

Dr inż. Grzegorz ŻYWICA

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.322

Prof. dr hab. inż. Jan KICIŃSKI

Dr inż. Tomasz KACZMARCZYK

Dr inż. Eugeniusz IHNATOWICZ

Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku

Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin

## PROJEKTOWANIE I BADANIA DOMOWEJ MIKROSIŁOWNI KOGENERACYJNEJ ORC

*Streszczenie: W artykule omówiono koncepcję konstrukcyjną, budowę oraz badania prototypowej mikrosiłowni kogeneracyjnej ORC (Organic Rankine Cycle), umożliwiającej wytwarzanie energii cieplnej i elektrycznej w warunkach domowych. Źródłem ciepła w mikrosiłowni jest kocioł na biomasę. Energia elektryczna jest wytwarzana przy pomocy specjalnie zaprojektowanej bezolejowej mikroturbiny parowej. Dzięki zastosowaniu łożysk gazowych zasilanych czynnikiem roboczym opracowany turbogenerator ma zwartą i hermetyczną budowę. W artykule zostały omówione również wybrane wyniki badań eksperymentalnych. Uzyskane wyniki dowiodły, że opracowany prototyp mikrosiłowni pracował zgodnie z założeniami projektowymi i przy mocy cieplnej kotła na poziomie 25 kW umożliwiał uzyskanie ponad 2 kW mocy elektrycznej.*

## DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COGENERATIVE DOMESTIC MICRO POWER PLANT WITH ORC SYSTEM

*Abstract: This paper discusses the design concepts, construction and experimental investigation of the prototype of small CHP unit with ORC system. The source of heat is a boiler designed for biomass combustion. Electricity is generated using specially designed oil-free steam micro-turbine. The turbo-generator has compact structure and hermetical casing thanks to the use of gas bearings lubricated by working medium. The article also discusses selected experimental results conducted under laboratory conditions. The achieved results have shown that the developed energy system operated in accordance with design assumptions. Electricity derived from the prototype was around 2 kW, with boiler's thermal power of 25 kW.*

*Słowa kluczowe: układy ORC, mikroturbiny, kogeneracja rozproszona*  
*Keywords: ORC systems, microturbines, dispersed cogeneration*

### 1. WPROWADZENIE

W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku prowadzone są prace nad różnymi technologiami umożliwiającymi wykorzystanie źródeł odnawialnych, w tym nad małymi

układami kogeneracyjnymi służącymi do jednoczesnego wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej w małej skali. Jedną z najszybciej rozwijających się technologii kogeneracyjnych są układy funkcjonujące w oparciu o obieg ORC. Duża popularność tej technologii wynika m.in. z bardzo szerokiej możliwości zastosowania [1], gdyż może ona wytwarzać energię elektryczną niezależnie od źródła ciepła. W zależności od lokalnych zasobów energetycznych układ ORC może współpracować z kotłem na biomasę, inne paliwo odnawialne lub nieodnawialne, ze źródłem ciepła geotermalnego lub odpadowego, a nawet jako nadbudowa większych systemów energetycznych, w których nie wykorzystuje się w pełni dostępnej energii cieplnej. Prace nad podzespołami mikrośilowni oraz konstrukcją i badaniami całych układów są aktualnie prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie, co potwierdzają również liczne publikacje o tej tematyce. W większości publikacji omawiane są badania prowadzone na instalacjach badawczych w warunkach laboratoryjnych, a w zakresie mocy elektrycznej do kilku kW praktycznie nie istnieją jeszcze rozwiązania dostępne komercyjnie.

Aktualnie prowadzone prace badawcze mają na celu głównie rozwój technologii ORC do fazy komercyjnej. Wdrożenie tej technologii wiąże się z koniecznością pokonania barier technicznych i ekonomicznych, którym poświęca się wiele publikacji naukowych. Głównym problemem jest konstrukcja ekspandera. W tym zakresie mocy mogą być stosowane różnego typu rozwiązania, w tym ekspandery spiralne, śrubowe, łopatkowe czy turbinowe (mikroturbiny parowe). Przegląd różnych typów ekspanderów, głównie o mocy do 10 kWel, rozwijanych obecnie przez ośrodki przemysłowe i naukowe, został zamieszczony np. w pracy [2]. Żaden z omawianych ekspanderów nie jest jeszcze gotowy do produkcji seryjnej i sprzedaży na większą skalę. Głównym tematem badań różnego typu ekspanderów jest poprawa ich sprawności. Prace w tym zakresie są prowadzone zarówno na drodze badań eksperymentalnych [3-5] jak i obliczeń numerycznych [6-8]. Prace nad ekspanderami są prowadzone również w IMP PAN w Gdańsku. Dotychczas przeprowadzone badania wykazały, że najbardziej atrakcyjnym rozwiązaniem w warunkach domowych są ekspandery turbinowe [9,10]. W wykonaniu bezolejowym mikroturbiny parowe są nowoczesnym i bardzo niezawodnym rozwiązaniem. W porównaniu z innymi ekspanderami nie wymagają one smarowania olejem, uszczelnień ruchowych i są bardzo ciche [10, 11]. Dzięki uzyskiwanym wysokim prędkościom mają bardzo małe wymiary. Posiadają tylko jeden element obrotowy (wirnika z turbiną i generatorem), który przy odpowiednio zaprojektowanym układzie łożyskowania nie zużywa się podczas pracy [11, 12]. Umożliwiają też uzyskanie satysfakcjonującego poziomu sprawności przepływowej na poziomie nawet do ok. 80%.

W dalszej części artykułu przedstawiono prototyp domowej mikrośilowni kogeneracyjnej ORC opracowany w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Paliwem mikrośilowni jest biomasa w postaci pelletu, a energia elektryczna jest wytwarzana przy użyciu wysokoobrotowej bezolejowej mikroturbiny parowej. Wymiary mikrośilowni pozwalają na instalację w domach jednorodzinnych. Jest to pierwsza w kraju i prawdopodobnie w tej części Europy tego typu mikrośilownia kogeneracyjna. Rozruch prototypu odbył się w połowie 2014 roku. Od tego czasu prowadzone były różne badania eksperymentalne, których celem było wyznaczenie charakterystyk zbudowanego urządzenia oraz jego optymalizacja.

## 2. OBIEG TERMODYNAMICZNY I PODZESPOŁY MIKROSIŁOWNI

Prototyp domowej mikrośilowni kogeneracyjnej ORC powstał w ramach projektu badawczego współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej. Głównym celem tego projektu było opracowanie technologii energetycznych umożliwiających lepsze wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Dlatego układ ORC wytwarzający energię

elektryczną został zintegrowany z kotłem na biomasę. Tego typu paliwo stanowi łatwo dostępne źródło energii odnawialnej, a jego ilość jest niezależna od chwilowych warunków pogodowych. Poza tym biomasa jest jednym z najpopularniejszych paliw stosowanych do ogrzewania domów jednorodzinnych, szczególnie na obszarach wiejskich.

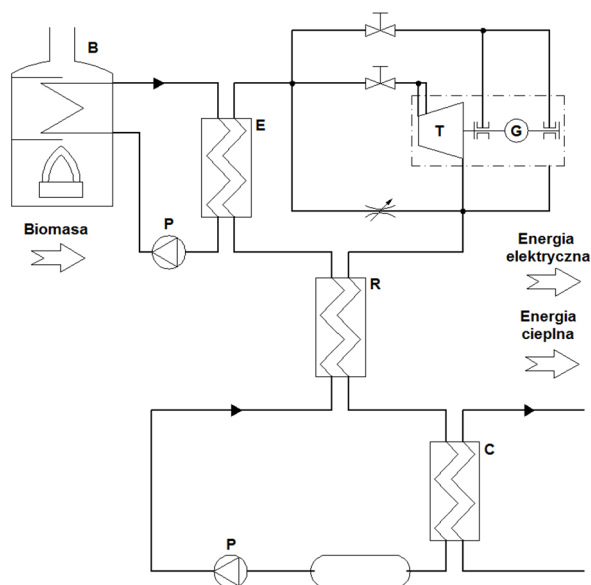
W ramach wstępnych założeń projektowych oszacowano zapotrzebowanie na energię cieplną i elektryczną w przeciętnym domu jednorodzinnym. Na tej podstawie przyjęto, że maksymalne moce układu kogeneracyjnego powinny być na poziomie ok. 25 kW mocy cieplnej i ok. 2,5 kW mocy elektrycznej. Przy takich założeniach możliwe było wykorzystanie różnego typu ekspanderów. Ze względu na największy potencjał dalszego rozwoju oraz aspekty eksploatacyjne, jako ekspander zdecydowano się zastosować mikroturbinę parową wykonaną w technologii bezolejowej. Maszyny tego typu w przypadku małych układów ORC mają kilka zalet, a najważniejsze z nich to [9-12]: wysoka sprawność, brak zużywających się części, hermetyczna konstrukcja oraz cichobieżność. Duże znaczenie w przypadku wykorzystania układu ORC w warunkach domowych miały również małe wymiary, co pozwalało na opracowanie zwartej konstrukcji. Podstawowe założenia techniczne przyjęte na początkowym etapie prac zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe parametry prototypowej mikrośirowni ORC

Parametr	Wartość
Paliwo	Biomasa (pellet)
Moc cieplna	~ 25 kW
Moc elektryczna	~ 2,5 kW
Typ ekspandera	Mikroturbina parowa (bezolejowa)
Inne wymagania	Bezpieczna eksploatacja, małe wymiary i cicha praca, niezawodność

Po analizach i porównaniach przeprowadzonych przez zespół naukowców z IMP PAN jako czynnik roboczy mikrośirowni wytypowana została mieszanina o nazwie HFE-7100. Czynnik ten należy do grupy nowoczesnych rozpuszczalników, ale jest bezwonny i niepalny. Temperatura wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym wynosi 61°C. Obieg termodynamiczny mikrośirowni kogeneracyjnej dla wymienionego czynnika roboczego został opracowany z uwzględnieniem kilku kryteriów, takich jak: łatwość zaprojektowania wysokosprawnej mikroturbiny parowej, koszty zakupu innych podzespołów, maksymalna moc elektryczna netto oraz dostępność na rynku odpowiedniej aparatury pomiarowej i regulacyjnej. Schemat realizowanego obiegu mikrośirowni z oznaczonymi punktami charakterystycznymi został przedstawiony na rys. 1. Charakterystyczną cechą obiegu było zastosowanie regeneracyjnego wymiennika ciepła, który dla wybranego czynnika roboczego podnosił sprawność obiegu. Sprawność teoretyczna wytwarzania energii elektrycznej wg tego obiegu wynosiła około 13%, przy teoretycznej mocy elektrycznej netto na poziomie 2,7 kW. Wyniki te z pewnym zapasem spełniały założenia projektowe mikrośirowni.

W oparciu o wyznaczone charakterystyki obiegu opracowano kryteria doboru wszystkich podzespołów mikrośirowni. Następnie podzespoły te były przedmiotem analiz teoretycznych, prac konstrukcyjnych oraz badań laboratoryjnych. Badania te były wykonywane w specjalnie do tego celu stworzonym laboratorium. Ostatecznie wytypowane zostały najlepsze rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające niezawodne działanie oraz wysoką sprawność całej maszyny. Zestawienie podstawowych parametrów dla podzespołów mikrośirowni zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 1. Schemat obiegu mikrośilowni z kotłem na biomasę (B – kocioł, P – pompa, T – turbina, G – generator, E – parownik, R – regenerator, C – skraplacz)

Tabela 2. Podstawowe parametry głównych podzespołów mikrośilowni

Podzespół	Cecha charakterystyczna
Kocioł na biomasę	Moc cieplna (trwała) ~ 28 kW
Mikroturbina parowa	Moc nominalna – 2,7 kW (przy prędkości – 24 tys. obr/min)
Parownik	Obciążenie cieplne – 25 kW
Regenerator	Obciążenie cieplne – 22,5 kW
Skraplacz	Obciążenie cieplne – 6,6 kW
Pompa obiegowa	Nom. różnica ciśnień – 10 bar, wydajność – 7,6 dm <sup>3</sup> /min

Wymienione podzespoły pomyślnie przeszły badania eksperymentalne z czynnikiem roboczym. W trakcie prac nad każdym podzespołem w IMP PAN powstało kilka innowacyjnych, alternatywnych rozwiązań kotłów [13], pomp obiegowych [14], wymienników ciepła [15] oraz mikroturbin parowych [10, 16, 17]. Podczas wyboru podzespołów ważnym kryterium oprócz założonej mocy i wydajności była wysoka trwałość i pewność działania, a także możliwie niska cena. Zastosowana mikroturbina parowa posiada łożyska gazowe, smarowane parą czynnika niskowrzącego, co umożliwiło hermetyzację korpusu. Wewnątrz korpusu, pomiędzy łożyskami, umieszczono wysokoobrotowy generator z magnesami ziem rzadkich. Pod względem przepływowym jest to turbina promieniowa 4-stopniowa (dwa stopnie dośrodkowe i dwa stopnie odśrodkowe). Według obliczeń projektowych zastosowana mikroturbina powinna osiągać sprawność przeplywową na poziomie do 75%.

### 3. PROJEKTOWANIE I BUDOWA PROTOTYPU

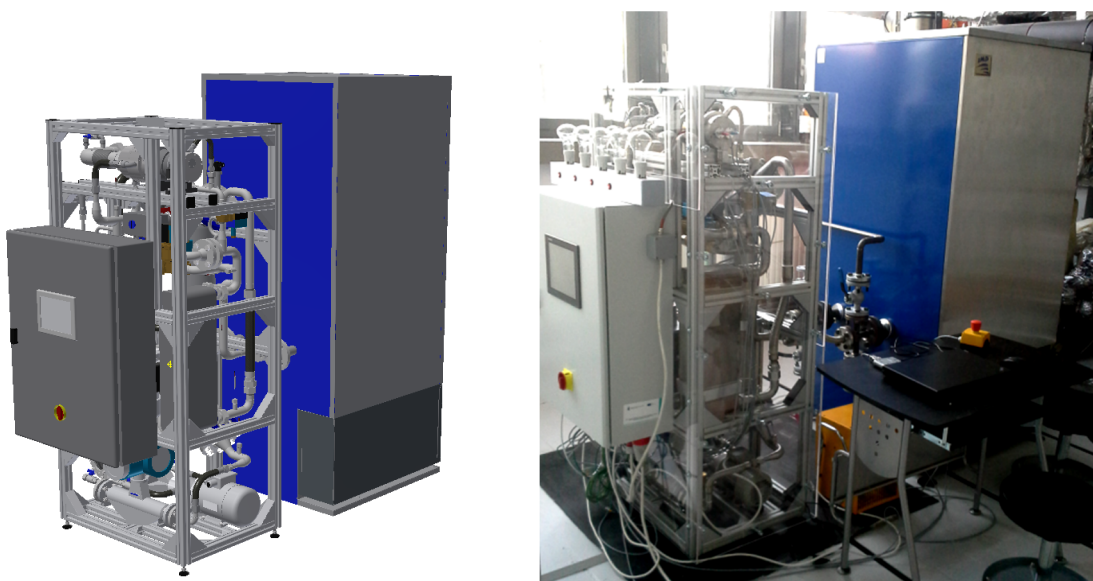
Na podstawie założeń projektowych oraz wytypowanych podzespołów opracowane zostało rozwiązanie konstrukcyjne mikrośilowni w postaci parametrycznego, trójwymiarowego modelu CAD w programie Autodesk Inventor. Następnie, po opracowaniu dwuwymiarowej dokumentacji wykonawczej, rozpoczęto budowę mikrośilowni w laboratorium IMP PAN. Instalację mikrośilowni wraz z konstrukcją nośną oraz elementami automatycznej regulacji

i odbioru energii elektrycznej nazwano modułem kogeneracyjnym. Moduł ten do wytwarzania energii elektrycznej wymaga podłączenia dowolnego źródła energii cieplnej, którym w tym przypadku był kocioł wielopaliwowy z obiegiem oleju termicznego. Moduł kogeneracyjny połączony z kotłem stanowi kompletną mikrosiłownię umożliwiającą konwersję energii chemicznej paliwa na energię ciepłą i elektryczną.

Najważniejsze zasady, którymi kierowano się podczas prac projektowych, to:

- rozmieszczenie elementów wokół największego podzespołu – regeneratora (wymyennika),
- ustawienie podzespołów mikrosiłowni względem siebie w sposób ograniczający długości rurociągów oraz zajmowaną przez nie przestrzeń,
- stosowanie następującej zasady: gorąca para na górze, zimna ciecz na dole (mikroturbina najwyżej, pompa obiegowa najniżej),
- zastosowanie rurociągów o średnicy nie mniejszej niż średnice przyłączy podzespołów,
- zastosowanie modułowego zbiornika czynnika roboczego o zmiennej pojemności,
- ograniczenie do minimum połączeń kątowych oraz gwałtownych zmian średnicy rurociągów (minimalizacja spadków ciśnienia),
- stosowanie elementów podatnych pomiędzy łączonymi podzespołami (kompensacja wydłużeń termicznych, ograniczenie przenoszenia drgań),
- zastępowanie połączeń rozłącznych połączeniami spawanymi (zwiększenie szczelności instalacji), przy zachowaniu możliwości demontażu każdego podzespołu,
- stosowanie standardowych elementów połączeń i materiałów dostępnych powszechnie w handlu (łatwość przebudowy i napraw),
- rozmieszczenie podzespołów umożliwiające cyrkulację powietrza chłodzącego silniki pomp oraz podzespoły automatyki (chłodzenie powietrzem od dołu do góry),
- zaplanowanie tzw. strony transparentnej, po której zamontowano skrzynię z elementami sterującymi oraz wszystkie wskaźniki/ekrany urządzeń regulacyjnych i pomiarowych,
- zastosowanie dodatkowych przyłączy umożliwiających wygodny serwis maszyny (np. napełnianie, opróżnianie, odpowietrzanie instalacji).

Projektując mikrosiłownię, wykorzystano również wszystkie inne powszechnie znane zasady projektowania maszyn oraz odpowiednie normy branżowe. Wyniki prac projektowych zostały przedstawione na rysunku 2 w postaci modelu 3D oraz zbudowanego prototypu mikrosiłowni.

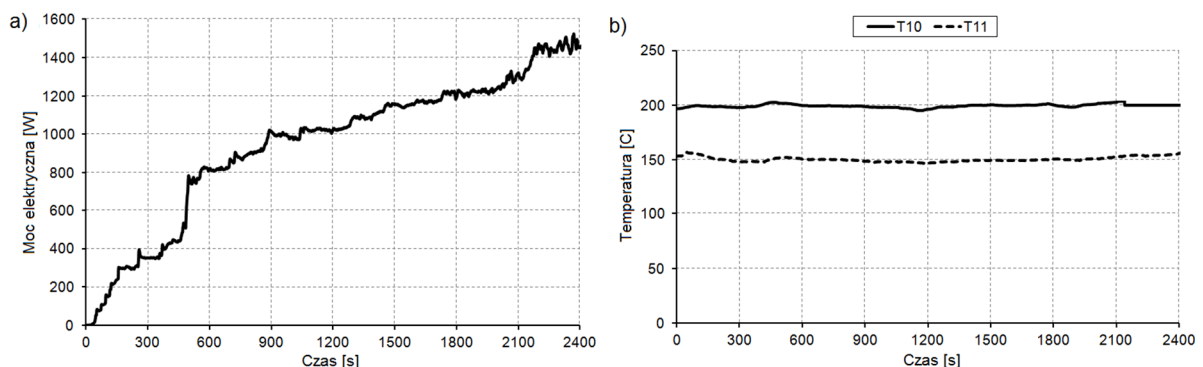


Rys. 2. Trójwymiarowy model CAD mikrosiłowni ORC oraz prototyp zbudowany w laboratorium IMP PAN w Gdańsku

Aby możliwa była właściwa praca wszystkich podzespołów mikrośilowni, konieczne było zastosowanie odpowiedniego systemu kontrolno-pomiarowego. Zdecydowano się na budowę układu automatycznej regulacji w oparciu o uniwersalne sterowniki PLC, zintegrowanego z układem odbioru i kondycjonowania energii elektrycznej. Sterowanie wszystkimi procesami zachodzącymi w mikrośilowni odbywało się z poziomu ekranu monitora komputera osobistego. Układ automatycznej regulacji pełnił również funkcję układu kontrolno-pomiarowego, umożliwiając prowadzenie pomiarów, wizualizację oraz archiwizację wyników.

#### 4. WYNIKI BADAŃ ROZRUCHOWYCH

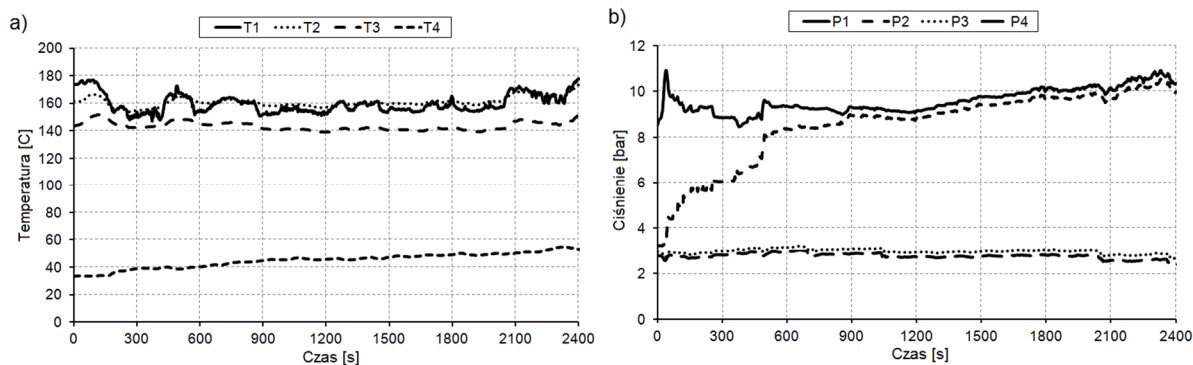
Celem badań rozruchowych było przede wszystkim sprawdzenie poprawności działania podzespołów współpracujących we wspólnym obiegu ORC oraz poprawności funkcjonowania zabezpieczeń i układu automatycznej regulacji [18]. Badania te były prowadzone przed dokończeniem izolacji termicznej instalacji i niektórych podzespołów. Dzięki temu możliwa była łatwiejsza lokalizacja miejsc ewentualnych wycieków oraz szybsze usuwanie nieszczelności. Wiązało się to jednak z dużymi stratami ciepła, co uniemożliwiło uzyskanie nominalnych parametrów pracy. Dlatego podczas pierwszych prób nie starano się jeszcze uzyskać zakładanych parametrów projektowych mikroturbogeneratora, a jedynie sprawdzić poprawność jego działania. Wstępne badania trwały kilka godzin, a wybrane wyniki pomiarów zostały przedstawione na poniższych rysunkach.



Rys. 3. Moc elektryczna wytwarzana przez turbogenerator (a) oraz przebiegi temperatury oleju termicznego (b) ogrzewanego w kotle (T10 – temp. na wyjściu z kotła, T11 – temp. na powrocie do kotła) podczas wstępnych badań mikrośilowni kogeneracyjnej ORC

Przebieg generowanej energii elektrycznej uzyskany podczas 40-minutowego rozruchu został przedstawiony na rys. 3. Poprzez płynną regulację obiegów roboczych udało się osiągnąć stabilne parametry pracy układu oraz stopniowy wzrost mocy. Maksymalnie uzyskano moc elektryczną na poziomie 1500 W na wyjściu z układu kondycjonowania energii elektrycznej. Przy największej mocy wał mikroturbiny obracał się z prędkością ok. 18 000 obr/min, a więc 6 000 obr/min poniżej prędkości nominalnej. Na rysunku 3 przedstawiono również przebiegi temperatury oleju termicznego na wyjściu i wejściu do kotła. Maksymalna temperatura oleju na wylocie z kotła (wlocie do parownika) była na poziomie 200°C, a na wlocie do kotła (wyjściu z parownika) wynosiła ok. 150°C. Parametry te były stabilnie utrzymywane w całym rozpatrywanym okresie czasu. Spadek temperatury oleju podczas badań był więc utrzymywany na poziomie ok. 50°C. Na rysunku 4 zestawiono przebiegi temperatur oraz ciśnień czynnika niskowrzącego w różnych punktach charakterystycznych obiegu ORC. Za parownikiem i przed mikroturbiną uzyskano bardzo zbliżony poziom temperatur, co

świadczyły o małych stratach ciepła na tym odcinku instalacji. Na poniższej charakterystyce można również zauważyć stopniowy wzrost temperatury czynnika roboczego przed pompą. Pod koniec okna czasowego temperatura ta wynosiła ponad 50°C. Różnica temperatury pomiędzy wlotem i wylotem mikroturbiny mieściła się w zakresie od 10 do 22°C.



Rys. 4. Przebiegi temperatur (a) i ciśnień (b) czynnika roboczego HFE-7100 podczas badań mikrośilowni ORC (T1, P1 – temperatura i ciśnienie za parownikiem, T2, P2 – temperatura i ciśnienie przed mikroturbiną, T3, P3 – temperatura i ciśnienie za mikroturbiną, T4 – temperatura i ciśnienie w zbiorniku przed pompą)

Na rysunku 4 przedstawiono również przebiegi ciśnień w wybranych miejscach obiegu ORC. Najwyższe ciśnienie, dochodzące do 11 barów (abs), występowało bezpośrednio za parownikiem. Ciśnienie przed mikroturbiną (P2) rosło wraz ze stopniowym otwieraniem zaworu regulacyjnego i przy w pełni otwartym zaworze było tylko nieznacznie mniejsze od ciśnienia za parownikiem (ok. 0,3 bara). Po przejściu przez mikroturbinę następował gwałtowny spadek ciśnienia pary czynnika niskowrzącego do wartości ok. 3 barów.

Podczas badań układu ORC bardzo duże znaczenie miało również natężenie przepływu czynnika roboczego. Zmierzone podczas badań natężenie przepływu czynnika niskowrzącego było na poziomie 140 g/s. Stanowiło to 83% wartości przepływu nominalnego, wynoszącego 169 g/s. Pod względem przepływowym podczas przeprowadzonych badań nie osiągnięto zatem parametrów optymalnych dla mikroturbiny. Poziom różnicy ciśnień i natężenie przepływu były niższe od projektowego.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono prototypową mikrośilownię kogeneracyjną ORC oraz wstępne wyniki badań, podczas których przetestowano poprawność funkcjonowania wszystkich podzespołów podczas procesów wygrzewania i chłodzenia czynnika roboczego, a także w trybie pracy z wytwarzaniem energii elektrycznej przez mikroturbinę. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowe działanie wszystkich podzespołów oraz układu automatycznej regulacji i odbioru energii elektrycznej. Podczas omówionych badań uzyskano moc elektryczną na poziomie 1,5 kW, gdyż instalacja nie była jeszcze w pełni przygotowana do uzyskania mocy nominalnej. Wyniki oraz dotychczasowe doświadczenia zespołu badawczego pozwalają stwierdzić, że przy optymalnych warunkach opracowana mikrośilownia ORC powinna pozwolić na uzyskanie mocy elektrycznej na poziomie 2,5 kW.

Docelową grupą odbiorców opracowanego rozwiązania są mieszkańcy domów jednorodzinnych, którzy do tej pory do ogrzewania budynków wykorzystywali biomasę lub inne paliwa. Aby opracowana mikrośilownia kogeneracyjna ORC mogła zastąpić tradycyjne kotły centralnego ogrzewania, konieczna jest jeszcze optymalizacja kosztów budowy oraz

wielogodzinne testy w warunkach rzeczywistych. Wydaje się, że przy odpowiedniej polityce państwa w zakresie wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych domowa mikrośilownia kogeneracyjna ORC może stać się bardzo atrakcyjnym źródłem czystej energii.

## LITERATURA

- [1] Kiciński J.: *Do we have chance for small-scale energy generation? The examples of technologies and devices for distributed energy systems in micro & small scale in Poland*, "Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences", 61 (4), 749-756 (2013).
- [2] Qiu G., Liu H., Riffat S.: *Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle*, "Applied Thermal Engineering" 31, 3301-3307 (2011).
- [3] Wang W., Wu Y., Maa C., Liu L., Yu J.: *Preliminary experimental study of single screw expander prototype*, "Applied Thermal Engineering" 31, 3684-3688 (2011).
- [4] Declaye S., Quoilin S., Guillaume L., Lemort V.: *Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid*, "Energy" 55, 173-183 (2013).
- [5] Hsu S.-W., Chiang H.-W.D., Yen Ch.-W.: *Experimental Investigation of the Performance of a Hermetic Screw-Expander Organic Rankine Cycle*, "Energies" 7, 6172-6185 (2014).
- [6] Fiaschi D., Manfrida G., Maraschiello F.: *Thermo-fluid dynamics preliminary design of turbo-expanders for ORC cycles*, "Applied Energy" 97, 601-608 (2012).
- [7] Klonowicz P., Borsukiewicz-Gozdur A., Hanausek P., Kryłowicz W., Brüggemann D.: *Design and performance measurements of an organic vapour turbine*, "Applied Thermal Engineering", 63, 297-303, (2014).
- [8] Fiaschi D., Manfrida G., Maraschiello F.: *Design and performance prediction of radial ORC turboexpanders*, "Applied Energy" 138, 517-532 (2015).
- [9] Kaczmarczyk T., Ihnatowicz E., Bykuć S., Żywica G., Kozanecki Z.: *Experimental investigation of the ORC system in a cogenerative domestic power plant with a microturbine and an expansion valve*, ASME ORC 2013, 2nd International Seminar on ORC Power System, Rotterdam (The Netherlands) (2013).
- [10] Kiciński J., Żywica G.: *Steam microturbines in distributed cogeneration*, Springer, 2014.
- [11] Kozanecki Z., Tkacz E., Łagodziński J., Miazga K.: *Theoretical and experimental investigation of oil-free bearings and their application in diagnostics of high-speed turbomachinery*, "Key Engineering Materials" 588, 302-309 (2014).
- [12] Kiciński J., Żywica G.: *The numerical analysis of the steam microturbine rotor supported on foil bearings*, "Advances in Vibration Engineering" 11(2), 113-120 (2012).
- [13] Kardaś D., Turzyński T., Wardach-Święcicka I., Ronewicz K.: *Spalanie i wymiana ciepła w olejowym kotle na biomasę*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk, 2014.
- [14] Kaniecki M., Henke A., Krzemianowski Z.: *Agregaty pompowe w zastosowaniu do obiegów ORC mikrośilowni kogeneracyjnych na czynnik niskowrzący*, Wyd. IMP PAN, Gdańsk, 2013.
- [15] Mikielewicz D., Mikielewicz J., Ihnatowicz E., Muszyński T., Wajs J., Rybiński W.: *Wybrane aspekty projektowania i badań wymienników ciepła dla obiegu ORC mikrośilowni domowej*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk, 2013.
- [16] Kozanecki Z., Kozanecka D., Klonowicz P., Łagodziński J., Gizelska M., Tkacz E., Miazga K., Kaczmarek A.: *Bezolejowe maszyny przepływowe małej mocy*, Wyd. IMP PAN, Gdańsk, 2014.
- [17] Stępień R.: *Wybrane zagadnienia projektowania wielostopniowych mikrośilowni osiowych*, Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk, 2013.
- [18] Kiciński J., Żywica G., Kozanecki Z., Ihnatowicz E., Kaczmarczyk T., Turzyński T., Bykuć S., Niewiadomski J., Kardaś D.: *Badania rozruchowe przed-prototypu mikrośilowni kogeneracyjnej ORC*, opracowanie wew. IMP PAN nr 196/2014, Gdańsk, 2014.

Prezentowane badania zostały sfinansowane ze środków projektu kluczowego nr POIG.01.01.02-00-016/08 pt. *Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii*.