

Wstępne wyniki badań prototypowego układu minisiłowni z ORC zasilanej wodą o temperaturze 100°C

Władysław Nowak¹, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur¹, Piotr Klonowicz²,
Aleksander Stachel¹, Paweł Hanausek², Wojciech Klonowicz³



W. Nowak



A. Borsukiewicz-Gozdur



P. Klonowicz



A. Stachel



P. Hanausek



W. Klonowicz

Small prototype of ORC power plant fuelled by water at 100°C: first experimental results. Prz. Geol., 58: 622–625.

Abstract. A general layout and principle of operation of the power plants based on the Organic Rankine Cycle (ORC) are presented together with an overall analysis of the effectiveness of such type of installations. This is followed by a more detailed description of the ORC research installation that has been originally designed, built and successfully put into operation. Substantial part of the paper is then devoted to design assumptions of that small ORC power plant that is fuelled with hot water at the temperature of 100°C, has nominal output of 22 kW and is located at the Department of Heat Engineering, West Pomeranian University of Technology in Szczecin. The R227ea organic fluid with low boiling point is used as the cycle working medium. Finally, first experimental results of the power plant tests and conclusions are given.

Keywords: geothermal energy, prototype of ORC power plant

Energetyka polska nadal oparta jest głównie na spalaniu węgla – ok. 75% energii uzyskuje się ze spalania węgla brunatnego i kamiennego. Udział źródeł odnawialnych w produkcji energii w Polsce w 2007 r. wyniósł tylko 3,5%, na rok 2010 zakłada się wzrost do 7,5% (Dz.U. z 1997 r. Nr 54, poz. 348; Dz.U. z 2003 r. Nr 153, poz. 1504 z późniejszymi zmianami).

Polska dysponuje znacznym potencjałem geotermalnym, stosunkowo równomiernie rozłożonym na terenie kraju. W pracach Neya (1987), Sokołowskiego (1997) i Góreckiego (1996, 2001 i 2006) przedstawiono rozkład zasobów wód geotermalnych w zależności od położenia i uwarunkowań geologicznych. Szacuje się, że całkowita wielkość tych zasobów, przypadających na źródła o niskiej i średniej entalpii i temperaturze w granicach 25–150°C, wynosi około 6600 km³. Najdogodniejsze warunki geotermalne występują na Niżu Polskim, Podhalu i w Sudetach. Na rycinie 1 przedstawiono mapę temperatur na głębokości 3000 m na Niżu Polskim (Górecki, 2006), gdzie uruchomiono dotychczas cztery instalacje wykorzystujące ciepło wody geotermalnej do ogrzewania.

Podstawowym problemem przy wykorzystywaniu wód geotermalnych do produkcji energii elektrycznej jest w Polsce brak własnych doświadczeń w dziedzinie projektowania, budowy i eksploatacji instalacji z organicznym obiegiem Rankine'a (ORC – *Organic Rankine Cycle*). Z dotychczasowego stanu wiedzy wynika, że jest to naj-

prostsza metoda konwersji energii ciepłej wody na prąd elektryczny (Borsukiewicz-Gozdur, 2008). Kluczową kwestią w tej technologii jest dobór odpowiedniego niskowrzącego czynnika obiegowego dla danej temperatury wody grzewczej w celu uzyskania optymalnych parametrów pracy turbiny przy założonej wielkości siłowni.

Podstawy działania siłowni opartej na ORC

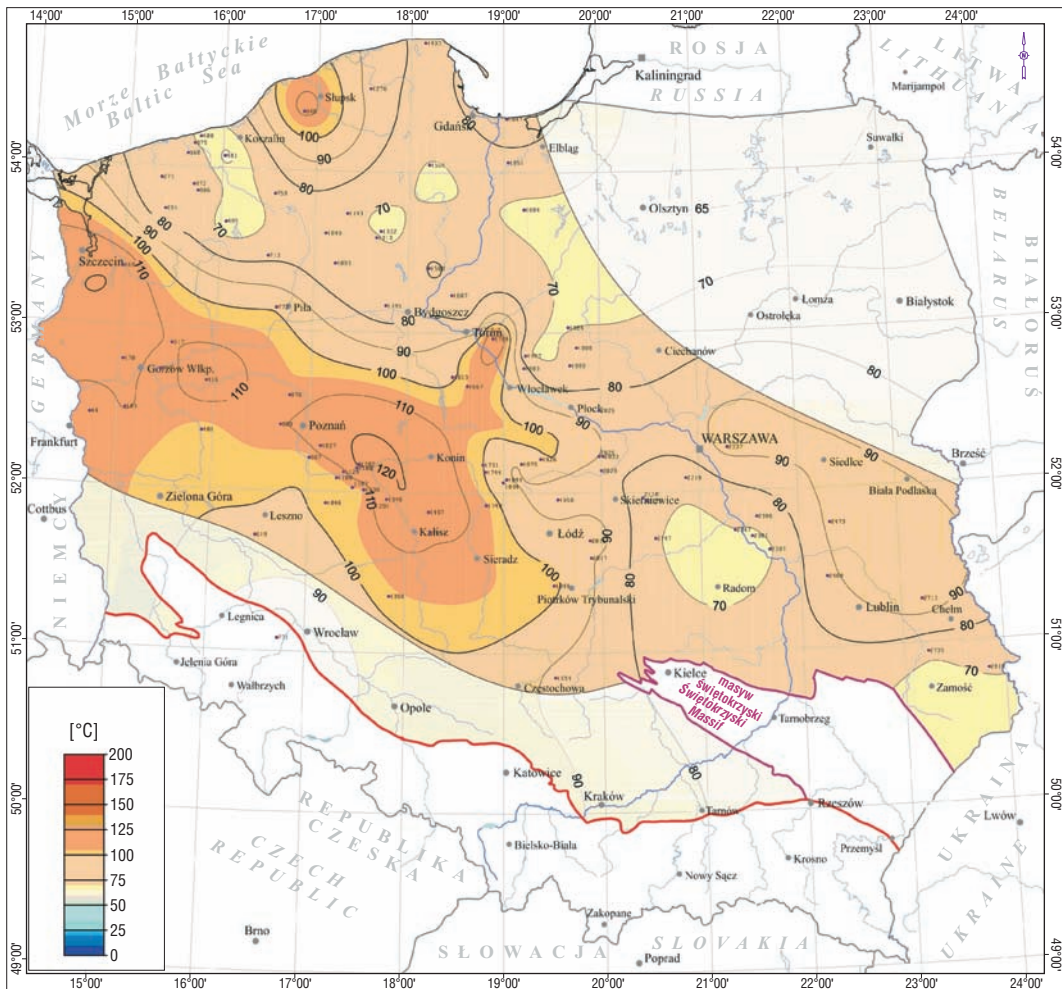
Zasada działania siłowni opartej na organicznym obiegu Rankine'a (ORC) nie różni się istotnie od zasady działania tradycyjnej siłowni z obiegiem wodnym. Jedyną różnicą polega na tym, że w tradycyjnej siłowni do wytworzenia pary wodnej zasilającej turbinę potrzebne jest wysokotemperaturowe źródło ciepła (kocioł opalany węglem, gazem itp.), podczas gdy w siłowni z ORC zamiast wody stosowany jest czynnik niskowrzący, najczęściej organiczny, którego parę (do zasilania turbiny) można otrzymać przy użyciu niskotemperaturowego źródła ciepła, np. wymiennika gorąca woda-czynnik niskowrzący. Zagadnienie optymalnego doboru czynnika organicznego wykracza poza ramy niniejszego artykułu, należy jednak wspomnieć tu o jednym z kryteriów – czyli o takiej pożądanej charakterystyce czynnika niskowrzącego, by jego para nie musiała być przegrzewana, a jednocześnie podczas rozprężania w turbinie nie przechodziła w stan pary wilgotnej (co powoduje wytrącanie się kropeł cieczy i erozję łopatek turbiny). Czynnik o takiej charakterystyce nazywamy czynnikiem suchym – w jego przypadku nie ma potrzeby stosowania przegrzewacza pary czynnika roboczego (Borsukiewicz-Gozdur i in., 2007).

Typowa instalacja siłowni parowej pracującej z czynnikiem suchym została przedstawiona na rycinie 2.

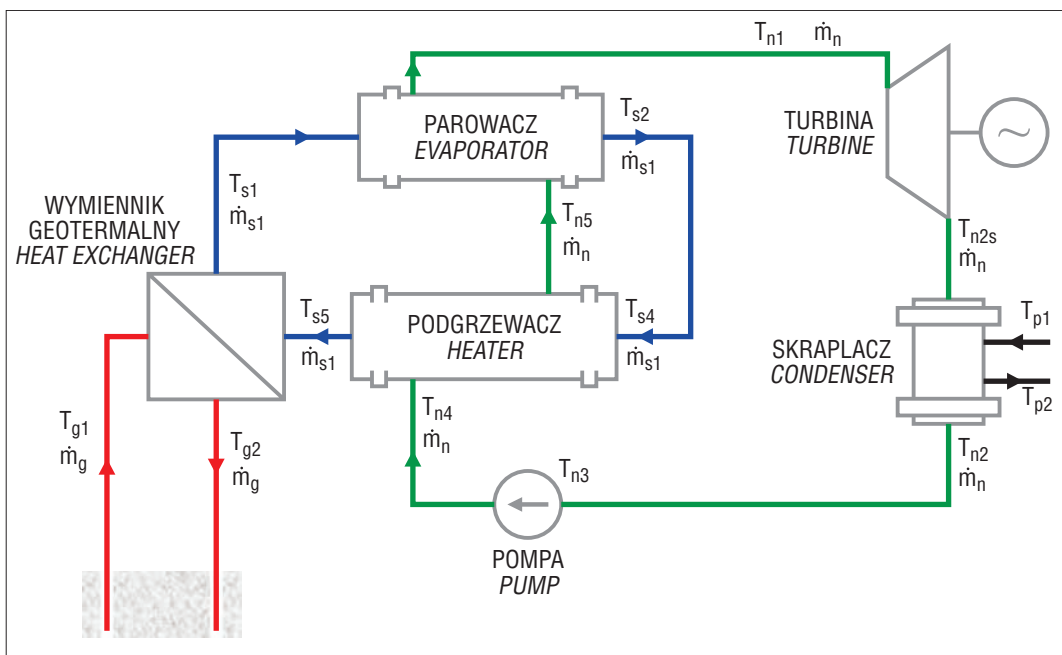
¹Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

²Instytut Maszyn Przepływowych, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 219/223, 93-005 Łódź

³Turboservice Sp. z o.o., ul. Wróblewskiego 38A, 93-578 Łódź



Ryc. 1. Mapa rozkładu temperatur na głębokości 3000 m p.p.t. na obszarze Nizy Polskiego (Górecki, red., 2006)
 Fig. 1. Temperature distribution at the ground depth of 3000 m across the Polish Lowland (Górecki, ed., 2006)



Ryc. 2. Schemat instalacji siłowni parowej z suchym czynnikiem organicznym
 Fig. 2. Schematic outlay of the power station cycle working with a dry organic fluid

Siłownia obejmuje następujące urządzenia: wymiennik geotermalny, turbinę z generatorem prądowtłórczym, skraplacz, pompę obiegową, podgrzewacz i parowacz. Para nasycona sucha kierowana jest do turbiny parowej, w której następuje jej rozprężenie do ciśnienia panującego w skraplaczu. Następnie para przepływa przez skraplacz, a skroplony czynnik organiczny kierowany jest do podgrzewacza i parowacza.

Projekt i budowa doświadczalnej minisiłowni z ORC

Pod koniec 2008 r. na zamówienie Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie krajowa firma Turboservice Sp. z o.o. przy wsparciu Politechniki Łódzkiej zaprojektowała i wykonała stanowisko doświadczalne symulujące działanie elektrowni geotermalnej.

Układ minisiłowni oparty był na organicznym obiegu Rankine'a zasilanym gorącą wodą z sieci ciepłowniczej, przy założeniu dostępności wody o temperaturze do 110°C. Skraplacz obiegu był chłodzony wodą, której temperatura obniżana była w chłodni kominowej. Jako medium robocze zastosowano czynnik organiczny R227ea. Wybór czynnika został podyktowany względami termodynamicznymi (wysoką sprawnością konwersji energii – ryc. 3). Dodatkową korzyść stanowił fakt, że było to medium suche. Czynnik R227ea miał ponadto niski indeks ODP (*Ozone Depletion Potential*), czyli uszczuplenia warstwy ozonowej oraz umiarkowaną wartość GWP (*Global Warming Potential*), czyli wpływu na globalne ocieplenie (Bonca i in., 2004). Niska wartość tych wskaźników jest wymagana wobec możliwości awarii i wycieków czynnika roboczego do otoczenia.

Na rycinie 4 przedstawiono obliczeniową moc obiegu w funkcji temperatury pary nasyconej na wyjściu z wymiennika (parowacza) dla czynnika R227ea. Jak widać, maksimum mocy odpowiada pracy obiegu przy temperaturze pary nasyconej o wartości 72°C. Przy maksymalnej dostępnej ilości wody grzewczej, wynoszącej tylko 6 m³/h tak wysokie parametry pary zasilającej turbinę prowadziłyby do konieczności zaprojektowania turbiny o nadzwyczaj małych wymiarach i jednocześnie o bardzo wysokiej częstotliwości obrotów. Aby zwiększyć rozmiary turbiny, a także zredukować jej prędkość obrotową, zdecydowano, że nominalna temperatura pary czynnika na wlocie do turbiny będzie równa 63°C. Obliczenia mocy obiegu przeprowadzono z użyciem termodynamicznej biblioteki REFPROP 7.0 (*Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database: Version 7.0*).

Biorąc pod uwagę dostępne środki finansowe, przyjęto następującą koncepcję turbiny:

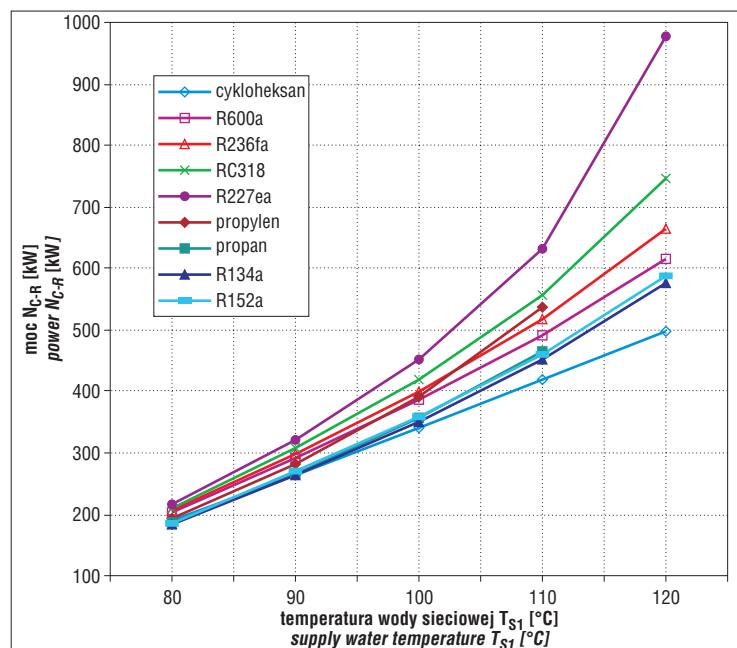
- wał jest łożyskowany na łożyskach tocznych;
- moc turbiny odbierana jest przez sprężarkę promieniową z wirnikiem osadzonym na drugim końcu wału turbiny;
- uszczelnienie absolutne wału po stronie turbiny (dla zabezpieczenia przed wyciekami czynnika

obiegowego do otoczenia) jest zapewnione za pomocą uszczelnienia labiryntowego i układu blokady gazowej (powietrze pod ciśnieniem z zewnętrznego zasilania).

Przyjęto następujące nominalne parametry projektowanej turbiny:

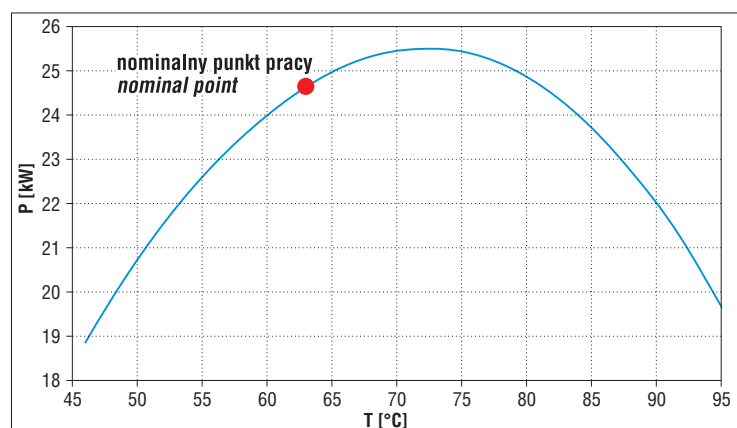
- strumień masy czynnika 2 kg/s,
- ciśnienie pary na wlocie 12,6 bar,
- temperatura pary na wlocie 63°C,
- ciśnienie pary na wylocie 3,9 bar,
- temperatura pary na wylocie 38°C,
- prędkość obrotowa wirnika 28 000 obr./min.

Obliczenia projektowe turbiny zostały przeprowadzone na podstawie jednowymiarowej teorii przepływów, natomiast pełne trójwymiarowe obliczenia sprawdzające przepływy w turbinie wykonano za pomocą oprogramowania



Ryc. 3. Moc obiegu Clausiusa-Rankine'a w funkcji temperatury wody sieciowej T_{S1} dla wybranych czynników roboczych

Fig. 3. Power output of the Clausius-Rankine cycle as function of the supply water temperature T_{S1} for selected cycle working fluids



Ryc. 4. Wykres obliczeniowej mocy obiegu w funkcji temperatury pary nasyconej opuszczającej wymiennik dla czynnika R227ea

Fig. 4. Calculated power output of the R227ea fluid based cycle as function of the saturated steam temperature at the evaporator outlet

ANSYS CFX. Wyniki symulacji numerycznej dały moc wewnętrzną turbiny o wartości 24,9 kW.

Na rycinie 5 przedstawiono widok kompletnego stanowiska zbudowanej siłowni doświadczalnej. Oprócz opisanej wyżej turbiny i odbierającej jej moc powietrznej sprężarki promieniowej w obiegu zastosowano odpowiednio dobrane wymienniki płytowe (pełniące funkcje parowacza i skraplacza) oraz hermetyczną pompę skroplonej cieczy czynnika roboczego. Stanowisko wyposażono w bogaty zestaw sond i przetworników ciśnienia, temperatury i przepływu, umożliwiających pomiar i rejestrację wszystkich parametrów obiegu oraz wody zasilającej parowacz i chłodzącej skraplacz. W celu uzyskania możliwości

badania pełnego zakresu charakterystyk siłowni zastosowano ręczną regulację parametrów sterujących siłowni, tj. temperatury i strumienia objętości wody zasilającej parowacz i chłodzącej skraplacz oraz strumienia masy czynnika obiegowego.

Wyniki badań

Temperatura wody zasilającej, pobieranej z sieci centralnego ogrzewania, nie osiągnęła podczas pierwszych badań zakładanej wartości nominalnej i w związku z tym nie uzyskano założonej mocy nominalnej. Jednak w zakresie przebadanej prędkości obrotowej charakterystyka mocy turbiny, uzyskana z pomiarów mocy pobieranej przez sprężarkę, wykazała oczekiwany przebieg (ryc. 6). Badania z wodą zasilającą o temperaturze do 110°C przewidziano na jesień 2010 r.

Wnioski

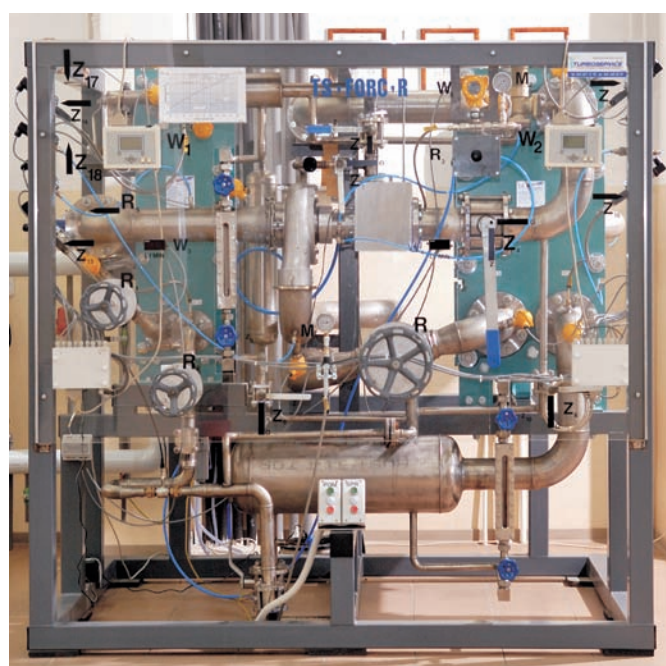
Badania przeprowadzone na stanowisku doświadczalnym kompletnej minisiłowni z ORC, zaprojektowanej i zoptymalizowanej dla zadanego źródła wody gorącej, potwierdziły poprawność przyjętych założeń projektowych i zastosowanych metod obliczeniowych oraz – jednocześnie – możliwości technologiczne wykonania tego typu instalacji w warunkach krajowych. Te pozytywne okoliczności winny być zatem brane pod uwagę przy planach wykorzystania wspomnianego wcześniej dużego potencjału wód geotermalnych w Polsce.

Przedstawiona praca została wykonana w ramach projektu badawczo-rozwojowego nr R06 015 01 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

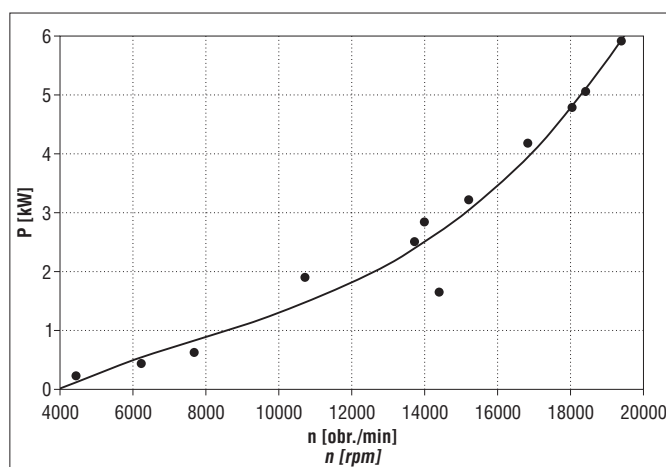
- BONCA Z., BUTRYMOWICZ D., TARGAŃSKI W. & HAJDUK T. 2004 – Nowe czynniki chłodnicze i nosniki ciepła. Właściwości cieplne, chemiczne i użytkowe. IPPU Masta Sp. z o.o.
- BORSUKIEWICZ-GOZDUR A. 2008 – Efektywność pracy elektrowni geotermalnej z organicznym czynnikiem roboczym. Praca doktorska, Politechn. Szczec., Szczecin.
- BORSUKIEWICZ-GOZDUR A. & NOWAK W. 2007 – Comparative Analysis of Natural and Synthetic Refrigerants in Application to Low Temperature Clausius-Rankine Cycle. Energy, 32: 344–352.
- GÓRECKI W. 1996 – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. Wyd. GEOS, Kraków.
- GÓRECKI W. (red.) 2006 – Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Polskim. Formacje Mezozoiku. AGH, Kraków.
- GÓRECKI W., KUŹNIAK T. & KOZDRA T. 2001 – Zasoby wód i energii geotermalnej na Niżu Polskim oraz możliwości ich przemysłowego wykorzystania. Międzynarodowa Konferencja „Odnawialne Źródła Energii”, 10–11.12.2001. Warszawa.
- NEY R. & SOKOŁOWSKI J. 1987 – Wody geotermalne Polski i możliwości ich wykorzystania. Nauka Polska, 6.
- Obwieszczenie** Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 15 lipca 2003 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo energetyczne. Dz.U. z 2003 r. Nr 153, poz. 1504 z późniejszymi zmianami.
- Ustawa** z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne. Dz.U. z 1997 r. Nr 54, poz. 348.
- SOKOŁOWSKI J. 1997 – Metodyka oceny zasobów geotermalnych i warunki ich występowania w Polsce. Materiały Polskiej Szkoły Geotermalnej, III Kurs, Wyd. PGA i CPPGSMiE PAN, Kraków-Szręszecin.

Praca wpłynęła do redakcji 2.03.2010 r.
Po recenzji akceptowano do druku 5.05.2010 r.



Ryc. 5. Stanowisko doświadczalne minisiłowni z ORC w Katedrze Techniki Ciepłej na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie

Fig. 5. Test rig of a small ORC power station located at the Department of Heat Engineering, West Pomeranian University of Technology in Szczecin



Ryc. 6. Zmierzona moc mechaniczna turbiny w funkcji jej prędkości obrotowej

Fig. 6. Measured power output of the turbine as function of its rotational speed