



Krzysztof SORNEK<sup>1</sup>, Mariusz FILIPOWICZ<sup>1</sup>

## **Analiza parametrów pracy systemu mikrokogeneracyjnego z generatorem termoelektrycznym i kominkiem opalonym drewnem pod kątem zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego odbiorców końcowych**

Streszczenie: Wdrażanie rozwiązań w zakresie skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej w systemach mikroskalowych stanowi jeden ze sposobów na zwiększenie bezpieczeństwa dostaw energii do odbiorców końcowych. Na rynku dominują rozwiązania średniej i dużej skali zasilane paliwami kopalnymi, dlatego też istotne jest opracowanie systemów dedykowanych do zastosowania w budynkach mieszkalnych, gospodarstwach rolnych, szkołach itp. Niniejsza praca przedstawia koncepcję rozwinięcia funkcjonalności typowego kominka opalanego drewnem o wytwarzanie energii elektrycznej. Energia elektryczna wytwarzana w generatorach termoelektrycznych (badane były zarówno jednostki dostępne na rynku, jak i jednostka własnej konstrukcji) może zapewnić pokrycie potrzeb własnych systemu mikrokogeneracyjnego (zasilanie sterownika, siłownika przepustnicy powietrznej, wentylatora, pompy itp.). Z kolei nadatek energii może zostać zmagazynowany w akumulatorach, a następnie wykorzystany do zasilania innych urządzeń (oświetlenie, drobne urządzenia RTV i AGD itp.). Należy przy tym zwrócić uwagę, że dostępne na rynku generatory termoelektryczne nie są zwykle zaprojektowane do współpracy z domowymi urządzeniami grzewczymi – występuje problem m.in. z zapewnieniem wystarczająco dużego strumienia ciepła przekazywanego do strony gorącej generatora, jak również z jego efektywnym chłodzeniem. Dla zapewnienia wysokiej efektywności systemu mikrokogeneracyjnego konieczne jest więc opracowanie dedykowanej konstrukcji zarówno generatora, jak i źródła ciepła.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo energetyczne, mikrokogeneracja, energetyka odnawialna, biomasa, generatory termoelektryczne

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Kraków; Instytut Zrównoważonej Energetyki, Kraków;  
e-mail: krzysztof.sornek@agh.edu.pl; mariusz.filipowicz@agh.edu.pl

## ***Analysis of the micro-cogeneration system operating parameters with a thermoelectric generator and wood-fired stove in terms of improving the energy security of consumers***

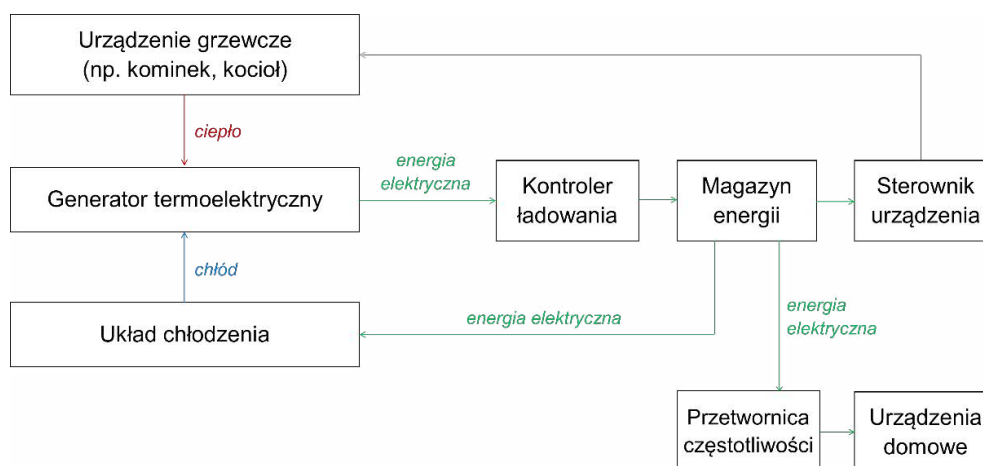
Abstract: The implementation of micro scale combined heat and power systems is one of the ways to improve the energy security of consumers. In fact, there are many available large and medium scale cogeneration units, which operate according to the Rankine Cycle. Due to European Union demands in the field of using renewable energy sources and increasing energy efficiency result in the importance of additionally developing systems dedicated for use in residential buildings, farms, schools and other facilities. This paper shows the concept of introducing thermoelectric generators into typical wood stoves: steel plate wood stoves and accumulative wood stoves. Electricity generated in thermoelectric generators (there were studies on both three market available units and a prototypical unit developed by the authors) may be firstly consumed by the system (to power controller, actuators, fans, pumps, etc.). Additional power (if available) may be stored in batteries and then used to power home appliances (light, small electronics and others). It should be noted that commercially available thermoelectric generators are not matched for domestic heating devices – the main problems are connected with an insufficient heat flux transmitted from the stove to the hot side of the generator (caused e.g. by the non-homogeneous temperature distribution of the surface and bad contact between the stove and the generator) and inefficient cooling. To ensure the high efficiency of micro cogeneration systems, developing a dedicated construction both of the generator and the heat source is necessary.

Keywords: energy security, micro cogeneration, renewable energy sources, biomass, thermoelectric generators

### ***Wprowadzenie – bezpieczeństwo energetyczne***

Bezpieczeństwo energetyczne definiowane jest w zróżnicowany sposób. Rozumiane jest jako stan braku zagrożenia przerwaniem dostaw paliw i energii (tj. stan zapewnienia ciągłości dostaw na poziomie wynikającym z aktualnych potrzeb odbiorców), przy uwzględnieniu aspektów ekonomicznych (zapewnienie stałych cen energii i przeciwdziałanie tzw. ubóstwu energetycznemu użytkowników) oraz ekologicznych (wytwarzanie energii w sposób bezpieczny dla środowiska przyrodniczego). Bezpieczeństwo energetyczne może być również rozumiane jako dynamiczny proces obejmujący całość problematyki związanej z kwestiami zapewniania przetrwania państwa i swobody realizacji własnych interesów narodowych w niepewnym lub jawnie nieprzyjawnym (niebezpiecznym, ryzykownym) środowisku energetycznym, głównie poprzez wykorzystywanie szans, podejmowanie wyzwań, redukowanie ryzyk i przeciwdziałanie zagrożeniom energetycznym. W takim kontekście najbardziej bezpieczna jest samowystarczalność energetyczna, gdy podstawę produkcji energii stanowią własne jej nośniki. Kwestie dotyczące bezpieczeństwa energetycznego rozpatrywane są najczęściej w kontekście danego kraju lub regionu, jednak mogą dotyczyć także społeczności lokalnych (miasta, gminy) oraz odbiorców końcowych (np. gospodarstwa domowe). Nowoczesnym miastom dedykowane są własne sieci energetyczne bazujące na technologii *smart grid*, integrujące lokalne jednostki wytwórcze oraz efektywnie dystrybuujące energię do odbiorców końcowych. W przypadku indywidualnych gospodarstw domowych (a także innych, niewielkich obiektów, w tym układów wyspowych), z powodzeniem mogą zostać wykorzystane systemy energetyki odnawialnej. Zastosowanie systemów wykorzystujących OZE (ciepło powstające w wyniku spalania biomasy, energia promieniowania słonecznego, energia wiatru itp.) pozwala na częściowe lub całkowite unie-

zależnienie się od zewnętrznych dostaw energii elektrycznej, a w konsekwencji – globalnego ograniczenia popytu na energię konwencjonalną. Dodatkową zaletą zastosowania tego typu rozwiązań jest brak wrażliwości na awarie sieci elektroenergetycznej (mogące wynikać z kwestii infrastrukturalnych lub być spowodowane przez zniszczenia powstałe wskutek gwałtownych zjawisk atmosferycznych – burz, wichur itp.). Z drugiej strony zapewnienie niezależności energetycznej gospodarstw domowych w warunkach polskich nie jest łatwe. Duża zmienność (zarówno dobową, jak i sezonową) ilości dostępnej energii promieniowania słonecznego oraz energii możliwej do pozyskania w siłowniach wiatrowych powoduje, że systemy energetyki słonecznej i wiatrowej nie gwarantują w 100% pokrycia potrzeb energetycznych obiektów (konieczne jest pozostawienie przyłącza do sieci lub zapewnienie alternatywnej jednostki prądotwórczej, np. generatora energii z silnikiem spalinowym). Dużo korzystniejszym rozwiązaniem w kontekście systemów OZE jest zastosowanie układu prądotwórczego opartego na termicznej konwersji biomasy – może to być np. generator termoelektryczny, silnik Stirlinga lub układ mikrogeneracyjny z turbiną parową (Sornek i Filipowicz 2016). Niestety, tego typu rozwiązania w większości przypadków znajdują się wciąż w fazie testowej, a wybór dostępnych na rynku układów jest niewielki. Dlatego też w niniejszym artykule, obejmującym analizę możliwości implementacji generatorów termoelektrycznych w typowym wkładzie kominkowym, pod uwagę zostały wzięte przykładowe konstrukcje generatorów dostępnych na rynku, a także generator termoelektryczny własnej konstrukcji. Celem aktualnie prowadzonych badań jest zapewnienie niezależnej pracy urządzenia grzewczego (zasilanie sterownika, siłownika przepustnicy powietrznej, wentylatora, pompy itp.), natomiast w dalszej perspektywie – zapewnienie możliwości zasilania innych urządzeń domowych (oświetlenie, drobne urządzenia RTV i AGD itp.). Schemat ideowy proponowanej konstrukcji systemu mikrogeneracyjnego przedstawiony został na rysunku 1.



Rys. 1. Idea systemu mikrogeneracyjnego z urządzeniem grzewczym opalanym biomasą i generatorem termoelektrycznym

Fig. 1. General idea of the micro-cogeneration system with wood-fired heating devices and thermoelectric generators

## 1. Aktualny stan badań

Literatura polska i światowa zawierają szereg prac poświęconych zagadnieniu bezpieczeństwa energetycznego.

Wysoką wagę bezpieczeństwa energetycznego, jako jednego z głównych czynników poprawnego funkcjonowania państwa, przedstawiono w pracy (Gawłowski i in. 2010). Wśród kilku przytoczonych warunków strategicznego bezpieczeństwa energetycznego Polski na lata 2010–2110, wymienione zostało m.in. wykorzystanie OZE, w tym energii wodnej, wiatru, promieniowania słonecznego oraz biomasy. Wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych jest o tyle istotne, że pierwsza dekada XXI wieku przyniosła blisko 12% obniżenie produkcji energii pierwotnej w Polsce oraz nieznaczny wzrost zużycia energii pierwotnej. W konsekwencji wzrosła zależność od importu surowców energetycznych. Nie mniej, co warto podkreślić, Polska zachowała czwartą pozycję wśród państw UE pod względem pozyskania energii pierwotnej (Kamiński i in. 2015). Postępujące zmiany krajowej struktury wytwarzania energii elektrycznej zostały również poddane analizie w kontekście kluczowych założeń polityki energetycznej w pracy (Szurlej i in. 2013). Do najistotniejszych zmian zaliczono stopniowe zmniejszenie się udziału węgla przy systematycznym wzroście udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz gazu ziemnego. Ważnym elementem w kontekście zagadnienia bezpieczeństwa energetycznego są działania zmierzające w kierunku poprawy efektywności energetycznej. Prowadzą one do racjonalizacji gospodarki surowcami energetycznymi oraz osiągnięcia oszczędności energii w łańcuchu przemian energetycznych. Efektywność energetyczna ma do odegrania kluczową rolę w transformacji energetyki w kierunku bardziej konkurencyjnego, bezpiecznego i zrównoważonego systemu energetycznego z wewnętrznym rynkiem energii jako podstawą funkcjonowania tego systemu (Komorowska i Mirowski 2016). Pomimo stopniowego podnoszenia efektywności energetycznej gospodarki oczekuje się zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną w nadchodzących dziesięcioleciach. Aby możliwe było zapewnienie długoterminowego bezpieczeństwa energetycznego, konieczne są więc inwestycje w sektor energetyczny. Jest to spowodowane opóźnieniami w budowie nowych mocy produkcyjnych i przestarzałą bazą produkcyjną (Gawlik i Mirowski 2016). Równoległe z rozwojem krajowego systemu energetycznego, niezbędny jest rozwój jednostek lokalnych, które mogą istotnie przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego – zarówno w skali pojedynczych budynków, jak również wsi, miast czy regionów. Przykładem są tutaj systemy mikrokogeneracyjne wykorzystujące do swojej pracy energię ze źródeł odnawialnych, w tym ciepło spalania biomasy. Jak wspomniano wcześniej, system taki może być oparty na zastosowaniu generatorów termoelektrycznych. W literaturze polskiej i światowej znaleźć można prace poświęcone analizie możliwości zastosowania generatorów termoelektrycznych współpracujących m.in. z piecami kuchennymi i grzewczymi. Przykład takiego rozwiązania zaprezentowany został w pracy (Lertsatitthanakorn 2007), gdzie dostępne na rynku moduły termoelektryczne typu  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  zostały zainstalowane na bocznej ścianie pieca kuchennego. Moc osiągnięta przez opracowany układ prądotwórczy była równa 2,4 W przy różnicy temperatury 150 K. Inne tego typu rozwiązanie zostało pokazane w pracy (Nuwayhid i in. 2005). W tym przypadku przedstawiony został układ złożony z pieca grzewczego opalanego drewnem i modułów

termoelektrycznych chłodzonych powietrzem (z wykorzystaniem zjawiska konwekcji naturalnej). Maksymalna moc uzyskiwana w pojedynczym module wyniosła 4,2 W. Kompletny układ z piecem wielofunkcyjnym, wyposażonym w moduły termoelektryczne o mocy maksymalnej 9,5 W, przedstawiony został w pracy (Champier i in. 2011). W tym przypadku uzyskiwana w praktyce użytkowej moc była równa 7,6 W. Odrębne rozwiązanie z chłodzeniem wodnym zastępującym chłodzenie powietrzne, pokazane zostało w pracy (Rinalde i in. 2010). Jako źródło ciepła zastosowano grzejnik elektryczny (symulujący parametry pracy dowolnego urządzenia grzewczego), a maksymalna moc uzyskana w modułach termoelektrycznych wyniosła 10 W (znaczący wpływ na wartość mocy miała ciągła praca pompy wodnej). Inny przykład działania modułu termoelektrycznego chłodzonego wodą został przedstawiony w pracy (Sornek i Filipowicz 2016a). Badany moduł zainstalowany został na kanale spalinowym kominka akumulacyjnego z wykorzystaniem dedykowanej konstrukcji wymiennika ciepła. Maksymalna moc uzyskana w trakcie badań była równa 6,1 W przy różnicy temperatury 150 K. Ten sam moduł termoelektryczny został poddany dalszym badaniom, w których porównano dodatkowo dwa inne sposoby chłodzenia: chłodzenie powietrzne z wykorzystaniem radiatora oraz radiatora z wentylatorem. W pierwszym przypadku uzyskana moc wyniosła 2,6 W, a w drugim – 4,2 W (Sornek 2016). Generator termoelektryczny, składający się z 96 modułów termoelektrycznych, został zaprezentowany w pracy (Liu i in. 2014). Jego moc wynosiła 500 W przy różnicy temperatury 200 K oraz 160 W przy różnicy temperatury 80 K. Z kolei w pracy (Montecucco i in. 2015) energia elektryczna generowana w modułach termoelektrycznych przytwierdzonych do pieca na paliwo stałe, wykorzystana została do równoczesnego ładowania akumulatora ołowio-wodno-kwasowego oraz ogrzewania wody. Opracowany system pozwalał na produkcję średnio  $600 W_{th}$  i  $27 W_{el}$  podczas eksperymentu trwającego dwie godziny.

Powyższe pozycje literaturowe pokazują przykładowe działania podejmowane w celu opracowania systemu mikrokogeneracyjnego, pozwalającego na wykorzystanie ciepła wytwarzanego w domowych urządzeniach grzewczych do produkcji energii elektrycznej. Moc dostępnych aktualnie generatorów termoelektrycznych jest stosunkowo niska, dlatego konieczny jest ich dalszy rozwój technologiczny, a ponadto dostosowanie konstrukcji urządzeń grzewczych do efektywnej współpracy z generatorami.

## 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze, przygotowane na potrzeby prac eksperymentalnych, wyposażone zostało w stalowy wkład kominkowy o mocy nominalnej  $12 kW_{th}$ , dwa typy generatorów termoelektrycznych montowanych na tylnej ścianie paleniska *TEG1* i *TEG2*, generator termoelektryczny przeznaczony do montażu na kanale spalinowym *TEG3*, a także system kontrolno-pomiarowy oparty na modułowym sterowniku PLC WAGO PFC200. Parametry badanych generatorów termoelektrycznych przedstawione zostały w tabeli 1.

Generatory *TEG1* i *TEG2* zajmują jedynie część dostępnej powierzchni tylnej ścianki badanego wkładu kominkowego (rys. 2). Z drugiej strony biorąc pod uwagę konstrukcję wkładu, około 30% powierzchni generatora *TEG2* (jego górna część) znajduje się w obszarze

TABELA 1. Parametry testowanych generatorów termoelektrycznych

TABLE 1. Main parameters of the studied thermoelectric generators

Parametr	TEG1	TEG2	TEG3
Moc maksymalna	45 W	100 W	350 W
Napięcie w punkcie mocy maksymalnej	12 V	24 V	48 V
Natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy	3,8 A	4,2 A	7,2 A
Temperatura strony gorącej	350°C	270°C	400°C
Typ chłodzenia	powietrzne	wodne	wodne
Wymiary	330 × 220 × 108 mm	600 × 146 × 57 mm	500 × 151 × 259 mm

deflektora – temperatura ścianki wkładu jest w tym miejscu wyraźnie niższa (200–250°C) od temperatury występującej w jej centralnej części (ok. 500°C). Wymienione wyżej wartości nie są stałe – zmieniają się w zależności od aktualnej fazy procesu spalania, a dodatkowo zależą m.in. od wielkości załadunku, rodzaju stosowanego paliwa i ilości dopływającego powietrza. Stosując automatyczną regulację strumienia powietrza dolotowego (realizowaną za pomocą przepustnicy powietrznej), istnieje możliwość utrzymania określonego poziomu temperatury w obszarze paleniska, a w konsekwencji – w przybliżeniu stałej, pożądanej temperatury ściany wkładu kominkowego.

Usytuowanie badanych generatorów termoelektrycznych zostało przedstawione na rysunku 2.

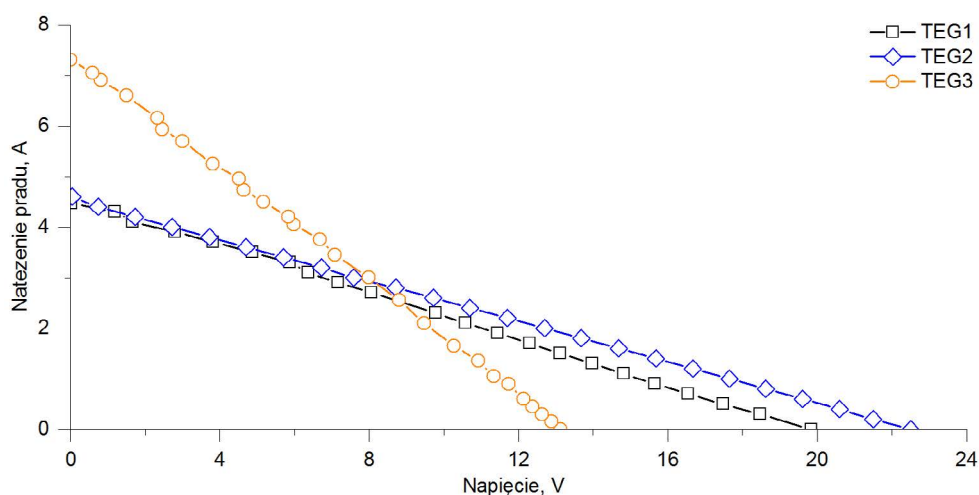


Rys. 2. Usytuowanie generatorów termoelektrycznych na powierzchni wkładu kominkowego (*TEG1*, *TEG2*) oraz na kanale spalinowym (*TEG3*)

Fig. 2. Location of the thermoelectric generators on rear wall of the stove (*TEG1*, *TEG2*) and on flue gas channel (*TEG3*)

### 3. Rezultaty badań

Analizując podstawowe parametry operacyjne badanych generatorów termoelektrycznych – napięcie, natężenie prądu i generowaną moc – można zauważyć, że silnie zmieniają się one wraz ze zmianami temperatury gorącej i zimnej strony urządzeń. Podczas testów temperatura zimnej strony była stała w czasie (wynosiła ok. 23°C zarówno w przypadku wody chłodzącej, jak i powietrza), natomiast temperatura gorącej strony wynikała z aktualnej fazy procesu spalania. Charakterystykę prądowo-napięciową (I-U) wykonano każdorazowo w czasie, gdy temperatura gorącej strony była zbliżona do nominalnej temperatury pracy danego generatora termoelektrycznego. Jak wynika z rysunku 3, charakterystyki I-U w przypadku generatorów *TEG1* i *TEG2* mają bardzo podobny przebieg (nieco wyższe napięcie zostało odnotowane dla *TEG2*). Charakterystyka prądowo-napięciowa wyznaczona dla generatora *TEG3* jest znacząco różna – otrzymane napięcie obwodu otwartego było ponad dwa razy niższe w porównaniu do poprzednich przypadków.



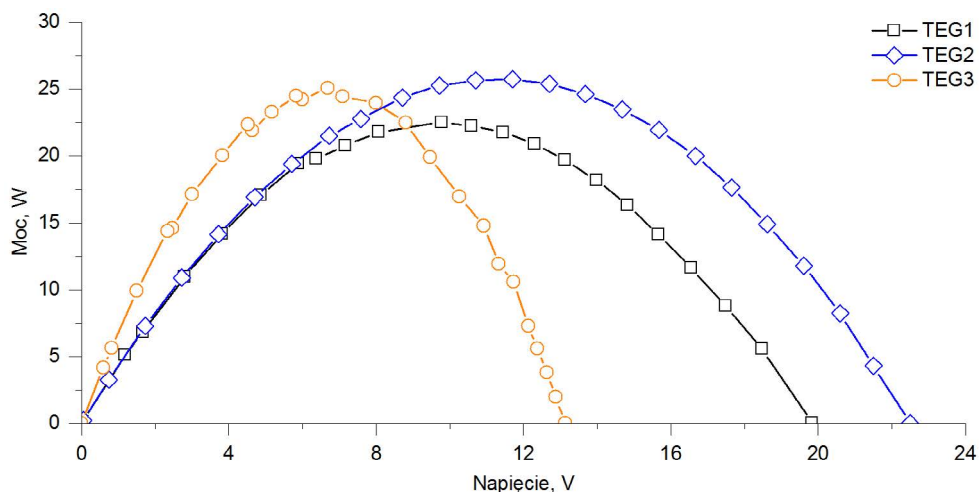
Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe (U-I) badanych generatorów termoelektrycznych

Fig. 3. Current-voltage characteristics of the studied thermoelectric generators

Rejestrowane wartości prądu i napięcia przekładają się bezpośrednio na moc wytwarzaną w generatorach termoelektrycznych. Charakterystyki P-U przedstawione zostały na rysunku 4.

Z rysunku 4 wynika, że moc wytwarzana w generatorach termoelektrycznych była zdecydowanie niższa od ich mocy nominalnej. W przypadku badanych generatorów uzyskano odpowiednio:

- 22,5 W w przypadku generatora *TEG1* (50,0% jego mocy nominalnej),
- 25,8 W w przypadku generatora *TEG2* (25,8% jego mocy nominalnej),
- 25,1 W w przypadku generatora *TEG3* (7,2% jego mocy nominalnej).



Rys. 4. Charakterystyki zmienności mocy w funkcji napięcia (P-U) badanych generatorów termoelektrycznych

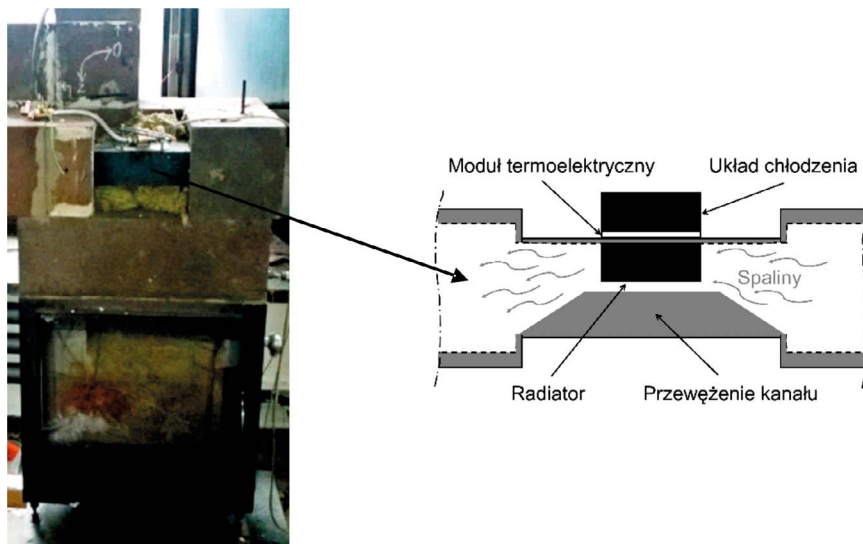
Fig. 4. Power-voltage characteristics of the studied thermoelectric generators

Tak niskie wartości mocy wytwarzanej przez badane generatory termoelektryczne wynikają z kilku przyczyn. W przypadku generatorów *TEG1* i *TEG2* podstawowym problemem jest niedopasowanie parametrów konstrukcyjnych generatorów i ścianki wkładu kominkowego, skutkujące nierównomiernym rozkładem temperatury na powierzchni gorącej strony generatorów (obserwowanym szczególnie w trakcie pomiarów drugiego z badanych urządzeń). Z kolei w przypadku generatora *TEG3* głównym problemem jest zbyt mały przekrój kanałów spalinowych wewnątrz urządzenia, powodujący zaburzenie procesu spalania wskutek ograniczenia ciągu kominowego (przygaszanie płomienia, zmniejszenie strumienia spalin). Powyższe ograniczenia powodują, że zastosowanie istniejących rozwiązań generatorów oraz wkładów kominkowych nie jest proste – konieczne jest przeprowadzenie procesu doboru zarówno urządzenia grzewczego, jak i generatora termoelektrycznego (dobór ten powinien być przeprowadzony już na etapie projektowania budynku lub przy wyborze źródła ciepła). W przypadku istniejących urządzeń skutecznym rozwiązaniem jest opracowanie konstrukcji generatora prądotwórczego dedykowanej do parametrów urządzenia. Przykładowa konstrukcja tego typu została opracowana pod kątem współpracy z kominem akumulacyjnym (rys. 5) – szczegółowy opis rozwiązania dostępny jest w pracy (Sornek i Filipowicz 2016a).

Generator termoelektryczny usytuowany został na wylocie spalin z obszaru deflektora. Wersja testowa wyposażona została w jeden moduł termoelektryczny o parametrach przedstawionych w tabeli 2.

Na rysunku 6 ukazane zostały charakterystyki prądowo-napięciowe (U-I) opracowanego generatora termoelektrycznego w zależności od temperatury zasilania (temperatura po stronie zimnej wynosiła ok. 20°C), natomiast na rysunku 7 – charakterystyki zmian generowanej





Rys. 5. Konstrukcja i usytuowanie prototypowego generatora termoelektrycznego dedykowanego do współpracy z kominkiem akumulacyjnym

Fig. 5. Construction and location of the prototypical thermoelectric generator dedicated for operation with a wood-fired accumulation stove

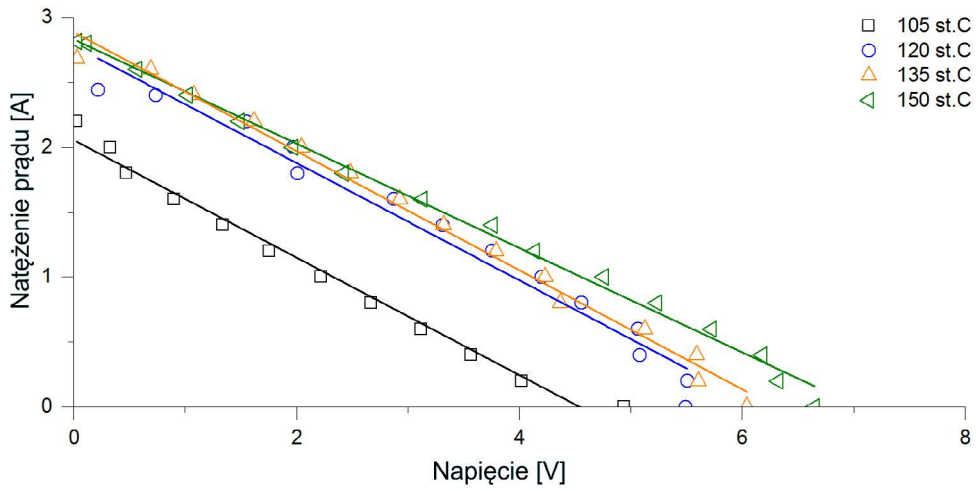
mocy w funkcji napięcia (P-U). W tym przypadku wartość uzyskanej mocy była na poziomie równym około 62% mocy maksymalnej modułu.

Uwzględniając czas trwania procesu spalania na poziomie około 3 godzin, badany kominek akumulacyjny zużywa na potrzeby zasilania sterownika i przepustnicy powietrznej około 25 Wh<sub>el</sub>. Biorąc dodatkowo pod uwagę działanie pompy cyrkulacyjnej, do tej wartości należy dodać kolejne 20 Wh<sub>el</sub> (przy czym należy mieć na uwadze, że obieg wody chłodzącej może być niezależnym układem lub stanowić część instalacji grzewczej). Uwzględ-

TABELA 2. Parametry modułu termoelektrycznego wykorzystanego do budowy generatora

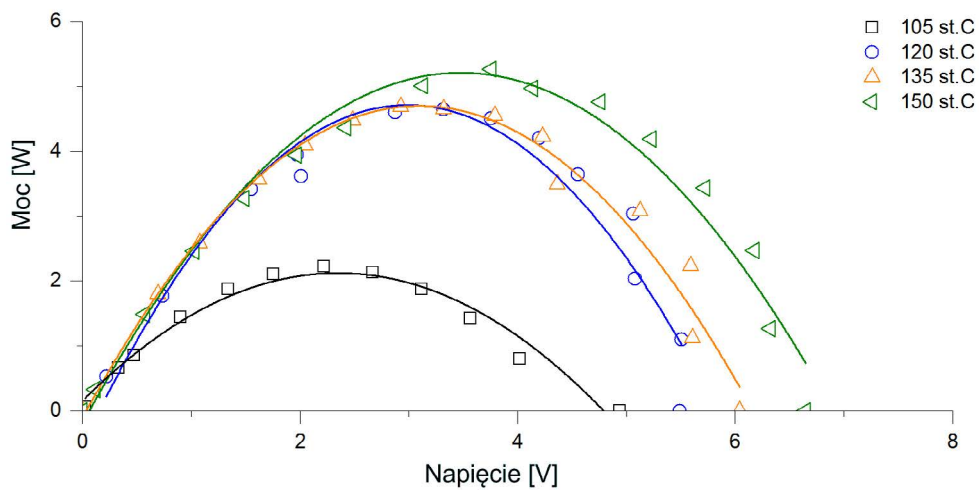
TABLE 2. The main parameters of the Peltier module used in the construction of the thermoelectric generator

Parametr	TEG
Moc maksymalna	11,75 W
Napięcie w punkcie mocy maksymalnej	5,26 V
Natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy	2,23 A
Temperatura strony gorącej	150°C
Materiał	Bi <sub>2</sub> Te <sub>2</sub>
Wymiary	40 × 40 × 3,2 mm



Rys. 6. Charakterystyki prądowo-napięciowe (U-I) opracowanego generatora termoelektrycznego

Fig. 6. Current-voltage characteristics of the developed thermoelectric generator



Rys. 7. Charakterystyki zmienności mocy w funkcji napięcia (P-U) opracowanego generatora termoelektrycznego

Fig. 7. Power-voltage characteristics of the developed thermoelectric generator

niając fakt, że generator termoelektryczny działa sprawnie przez około 2 godziny podczas procesu spalania oraz zakładając, że do niezależnej pracy badanego kominka wymagane jest dostarczenie 45–50 Wh<sub>el</sub>, wymagane jest zastosowanie generatora termoelektrycznego o mocy nie mniejszej niż 25 W. Generator taki może składać się z 6 modułów termoelektrycznych (o parametrach jak w tab. 2), połączonych w układzie szeregowo-równoległym (dla uzyskania odpowiednich wartości mocy, napięcia i natężenia prądu). Szacowany koszt generatora to około 4000–5000 PLN (obejmuje on cenę wymiennika ciepła, przepustnicy spalin z siłownikiem, modułów termoelektrycznych, układu chłodzenia, akumulatora oraz regulatora napięcia). Zakłada się, że kompletny układ prądotwórczy nie powinien zwiększyć ceny kominka akumulacyjnego o więcej niż 30%.

Biorąc pod uwagę jedynie względy ekonomiczne związane z rozwojem funkcjonalności kominka akumulacyjnego o wytwarzanie energii elektrycznej można stwierdzić, że jest to nieopłacalne bez zewnętrznego finansowania. Z drugiej strony rozwiązanie takie pozwala na uniezależnienie się od sieci elektroenergetycznej. Proponowany system pozwala w pełni kontrolować proces spalania – pod kątem zapewnienia temperatury wymaganej dla poprawnej pracy generatora termoelektrycznego oraz wysokiej czystości spalin – kwestie ekologiczne zostały szerzej poruszone w pracy (Sornek i in. 2017), a także pod kątem ogrzewania wody na potrzeby instalacji grzewczej (bez wykorzystania zewnętrznych źródeł). Dalszy rozwój proponowanego systemu pozwoli ponadto na zasilanie innych urządzeń wykorzystywanych w gospodarstwach domowych (np. systemów oświetlenia).

## Wnioski

Generatory termoelektryczne są obiecującym źródłem energii elektrycznej, które może współpracować z domowymi urządzeniami grzewczymi, takimi jak wkłady kominkowe, kominki czy kotły grzewcze. Celem prac badawczych prowadzonych w Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego jest przygotowanie rozwiązania zapewniającego niezależną od sieci pracę urządzenia grzewczego, a dalej – produkcję energii na potrzeby zasilania sprzętu domowego. Jest to szczególnie istotne w miejscach, w których nie ma dostępu do sieci elektroenergetycznej. Mimo że budowa systemu mikrokogeneracyjnego wydaje się stosunkowo prostym zadaniem, w rzeczywistości – jak pokazują przedstawione wyżej rezultaty badań – jest to dużo bardziej skomplikowane. Dostępne na rynku generatory termoelektryczne nie są zwykle zaprojektowane do współpracy z domowymi urządzeniami grzewczymi – występuje problem m.in. z zapewnieniem wystarczająco dużego strumienia ciepła przekazywanego do strony gorącej generatora, jak również z jego efektywnym chłodzeniem. W efekcie rzeczywista moc wytwarzania przez generatory jest wyraźnie niższa od ich mocy nominalnej – w przypadku testowanych urządzeń udało się uzyskać odpowiednio: 50% mocy nominalnej dla generatora *TEG1*, 25,8% – dla generatora *TEG2* oraz 7,2% – dla generatora *TEG3*. Dużo lepsze rezultaty zostały odnotowane w przypadku dedykowanej konstrukcji generatora termoelektrycznego – wytworzona moc stanowiła około 62% mocy nominalnej zastosowanego modułu. Potwierdza to zasadność stosowania generatorów termoelektrycznych pod warunkiem odpowiedniego przystosowania ich konstrukcji do źródła

ciepła. W przyszłości rozwiązania tego typu przy zapewnieniu ich dalszego rozwoju technologicznego, mogą zyskać większą popularność stając się istotnym elementem w zapewnieniu bezpieczeństwa dostaw energii do odbiorców końcowych.

Praca wykonana została w ramach działalności statutowej Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego Wydziału Energetyki i Paliw AGH w Krakowie, z wykorzystaniem infrastruktury badawczej Centrum Energetyki AGH.

### Literatura

- Champier i in. 2011 – Champier, D., Bédécarrats, J.P., Kousksou, T., Rivaletto, M., Strub, F. i Pignolet, P. 2011. Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. *Energy* 36(3), s. 1518–1526.
- Gawlik, L. i Mirowski, T. 2016. Strategic directions of development of the Polish power sector in the light of climate and energy policy of the European Union. *Humanities and Social Sciences* 23(2), s. 49–62.
- Gawłowski i in. 2010 – Gawłowski, S., Listowska-Gawłowska, R. i Piecuch, T. 2010. Uwarunkowania i prognoza bezpieczeństwa energetycznego Polski na lata 2010–2110. *Rocznik Ochrony Środowiska Środkowo-Pomorskiego Towarzystwa Naukowego* 12, s. 127–176.
- Kamiński i in. 2015 – Kamiński, J., Kaszyński, P., Malec, M. i Szurlej, A. 2015. Analiza zmian zużycia energii pierwotnej w Polsce w kontekście liberalizacji rynków paliw i energii. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 18(3), s. 25–36.
- Komorowska, A. i Mirowski, T. 2016. Instrumenty poprawy efektywności energetycznej w Polsce. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 92, s. 297–306.
- Lertsatitthanakorn, C. 2007. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresource Technology* 98(8), s. 1670–1674.
- Liu i in. 2014 – Liu, C., Chen, P. i Li, K. 2014. A 1 kW low-temperature thermoelectric generator for low temperature geothermal resources. Proceedings of 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, 24–26 lutego 2014.
- Montecucco i in. 2015 – Montecucco, A., Siviter, J. i Knox, A.R. 2015. A Combined Heat and Power System for Solid-fuel Stoves Using Thermoelectric Generators. *Energy Procedia* 75, s. 597–602.
- Nuwayhid i in. 2005 – Nuwayhid, R.Y., Shihadeh, A. i Ghaddar, N. 2005. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Conversion and Management* 46(9–10), s. 1631–1643.
- Rinalde i in. 2010 – Rinalde, G.F., Juanico, L.G., Tagliavore, E., Gortari, S. i Molina, M.G. 2010. Development of thermoelectric generators for electrification of isolated rural homes. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(11), s. 5818–5822.
- Sornek, K. 2016. A study of selected aspects of the operation of thermoelectric generator incorporated in a biomass-fired stove. *E3S Web of Conferences* 10, s. 1–6.
- Sornek i in. 2016 – Sornek, K. i Filipowicz, M. 2016. A study of the applicability of a straw-fired batch boiler as a heat source for a small-scale cogeneration unit. *Chemical and Process Engineering* 37(4), s. 503–515.
- Sornek i in. 2016a – Sornek, K., Filipowicz, M. i Rzepka, K. 2016a. The development of a thermoelectric power generator dedicated to stove-fireplaces with heat accumulation systems. *Energy Conversion and Management* 125, s. 185–193.
- Sornek i in. 2017 – Sornek, K., Filipowicz, M. i Rzepka, K. 2017. Study of clean combustion of wood in a stove-fireplace with accumulation. *Journal of the Energy Institute* 90(4), s. 613–623.
- Szurlej i in. 2013 – Szurlej, A., Mirowski, T. i Kamiński, J. 2013. Analiza zmian struktury wytwarzania energii elektrycznej w kontekście założeń polityki energetycznej. *Rynek Energii* 1, s. 3–10.