

TOMASZ KAMIŃSKI
DARIUSZ KARDAS^{*}

Instytut Maszyn Przepływowych
Polskiej Akademii Nauk
Gdańsk

Charakterystyka pomiarowa kotła na biomasę chłodzonego olejem w instalacji ORC

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych stanowiska kotłowego należącego do laboratorium mikrośiłowni Instytutu Maszyn Przepływowych. Celem pracy było wyznaczenie bilansów energii kotła opalanego biomasą, którego zadaniem jest dostarczanie ciepła dla eksperymentalnej instalacji do produkcji ciepła i prądu w mikroskali. Specyfika mikrośiłowni polega na zastosowaniu turbiny parowej w tej skali urządzeń do produkcji prądu, co powoduje nietypowe wymagania dotyczące kotła. Ze względu na te wymogi zastosowano olej termalny jako medium odbierające ciepło od spalin. W pracy przedstawiono charakterystyki cieplne kotła sporządzone na podstawie serii pomiarów. Badania kotła prowadzono dla różnych wydatków paliwa, ilości powietrza oraz strumieni masy czynnika chłodzącego. Na podstawie pomiarów sporządzono wykresy parametrów chemicznych i cieplnych dla różnych nastaw kotła.

1 Wstęp

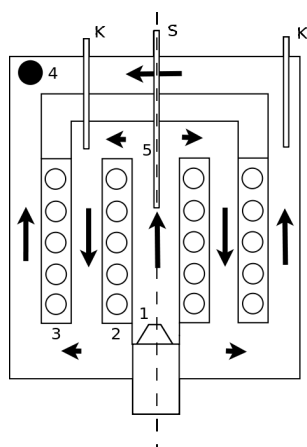
Celem pracy jest przedstawienie budowy i charakterystyki pracy kotła małej mocy opalanego biomasą i chłodzonego olejem termalnym. Kocioł ten stanowi element badawczej instalacji do produkcji ciepła i prądu w mikroskali, której podstawowymi elementami są kocioł na biomasę, turbina parowa wraz z generatorem prądu elektrycznego, parownik, kondensator i pompa (rys. 1). Instalacja tego typu ma być stosowana w gospodarstwach domowych i gospodarstwach rolnych posiadających własne zasoby biomasy, wymagających zaopatrzenia w ciepło. Podstawą zamiany energii cieplnej w energię elektryczną jest organiczny obieg Rankine'a (ORC). Ze względów bezpieczeństwa zastosowany w części parowej mikrośiłowni czynnik roboczy o niskiej temperaturze wrzenia, nie może odbierać ciepła bezpośrednio w kotle. Zastosowano więc olej termalny jako medium pośredniczące. Olej ten odbiera ciepło bezpośrednio z kotła, a następnie oddaje je do czynnika

^{*}E-mail: dk@imp.gda.pl

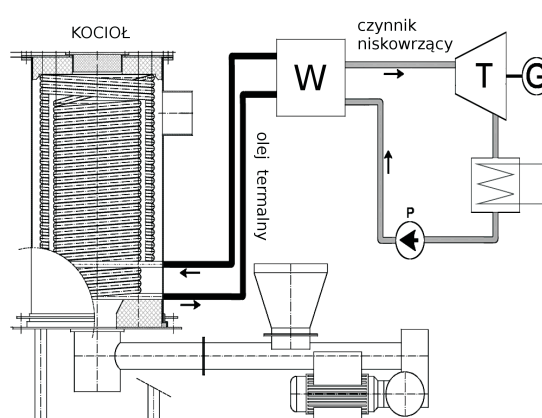
niskowrzącego. Tak jak układ mikroCHP (micro Combined Heat and Power) jest przedsięwzięciem nietypowym w swojej dziedzinie, tak kocioł chłodzony olejem stanowi nietypową konstrukcją kotłową.

2 Budowa kotła

Ze względu na wymagane wysokie temperatury czynnika, jako medium wybrano olej termalny. W konsekwencji dokonanego wyboru niemożliwe jest zastosowanie płaszcza chłodzącego, gdyż taka konstrukcja mogłaby doprowadzić do miejscowego przegrzania czynnika. W przypadku wody dochodziłoby jedynie do miejscowego wrzenia, natomiast olej zmieniałby stopniowo swe właściwości lub uległ zwęgleniu. W obu przypadkach doprowadziłoby to do gorszej wymiany ciepła między olejem a spalinami. By lepiej sterować przepływem oleju zdecydowano się na zastosowanie wymiennika rurowego. Kocioł zbudowany jest więc z dwóch, połączonych ze sobą zwojnic, gdzie mniejsza zwojnica umieszczona jest wewnątrz większej (rys. 1). Olej termalny wpływa wpierw do większej zwojnicy a następnie łącznikiem dostaje się do mniejszej. Natomiast spaliny w pierwszej kolejności przepływają wewnątrz zwojnicy mniejszej, następnie zmieniają kieru-



Rysunek 1. Schemat przepływu spalin wewnątrz kotła: 1 – palnik, 2 – mniejsza zwojnica, 3 – większa zwojnica, 4 – czopuch, 5 – termopara z osłoną korundową, K, S – typy termopar

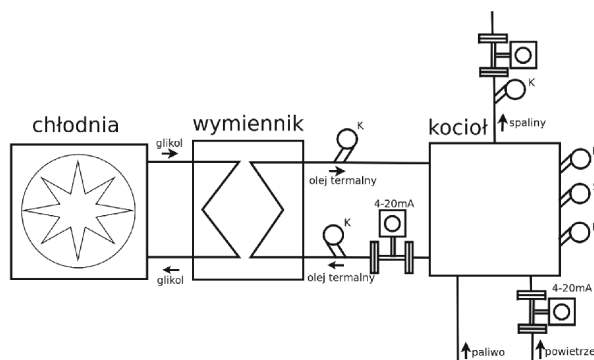


Rysunek 2. Schemat ideowy zasady działania mikrośilowni z turbiną parową: T – turbina, W – wymiennik, G – generator prądu elektrycznego, P – pompa

nek by znaleźć się pomiędzy zwojnicami, a ostatecznie podążają po zewnętrznej stronie zwojnicy większej w kierunku komina. Uproszczoną zasadę działania urządzenia zamieszczono na rys. 2. Strzałkami oznaczono kierunki przepływu spalin. Można więc zauważyć, iż wymiana ciepła zachodzi raz współprądowo a innym razem przeciwprądowo.

3 Stanowisko pomiarowe i jego wyposażenie

Stanowisko pomiarowe umożliwia samodzielną pracę kotła bez konieczności podgrzewania czynnika niskowrzącego. W takim przypadku czynnikiem odbierającym ciepło był glikol etylenowy (rys. 3). W ten sposób możliwe jest sporządzenie bilansów ciepła przy różnych nastawach palnika, strumieniach oleju i różnym odbiorze ciepła. Jak widać na rys. 3 do palnika dostarczane jest zarówno paliwo jak i powie-



Rysunek 3. Schemat blokowy układu pomiarowego do bilansowania kotła rurowego z palnikiem retortowym

trze. Podawanie paliwa jest regulowane na zasadzie run-stop, z różnymi czasami postoju i działania. Aktualnie wyznaczenie ilości dostarczanego paliwa odbywa się w oparciu o zmierzoną na zimno ilość podawanego paliwa dla poszczególnych nastaw. Budowa palnika nie pozwala na stosowanie bezpośredniego pomiaru masy, gdyż zbiornik jest na sztywno przyłączony do palnika i kotła. Dodatkowo, za pomocą nadmuchu, do palnika dostarczane jest powietrze. Pomiar przepływu powietrza odbywa się na odcinku prostym pomiędzy nadmuchem a palnikiem za pomocą przepływomierza termicznego.

Do pomiaru przepływu oleju zastosowano przepływomierz turbinowy GPI GBT-075Hx-x 3/4". Jak wiadomo przepływomierze tego typu nie nadają się dla cieczy o bardzo dużej lepkości. Lepkość oleju termalnego jest wysoka w tempe-

raturze pokojowej, jednak znacząco spada z temperaturą. Zastosowany olej Shell Thermia B w temperaturze 0 °C posiada lepkość kinematyczną równą 230 mm²/s, natomiast w temperaturze 40 °C spada ona do 25 mm²/s. Tak więc przepływomierz ten będzie zaniżał wyniki przy przepływie w temperaturze pokojowej. Ze względu na ograniczone miejsce nie możliwe było zapewnienie odcinków prostych między pompą a kotłem, zdecydowano się więc na umieszczenie przepływomierza na wyjściu z kotła. Zaletą pracy układu pomiarowego z przepływomierzem umieszczonym za kotłem jest więc brak wpływu pracy pompy na przepływomierz. Wybrany przepływomierz został zamówiony w wersji specjalnej, zdolnej pracować w temperaturze do 400 °C. Ponadto olej na wyjściu z kotła posiada niższą lepkość, niż na wejściu, co pozwala na zastosowanie tego rodzaju przepływomierzy.

W celu pomiaru temperatury oleju zarówno na wlocie i wylocie kotła zastosowano termopary typu K. Wybór termopary był spowodowany długim odcinkiem prostym między urządzeniem pomiarowym a czujnikami. Wewnątrz kotła zastosowano dwie termopary typu K i jedną typu S w osłonie korundowej. Termopara typu S zapewnia pomiar nad płomieniem, co wymagało zastosowania osłony ogniotrwalej. Dla pomiaru temperatury spalin stosowana jest termopara typu K połączona z sondą do poboru spalin.

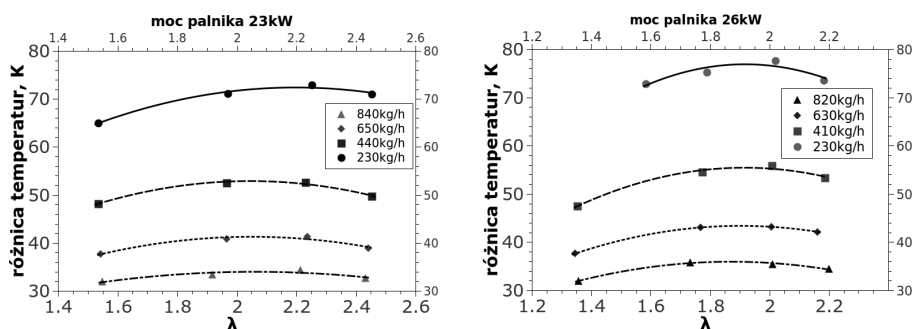
Na potrzeby pomiarów w kotle zastosowano analizator spalin GA-40Tplus, w którym trzy czujniki (CO, O₂, NO_x) są czujnikami elektrochemicznymi, zaś pomiary CO₂ wykorzystuje absorpcję w podczerwieni. Ponadto urządzenie posiada wbudowany kondycjoner gazów z trzymetrowym ogrzewanym węzłem i zintegrowanym ogrzewanym filtrem wstępnym, co wydłuża żywotność urządzenia. Spaliny z kanału pomiarowego pobierane są przy pomocy sondy, wewnątrz której umieszczona jest termopara Ni-CrNi o maksymalnej temperaturze pomiarowej 800 °C.

Pomiar przepływu spalin wykonano przy użyciu specjalnej wersji przepływomierza termicznego przystosowanego do pracy z wysoką temperaturą. Pomiar w wysokiej temperaturze zapewnia odizolowanie elektroniki pomiarowej z konwerterem 4-20mA i sondy przepływomierza.

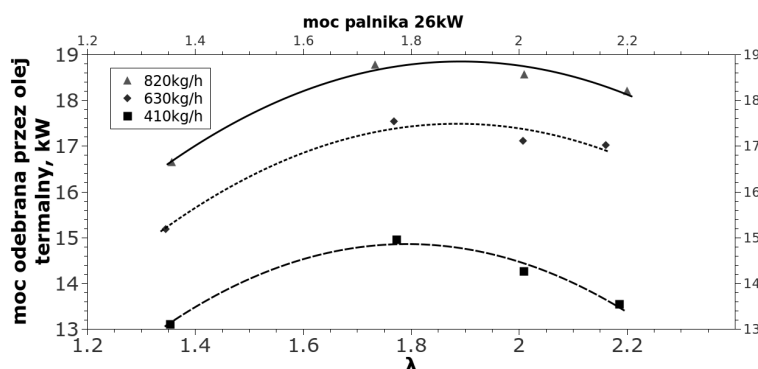
4 Wyniki pomiarów

Jak wspomiano wyżej w trakcie pomiarów rejestrowane były temperatury oleju na wlocie i wylocie kotła, spalin na czopuchu i wewnątrz urządzenia (rys. 4). Najwyższa osiągnięta temperatura oleju wynosiła 240 °C. Dla lepszego porównania wyników pomiarowych utrzymywano temperaturę oleju na wejściu około 110 °C. W tych warunkach najwyższa temperatura na wyjściu wynosiła 211 °C.

Jak wiadomo temperatura na wyjściu zależy dość istotnie od wejściowej, tak więc istotniejsze są wykresy różnic temperatur na wejściu i wyjściu kotła. Przykładowe wyniki uzyskanej różnicy temperatur oleju na wlocie i wylocie od współczynnika nadmiaru powietrza (λ), dla różnej ilości podawanego paliwa do spalania, przedstawiono na wykresach 4. Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane moce dla nastawy palnika 26 kW (5,7kg/h paliwa, przy wartości opałowej 16,5 MJ/kg).

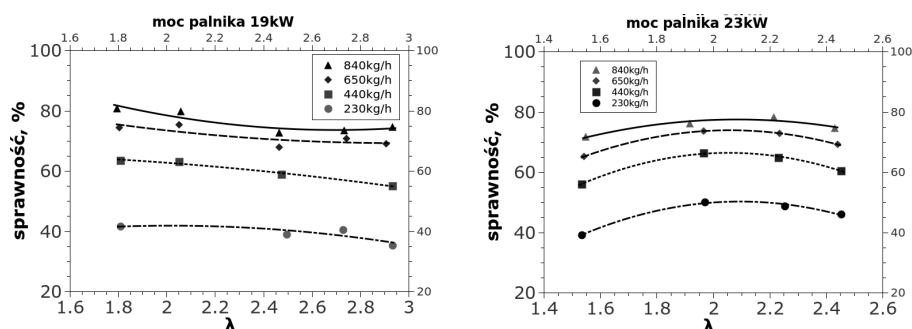


Rysunek 4. Różnica temperatur na wlocie i wylocie kotła

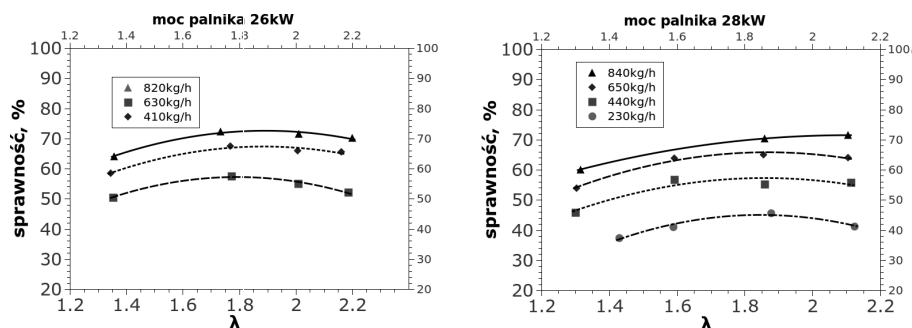


Rysunek 5. Moc odebrana przez olej w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza dla trzech wartości strumienia masywnego oleju

Poniżej (rys. 6 i 7) przedstawiono wyniki obliczeń sprawności kotła w zależności od wartości współczynników nadmiaru powietrza dla różnego natężenia przepływu oleju. Trzeba tu zauważyć fakt występowania wysokich temperatur oleju, co negatywnie wpływa na uzyskiwane sprawności. Możliwe jest jednak zastosowanie w przyszłości dodatkowego wymiennika z innym medium, co znacząco poprawi sprawność urządzenia, zdefiniowanej jako stosunek mocy cieplnej odebra-



Rysunek 6. Uzyskane sprawności dla dwóch nastaw palnika w zależności od współczynników nadmiaru powietrza dla różnych natężeń masowych oleju

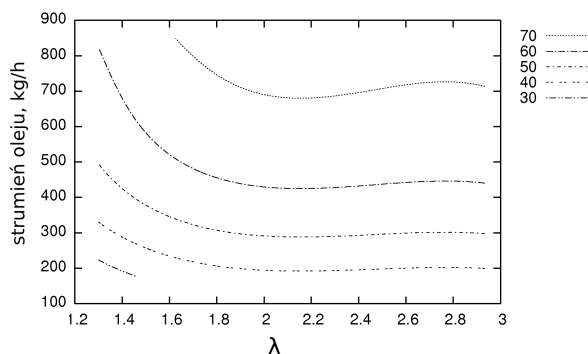


Rysunek 7. Uzyskane sprawności dla dwóch nastaw palnika w zależności od współczynników nadmiaru powietrza dla różnych natężeń masowych oleju

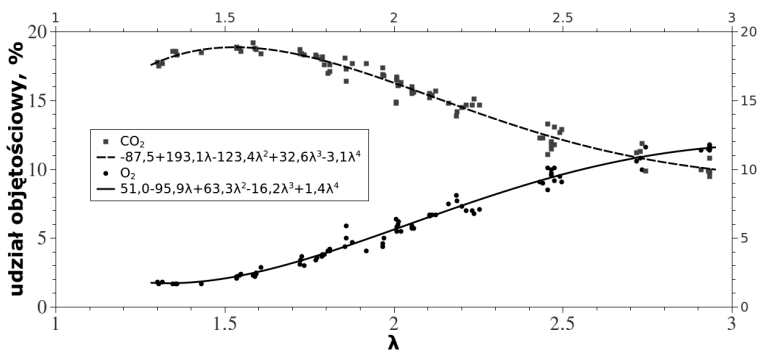
nej przez olej względem mocy cieplnej palnika. Moc cieplną palnika wyznaczono na podstawie wartości opałowej paliwa (16.5MJ/kg).

Jak widać na rys. 6 i 7 najwyższe osiągnięte sprawności nieznacznie przekraczają 80%. Osiągane są one przy współczynniku nadmiaru powietrza około 2. Zwiększanie lub zmniejszenie współczynnika nadmiaru powietrza powoduje stopniowe pogorszenie się sprawności kotła. Na wykresach widać również wyższą sprawność przy większych strumieniach oleju, co jest związane z mniejszą różnicą temperatur na wlocie i wylocie kotła, a co za tym idzie niższą średnią temperaturą tego medium.

Wykonano również aproksymacje wszystkich uzyskanych sprawności za pomocą powierzchni opisanej sumą dwóch wielomianów stopnia trzeciego. Wyznaczone wartości przedstawiono w postaci izolinii na rys. 8. Można tu zauważyć osiąganie sprawności powyżej 70% przy współczynniku nadmiaru powietrza wyższym od



Rysunek 8. Uzyskane sprawności w zależności od natężenia przepływu oleju i współczynnika nadmiaru powietrza aproksymowane za pomocą sumy dwóch wielomianów stopnia trzeciego

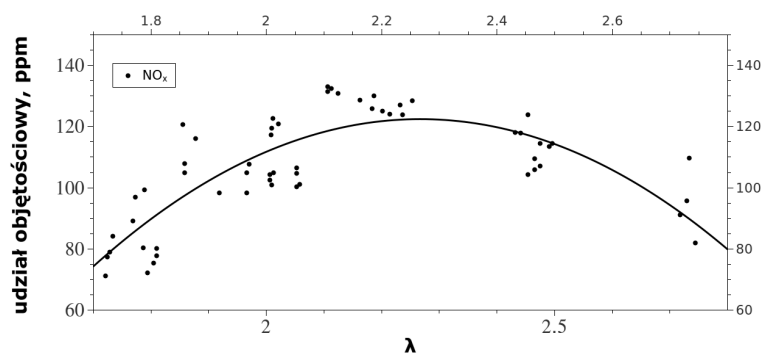


Rysunek 9. Wyniki analizy zawartości O_2 i CO_2 w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza, przy spalaniu peletów z mieszanki drzew liściastych

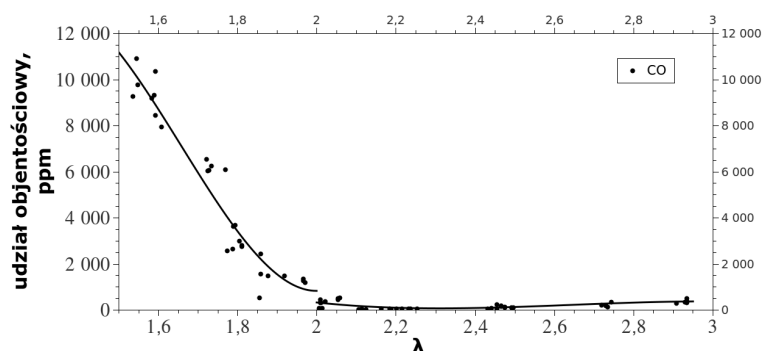
1,8 i strumieniu oleju powyżej 700 kg/h.

Jak już wspomniano wykonywano również analizę spalin, czego wyniki przedstawiono na rys. 9,10 i 11. Na rys. 9 przedstawiono zmiany zawartości CO_2 i O_2 w spalinach ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza. Na rys. 9 można zauważyć, iż dla współczynnika nadmiaru powietrza równego 2, przy którym osiągnano najwyższe sprawności kotła, zawartość O_2 w spalinach wynosiła około 6%. Informacja ta może zostać wykorzystana przy automatyzacji kotła z wykorzystaniem sondy lambda. Na rys. 10 można zauważyć, iż najwyższe udziały objętościowe NO_x wystąpiły przy współczynniku nadmiaru powietrza równym 2,2. Dla $\lambda=2$ stężenie NO_x utrzymywało się w zakresie od 100 ppm do 120 ppm. W przypadku CO (rys. 11) można zauważyć, że powyżej współczynnika nadmiaru

powietrza równego 2 istnieje bardzo niewielka tendencja wzrostowa ilości tlenku węgla w spalinach, natomiast poniżej tej liczby zawartość CO silnie wzrasta.



Rysunek 10. Wyniki analizy zawartości NOx w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza, przy spalaniu peletów z mieszanki drzew liściastych



Rysunek 11. Wyniki analizy zawartości CO w spalinach w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza, przy spalaniu peletów z mieszanki drzew liściastych

5 Podsumowanie

Maksymalną sprawność cieplną kocioł osiągnął dla współczynnika nadmiaru powietrza równego 2. Mniejsza ilość powietrza skutkuje nie tylko spadkiem mocy cieplnej ale również dużą ilością smoły na powierzchniach kotła. W trakcie prac zaobserwowano odkładanie się grubych warstw osadów na węzownicach, co pogarsza wymianę ciepła, przez co zmniejsza się sprawność kotła. Efektywność pracy

kotła zależy również od strumienia czynnika chłodzącego. Większy strumień masy oleju zwiększa sprawność instalacji kotłowej i jednocześnie skutkuje to mniejszą różnicą temperatur oleju pomiędzy wylotem z kotła i wlotem do niego.

Praca finansowana w ramach projektu nr POIG01.01.02-00-016/08 pt. "Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii".

Praca wpłynęła do Redakcji 1 sierpnia 2012

Literatura

- [1] Kamiński T.: *Wstępna koncepcja stanowiska kotłowego i jego opomiarowanie*. IMP PAN, 2010.

Experimental investigation of the biomass boiler cooled with thermal oil in ORC installation

S u m m a r y

The aim of the article was to present the testing results and the analysis of performance characteristics of a small-scale biomass-fired boiler, cooled with thermal oil. This boiler is a part of the laboratory installation for combined production of heat and electric power in micro-scale (micro CHP) in the Szewalski Institute of Fluid-Flow Machinery in Gdańsk. Both, the oil-cooled boiler and the micro CHP system, are the untypical solution in the field of electric power production. The measurements were performed for different air, oil and fuel mass flow rates.

