojach poprzecznych urządzenia. Poniżej mieszczą się pola przedstawiające wartości temperatur spalin oraz na ściankach rur w wybranych punktach w części kondensacyjnej wymiennika. Ponadto na wlocie i wylocie wymiennika ciepła znajdują się pola wyświetlające strumień masy spalin, ich wilgotność względną oraz temperaturę gazów i wody chłodzącej. Ekran z obrazem z graficznego interfejsu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2: Widok interfejsu graficznego użytkownika

Widok ogólny stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3: Fotografia stanowiska laboratoryjnego

3. PROGRAM BADAŃ

W trakcie badań laboratoryjnych dokonywano zmiany jednego parametru, np. temperatury spalin na wlocie, strumienia masy spalin, strumienia masy wody chłodzącej itd. W trakcie zmian jednej wielkości pozostałe utrzymywane były na stałym poziomie, dzięki zainstalowanym układom regulacji. Badania wykonywano w punktach pracy wymiennika ciepła tak, aby zachodziła kondensacja pary wodnej z przepływających spalin. Charakterystyki przedstawiające zależności między wielkościami mierzonymi, jakie otrzymano w wyniku badań, dotyczą ustalonych stanów pracy wymiennika ciepła.

W niniejszej pracy zbadano wpływ zmiany strumienia masy spalin na pozostałe parametry wymiennika ciepła. Przeprowadzono trzynaście pomiarów. Strumień masy spalin zmieniano w zakresie 0,07–0,13 kg/s. Strumień masy kondensatu obliczano na podstawie różnic wilgotności względnej na wlocie i wylocie wymiennika. Jednocześnie mierzono masę kondensatu wpływającego do zlewki. W celu porównania wartości obliczonych za pomocą modelu matematycznego z wartościami zmierzonymi wybrano kilka parametrów. Są to: długość wymiennika ciepła, strumień masy kondensatu, współczynnik zawilżenia spalin na wylocie wymiennika ciepła, strumień masy wody chłodzącej, temperatura wody na wlocie oraz moc cieplna wymiennika.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

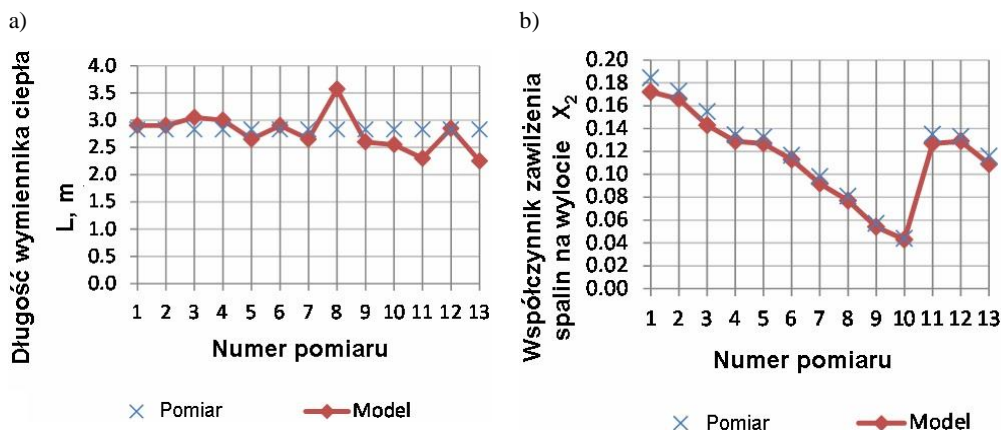
Udziały molowe poszczególnych składników spalin powstałych w wyniku spalania gazu GZ 50 wynosiły: $y_{CO_2} = 0,095$, $y_{N_2} = 0,715$, $y_{H_2O} = 0,19$. Pozostałe składniki spalin pominięto. Po wtrysku wody do komory spalania nastąpiła zmiana poszczególnych udziałów molowych, które zostały obliczone na podstawie zmierzonego strumienia masy spalin oraz zmierzonej wilgotności względnej spalin na wlocie wymiennika ciepła.

Porównanie wartości obliczonych za pomocą modelu matematycznego z wartościami zmierzonymi przedstawiono na rys. 4–6. Na rysunku 4(a) pokazano długość wymiennika ciepła L , obliczoną numerycznie z użyciem danych początkowych na podstawie trzynastu pomiarów, w porównaniu do rzeczywistej długości wymiennika, która wynosi $L = 2,83$ m. Jednak w wyniku obliczeń średnia długość wymiennika ciepła wynosiła $L = 2,78$ m (wartości obliczone mieściły się w przedziale 2,2–3,5 m). Błąd obliczeń wynikał z głównej pętli dostrajania **WHILE abs[Tw_in – Tw[I]] > 3 do** (szczegółowy algorytm obliczeń na podstawie zmodyfikowanego modelu matematycznego kondensacyjnego wymiennika ciepła opisano w [6]). W algorytmie obliczeń należy podać różnicę pomiędzy zmierzoną temperaturą wlotową wody chłodzącej T_{w_in} a temperaturą wody w ostatniej sekcji obliczeniowej wymiennika. W niniejszej pracy różnica ta wynosiła 3 °C. Porównanie wartości zmierzonej i obliczonej temperatury wlotowej wody przedstawiono na rys. 5(a).

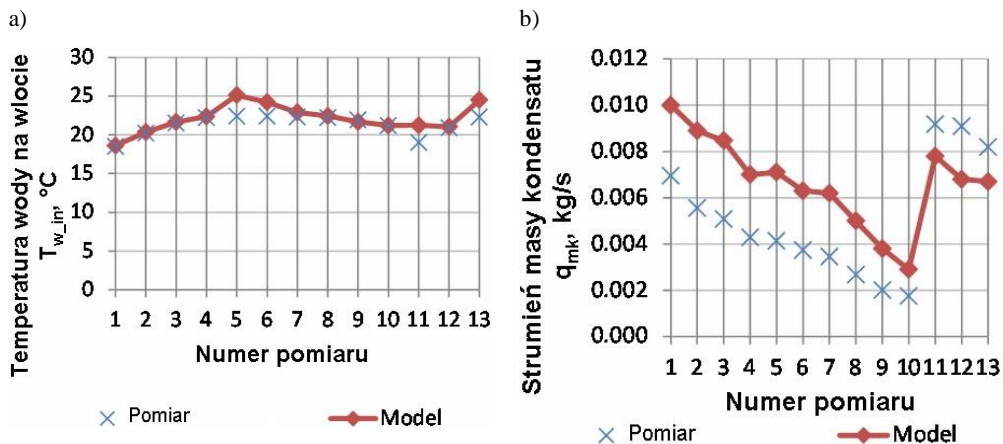
Na rysunku 4(b) przedstawiono porównanie wartości (obliczonej numerycznie oraz obliczonej na podstawie zmierzonej wilgotności względnej) współczynnika zawilżenia spalin X_2 na wylocie wymiennika ciepła. Średnia niepewność pomiaru wynosiła 4,86%.

Na rysunku 6(b) przedstawiono porównanie zmierzonego i obliczonego całkowitego strumienia ciepła przekazanego wodzie chłodzącej. Wartości obliczone mieściły się

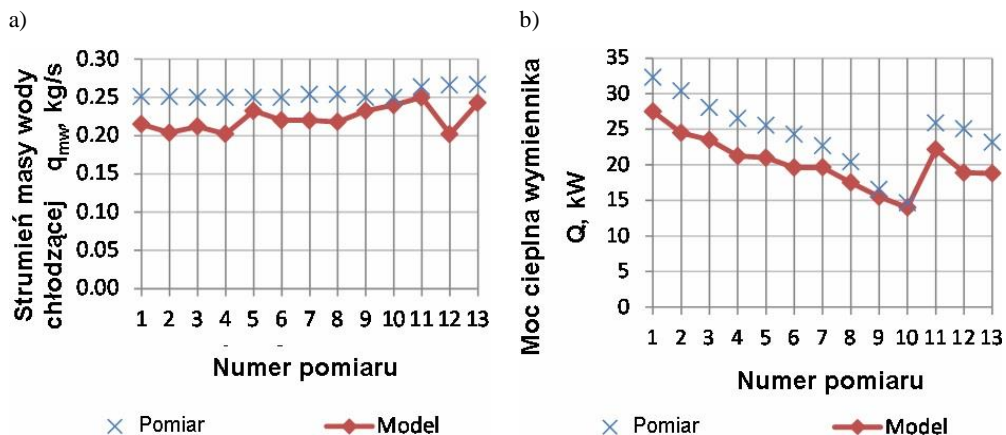
w przedziale 15–30 kW, natomiast różnica między wartościami obliczonymi i zmierzonymi nie przekraczała 4 kW. W jednej komórce obliczeniowej wymiennika strumień ciepła przekazanego wodzie chłodzącej wynosił 2,7–3 kW. Aby zredukować błąd obliczeń, należało wykonać jedną z dwóch operacji: dodać jedną sekcję obliczeniową i tym samym zwiększyć moc cieplną wymiennika o około 3 kW lub tego nie robić. Nowa komórka obliczeniowa zmniejszała niepewność obliczeń długości wymiennika ciepła L , zwiększając tym samym niepewność obliczeń mocy cieplnej wymiennika Q lub na odwrót.



Rys. 4: Porównanie wyników obliczeń numerycznych (linia ciągła) z wynikami badań eksperymentalnych (znak x): (a) długość wymiennika ciepła L , (b) współczynnik zawilżenia spalin X_2 na wylocie



Rys. 5: Porównanie wyników obliczeń numerycznych (linia ciągła) z wynikami badań eksperymentalnych (znak x): (a) temperatura wody chłodzącej na wlocie T_{w_in} , (b) strumień masy kondensatu q_{mk}



Rys. 6: Porównanie wyników obliczeń numerycznych (linia ciągła) z wynikami badań eksperymentalnych (znak x): (a) strumień masy wody chłodzącej q_{mw} , (b) moc cieplna wymiennika Q

Autorzy rozwiązali powyższy problem przez zmniejszenie różnicy temperatur spalin ΔT_g , która jest miarą długości jednej komórki obliczeniowej. Zmniejszenie wartości ΔT_g spowodowało zwiększenie liczby komórek obliczeniowych i poprawiło dokładność obliczeń. Spowodowało to również zmniejszenie niepewności pomiaru temperatury wody chłodzącej na wlocie wymiennika.



Rys. 7: Proces kondensacji pary wodnej w spalinach obserwowany w okienku inspekcyjnym

Innym powodem rozbieżności między wynikami obliczeń numerycznych a wynikami badań laboratoryjnych było założenie w modelu matematycznym, że zachodzi tylko kondensacja błonowa. W rzeczywistości na początku zachodziła kondensacja kropłowa, a dopiero potem przekształcała się w kondensację błonową.

W tabeli 1 przedstawiono analizę błędów. Podano niepewności pomiarów dla każdego z trzynastu pomiarów oraz dla każdego z parametrów wraz ze średnimi błędami obliczeń. Duża niepewność pomiaru strumienia masy kondensatu wynika z tego, iż znaczna część (prawie połowa całego strumienia) kondensatu osadzała się na rurkach wymiennika (rys. 7), a tylko pozostała odprowadzana była do zlewki. Porównanie wartości obliczonego i zmierzonego strumienia masy wykroplonego kondensatu przedstawiono na rys. 5(b).

Tab. 1: Analiza błędów obliczeń dla wybranych parametrów wymiennika ciepła

Parametr	Długość wymiennika L , %	Współczynnik zawilżenia spalin na wylocie X_2 , %	Temperatura wody na wlocie T_{w_in} , %	Strumień masy kondensatu q_{mk} , %	Strumień masy wody chłodzącej q_{mw} , %	Moc cieplna wymiennika Q , %
1	10,8	6,67	-0,65	-44,00	14,34	14,83
2	10,8	3,94	-0,74	-60,20	18,73	19,39
3	6,2	7,68	-0,70	-66,86	15,20	16,29
4	7,7	4,02	-0,77	-63,10	19,08	19,88
5	18,5	4,08	-12,14	-71,82	7,00	17,84
6	10,8	3,09	-8,04	-68,84	12,00	19,35
7	18,5	6,22	-2,69	-79,80	13,39	13,32
8	-9,8	4,82	-1,04	-87,00	14,17	14,36
9	20,0	5,43	1,05	-90,00	7,00	6,35
10	21,5	2,27	0,05	-65,30	4,00	4,53
11	29,2	5,93	-11,74	14,98	5,30	14,39
12	12,3	3,01	-0,67	25,20	24,06	24,63
13	30,8	6,03	-9,87	18,26	8,99	18,82
Średnia niepewność	15,9	4,86	-3,69	-49,11	12,55	15,69

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych kondensacyjnego wymiennika ciepła typu spalin-y-woda o przepływie krzyżowo-przeciwprądowym. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń numerycznych modelu matematycznego kondensacyjnego wymiennika ciepła opisanego przez autorów w [3, 4, 5, 6]. Analiza przeprowadzonych badań umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie kondensacyjnego wymiennika ciepła ma sens w przypadku spalin o wysokiej wilgotności (np. spalin pochodzących z węgla brunatnego) ze względu na dominujący udział strumienia ciepła utajonego w procesie schładzania spalin z kondensacją.
2. Maksymalny udział strumienia ciepła utajonego odzyskanego w procesie kondensacji pary wodnej w spalinach wynosi 90% całego strumienia ciepła spalin, co daje wiele korzyści z zastosowania kondensacyjnego wymiennika ciepła do odzysku ciepła odpadowego ze spalin w bloku energetycznym węglowym.

3. Stwierdzono dobrą zgodność między wartościami zmierzonymi a obliczonymi numerycznie, co ułatwia wnioskowanie o poprawności opracowanego wcześniej algorytmu obliczeń kondensacyjnego wymiennika ciepła.

LITERATURA

- [1] Wójs K., Szulc P., Redzicki R., Gadowski J., *Odzysk ciepła odpadowego spalin do podgrzewu regeneracyjnego bloku energetycznego*, Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, 421–428, 2000.
- [2] Webb R., Wanniarachchi A., *The effect of non-condensable gases in water chiller condensers – literature survey and theoretical predictions*, ASHARE Trans. 80, 142–159, 1980.
- [3] Polko K., *Modelowanie procesu odzysku ciepła ze spalin z kondensacją*, Zeszyty Energetyczne. T. 1, Problemy współczesnej energetyki / pod red. Henryka Kudeli, Krzysztofa Czajki i Wojciecha Moronia, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 11–22, 2014.
- [4] Polko K., *Modelowanie procesu odzysku ciepła odpadowego spalin wylotowych*, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Raport serii PREPRINTY nr 35/2012, Wrocław 2012, Rozprawa doktorska.
- [5] Lichota J., Polko K., Wójs K., *Condensing heat exchanger*, Journal of Energy and Power Engineering, vol. 8, nr 9, 1511–1542, 2014.
- [6] Wójs K., Polko K., Lichota J., *Kondensacyjny odzysk ciepła ze spalin*, Rynek Energii, nr 3, 101–113, 2012.
- [7] Lichota J., Polko K., Szulc P., Tietze T., Wójs K., *Heat exchanger condensing flue gases in coal-fired power plant - analysis of experiments*, The Clearwater Clean Coal Conference [Dokument elektroniczny] : proceedings of the 39th International Technical Conference on Clean Coal & Fuel Systems, June 1 to 5, 2014, Clearwater, Florida, USA / [ed. Barbara A. Sakkestad. North Potomac] : Coal Technologies Associates, 1–13, 2014.