

Cooperation of ORC Installation with a Gas Boiler as a Perspective Co-generation System for Households

Authors

Jan Wajs
 Dariusz Mikielwicz

Keywords

microgeneration, ORC, prosumer technology

Abstract

This paper reports tests of an innovative micro-CHP unit prototype, consisting of a traditional gas boiler and organic Rankine cycle (ORC), which incorporates original system components such as an axial vapour microturbine, evaporator and condenser. The system co-generates heat and electricity for a single household or a group of households. Electricity is only a by-product during production of heat. While testing the prototype, temperatures of the ORC working fluid and condenser cooling water were measured, as well as the heat flows, electricity output, and the efficiency of the entire system were estimated. It has been shown that the tested system can produce 1 kWe of electricity, and a typical home gas boiler can at the same time act as an autonomous source of heat for heating purposes and for the production of saturated/superheated ethanol vapour in the ORC system. In the authors' opinion, a commercially available gas boiler, additionally equipped with an ORC module with an ecological working fluid, may be considered a perspective co-generation unit for future households located outside the system heat supply.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017317

Received: 07.03.2017

Accepted: 27.06.2017

Available online: 30.09.2017

1. Introduction

In 2008, the Council of the European Union endorsed the 3x20 Energy and Climate Package, which emphasizes energy efficiency and, consequently, cumulative savings in fuel consumption (primarily fossil fuels) and a controlled increase in the share of renewable energy sources in the energy mixes of Member States. Following that legislative package, the *Europe 2020 Strategy* [1] for smart and sustainable development is currently being pursued. It also highlights energy efficiency as an important element of European energy policy. This confirms one of the main objectives of reducing primary energy consumption by 20% by 2020. As emissions from the generation of utilities (electricity and heat) account for about 80% of total greenhouse gas emissions, increasing its efficiency will undoubtedly contribute to the achievement of the low carbon economy goal and slowing down climate change.

The most important priority of Poland's energy policy strategy until 2030 is the pursuit of energy efficiency improvement, energy security (supplying consumers with heat, electricity and

gas) assurance, and generation capacity diversification [2]. This allows for the expectation, that in the coming years the Polish government will increasingly take measures to raise public awareness of the need to save energy and to treat it as a common good. For several years, an intensive two-track effort has been in progress for the development of clean coal technologies and the application of waste heat management systems in the commercial power units of the National Power System (NPS), also, new directions are being explored for distributed energy generation as a support for the operation of the centralized system. In this case distributed generation means output from units of up to 50 MW, which are not subject to the central power distribution. They co-operate with the low voltage (LV), medium voltage (MV) and 110 kV grids [3] or directly supply customers. The progress in the development of a distributed system is also reflected in the numerous power or agro-power plants based on local, often renewable (RES), energy sources. The development of these plants is being supported by a prosumer policy under which a plant user can be either a consumer of electricity from, or a

seller to, the power grid. Due to the Act on renewable energy sources [4], sources classified as micro-sources have a privileged position (also cogeneration), i.e. units with an installed electrical capacity of up to 40 kW. This provides a great opportunity for the development of micro-CHP units installed to meet the needs of the household. The number of households in Poland accounts for about 6.5% of their total number in the European Union [5]. Over the past 15 years, the sector has seen an increase in electricity consumption of about 25%, and now it accounts for about 20% of the annual energy output [5]. According to ARE and GUS data quoted in [6], electricity demand for households was 34.3 TWh in 2015 and the 2020 demand is projected to reach 38.3 TWh. The sector is the third largest consumer of electricity – behind industry and services, with electricity demand expected to fall slightly in industry and transport in the coming years, while rising in the household and services sectors. Household electric loads are primarily appliances for heating premises and domestic water, and running air-conditioners, electric kitchen, household and home entertainment appliances. Electric heating appliances are complementary sources of heat in residential buildings, but they can also take over as autonomous heat sources for isolated locations. According to ARE and GUS data, the total household demand for heat (including the heating of premises and domestic hot water) amounted to 474.3 PJ in 2015. This demand is projected to increase to 478.2 PJ by 2020. In this respect, the household sector exceeds the industry and services sectors with demands for utility heat at 313.2 and 178.6 PJ [5], respectively. In 2013, the number of households in Poland was 13.3 million, with an average consumption of approximately 2 150 kWh per household [5].

A product that is likely to gain attention in the household sector soon is a co-generation micro-source based on ORC (Organic Rankine Cycle) technology, and endorsed in *Directive 2012/27/UE* [7]. The authors' proposal in this regard is a prototype monoblock microcogeneration unit consisting of a conventional gas boiler coupled with an ORC module. In the form presented herein it is mainly intended for use in households in suburban or rural areas, where single-family housing is being developed, and the existing infrastructure does not allow for the use of system heat. It is worth emphasizing that in most of these facilities, monovalent heating systems are installed with boilers as a source of heat, which is conducive to the application of a cogeneration boiler. The presented unit is the first prototype of a domestic-scale micro-power plant in Poland.

2. ORC technology concept

The operating principle of a system based on organic Rankine cycle does not differ from the fundamental operating principle of a classical steam power plant, where the working fluid is water. In ORC system, the heat source (classical boiler, low temperature or so-called waste heat) transmits heat to a low boiling point working fluid, which undergoes isobaric heating and evaporation (also superheating, where needed). This process occurs in the primary heat exchanger of the ORC system, in other words the evaporator or steam generator. The steam flows to the turbine where it expands adiabatically, driving the turbine rotor

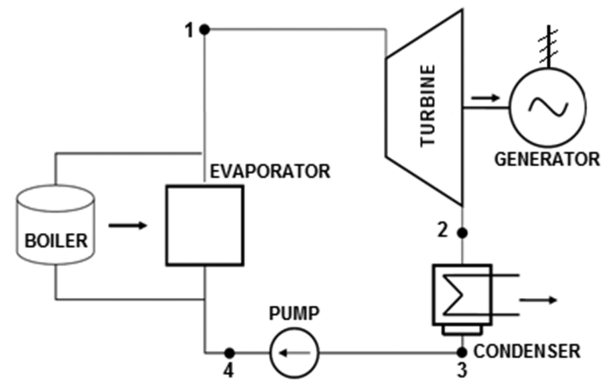


Fig. 1. Diagram of the vapour ORC unit

and the electric generator coupled to it. After expansion, the working fluid is condensed in the condenser and directed by the pump in the isochoric pressure rising process for re-evaporation. The alignment of the main elements of ORC cycle is shown schematically in Fig. 1.

Having the classic C-R cycle as a reference point, it is obvious that the fundamental difference in ORC cycle is the use of a low-boiling point agent as the working fluid. As a result, low-temperature waste energy sources can also contribute to the preparation of saturated/superheated vapour. In practice, this means replacing the boiler and combustion system with a heat exchanger, in which the ORC system working medium evaporates at the expense of converting waste energy into the enthalpy of the carrier.

ORC technology has its origins in binary geothermal systems, but currently it is also applied in energy conversion systems for biomass, solar radiation, or waste heat from power supply and production processes. The world-leaders in the construction of large-scale units are Nevada-based Ormat® [8], and Italian Turboden [9]. At the same time, many R&D centres are working on an appropriate selection of working fluid [10, 11] and discussing new, more energy efficient ORC concepts [12, 13, 14].

A difficult technological challenge is the practical implementation of a home ORC micro co-generation source.

The ORC module working medium selection is a problem in itself, because apart from its physico-chemical properties, in the context of the plant's operation in a residential building, the working fluid explosiveness and toxicity in the event of a system breakdown/leakage gains particular importance. The dominant technical problem is a small-size expansion device (turbine) with a power output of several kilowatts, that is 100% guaranteed to remain sealed in the presence of the power plant's organic working fluid. It should be emphasized here that there are no such solutions on the market. In the relevant literature, there are very many studies of the adaptation of fixed volume machines (screw and spiral compressors, pneumatic engines) to operate under the conditions imposed by the expansion of low-boiling point medium vapours [15, 16]. Also, the work of Kosowski et al. [17] has contributed to significant advances in turbines dedicated to ORC micro-systems. During testing of the prototype single-stage axial micro-turbo-set with HFE7100, the internal efficiency

was found to be ca. 85%, which is a globally relevant achievement for rotary machines with an effective output of up to 3 kW [18]. Another direction in the effort to develop ORC microsystems concerns the implementation of innovative heat exchanger (evaporator, condenser, regenerator) solutions. This is also the main research area of the authors of this paper [19, 20, 21]. In this case the high efficiency of the recuperation process is significant, while maintaining the design's compactness.

There are two outstanding manufacturers of up to 10 kW ORC units: Infinity Turbine [22] and Enogia [23]. The products they offer, however, are significantly different from the own concept of an ORC unit with a gas boiler reported by authors in [24].

3. ORC microplant with gas boiler

The prototype micro-CHP unit with ORC technology is shown in the form of photograph and axonometric view in Fig. 2. It was designed based on the gas boiler DTG X 23 N, which in its commercial version is offered by the De Dietrich company for households. Based on the experience of other R&D centres, as well as on own research [10, 25], anhydrous ethyl alcohol was selected to be the circulating working fluid. Many analyses have found that it's the best medium from a thermodynamic point of view. Certain applicability restrictions are due to its explosiveness and lubricity.

As previously stressed, the gas boiler (1) is the autonomous heat source for the ORC microplant. Heat generated at the expense of fuel combustion is transferred to Mobiltherm thermal oil. This oil is an indirect heat carrier circulating in the closed loop between the boiler and evaporator (2) in the ORC module. It is characterized by a high thermal stability and resistance to oxidation, non-toxicity, and favourable properties in indirect heating installations with operating temperatures up to ca. 315°C.

Oil circulation is driven by a Wilo pump (8) (model IPH-O-32/170-0,37/4) with a maximum capacity of 3.5 m³/h and a maximum head of 6 m. The oil volumetric flow rate is measured with a vane flow meter (7). Ethyl alcohol circulation in the ORC module's closed loop is driven by a tight gear pump with a Tuthillof magnetic couple (model TXS2.6). Its nominal capacity is 430 l/h at a differential pressure of 10.3 bar. Performance is adjusted by varying the frequency in the 0–60 Hz range of the electric pump motor supply system through an inverter or by using a manually operated throttle valve installed in the bypass stack. While flowing through the evaporator, the alcohol acquires heat from the thermal oil, thereby evaporating, also changing, at a sufficiently high heat flux, into superheated vapour. The saturated/superheated vapour is directed to the turbine (3) where it expands and then flows to the condenser (4). The throttle valve (6) is used for the medium expansion at the start up and

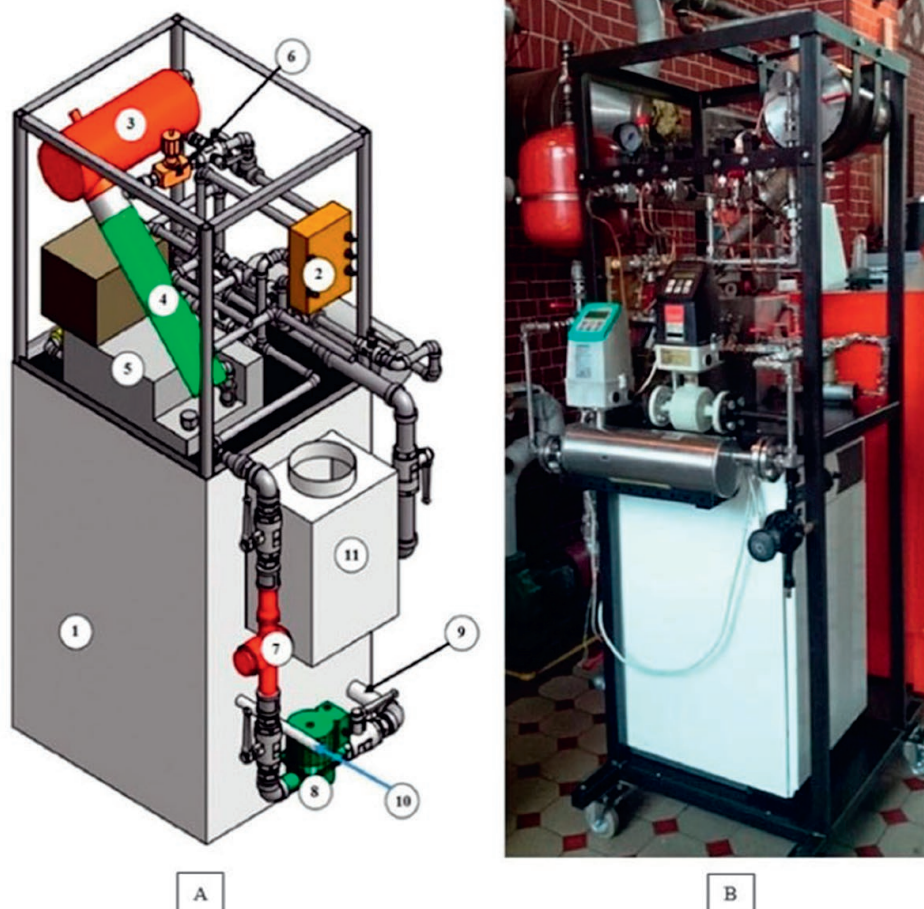


Fig. 2. ORC microplant; (A) axonometric view: 1 – gas boiler, 2 – evaporator, 3 – turbogenerator, 4 – condenser, 5 – ethanol tank, 6 – throttle valve, 7 – oil flow meter, 8 – oil pump, 9 – oil to boiler return connection, 10 – gas pipe, 11 – exhaust, (B): view of the stand



Photo 1. Vapour micro-turbo-set

warming up of the unit. The ORC module condenser is tap-water cooled. After the condensation process, ethanol is directed to a tank (5). The initial overpressure in the oil system is provided by a nitrogen filled expansion vessel – in the cold system it generates a overpressure of 0.5 bar. The oil system is equipped with a safety valve with an opening pressure of 4.5 bar.

The key element in the installation is the axial steam micro-turbine designed for ethyl alcohol driven operation [17]. The generator is set on the turbine shaft, directly behind its low-pressure section – the turbine and generator assembly therefore have a common body. The microturbine is equipped with a single supersonic turbine stage (Mach number at the outlet of the steering rack is 2.4, the design rotor speed is 36 000 rpm). The turbine stage was designed to work with ethyl alcohol vapour. The assumed alcohol mass output is 25 g/s, its vapour pressure at the turbine inlet is 7 bar, and the vapour pressure after expansion in the turbine is 1 bar. A view of the turbo-set is shown in Photo 1. This turbine's bearings are lubricated by the ethanol vapours.

The evaporator in the prototype microplant is an innovative mini-channel, shell-and-tube heat exchanger with baffles inside the shell [26]. This heat exchanger is designed to work with thermal oil at high temperatures (up to 300°C) and high pressures on the side of the low boiling point fluid evaporating in the pipe bundle (up to 30 bar). The condenser of the ORC module is a compact shell-and-tube heat exchanger with the same design as the evaporator. It has also been produced for the ORC microplant based on thermal-hydraulic calculations [27].

4. Prototype tests results

Systematic experimental studies of the prototype ORC micro-plant with anhydrous ethyl alcohol have already been reported by authors [28, 29]. The referenced papers have described in detail the used measurement instruments, the test methodology and calculation algorithms. For the purposes of this paper, however, graphs were constructed to show the heat output, heat carrier temperatures and thermal efficiency of the vapour circuit.

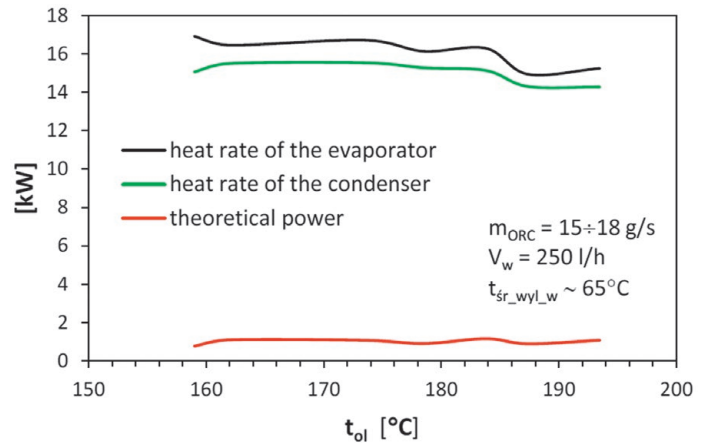


Fig. 3. ORC module power characteristics

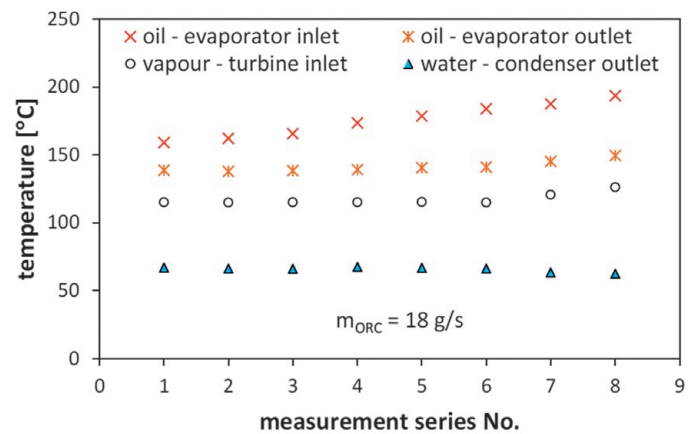


Fig. 4. Energy carrier temperatures in ORC microplant

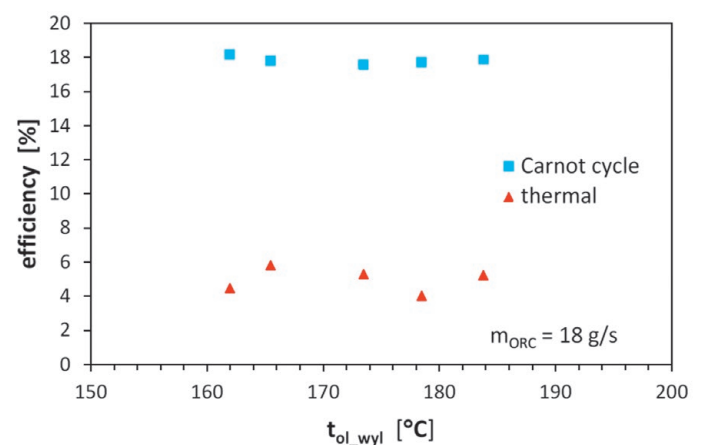


Fig. 5. Performance characteristics of ethyl alcohol vapour cycle

The graphs were drawn up based on heat-flow measurements and thermo-dynamic analysis. According to the authors, they are important for emphasizing the potential of the technology and the initial verification of the idea of a household heating node operation with a proposed cogeneration micro source.

Fig. 3 shows the characteristics of the evaporator and condenser heat rates and the theoretical power associated with the expansion of the alcohol vapour within the evaporation/condensation pressure range. The runs were plotted as a function of the thermal oil temperature. As already mentioned in point 3, the evaporator of the ORC module is supplied with heat through the intermediate circuit with thermal oil, and therefore this heat exchanger's output may be viewed as a rough approximation of the boiler's usable heat output. In the authors' opinion, the reported thermal capacity of the condenser (ca. 15 kW) will cover the thermal load of a typical single family home in Poland with a low temperature heating system. The average water temperature at the condenser outlet is ca. 65°C (Fig. 4), which also allows for the heating of domestic water (required inflow temperature 55°C), although in this case additional calculations should be made in consideration of, inter alia, the impact of the number of residents on domestic hot water consumption. The vapour circuit's theoretical power is 1 kW. The circuit's thermal efficiency, plotted in Fig. 5, remains relatively low (ca. 5%), but it should be remembered that the electricity generation in this case is a by-product. The cycle carnotisation method, consisting of lowering the working medium condensation temperature, does not apply here since an attempt was made to fulfil the boiler's basic function, i.e. supplying consumers with heat.

5. Summary

This paper discusses a prototype micro source with ORC technology for residential applications, along with a thermodynamic analysis based on the results of experimental research.

These characteristics have confirmed the effectiveness of the gas boiler/ORC module cooperation in a domestic setting and are a premise for the further development of the proposed concept. The authors are aware of the need to expand the system by heat storage, automatic control of turbine operation and the synchronization of electrical parameters with the parameters of the local power grid. These are the basic elements of the current work. Also, the issue of working medium selection for the vapour module remains open. Research work is in progress concerning the use of water as a working medium, and the first results have been already published [29].

In the authors' opinion, a home gas boiler equipped with an electricity generating module deserves to be classified as a „third generation boiler”. Devices of this type may be of interest for individual households, when their viability, high reliability, and maintenance-free and quiet operation are confirmed. The proposed solution perfectly suits to the national framework for smart specializations in the field of building energy systems.

REFERENCES

1. "Communication from the Commission" [online], http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_PL_ACT_part1_v1.pdf [access: 21.03.2017].
2. "Polityka energetyczna Polski do 2030" [The Polish Energy Policy until 2030], *Monitor Polski*, No. 2, 2010, pp. 28–149.
3. J. Bargiel et al., "Rola generacji rozproszonej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym na przykładzie gminy Gierałtów" [The role of distributed generation in the National Power System on the example of Gierałtów municipality], *Acta Energetica*, No. 4 (21), 2014, pp. 31–37.
4. Act of 20.02.2015 on renewable energy sources, *J. of L.* 2015, Item 478.
5. M. Kott, "Efektywność wykorzystania energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w kontekście europejskiej polityki energetycznej" [Efficiency of electricity utilization in households in the context of European energy policy], *Acta Energetica*, No. 3 (25), 2015, pp. 54–59.
6. "Analiza potencjału rynkowego dla technologii – Wysokosprawny płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła z techniką mikrostrugową w rurach pęku" [High-performance shell-and-tube heat exchanger with microjet technique in bundle pipes], Expert opinion for CTWT PG, 2015.
7. Directive EU 2012/27 of the European Parliament and the Council of 25.10.2012.
8. "Ormat Technologies" [online], <http://www.ormat.com/> [access: 21.03.2017].
9. Turboden [online], <http://www.turboden.eu/en/home/index.php> [access: 21.03.2017].
10. D. Mikielwicz, J. Mikielwicz, "A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, 2010, pp. 2357–2362.
11. R. Rayegan, Y.X. Tao, "A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs)", *Renewable Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 659–670.
12. M. Jradi, S. Rifat, "Modelling and testing of a hybrid solar-biomass ORC-based micro-CHP system", *International Journal of Energy Research*, Vol. 38, 2014, pp. 1039–1052.
13. D. Mikielwicz, J. Mikielwicz, J. Wajs, "Układ turbiny parowej z organicznym obiegiem Rankine'a (ORC) do wykorzystania ciepła odpadowego" [Steam turbine system with organic Rankine cycle (ORC) for waste heat utilization], patent PL 224462, 2013.
14. D. Mikielwicz, J. Wajs, "Organic fash cycle as an alternative to organic rankine cycle for application in domestic heat and power supply system, proceedings" of IV. Conference of WTiUE, Kraków 2016.
15. D. Mikielwicz, J. Mikielwicz, J. Wajs, "Experiences from operation of different expansion devices for application in domestic micro CHP", *Archives of Thermodynamics*, Vol. 31, No. 4, 2010, pp. 3–13.
16. D. Ziviani et al., "Characterizing the performance of a single-screw expander in a small-scale organic Rankine cycle for waste heat recovery", *Applied Energy*, Vol. 181, 2016, pp. 155–170.
17. K. Kosowski et al., "Mikroturbiny. Badania numeryczne i eksperymentalne" [Microturbines. Numerical and experimental studies], Foundation for the Promotion of the Shipbuilding Industry and Maritime Economy, Gdańsk 2016.
18. W. Włodarski, "Badania eksperymentalne mikroturbozespołów" [Experimental studies of micro-turbines], Foundation for the Promotion of the Shipbuilding Industry and Maritime Economy, Gdańsk 2016.
19. J. Wajs, D. Mikielwicz, "Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, 2016, pp. 1337–1346.

20. J. Wajs, D. Mikielwicz, E. Fornalik-Wajs, "Strugowy wymiennik ciepła o budowie cylindrycznej, zwłaszcza do odzysku energii cieplnej z niskotemperaturowych źródeł odpadowych" [Plate cylindrical jet heat exchanger dedicated to heat recovery, especially from low-temperature waste sources], patent PL 224494, 2013.
21. J. Wajs, D. Mikielwicz, E. Fornalik-Wajs, "Thermal performance of a prototype plate heat exchanger with minichannels under boiling conditions", *Journal of Physics, Conference Series*, Vol. 745, 032063, 2016, doi:10.1088/1742-6596/745/3/032063
22. Infinity Turbine [online], <http://www.infinityturbine.com/> [access: 21.03.2017].
23. Enogia [online], <http://www.enogia.com/> [access: 21/03/2017].
24. D. Mikielwicz, J. Wajs, J. Mikielwicz, "Gas boiler as a heat source for a domestic micro-CHP", *Journal of Power Technologies*, Vol. 94, No. 4, 2014, pp. 317–322.
25. D. Mikielwicz, J. Mikielwicz, "Analytical method for calculation of heat source temperature drop for the Organic Rankine Cycle application", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, 2014, pp. 541–550.
26. J. Wajs, D. Mikielwicz, "Minikanałowy płaszczowo-rurowy wymiennika ciepła" [Minichannels shell-and-tube heat exchanger], *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*, No. 6–7, 2010, pp. 255–259.
27. J. Wajs, D. Mikielwicz, B. Jakubowska, "Performance of shell-and-tube condenser with minichannels for the micro domestic ORC", *Applied Thermal Engineering* [in reviews].
28. J. Wajs, D. Mikielwicz, M. Woźnowska, "Gazowy kocioł kogeneracyjny – badania prototypu" [Cogeneration gas boiler – investigations of prototype], *Instal*, No. 1 (369), 2016, pp. 11–17.
29. J. Wajs et al., "Experimental investigation of domestic micro-CHP based on the gas boiler fitted with ORC module", *Archives of Thermodynamics*, Vol. 37, No. 3, 2016, pp. 79–93.

Acknowledgements

The authors are especially grateful to prof. Jarosław Mikielwicz, a fellow member of the PAN Polish Academy of Sciences, initiator and promoter of the idea of home micro power plant with ORC technology, for substantive support of its evolutionary development.

Jan Wajs

Gdańsk University of Technology
 e-mail: Jan.Wajs@pg.edu.pl

Assistant Professor in the Department of Power Engineering and Industrial Apparatus at the Faculty of Mechanical Engineering of Gdańsk University of Technology. Member of the Thermodynamics Section of the Committee of Thermodynamics and Combustion of the Polish Academy of Sciences.

Dariusz Mikielwicz

Gdańsk University of Technology
 e-mail: Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl

Head of the Department of Power Engineering and Industrial Apparatus at the Faculty of Mechanical Engineering of Gdańsk University of Technology. Member of the Presidium of Thermodynamics and Combustion of the Polish Academy of Sciences and the Committee on Energy Problems at the Polish Academy's of Sciences Presidium.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 216–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Współpraca instalacji ORC z kotłem gazowym jako perspektywiczny układ kogeneracyjny dla gospodarstw domowych

Autorzy

Jan Wajs
Dariusz Mikielawicz

Słowa kluczowe

mikrokogeneracja, ORC, technologia prosumencka

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania innowacyjnej prototypowej jednostki micro-CHP, składającej się z tradycyjnego kotła gazowego i organicznego obiegu Rankine'a (ORC), w skład którego wchodzi oryginalne elementy układu, jak osiowa mikroturbina parowa, parownik i skraplacz. System umożliwia kogeneracyjne wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej na potrzeby pojedynczego gospodarstwa domowego lub grupy gospodarstw domowych. Podczas produkcji ciepła energia elektryczna jest wytwarzana jako produkt uboczny. W trakcie badań prototypu zebrano robocze temperatury czynnika roboczego ORC oraz wody chłodzącej skraplacz, oszacowano strumienie ciepła, wytwarzaną energię elektryczną i efektywność całego systemu. Wykazano, że badany układ jest zdolny wygenerować moc elektryczną na poziomie 1 kW_e, a typowy domowy kocioł gazowy może równocześnie stanowić autonomiczne źródło ciepła dla celów grzewczych i produkcji pary nasyconej / pary przegrzanej etanolu w systemie ORC. W opinii autorów komercyjnie osiągalny kocioł gazowy, dodatkowo wyposażony w moduł ORC z ekologicznym czynnikiem roboczym, może być uważany za perspektywiczną jednostkę kogeneracyjną dla przyszłych gospodarstw domowych, zlokalizowanych poza siecią ciepła systemowego.

Data wpływu do redakcji: 07.03.2017

Data akceptacji artykułu: 27.06.2017

Data publikacji online: 30.09.2017

1. Wprowadzenie

Już w 2008 roku Rada Unii Europejskiej wyraziła aprobatę dla pakietu energetyczno-klimatycznego „3x20”, który kładzie nacisk na zwiększenie efektywności energetycznej, a co za tym idzie, skumulowaną oszczędność w konsumpcji paliw (przede wszystkim kopalnych) i kontrolowany wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w systemach energetycznych krajów członkowskich. W ślad za pakietem podąża strategia *Europa 2020* [1] na rzecz inteligentnego, zrównoważonego rozwoju. W niej również wyeksponowano efektywność energetyczną jako ważny element europejskiej polityki energetycznej. Potwierdza to jeden z głównych celów ukierunkowany na redukcję do 2020 roku zużycia energii pierwotnej o 20%. Ponieważ emisje związane z generacją energii użytkowej (elektrycznej i cieplnej) stanowią ok. 80% całkowitej emisji gazów cieplarnianych, zwiększenie efektywności energetycznej niewątpliwie przyczyni się do osiągnięcia celu w postaci gospodarki niskoemisyjnej i spowolni zmiany klimatyczne.

Najważniejszy z priorytetów strategii polityki energetycznej Polski do 2030 roku to dążenie do poprawy efektywności energetycznej, zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego (zaopatrzenie odbiorców w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe) oraz dywersyfikacja mocy wytwórczych [2]. Pozwala to przypuszczać, że w najbliższych latach polski rząd będzie w coraz większym stopniu podejmował działania mające na celu zwiększenie świadomości obywateli co do konieczności oszczędzania energii i traktowania jej jako

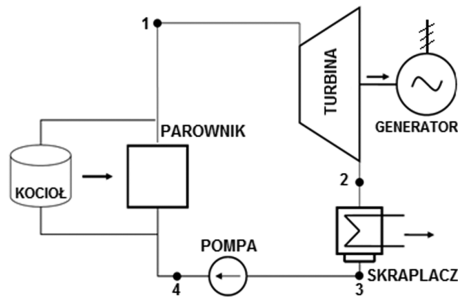
dobro wspólne. Od kilku lat prowadzone są także intensywne dwutorowe prace nad rozwojem czystych technologii węglowych oraz aplikacją układów do zagospodarowania ciepła odpadowego w zawodowych blokach energetycznych Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), jak również poszukuje się nowych kierunków produkcji energii w systemie rozproszonym – wspomagających pracę systemu scentralizowanego. Pojęcie generacji w systemie rozproszonym obejmuje jednostki o zainstalowanej mocy do 50 MW, niepodlegające centralnej dyspozycji mocy. Współpracują one z siecią dystrybucyjną niskiego napięcia (nN), średniego napięcia (SN) i siecią 110 kV [3] lub bezpośrednio zaopatrują odbiorcę. O postępie w rozwoju systemu rozproszonego świadczą m.in. liczne kompleksy energetyczne lub agroenergetyczne bazujące na lokalnych, często odnawialnych źródłach energii (OZE). Rozwój tych instalacji jest wspomagany polityką prosumencką, w której założeniu użytkownik instalacji może być zarówno konsumentem wytworzonej energii elektrycznej, jak też sprzedawcą tej energii do sieci elektroenergetycznej. Dzięki ustawie o odnawialnych źródłach energii [4] uprzywilejowane pod tym względem są tzw. mikroźródła (również kogeneracyjne), czyli jednostki o zainstalowanej mocy elektrycznej do 40 kW. Daje to ogromną szansę rozwoju jednostek wytwórczych micro-CHP, instalowanych w celu pokrycia potrzeb gospodarstw domowych.

Liczba gospodarstw domowych w Polsce stanowi ok. 6,5% ogólnej liczby gospodarstw

w Unii Europejskiej (UE) [5]. Na przestrzeni ostatnich 15 lat w sektorze tym odnotowano wzrost zużycia energii elektrycznej o ok. 25%, a obecnie zagospodarowuje on ok. 20% rocznej produkcji tej energii [5]. Zgodnie z danymi ARE i GUS, przytoczonymi w [6], zapotrzebowanie na energię elektryczną w gospodarstwach domowych wyniosło w 2015 roku 34,3 TWh, a prognozowane zapotrzebowanie na 2020 rok wynosi 38,3 TWh. Sektor ten jest trzecim w kolejności odbiorcą energii elektrycznej – poprzedzają go przemysł i sektor usług, przy czym prognozuje się, że w kolejnych latach popyt na energię elektryczną nieznacznie spadnie w przemyśle i transporcie, natomiast wzrośnie w sektorze gospodarstw domowych i usług. Wśród odbiorców energii elektrycznej w gospodarstwach domowych znajdują się przede wszystkim urządzenia do ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania wody użytkowej, urządzenia klimatyzacyjne, kuchnie elektryczne, sprzęt AGD i RTV. Elektryczne urządzenia grzewcze stanowią właściwie uzupełniające źródła ciepła w budownictwie mieszkaniowym, ale mogą również przejąć funkcję autonomicznego źródła ciepła w przypadku niewłaściwych lokalizacji obiektów. Według danych ARE i GUS łączne zapotrzebowanie na ciepło w gospodarstwach domowych (obejmujące ogrzewanie pomieszczeń i przygotowanie ciepłej wody użytkowej) wyniosło w 2015 roku – 474,3 PJ. Prognozuje się wzrost tego zapotrzebowania do 478,2 PJ w 2020 roku. Pod tym względem sektor gospodarstw domowych góruje nad przemysłem i sektorem

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 216–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 1. Schemat ideowy parowej jednostki ORC

usług, dla których w 2015 roku zapotrzebowanie na ciepło użytkowe wyniosło odpowiednio 313,2 i 178,6 PJ [5]. W 2013 roku liczba gospodarstw domowych wynosiła w Polsce 13,3 mln, przy czym na pojedyncze gospodarstwo przypada średnie zużycie ok. 2150 kWh energii elektrycznej [5]. Produktem, który w najbliższej przyszłości może zyskać atrakcyjność w sektorze gospodarstw domowych, jest kogeneracyjne mikroźródło oparte na technologii obiegu parowego z organicznym czynnikiem roboczym. Technologia ORC (*Organic Rankine Cycle*) znajduje się wśród technologii promowanych w *Dyrektywie 2012/27/UE* [7]. Propozycję autorów w tym zakresie stanowi prototypowa monoblokowa jednostka mikrokogeneracyjna, składająca się z tradycyjnego kotła gazowego sprzężonego z modułem ORC. W formie przedstawionej w niniejszym artykule przeznaczona jest ona głównie do zastosowań w gospodarstwach domowych na obszarach podmiejskich lub wiejskich, gdzie rozwija się budownictwo głównie jednorodzinne, a istniejąca infrastruktura nie pozwala na wykorzystanie ciepła systemowego. Warto podkreślić, że w większości takich obiektów instalowane są monowalentne systemy grzewcze z kotłem jako źródłem ciepła, co sprzyja aplikacji kotła kogeneracyjnego. Prezentowana jednostka stanowi pierwszy w Polsce prototyp mikrośiłowni w skali domowej.

2. Idea technologii ORC

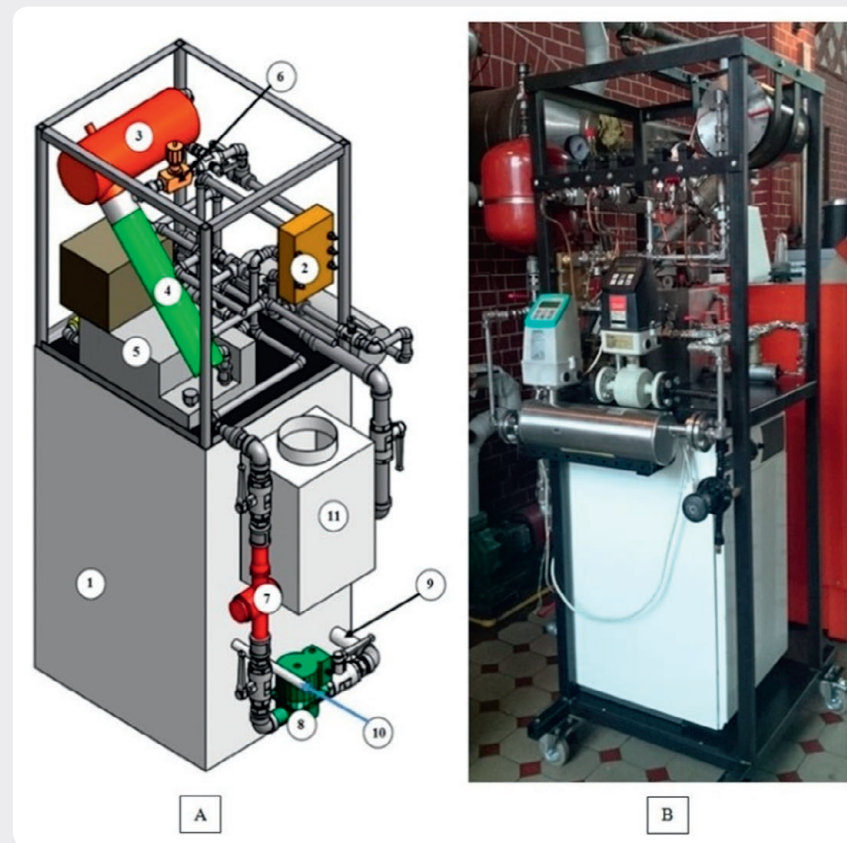
Zasada działania układu pracującego z wykorzystaniem organicznego obiegu Rankine'a nie odbiega od fundamentalnej zasady działania klasycznej siłowni parowej, gdzie czynnikiem roboczym jest woda. W przypadku układu ORC źródło ciepła (klasyczne w postaci kotła, niskotemperaturowe lub tzw. odpadowe) przekazuje energię cieplną niskowrzącemu czynnikowi roboczym, który z kolei zostaje izobarycznie podgrzany i odparowany (w uzasadnionych przypadkach osiągając też stan pary przegrzanej). Proces ten realizowany jest w podstawowym wymienniku układu ORC, zwanym parownikiem lub wytwornicą pary. Wytworzona para trafia do turbiny, w której ulega adiabaticznemu rozprężaniu, napędzając wirnik turbiny i sprzężony z nim generator prądu elektrycznego. Po ekspansji czynnik podlega kondensacji w skraplaczu i pompą, w procesie izochorycznego podnoszenia ciśnienia, kierowany jest

do ponownego odparowania. Uszeregowanie głównych elementów w obiegu ORC pokazano schematycznie na rys. 1.

Mając za tło klasyczny obieg C-R, łatwo zauważyć, że zasadniczą różnicę w obiegu ORC stanowi fakt zastosowania czynnika niskowrzącego jako czynnika roboczego. Dzięki temu do przygotowania pary nasyconej/przegrzanej czynnika można również wykorzystać niskotemperaturowe źródło energii odpadowej. W praktyce oznacza to zastąpienie kotła i odbywającego się w nim procesu spalania wymiennikiem ciepła, w którym odparowanie czynnika roboczego układu ORC następuje kosztem zmiany entalpii fizycznej nośnika energii odpadowej.

Technologia ORC ma swoją genezę w binarnych systemach geotermalnych, ale obecnie znajduje również zastosowanie w układach do konwersji energii z biomasy, promieniowania słonecznego, czy też zagospodarowania ciepła odpadowego z procesów technologicznych i energetycznych. Potencjalnymi w budowie jednostek wielkoskalowych są firma Ormat® [8] z siedzibą w Nevadzie oraz włoski Turboden [9]. Równolegle w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są m.in. badania nad właściwym doborem czynnika roboczych [10, 11] oraz dywagacje nad nowymi, bardziej efektywnymi energetycznie koncepcjami układów ORC [12, 13, 14].

Trudnym wyzwaniem technologicznym jest praktyczna realizacja domowego kogeneracyjnego mikroźródła w technologii ORC. Problem stanowi już sam dobór czynnika roboczego dla modułu ORC, ponieważ poza własnościami fizyko-chemicznymi, w kontekście eksploatacji instalacji w budynku mieszkalnym szczególnego znaczenia nabiera wybuchowość i toksyczność czynnika w wypadku awarii/rozszczęnienia układu. Dominującym problemem technicznym jest wykonanie małogabarytowego urządzenia ekspansyjnego (turbiny) o mocy efektywnej rzędu kilku kW, gwarantującej 100-procentową szczelność w obecności organicznego medium roboczego siłowni. Należy w tym miejscu podkreślić, że na rynku brak jest takich rozwiązań. W literaturze przedmiotu z kolei można dostrzec ogromną liczbę prac studialnych,



Rys. 2. Mikrośiłownia ORC; (A) rysunek aksjonometryczny: 1 – kocioł gazowy, 2 – parownik, 3 – turbogenerator, 4 – skraplacz, 5 – zbiornik etanolu, 6 – zawór dławiący, 7 – przepływomierz oleju, 8 – pompa oleju, 9 – króciec powrotu oleju do kotła, 10 – króciec gazowy, 11 – czopuch; (B): widok stanowiska

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 216–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

poświęconych adaptacji znanych maszyn objętościowych (sprężarek śrubowych i spiralnych, silników pneumatycznych) do pracy w warunkach ekspansji par czynników niskowrzących [15, 16]. Do znaczącego postępu w zakresie turbin dedykowanych mikrośilownikom ORC przyczyniły się też prace Kosowskiego i in. [17]. W badaniach prototypowego jednostopniowego mikroturbozespołu osiowego z HFE7100 odnotowano sprawności wewnętrzne na poziomie ok. 85%, co jest światowym osiągnięciem w przypadku maszyn wirnikowych o mocy efektywnej w zakresie do 3 kW [18]. Inny kierunek prac nad rozwojem mikrośilowni ORC dotyczy wdrażania nowatorskich rozwiązań wymienników ciepła (parownika, skraplacza, regeneratora). Jest to też główny obszar działalności naukowej autorów niniejszej pracy [19, 20, 21]. Oczekuje się w tym przypadku wysokiej efektywności procesu rekuperacji przy jednoczesnym zachowaniu kompaktowości konstrukcji.

Wśród producentów jednostek ORC w zakresie mocy elektrycznej do 10 kW można wskazać dwie firmy, a mianowicie Infinity Turbine [22] oraz Enogię [23]. Oferowane przez nie produkty są jednak znacząco różne w porównaniu z rozwijaną przez autorów koncepcją mikrośilowni ORC z kotłem gazowym [24].

3. Mikrośilownia ORC z kotłem gazowym

Prototypową jednostkę mikro-CHP z technologią ORC pokazano w formie fotografii i widoku aksjonometrycznym na rys. 2. Zaprojektowano ją w oparciu o kocioł gazowy DTG X 23 N, który w wersji komercyjnej stanowi ofertę firmy De Dietrich dla gospodarstw domowych. Na podstawie doświadczeń z innych ośrodków badawczych, jak i badań własnych [10, 25], do pracy w obiegu wybrano bezwodny alkohol etylowy. Wiele analiz wykazuje, że pod względem termodynamicznym jest to najbardziej korzystny czynnik. Pewne ograniczenia stosowania wiąże się z jego wybuchowością i własnościami smarnymi. Jak już wcześniej zaakcentowano, kocioł gazowy (1) jest autonomicznym źródłem ciepła dla mikrośilowni ORC. Ciepło wydzielane kosztem spalania paliwa jest odbierane za pomocą oleju termalnego Mobiltherm. Olej ten jest pośrednim nośnikiem ciepła cyrkulującym w zamkniętej pętli pomiędzy kotłem i parownikiem (2) modułu ORC. Charakteryzuje się wysoką trwałością termiczną i odpornością na utlenianie, brakiem toksyczności, a także dobrymi własnościami w instalacjach ogrzewania pośredniego, w temperaturach pracy do ok. 315°C. Cyrkulację oleju zapewnia pompa (8) Wilo (model IPH-O-32/170-0,37/4) o maksymalnej wydajności 3,5 m³/h i maksymalnej wysokości podnoszenia 6 m. Do pomiaru wydatku objętościowego oleju wykorzystano przepływomierz skrzydełkowy (7). Cyrkulację alkoholu etylowego w zamkniętym obiegu modułu ORC zapewnia hermetyczna pompa zębata ze sprężem magnetycznym firmy Tuthill (model TXS2.6). Jej nominalna wydajność wynosi 430 l/h przy ciśnieniu różnicowym 10,3 bara. Regulacja wydajności odbywa się poprzez zmianę częstotliwości w zakresie



Fot. 1. Widok turbozespołu parowego

0–60 Hz w układzie zasilania silnika elektrycznego pompy za pośrednictwem falownika bądź dzięki wykorzystaniu zaworu dławiącego sterowanego ręcznie – zainstalowanego na tzw. boczniku. Alkohol, przepływając przez parownik, pobiera ciepło od oleju termalnego, na skutek czego odparowuje, przechodząc również przy odpowiednio dużej gęstości strumienia ciepła w stan pary przegrzanej. Para nasycona/przegrzana jest docelowo kierowana do turbiny (3), gdzie się rozpręża, a następnie płynie do skraplacza (4). Podczas rozruchu stanowiska i w fazie jego nagrzewania do ekspansji czynnika służy zawór dławiący (6). Skraplacz modułu ORC jest chłodzony wodą sieciową. Po procesie kondensacji etanol jest kierowany do zbiornika (5). Wstępne naciśnienie w układzie olejowym zapewnia naczynie wyrównawcze wypełnione azotem – w zimnym układzie wygenerowano naciśnienie 0,5 bara. Układ olejowy wyposażony jest w zawór bezpieczeństwa o ciśnieniu otwarcia 4,5 bara.

Kluczowym elementem w instalacji jest osiowa mikroturbina parowa zaprojektowana do współpracy z alkoholem etylowym [17]. Generator prądu posadowiony jest na wale turbiny, bezpośrednio za jej częścią niskoprężną – zespół turbina i generator mają w związku z tym wspólny kadłub. Mikroturbina wyposażona jest w pojedynczy stopień turbinowy naddźwiękowy (liczba Macha na wylocie z palisady kierowniczej wynosi 2,4, obliczeniowa prędkość obrotowa wirnika to 36 tys. obr./min). Stopień turbinowy zaprojektowano pod kątem współpracy z parą alkoholu etylowego. Obliczeniowy wydatek masowy alkoholu wynosi 25 g/s, ciśnienie jego pary na wlocie do turbiny 7 barów, a ciśnienie pary po ekspansji w turbinie 1 bar. Widok turbozespołu pokazano na fot. 1. Smarowanie łożysk tej turbiny odbywa się za pomocą par etanolu.

Parownikiem w prototypowej mikrośilowni jest nowatorski minikanalowy, płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła z przegrodami turbulizującymi przepływ, umieszczonymi wewnątrz płaszczu [26]. Wymiennik ten zaprojektowano do współpracy z olejem termalnym w warunkach wysokich temperatur oleju (do 300°C) i wysokich ciśnień po stronie czynnika

niskowrzącego, odparowującego w rurach pęku (do 30 barów). Skraplacz modułu ORC jest kompaktowym płaszczowo-rurowym wymiennikiem ciepła o konstrukcji bliźniaczej do parownika. Wykonano go również na potrzeby mikrośilowni ORC na podstawie obliczeń o charakterze cieplno-przepływowym [27].

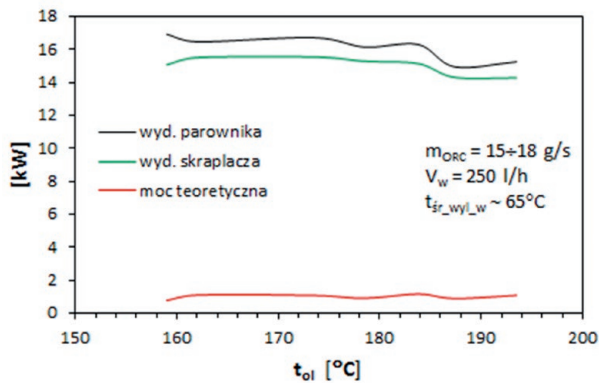
4. Wyniki badań prototypu

Systematyczne badania eksperymentalne prototypu mikrośilowni ORC z bezwodnym alkoholem etylowym były już wcześniej publikowane przez autorów [28, 29]. W przywołanych artykułach opisano szczegółowo zastosowane przyrządy pomiarowe, metodykę badawczą i algorytmy obliczeniowe. Na potrzeby rozważań prowadzonych w niniejszym artykule skonstruowano natomiast wykresy przedstawiające osiągnięte moce cieplne, temperatury nośników ciepła i sprawność termiczną realizowanego obiegu parowego. Wykresy opracowano na podstawie przeprowadzonych pomiarów cieplno-przepływowych i analizy termodynamicznej. W opinii autorów są one istotne dla podkreślenia potencjału technologii oraz wstępnej weryfikacji idei funkcjonowania węzła cieplnego gospodarstwa domowego z proponowanym kogeneracyjnym mikroźródłem.

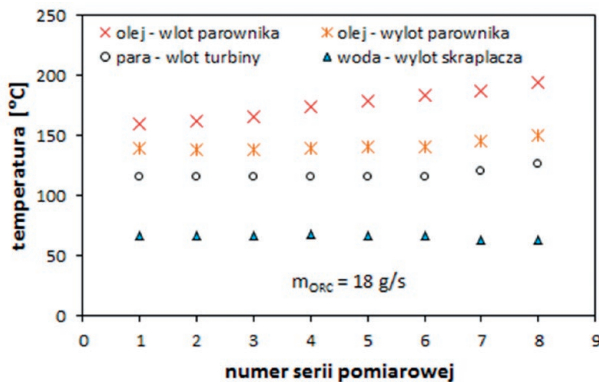
Na rys. 3 pokazano charakterystyki mocy cieplnych parownika i skraplacza oraz mocy teoretycznej związanej z ekspansją pary alkoholu w zakresie ciśnień parowania-skraplanie. Przebiegi wykreślono w funkcji temperatury oleju termalnego. Jak już wspomniano w rozdziale 3, parownik modułu ORC jest zasilany w ciepło z wykorzystaniem obiegu pośredniego z olejem termalnym, a zatem wydajność cieplna tego wymiennika może być w przybliżeniu rozumiana jako użytkowa moc cieplna kotła. Odnotowana wydajność cieplna skraplacza (ok. 15 kW) pozwoli w opinii autorów na pokrycie obciążenia cieplnego typowego domu jednorodzinnego w Polsce z niskotemperaturowym systemem grzewczym. Średnia temperatura wody opuszczającej skraplacz wynosi ok. 65°C (rys. 4), co daje również możliwość przygotowania wody użytkowej (wymagana temperatura zasilania 55°C), choć w tym przypadku należy przeprowadzić dodatkowe obliczenia, uwzględniając m.in. wpływ

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 216–221. When referring to the article please refer to the original text.

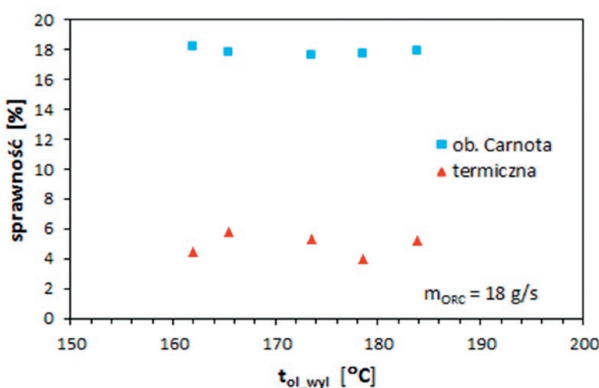
PL



Rys. 3. Charakterystyka mocy dla modułu ORC



Rys. 4. Poziomy temperaturowe nośników energii w mikrośilowni ORC



Rys. 5. Charakterystyka sprawności dla obiegu parowego z alkoholem etylowym

liczby mieszkańców na pobór ciepłej wody. Moc teoretyczna obiegu parowego kształtuje się na poziomie 1 kW. Sprawność termiczna obiegu, wykreślona na rys. 5, pozostaje na stosunkowo niskim poziomie (ok. 5%), niemniej należy pamiętać, że generacja energii elektrycznej w tym przypadku jest produktem ubocznym. Nie ma tu zastosowania metoda karnotyzacji obiegu, polegająca na obniżeniu temperatury skraplania pary czynnika roboczego, ponieważ podjęto próbę dopełnienia podstawowej funkcji kotła – zaopatrzenia odbiorcy w ciepło.

5. Podsumowanie

W artykule omówiono prototypowe mikroźródło z technologią ORC, przeznaczone do aplikacji w sektorze gospodarstw domowych, wraz z analizą termodynamiczną, przeprowadzoną na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Przedstawione charakterystyki potwierdziły skuteczność współpracy kotła gazowego z modułem ORC w skali domowej i są przesłanką do kontynuacji prac nad rozwojem proponowanej koncepcji. Autorzy mają świadomość potrzeby rozbudowy układu

o magazyn ciepła, układ automatycznej regulacji pracą turbiny i synchronizacji parametrów elektrycznych z parametrami sieci elektroenergetycznej lokalnego operatora. To elementy obecnie prowadzonych prac. Otwarta pozostaje również sprawa doboru czynnika roboczego dla modułu parowego. Prowadzone są aktualnie prace nad wdrożeniem wody jako czynnika roboczego, a pierwsze rezultaty zostały opublikowane w literaturze [29].

W opinii autorów domowy kocioł gazowy doposażony w moduł generujący energię elektryczną zasługuje na miano tzw. kotła III generacji. Urządzenia tego typu mogą spotkać się z zainteresowaniem w indywidualnych gospodarstwach domowych, pod warunkiem że zostanie potwierdzona ich żywotność, wysoka niezawodność, a także możliwość bezobsługowej i cichej pracy. Proponowane rozwiązanie doskonale wpisuje się również w krajowe ramy inteligentnych specjalizacji w obszarze systemów energetycznych budynków.

Bibliografia

1. Komunikat Komisji [online], http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_PL_ACT_part1_v1.pdf [dostęp: 21.03.2017].
2. Polityka energetyczna Polski do 2030, *Monitor Polski* 2010, nr 2, s. 28–149.
3. Bargiel J. i in., Rola generacji rozproszonej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym na przykładzie gminy Gierałtów, *Acta Energetica* 2014, No. 4/21, s. 31–37.
4. Ustawa z dnia 20.02.2015 o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. z 2015 r., poz. 478.
5. Kott M., Efektywność wykorzystania energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w kontekście europejskiej polityki energetycznej, *Acta Energetica* 2015, No. 3/25, s. 54–59.
6. Analiza potencjału rynkowego dla technologii – Wysokosprawny płaszczoworurowy wymiennik ciepła z techniką mikrostrugową w rurach pęku, Ekspertyza dla CTWT PG, 2015.
7. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady, 2012/27/UE, 25.10.2012.
8. Ormat Technologies [online], <http://www.ormat.com/> [dostęp: 21.03.2017].
9. Turboden [online], <http://www.turboden.eu/en/home/index.php> [dostęp: 21.03.2017].
10. Mikielwicz D., Mikielwicz J., A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP, *Applied Thermal Engineering* 2010, Vol. 30, s. 2357–2362.
11. Rayegan R., Tao Y.X., A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs), *Renewable Energy* 2011, Vol. 36, s. 659–670.
12. Jradi M., Riffat S., Modelling and testing of a hybrid solar-biomass ORC-based micro-CHP system, *International Journal of Energy Research* 2014, Vol. 38, s. 1039–1052.
13. Mikielwicz D., Mikielwicz J., Wajs J., Układ turbiny parowej z organicznym obiegiem Rankine'a (ORC) do wykorzystania ciepła odpadowego, patent PL 224462, 2013.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 216–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

14. Mikielwicz D., Wajs J., Organic flash cycle as an alternative to organic rankine cycle for application in domestic heat and power supply system, materiały IV Konferencji WTiUE, Kraków 2016.
15. Mikielwicz D., Mikielwicz J., Wajs J., Experiences from operation of different expansion devices for application in domestic micro CHP, *Archives of Thermodynamics* 2010, Vol. 31, No. 4, s. 3–13.
16. Ziviani D. i in., Characterizing the performance of a single-screw expander in a small-scale organic Rankine cycle for waste heat recovery, *Applied Energy* 2016, Vol. 181, s. 155–170.
17. Kosowski K. i in., Mikroturbiny. Badania numeryczne i eksperymentalne, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2016.
18. Włodarski W., Badania eksperymentalne mikroturbozespołów, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2016.
19. Wajs J., Mikielwicz D., Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger, *Applied Thermal Engineering* 2016, Vol. 93, s. 1337–1346.
20. Wajs J., Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Strugowy wymiennik ciepła o budowie cylindrycznej, zwłaszcza do odzysku energii cieplnej z niskotemperaturowych źródeł odpadowych, patent PL 224494, 2013.
21. Wajs J., Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Thermal performance of a prototype plate heat exchanger with minichannels under boiling conditions, *Journal of Physics, Conference Series* 2016, Vol. 745, 032063, doi: 10.1088/1742-6596/745/3/032063
22. Infinity Turbine [online], <http://www.infinityturbine.com/> [dostęp: 21.03.2017].
23. Enogia [online], <http://www.enogia.com/> [dostęp: 21.03.2017].
24. Mikielwicz D., Wajs J., Mikielwicz J., Gas boiler as a heat source for a domestic micro-CHP, *Journal of Power Technologies* 2014, Vol. 94, No. 4, s. 317–322.
25. Mikielwicz D., Mikielwicz J., Analytical method for calculation of heat source temperature drop for the Organic Rankine Cycle application, *Applied Thermal Engineering* 2014, Vol. 63, s. 541–550.
26. Wajs J., Mikielwicz D., Minikanałowy płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła, *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna* 2010, nr 6–7, s. 255–259.
27. Wajs J., Mikielwicz D., Jakubowska B., Performance of shell-and-tube condenser with minichannels for the micro domestic ORC, *Applied Thermal Engineering* [w recenzjach].
28. Wajs J., Mikielwicz D., Woźnowska M., Gazowy kocioł kogeneracyjny – badania prototypu, *Instal* 2016, nr 1 (369), s. 11–17.
29. Wajs J. i in., Experimental investigation of domestic micro-CHP based on the gas boiler fitted with ORC module, *Archives of Thermodynamics* 2016, Vol. 37, No. 3, s. 79–93.

Podziękowania

Autorzy kierują szczególne podziękowania do prof. Jarosława Mikielwicza, członka rzeczywistego PAN, inicjatora i promotora idei mikrośilowni domowej z technologią ORC, za opiekę merytoryczną nad jej ewolucyjnym rozwojem.

Jan Wajs

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: Jan.Wajs@pg.edu.pl

Adiunkt w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Członek Sekcji Termodynamiki Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN.

Dariusz Mikielwicz

prof. dr hab. inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl

Kierownik Katedry Energetyki i Aparatury Przemysłowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Członek Prezydium Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN oraz Komitetu Problemów Energetyki przy prezydium PAN.