POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA

KATEDRA KLIMATYZACJI, OGRZEWNICTWA, GAZOWNICTWA I OCHRONY POWIETRZA

ROZPRAWA DOKTORSKA

WYKORZYSTANIE CIEPŁA DO LOKALNEGO WYTWARZANIA ENERGII POMOCNICZEJ DLA SYSTEMÓW CIEPLNYCH

mgr inż. Marek Sidorczyk

Promotor: dr hab. inż. Jan Syposz, prof. nadzw. PWr

Słowa kluczowe: generatory termoelektryczne, TEG, systemy cieplne, energia pomocnicza, ciepło odpadowe, analiza statystyczna

Wrocław 2016

SPIS TREŚCI

Streszczenie 4

Wykaz oznaczeń, indeksów i skrótów 5

1. Wstęp 7

1.1. Energia pomocnicza 9

2. Teoria zjawisk termoelektrycznych 11

2.1. Zjawiska termoelektryczne 11

2.1.1. Efekt Joule'a 11

2.1.2. Efekt Peltiera 11

2.1.3. Efekt Thomsona 12

2.1.4. Efekt Seebecka 13

2.1.5. Fizyczne podstawy efektu Seebecka 14

2.2. Generatory termoelektryczne 16

3. Cel i zakres pracy 20

4. Wymagania energetyczne współczesnych systemów cieplnych 21

5. Przegląd literaturowy 26

5.1. Artykuły naukowe dotyczące generatorów termoelektrycznych 26

5.2. Aktualne kierunki badań dotyczące generatorów termoelektrycznych 28

5.3. Badania dotyczące zastosowania generatorów termoelektrycznych do wytwarzania pomocniczej energii elektrycznej na potrzeby systemów cieplnych 30

6. Warunki pracy generatora termoelektrycznego 52

7. Projekt wymiennika ciepła modułu TEG 54

8. Stanowisko badawcze 58

9. Plan eksperymentu 69

9.1. Badanie wpływu stosowania materiału termoprzewodzącego oraz wybór jego rodzaju 69

9.2. Wybór i badanie wpływu rodzaju wymiennika ciepła na parametry generowanego prądu elektrycznego 69

9.3. Sporządzenie charakterystyk elektrycznych oraz cieplno-elektrycznych różnych generatorów (dla różnych parametrów temperaturowych) 70

9.4. Szczegółowe badanie wybranego generatora termoelektrycznego 70

10. Wyniki badań 71

10.1. Wpływ materiałów termoprzewodzących 71

10.2. Badanie porównawcze parametrów generowanego prądu elektrycznego w przypadku zastosowania wymienników wysokich lub niskich w obiegach grzewczym i chłodzącym 73

10.3. Charakterystyki elektryczne oraz cieplno-elektryczne wybranych generatorów termoelektrycznych 74

10.3.1. Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych 75

10.4. Wyniki szczegółowych badań termogeneratora TEC1-12730 87

10.4.1. Wpływ różnicy temperatur oraz jej położenia na skali temperatur na parametry prądu elektrycznego generowanego przez ogniwo TEC1-12730 87

10.4.2. Wpływ strumienia przepływu czynnika w obiegach grzewczym i chłodzącym na parametry prądu elektrycznego generowanego przez ogniwo TEC1-12730 105

10.4.3. Określenie bezwładności rozruchowej modułu termoelektrycznego z ogniwem TEC1-12730 przy generowaniu prądu elektrycznego 122

10.4.4. Efektywności pracy generatora termoelektrycznego TEC1-12730 126

10.4.5. Wyznaczenie zależności matematycznej pozwalającej na określenie mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo TEC1-12730 pracującego jako termogenerator przy danych parametrach pracy systemu cieplnego. 127

11. Niepewność pomiarów 133

11.1. Niepewność standardowa i rozszerzona pomiarów 133

11.2. Niepewność pomiarów wykonanych na stanowisku pomiarowym 134

12. Zastosowanie modułu termoelektrycznego do wytwarzania elektrycznej energii pomocniczej w rzeczywistych warunkach pracy systemu cieplnego 136

13. Projekt techniczny uniwersalnego, skalowalnego modułu termoelektrycznego 139

14. Wnioski 142

15. Podsumowanie pracy 143

BIBLIOGRAFIA 145

SPIS RYSUNKÓW 155

SPIS FOTOGRAFII 164

SPIS TABEL 165

Streszczenie

Konsumpcja energii pierwotnej na świecie stale rośnie. Z tego powodu coraz większą uwagę przykłada się do zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych w globalnej konsumpcji oraz poprawy efektywności energetycznej klasycznych systemów cieplnych.

Każdy system cieplny do prawidłowego działania, poza odpowiednią ilością energii pierwotnej dostarczanej w postaci paliwa, potrzebuje także określoną ilość energii pomocniczej. Energia ta, najczęściej w postaci energii elektrycznej służy do zasilania urządzeń takich jak sterowniki, pompy obiegowe, wentylatory itp.

Jedną z możliwości realizacji postulatu zwiększenia efektywności energetycznej systemów cieplnych jest wykorzystanie generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej dla takich systemów.

Celem pracy była weryfikacja, czy możliwe jest stworzenie termoelektrycznego systemu zasilania, który korzystając z ciepła systemów cieplnych, wytworzy lokalnie energię pomocniczą o parametrach zapewniających utrzymanie systemów cieplnych w ruchu. W oparciu o przeprowadzoną analizę określono rzeczywiste zapotrzebowanie na energię pomocniczą urządzeń pomocniczych wchodzących w skład systemów cieplnych.

Na podstawie szczegółowej analizy literaturowej, w oparciu o aktualne kierunki badań wytypowano parametry charakterystyczne systemów cieplnych, które bezpośrednio wpływają na pracę generatorów termoelektrycznych. Uwzględniając przyjęte parametry dokonano badań porównawczych różnych generatorów termoelektrycznych dostępnych na rynku oraz dokonano wyboru najbardziej efektywnego z nich.

Wybrany generator termoelektryczny poddano szczegółowym badaniom w symulowanych warunkach pracy wodnego systemu cieplnego. Na tej podstawie określono wpływ parametrów, takich jak temperatury oraz strumienie przepływu czynnika pośredniczącego, w wymianie ciepła na charakterystykę podaży prądu elektrycznego przez generator. Przeprowadzone badania były podstawą do wyznaczenia zależności matematycznej umożliwiającej wymiarowanie termoelektrycznych systemów zasilających w oparciu o parametry charakterystyczne systemów cieplnych.

W końcowej części pracy wykonano analizę wykorzystania generatora termoelektrycznego do zasilania urządzenia pomocniczego w warunkach rzeczywistych oraz sporządzono projekt techniczny uniwersalnego, skalowalnego termoelektrycznego modułu zasilającego.

Wykaz oznaczeń, indeksów i skrótów

Oznaczenia:

E* - natężenie pola elektrycznego, *V/m*

I - natężenie prądu elektrycznego, *A*

P - moc prądu elektrycznego, *W*

Q - moc cieplna, *W*

R - oporność elektryczna, *Ω*

R_w - rezystancja wewnętrzna, *Ω*

T - temperatura w skali Kelwina, *K*

t - temperatura w skali Celsjusza, *°C*

U - napięcie prądu elektrycznego, *V*

U_0 - napięcie kontaktowe, *V*

V - strumień objętościowy czynnika, m^3/h

Z - współczynnik dobroci termoelektrycznej, *1/K*

ZT - bezwymiarowy współczynnik dobroci termoelektrycznej, -

α - współczynnik Seebecka, *V/K*

Δt - różnica temperatur, °C

ε - siła elektromotoryczna, *V*

λ - współczynnik przewodzenia ciepła, *W/mK*

Π - współczynnik Peltiera, *V*

ρ - rezystywność, *Ωm*

τ - współczynnik Thompsona, *V/K*

Indeksy:

A - dotyczy parametrów w punkcie A

B - dotyczy parametrów w punkcie B

AB - dotyczy parametrów w kierunku od punktu A do punktu B

BA - dotyczy parametrów w kierunku od punktu B do punktu A

c - dotyczy obiegu chłodzącego

h - dotyczy obiegu grzewczego

1 - dotyczy parametrów w punkcie 1

2 - dotyczy parametrów w punkcie 2

Skróty:

IŚ - Inżynieria Środowiska

ORC - organiczny cykl Rankine'a

STEG - solarny generator termoelektryczny

TEC - chłodziarka termoelektryczna

TEG - generator termoelektryczny

p.w.c. - w odniesieniu do temperatury: przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego

p.w.z. - w odniesieniu do temperatury: przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego

w.c. - w odniesieniu do temperatury: przy powierzchni wtórnej wymiennika ciepła obiegu grzewczego

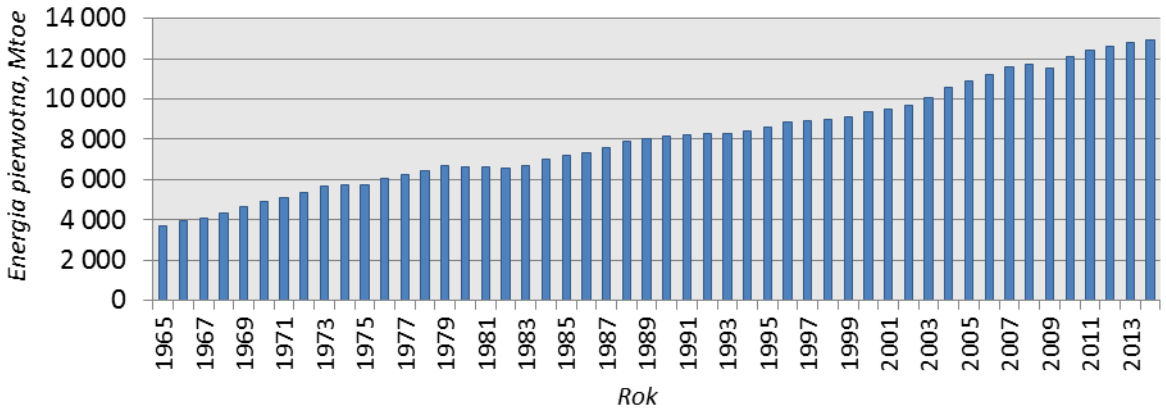
w.z. - w odniesieniu do temperatury: przy powierzchni wtórnej wymiennika ciepła obiegu chłodzącego

z.w.c. - w odniesieniu do temperatury: za wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego

z.w.z. - w odniesieniu do temperatury: za wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego

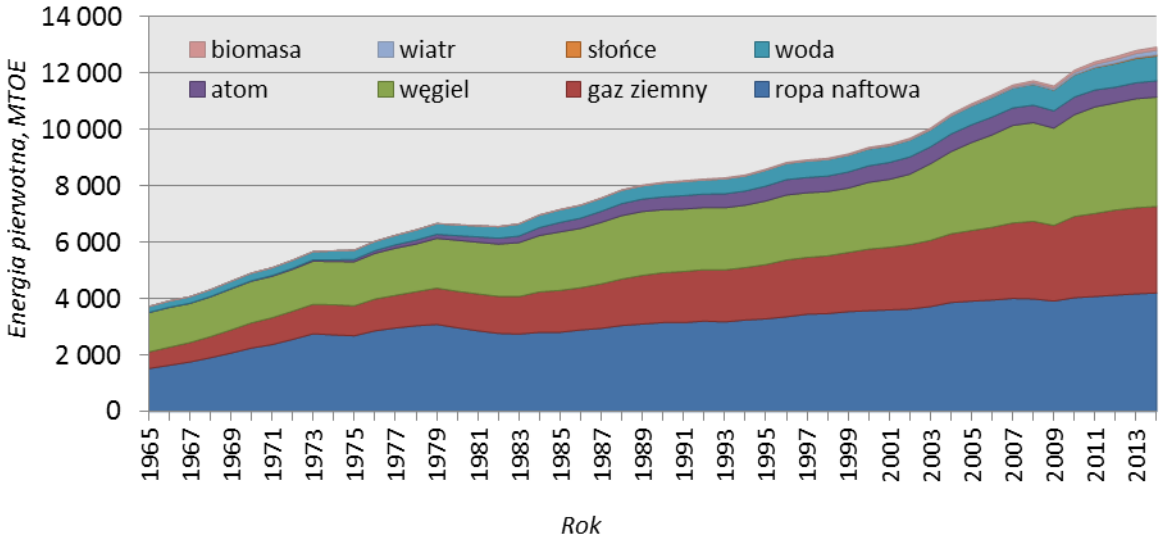
1. Wstęp

Zużycie energii pierwotnej na świecie rośnie z każdym rokiem, przez ostatnie 50 lat wzrosło ponad trzykrotnie (Rys. 1.1) (1).



Rys. 1.1. Zużycie energii pierwotnej na świecie w latach 1965-2014, w Mtoe[1] (1)

Wzmożona konsumpcja energii przyczynia się do wykorzystywania surowców naturalnych, co z każdym rokiem zbliża ludzkość do kresu ich dostępności. Według źródeł literaturowych (3) paliw kopalnych w postaci węgla, gazu ziemnego oraz ropy naftowej wystarczy odpowiednio jeszcze na około 107, 37 i 35 lat. Dane te obarczone są niepewnością, ale z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że zasoby części paliw kopalnych zostaną wyczerpane w XXI wieku. Jest to o tyle istotne, że opisane surowce są podstawowymi nośnikami energii pierwotnej (Rys. 1.2). Wraz ze zmniejszaniem się zasobów paliw kopalnych zmniejsza się ich dostępność i rosną koszty wydobycia. Przekłada się to na rosnące ceny energii ze źródeł konwencjonalnych.



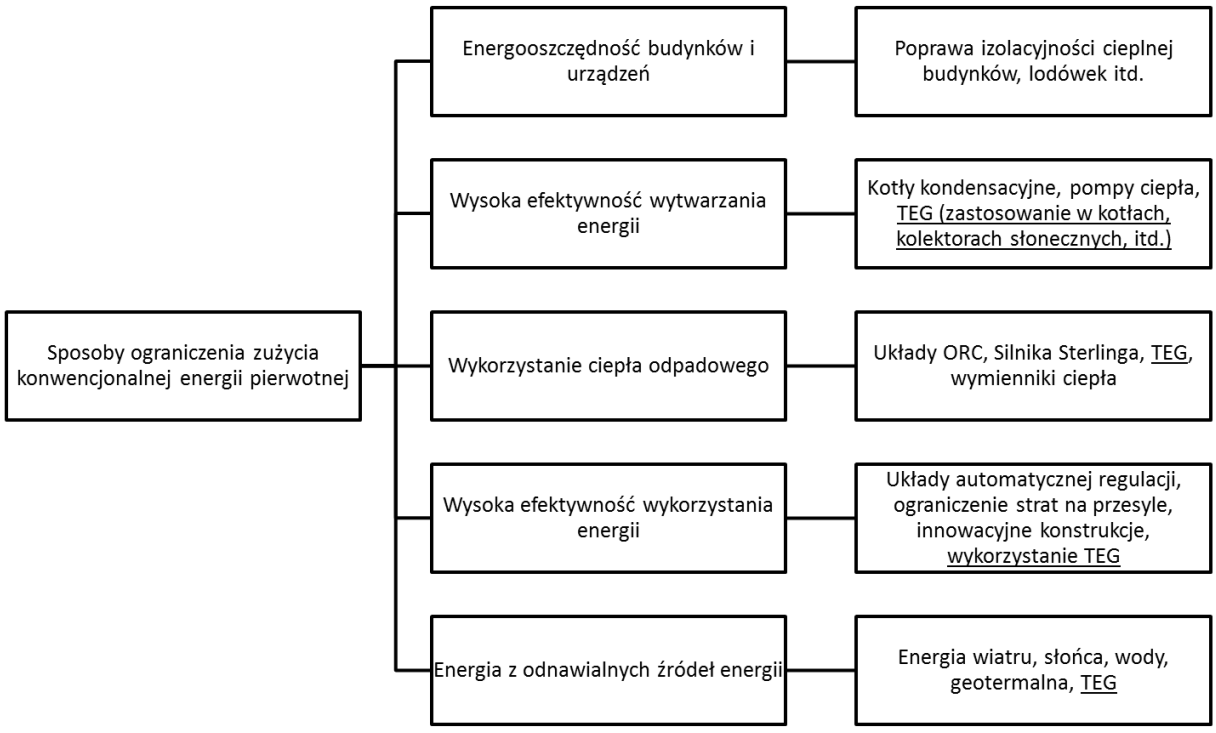
Rys. 1.2. Zużycie energii pierwotnej w rozbiciu na nośniki energii, Mtoe (1)

[1] Mtoe – ang. milion tonnes oil equivalnet – jednostka energii odpowiadająca 41,688 PJ (2)

Jednym ze sposobów rozwiązania przedstawionego problemu byłoby zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Jednak zgodnie z danymi zawartymi na Rys. 1.2. udział nośników energii innych niż paliwa kopalne w globalnej konsumpcji energii pierwotnej w 2014 roku był niższy niż 15 %. Rokrocznie udział energii odnawialnej rośnie, jednak wzrost ten jest zbyt powolny by w najbliższej przyszłości nastąpiło zastąpienie energii pozyskiwanej z paliw kopalnych przez energię odnawialną pozyskiwaną obecnymi technologiami. Istotnym zagadnieniem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń do atmosfery, towarzyszące spalaniu paliw kopalnych. Ograniczając ich zużycie i zastępując je ekologicznymi źródłami energii można także zrealizować ten cel.

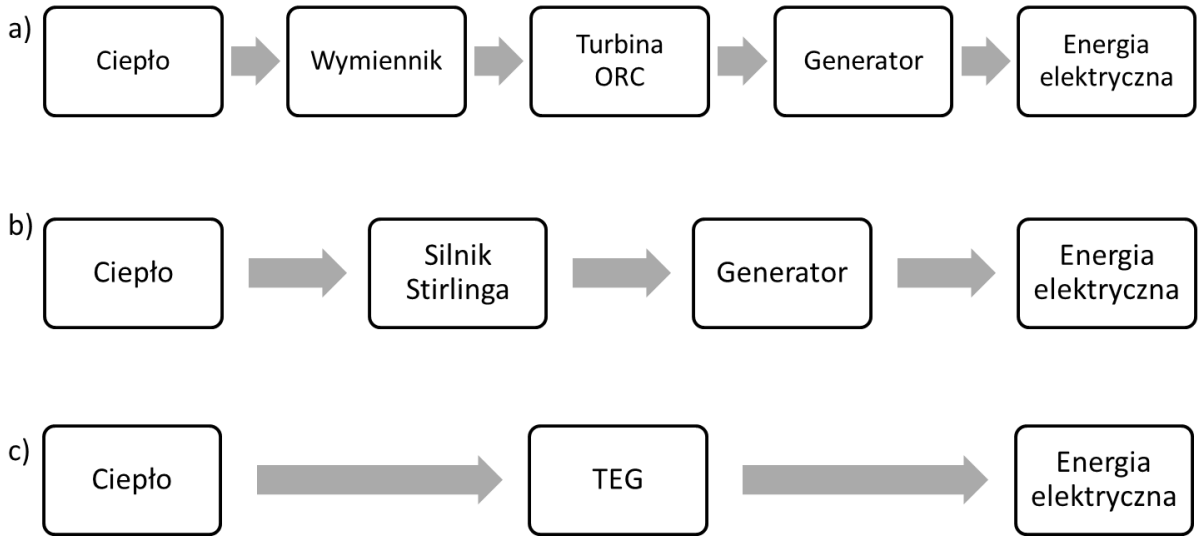
Obecnie światowe działania ograniczające wykorzystanie paliw kopalnych prowadzone są dwutorowo. Z jednej strony wspiera się stały i dynamiczny wzrost udziału energii odnawialnej w globalnym zużyciu energii, a z drugiej zwiększa się efektywność wykorzystywania paliw kopalnych. Średnia sprawność wytwarzania energii z paliw kopalnych to około 40 % (4). Pozostałe 60 % to straty i energia odpadowa. Ich wykorzystanie wydatnie zmniejsza zużycie energii pierwotnej pochodzącej ze źródeł nieodnawialnych.

Na Rys. 1.3 przedstawiono potencjalne sposoby ograniczenia zużycia konwencjonalnej energii pierwotnej, co w konsekwencji prowadzi do wypełnienia założeń pakietu energetyczno-klimatycznego (szeroko omawiane 3 x 20 do 2020 roku).



Rys. 1.3 Sposoby ograniczenia zużycia konwencjonalnej energii pierwotnej

Jedną z dróg realizacji zarówno postulatu zwiększenia udziału energii odnawialnej w globalnym zużyciu energii jak i zwiększenia efektywności wykorzystania energii ze źródeł konwencjonalnych jest wykorzystanie ciepła (odpadowego) do lokalnego generowania energii elektrycznej. Wśród metod, które pozwalają na konwersję niskoparametrowego ciepła odpadowego należy wymienić pompy ciepła (5-8), silniki Stirlinga (9), urządzenia wykorzystujące organiczny obieg Rankine'a (10, 11) oraz generatory termoelektryczne. Zasada działania każdego z wymienionych urządzeń jest inna. Inne jest też faktyczne i potencjalne pole ich zastosowań. Spośród wymienionych generatory termoelektryczne posiadają cechy, które predysponują je do zastosowania na szerszą skalę szczególnie w obrębie systemów cieplnych. Generatory termoelektryczne (TEG - ang. thermoelectric generator) są to urządzenia, które w oparciu o zjawisko Seebecka wytwarzają prąd elektryczny. Siłą napędową tego procesu jest różnica temperatur między okładką ciepłą i zimną generatora. Konwersja ciepła w energię elektryczną odbywa się bezpośrednio, bez przekształcania w energię mechaniczną jak w tradycyjnych generatorach (Rys. 1.4). Dzięki budowie typu solid-state (brak ruchomych części) generatory termoelektryczne są niezwykle niezawodne oraz długowieczne. W przypadku układów opartych na turbinie ORC oraz silniku Stirlinga prąd generowany jest w oparciu o urządzenia mechaniczne, przez co układy takie są o wiele mniej niezawodne.



Rys. 1.4 Schemat produkcji energii elektrycznej z ciepła dla układów:
a) z turbiną ORC, b) z silnikiem Stirlinga, c) z generatorem termoelektrycznym

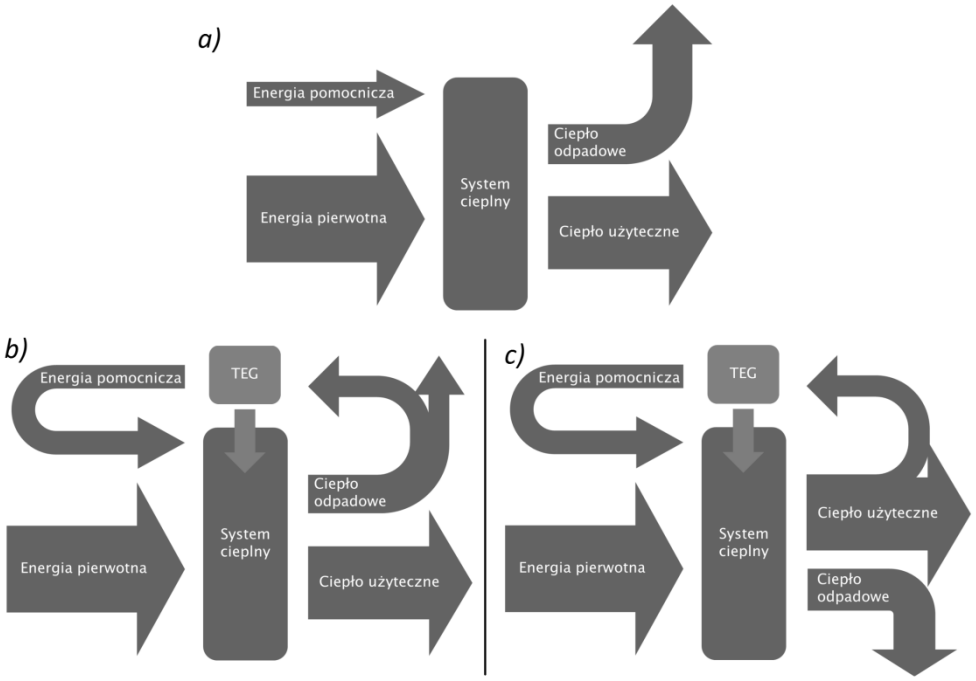
1.1. Energia pomocnicza

Praktycznie wszystkie, obecnie stosowane, systemy cieplne potrzebują, poza paliwem będącym podstawowym nośnikiem energii, także energii pomocniczej, która zapewnia ich prawidłowe funkcjonowanie. Najczęstszą formą energii pomocniczej w technice instalacyjnej Inżynierii Środowiska (IŚ) jest energia elektryczna. Energia ta jest wykorzystywana do zasilania układów

sterowania, do napędu pomp obiegowych, siłowników zaworów regulacyjnych, palników, wentylatorów itd. Współcześnie stosunek zapotrzebowania na moc elektryczną do mocy cieplnej typowego systemu cieplnego jest niewielki i zazwyczaj nie przekracza wartości 1:100. Jest to jeden z głównych czynników sprzyjających zastosowaniu generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej.

W ostatnich latach wyraźnie spada zapotrzebowanie na pomocniczą energię elektryczną w systemach cieplnych. Wiąże się to ze zwiększaniem efektywności energetycznej urządzeń, która jest wymagana przez odpowiednie przepisy. Aby umożliwić osiągnięcie poszczególnych celów pakietu klimatycznego Unia Europejska począwszy od roku 2009 sukcesywnie wprowadzała odpowiednie przepisy w obrębie efektywności systemów cieplnych (12-16). Określono w nich między innymi minimalne współczynniki efektywności energetycznej urządzeń pomocniczych, będących integralną częścią systemów cieplnych takich jak pompy obiegowe, wentylatory itd. (17-19). W przypadku pomp obiegowych ustawodawca ustalił minimalną wartość współczynnika efektywności energetycznej na 0,23 (od 1 sierpnia 2015 roku). Obecnie produkowane pompy obiegowe charakteryzują się współczynnikiem efektywności energetycznej na poziomie 0,15 - 0,16 (20). Tak duża energooszczędność elementów systemów cieplnych jest kolejnym czynnikiem sprzyjającym zastosowaniu generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej.

Ideę zastosowania generatorów termoelektrycznych w systemie cieplnym przedstawiono na Rys. 1.5.



Rys. 1.5 Idea wykorzystania generatorów termoelektrycznych w systemie cieplnym: a) schemat przepływu energii w konwencjonalnym systemie cieplnym, b) wykorzystanie ciepła odpadowego do zasilania TEG, c) wykorzystanie ciepła użytecznego do zasilania TEG

2. Teoria zjawisk termoelektrycznych

2.1. Zjawiska termoelektryczne

Termin zjawiska termoelektryczne dotyczy związku, który zachodzi między procesami cieplnymi i elektrycznymi w metalach i półprzewodnikach. W uproszczeniu obejmuje on proces bezpośredniego wytwarzania energii elektrycznej z ciepła oraz odwrotny proces bezpośredniego wytwarzania ciepła z energii elektrycznej. Zjawiska te dzieli się na dwie podstawowe grupy: nieodwracalne i odwracalne. Zjawiska odwracalne umożliwiają w jednym elemencie przetwarzanie ciepła w energię elektryczną lub energii elektrycznej w ciepło. Są one powszechnie znane i opisane jako efekty nazwane od nazwisk odkrywców.

Do grupy efektów nieodwracalnych należy efekt Joule'a (21), a do grupy efektów odwracalnych zalicza się efekt Peltiera, efekt Thomsona oraz efekt Seebecka (22-24). W oparciu o te zjawiska działają urządzenia wykorzystywane w miernictwie (termopary), chłodnictwie (ogniwa Peltiera) oraz generatory termoelektryczne prądu elektrycznego (TEG).

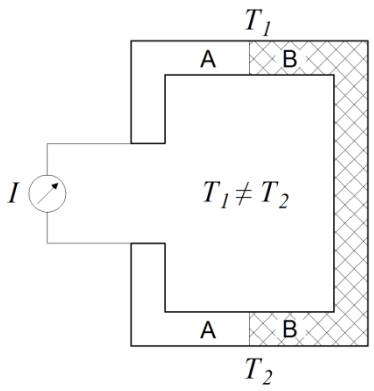
2.1.1. Efekt Joule'a

Efekt Joule'a (21) jest zjawiskiem nieodwracalnym związanym z wydzielaniem ciepła w materiale o rezystancji R przez który płynie prąd o natężeniu I. Przemiana przebiega tylko w jednym kierunku (ciepło z prądu) i opisana jest zależnością:

$$P = I^2 \cdot R \tag{2.1}$$

2.1.2. Efekt Peltiera

W roku 1835 J.C. A. Peltier (23) zaobserwował zjawisko, które polegało na zmianach temperatury w pobliżu złączy dwóch różnych przewodników, kiedy przepływał przez nie prąd. Schemat ideowy złącza zaprezentowano na Rys. 2.1.



Rys. 2.1. Ilustracja zjawiska Peltiera

Ustalono, że ilość ciepła, która jest wytwarzana lub pochłaniana na złączu jest proporcjonalna do prądu o natężeniu *I* przepływającego przez złącze oraz do współczynnika proporcjonalności *Π* noszącego nazwę *współczynnika Peltiera*. W przypadku złącza z Rys. 2.1, zależność przyjmuje następującą postać:

$$Q = \Pi_{AB} \cdot I \tag{2.2}$$

gdzie: $\Pi_{AB} = \Pi_A + \Pi_B$.

Z (2.2) wynika, że ciepło Peltiera jest proporcjonalne do pierwszej potęgi natężenia prądu elektrycznego w odróżnieniu od ciepła Joule'a, które jest proporcjonalne do potęgi drugiej. Należy zauważyć, że w sytuacji zmiany kierunku przepływu prądu ciepło *Q* zmienia znak, to znaczy, że zamiast wydzielania (pochłaniania) obserwuje się pochłanianie (wydzielanie) dokładnie takiej samej ilości ciepła na złączu (24). Wynika z tego, że $\Pi_{AB} = -\Pi_{BA}$.

Jeśli złącze składa się z dwóch substancji mających ten sam rodzaj nośników prądu, to nośniki te będące elektronami lub dziurami, po obu stronach złącza mają różne średnie energie całkowite (suma energii kinetycznej i potencjalnej). W sytuacji, w której nośnik trafia do obszaru o mniejszej energii, po przejściu przez złącze oddaje on nadmiar energii sieci krystalicznej – wskutek tego złącze ulega rozgrzaniu. W tym samym czasie na przeciwnym złączu nośnik przechodzi do obszaru o większej energii. Aby zdobyć brakującą energię, nośniki pobierają ją z sieci krystalicznej, tym samym wychładzając złącze.

2.1.3. Efekt Thomsona

W 1856 roku W. Thompson opisał kolejny efekt termoelektryczny nazwany od jego nazwiska efektem Thompsona. W przypadku jednorodnego przewodnika przez który przepływa prąd o natężeniu *I* oraz wzdłuż którego występuje gradient temperatur ΔT następuje wydzielanie lub pochłanianie ciepła. Zależność opisująca zjawisko Thompsona wygląda następująco:

$$Q = \tau \cdot I \cdot \Delta T \tag{2.3}$$

gdzie τ – współczynnik Thompsona.

Charakter zjawiska Thompsona jest bardzo podobny do zjawiska Peltiera. Przyjmując, że prąd płynie w kierunku wyższej temperatury i nośnikami prądu są elektrony, to w wyniku swojego ruchu będą one przemieszczać się z miejsc o temperaturze wyższej (wyższa średnia energia elektronów) do miejsc o temperaturze niższej (analogicznie mniejsza średnia energia). Nadmiar energii zostanie przekazany do sieci krystalicznej, czego konsekwencją będzie wydzielanie się ciepła. W przypadku rozpatrywania dziur jako nośników prądu elektrycznego, zjawisko to będzie miało znak przeciwny (24).

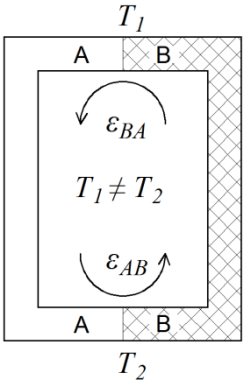
Do Thompsona należy również opisanie związków pomiędzy różnymi efektami termoelektrycznymi, a ściślej pomiędzy współczynnikami Peltiera *(Π)*, Thompsona *(τ)* oraz Seebecka *(α).* Współczynniki te określają wielkość konkretnego efektu dla danego materiału i temperatury *T* (25):

$$\Pi = \alpha \cdot T \tag{2.4}$$

$$\tau = T \cdot \frac{d\alpha}{dT} \tag{2.5}$$

2.1.4. Efekt Seebecka

W 1821 roku T. J. Seebeck opisał pierwsze ze zjawisk termoelektrycznych, nazwane od jego imienia. Jeśli obwód złożony z dwóch różnych przewodników A oraz B znajdzie się w środowisku, w którym na złącza materiałów będą oddziaływać różne temperatury, to w takim obwodzie będzie płynął prąd elektryczny (26). Kierunek przepływu prądu związany jest ze znakiem różnicy temperatur między złączami (24). Schemat obwodu przedstawiono na Rys. 2.2.



Rys. 2.2. Obwód termoelektryczny

Na złączach przewodników indukowane są dwie siły elektromotoryczne *(ε_{BA}* oraz *ε_{AB})*. Wartość tych sił jest zależna od temperatury poszczególnych złączy:

$$\varepsilon_{BA}(T_1) \approx U_0 + \alpha_{AB} \cdot T_1 \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_{AB}(T_2) \approx -U_0 - \alpha_{AB} \cdot T_2 \tag{2.7}$$

gdzie: U_0 jest napięciem kontaktowym (*V*), T_1 oraz T_2 to temperatury złączy przewodników A i B (*K*), α_{AB} jest współczynnikiem Seebecka danego obwodu (*V/K*). Jeżeli obwód złożony jest z dwóch różnych materiałów A oraz B to zależność na wyznaczenie współczynnika Seebecka α_{AB} przyjmuje następującą postać (21):

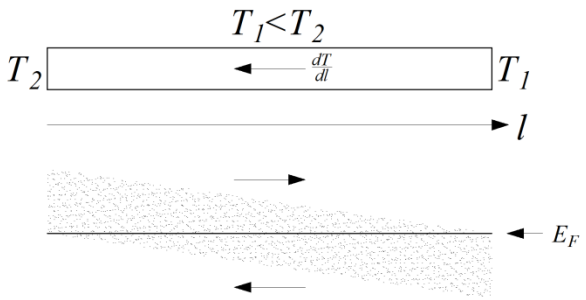
$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \tag{2.8}$$

gdzie: α_A oraz α_B są to współczynniki Seebecka materiału A oraz B.

2.1.5. Fizyczne podstawy efektu Seebecka

Pierwotnie indukowanie siły termoelektrycznej wiązano z zależnością tak zwanego poziomu Fermiego od temperatury, dyfuzją elektronów (lub dziur) oraz unoszeniem elektronów przez fonony (24). Obecnie (23, 26) uważa się, że zależność poziomu Fermiego od temperatury, a tym samym powstanie napięcia kontaktowego nie może być utożsamiane z powstaniem siły termoelektrycznej. Indukowanie siły termoelektrycznej związane jest wyłącznie z dyfuzją elektronów oraz dryfem fononów. Zjawiska te leżą u podstaw działania generatora termoelektrycznego.

Aby wyjaśnić rolę dyfuzji elektronów dla powstawania siły termoelektrycznej należy rozpatrzyć jednorodny przewodnik, którego końce znajdują się w różnych temperaturach, Rys. 2.3.



Rys. 2.3. Dyfuzja elektronów w jednorodnym przewodniku, którego końce znajdują się w różnych temperaturach

W pobliżu końca przewodnika o wyższej temperaturze T_2 zagęszczenie elektronów o energii większej od energii poziomu Fermiego jest znacznie większa niż w pobliżu końca chłodniejszego o temperaturze T_1. Analogicznie koncentracja elektronów o energii mniejszej od energii poziomu Fermiego jest mniejsza w pobliżu końca o wyższej temperaturze T_2. Na długości przewodnika występuje gradient zagęszczenia elektronów o określonej energii – w efekcie szybsze elektrony zaczynają przemieszczać się w kierunku chłodniejszego końca przewodnika, a wolniejsze w kierunku cieplejszego. Tempo przepływu dyfuzyjnego jest większe dla elektronów szybkich, z tego względu w okolicach zimniejszego końca tworzy się nadmiar elektronów, w przeciwieństwie do końca gorącego gdzie jest ich niedobór. Zjawisko to leży u podstaw powstania dyfuzyjnej składowej siły elektromotorycznej w przewodniku.

Druga przyczyna indukowania siły termoelektrycznej tkwi w unoszeniu elektronów przez fonony. Jeśli przewodnik znajduje się w środowisku, w którym występuje gradient temperatur to staje się to przyczyną dryfu fononów. Kolizje fononów z elektronami wprawiają elektrony w ruch, którego kierunek jest zgodny z kierunkiem spadku temperatury w przewodniku. Wynikiem tego zjawiska jest wzrost koncentracji elektronów w pobliżu chłodniejszego końca przewodnika, a tym samym pojawienie się składnika siły termoelektrycznej związanej właśnie z dryfem fononów.

Konsekwencją dwóch ostatnich zjawisk jest wzmożona koncentracja elektronów w okolicy zimnego końca przewodnika oraz ich niedobór w pobliżu końca gorącego. Z uwagi na to pojawia się pole elektryczne, którego kierunek jest przeciwny do gradientu temperatury. Dla określonej (różnej dla danego przekroju przewodnika) wartości natężenia pola elektrycznego, suma dyfuzyjnego i fononowego strumienia elektronów jest równa zeru, czego następstwem jest wystąpienie stanu stacjonarnego. W stanie stacjonarnym natężenie pola elektrycznego opisane jest zależnością:

$$E^* = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{d\varphi}{dT} \cdot \frac{dT}{dl} = -\alpha \cdot \frac{dT}{dl} \tag{2.9}$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{d\varphi}{dT} \tag{2.10}$$

W wyrażeniu (2.9) widać powiązanie natężenia pola *E** z gradientem temperatury *dT/dl.* Indukowane pole elektryczne i gradient temperatury mają przeciwne kierunki, co wyraża się w przeciwnych znakach. Z uwagi na to przy przewodnictwie elektronowym wartość współczynnika *α* jest dodatnia, a w przypadku przewodnictwa dziurowego współczynnik przyjmuje wartość ujemną.

Opisane pole jest polem sił zewnętrznych, w związku z tym całkując natężenie tego pola po drodze *A* od złącza o temperaturze T_1 do złącza o temperaturze T_2 otrzymuje się wyrażenie na siłę termoelektryczną, która działa na odcinku *A* przewodnika, a kierunek której wskazują strzałki na Rys. 2.2. Siła ta może być obliczona na podstawie wyrażenia:

$$\varepsilon_{1A2} = -\int_1^2 \alpha_A \cdot \frac{dT}{dl} \cdot dl = \int_{T_2}^{T_1} \alpha_A \cdot dT \tag{2.11}$$

Podobnie siła elektromotoryczna indukowana na drodze odcinka *B* od złącza o temperaturze T_2 do złącza o temperaturze T_1 jest równa:

$$\varepsilon_{2B1} = -\int_2^1 \alpha_B \cdot \frac{dT}{dl} \cdot dl = -\int_{T_2}^{T_1} \alpha_B \cdot dT \tag{2.12}$$

Całkowita siła elektromotoryczna ε_{termo} jest sumą sił elektromotorycznych działających na drogach *A* oraz *B,* a także sił termoelektrycznych indukowanych na złączach, czyli:

$$\varepsilon_{termo} = \varepsilon_{1A2} + \varepsilon_{2B1} \tag{2.13}$$

Podstawiając do powyższego równania (2.12), (2.13) oraz (2.8) otrzymuje się wyrażenie na całkowitą siłę termoelektryczną:

$$\varepsilon_{termo} = \int_{T_2}^{T_1} \alpha_A \cdot dT - \int_{T_2}^{T_1} \alpha_B \cdot dT = \int_{T_2}^{T_1} \alpha_{AB} \cdot dT \tag{2.14}$$

Wartość współczynnika Seebecka α_{AB} dla par metali jest znacznie niższa niż w przypadku par półprzewodników typu p-n (24). Wynika to z faktu, że poszczególne półprzewodniki w parze mają inne typy przewodnictwa, a tym samym ich współczynniki Seebecka mają różne znaki, czyli:

$$|\alpha_{AB}| = |\alpha_A| + |\alpha_B| \tag{2.15}$$

Dla małego gradientu temperatur wyrażenie (2.14) można zapisać w postaci:

$$\varepsilon_{termo} \approx \alpha_{AB} \cdot (T_1 - T_2) \tag{2.16}$$

W przypadku większych gradientów temperatur na znaczeniu zyskuje zależność współczynnika Seebecka od temperatury.

Przykładowe wartości współczynnika Seebecka dla metali zestawiono w Tab. 2-1

Tab. 2-1. Wartości współczynnika Seebecka dla metali, w temperaturze 300K, µV/K (27)

Metal	α_{AB}	Metal	α_{AB}	Metal	α_{AB}	Metal	α_{AB}
Ag	1,51	Eu	24,5	Nh	-0,44	Sr	1,1
Al	-1,66	Fe	15	Nd	-2,3	Ta	-1,9
Au	1,94	Gd	-1,6	Ni	-19,5	Tb	-1
Ba	12,1	Hf	5,5	Np	-3,1	Th	-3,2
Be	1,7	Ho	-1,6	Os	-4,4	Ti	9,1
Ca	10,3	In	1,68	Pb	-1,05	Tl	0,3
Cd	2,55	Ir	0,86	Pd	-10,7	Tm	1,9
Ce	6,2	K	-13,7	Rb	-10	U	7,1
Co	-30,8	La	1,7	Re	-5,9	V	0,23
Cr	21,8	Lu	-4,3	Rh	0,6	W	0,9
Cs	-0,9	Mg	-1,46	Ru	-1,4	Y	-0,7
Cu	1,83	Mn	-9,8	Sc	-19	Yh	30
Dy	-1,8	Mo	5,6	Sm	1,2	Zn	2,4
Er	-0,1	Na	-6,3	Sn	-1	Zr	8,9

2.2. Generatory termoelektryczne

Podstawą działania generatorów termoelektrycznych jest zjawisko Seebecka. W przypadku konstrukcji generatora kluczowe jest odpowiednie dobranie materiałów, z których będą wykonane elementy termoelektryczne. Pierwsze konstrukcje termoelementów były oparte na metalach, jednak niewielka wydajność takich połączeń była przyczyną poszukiwań wydajniejszych materiałów. Z tego

względu rozpoczęto próby z elementami półprzewodnikowymi, które do dziś osiągają największe wydajności. Aby jednak precyzyjnie opisać różnice pomiędzy różnymi materiałami niezbędne było wprowadzenie wskaźników, które umożliwiają określenie wydajności dla każdego materiału.

Wskaźnikiem określającym przydatność danego materiału do zastosowań termoelektrycznych jest tzw. współczynnik dobroci termoelektrycznej *Z* (ang. figure-of-merit) (23). W wielkości tej połączono trzy kluczowe parametry charakteryzujące materiały termoelektryczne: współczynnik Seebecka α, rezystywność ρ oraz przewodność cieplną λ. Zależność ma postać:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \tag{2.17}$$

Zgodnie z układem SI jednostką współczynnika dobroci termoelektrycznej jest *1/K*. Powyższa zależność dotyczy tylko jednego materiału. Dla elementu termoelektrycznego składającego się z dwóch materiałów zależność przyjmuje postać (28):

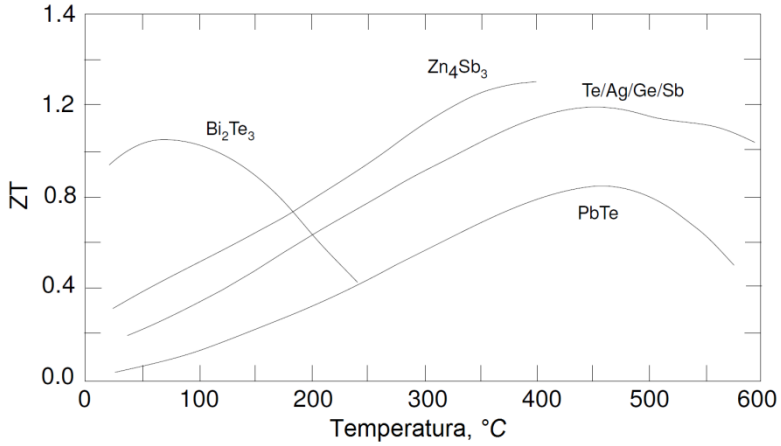
$$Z_{AB} = \frac{(\alpha_A + \alpha_B)^2}{\left(\sqrt{\lambda_A \cdot \rho_A} + \sqrt{\lambda_B \cdot \rho_B}\right)^2} \tag{2.18}$$

W powyższej zależności indeksy A oraz B odnoszą się do poszczególnych materiałów użytych do konstrukcji termopary. Dla powszechnie stosowanych materiałów termoelektrycznych wartości współczynnika dobroci termoelektrycznej kształtuje się na poziomie 10^{-3} *1/K*.

Ze względu na silną zależność współczynnika dobroci termoelektrycznej od temperatury, współczynniki dla poszczególnych materiałów należy podawać dla ujednoliconej temperatury lub zmodyfikować współczynnik *Z* tak, aby uwzględnić w nim temperaturę. Z tego względu w źródłach literaturowych najczęściej stosuje się bezwymiarową postać współczynnika dobroci termoelektrycznej, która przyjmuje postać:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \cdot T \tag{2.19}$$

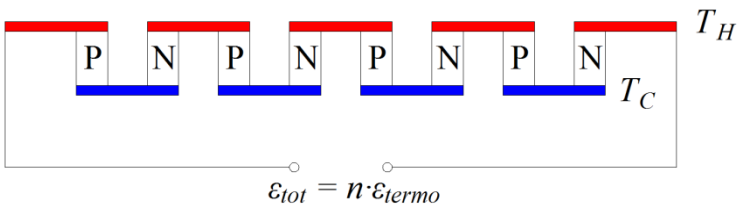
Aktualne źródła literaturowe podają największe osiągalne wartości parametru *ZT* na poziomie powyżej 2,0 (29-34). Z kolei dla materiałów, które są wykorzystywane komercyjnie wartość współczynnika wynosi około 1,0. Zestawienie najpopularniejszych materiałów półprzewodnikowych wykorzystywanych jako termoelektryki przedstawiono na Rys. 2.4.



Rys. 2.4. Bezwymiarowy współczynnik dobroci termoelektrycznej ZT najpopularniejszych materiałów półprzewodnikowych w funkcji temperatury (27)

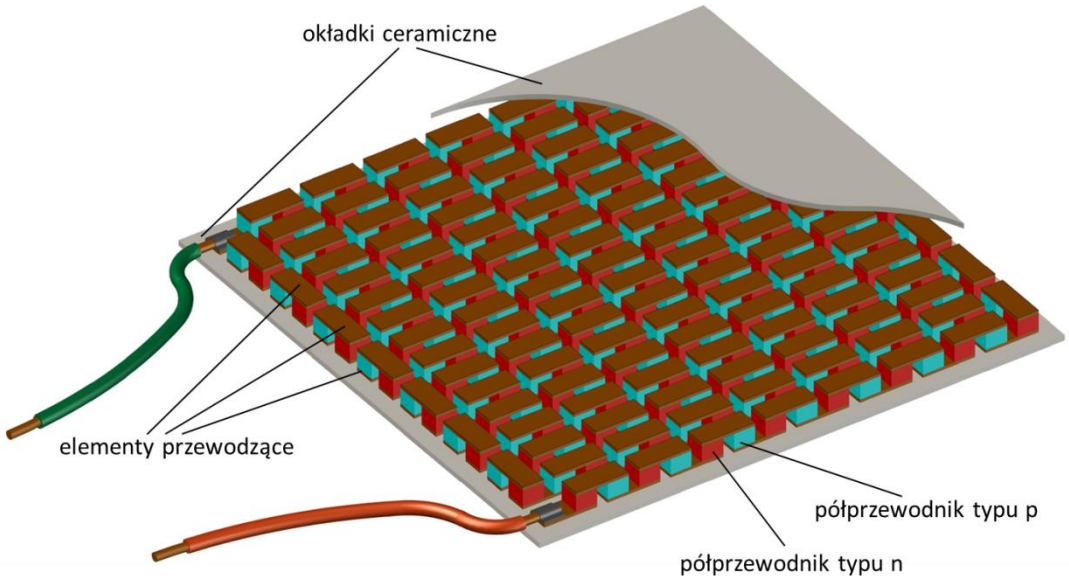
Dla każdego z materiałów współczynnik *ZT* ma najwyższą wartość dla konkretnej temperatury. Cecha ta predysponuje określone materiały do pracy w konkretnych temperaturach. Współcześnie popularne generatory termoelektryczne produkowane komercyjnie są najczęściej wykonane z *tellurku bizmutu* (Bi_2Te_3), który odznacza się najwyższą wartość współczynnika *ZT* dla temperatury około 75 °C (*ZT* = 1,05). Związek ten jest odpowiednio domieszkowany, a w zależności od domieszki powstaje półprzewodnik typu n (przewodnictwo elektronowe) lub typu p (przewodnictwo dziurowe).

Niestety siła elektromotoryczna generowana przez pojedyncze złącze (termoparę) jest niewielka. Z tego względu w konstrukcji generatorów termoelektrycznych wykorzystuje się zespoły termopar (termostosy), które odpowiednio połączone zwiększają wytwarzaną siłę elektromotoryczną. Na Rys. 2.5 przedstawiono ideowy schemat termostosu.



Rys. 2.5. Schemat termostosu złożonego z n=4 termopar

Termostos z Rys. 2.5 można rozpatrywać jako bardzo prymitywny generator termoelektryczny. W rzeczywistości powszechnie dostępne generatory termoelektryczne składają się z ponad 100 termopar, które razem tworzą prostopadłościan o wymiarach około 50 mm x 50 mm oraz wysokości kilku milimetrów. Dokładny schemat komercyjnie produkowanego termogeneratora zaprezentowano na Rys. 2.6.



Rys. 2.6. Schemat budowy półprzewodnikowego generatora termoelektrycznego

3. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy jest określenie potencjału zastosowania generatorów termoelektrycznych w systemach cieplnych do lokalnego wytwarzania elektrycznej energii pomocniczej z ciepła.

Zrealizowanie wyżej postawionego celu wymaga:

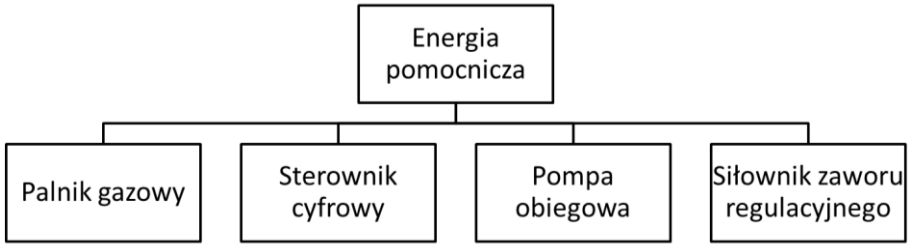
1) określenia zapotrzebowanie elektrycznej energii pomocniczej we współczesnych systemach cieplnych,
2) wyznaczenia charakterystyk podaży prądu elektrycznego przez generatory termoelektryczne przy różnych parametrach cieplnych i obciążenia elektrycznego w systemie cieplnym,
3) wyznaczenia zależności matematycznej określającej parametry prądu generowanego przez generator termoelektryczny dla dowolnych parametrów cieplnych i obciążenia elektrycznego systemu cieplnego.

Zakres pracy związany z przedstawionym tematem badań podzielono na etapy, które obejmują:

a) analizę zapotrzebowania elektrycznej energii pomocniczej we współczesnych systemach cieplnych,
b) określenie zapotrzebowania na moc elektryczną urządzeń pomocniczych w systemach cieplnych,
c) przegląd źródeł literaturowych w celu zapoznania się z aktualnymi kierunkami badań i określenia niezbędnego zakresu prac badawczych, które należy przeprowadzić,
d) analizę czynników wpływających na pracę generatora termoelektrycznego,
e) opracowanie koncepcji oraz budowę stanowiska pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie charakterystyk elektrycznych i cieplno-elektrycznych generatorów termoelektrycznych w zmiennych warunkach cieplnych i obciążenia elektrycznego,
f) badania wstępne wybranych typów generatorów termoelektrycznych w celu wyboru najbardziej wydajnego generatora,
g) szczegółowe badania najlepszego generatora w celu wyznaczenia zależności matematycznej umożliwiającej dobór i wymiarowanie zespołów termoelektrycznych dla określonych warunków cieplnych i obciążenia elektrycznego,
h) badania wytwarzania energii pomocniczej przez generator termoelektryczny w rzeczywistych warunkach pracy systemu cieplnego,
i) projekt techniczny uniwersalnego, skalowalnego modułu termoelektrycznego.

4. Wymagania energetyczne współczesnych systemów cieplnych

Postulując lokalne wytwarzanie energii pomocniczej w systemach cieplnych wykorzystując TEG, kluczowe jest ustalenie rzeczywistego zapotrzebowania na energię pomocniczą niezbędną do utrzymania systemów cieplnych w ruchu. Na przykładzie układu z gazowym kotłem kondensacyjnym przeanalizowano zapotrzebowanie na energię pomocniczą wykorzystywaną przez urządzenia dostępne obecnie na rynku (Tab. 4-1). Sprawdzono ponad 140 modeli kotłów różnych producentów, z których wybrano grupę 33 kotłów, dla których stosunek zapotrzebowania na moc elektryczną do maksymalnej mocy cieplnej jest najmniejszy. W wypadku kotła, na zapotrzebowanie na pomocniczą energię elektryczną składa się energia niezbędna do napędu: palnika gazowego, sterownika cyfrowego, pompy obiegowej i siłownika zaworu regulacyjnego, jeżeli taki występuje w układzie (Rys. 4.1).



Rys. 4.1 Elementy kotła kondensacyjnego wykorzystujące energię pomocniczą

W typowym systemie grzewczym (CO + CWU) zapotrzebowanie na energię pomocniczą jest zmienne w czasie, zależnie od chwilowego trybu pracy. Z uwagi na to, w tabeli przedstawiono zarówno minimalne jak i maksymalne zapotrzebowanie na moc elektryczną. W rzeczywistych warunkach pracy maksymalne zapotrzebowanie na moc elektryczną występuje bardzo rzadko. Jako kryterium porównawcze przyjęto stosunek mocy cieplnej do zapotrzebowania mocy elektrycznej. W najbardziej energooszczędnych kotłach stosunek maksymalnej pobieranej mocy elektrycznej do maksymalnej mocy cieplnej jest mniejszy niż 1:500. Dla żadnego spośród 140 przeanalizowanych urządzeń stosunek ten nie przekroczył wartości 1:50. Dane zawarte w tabeli potwierdzają, że obecnie produkowane kotły są wysoce energooszczędne pod względem zużycia energii elektrycznej. Co więcej nie dotyczy to jedynie pojedynczych urządzeń, ale praktycznie wszystkich dostępnych na rynku produktów.

Ze względu na niskie zapotrzebowanie na energię pomocniczą systemy cieplne oparte na gazowych kotłach kondensacyjnych stanowią obszar potencjalnego zastosowania systemów zasilania w energię elektryczną opartych na generatorach termoelektrycznych.

Tab. 4-1 Zapotrzebowanie na energię pomocniczą wybranych gazowych kondensacyjnych kotłów grzewczych

l.p.	Nazwa urządzenia	Producent	Moc cieplna przy parametrach 50/30°C		Pobór mocy elektrycznej				Stosunek Obciążenie maksymalne / Maksymalna moc cieplna	Stosunek Pobór maksymalny / Maksymalna moc cieplna	Uwagi	Źródło
			Minimalna moc cieplna	Maksymalna moc cieplna	Tryb czuwania	Obciążenie maksymalne	Pobór maksymalny	Tryb ogrzewania, obciążenie pełne, ustawienie fabryczne pompy obiegowej				
-	-	-	*kW*	*kW*	*W*	*W*	*W*	*W*	-	-	-	-
1	VITOCROSSAL 300	Viessmann	5,2	19	6	25	BD	BD	1:770	BD	BPO	(35)
2	INNOVENS PRO MCA	DeDietrich	13,3	65	6	88	BD	BD	1:714	BD	BD	(36)
3	EcoTherm Plus WGB EVO 15	Brötje	3,1	15,6	3	22	85	57	1:714	BD	ZPO	(37)
4	EcoCondens BBS EVO 15	Brötje	3,1	15,6	3	22	85	57	1:714	BD	ZPO	(38)
5	VITOCROSSAL 300	Viessmann	5,2	26	6	37	BD	BD	1:714	BD	BPO	(35)
6	EcoTherm Plus WGB EVO 20	Brötje	3,1	20,8	3	30	93	70	1:714	BD	ZPO	(37)
7	EcoCondens BBS EVO 20	Brötje	3,1	20,8	3	30	93	70	1:714	BD	ZPO	(38)
8	IntroCondens WHBC 28/33	Brötje	7,4	30,7	4	45	95	25	1:667	1:322	ZPO	(39)
9	IntroCondens WHBS 30	Brötje	7,4	30,7	4	45	90	25	1:667	1:344	ZPO	(39)
10	VITOCROSSAL 300	Viessmann	12	45	6	68	BD	BD	1:667	BD	BPO	(35)
11	EcoTherm Plus WGB EVO 28	Brötje	4,2	29	3	45	108	92	1:625	1:270	ZPO	(37)
12	EcoCondens BBS EVO 28	Brötje	4,2	29	3	45	108	92	1:625	1:270	ZPO	(38)
13	INNOVENS PRO MCA	DeDietrich	8,9	43	5	68	BD	BD	1:625	BD	BD	(36)
14	EcoTherm Plus WGB 50	Brötje	12,9	52,1	3	83	83	BD	1:625	1:625	BPO	(40)
15	VITOCROSSAL 300	Viessmann	7	35	6	56	BD	BD	1:625	BD	BPO	(35)
16	IntroCondens WHBC 22/24	Brötje	5,2	22,8	4	40	95	25	1:556	1:238	ZPO	(39)
17	IntroCondens WHBS 22	Brötje	5,2	22,8	4	40	90	25	1:556	1:256	ZPO	(39)
18	EcoTherm Plus WGB 38	Brötje	9,7	39,6	3	70	122	120	1:556	1:322	ZPO	(41)
19	EcoTherm Plus WGB 28	Brötje	6	29,2	3	52	104	95	1:556	1:278	ZPO	(41)
20	EcoTherm Kompakt WBC 22/24	Brötje	5,2	22,8	3	45	107	89	1:500	1:213	ZPO	(42)
21	EcoTherm Kompakt WBC 22/27	Brötje	5,2	22,8	3	45	107	89	1:500	1:213	ZPO	(42)
22	EcoTherm Kompakt WBS 22	Brötje	5,2	22,8	3	45	107	89	1:500	1:213	ZPO	(42)
23	EcoTherm Plus WGB 20	Brötje	3,7	20,8	3	45	97	79	1:454	1:213	ZPO	(41)
24	IntroCondens WHBS 14	Brötje	3,7	14,6	4	35	85	25	1:417	1:172	ZPO	(39)
25	EcoTherm Plus WGB 15	Brötje	3,1	15,6	3	41	93	67	1:384	1:167	ZPO	(41)
26	MCR3 Plus 30/35 MI	DeDietrich	8,5	31	3	87	BD	BD	1:357	BD	BD	(43)
27	VITODENS 050-W	Viessmann	6,5	24	-	72	72	56	1:333	1:333	ZPO	(44)
28	EcoTherm Kompakt WBS 14	Brötje	3,7	14,6	3	45	97	71	1:322	1:152	ZPO	(42)
30	MCR3 Plus 24S	DeDietrich	6,1	24,8	3	78	BD	BD	1:322	BD	BD	(43)
31	MCR3 Plus 24/28 MI	DeDietrich	6,1	24,8	3	78	BD	BD	1:322	BD	BD	(43)
32	MCR3 Plus 24T	DeDietrich	6,1	24,8	3	79	BD	BD	1:312	BD	BD	(43)
33	INNOVENS MCA 15	DeDietrich	3,4	15,8	4,4	81	BD	BD	1:196	BD	BD	(45)

Objaśnienia: BD – brak danych, ZPO – wraz z pompą obiegową, BPO – bez pompy obiegowej

Równie istotna z punktu widzenia możliwości implementacji generatorów termoelektrycznych jest analiza zapotrzebowania na moc elektryczną urządzeń wchodzących w skład systemów cieplnych takich jak regulatory cyfrowe, pompy obiegowe oraz siłowniki zaworów regulacyjnych.

W Tab. 4-2 zestawiono zapotrzebowanie na moc elektryczną wybranych regulatorów cyfrowych dostępnych na rynku. Wprowadzono podział na trzy podstawowe grupy: regulatory kotłowe, solarne oraz do kominków z płaszczem wodnym. Wszystkie regulatory wykazują zapotrzebowanie mniejsze niż 12 W mocy elektrycznej, a w znakomitej większości jest to kilka watów. Istnieją również urządzenia których wymagana moc elektryczna jest mniejsza od 1 W.

Elementy elektroniczne wchodzące w skład sterowników zasilane są prądem stałym o napięciu kilku woltów. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie generatorów termoelektrycznych do zasilania sterowników. Należy nadmienić, że ze względu na unifikację producenci zaopatrują sterowniki w zasilacze, które umożliwiają wykorzystanie do ich zasilania prądu przemiennego.

Tab. 4-2 Zapotrzebowanie na moc elektryczną wybranych sterowników cyfrowych

l.p.	Nazwa urządzenia	Producent	Typ	Pobór mocy	Źródło
-	-	-	-	*W*	-
Sterowniki cyfrowe do kotłów					
1	IGNEO SLIM	estyma electronics	Sterownik kotła - uniwersalny	6	(46)
2	REG - 07	JUMAR	Sterownik kotła stałopalnego	8	(47)
3	REG - 30	JUMAR	Mikroprocesorowy regulator palnika pelet	8	(48)
4	ST - 80	TECH	Sterownik kotła z podajnikiem	2	(49)
5	ST -88zPID	TECH	Sterownik kotła zasypowego	5	(50)
6	ST - 880 zPID	TECH	Sterownik kotła zasypowego	11	(51)
7	ST-22N	TECH	Sterownik kotła zasypowego	2	(52)
8	ST-37N RS	TECH	Sterownik kotła z podajnikiem	7	(53)
9	ST-81	TECH	Sterownik kotła zasypowego	5	(54)
10	ST-480	TECH	Sterownik kotła z podajnikiem	11	(55)
11	ST-580	TECH	Sterownik kotła z podajnikiem	11	(56)
12	ST-717	TECH	Sterownik do kotła na PELLET	11	(57)
13	ST-58 zPID	TECH	Sterownik do kotła na zgazowanie drewna	9	(58)
14	EUNI3	EUROSTER	Pogodowy sterownik instalacji grzewczej	4	(59)
15	Vitotronic 300K	Viessmann	Sterowany pogodowo regulator kaskadowy	10	(60)
16	Vitotronic 200	Viessmann	Sterowany pogodowo regulator kotłowy	10	(61)
Sterowniki cyfrowe do układów solarnych					
1	813	Euroster	Sterownik solarny	0,8	(62)
2	WCM-SOL	Weishaupt	Sterownik solarny	5	(63)
3	Diemasol Ci	DeDietrich	Sterownik solarny	4	(64)

l.p.	Nazwa urządzenia	Producent	Typ	Pobór mocy	Źródło
-	-	-	-	*W*	-
4	Vitosolic 100	Viessmann	Sterownik solarny	2	(65)
5	Vitosolic 200	Viessmann	Sterownik solarny	6	(66)
6	ST-21 Solar	TECH	Sterownik solarny	1	(67)
7	ST-401N	TECH	Sterownik solarny	4	(68)
8	ST-460	TECH	Sterownik solarny	6	(69)
Sterowniki cyfrowe do kominków					
1	E11K	EUROSTER	Sterownik kominka z płaszczem wodnym	4,3	(70)
2	ecoKOM 200T	PLUM	Sterownik kominka z płaszczem wodnym	1,5	(71)
3	ecoKOM 260	PLUM	Sterownik kominka z płaszczem wodnym	1,5	(72)
4	RT-08 G	TATAREK	Regulator obiegu grzewczego do kominków i palenisk wodnych	5	(73)
5	RT-08 K	TATAREK	Regulator obiegu grzewczego z kominkiem	5	(74)
6	ST-390 zPID	TECH	Sterownik do kominka	4	(75)
7	ST-392 zPID	TECH	Sterownik do kominka	4	(76)

Do pełnej funkcjonalności wodnego systemu cieplnego, poza układem automatycznego sterowania, niezbędna jest praca pompy obiegowej oraz ewentualnego siłownika zaworu regulacyjnego. Zestawienie zapotrzebowania na moc wybranych pomp obiegowych oraz siłowników dostępnych na rynku prezentuje Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Zapotrzebowanie na moc elektryczną urządzeń pomocniczych

l.p.	Nazwa urządzenia	Producent	Typ	Pobór mocy	Źródło
-	-	-	-	W	-
Pompy obiegowe					
1	BLUEONE BWO 155 R 12V	DEUTSCHE VORTEX	Pompa obiegowa	2-7	(77)
2	FT5-15-PV	FOTTON	Pompa obiegowa	2,5-15	(78)
3	D5 Brass	Laing Thermotech	Pompa obiegowa	2-25	(79)
Siłownik mieszaczy					
1	7 450 657	Viessmann	Siłownik dla mieszacza ogrzewania	4	(80)
2	9 522 487	Viessmann	Siłownik mieszacza 3-drogowego	3	(80)
3	9 522 488	Viessmann	Siłownik mieszacza 3-drogowego	4	(80)
4	seria 90	ESBE	Siłownik 3-punktowy	2	(81)
5	ARA 600	ESBE	Siłownik 3-punktowy	3	(82)
6	AME 10	Danfoss	Siłownik mieszacza	4	(83)
7	TA-MC15	IMI TA	Siłownik proporcjonalny o wysokiej precyzji działania	2,5	(84)
8	VRM	Honeywell	Siłownik do zaworów mieszających	2,4	(85)

Zapotrzebowanie na moc elektryczną w przypadku zarówno pomp jak i siłowników zaworów regulacyjnych jest niskie. Pompy obiegowe do prawidłowej pracy potrzebują maksymalnie kilkunastu watów, choć prawidłowo pracują już przy mocach rzędu 2 – 2,5 W. W przypadku siłowników wymagana moc w żadnym z przypadków nie przekracza 5 W. Opisane pompy obiegowe są wykonane jako przystosowane do zasilania napięciem stałym, natomiast praktycznie wszystkie siłowniki dostępne na rynku występują w wersji przystosowanej do zasilania prądem stałym o napięciu 24 V.

Na Rys. 4.2 przedstawiono czynniki, które sprzyjają zastosowaniu generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej.

Rys. 4.2 Czynniki sprzyjające zastosowaniu TEG do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej

Biorąc pod uwagę wyżej zaprezentowane czynniki, które wynikają bezpośrednio z dokładnie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że możliwe jest stworzenie systemu cieplnego zasilanego w energię pomocniczą wytwarzaną lokalnie przez generatory termoelektryczne z ciepła wytwarzanego w tym systemie cieplnym. Wiąże się to z podniesieniem efektywności energetycznej urządzeń cieplnych, a w konsekwencji ograniczeniem zużycia energii pierwotnej. Szeroka dostępność energooszczędnych komponentów pozwala na skompletowanie układu urządzeń pomocniczych o łącznym zapotrzebowaniu mocy elektrycznej nie przekraczającym 20 W.

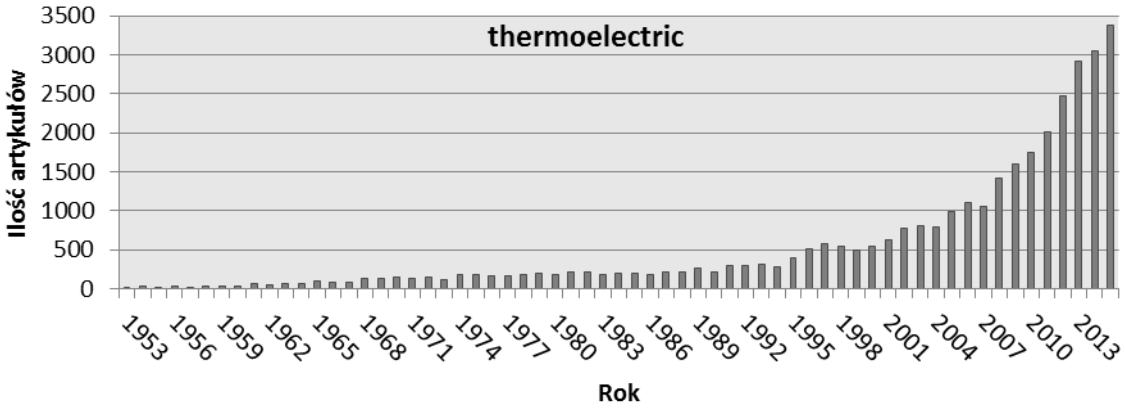
W oparciu o powyższe sformułowano tezę niniejszej rozprawy doktorskiej w brzmieniu:

Wykorzystując ciepło, ogniwa termoelektryczne mogą lokalnie wytworzyć elektryczną energię pomocniczą o parametrach zapewniających utrzymanie systemów cieplnych w ruchu.

5. Przegląd literaturowy

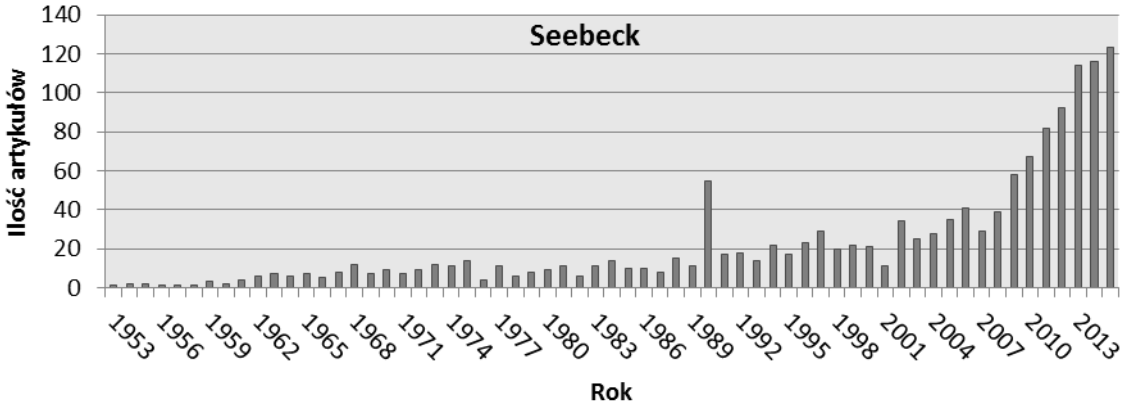
5.1. Artykuły naukowe dotyczące generatorów termoelektrycznych

W ostatnich latach zainteresowanie potencjalnym wykorzystaniem generatorów termoelektrycznych do wytwarzania prądu z ciepła jest coraz większe. Liczba artykułów naukowych zawierających w tytule słowo *thermoelectric* (Rys. 5.1) jeszcze w 1995 roku wynosiła około 300, a po 20 latach zwiększyła się ponad dziesięciokrotnie, aż do liczby 3379 w roku 2015. Artykuły zawierające słowo *thermoelectric* dotyczą zagadnień związanych zarówno z generatorami termoelektrycznymi jak i ogniwami Peltiera. Z tego względu dodatkowo przeanalizowano liczbę artykułów zawierających w tytule słowa *Seebeck, thermoelectric generator* oraz *TEG.*



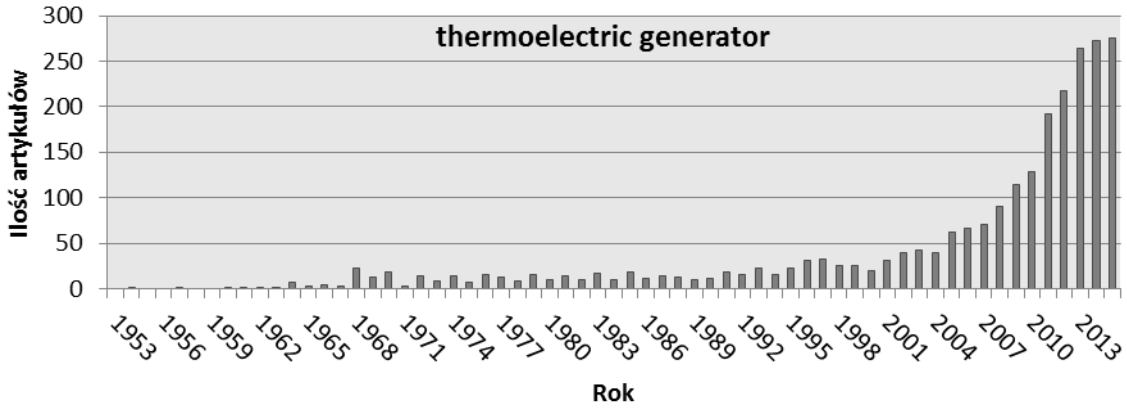
Rys. 5.1 Artykuły naukowe zawierające słowo thermoelectric w tytule, według bazy Web of Science (86)

Liczba artykułów dotyczących zjawiska Seebecka (Rys. 5.2) jest o rząd wielkości mniejsza niż tych zawierających słowo *thermoelectric*. Wynika to z faktu, że samo zjawisko Seebecka jest dość dobrze poznane, a autorzy skupiają się w większym stopniu na wykorzystaniu tego zjawiska w artykułach dotyczących generatorów termoelektrycznych.

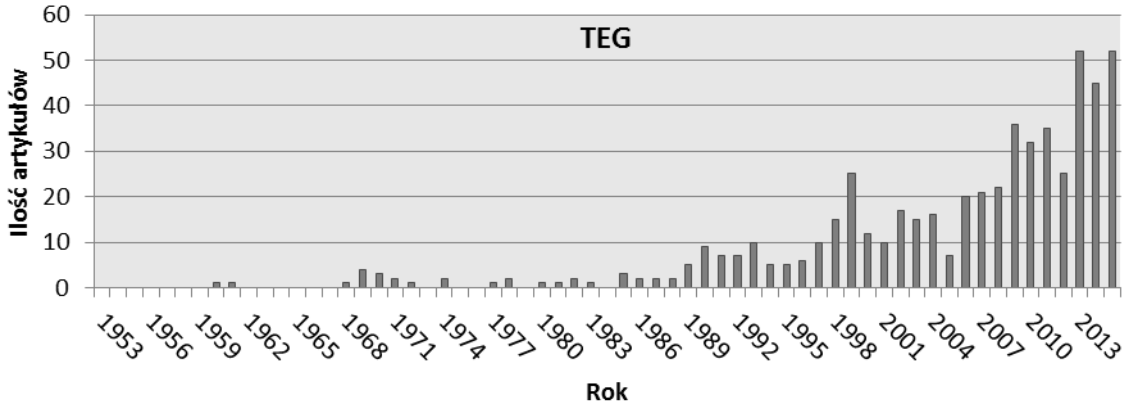


Rys. 5.2 Artykuły naukowe zawierające słowo Seebeck w tytule, według bazy Web of Science (87)

Nazwy *thermoelectric generator* oraz *TEG* zwykle stosowane są zamiennie. Zarówno w przypadku słów *thermoelectric generator* (Rys. 5.3) jak i *TEG* (Rys. 5.4) zauważalny jest rokroczny wzrost w liczbie publikowanych artykułów. W pierwszym przypadku jest to wzrost od 20 artykułów na początku lat 90 XX wieku, aż do około 280 artykułów w roku 2015. W przypadku słowa *TEG* wzrost ten jest pięciokrotny porównując początek lat 90 (10 artykułów) oraz rok 2015 (ponad 50 artykułów).



Rys. 5.3 Artykuły naukowe zawierające słowa thermoelectric generator w tytule, według bazy Web of Science (88)

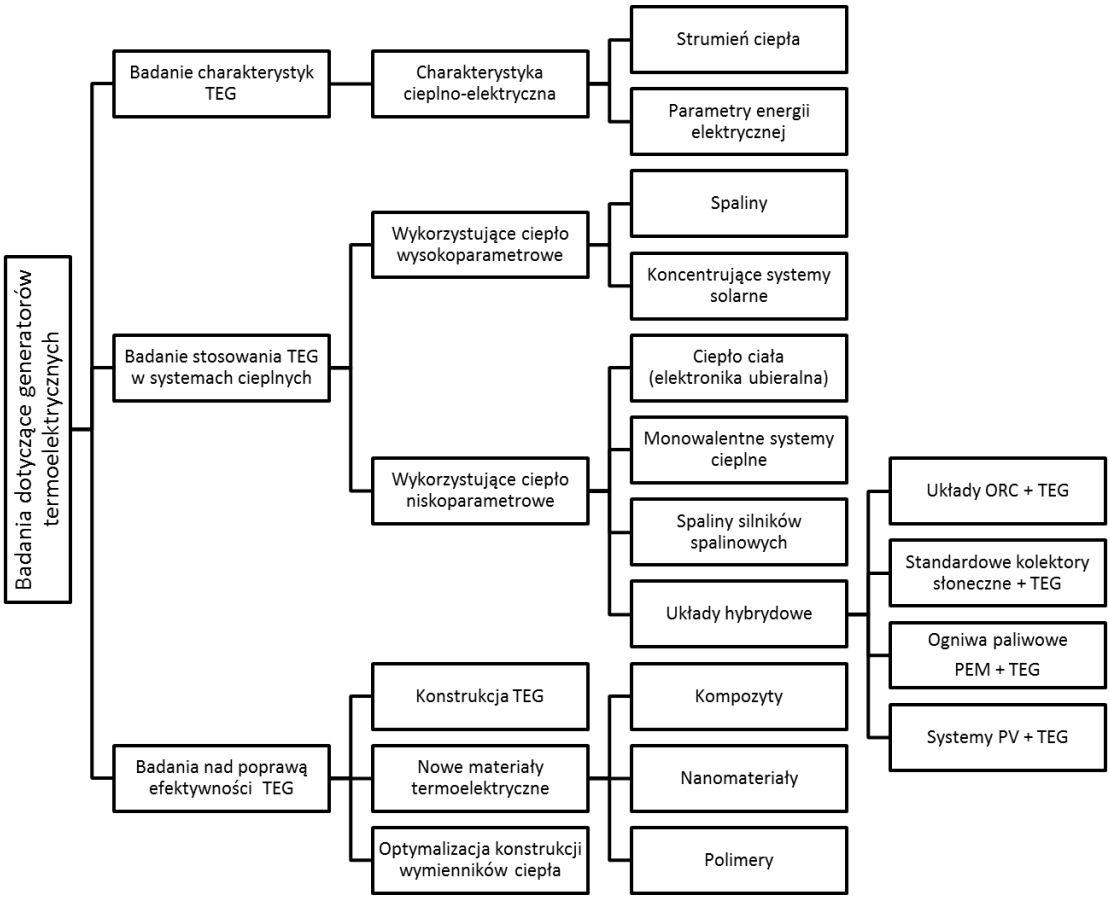


Rys. 5.4 Artykuły naukowe zawierające słowo TEG w tytule, według bazy Web of Science (89)

Prezentowana tendencja potwierdza słuszność podjęcia tematu wykorzystania generatorów termoelektrycznych w dziedzinie IŚ, co wpisuje się w ogólnoświatowy trend dotyczący wykorzystania technologii termoelektrycznych. W dalszej części pracy przedstawiony zostanie aktualny stan wiedzy dotyczący zarówno konstrukcji generatorów termoelektrycznych, jak i ich wykorzystania do produkcji energii elektrycznej z ciepła.

5.2. Aktualne kierunki badań dotyczące generatorów termoelektrycznych

Badania dotyczące generatorów termoelektrycznych są obecnie prowadzone na wielu płaszczyznach. Widoczne są trzy podstawowe kierunki badań naukowych: badanie charakterystyk TEG, badania stosowania TEG w systemach cieplnych oraz badania nad poprawą efektywności TEG (Rys. 5.5).



Rys. 5.5. Aktualne kierunki badań dotyczące generatorów termoelektrycznych

Do pierwszej grupy należą badania charakterystyk generatorów termoelektrycznych w celu określenia ich roboczych parametrów cieplno-elektrycznych osiąganych w różnych warunkach pracy, z wykorzystaniem ciepła wysoko lub niskoparametrowego. Druga grupa badań dotyczy metod i sposobów implementacji termogeneratorów w systemach cieplnych w celu efektywnego wytwarzania prądu. Trzecia grupa to prace badawcze, których celem jest zwiększenie efektywności pracy TEG poprzez zmiany ich konstrukcji, stosowanych materiałów oraz wymienników ciepła.

Obecnie na świecie prowadzi się liczne badania, których celem jest sporządzenie charakterystyk cieplno-elektrycznych generatorów termoelektrycznych (90-93). Z wykorzystaniem odpowiednich wymienników ciepła oraz różnych czynników pośredniczących (ciecz, gaz), autorzy badają jak zmienia się ilość i jakość prądu elektrycznego w zależności od zmienności warunków dostawy ciepła (strumień

ciepła, temperatura strony ciepłej oraz zimnej ogniwa, względna różnica temperatur[2]) oraz zmiennego obciążenia elektrycznego. Badania te są istotne z punktu widzenia późniejszego zastosowania modułów termoelektrycznych, ponieważ dzięki uzyskanym charakterystykom można wstępnie ocenić jaki TEG (lub zespół TEG) należy zastosować w oparciu o warunki pracy danego systemu cieplnego.

Osobną gałąź badań stanowią te dotyczące poprawy efektywności pracy generatorów termoelektrycznych. Do grupy tej należą między innymi badania dotyczące optymalizacji konstrukcji generatorów (94-103). Duży nacisk naukowcy kładą także na poszukiwania nowych materiałów termoelektrycznych. Obecnie badania są prowadzone pod kątem wykorzystania nanostruktur (104-109), polimerów (108, 110) oraz materiałów kompozytowych (111, 112).

Obszar badań nad implementacją TEG obejmuje zarówno nisko jak i wysokoparametrowe źródła ciepła. Najbardziej dostępnymi formami wysokoparametrowego ciepła jest energia słońca oraz ciepło zawarte w spalinach ze spalania paliw kopalnych. W przypadku wykorzystania energii słonecznej (STEG – Solar thermoelectric generator) autorzy obierają różne drogi. Większość badaczy pracuje nad systemami, które umożliwiają uzyskanie wysokich temperatur poprzez skupienie wiązki światła słonecznego (113-117). Niektórzy wykorzystują układy z rurkami ciepła (118), pozostali koncentrują się na płaskich elementach skupiających ograniczonych próżnią w celu minimalizacji strat ciepła (119). W przypadku wykorzystania ciepła spalin niemal wszyscy autorzy dążą do implementacji generatorów termoelektrycznych w układach wydechowych silników spalinowych samochodów (120-127). Przy takiej lokalizacji generatory są chłodzone z wykorzystaniem powietrza omywającego radiatory w czasie jazdy lub korzystając z układu chłodzenia silnika pojazdu.

Wykorzystanie ciepła niskoparametrowego daje o wiele szersze spektrum implementacji. Część naukowców analizuje możliwość zastosowania TEG w urządzeniach grzewczych takich jak gazowe kotły kondensacyjne (128), kotły na biomasę (129), kuchnie opalane drewnem (130) czy też okrętowe spalarnie odpadów (131). W ostatnich latach wielu autorów skupia się na próbach zastosowania generatorów termoelektrycznych do zasilania elektroniki ubieralnej (ang. *wearables*) (132-135), czyli urządzeń takich jak inteligentne zegarki, okulary itp. Jest to obiecująca droga, ponieważ obecnie urządzenia te potrzebują codziennego ładowania akumulatorów, co znacząco wpływa na komfort ich użytkowania. Mniejszą uwagę przykłada się do wykorzystania spalin o niższej temperaturze do zasilania TEG (136). Dużym zainteresowaniem autorów cieszą się układy hybrydowe wykorzystujące generatory termoelektryczne oraz układy ORC (137), układy przygotowania ciepłej wody

[2] Ze względu na zależność współczynnika Seebecka od temperatury, siła elektromotoryczna indukowana w generatorze przy takiej samej różnicy temperatur, ale uzyskiwanej na różnych poziomach odniesienia, będzie różna np. $t_{H1} = 50$ °C, $t_{C1} = 20$ °C, $\Delta t_1 = 30$ °C; $t_{H2} = 100$ °C, $t_{C2} = 70$ °C, $\Delta t_2 = 30$ °C; $\Delta t_1 = \Delta t_2$ ale $\varepsilon_{termo1} \neq \varepsilon_{termo2}$

wykorzystujące kolektory słoneczne (138), ogniwa paliwowe PEM (139) i ogniwa fotowoltaiczne (140).

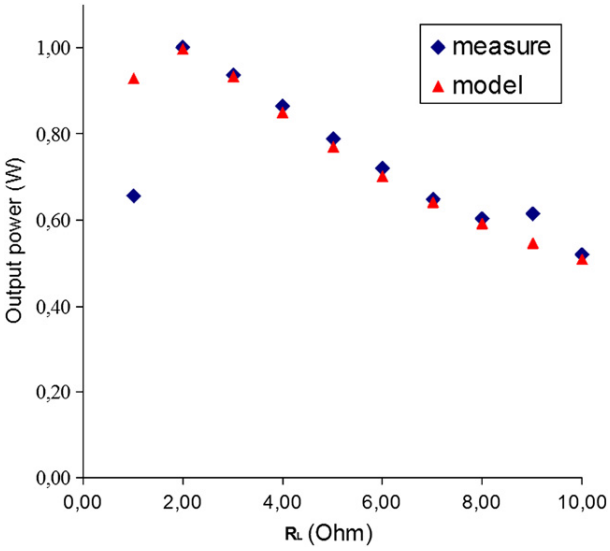
5.3. Badania dotyczące zastosowania generatorów termoelektrycznych do wytwarzania pomocniczej energii elektrycznej na potrzeby systemów cieplnych

Zastosowanie TEG do wytwarzania energii pomocniczej na potrzeby systemów cieplnych jest obecnie przyszłościową gałęzią nauki. Bardzo dynamiczny rozwój technologiczny szybko dezaktualizuje wyniki badań naukowych w dziedzinie TEG. Z tego względu analizując dotychczasowe dokonania skupiono się na najnowszych badaniach, co gwarantuje przedstawienie aktualnego i rzetelnego obrazu obecnego stanu wiedzy w omawianej dziedzinie. Zaprezentowano istotne odkrycia naukowe z okresu ostatnich sześciu lat.

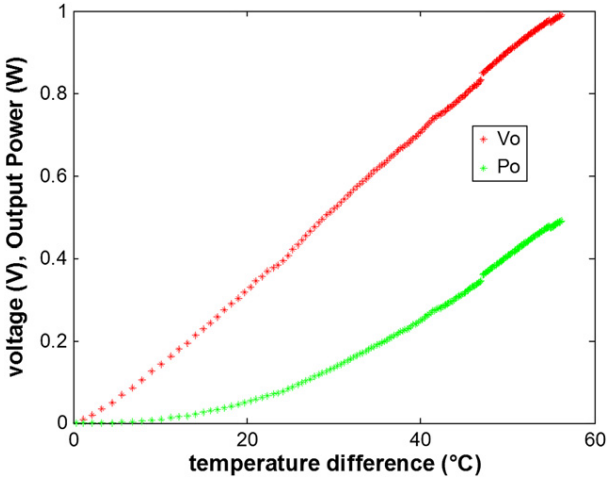
Podejście poszczególnych badaczy do tematu wykorzystania TEG w obrębie systemów cieplnych jest diametralnie różne. Jak zostało wspomniane w poprzednim rozdziale część autorów skupia się na implementowaniu modułów termoelektrycznych do konkretnych urządzeń, kolejni dążą do integracji modułów z innymi urządzenia cieplnymi (tworząc urządzenia hybrydowe), inni natomiast nie precyzują konkretnego zastosowania lecz skupiają się na określeniu efektywności różnych generatorów przy zmiennych warunkach pracy.

Spośród kilkuset przeanalizowanych artykułów wybrano, te które były najczęściej cytowane i dotyczą zagadnień blisko związanych z niniejszą rozprawą doktorską.

W 2010 roku Champier et al. (141) rozważał wykorzystanie TEG do wytwarzania prądu elektrycznego w rejonach z ograniczoną dostępnością sieci elektroenergetycznej. W badaniach wykorzystał termogenerator o oznaczeniu TEP1-12656-0.8. Jako element dostarczający ciepło wykorzystano grzałkę elektryczną o mocy około 150 W, natomiast chłodzenie ogniwa odbywało się poprzez wodny wymiennik ciepła. Autor wykonał dwa typy charakterystyk ogniwa. W pierwszym przypadku przy ustalonych parametrach temperaturowych rejestrował zmienność mocy w zależności od zadanej oporności, a otrzymane dane porównał z wartościami wynikającymi z modelu. Kolejno przy ustalonym oporze odbiornika (2 Ω) badał zmienność napięcia oraz mocy prądu elektrycznego w funkcji różnicy temperatur między stroną ciepłą i zimną generatora. Otrzymane charakterystyki przedstawiono na Rys. 5.6 oraz Rys. 5.7.

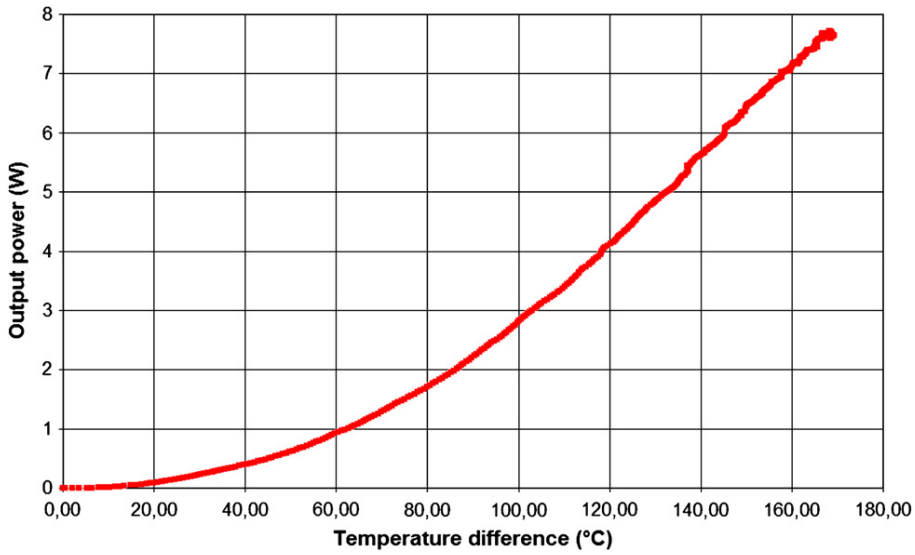


Rys. 5.6 Moc elektryczna w funkcji oporu dla różnicy temperatur wynoszącej 99 °C, strona zimna 62 °C, strona ciepła 161 °C (wyniki eksperymentalne) (141)



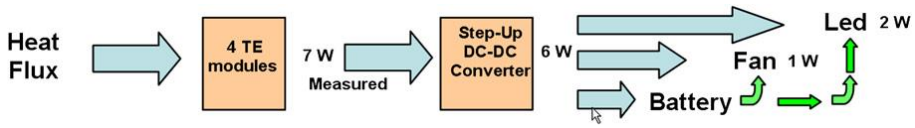
Rys. 5.7 Napięcie i moc elektryczna w funkcji różnicy temperatur przy oporności wynoszącej 2 (wyniki eksperymentalne) (141)

Następnym krokiem było skonstruowanie moduł termoelektrycznego, który umieszczono w kuchni na drewno ogrzewającej pomieszczenia i przygotowującej ciepłą wodę użytkową. Moduł składał się z 4 generatorów termoelektrycznych. Dla takiego układu sporządzono charakterystykę przedstawiającą zależność mocy elektrycznej od różnicy temperatur (Rys. 5.8).



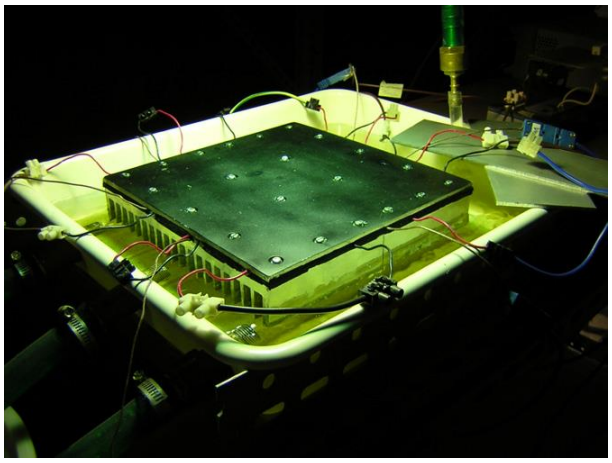
Rys. 5.8 Moc elektryczna w funkcji różnicy temperatur dla 4 generatorów termoelektrycznych połączonych szeregowo (wyniki eksperymentalne) (141)

Wyniki eksperymentalne potwierdziły, że taki układ może zasilać wentylator umieszczony w kuchni, którego zastosowanie umożliwia uzyskanie procesu spalania całkowitego. Dodatkowo układ ten wytwarza na tyle dużo energii, że część może być wykorzystana do zasilania oświetlenia typu LED, a pozostała ilość jest magazynowana w akumulatorze. Jest to o tyle istotne, że ze względu na dużą pojemność cieplną całej kuchni rozruch modułu termoelektrycznego następuje powoli i w początkowej fazie pracy po rozpaleniu nie wytwarza dostatecznie dużo prądu do zasilenia wentylatora i oświetlenia. Schemat zasilania przedstawia Rys. 5.9.



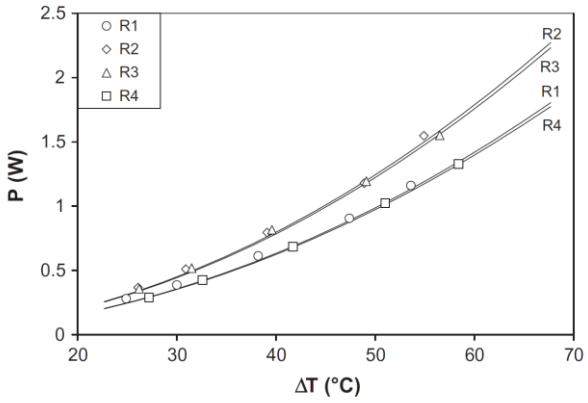
Rys. 5.9 Bilans energetyczny badanego generatora termoelektrycznego (141)

Casano i Piva (91) w 2011 roku opublikowali wyniki badań modułu termoelektrycznego zbudowanego z ogniw Peltiera. Badania miały na celu sprawdzenie czy tańsze i bardziej dostępne ogniwa Peltiera mogą z powodzeniem tworzyć moduły termoelektryczne służące do generowania prądu elektrycznego. Układ pomiarowy złożony był z 9 ogniw Peltiera połączonych szeregowo. Dostarczanie ciepła do modułu następowało z wykorzystaniem grzałki elektrycznej, natomiast odbiór realizowany był z wykorzystaniem radiatora, którego żebra były zanurzone w wodzie (Rys. 5.10). W celu intensyfikacji procesów wymiany ciepła zastosowano ciągły przepływ wody.



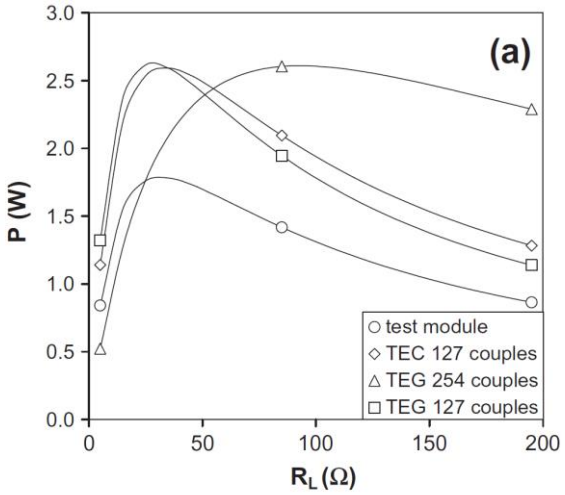
Rys. 5.10 Stanowisko badawcze modułu termoelektrycznego (91)

Poza badaniami eksperymentalnymi autorzy stworzyli również model. Wyniki eksperymentalne były porównywane z wielkościami obliczonymi w oparciu o model. Badania pod obciążeniem przeprowadzano dla czterech różnych oporności elektrycznych odbiornika (R_1 = 11,14 Ω; R_2 = 22,39 Ω; R_3 = 39,20 Ω; R_4 = 86,22 Ω). Temperatura po stronie zimnej modułu wynosiła 32,7 ± 3,9 °C, natomiast po stronie ciepłej zmieniała się od wartości 55,0 °C do 98,3 °C. Wyniki eksperymentu w postaci wykresu zależności mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur między okładką ciepła i zimną generatorów przedstawia Rys. 5.11.



Rys. 5.11 Zmierzone i obliczone wartości mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur (91)

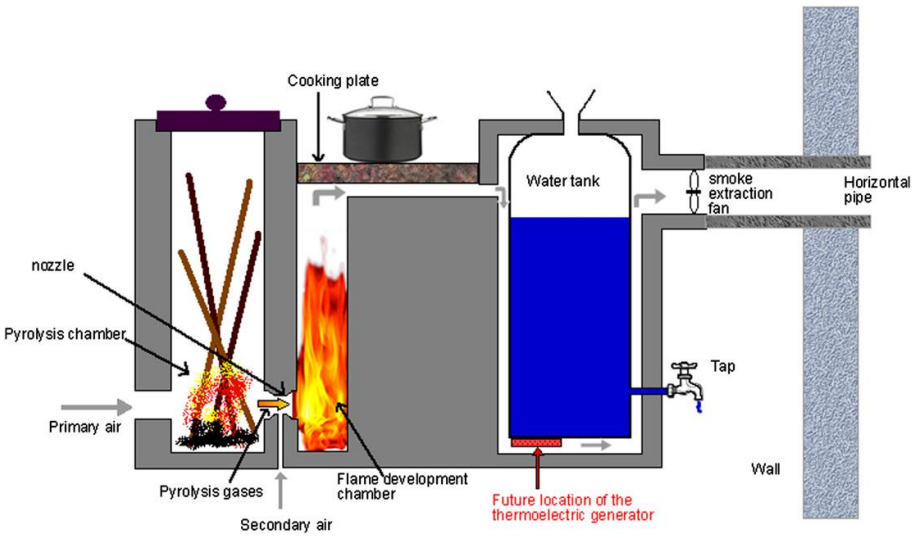
Dodatkowo autorzy porównali moc elektryczną wytwarzaną przez ogniwo Peltiera (TEC) oraz typowe ogniwa TEG w funkcji oporu elektrycznego. Badania przeprowadzono dla parametrów t_H = 90 °C, t_C = 30 °C, Δt = 60 °C. Wyniki przedstawiono na Rys. 5.12.



Rys. 5.12 Porównanie mocy elektrycznej w funkcji oporu elektrycznego dla ogniwa Peltiera oraz różnych TEG (91)

Otrzymane wyniki potwierdziły, że dla niskich temperatur ogniwa Peltiera mogą z powodzeniem zastępować typowe generatory termoelektryczne. Szczególnie dobre wyniki osiągają TEC o 127 parach elementów półprzewodnikowych.

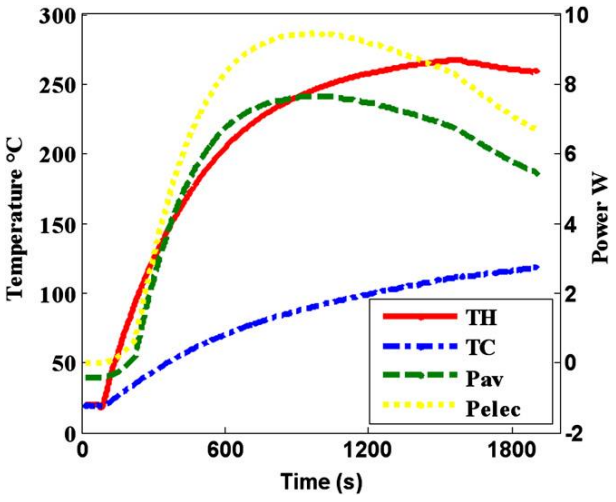
Champier et al. ponownie w 2011 roku zajął się tematem wykorzystania generatorów termoelektrycznych w kuchniach opalanych drewnem (130). Schematyczną budowę układu oraz rzeczywisty układ badawczy przedstawiono odpowiednio na Rys. 5.13 oraz Rys. 5.14.



Rys. 5.13 Schemat efektywnej energetycznie wielofunkcyjnej glinianej kuchni (130)

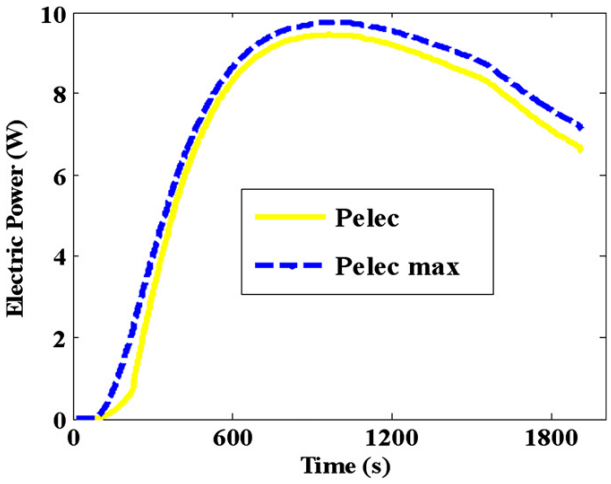
Rys. 5.14 Działająca kuchnia z wbudowanym układem termoelektrycznym (130)

Podobnie jak w poprzednich badaniach uzyskiwane wyniki były porównywane z wartościami obliczonymi w oparciu o model. W czasie badań układ termoelektryczny był obciążony rezystorem o oporze równym 12 Ω. Po analizie wybrano do badań ogniwo TEG o nazwie TEP1-12656-0.6. Zależność temperatury w układzie oraz mocy w funkcji czasu przedstawia Rys. 5.15. Ze względu na konieczność zastosowania przetwornicy napięcia typu DC - DC Step-up w układzie, rzeczywista dostępna moc elektryczna P_{av} jest mniejsza od maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEG P_{elec} o wartość strat na przetwornicy.



Rys. 5.15 Temperatura strony ciepłej i zimnej ogniwa oraz moce elektryczne w czasie eksperymentu (130)

Dodatkowo autor porównał otrzymane wartości maksymalnej mocy elektrycznej z wyniki obliczonymi w oparciu o model Rys. 5.16.



Rys. 5.16 Mierzona moc elektryczna i moc obliczona w oparciu o model (130)

Podobnie jak w przypadku poprzednich badań (141) zbudowany układ umożliwia zasilanie wentylatora oraz ładowanie baterii, która zapewnia zasilanie układu w trakcie rozruchu kuchni. Autor porównał również koszty układu termoelektrycznego (Rys. 5.17).

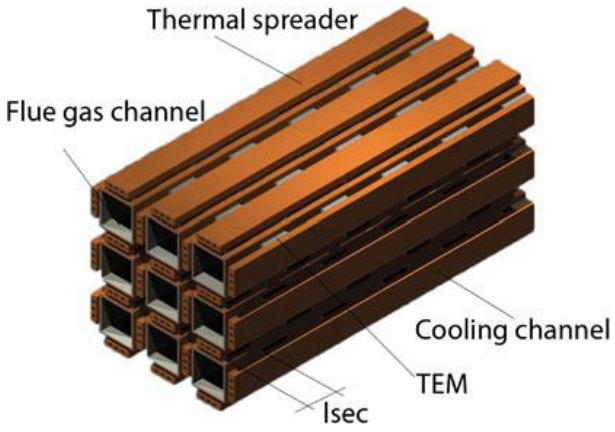
Components	Single unit cost	100 samples	High volume cost 10,000 samples
Electronic part	31€	15€	13€
Thermal part (aluminum exchangers)	31 €	22€	12€
TE module	67€	35€	15€
8 W TE generator	129€	72€	40€
	16€ per watt	9€ per watt	5€ per watt

Rys. 5.17 Szacowane koszty implementacji generatora termoelektrycznego w kuchni opalanej drewnem (130)

Jednostkowe koszty energii elektrycznej wytwarzanej przez system termoelektryczny w kuchni opalanej drewnem autor określił jako konkurencyjne w stosunku do energii elektrycznej uzyskiwanej z ogniw fotowoltaicznych (13 €/W).

W 2012 Kristiansen et al. przedstawił koncepcję wykorzystania ciepła odpadowego z okrętowej spalarni odpadów wykorzystując generator termoelektryczny (131). Z uwagi na wysoką temperaturę spalin w urządzeniu spalającym śmieci oraz możliwość wykorzystania chłodziwa w postaci wody morskiej autor określił opisywaną lokalizację jako idealną do implementacji układu termoelektrycznego. Badania miały charakter optymalizacyjny i zostały wykonane wyłącznie

w oparciu o model. Na ich potrzeby stworzono koncepcję odpowiedniego wymiennika ciepła (Rys. 5.18).



Rys. 5.18 Projekt modułowego wymiennika ciepła do montażu w strumieniu spalin ze spalarni odpadów (131)

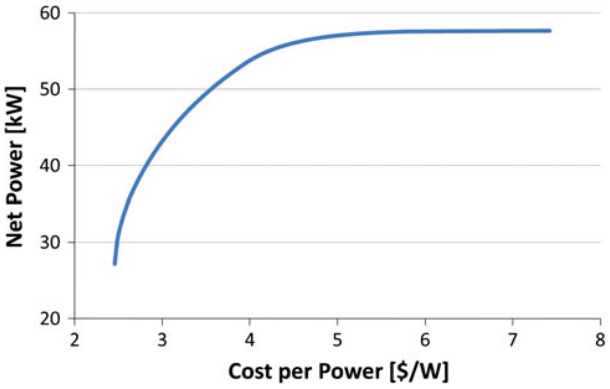
Optymalizację wykonano dwutorowo. Pierwsza optymalizacja polegała na takiej budowie wymiennika, która umożliwia uzyskanie jak największej mocy elektrycznej, natomiast w przypadku drugiej chodziło o uzyskanie jak najniższej ceny za 1 W wytworzonej mocy elektrycznej. Wyniki opisywanej optymalizacji przedstawiono na Rys. 5.19.

Parameter/Indicator	Value for Max. Power	Value for Min. US$/W	Unit
Power gain	57.7	27.4	W
Price per Watt	7.42	2.46	US$/W
Weight of heat exchanger	16,300	2,140	kg
Length of heat exchanger	17.1	4.0	m
First section length	180	80	mm
Growth factor section length	21.2	0	‰
Thickness of copper thermal spreader	15.4	1.99	mm
Thickness of thermoelectric module	12.1	4.7	mm
Filling factor of thermoelectric module	0.900	0.266	–
Diameter of cooling-water channels	0.01	0.01	m
Flow of cooling water	19.7	14.8	m^3/h

Rys. 5.19 Optymalne rozwiązania w odniesieniu do mocy elektrycznej i kosztów jednostkowych (131)

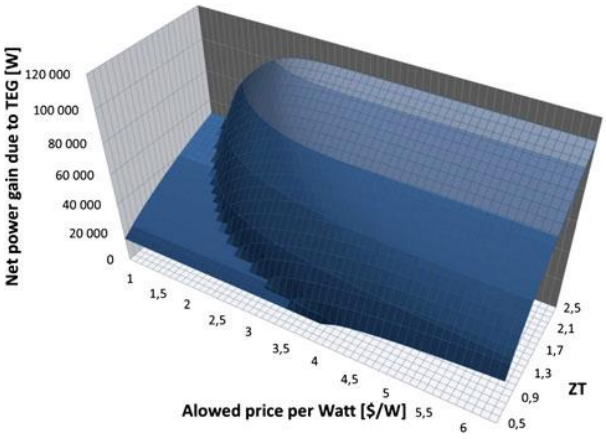
W pierwszym wierszu tabeli wystąpił błąd, ponieważ jednostką mocy elektrycznej (Power gain) powinien być kW, a nie W.

Proces optymalizacji pozwolił także na stworzenie wykresu dzięki, któremu można odnieść uzyskiwaną moc elektryczną do kosztów jej uzyskania Rys. 5.20.



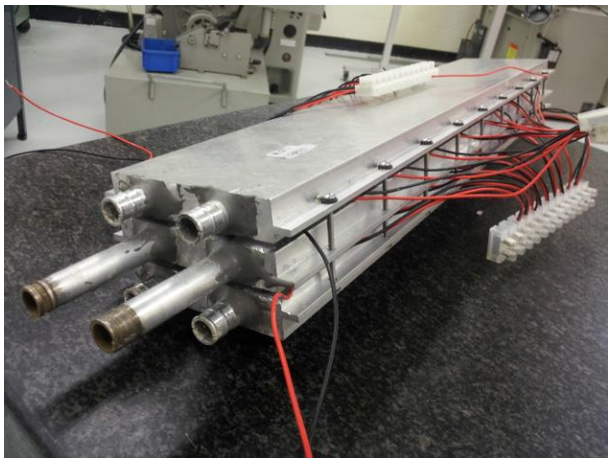
Rys. 5.20 Maksymalna moc elektryczna w funkcji kosztów za 1 W (131)

Ostatnim etapem pracy było stworzenie wykresu, który wiązał ze sobą maksymalną moc elektryczną, przewidywaną cenę za wat mocy oraz współczynnik ZT (131). Dzięki temu możliwa jest analiza opłacalności przedsięwzięcia z uwzględnieniem poprawy wydajności materiałów termoelektrycznych (Rys. 5.21).



Rys. 5.21 Maksymalna moc elektryczna generowana przez TEG przy zmiennym współczynniku ZT oraz koszcie wytworzenia 1 W energii elektrycznej (131)

W 2013 Lasage i Pagé-Potvin opublikowali wyniki badań dotyczących maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEG w układzie woda – woda przy zmieniającym się oporze elektrycznym (92). W celu przeprowadzenia badań skonstruowano prototyp urządzenia (Rys. 5.22) oraz opracowano stosowny model.



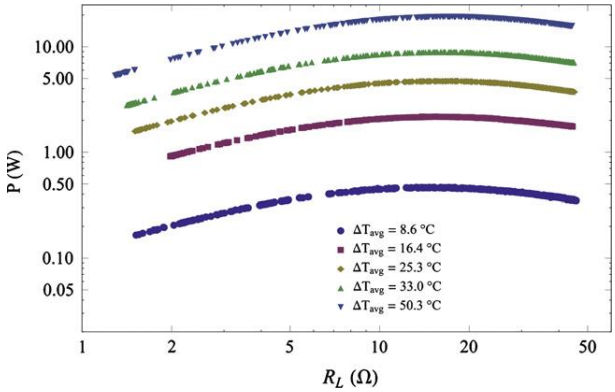
Rys. 5.22 Aluminiowy moduł termoelektryczny typu woda-woda (92)

Układ badawczy złożony był z 40 TEG typu TEG2-07025HT-SS oraz aluminiowych wymienników ciepła. Oporność elektryczna odbiornika była zmieniana w zakresie 0 – 40 Ω. Badania podzielono na kilka etapów. W pierwszym zmianę parametrów generowanego prądu elektrycznego wymuszano poprzez zmianę temperatury wody w wymienniku dostarczającym ciepło do układu. Zmienność temperatury w czasie przedstawiono na Rys. 5.23.

ΔT_{avg}	8.6 °C	16.4 °C	25.3 °C	33.0 °C	50.3 °C
$T_{H,in}$ (°C)	30.6	40.6	48.9	59.4	79.4
$T_{H,out}$ (°C)	29.4	40.0	46.7	58.3	75.0
$T_{C,in}$ (°C)	21.1	22.8	21.1	23.9	23.3
$T_{C,out}$ (°C)	21.7	25.0	23.9	27.8	30.6

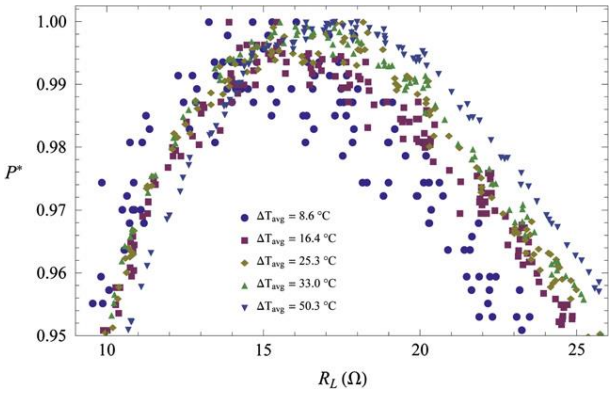
Rys. 5.23 Temperatury przed i za wymiennikami ciepła (92)

Zależność mocy elektrycznej w funkcji oporu elektrycznego dla poszczególnych temperatur przedstawiono na Rys. 5.24.



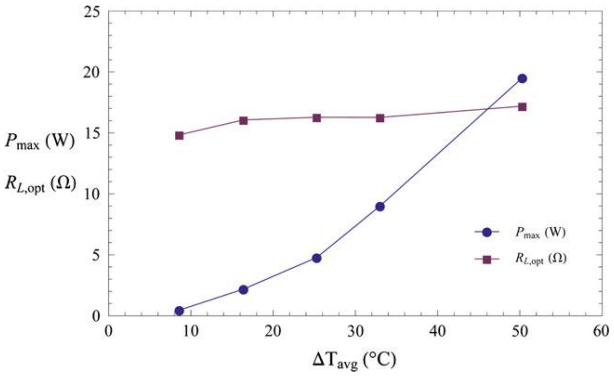
Rys. 5.24 Wpływ zwiększania oporu elektrycznego na moc elektryczną (92)

Dodatkowo, aby uszczegółowić otrzymane dane, autorzy sporządzili wykres względnej mocy elektrycznej[3] w funkcji oporu elektrycznego (Rys. 5.25).



Rys. 5.25 Wpływ zmiany oporu elektrycznego na względną moc elektryczną (92)

Kolejno dla poszczególnych różnic temperatur określono wartości oporu elektrycznego układu, dla których moc elektryczna przyjmuje największą wartość (Rys. 5.26).



Rys. 5.26 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji różnicy temperatur (92)

Na podstawie powyższego wykresu można stwierdzić, że maksymalna moc elektryczna niezależnie od różnicy temperatur między stroną ciepłą, a zimną generatora termoelektrycznego, jest generowana dla zbliżonej wartości oporu elektrycznego.

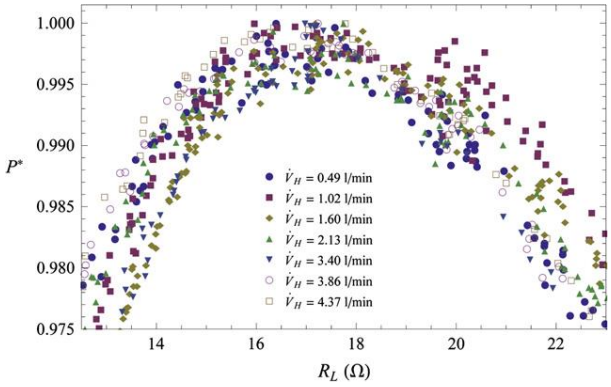
Kolejno autorzy sprawdzili, w jaki sposób zmienia się względna moc elektryczna przy zmiennej oporności elektrycznej układu, dla różnych strumieni przepływu cieczy w wymienniku dostarczającym ciepło do generatorów. Temperatura na wlocie do wymiennika ciepłego oscylowała w granicach 78,9 – 81,1 °C; w przypadku wymiennika zimnego było to odpowiednio 20,0 – 20,6 °C (Rys. 5.27).

[3] Względna moc elektryczna – stosunek chwilowej mocy elektrycznej do maksymalnej mocy elektrycznej w ustalonych warunkach temperaturowych

Hot flow (°C):	0.49 L/min	1.02 L/min	1.60 L/min	2.13 L/min	3.40 L/min	3.86 L/min	4.37 L/min
$T_{H,in}$	79.4	80.6	78.9	79.4	78.9	78.9	81.1
$T_{H,out}$	57.8	62.2	68.3	71.1	72.2	73.9	75.0
$T_{C,in}$	20.0	20.0	20.0	20.0	20.6	20.6	20.6
$T_{C,out}$	30.0	30.0	32.2	32.2	32.8	32.8	32.2

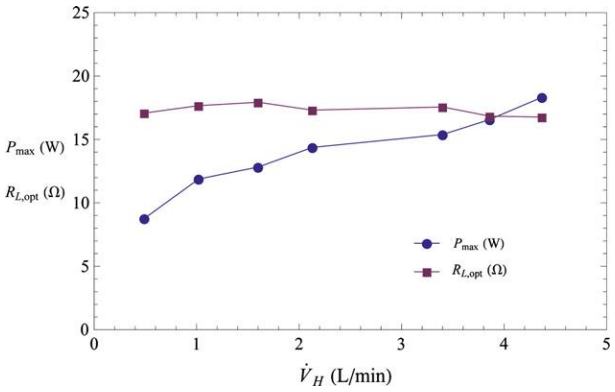
Rys. 5.27 Temperatury wlotowe oraz wylotowe z wymienników ciepła (92)

Przepływ w wymienniku zimnym ustalono na poziomie 2,5 l/min, a w wymienniku ciepłym zmieniano w zakresie 0,49 – 4,37 l/min. Wyniki pomiarów przedstawia Rys. 5.28.



Rys. 5.28 Wpływ zmiany strumienia przepływu czynnika grzewczego na względną moc elektryczną (92)

Podobnie jak dla poprzedniego wariantu badań, dla kolejnych wartości strumienia przepływu, autorzy sporządzili wykres zależności wartości oporu elektrycznego układu, dla których moc elektryczna przyjmuje największą wartość (Rys. 5.29).



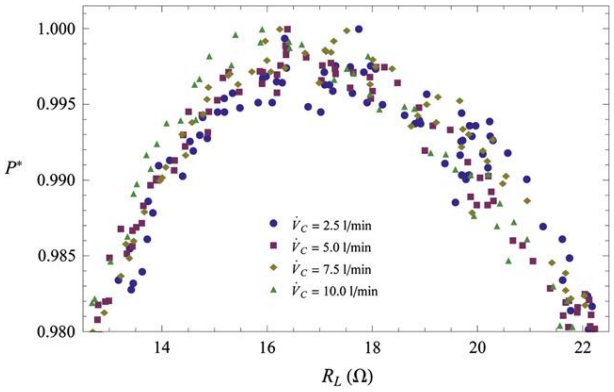
Rys. 5.29 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji strumienia przepływu w wymienniku dostarczającym ciepło do TEG (92)

Analiza danych na wykresie wskazuje, że maksymalna moc elektryczna jest silnie związana ze strumieniem przepływu i w zależności od jego wartości zmienia się w zakresie 8 – 18 W. Oporność elektryczna odbiornika pozostaje natomiast na prawie stałym poziomie.

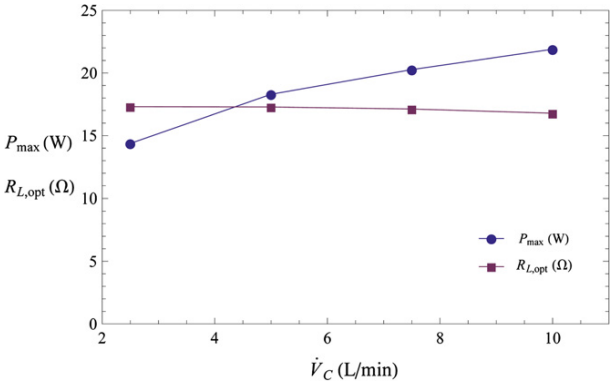
Analogicznie kolejne badania dotyczyły wpływu wartości strumienia przepływu czynnika przez wymiennik odbierający ciepło z generatorów. Temperatury w układzie przedstawia Rys. 5.30. Wyniki zaprezentowano odpowiednio na Rys. 5.31 oraz na Rys. 5.32.

Cold flow (°C):	2.5 L/min	5.0 L/min	7.5 L/min	10.0 L/min
$T_{H,in}$	79.4	78.9	78.3	79.4
$T_{H,out}$	71.1	70.0	69.4	70.0
$T_{C,in}$	20.0	20.0	19.4	20.0
$T_{C,out}$	32.2	25.0	22.8	23.9

Rys. 5.30 Temperatury wlotowe oraz wylotowe z wymienników ciepła (92)



Rys. 5.31 Wpływ zmiany strumienia przepływu czynnika chłodzącego na względną moc elektryczną (92)



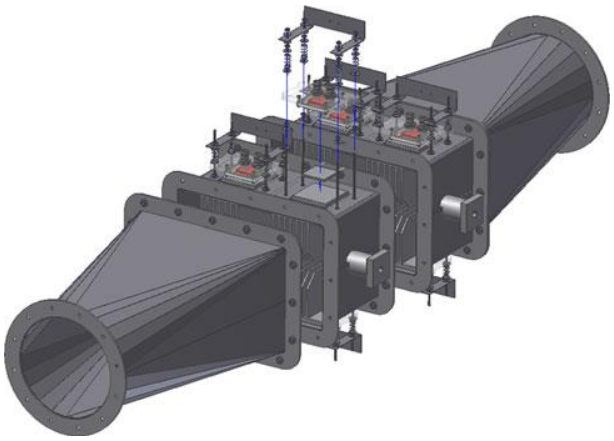
Rys. 5.32 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji strumienia przepływu w wymienniku odbierającym ciepło z TEG (92)

Podobnie jak w przypadku zmian strumienia w wymienniku ogrzewającym generatory, zmiana strumienia w wymienniku chłodzącym ma wpływ na maksymalną moc elektryczną. Zmiany strumienia od wartość 2,5 l/min do wartości 10 l/min powodują zmianę mocy elektrycznej w zakresie od 14 do 22 W. Opór elektryczny odbiornika nie wykazuje większej wrażliwości na zmiany strumienia przepływu.

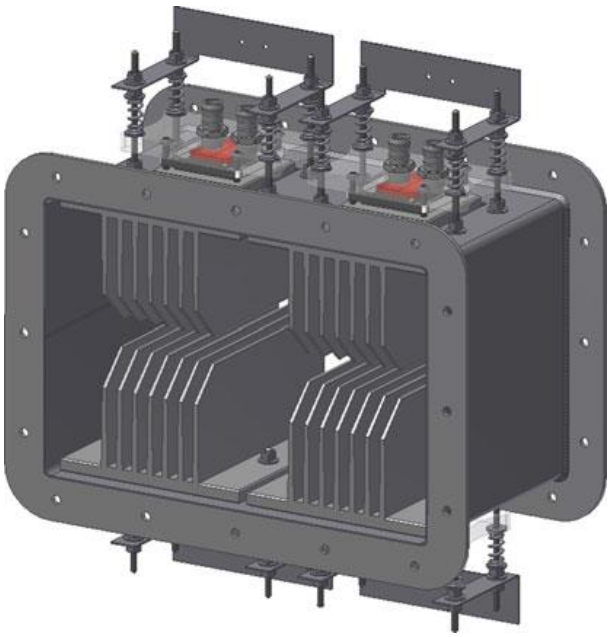
Przedstawione wyniki badań wskazują na dużą zależność wartości generowanej mocy elektrycznej w układzie od strumieni przepływu w wymiennikach po stronie ciepłej i zimnej generatora, a przede wszystkim od występującej różnicy temperatur.

W 2013 roku Bradzil i Pospisil opublikowali badania dotyczące implementacji modułu termoelektrycznego w kotle na biomasę (129). Według koncepcji autorów, źródłem ciepła miały być spaliny z kotła natomiast odbiór ciepła realizowany miał być przez wodne wymienniki ciepła. Projekt

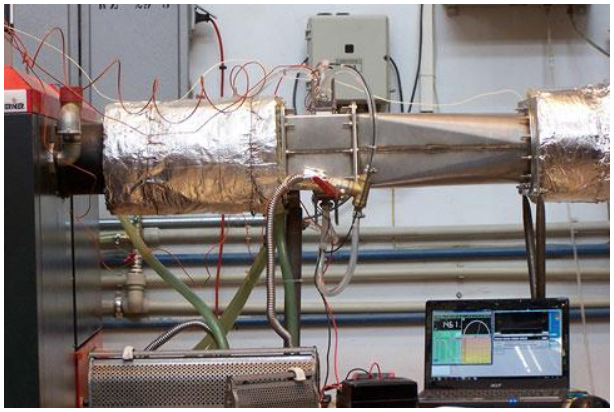
modułu termoelektrycznego przedstawiono na Rys. 5.33 oraz Rys. 5.34, a gotowy prototyp na Rys. 5.35.



Rys. 5.33 Projekt modułu termoelektrycznego do zastosowania w kotle na biomasę (129)

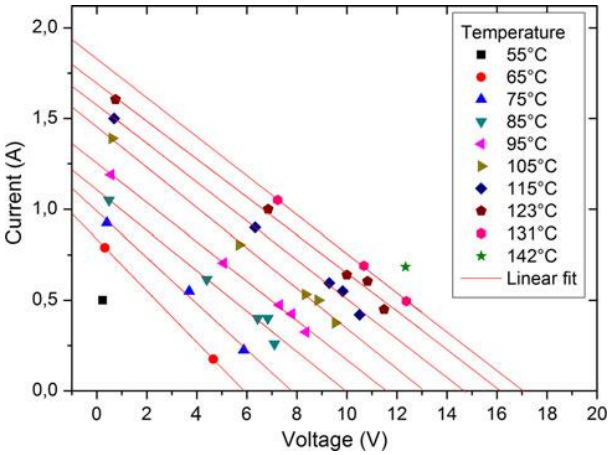


Rys. 5.34 Pojedyncza sekcja modułu termoelektrycznego (129)

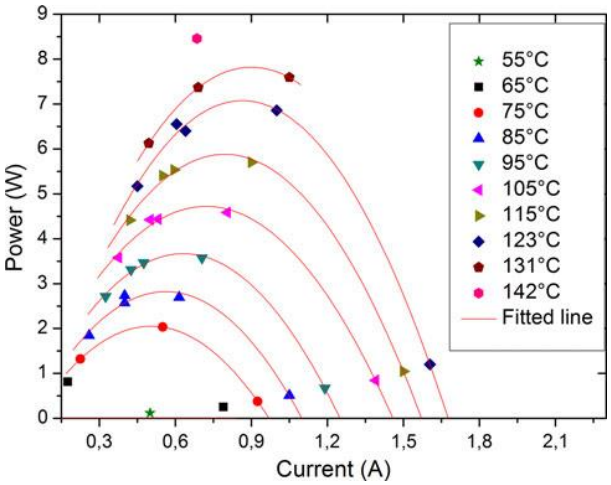


Rys. 5.35 Prototyp modułu termoelektrycznego (129)

W prototypie zastosowane generatory typu TEG-127-230-23e oraz kocioł Verner A251.1 o nominalnej mocy cieplnej wynoszącej 25 kW. Temperatura wody chłodzącej TEG wynosiła między 25 a 27 °C. Charakterystyki elektryczne dla kolejnych różnic temperatur zaprezentowano odpowiednio na Rys. 5.36 oraz Rys. 5.37.



Rys. 5.36 Prąd w funkcji napięcia dla wybranych temperatur strony ciepłej generatorów (129)



Rys. 5.37 Moc elektryczna w funkcji natężenia dla wybranych temperatur strony ciepłej generatorów (129)

Dla różnicy temperatur między stroną ciepłą i zimną TEG równej 112,8 °C uzyskano maksymalnie 8,5 W mocy elektrycznej. Temperatura spalin w kotle bez modułu termoelektrycznego wynosiła około 223 °C, natomiast z modułem 185 °C. Przeprowadzone badania wskazują, że możliwe jest odzyskanie części ciepła odpadowego, a tym samym zwiększenie sprawności wytwarzania ciepła w kotle na biomasę. Modułowa, segmentowa budowa urządzenia umożliwia uzyskanie większych mocy elektrycznych oraz dalsze obniżenie temperatury spalin. Według autorów otrzymana energia elektryczna może być wykorzystana np. do napędu pompy obiegowej.

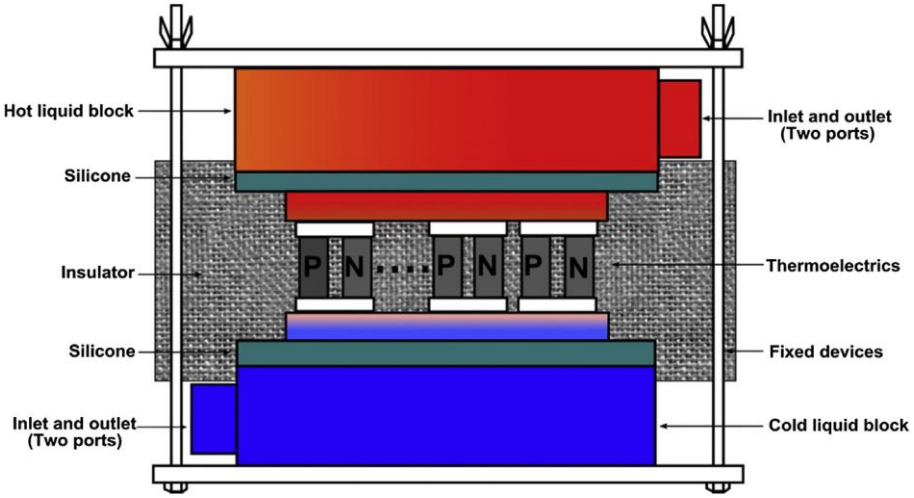
Liu et al. w 2014 opublikował wyniki badań dotyczące niskotemperaturowego generatora termoelektrycznego o mocy elektrycznej równej 500 W (93). W pierwszym etapie badań autorzy

spośród 5 różnych TEG (Rys. 5.38) wybierali najbardziej efektywny. W tym celu stworzyli moduł badawczy, który przedstawiono na Rys. 5.39.

Table 1 – Properties of different modules.

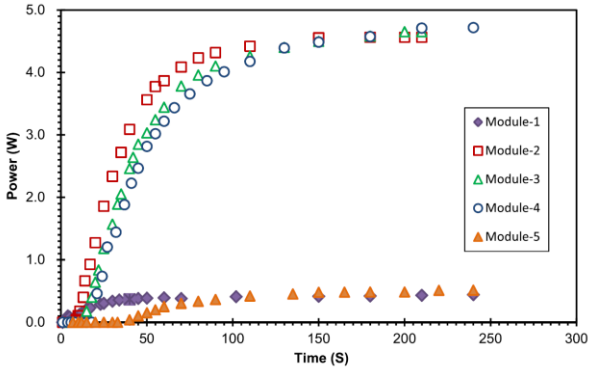
	Cost (US$)	Materials	Size (cm^2)	No. of couples	Insulator plate thickness (mm)
Module 1	10.5	PbTe	16	127	0.8
Module 2	4.5	Bi_2Te_3	16	127	0.65
Module 3	7.7	Bi_2Te_3	16	127	0.65
Module 4	3.4	Bi_2Te_3	16	127	0.6
Module 5	30.8	PbTe	9	241	0.7

Rys. 5.38 Właściwości badanych TEG (93)



Rys. 5.39 Schemat modułu testowego (93)

Ciepło było dostarczane i odbierane z generatora z wykorzystaniem wodnych wymienników ciepła. W trakcie badań różnica temperatur między stroną ciepłą i zimną ogniwa była utrzymywana na stałym poziomie 140 °C. Zależność generowanej mocy elektrycznej od czasu, przedstawiono na Rys. 5.40.

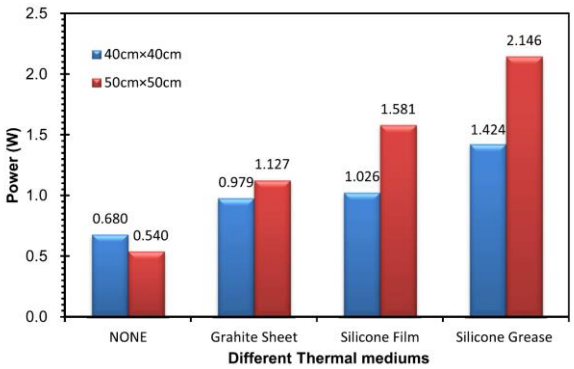


Rys. 5.40 Maksymalna moc elektryczna generowana przez różne TEG (93)

Analizując powyższy wykres można dostrzec, że trzy TEG (2, 3, 4) mają bardzo zbliżone charakterystyki mocy elektrycznej, natomiast dla dwóch modułów (1 oraz 5) maksymalna

generowana moc elektryczna jest o wiele niższa. Wynika to z faktu, że materiał termoelektryczny zastosowany do budowy generatora 1 oraz 5 (PbTe) charakteryzuje się wysokim współczynnikiem ZT przy znacznie większych temperaturach niż Bi_2Te_3, który z kolei został zastosowany w pozostałych TEG. Z badanych ogniw do dalszych pomiarów wybrano moduł numer 4, który dodatkowo jest najtańszy.

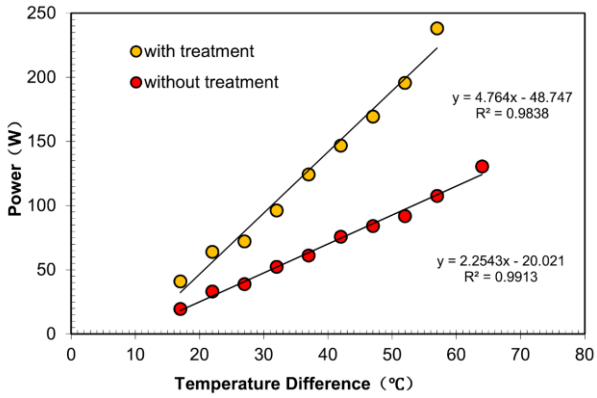
W dalszej części badań autorzy określali wpływ zastosowanego materiału termoprzewodzącego znajdującego się między ogniwem a wymiennikami ciepła po stronie zimnej i ciepłej ogniwa na maksymalną moc elektryczną w ustabilizowanych warunkach temperaturowych (T_H *= 80 °C,* T_C *= 20 °C).* Badania przeprowadzono dla dwóch wielkości wybranego ogniwa 40 mm x 40 mm oraz 50 mm x 50 mm. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 5.41.



Rys. 5.41 Wpływ zastosowanego materiału termoprzewodzącego na maksymalną moc elektryczną generowaną przez TEG (93)

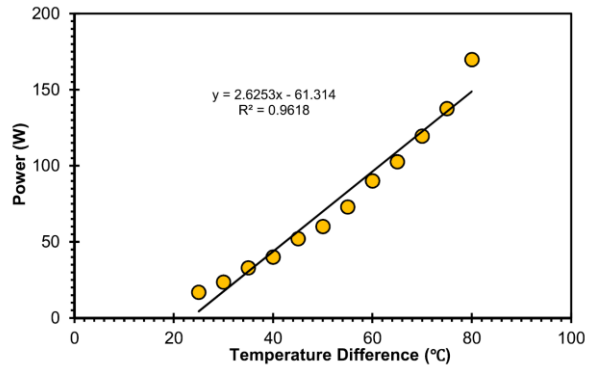
Ogniwo charakteryzowało się najwyższą mocą elektryczną przy zastosowaniu pasty termoprzewodzącej na bazie krzemu. Jednak z uwagi na jego wysoki koszt autorzy postanowili zastosować metodę polegającą na adhezyjnym naklejaniu (przy użyciu śladowych ilości żelu krzemionkowego) na powierzchnię generatorów arkuszy grafitowych. Dzięki temu, możliwe było uniknięcie pozostawania pęcherzyków powietrza między okładką generatora, a arkuszem grafitu.

W celu zbadania efektowności tej metody autorzy przebadali 2 moduły termoprzewodzące składające się ze 100 TEG każdy. Ogniwa w jednym z modułów były pokryte warstwą grafitu, natomiast te z drugiego modułu były jej pozbawione. Dla tych samych temperatur cieczy w wymiennikach ciepła dla grupy pokrytej grafitem uzyskano różnicę temperatur równą 64 °C oraz maksymalną moc elektryczną równą 230 W. Dla drugiej grupy natomiast było to odpowiednio 57 °C oraz 130 W. Wyniki badań (Rys. 5.42) potwierdziły skuteczność zaproponowanego rozwiązania.



Rys. 5.42 Zależność między mocą elektryczną, a różnicą temperatur (93)

Ostatecznie autorzy zbudowali moduł termoelektryczny składający się z 96 TEG. Ciepło było dostarczane i odbierane z modułu z wykorzystaniem wodnych wymienników ciepła. Otrzymaną zależność maksymalnej mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur przedstawia Rys. 5.43.

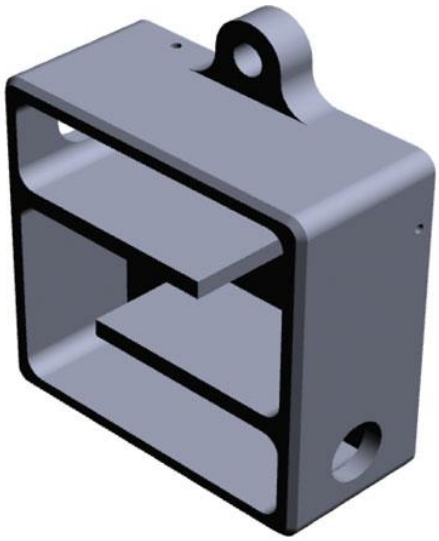


Rys. 5.43 Zależność między mocą elektryczną a różnicą temperatur (93)

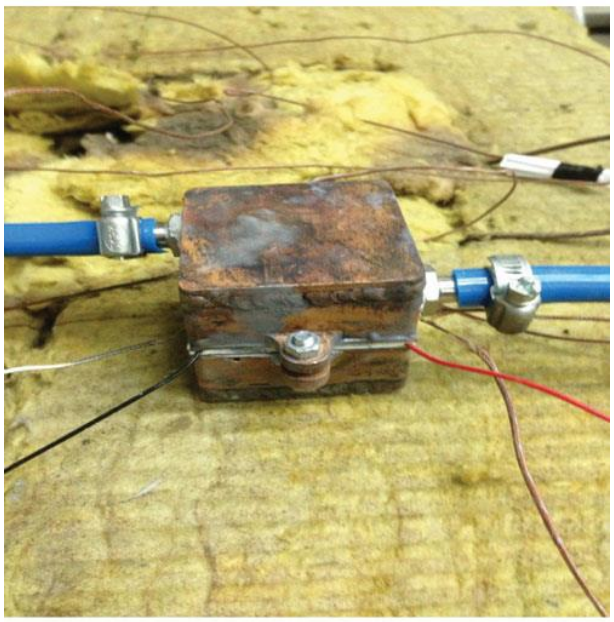
Na podstawie otrzymanych wyników autorzy określili zależność między różnicą temperatur, a mocą elektryczną. Ocenili, że przy różnicy temperatur wynoszącej około 200 °C moc elektryczna generowana przez moduł wynosiłaby około 500 W.

Baskaya et al. w 2015 roku opublikowali wyniki badań dotyczących efektywności stosowania generatorów termoelektrycznych w gazowym kotle kondensacyjnym (128). Badania podzielono na dwie części: w pierwszej autorzy badali wydajność zespołu generatorów termoelektrycznych w zmiennych warunkach temperaturowych i elektrycznych. W części drugiej opracowali model matematyczny wymiennika ciepła gazowego kotła kondensacyjnego w oparciu o który analizowano najbardziej korzystną lokalizację dla modułu termoelektrycznego.

Do badań dotyczących wydajności generatora termoelektrycznego opracowano specjalne wymienniki ciepła (Rys. 5.44).



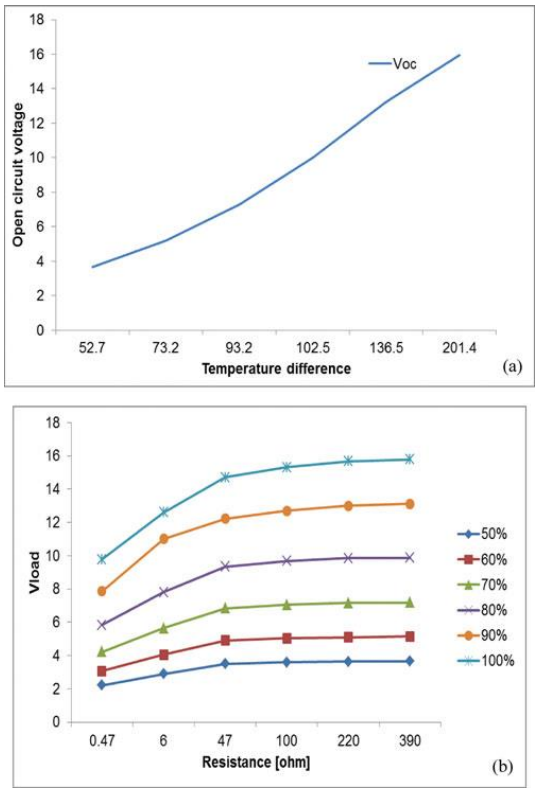
(a)



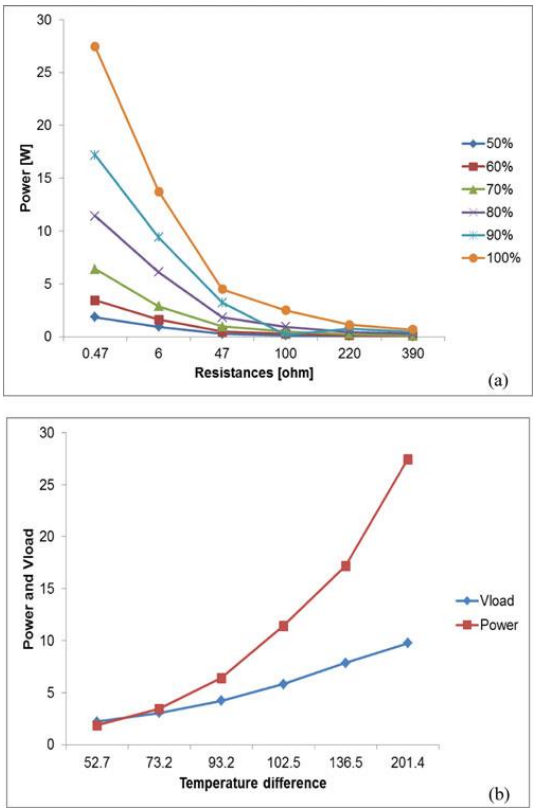
(b)

Rys. 5.44 Projekt wymiennika ciepła (a), moduł testowy (b) (128)

Ciepło do TEG było dostarczane poprzez miedziany blok do którego była przytwierdzona grzałka elektryczna. Odbiór ciepła był realizowany przez wymiennik wodny. Temperatura wody chłodzącej była utrzymywana na poziomie 10 °C. Do badań zastosowano zestaw złożony z 7 generatorów typu TEHP1-1264-0,8 o wymiarach 40 mm x 40 mm x 4 mm każdy. Dla opisanego zestawu otrzymano wyniki, które przedstawiono na Rys. 5.45 oraz Rys. 5.46.



Rys. 5.45 Zależność napięcia obwodu otwartego od różnicy temperatur (a) zależność napięcia ładowania od oporu elektrycznego dla różnych nastaw autotransformatora (b) (128)

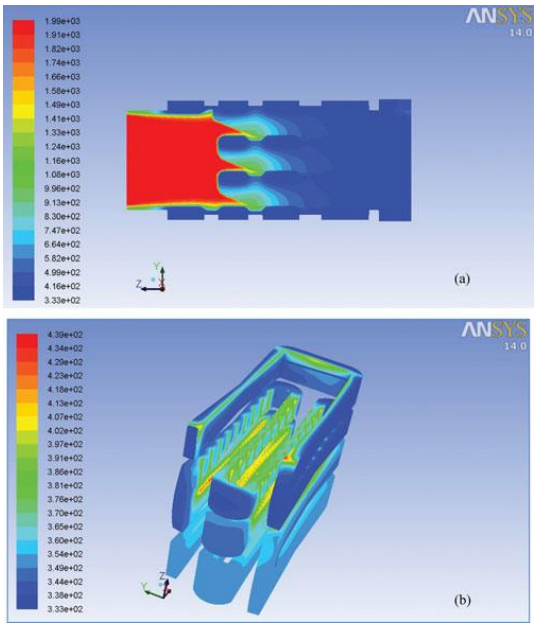


Rys. 5.46 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej od oporu dla różnych nastaw autotransformatora (a) zależność maksymalnej mocy oraz napięcia od różnicy temperatur przy oporze równym 0,47 Ω (b) (128)

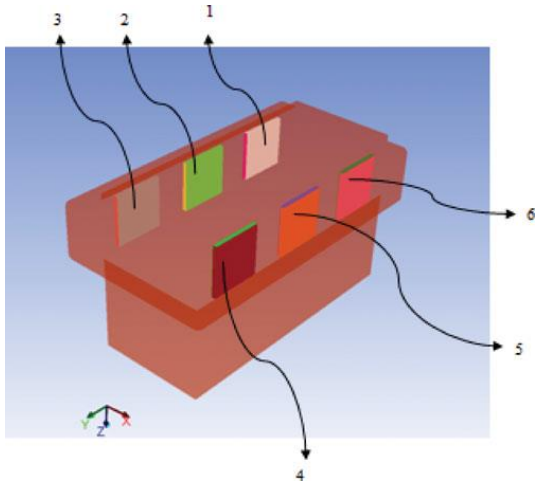
Wykres maksymalnej mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur sporządzono dla oporu elektrycznego równego 0,47 Ω, ponieważ przy tej wartości rejestrowano najwyższe wartości mocy elektrycznej.

Zgodnie z danymi zawartymi na Rys. 5.46 największa zmierzona moc elektryczna wynosiła około 27,5 W przy różnicy temperatur wynoszącej 201,4 °C.

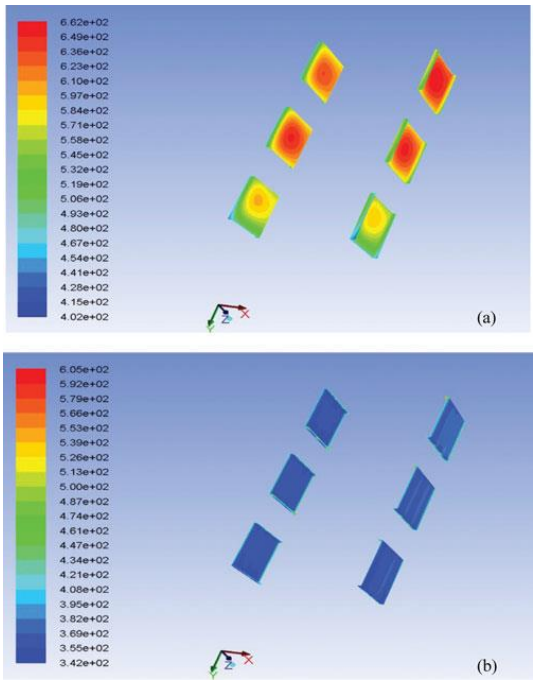
W drugiej części badań stworzono model matematyczny wymiennika ciepła gazowego kotła kondensacyjnego w oparciu o który wytypowano optymalne miejsce w którym powinien znajdować się zespół termoelektryczny. Rozkład temperatur w poszczególnych częściach wymiennika przedstawiono kolejno na Rys. 5.47, Rys. 5.48 oraz Rys. 5.49.



Rys. 5.47 Rozkład temperatur w wymienniku po stronie spalin, rozkład temperatur w wymienniku po stronie wodnej (b) (128)



Rys. 5.48 Różne proponowane lokalizacje TEG w wymienniku ciepła kotła kondensacyjnego (128)



Rys. 5.49 Rozkład temperatury po stronie ciepłej TEG (a), rozkład temperatury po stronie zimnej TEG (b) (128)

Temperatury po stronie ciepłej i zimnej TEG dla każdej z 6 wytypowanych przez autorów lokalizacji przedstawiono na Rys. 5.50.

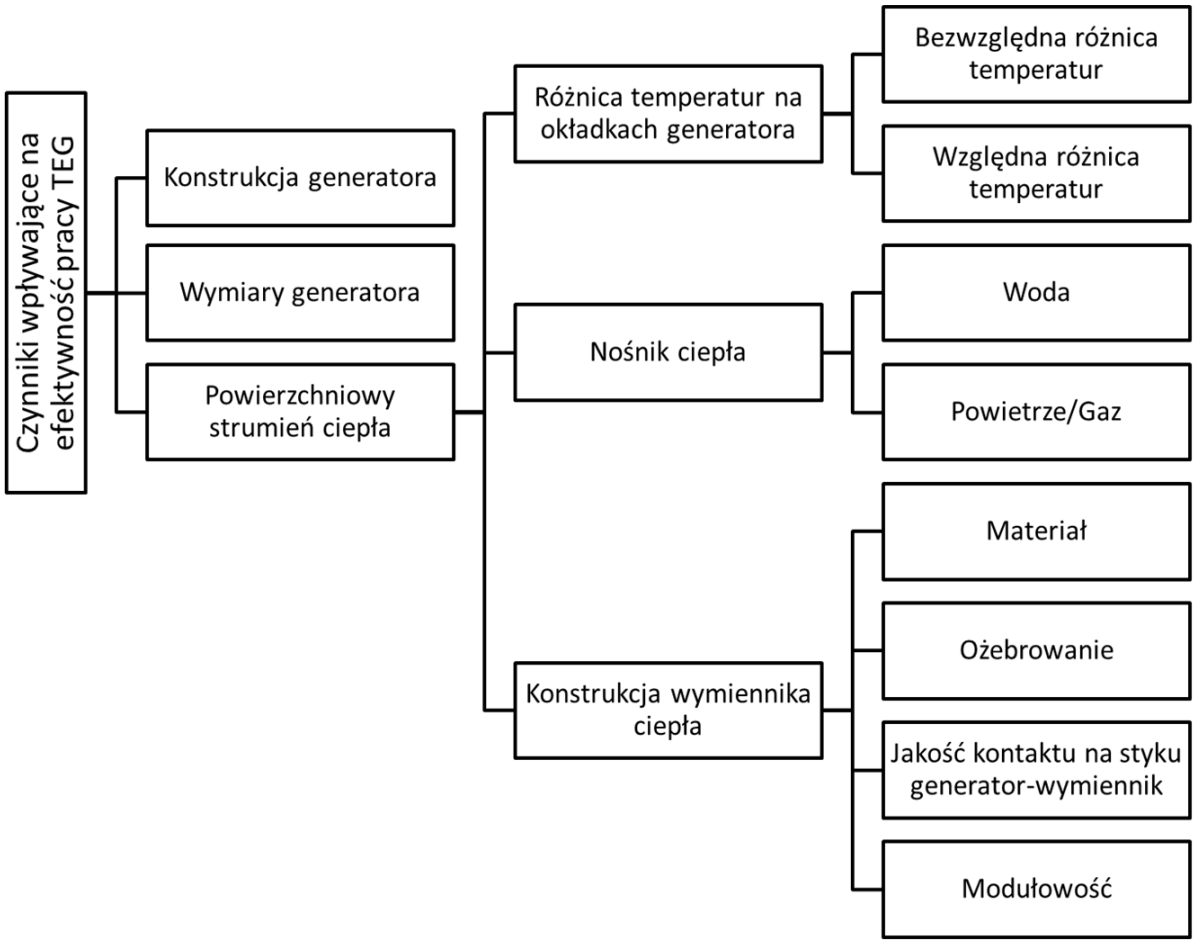
TEG	Hot surface temperature (°C)	Cold surface temperature (°C)
1	318.52	91.64
2	327.75	94.58
3	279.54	91.1
4	272.16	92.57
5	329.35	101.31
6	344.13	107.68

Rys. 5.50 Temperatura strony ciepłej oraz zimnej TEG, dla wybranych lokalizacji w wymienniku ciepła kotła kondensacyjnego (128)

Dla najbardziej korzystnej lokalizacji autorzy przewidują, że wykorzystując 7 generatorów termoelektrycznych możliwe będzie uzyskanie 120 W mocy elektrycznej, która w całości pokryje zapotrzebowanie kotła na energię pomocniczą.

6. Warunki pracy generatora termoelektrycznego

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej określono czynniki, od których uzależniona jest efektywna praca generatora termoelektrycznego. Na Rys. 6.1 schematycznie przedstawiono te czynniki, które najsilniej determinują efektywność pracy TEG.



Rys. 6.1 Czynniki wpływające na efektywność pracy generatora termoelektrycznego

Podstawowym czynnikiem, który wpływa na efektywność pracy TEG jest jego konstrukcja. Przede wszystkim ważna jest geometria elementów półprzewodnikowych, ich ilość oraz materiał z jakiego są wykonane. Zgodnie ze źródłami literaturowymi (27) w temperaturach do 200 °C najwyższą wartością bezwymiarowego współczynnika dobroci termoelektrycznej *ZT* charakteryzuje się tellurek bizmutu (Bi_2Te_3). Z uwagi na to w badaniach uwzględniono termogeneratory, które zbudowane są z użyciem tego związku.

Zastosowanie komercyjnie dostępnych TEG implikuje ograniczony wybór pomiędzy określonymi wielkościami generatorów. Zakres wielkości TEG obejmuje następujące wymiary geometryczne ogniwa: 30 mm x 30 mm, 35 mm x 35 mm, 40 mm x 40 mm, 50 mm x 50 mm, 56 mm x 56 mm. Do badań wykorzystano moduły o wielkości 50 mm x 50 mm oraz 56 mm x 56 mm.

Ostatnim z czynników warunkujących pracę generatora termoelektrycznego jest powierzchniowy strumień ciepła przepływający przez termogenerator. W przypadku TEG istnieje konieczność przekazania na okładkę ciepłą oraz odbioru z okładki zimnej jak największego strumienia ciepła, przez powierzchnię około 25 cm^2. Na ilość przekazanego ciepła wpływają trzy podstawowe czynniki: różnica temperatur między okładką ciepłą i zimną TEG, czynnik pośredniczący w wymianie ciepła oraz konstrukcja wymienników ciepła.

Wybór czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła determinuje użyteczny zakres różnicy temperatur. O ile w przypadku gazu, górna granica temperatury dla takiego układu wynosi kilkaset stopni, o tyle w układach wodnych temperatura ta nie powinna przekraczać 110 – 120 °C. Temperatura wody przy odpowiednio wysokim ciśnieniu może osiągnąć praktycznie dowolną wartość, lecz maksymalna temperatura w systemie cieplnym jest uzależniona od wytrzymałości elementów wchodzących w skład określonej instalacji (pompy, zawory, uszczelnienia, przewody oraz elementy pomiarowe).

W prowadzonych badaniach skupiono się na systemach wodnych.

Przy analizie pracy układu termoelektrycznego należy uwzględniać zarówno względną jak i bezwzględną różnicę temperatur. Zależność między generowaną siłą elektromotoryczną, a położeniem określonej różnicy temperatur na skali temperatur opisano w akapicie 5.2. Prowadzone badania muszą uwzględnić matematyczny opis zależności między generowaną siłą termoelektryczną, a względną różnicą temperatur.

Podczas implementacji TEG w systemie cieplnym krytycznym czynnikiem jest przekazanie jak największego strumienia ciepła na okładkę TEG. Wymaga to zaprojektowania wymiennika ciepła spełniającego to zadanie z uwzględnieniem parametrów czynnika i geometrii ogniwa.

7. Projekt wymiennika ciepła modułu TEG

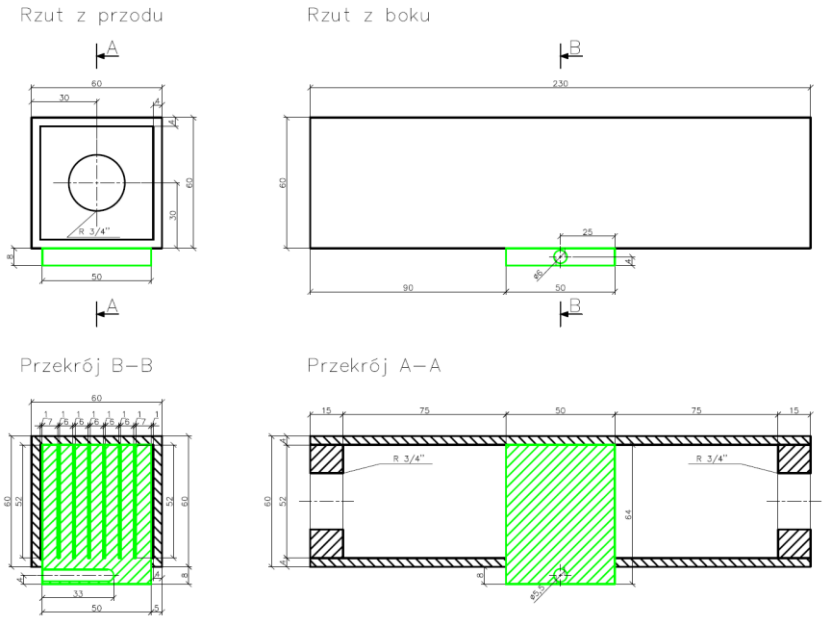
Ze względu na brak na rynku dedykowanych wymienników ciepła przystosowanych do współpracy z generatorami termoelektrycznymi zdecydowano o zaprojektowaniu autorskiego urządzenia. Przy projektowaniu wymienników ciepła, których zadaniem jest dostarczanie i odbieranie ciepła z TEG, należy wziąć pod uwagę wiele kryteriów. Pierwszym z nich jest określenie wielkości powierzchni wymiany ciepła zarówno po stronie pierwotnej jak i wtórnej. Wielkość powierzchni po stronie wtórnej (powierzchnia wymiennika stykająca się z generatorem) dla wymiennika dostarczającego ciepło do generatora jest determinowana wielkością konkretnego termogeneratora. W prowadzonych badaniach testowano TEG o wielkościach 50 mm x 50 mm oraz 56 mm x 56 mm. Wielkość powierzchni wymiany ciepła po stronie pierwotnej (powierzchnia wymiennika omywana przez czynnik pośredniczący w wymianie ciepła), z uwagi na konieczność przekazania dużego strumienia ciepła, powinna być możliwie jak największa. Przy projektowaniu wymiennika ciepła należy uwzględnić prędkość i charakter przepływu czynnika przez wymiennik (charakter burzliwy).

Kolejnym aspektem przy projektowaniu wymiennika ciepła jest wybór materiału, z którego wymiennik będzie wykonany. Ze względu na wartość współczynnika przewodzenia ciepła wybór należy ograniczyć do metali: stali, aluminium oraz miedzi. W przypadku stali czarnej współczynnik przewodzenia ciepła wynosi około 50 W/mK, dla aluminium jest to wartość w zakresie 160 – 200 W/mK w zależności od stopu oraz 370 – 400 W/mK dla miedzi. Za stosowaniem stali przemawia przede wszystkim łatwość obróbki oraz niska cena. Ma ona jednak zasadnicze wady tj. dużą podatność na korozję oraz najniższy współczynnik przewodzenia ciepła spośród wytypowanych metali. Pierwszy problem można rozwiązać stosując stal nierdzewną, jednak wiąże się to z drastycznym zmniejszeniem wartości współczynnika przewodzenia ciepła, którego wartość jest równa około 17 W/mK. Miedź charakteryzuje się najwyższą wartością współczynnika przewodzenia ciepła, jest jednak stosunkowo droga i uciążliwa w obróbce. Z opisywanych materiałów najlepszym kompromisem jest aluminium. Jest wyraźnie tańsze niż miedź, nie jest podatne na korozję, charakteryzuje się wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła, a obróbka aluminium jest tylko nieznacznie trudniejsza niż stali. Z uwagi na przytoczone argumenty do budowy wymiennika ciepła wybrano aluminium.

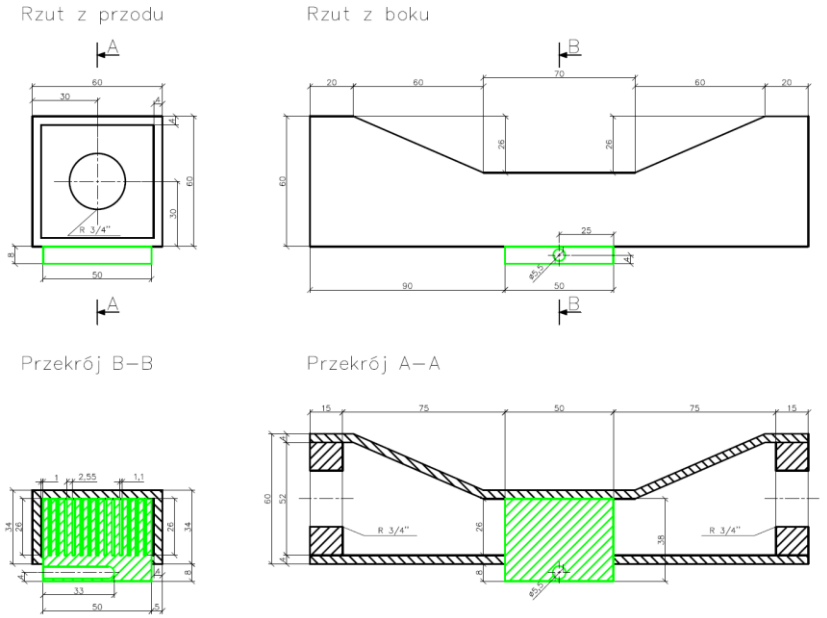
Konstrukcja wymiennika ciepła powinna łączyć dwie podstawowe cechy: zapewniać możliwie dużą powierzchnię wymiany ciepła po stronie pierwotnej oraz być mało skomplikowana.

Przy uwzględnieniu przedstawionych warunków brzegowych wykonano obliczenia numeryczne różnych konstrukcji wymienników. W oparciu o uzyskane wyniki wybrano dwa warianty, dla których

możliwy do przekazania strumień ciepła miał najwyższą wartość. Na podstawie danych liczbowych wykonano projekty dwóch wymienników ciepła wykonanych z aluminium - Rys. 7.1 oraz Rys. 7.2.



Rys. 7.1 Projekt aluminiowego wymiennika ciepła (wariant 1 – „wysoki")



Rys. 7.2 Projekt aluminiowego wymiennika ciepła (wariant 2 – „niski")

W obu przypadkach wymiennik składa się z dwóch zasadniczych części: obudowy oraz rdzenia. Obudowa została zaprojektowana jako wykonana z kwadratowej rury aluminiowej o boku 60 mm oraz grubości ścianki równej 4 mm. Rdzeń wymiennika został wykonany z kwadratowego pręta aluminiowego o boku 50 mm. Wymiary rdzeni wymienników zostały tak dobrane, aby powierzchnia po stronie pierwotnej w obu przypadkach była jak najbardziej zbliżona. Różnica w budowie polega

na zmianie grubości (6 mm vs 2,55 mm), wysokości (55 mm vs 26 mm) oraz ilości żeber (7 vs 14). Elementy wymiennika zostały połączone ze sobą poprzez spawanie. Na końcach znajdują się nagwintowane otwory o średnicy ¾ cala umożliwiające połączenie z obiegiem wodnym. W części rdzenia, znajdującej się poza obudową, wykonano otwory, które pozwalają na umieszczenie czujnika i pomiar temperatury w pobliżu okładki generatora. Gotowe wymienniki przedstawiono na Fot. 7-1 oraz Fot. 7-2.

Fot. 7-1 Wymiennik ciepła (wariant 1)

Fot. 7-2 Wymiennik ciepła (wariant 2)

Dodatkowo przygotowano specjalny wymiennik, analogiczny do wariantu 2, w którym wymiary rdzenia zostały powiększone do wielkości 56 mm x 56 mm, tak aby możliwe było przebadanie drugiego typu generatorów.

Aby zintensyfikować procesy wymiany ciepła niezbędne jest zapewnienie jak najlepszego kontaktu między powierzchnią wymiennika a okładką termogeneratora. Z uwagi na to, powierzchnie wtórne wymienników zostały wypolerowane. Dodatkowo zweryfikowano konieczność oraz korzyści wynikające z zastosowania różnych materiałów termoprzewodzących. Otrzymane rezultaty zostały opisane w rozdziale dotyczącym wyników badań.

Ostatnim istotnym, z punktu widzenia późniejszej implementacji, czynnikiem jest modułowość opracowanego rozwiązania. W oparciu o przeanalizowane źródła literaturowe należy przyjąć, że moduł termoelektryczny przygotowany do stosowania w różnych systemach cieplnych będzie składał się z wielu generatorów. Ich liczba będzie precyzyjnie określana odpowiednio dla konkretnego systemu cieplnego. Z uwagi na to, istotne jest, aby rozwiązanie umożliwiało stworzenie modułu składającego się z dowolnej liczby generatorów. Powtarzalność poszczególnych członów zagwarantuje niskie koszty produkcji oraz ułatwia późniejszy montaż. Zaproponowane wymienniki po modyfikacji spełnią kryterium modułowości i umożliwią tworzenie wieloczłonowych modułów TEG.

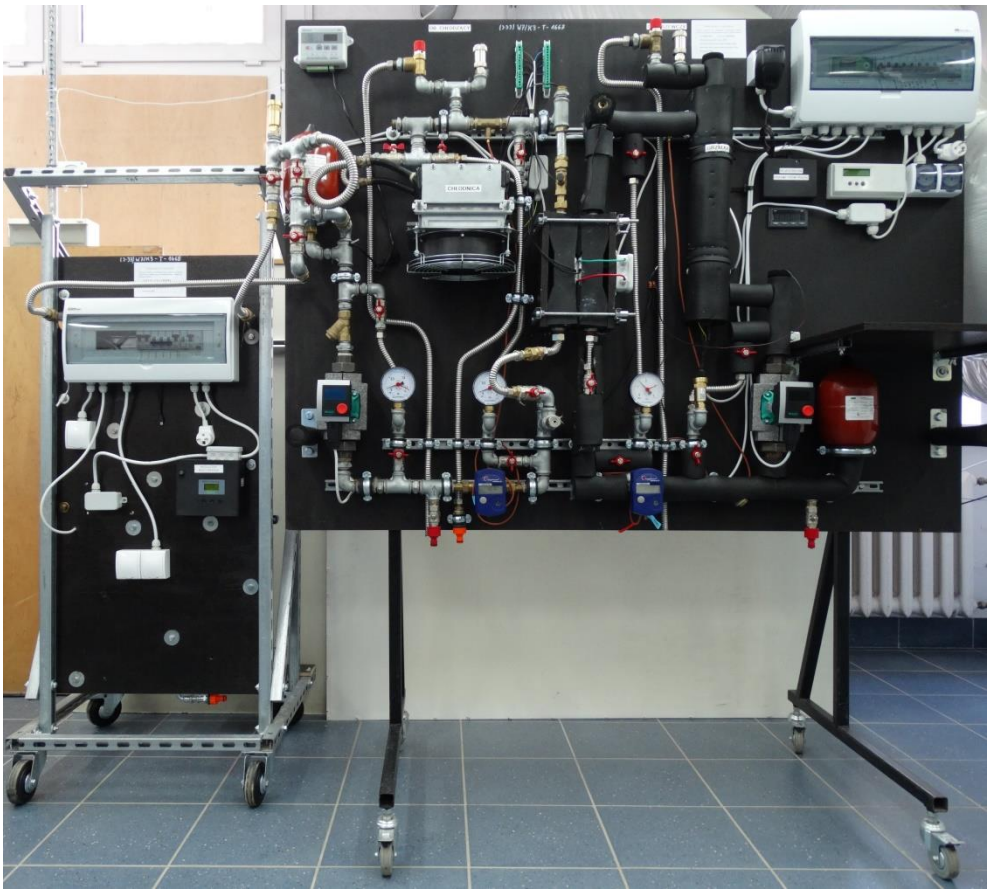
8. Stanowisko badawcze

W celu wykonania badań i sporządzenia szczegółowych charakterystyk pracy generatorów termoelektrycznych zaprojektowano i zbudowano autorskie stanowisko pomiarowe. Spełnia ono wszelkie wymagania stawiane aparaturze badawczej oraz oferuje uniwersalność i elastyczność wymaganą przez charakter badań. Posiada odpowiednie cechy i funkcjonalności:

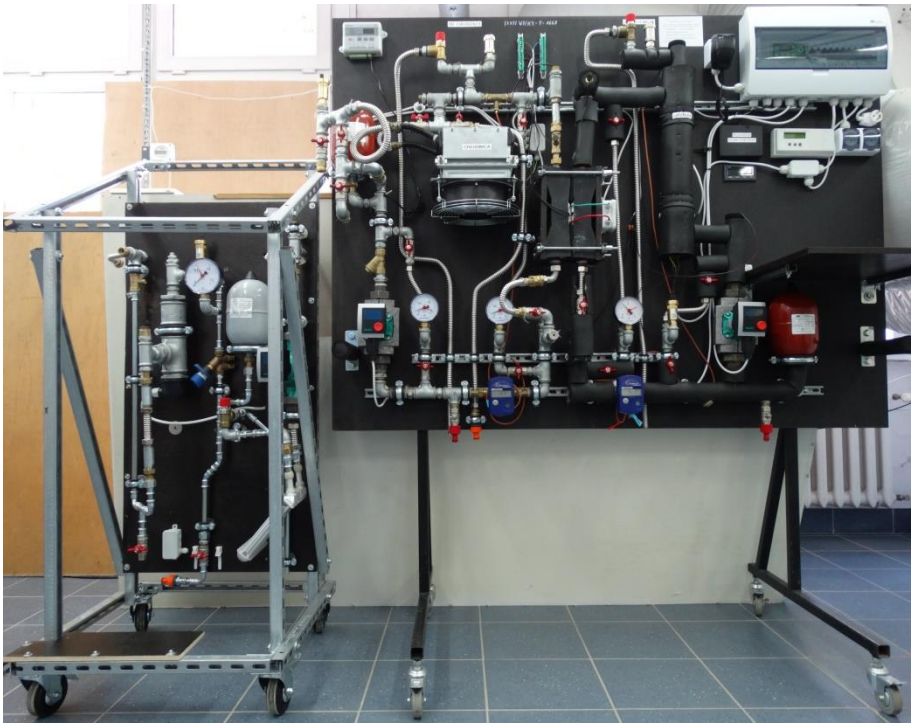
a) regulacja i stabilizacja temperatury w obiegu grzewczym i chłodzącym,
b) możliwość testowania różnych modeli termogeneratorów z różnymi wymiennikami ciepła,
c) regulacja strumienia przepływu czynnika w obiegu grzewczym i chłodzącym,
d) pomiar i rejestracja danych temperaturowych,
e) pomiar i rejestracja charakterystyk elektrycznych,
f) zabezpieczenie ciśnieniowe, temperaturowe i elektryczne.

Stanowisko składa się z wodnego obiegu dostarczającego ciepło wraz ze źródłem ciepła, zespołu wymienników przekazujących i odprowadzających strumień ciepła do badanego ogniwa TEG, wodnego obiegu odbierającego i rozpraszającego ciepło oraz rozbudowanego układu pomiarowego. Możliwe jest badanie ogniw TEG różnego rodzaju i wielkości, w zmiennych warunkach temperaturowych oraz zmiennych warunkach obciążenia elektrycznego. Sterowanie cyfrowe umożliwia powtarzalność warunków pomiarowych, a system monitoringu umożliwia bieżącą rejestrację i wstępną obróbkę danych pomiarowych.

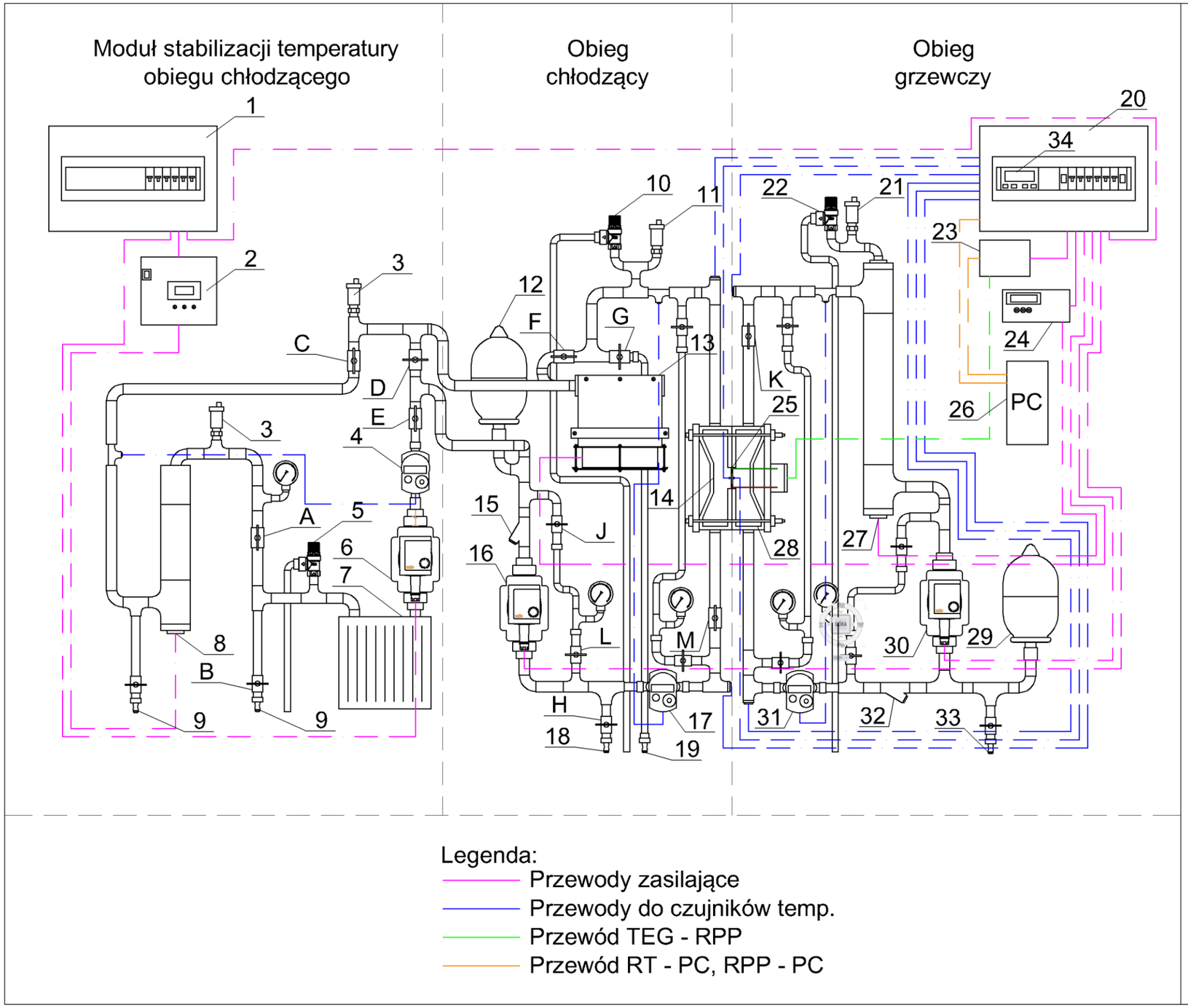
Fot. 8-1 oraz Fot. 8-2 prezentują gotowe stanowisko, a na Rys. 8.1 przedstawiono schemat jego finalnej wersji. Prowadzone badania wymuszały określone modyfikacje, które były wykonywane na bieżąco i umożliwiały uzyskanie pożądanych funkcjonalności.



Fot. 8-1 Stanowisko pomiarowe wraz z modułem stabilizacji temperatury w obiegu chłodzącym – widok od strony połączeń hydraulicznych



Fot. 8-2 Stanowisko pomiarowe wraz z modułem stabilizacji temperatury w obiegu chłodzącym - widok od strony urządzeń



1. Tablica rozdzielcza
2. Regulator mocy grzałki
3. Odpowietrznik automatyczny
4. Ciepłomierz
5. Zawór bezpieczeństwa
6. Pompa obiegowa
7. Chłodnica wody
8. Grzałka elektryczna
9. Złączka do napełniania / opróżniania
10. Zawór bezpieczeństwa
11. Odpowietrznik automatyczny
12. Naczynie wzbiorcze
13. Chłodnica wody
14. Wymiennik zimny
15. Filtr siatkowy
16. Pompa obiegowa
17. Ciepłomierz
18. Złączka do napełniania / oprożniania
19. Wylot wody zimnej
20. Tablica rozdzielcza
21. Odpowietrznik automatyczny
22. Zawór bezpieczeństwa
23. Rejestrator parametrów prądu (RPP)
24. Regulator mocy grzałki
25. Generator termoelektryczny (TEG)
26. Komputer (PC)
27. Grzałka elektryczna
28. Wymiennik ciepły
29. Naczynie wzbiorcze
30. Pompa obiegowa
31. Ciepłomierz
32. Filtr siatkowy
33. Złączka do napełniania / opróżniania
34. Rejestrator temperatur(RT)

Rys. 8.1 Schemat stanowiska pomiarowego

Obieg grzewczy stanowiska umożliwia symulację pracy dowolnego, wodnego źródła ciepła o temperaturze do 110 °C. Układ sterowania zapewnia precyzyjną i powtarzalną modulację temperatury oraz strumienia przepływu czynnika obiegowego. Źródłem ciepła w obiegu jest sterowana cyfrowo grzałka elektryczna (1000 W) o modulowanej płynnie mocy (oznaczona na schemacie numerem 27). Przepływ czynnika wymuszany jest elektroniczną pompą obiegową (nr 30). Ciepło do badanego ogniwa TEG dostarczane jest za pomocą autorskich wymienników ciepła (nr 28).

Odbiór ciepła z ogniwa TEG realizowany jest przez wodny obieg chłodzący wykorzystujący analogiczny wymiennik ciepła, jak w obiegu grzewczym. Przepływ czynnika wymuszany jest elektroniczną pompą obiegową (nr 16). Schładzanie wody obiegowej odbywa się w chłodnicy woda/powietrze z wentylatorem wymuszającym przepływ powietrza (nr 13). Możliwe jest również chłodzenie ogniwa wodą wodociągową w układzie otwartym, z pominięciem chłodnicy. Dla zapewnienia stabilnych i powtarzalnych warunków pracy obieg chłodzący wyposażono w dodatkową grzałkę elektryczną o mocy 1000 W (nr 8) oraz chłodnicę (nr 7) z własną pompą obiegową (nr 6), która pracuje szeregowo z pompą w obiegu chłodzącym (nr 16).

Zastosowana konfiguracja umożliwia uzyskanie stabilnej temperatury czynnika w obiegu chłodzącym w zakresie 15 – 75 °C oraz 20 – 110 °C w obiegu grzewczym, zależnie od wymagań prowadzonych badań.

W procesie badań stosowano pięć podstawowych trybów pracy stanowiska w odniesieniu do pracy obiegów grzewczego i chłodzącego:

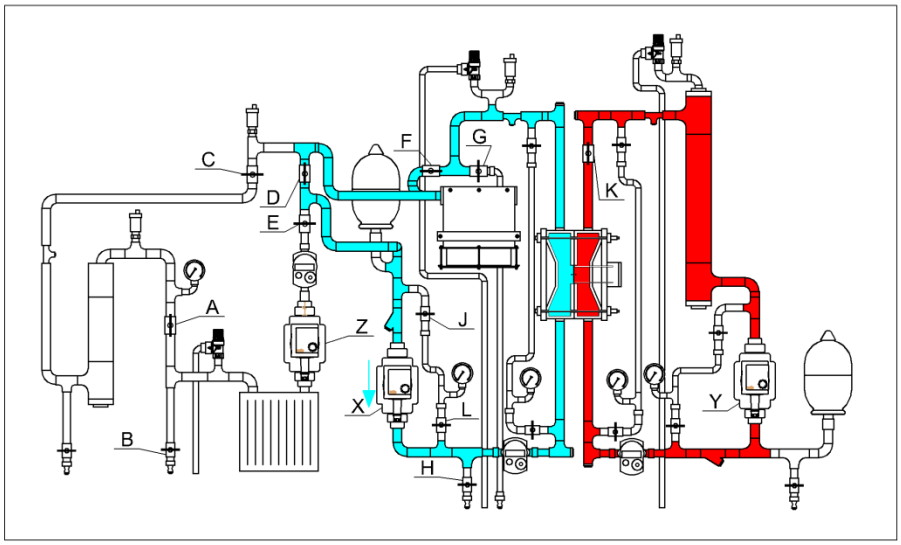
Tryb 1: w obiegu grzewczym praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury (Rys. 8.2). W trybie tym możliwe jest utrzymanie zakresu temperatury 30 - 110 °C w obiegu grzewczym i około 25 °C w obiegu chłodzącym.

Tryb 2: w obiegu grzewczym praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej (niższa temperatura obiegu chłodzącego) bez stabilizacji temperatury (Rys. 8.3). W trybie tym możliwe jest utrzymanie zakresu temperatury 20 - 110 °C w obiegu grzewczym i około 15 °C w obiegu chłodzącym.

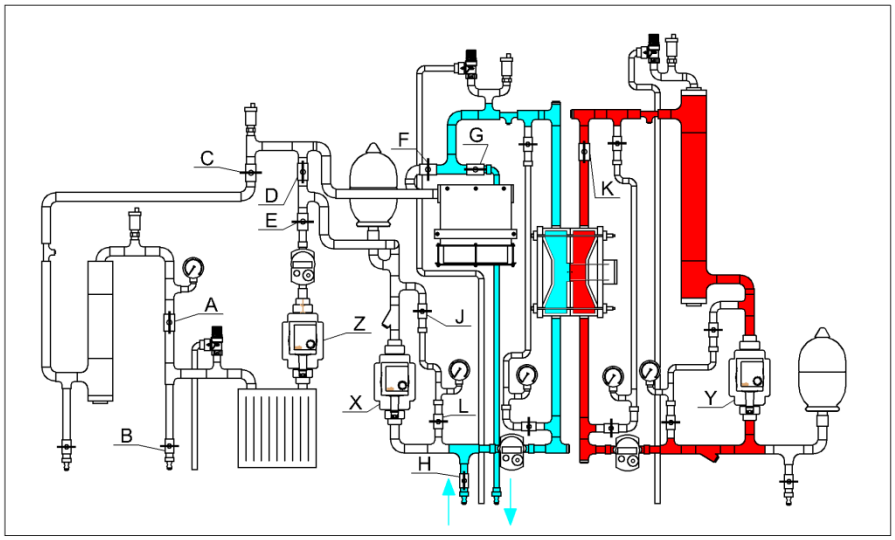
Tryb 3: w obiegu grzewczym praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła za pomocą chłodnicy wodnej ze stabilizacją temperatury za pomocą grzałki elektrycznej w obiegu chłodzącym (Rys. 8.4). W trybie tym możliwe jest utrzymanie zakresu temperatury 30 - 110 °C w obiegu grzewczym i 25 - 75 °C w obiegu chłodzącym.

Tryb 4: w obiegu grzewczym praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej (niższa temperatura obiegu chłodzącego) ze stabilizacją temperatury za pomocą grzałki elektrycznej w obiegu chłodzącym (Rys. 8.5). W trybie tym możliwe jest utrzymanie zakresu temperatury 20 - 110 °C w obiegu grzewczym i 15 - 35 °C w obiegu chłodzącym.

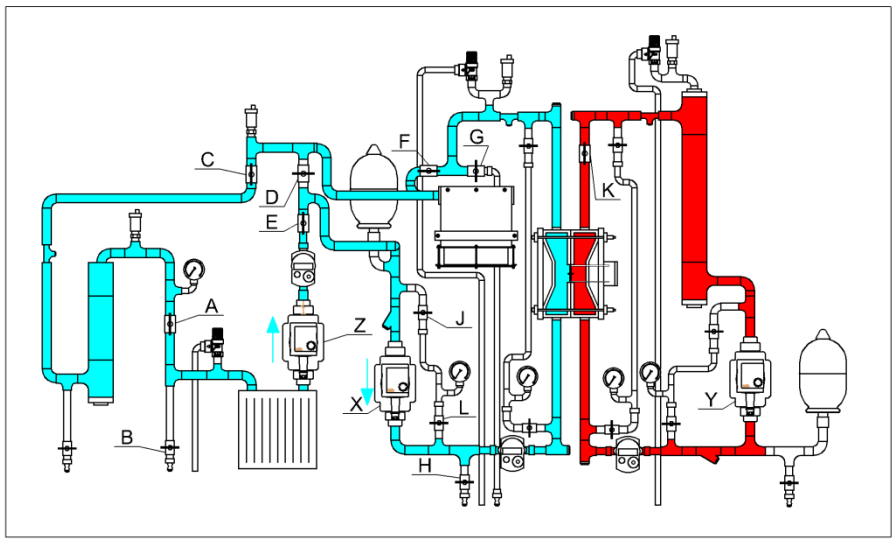
Tryb 5: praca obiegów na obejściach wymienników ciepła - w obiegu grzewczym praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury (Rys. 8.6). W trybie tym możliwe jest utrzymanie zakresu temperatury 30 - 110 °C w obiegu grzewczym i około 25 °C w obiegu chłodzącym.



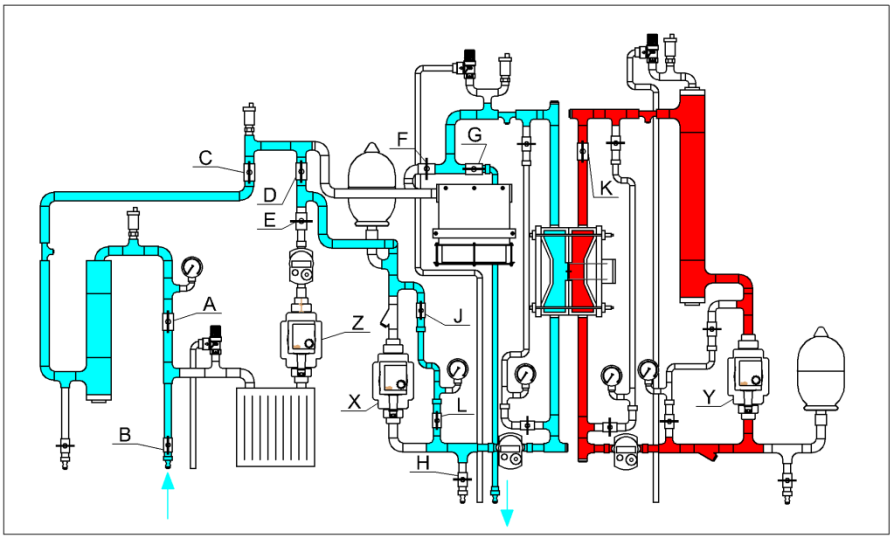
Rys. 8.2 Tryb 1 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury.



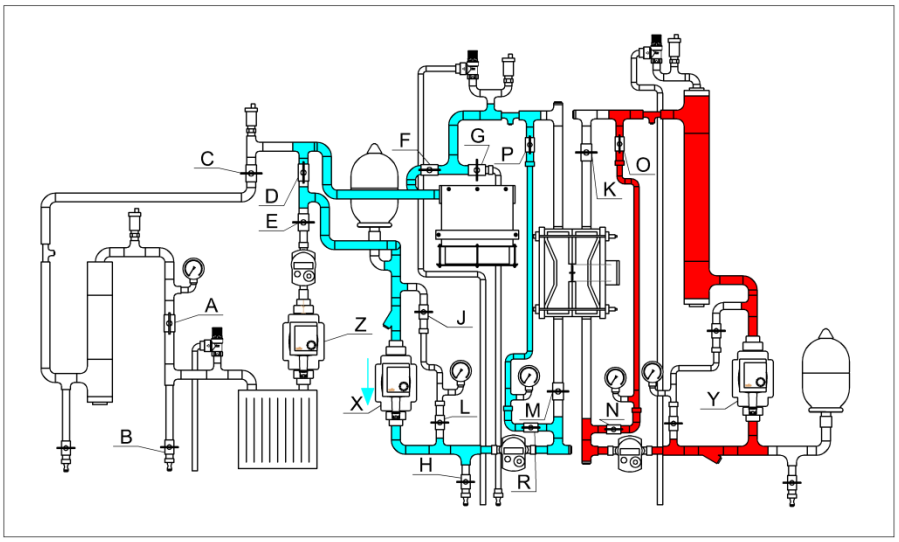
Rys. 8.3 Tryb 2 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej bez stabilizacji temperatury.



Rys. 8.4 Tryb 3 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej ze stabilizacją temperatury.



Rys. 8.5 Tryb 4 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej ze stabilizacją temperatury.



Rys. 8.6 Tryb 5 pracy stanowiska: praca obiegów na obejściach wymienników ciepła - w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury.

Zaprojektowane stanowisko umożliwia badania różnych modeli termogeneratorów. Budowa modułu wymienników ciepła wraz z TEG umożliwia wymianę ogniwa na inne w łatwy sposób. Cechę tę osiągnięto poprzez zastosowanie rozłącznych połączeń hydraulicznych, elektrycznych oraz mechanicznych łączących TEG i wymienniki ciepła. Celem uzyskania jak najlepszej jakości połączenia cieplnego między wymiennikami, a generatorem niezbędne jest zapewnienie możliwości dociśnięcia wymienników do termogeneratora. Istotna, z punktu widzenia konstrukcji złącza, jest możliwość stosowania generatorów o różnych grubościach oraz zmiana siły docisku między wymiennikami i TEG.

Z uwagi na to, połączenie to zostało wykonane jako śrubowe, dzięki czemu przy użyciu klucza dynamometrycznego można bardzo precyzyjnie ustawić siłę docisku.

Układ hydrauliczny obu obiegów zaprojektowano jako zamknięty pompowy. W celu wymuszenia przepływu czynnika zastosowano elektroniczne pompy obiegowe Wilo Stratos Pico 25/1-6 (nr 6, nr 16 i nr 30). Umożliwia to zgrubną regulację strumienia przepływu niezależnie w obu obiegach. W celu precyzyjnego ustalenia przepływu zastosowano zawory regulacyjne Honeywell Kombi 3 plus (A, K).

Z punktu widzenia wymagań i zakresu badań konieczny jest bieżący i jednoczesny pomiar oraz rejestracja licznych parametrów: temperatury, strumieni przepływu oraz parametrów elektrycznych. W celu pomiaru strumienia przepływu wody w obiegach zastosowano ciepłomierze Engelmann Sensostar 2 o przepływie nominalnym 0,6 m^3/h oraz średnicy DN 15 (nr 4, nr 17 i nr 31). Ciepłomierze charakteryzują się 2-gą klasą dokładności według normy EN 1434, czyli przy przepływie równym przepływowi nominalnemu charakteryzują się błędem wskazania równym 2,04 %. Pomiar oraz akwizycja danych temperaturowych odbywa się z wykorzystaniem rejestratora Ibis PL11-MUT24. Do pomiaru temperatury zastosowano cyfrowe czujniki temperatury Dallas Semiconductor DS18B20, których błąd wskazania określony przez producenta wynosi 0,5 °C. Badania wzorcowe tego typu czujników (142) pokazały, że błąd pomiaru jest nie większy niż 0,25 °C. Czujniki temperatury umieszczone są w ochronnych tulejach miedzianych o długości 100 mm, zlokalizowanych w obu obiegach przeciwprądowo. Fakt ten oraz użycie pasty termoprzewodzącej na styku czujnika i tulei gwarantuje dużą dokładność pomiaru temperatury. Cyfrowy rejestrator temperatury (nr 34) umożliwia pomiar wartości temperaturowych wszystkich czujników w odstępach 1 sekundowych oraz ich archiwizację na komputerze klasy PC.

W celu określenia parametrów prądu elektrycznego generowanego przez TEG w ustalonych warunkach temperaturowych, niezbędne było sporządzenie charakterystyk zawierających zależność napięcia od natężenia prądu oraz mocy od natężenia.

Moc użyteczna *P* pobierana z ogniwa zależy od natężenia *I,* napięcia *U* i rezystancji obciążenia R_o, zgodnie ze wzorem:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_o} \tag{8.1}$$

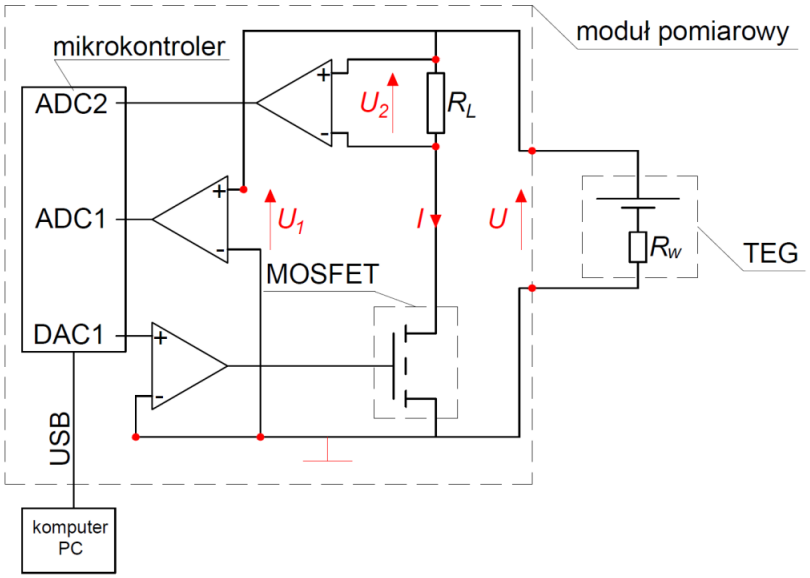
Rzeczywiste ogniwo termoelektryczne posiada niezerową rezystancję wewnętrzną, dlatego napięcie wyjściowe U_{TEG} mierzone na zaciskach ogniwa maleje wraz ze wzrostem pobieranego prądu. Napięcie na ogniwie można wyrazić w postaci równania:

$$U_{TEG} = U_{max} - I \cdot R_w \tag{8.2}$$

Można w prosty sposób wykazać, że maksymalna użyteczna moc jest pobierana z ogniwa wówczas gdy rezystancja obciążenia jest równa (nieznanej) rezystancji wewnętrznej R_w ogniwa.

W zależności od temperatur pracy parametry TEG mogą się zmieniać, dlatego zastosowanie stałego obciążenia R_0 nie pozwala (w przypadku ogólnym) na wyznaczenie maksymalnej mocy użytecznej, a zatem także na wyznaczenie rzeczywistej sprawności układu, co było istotnym elementem badań.

W celu rozwiązania tego problemu zastosowano regulowane obciążenie R_0 dobierane automatycznie. W tym celu zbudowano układ pomiarowy, którego uproszczony schemat ideowy pokazano na Rys. 8.7.



Rys. 8.7 Schemat ideowy układu pomiarowego do sporządzania charakterystyk elektrycznych TEG

Funkcję obciążenia R_0 w układzie pełni tranzystor unipolarny typu MOSFET ze wzbogacanym kanałem typu N, którego rezystancję można zmieniać (poprzez regulację napięcia bramki tranzystora) w zakresie od około 40 mΩ, do wartości rzędu MΩ, co pozwala badać praktycznie pełną charakterystykę prądowo - napięciową ogniwa. Rezystancja tranzystora zależy od przyłożonego napięcia w sposób nieliniowy. Do zadawania napięcia bramki wykorzystano mikrokontroler jednoukładowy z 12 bitowym przetwornikiem cyfrowo-analogowym oraz układ wzmacniacza, który pozwalał na zmianę rezystancji w programowalny sposób.

Pomiar mocy elektrycznej ogniwa realizowany jest metodą techniczną poprzez pomiar napięcia i prądu. Napięcie na ogniwie $U_1 = U$ było mierzone z wykorzystaniem 12 bitowego przetwornika analogowo - cyfrowego. Wzmacniacz służył do przeskalowania zakresu napięć 0 – 10 V do zakresu wejściowego przetwornika (0 - 3.3 V).

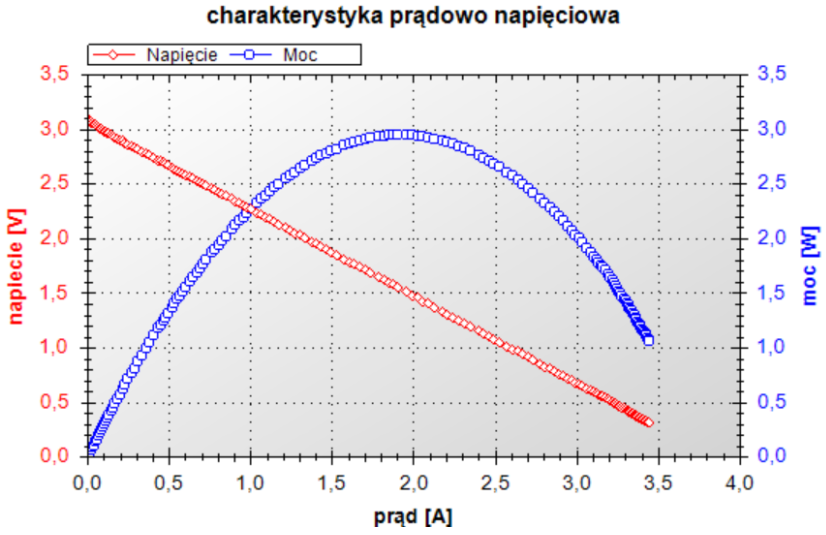
Prąd mierzono pośrednio poprzez pomiar spadku napięcia na szeregowym rezystorze R_L o oporności 50 mΩ. Spadek napięcia $U_2 = I \cdot R_L$ był wzmacniany i podawany na wejście drugiego kanału przetwornika analogowo - cyfrowego.

Układ został zaprojektowany do pomiaru napięć w zakresie 0,01 – 10 V oraz prądów w zakresie 0,01-5 A, co odpowiada mocy z przedziału 0,1 mW do 50 W. Poprawność wskazań systemu pomiarowego zweryfikowano z wykorzystaniem precyzyjnego multimetru laboratoryjnego typu FLUKE 8846A.

W celu zbadania pełnej charakterystyki ogniwa TEG, po ustaleniu termicznych warunków pracy ogniwa, w momencie uruchomienia pomiaru przez operatora algorytm sterujący układem automatycznie zmienia rezystancję obciążenia w odpowiednio dobranej sekwencji, dokonując pomiaru napięcia i prądu oraz obliczając moc maksymalną. Każdy wyzwolony pomiar jest w istocie automatycznie wykonywanym zbiorem pomiarów pełnej charakterystyki ogniwa, a wynikiem pomiaru jest tabela zawierająca napięcie, prąd oraz obliczone wartości rezystancji obciążenia i mocy maksymalnej.

Do obsługi systemu pomiarowego wykorzystano dedykowaną aplikację komputerową z graficznym interfejsem użytkownika. Komunikacja z modułem pomiarowym odbywa się z wykorzystaniem interfejsu USB. Dane pomiarowe zapisywane są w pamięci komputera w postaci plików w formacie .csv.

Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa przyjmowała charakterystyczny paraboliczny kształt, pozwalający określić maksymalną użyteczną moc elektryczną ogniwa przy danej różnicy temperatur, którą to wartość wykorzystywano do dalszej analizy. Przykładową charakterystykę elektryczną przedstawiono na Rys. 8.8.



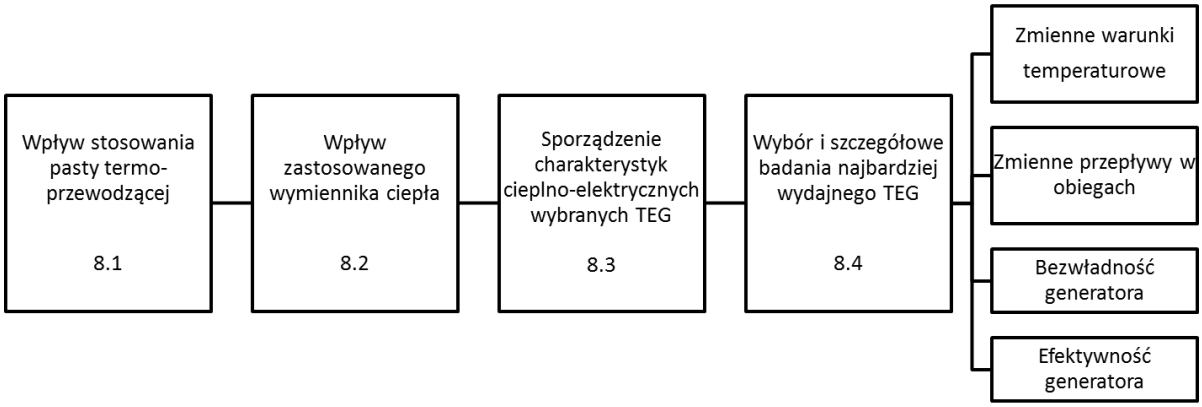
Rys. 8.8 Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa TEG

Wszystkie obiegi wodne stanowiska pomiarowego zaprojektowano jako zamknięte, wyposażone w zamknięty system zabezpieczeń (zawór bezpieczeństwa i naczynie wzbiorcze). W obiegu chłodzącym zastosowano zawór SYR 1915 o średnicy wylotu 12 mm oraz ciśnieniu otwarcia równym 1,5 bar. W obiegu grzewczym zastosowano taki sam zawór o ciśnieniu otwarcia 3,0 bar. Zastosowane naczynia wzbiorcze to Reflex S2. Całość obiegu grzewczego została zaizolowana izolacją z kauczuku.

Grzałki elektryczne, sterowniki mocy grzałek, pompy obiegowe, rejestrator temperatur, rejestrator parametrów prądu oraz wentylator chłodnicy zabezpieczono wyłącznikami nadprądowymi zlokalizowanymi w tablicach rozdzielczych (nr 1 i nr 20). Całość układu elektrycznego jest dodatkowo zabezpieczona głównym wyłącznikiem różnicowo - prądowym. Każdy z elementów metalowych instalacji jest uziemiony.

9. Plan eksperymentu

Na podstawie analizy literaturowej, mając na uwadze charakterystykę stanowiska, określono kolejność oraz zakres badań do wykonania. Na Rys. 9.1 przedstawiono schematycznie plan eksperymentu.



Rys. 9.1. Plan eksperymentu

9.1. Badanie wpływu stosowania materiału termoprzewodzącego oraz wybór jego rodzaju

W przypadku wykorzystania generatorów termoelektrycznych do wytwarzania energii elektrycznej, kluczowe jest przekazanie możliwie dużego strumienia ciepła na niewielką powierzchnię okładki generatora. Na wielkość tego strumienia, poza konstrukcją wymiennika, bezpośredni wpływ ma opór cieplny połączenia między wymiennikiem a generatorem. Wpływają na to trzy podstawowe czynniki: gładkość powierzchni po stronie wtórnej wymiennika (powierzchni styku z ogniwem), obecność materiałów termoprzewodzących oraz siła docisku wymiennika i ogniwa.

W praktycznych zastosowaniach za wystarczającą gładkość powierzchni styku uznaje się powierzchnię wypolerowaną, a optymalną siłę docisku określana producent ogniwa (dla badanych ogniw jest to 10 kg/cm^2). W trakcie badań sprawdzono wpływ obecności i rodzaju materiału termoprzewodzącego pomiędzy wymiennikami ciepła, a TEG na strumień przewodzonego ciepła.

9.2. Wybór i badanie wpływu rodzaju wymiennika ciepła na parametry generowanego prądu elektrycznego

Celem tego etapu badań była weryfikacja opartego na obliczeniach teoretycznych wyboru konstrukcji wymienników ciepła dostarczających i odbierających ciepło z ogniwa. Przebadano dwie wytypowane teoretycznie konstrukcje wymienników (tzw. wysoki i niski), w takich samych warunkach: z użyciem tego samego ogniwa, w takich samych warunkach temperaturowych i elektrycznych oraz przy tym samym przepływie cieczy w obiegach grzewczym i chłodzącym. Dla obu typów wymienników

zastosowano tą samą ilość materiału termoprzewodzącego oraz taką samą siłę docisku między wymiennikami a generatorem.

9.3. Sporządzenie charakterystyk elektrycznych oraz cieplno-elektrycznych różnych generatorów (dla różnych parametrów temperaturowych)

W kolejnym etapie badań sporządzono charakterystyki elektryczne wybranych generatorów termoelektrycznych jako zależność napięcia generowanego prądu od natężenia oraz jako zależność mocy elektrycznej od natężenia generowanego prądu. W oparciu o otrzymane wyniki wyznaczono również maksymalne moce elektryczne generowane przez badane ogniwa w określonych warunkach temperaturowych (tzw. charakterystyki cieplno-elektryczne). Ze względu na charakter porównawczy prowadzonych badań charakterystyki elektryczne sporządzano w porównywalnych warunkach pracy ogniw i systemu cieplnego. Umożliwia to porównanie charakterystyki podaży prądu elektrycznego dla każdego z generatorów.

9.4. Szczegółowe badanie wybranego generatora termoelektrycznego

Na podstawie sporządzonych charakterystyk cieplno-elektrycznych wybrano jeden rodzaj ogniwa do badań szczegółowych. Wybrano ogniowo o największej mocy elektrycznej w szerokim zakresie temperatury pracy. Wyniki wieloseryjnych badań szczegółowych pozwoliły na:

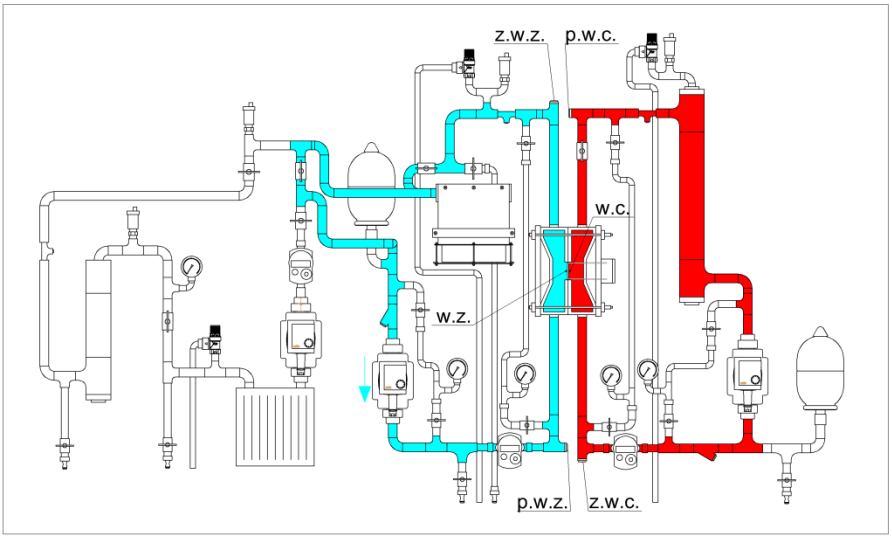
1. Wyznaczenie zależności matematycznej określającej zależność parametrów generowanego prądu od warunków temperaturowych. Umożliwia ona obliczeniowe wymiarowanie układów termoelektrycznych do współpracy z systemem cieplnym przy znanych parametrach jego pracy (temperatura, przepływ, napięcie prądu oraz wymagana moc elektryczna).
2. Określenie wpływu różnicy temperatur i jej położenia na skali temperatur na parametry generowanego prądu elektrycznego, poprzez badanie generatora w pełnym zakresie temperatur czynnika w obiegu grzewczym (15 - 75 °C) i chłodzącym (20 - 110 °C) przy stałym przepływie 0,2 m^3/h.
3. Określenie wpływu strumienia przepływu przy ustalonych temperaturach w obiegach chłodzącym (30 °C) oraz grzewczym (35 - 110 °C) przez sporządzenie charakterystyk cieplno-elektrycznych dla różnych wartości strumienia przepływu czynnika: 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 m^3/h i ich kombinacje.
4. Określenie bezwładności rozruchowej generatora poprzez określenie szybkości rozpoczęcia generowania i tempa stabilizowania się parametrów prądu przy uruchomianiu ogniwa przez skokowe podanie określonej różnicy temperatury na okładki ogniwa.
5. Określenie efektywności ogniwa jako stosunek maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo i mocy cieplnej dostarczanej do wymiennika ciepła obiegu grzewczego.

10. Wyniki badań

10.1. Wpływ materiałów termoprzewodzących

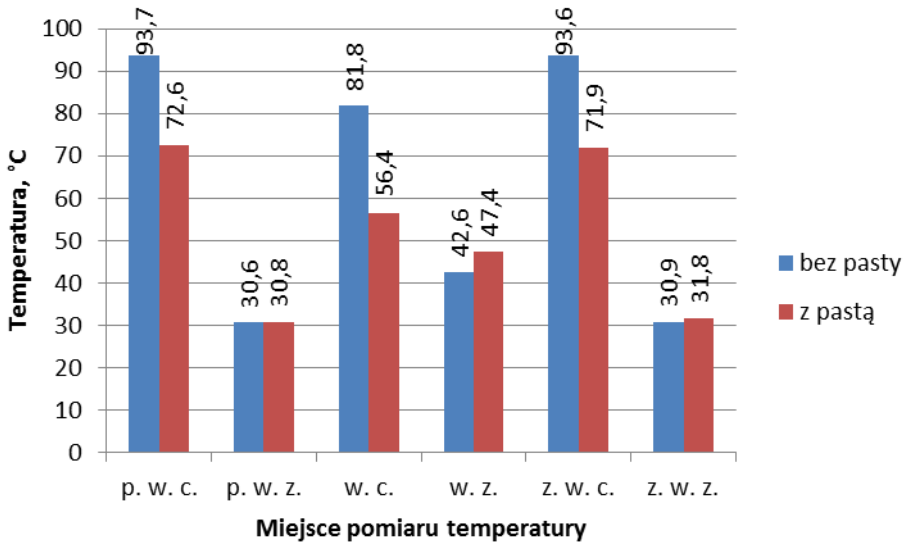
Zgodnie z planem eksperymentu w pierwszej kolejności przeprowadzono badania wpływu materiałów termoprzewodzących na styku wymienników ciepła i generatora termoelektrycznego. Na podstawie analizy danych producentów do dalszych badań wytypowano pastę termoprzewodzącą Arctic. Pasta ta charakteryzuje się wysoką wartością współczynnika przewodności cieplnej oraz dzięki półpłynnej konsystencji jest łatwa w aplikacji.

W badaniach porównawczych sprawdzano oporność cieplną styku wymienników ciepła (bez zamontowanego ogniwa): dla suchej, wypolerowanej powierzchni styku oraz z zastosowaniem warstwy pasty termoprzewodzącej. W obu przypadkach zastosowano identyczne warunki temperaturowe i tą samą siłę docisku wymienników. Podczas eksperymentu mierzono temperaturę powierzchni styku po stronie obiegu chłodzącego (1) i grzewczego (2) oraz temperaturę czynnika bezpośrednio przed i za wymiennikami (Rys. 10.1).



Rys. 10.1 Schemat rozmieszczenia czujników temperatur

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na Rys. 10.2.

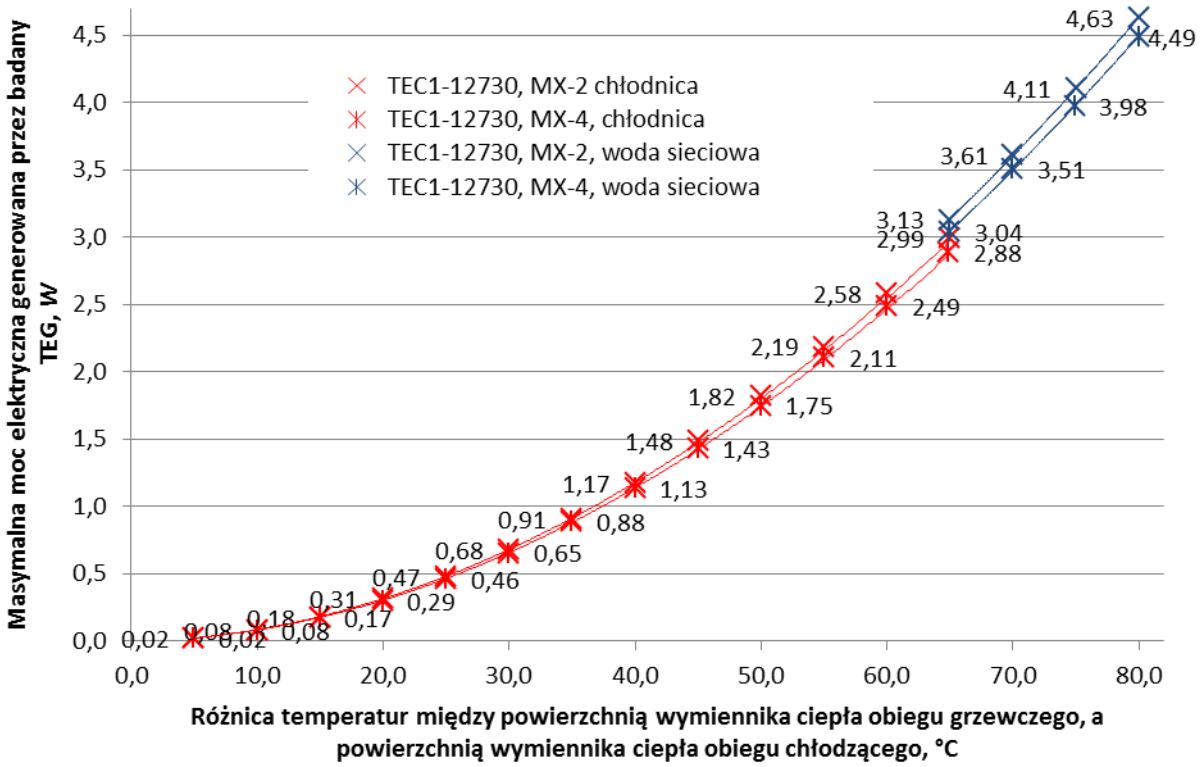


Rys. 10.2 Temperatura w określonych punktach układu w trakcie badań zasadności stosowania materiału termoprzewodzącego

Zarejestrowana różnica temperatur między powierzchniami wymienników w obiegach grzewczym i chłodzącym wyniosła 39,2 °C bez stosowania pasty termoprzewodzącej oraz 9,0 °C przy zastosowaniu pasty termoprzewodzącej. Tym samym zastosowanie pasty termoprzewodzącej umożliwiło czterokrotne obniżenie oporu cieplnego na styku wymienników ciepła. Dzięki temu możliwe jest przekazania większego strumienia ciepła przy tych samych warunkach temperaturowych.

Dokonano również badań wpływu materiału termoprzewodzącego na parametry pracy ogniwa zamontowanego między wymiennikami ciepła. Porównano maksymalne moce elektryczne wytwarzane przez termogenerator (TEC1-12730) przy określonych różnicach temperatur dla dwóch past termoprzewodzących z rodziny Arctic: MX-2 ($\lambda = 5{,}6\ W/mK$) i MX-4 ($\lambda = 8{,}5\ W/mK$). Celem zapewnienia możliwie zbliżonych warunków pomiarowych zarówno pasta MX-2 jak i MX-4 były badane w takich samych warunkach temperaturowych, przy tych samych strumieniach przepływu czynnika w obiegach oraz przy takiej samej sile docisku wymienników do generatora. W obu przypadkach na każdą z okładek generatora nałożoną taką samą ilość pasty.

Pomiary polegały na stabilizowaniu różnicy temperatur między powierzchniami wtórnymi wymienników ciepła na określonym poziomie i sporządzaniu charakterystyk elektrycznych. Różnicę temperatur ustalano od wartości 5 °C do 65 °C ze skokiem równym 5 °C dla chłodzenia z użyciem chłodnicy powietrznej oraz od 65 °C do 80 °C przy chłodzeniu sieciową wodą wodociągową. W oparciu o uzyskane wyniki sporządzono wykres zależności maksymalnej mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur, osobno dla każdej z past - Rys. 10.3.



Rys. 10.3 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEC1-12730 od różnicy temperatur między powierzchniami wymienników ciepła, dla pasty termoprzewodzącej Arctic MX-2 oraz Arctic MX-4

W pełnym zakresie temperatur pasta Arctic MX-2 umożliwiła uzyskanie wyższych maksymalnych mocy elektrycznych (od 3 % do 6 %) w stosunku do pasty Arctic MX-4. Jest to zaskakujące zważywszy na fakt wyższej wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla pasty MX-4. Jednak bardziej płynna konsystencja pasty MX-2 pozwoliła jej lepiej wypełnić nierówności powierzchni zarówno wymiennika ciepła jak i generatora, a tym samym umożliwić przekazanie większego strumienia ciepła.

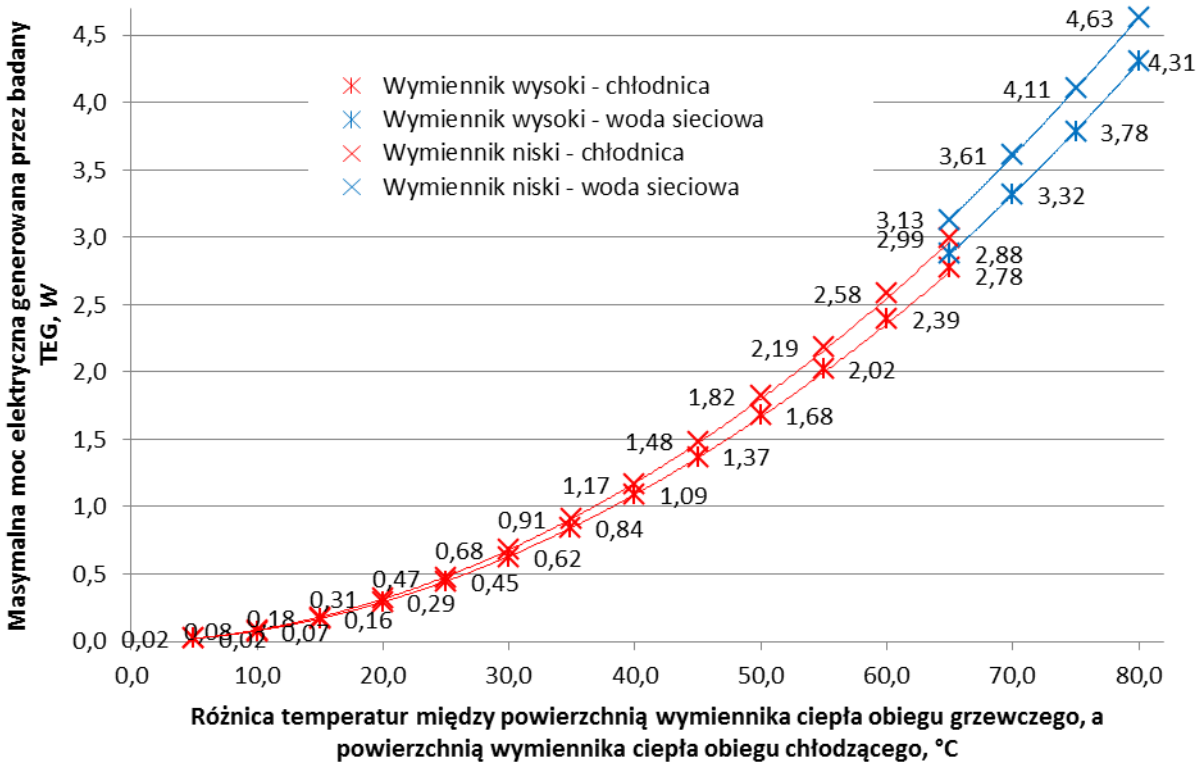
10.2. Badanie porównawcze parametrów generowanego prądu elektrycznego w przypadku zastosowania wymienników wysokich lub niskich w obiegach grzewczym i chłodzącym

Kolejno przeprowadzono badania, których istotą było wskazanie, który z zaprojektowanych wymienników ciepła jest w stanie przekazać większy strumień ciepła do generatora termoelektrycznego. Zarówno dla wymienników wysokich jak i niskich wykorzystano do badań generator TEC1-12730 o wymiarach 50 mm x 50 mm oraz grubości 3,1 mm. W obu przypadkach zastosowano pastę termoprzewodzącą Arctic MX-2, oraz jednakową siłę docisku między wymiennikami a generatorem.

W celu porównania efektywności wymienników sporządzono charakterystyki cieplno-elektryczne, w których dla kolejnych różnic temperatur między powierzchnią wymiennika obiegu grzewczego

i powierzchnią wymiennika obiegu chłodzącego, przyporządkowano maksymalną moc elektryczną generowaną przez TEG w danych warunkach temperaturowych.

Pomiary prowadzone były analogicznie do pomiarów dotyczących past termoprzewodzących. Wyniki badań przedstawiono na Rys. 10.4.



Rys. 10.4 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEC1-12730 od różnicy temperatur między powierzchniami wymienników ciepła, dla wymiennika niskiego i wysokiego

Analiza wyników badań wskazuje, że większy strumień ciepła można przekazać do generatora termoelektrycznego wykorzystując zespół wymienników niskich. W zależności od wartości różnicy temperatur maksymalna moc elektryczna generowana przez TEG przy współpracy z wymiennikami niskimi jest wyższa o od 6 % do 8 % od analogicznej mocy przy zastosowaniu wymienników wysokich.

W oparciu o przedstawione wyniki podjęto decyzję o wykorzystaniu do dalszych badań wymienników niskich.

10.3. Charakterystyki elektryczne oraz cieplno-elektryczne wybranych generatorów termoelektrycznych

Celem wyboru najlepszego termogeneratora, współpracującego z zaprojektowanymi wymiennikami ciepła, niezbędne było przeprowadzenie dokładnych pomiarów, w oparciu o które stworzono charakterystyki elektryczne oraz cieplno-elektryczne wybranych TEG.

Do badań wytypowano 6 różnych generatorów termoelektrycznych. Właściwości poszczególnych generatorów zestawiono w Tab. 10-1.

Tab. 10-1 Podstawowe parametry badanych generatorów termoelektrycznych

L.p.	Nazwa	Producent	Materiał termoelementów	Wymiary okładek, *mm*	Grubość, *mm*	Fabryczna powłoka okładek
1	G2-56-0352	Tellurex	Bi_2Te_3	56x56	5,1	Grafit
2	G2-56-0375	Tellurex	Bi_2Te_3	56x56	4,3	Grafit
3	G2-56-0570	Tellurex	Bi_2Te_3	56x56	4,0	Grafit
4	TEG1-12611-6.0	TECTEG	Bi_2Te_3	56x56	4,7	Grafit
5	TEG1-12611-8.0	TECTEG	Bi_2Te_3	56x56	5,5	Grafit
6	TEC1-12730	Wellen Tech	Bi_2Te_3	50x50	3,1	Brak

Pierwsze 5 z wymienionych w tabeli generatorów termoelektrycznych są to typowe ogniwa typu TEG, czyli według producenta, ich budowa predysponuje je do zastosowań w układach generujących prąd elektryczny. Ostatnim z badanych generatorów jest ogniwo Peltiera, czyli rodzaj silnika cieplnego, który po przyłożeniu napięcia elektrycznego wytwarza różnicę temperatur na swoich okładkach. Należy zauważyć, że budowa wszystkich z wymienionych ogniw jest taka sama, natomiast ich funkcjonalność jest narzucana niejako przez producenta. Badania pozwoliły zweryfikować czy produkty dedykowane do zastosowań termoelektrycznych są wydajniejsze niż produkt uniwersalny.

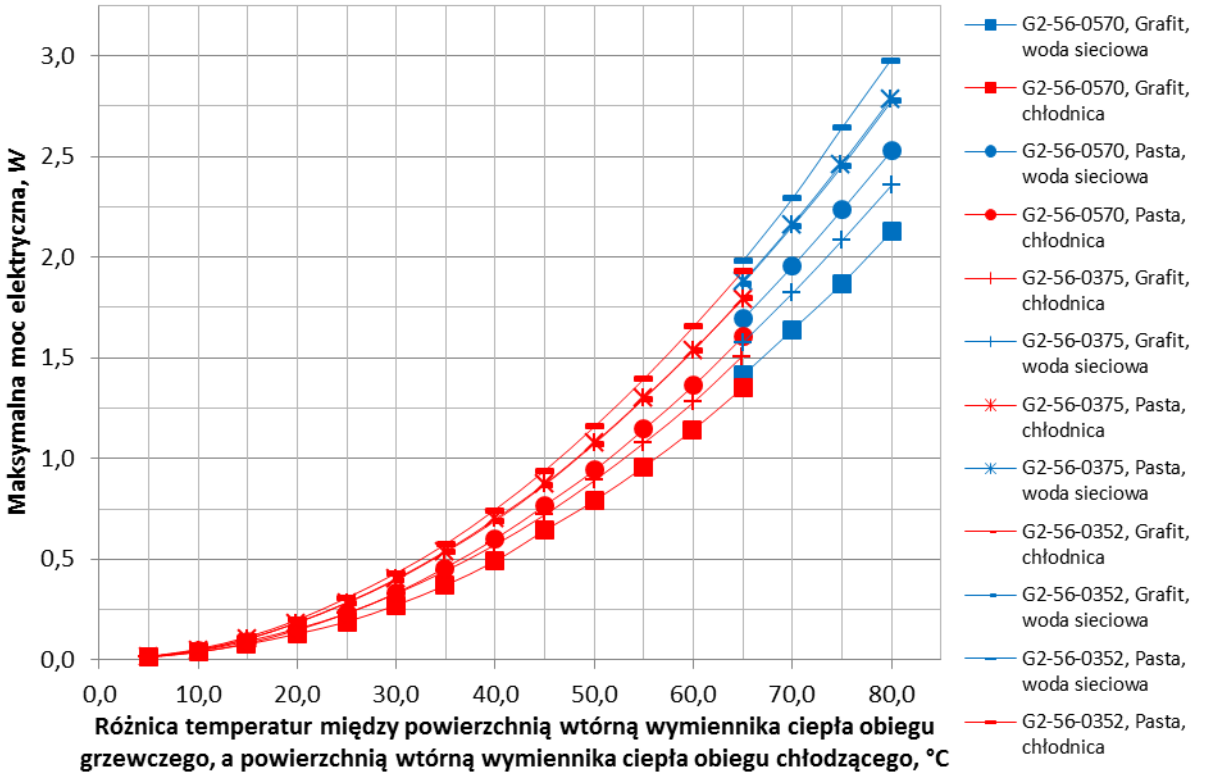
Z uwagi na różne rozmiary geometryczne ogniw do badań zastosowano 2 typy wymienników niskich, dla których powierzchnia strony pierwotnej wymiennika ciepła była identyczna, natomiast różna była powierzchnia strony wtórnej, która wynosiła odpowiednio 50 mm x 50 mm dla ogniwa numer 6 oraz 56 mm x 56 mm dla ogniw o numerze od 1 do 5.

Procedura pomiarowa była tożsama z procedurą opisaną w punkcie 10.1. Dodatkowo sporządzono pełne charakterystyki cieplno-elektryczne uwzględniające zależność napięcia prądu od natężenia oraz mocy elektrycznej od natężenia dla każdej różnicy temperatur z badanego zakresu.

Ze względu na fabryczne pokrycie okładek ogniw o numerach od 1 do 5 warstwą grafitu, przeprowadzono pełną procedurę pomiarową zarówno dla grafitu, jak i po jego usunięciu, z zastosowaniem pasty termoprzewodzącej Arctic MX-2.

10.3.1. Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych

Na Rys. 10.5 zestawiono charakterystyki maksymalnej mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur dla generatorów o numerze od 1 do 3.



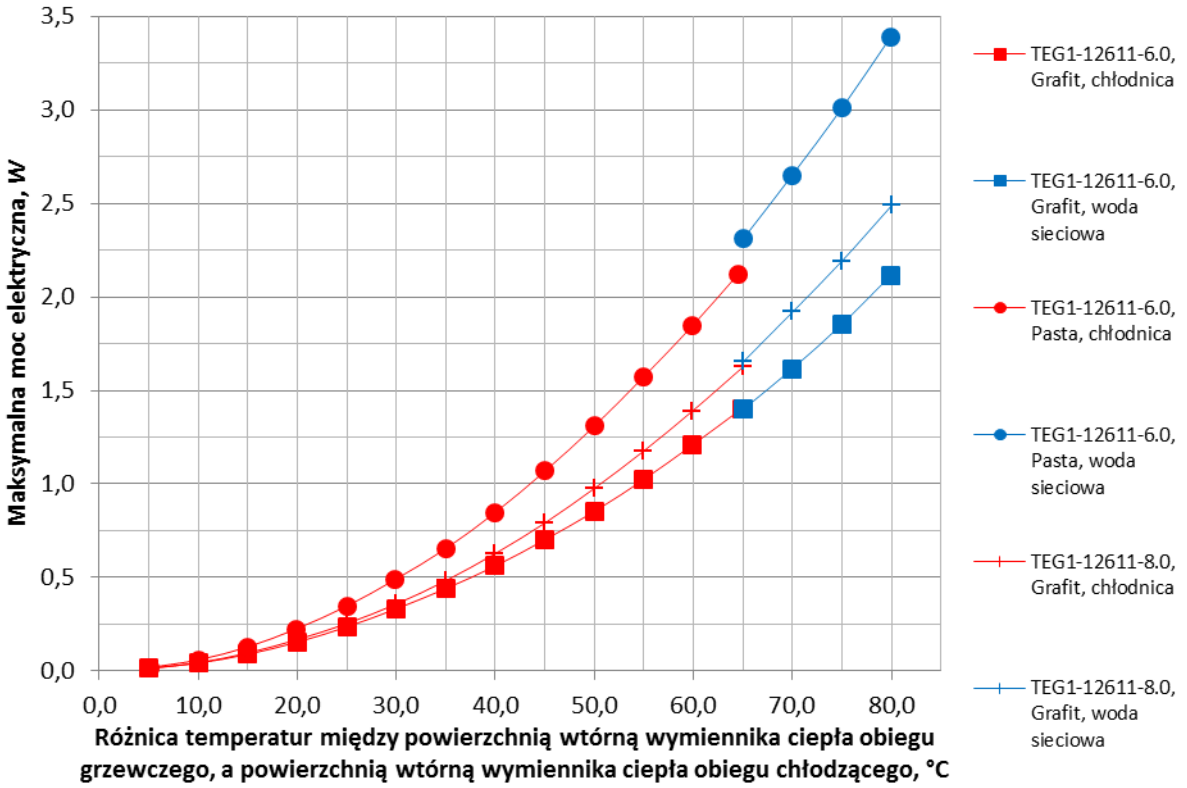
Rys. 10.5 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych firmy Tellurex

Analizując dane zawarte na wykresie należy zauważyć, że dla każdego z generatorów, zastosowanie pasty termoprzewodzącej w miejsce powłoki grafitowej skutkuje wzrostem wartości generowanej maksymalnej mocy elektrycznej o 10 do 18 % w zależności od badanego ogniwa. Jest to skutkiem półpłynnej konsystencji pasty, która umożliwia lepsze wniknięcie materiału termoprzewodzącego we wszelkie nierówności zarówno powierzchni wymiennika jak i okładki generatora. Powłoka grafitowa góruje nad pastą termoprzewodzącą jeśli chodzi o maksymalną temperaturę pracy, która w przypadku zastosowania grafitu wynosi około 300 °C, natomiast przy zastosowaniu pasty jest to około 120 °C.

W oparciu o dane z wykresu należy stwierdzić, że najwyższą moc elektryczną wynoszącą 3,0 W generuje ogniwo o nazwie G2-56-0352 przy różnicy temperatur wynoszącej 80 °C. Dla generatora G2-56-0375 wartość maksymalnej mocy elektrycznej wynosi 2,7 W, natomiast dla G2-56-0570 - 2,5 W. Z uwagi na fakt, nie ujawniania przez producenta szczegółowych danych dotyczących budowy wewnętrznej każdego z generatorów, trudno argumentować otrzymane różnice właśnie w oparciu o ich budowę wewnętrzną. Można zauważyć, że mimo największej grubości najlepsze wyniki osiągnął generator G2-56-0352. Wynika z tego, że charakteryzuje się on najwyższą wartością współczynnika przewodności cieplnej λ. Zależność generowanej maksymalnej mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur ma dla każdego z generatorów charakter wykładniczy. Ma to związek we wzrostem

wartości bezwymiarowego współczynnika dobroci termoelektrycznej *ZT* tellurku bizmutu (Bi_2Te_3) wraz ze wzrostem temperatury (Rys. 2.4).

Na Rys. 10.6 zawarto charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów firmy TECTEG.



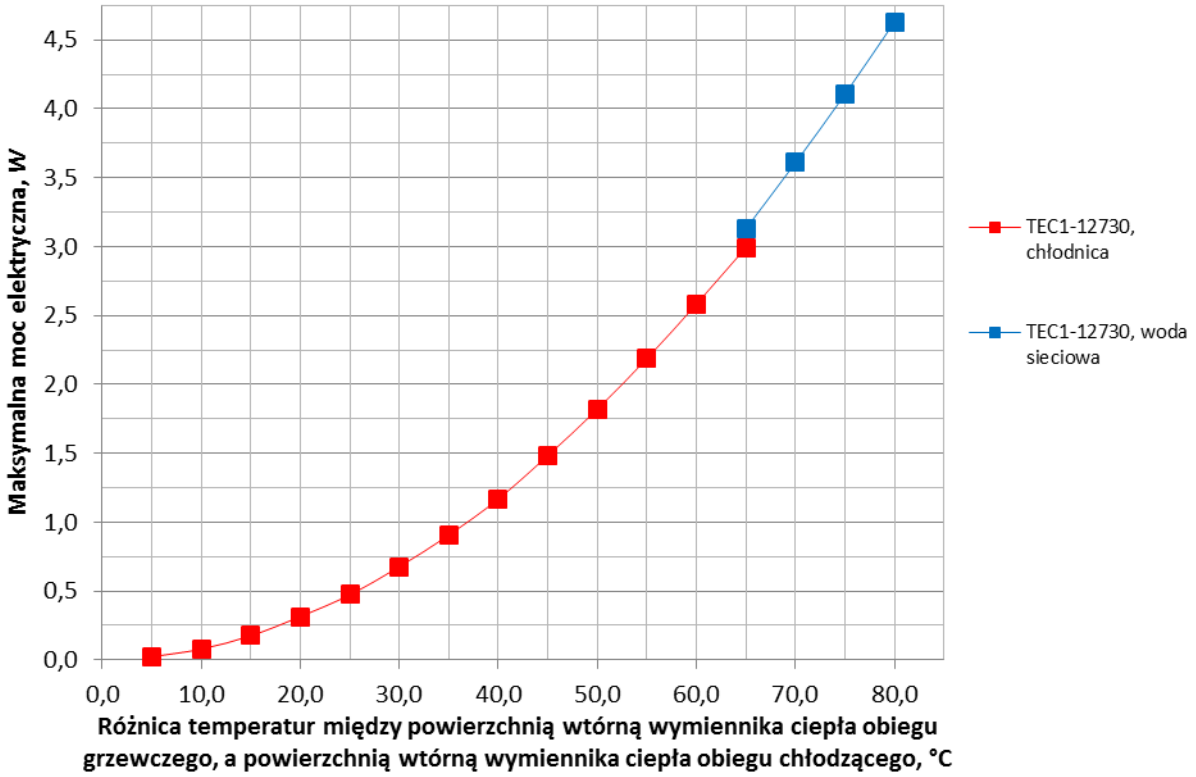
Rys. 10.6 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych firmy TECTEG

Podobnie jak w przypadku generatorów firmy Tellurex, również ogniwa firmy TECTEG miały zostać przebadane zarówno przy zastosowaniu powłoki grafitowej jak i pasty termoprzewodzącej. Niestety w trakcie badań jeden z generatorów uległ uszkodzeniu (TEG1-12611-8.0) przez co został przebadany wyłącznie z użyciem grafitowej warstwy przewodzącej.

Dla generatora TEG1-12611-6.0 wyższą wartość maksymalnej mocy elektrycznej uzyskano przy zastosowaniu pasty termoprzewodzącej. Wzrost w stosunku do grafitu wyniósł około 60 %. Wartość maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przy różnicy temperatur wynoszącej 80 °C to 3,3 W dla generatora TEG1-12611-6.0 oraz 2,5 W dla TEG1-12611-8.0. Również w przypadku badanych generatorów charakter zależności maksymalnej mocy elektrycznej od różnicy temperatur jest wykładniczy.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych pomiarów należy sformułować wniosek o konieczności stosowania pasty termoprzewodzącej w celu intensyfikacji procesów wymiany ciepła w układzie generator – wymienniki, których rezultatem jest uzyskanie większej efektywności TEG.

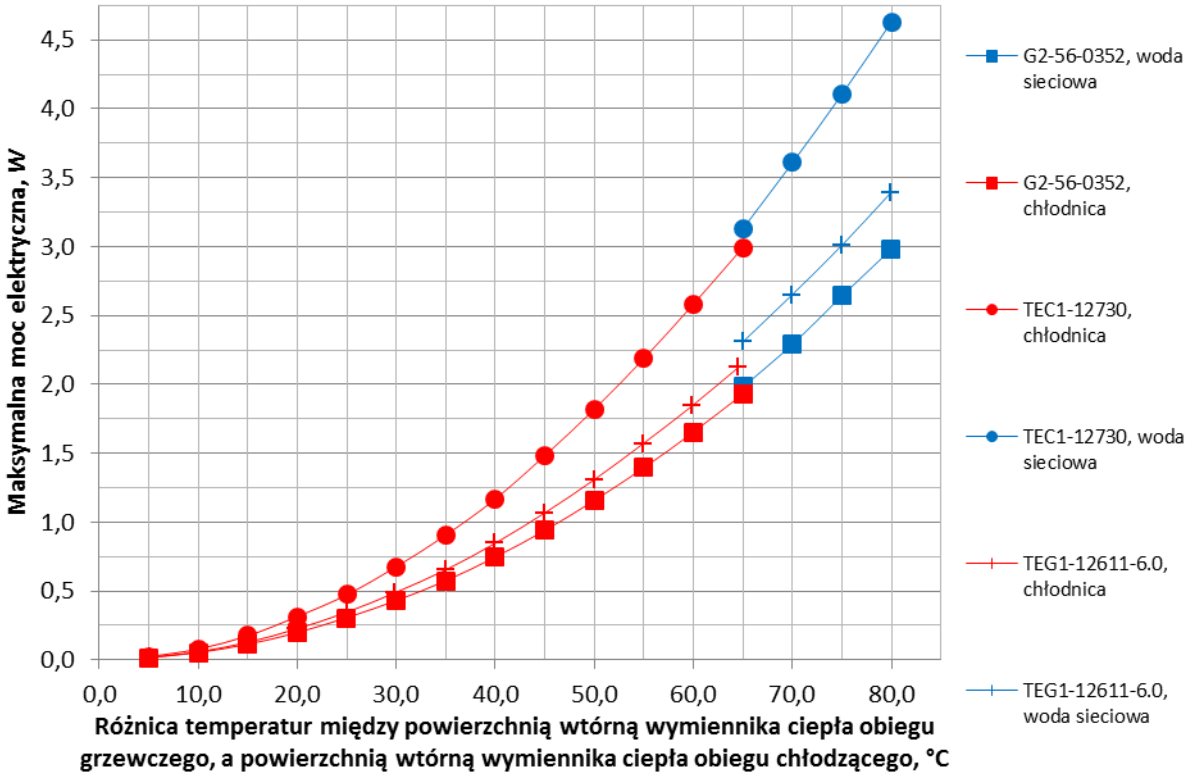
Na Rys. 10.7 przedstawiono charakterystykę cieplno-elektryczną ogniwa TEC1-12730.



Rys. 10.7 Charakterystyka cieplno-elektryczna generatora TEC1-12730

Z uwagi na fakt, że fabrycznie okładki ogniwa TEC1-12730 nie były fabrycznie pokryte żadną warstwą termoprzewodzącą, pomiary wykonano jedynie przy zastosowaniu pasty termoprzewodzącej. Podobnie jak w przypadku pozostałych generatorów również w przypadku badanego ogniwa zależność maksymalnej mocy elektrycznej od różnicy temperatur ma charakter wykładniczy. Maksymalna wartość mocy elektrycznej przy różnicy temperatur równej 80 °C wynosi 4,6 W.

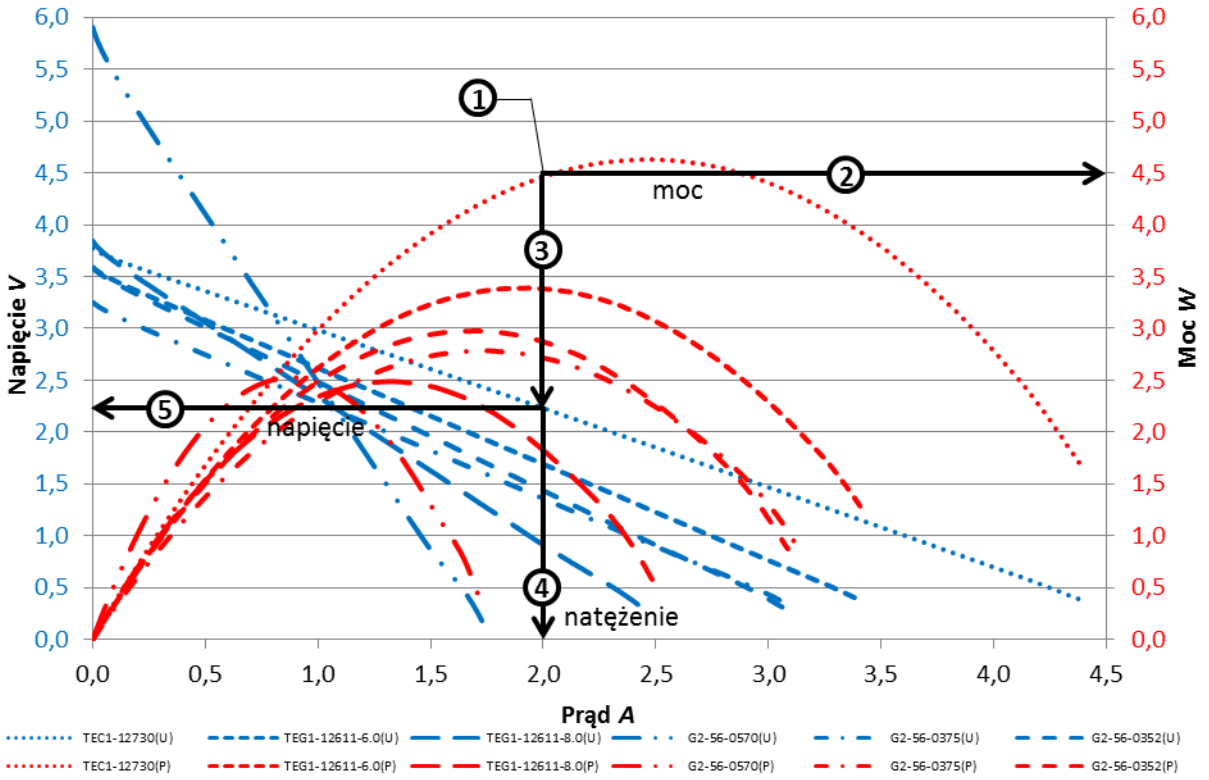
Aby porównać efektywności poszczególnych generatorów, na Rys. 10.8 zestawiono charakterystyki cieplno-elektryczne najlepszych generatorów firmy TECTEG oraz Tellurex, a także ogniwa TEC1-12730.



Rys. 10.8 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów G2-56-0352, TEG1-12611-6.0 oraz TEC1-12730

Wyniki potwierdziły, że najbardziej wydajnym z testowanych generatorów termoelektrycznych jest ogniwo TEC1-12730. Wytwarza ono o 23 % większą moc elektryczną w stosunku do generatora TEG1-12611-6.0 oraz o 54 % w stosunku do generatora G2-56-0352. Zależności te są o tyle zaskakujące, że ogniwo TEC1-12730 jest pierwotnie wykorzystywane jako ogniwo Peltiera, natomiast pozostałe są dedykowane do zastosowań termoelektrycznych. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że generator TEC1-12730 jest najcieńszym ze wszystkich badanych. Dzięki temu opór cieplny związany z jego obecnością pomiędzy wymiennikami ciepła obiegu grzewczego i chłodzącego jest najmniejszy, a co za tym idzie największy jest strumień ciepła przepływający przez samo ogniwo.

Na Rys. 10.9 zestawiono charakterystyki elektryczne wszystkich badanych termogeneratorów przy różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego równej 80 °C. Krzywe dla wszystkich generatorów, poza TEG1-12611-8.0, odpowiadają wynikom badań z użyciem pasty termoprzewodzącej. W przypadku ogniwa TEG1-12611-8.0 są to wyniki uzyskane z wykorzystaniem grafitu. Rodzaj kreskowania linii na wykresie odpowiada danemu modelowi ogniwa. Krzywe oznaczone kolorem czerwonym obrazują zależność mocy od natężenia prądu, natomiast niebieskie odnoszą się do zależności napięcia prądu w funkcji natężenia.



Rys. 10.9 Charakterystyki elektryczne badanych termogeneratorów przy różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego równej 80 °C (143)

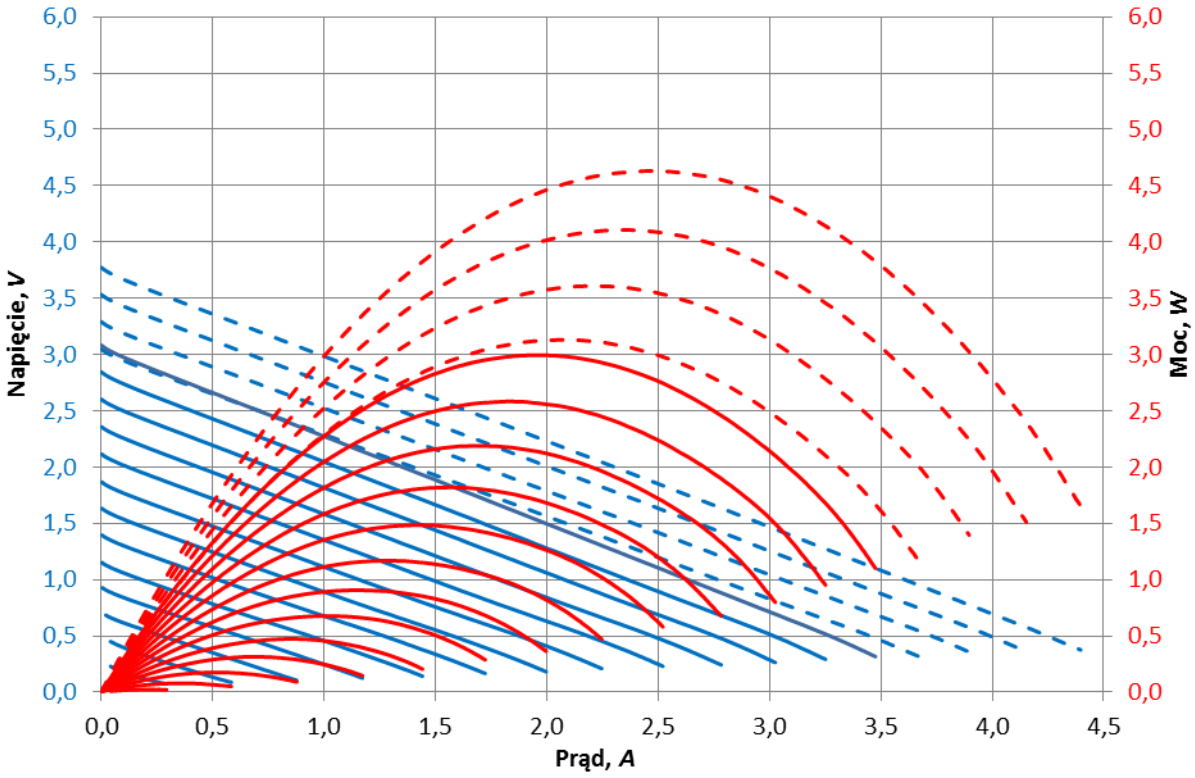
Sposób odczytu danych na wykresie zobrazowano strzałkami. Przykładowo dla generatora TEC1-12730 Przy mocy elektrycznej (punkt 1) równej 4,50 W (strzałka 2) natężenie prądu wynosi 2,00 A (strzałki 3 i 4), a napięcie 2,25 V (strzałka 5).

Przedstawione charakterystyki potwierdzają, że najbardziej efektywnym generatorem termoelektrycznym jest TEC1-12730. Jednakże podstawowym celem prezentowanych zależności jest ukazanie charakterystyki podaży mocy elektrycznej przez poszczególne ogniwa. W przypadku większości generatorów kształt omawianych charakterystyk jest zbliżony. Duża rozbieżność występuje w przypadku generatora G2-56-0570. Ogniwo to charakteryzuje się znacznie większym napięciem prądu przy zerowym natężeniu. Duża wartość współczynnika kierunkowego krzywej powoduje jednak, że maksymalna moc elektryczna generowana przez to ogniwo jest prawie 2 razy niższa od najbardziej wydajnego z badanych termogeneratorów. Cechy te predysponują generator G2-56-0570 do zasilania urządzeń o niewielkiej mocy elektrycznej, ale wymagających wysokiego napięcia.

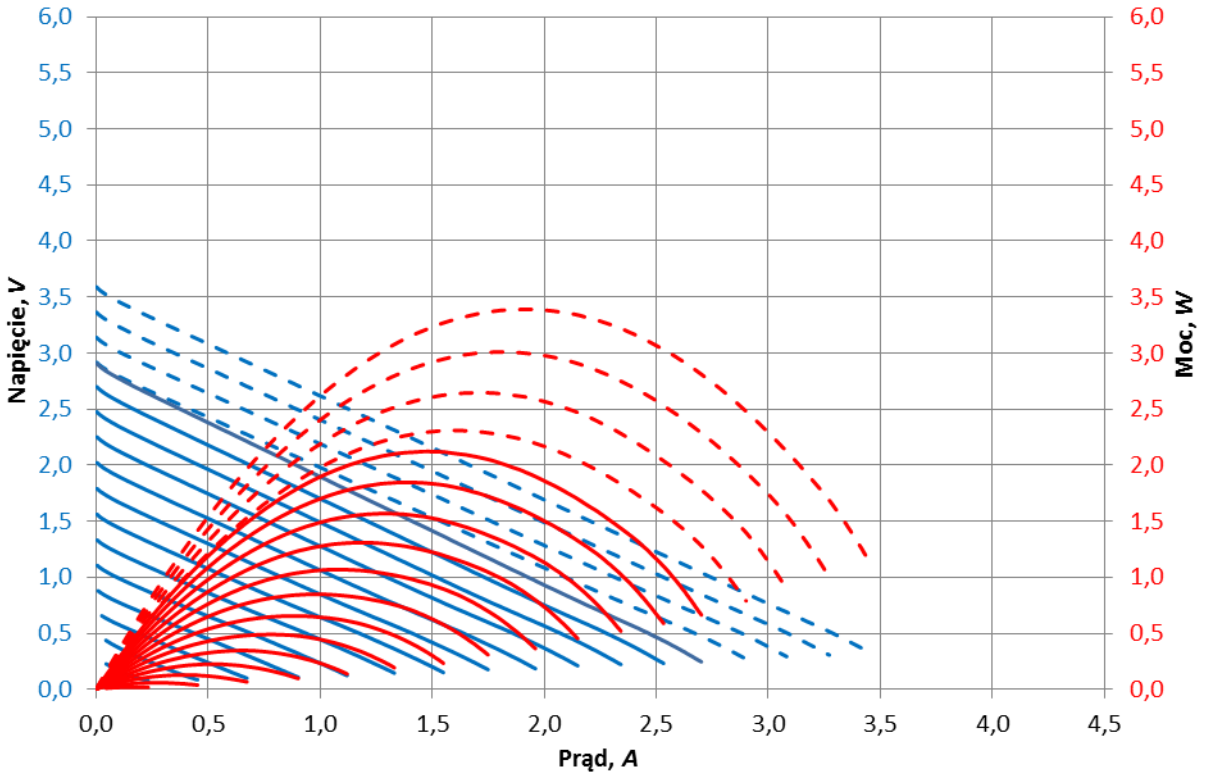
Na rysunkach od Rys. 10.10 do Rys. 10.15 przedstawiono kompletne charakterystyki elektryczne badanych generatorów z uwzględnieniem pełnego zakresu badanych różnic temperatur. Linie przerywane na wykresach symbolizują chłodzenie sieciową wodą wodociągową, ciągłe natomiast

odpowiadają chłodzeniu z użyciem chłodnicy. Dla krzywych przerywanych różnica temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego wynosi, począwszy od góry 80, 75, 70 oraz 65 °C, natomiast dla krzywych ciągłych odpowiednio 65, 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10 oraz 5 °C.

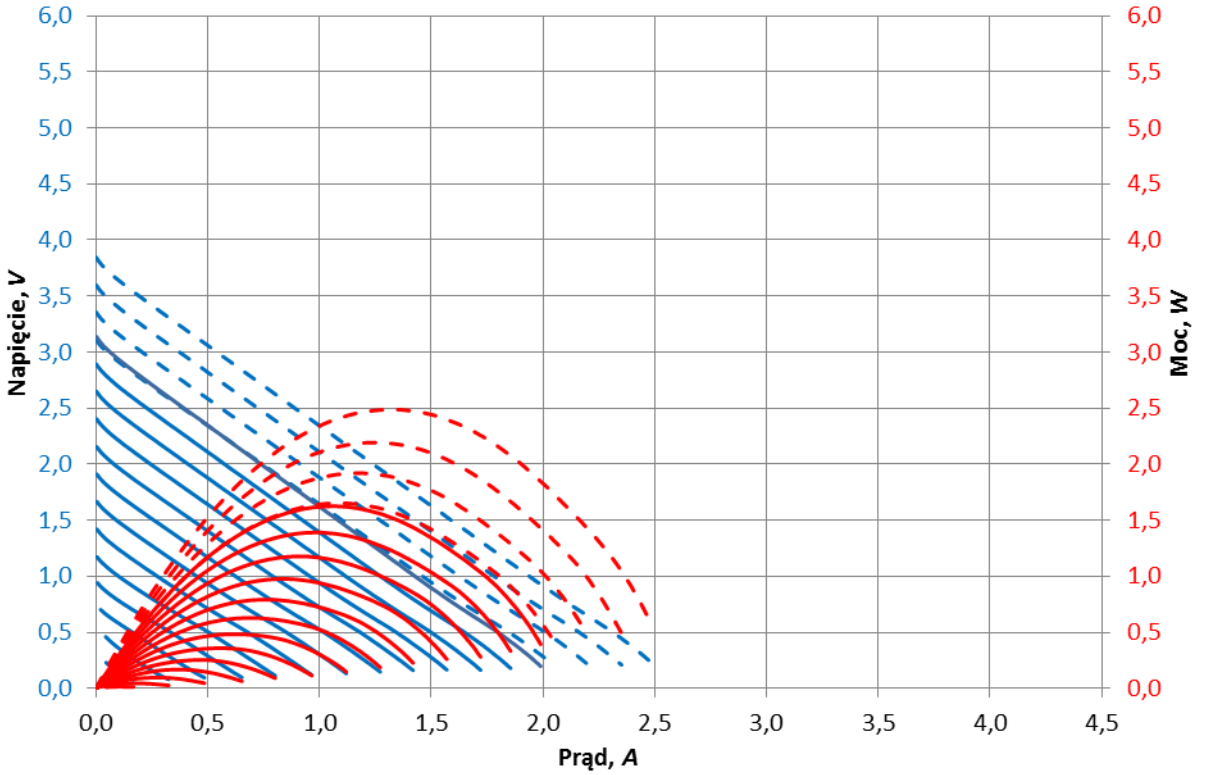
Wszystkie generatory z wyjątkiem TEG1-12611-8.0 były badane z użyciem pasty termoprzewodzącej. Wyniki dla ogniwa TEG1-12611-8.0 odnoszą się do badań z powłoką grafitową jako warstwą termoprzewodzącą.



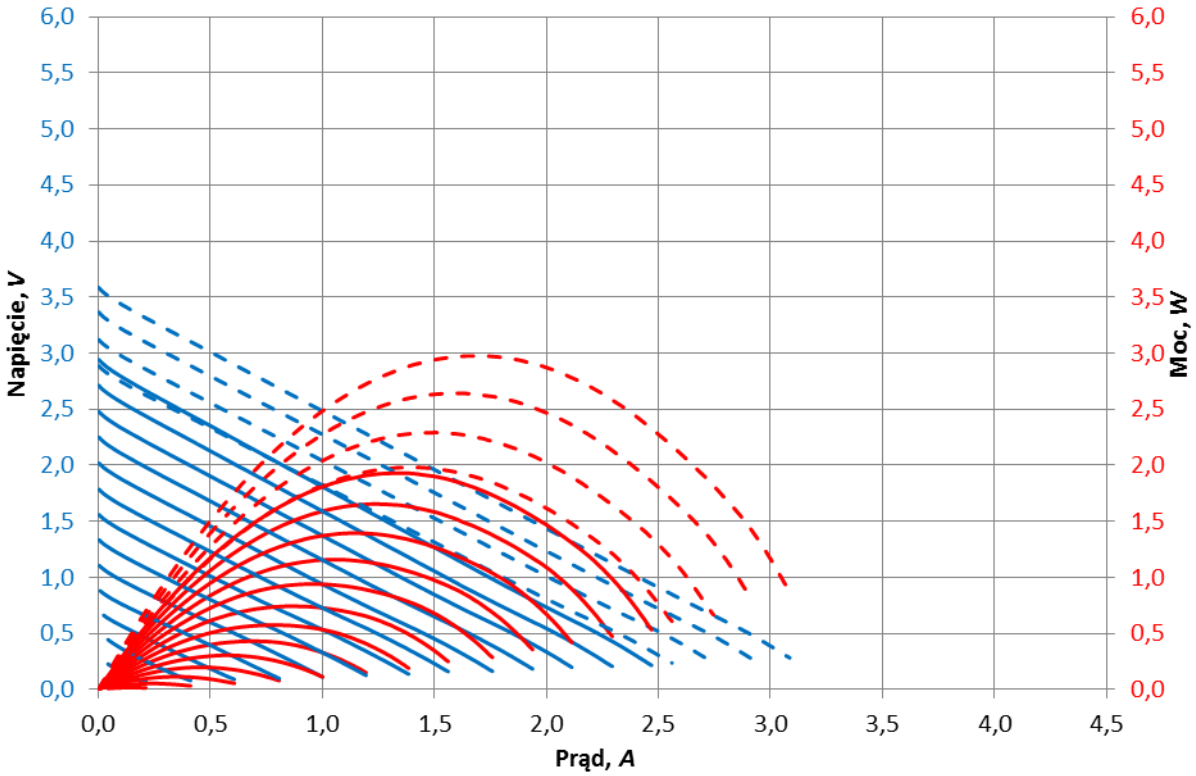
Rys. 10.10 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEC1-12730



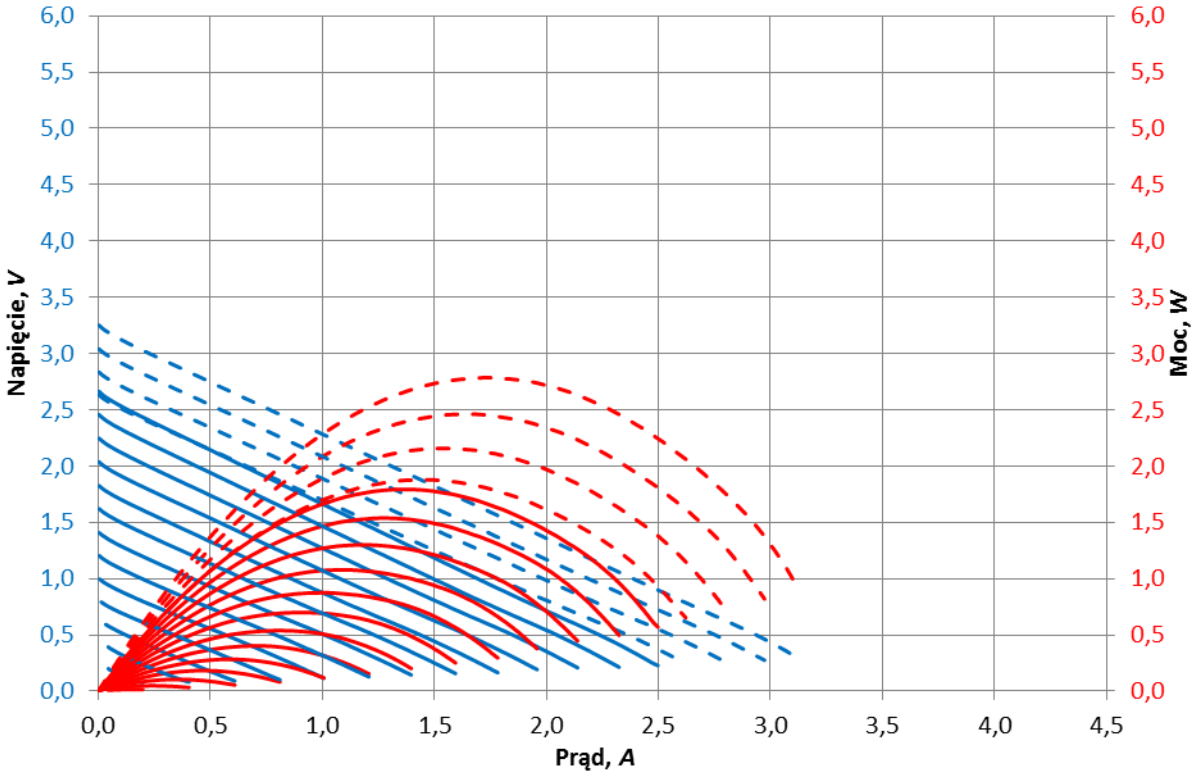
Rys. 10.11 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEG1-12611-6.0



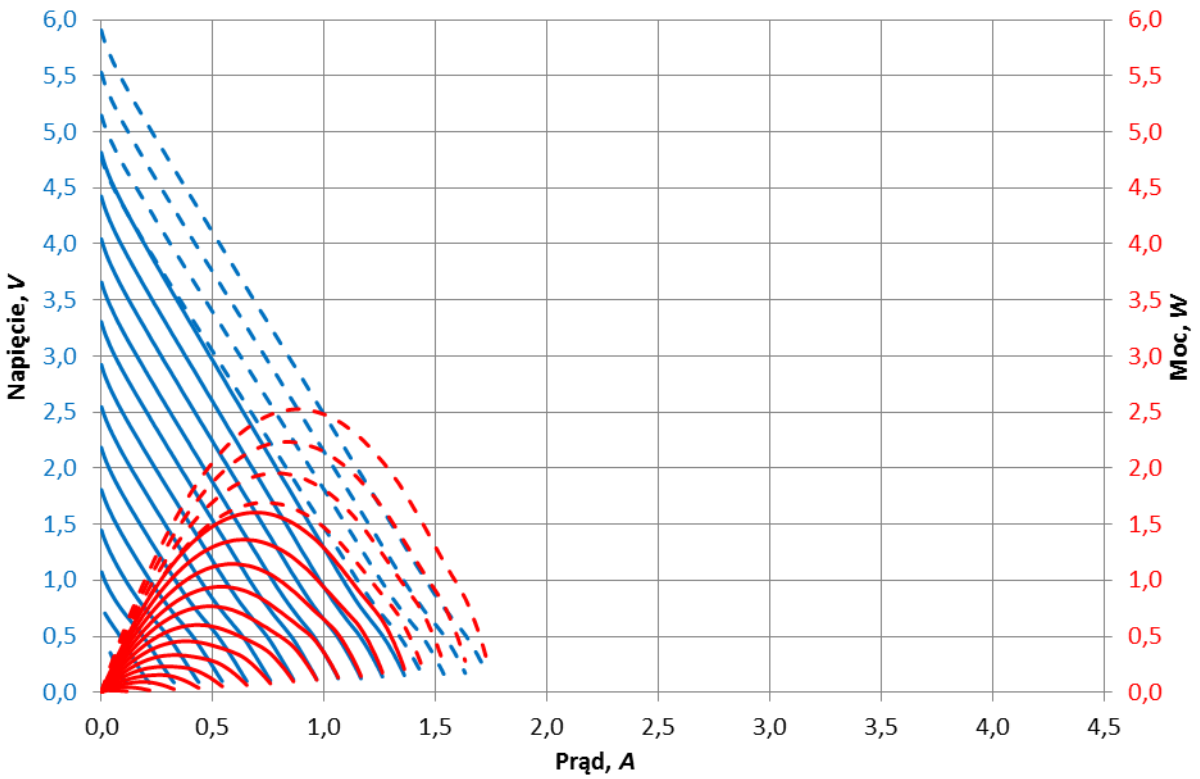
Rys. 10.12 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEG1-12611-8.0



Rys. 10.13 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0352



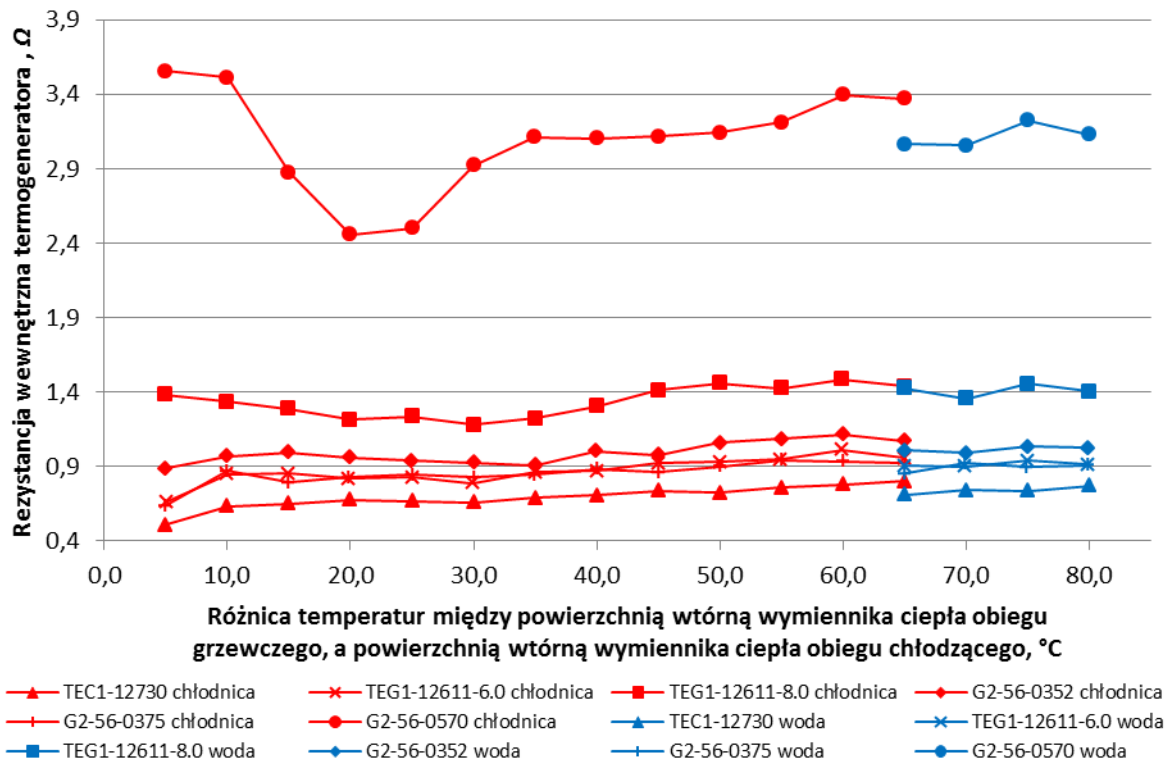
Rys. 10.14 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0375



Rys. 10.15 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0570

Istotny jest fakt, że dla tej samej różnicy temperatur (65 °C), ale różnych sposobów chłodzenia, krzywe prezentujące zależność maksymalnej mocy elektrycznej od natężenia prądu różnią się. Wynika to z faktu, że opisywane różnice temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego (t_h), a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego (t_c), uzyskiwane były przy różnych temperaturach odniesienia – dla chłodzenia z użyciem chłodnicy: t_h = 95 °C, t_c = 30 °C, przy chłodzeniu z użyciem wody sieciowej odpowiednio: t_h = 80 °C, t_c= 15 °C. Zależność mocy elektrycznej od poziomu odniesienia różnicy temperatur zostanie szczegółowo zbadana i opisana w kolejnym rozdziale.

W celach porównawczych sporządzono również wykres zależności rezystancji wewnętrznej badanych termogeneratorów w funkcji różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego (Rys. 10.16).



Rys. 10.16 Wykres zależność rezystancji wewnętrznej badanych termogeneratorów od różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego

Zgodnie z danymi zawartymi na powyższym wykresie w przypadku prawie wszystkich badanych termogeneratorów rezystancja wewnętrzna rośnie wraz ze wzrostem różnicy temperatur. Wyjątek stanowi generator G2-56-0570, dla którego początkowo obserwuje się gwałtowny spadek wartości rezystancji, a następnie od różnicy temperatur równej 30 °C, powolny wzrost. Najniższą wartością oporu wewnętrznego charakteryzuje się ogniwo TEC1-12730 (około 0,5 do 0,8 Ω), natomiast najwyższą wspomniany generator G2-56-0570 (od 2,4 do 3,6 Ω). Wartości rezystancji dla pozostałych ogniw mieści się w zakresie 0,5 – 1,5 Ω.

Otrzymane wyniki potwierdzają wysoką efektywność termogeneratora TEC1-12730. Charakteryzuje się on najniższą ze wszystkich badanych ogniw rezystancją wewnętrzną. Zgodnie z zależnością (8.1) najniższa rezystancja wewnętrzna generatora, przy jednakowych napięciach prądu, pozwala uzyskać najwyższą moc elektryczną.

Z punktu widzenia oceny jakości przeprowadzonych badań, istotne jest porównanie otrzymanych wartości z danymi podawanymi przez producentów generatorów (144-148). Tab. 10-2 zawiera zmierzone wartości maksymalnej mocy elektrycznej oraz rezystancji wewnętrznej przy różnicy temperatur równej 65 °C. Dane te porównano z wartościami zawartymi w kartach katalogowych poszczególnych generatorów.

Tab. 10-2 Porównanie maksymalnej mocy elektrycznej i rezystancji wewnętrznej wynikających z pomiarów z danymi producenta

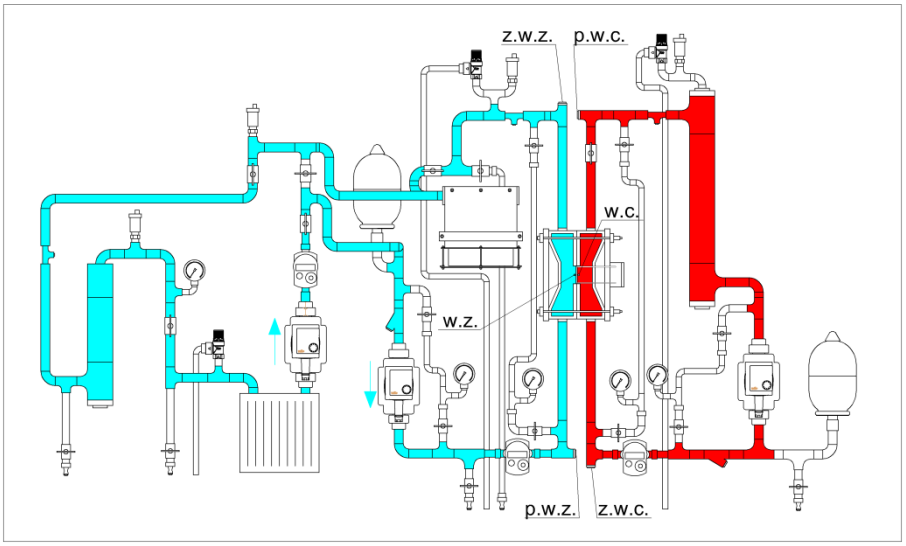
Generator	**Materiał termoprzewodzący**	**Maksymalna moc elektryczna przy ΔT = 65 °C (t.c. = 95, t.z. = 30)**		**Rezystancja wewnętrzna ΔT = 65 °C (t.c. = 95, t.z. = 30)**		**stosunek moc POMIAR/ moc PRODUCENT**	**stosunek rezystancja POMIAR/ rezystancja PRODUCENT**
		POMIAR	**PRODUCENT**	**POMIAR**	**PRODUCENT**		
		W	*W*	*Ω*	*Ω*	*%*	*%*
TEC1-12730	Pasta termoprzewodząca	2,99	-	0,80	-	-	-
	Grafit	-	-	-	-	-	-
TEG1-12611-6.0	Pasta termoprzewodząca	2,12	1,51	0,96	1,09	140,5%	87,8%
	Grafit	1,40	1,51	1,02	1,09	93,0%	93,8%
TEG1-12611-8.0	Pasta termoprzewodząca	-	1,33	-	1,37	-	-
	Grafit	1,63	1,33	1,44	1,37	122,2%	105,0%
G2-56-0352	Pasta termoprzewodząca	1,93	1,29	1,07	1,35	149,7%	79,3%
	Grafit	1,80	1,29	1,08	1,35	139,4%	79,7%
G2-56-0375	Pasta termoprzewodząca	1,79	1,50	0,92	0,96	119,5%	95,9%
	Grafit	1,51	1,50	0,94	0,96	100,4%	97,8%
G2-56-0570	Pasta termoprzewodząca	1,60	1,73	3,37	3,13	92,7%	107,7%
	Grafit	1,35	1,73	3,43	3,13	78,1%	109,6%

Jako, że ogniwo TEC1-12730 nie jest sprzedawane jako typowy termogenerator toteż producent nie podaje jego parametrów przy produkcji energii elektrycznej. Dla większości przebadanych generatorów maksymalna moc elektryczna uzyskana w trakcie badań jest znacząco lepsza w stosunku do danych producenta. Zmierzone wartości rezystancji wewnętrznej ogniw są zbliżone do parametrów deklarowanych przez producentów. Porównanie to potwierdza dużą precyzję pomiarów oraz wysoką jakość wykorzystanych komponentów w postaci zaprojektowanych wymienników ciepła i zastosowanego materiału termoprzewodzącego.

Zestaw składający się z niskich wymienników ciepła, generatora TEC1-12730 oraz pasty termoprzewodzącej Arctic MX-2 został wytypowany do szczegółowych badań jako najbardziej wydajna z przebadanych konfiguracji.

10.4. Wyniki szczegółowych badań termogeneratora TEC1-12730

W celu dokładnego zbadania ogniwa TEC1-12730 wprowadzono kilka modyfikacji w procedurze pomiarowej. Celem realizowanych badań było wyprowadzenie zależności matematycznej, która pozwala na określenie parametrów generowanego prądu elektrycznego w zależności od parametrów pracy systemu cieplnego – temperatur oraz przepływów. Biorąc pod uwagę powyższe należało zmodyfikować miejsca pomiaru różnicy temperatur po stronie ciepłej i zimnej generatora będącej siłą napędową zjawiska termoelektrycznego. Dla dalszych badań różnicą temperatur była różnica między temperaturą czynnika wpływającego do wymiennika ciepła obiegu grzewczego (p.w.c.), a temperaturą czynnika wpływającego do wymiennika ciepła obiegu chłodzącego (p.w.z.) - Rys. 10.17.



Rys. 10.17 Schemat miejsc pomiaru temperatur oraz obiegu czynnika chłodzącego termogenerator, przy chłodzeniu z wykorzystaniem chłodnicy

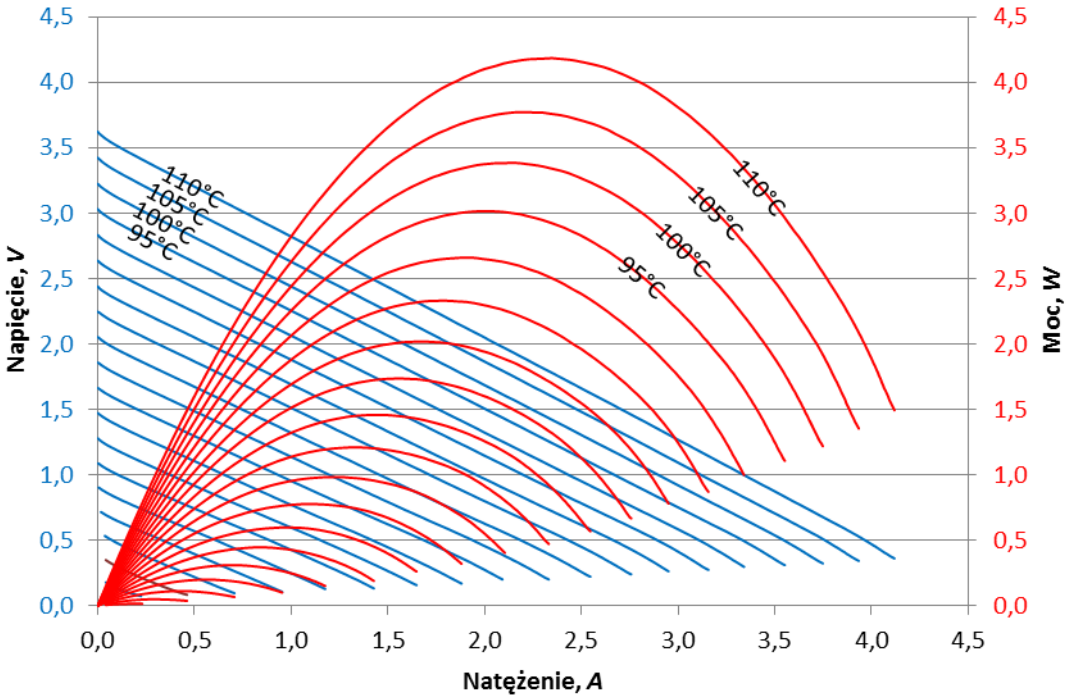
Dzięki temu w prosty sposób można odnieść wyniki pomiarów do rzeczywistego systemu cieplnego.

10.4.1. Wpływ różnicy temperatur oraz jej położenia na skali temperatur na parametry prądu elektrycznego generowanego przez ogniwo TEC1-12730

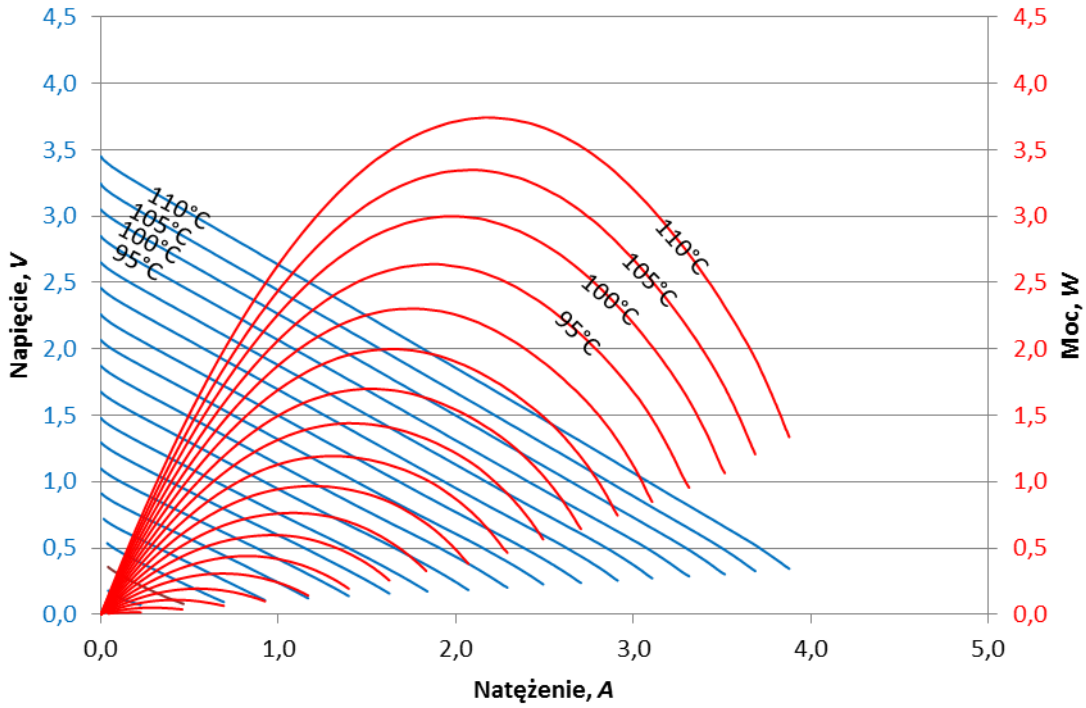
W celu dokładnego określenia wpływu różnicy temperatur na parametry prądu generowanego przez ogniwo wykonano odpowiednie pomiary. Temperatura czynnika w obiegu chłodzącym TEG była stabilizowana na kolejnych poziomach tj.: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 oraz 75 °C. Przy ustabilizowanej temperaturze w obiegu chłodzącym, zwiększano skokowo temperaturę w obiegu grzewczym. Początkowo różnica temperatur między obiegami była równa 5 °C. Następnie ze skokiem równym 5 °C zwiększano ją, aż do maksymalnej temperatury w obiegu grzewczym, której wartość ustalono na 110 °C. Dla każdej kolejnej różnicy temperatur dokonywano pomiaru charakterystyki elektrycznej generatora. W ten sposób powstało 13 pełnych charakterystyk elektrycznych

generatora. Każda charakterystyka była wykonywana dla konkretnej i ustalonej temperatury czynnika w obiegu chłodzącym. Strumień przepływu czynnika zarówno w obiegu grzewczym jak i chłodzącym był równy 0,200 m^3/h.

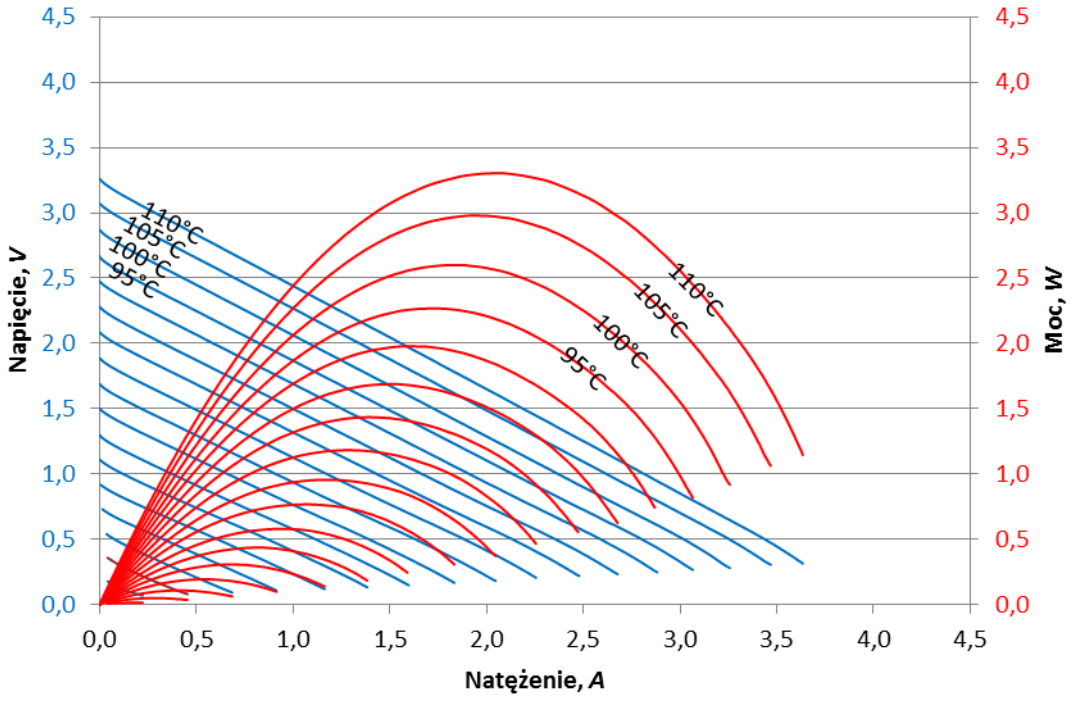
Na rysunkach: od Rys. 10.18 do Rys. 10.30 przedstawiono komplet charakterystyk elektrycznych dla ogniwa TEC1-12730. Krzywe na wykresie reprezentują wyniki dla określonej temperatury w obiegu grzewczym, począwszy od temperatury o 5 °C wyższej od temperatury w obiegu chłodzącym, aż do wartości temperatury równej 110 °C.



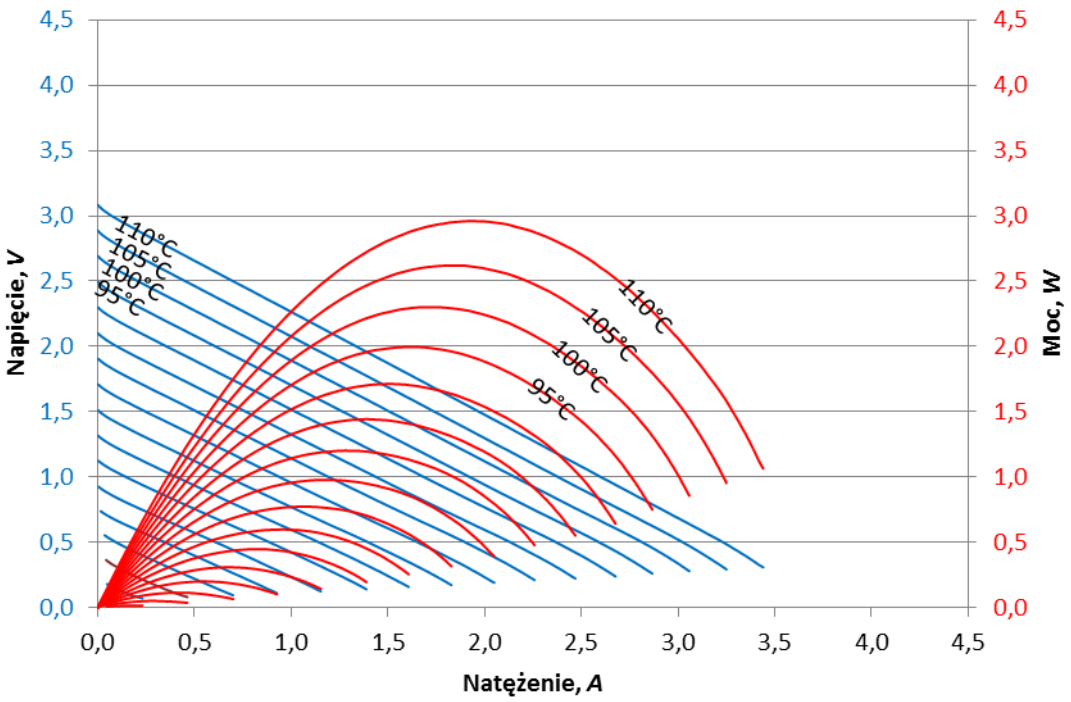
Rys. 10.18 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 15°C



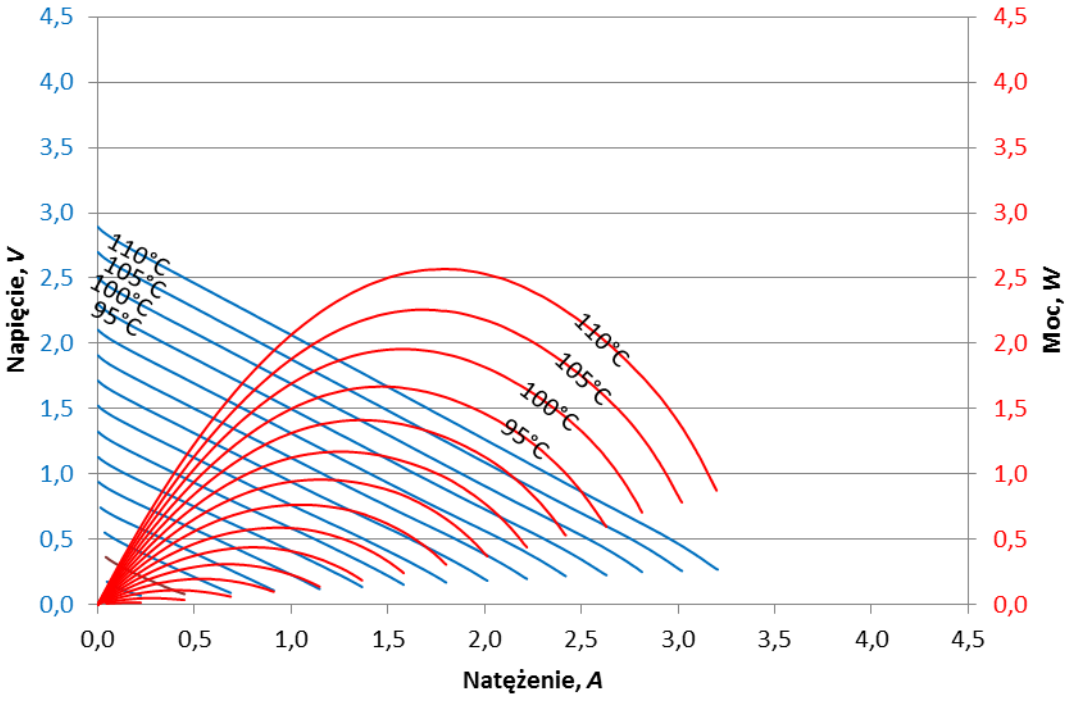
Rys. 10.19 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 20°C



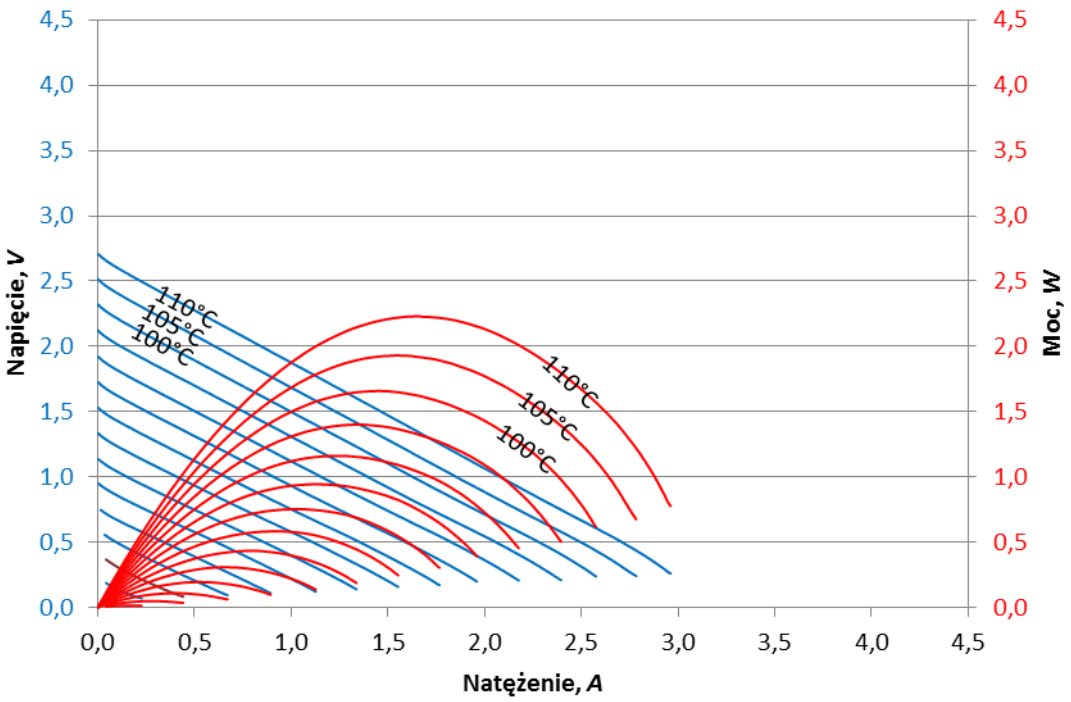
Rys. 10.20 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 25°C



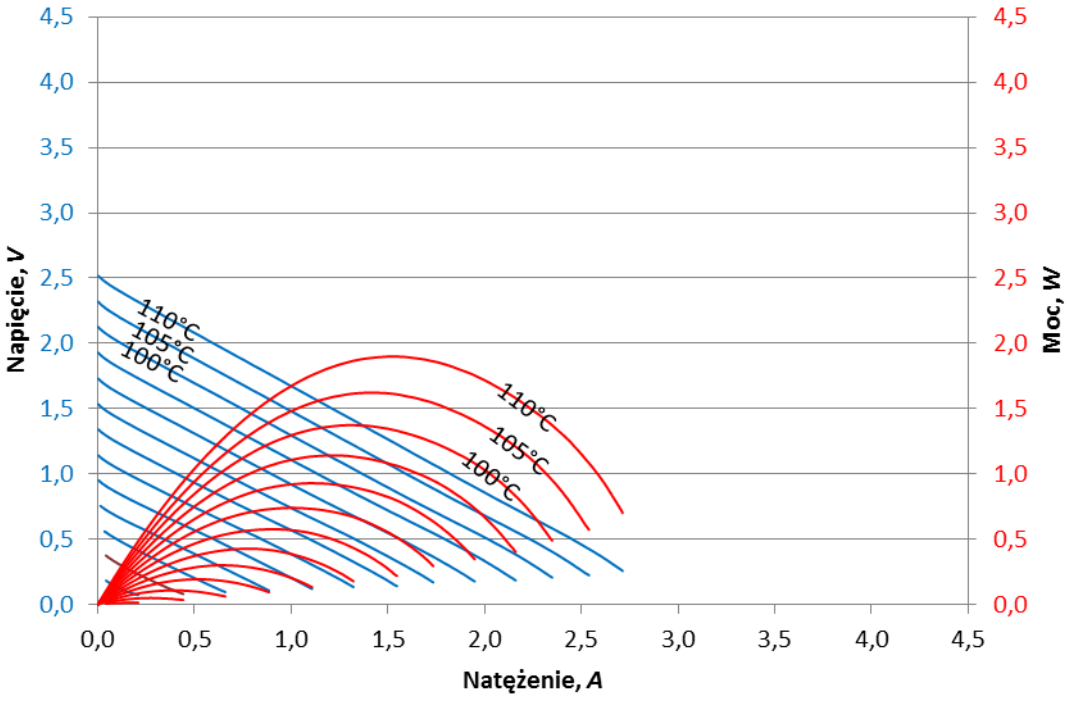
Rys. 10.21 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 30°C



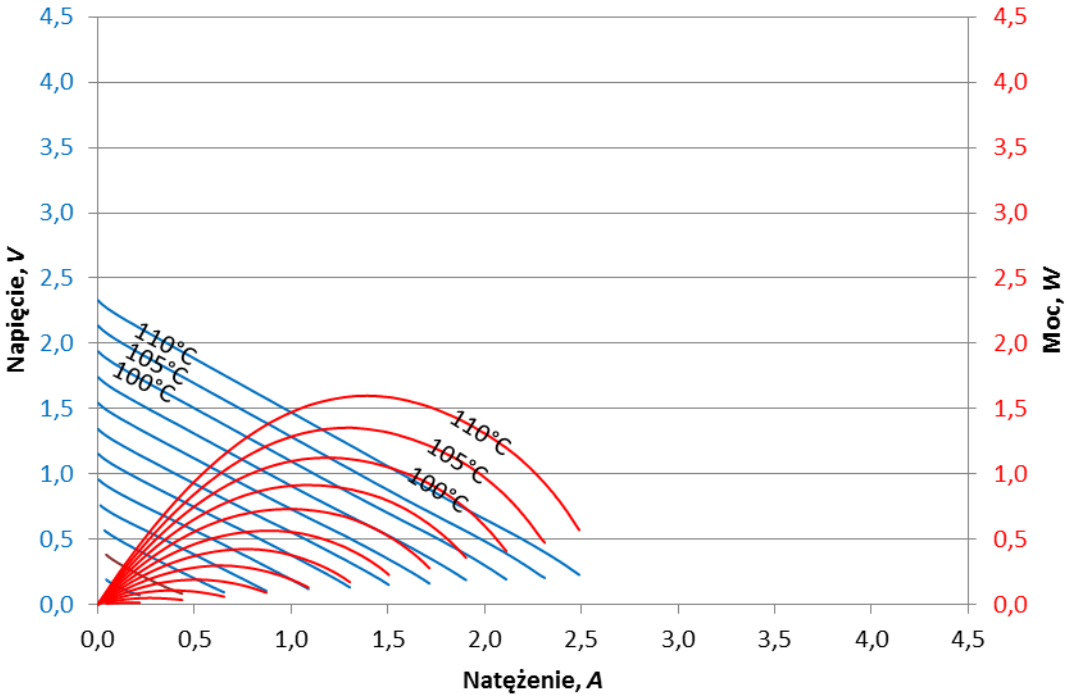
Rys. 10.22 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 35°C



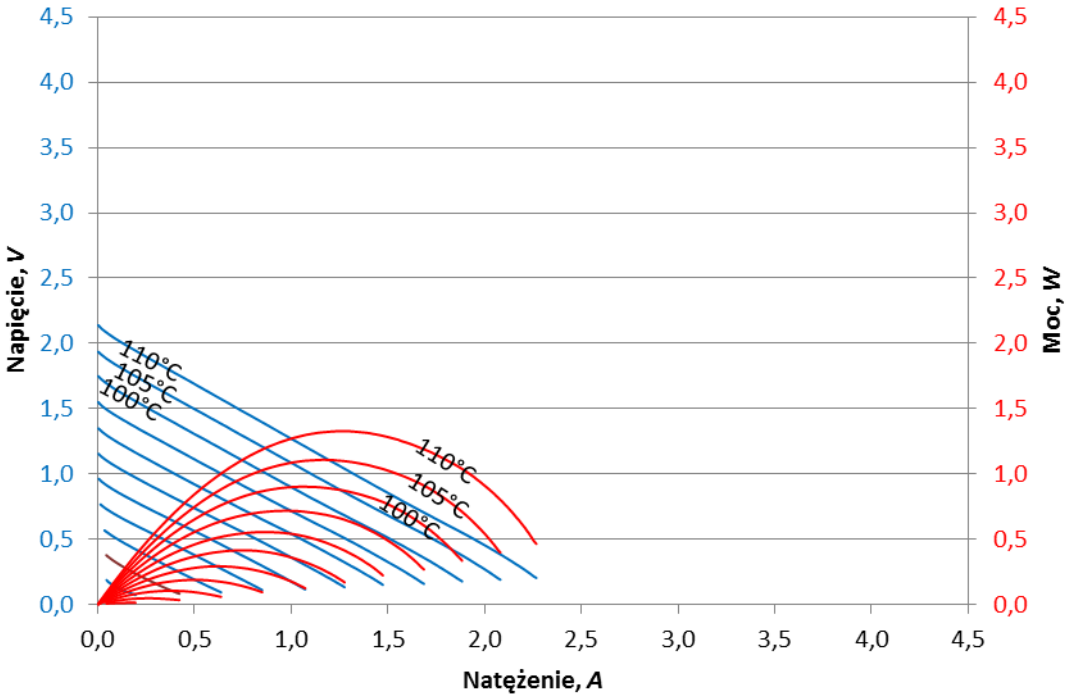
Rys. 10.23 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 40°C



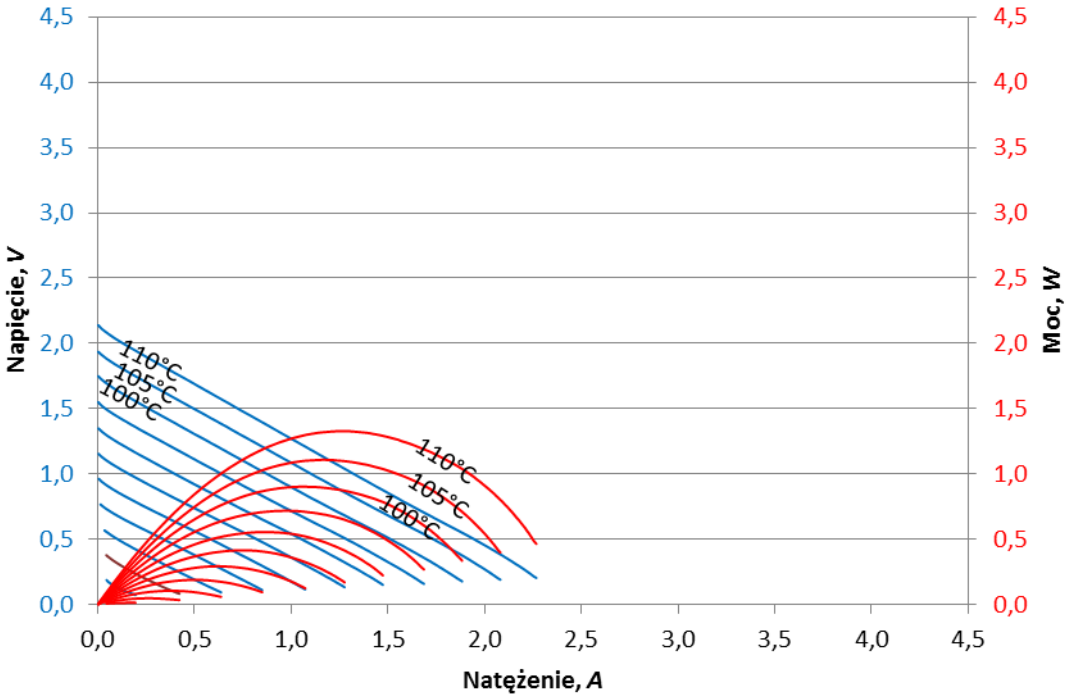
Rys. 10.24 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 45°C



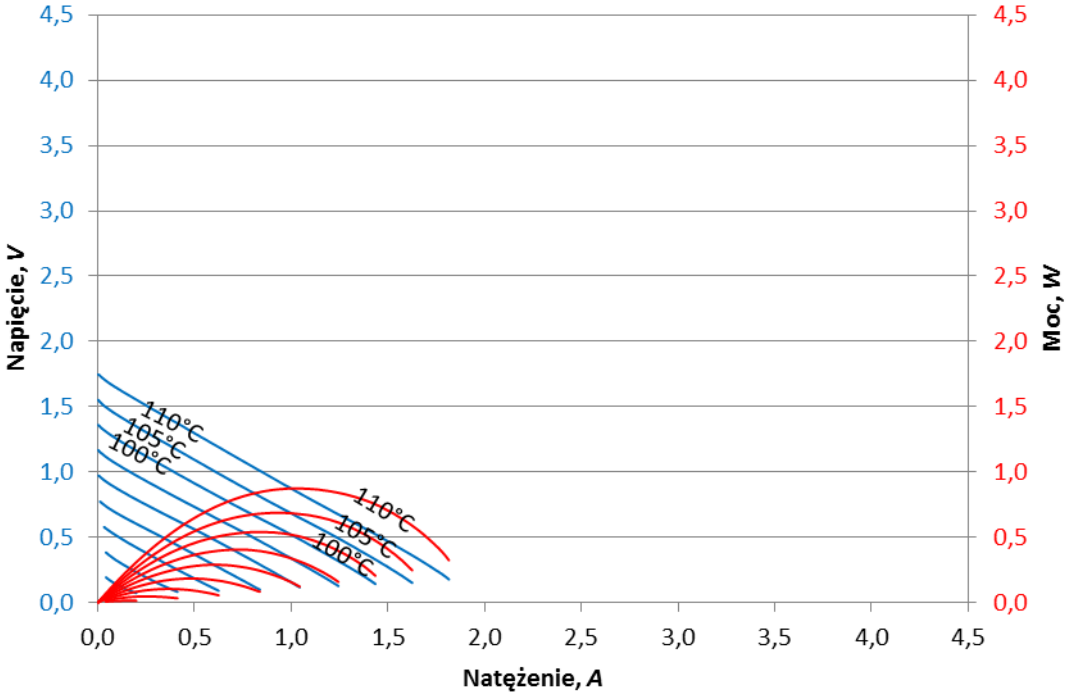
Rys. 10.25 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 50°C



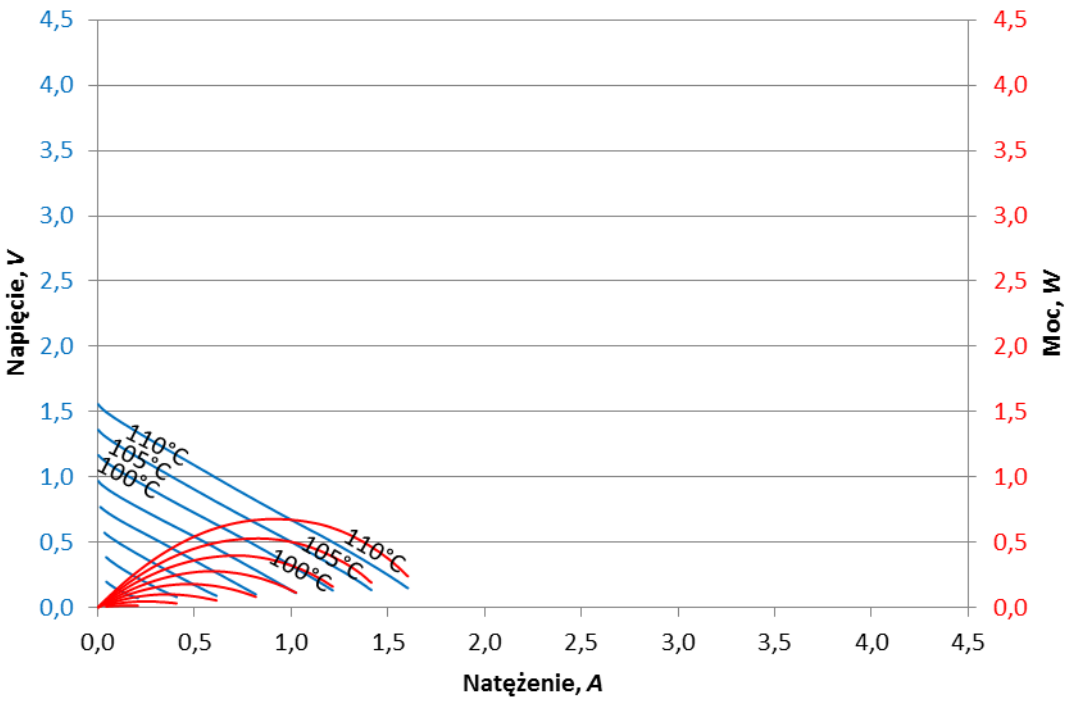
Rys. 10.26 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 55°C



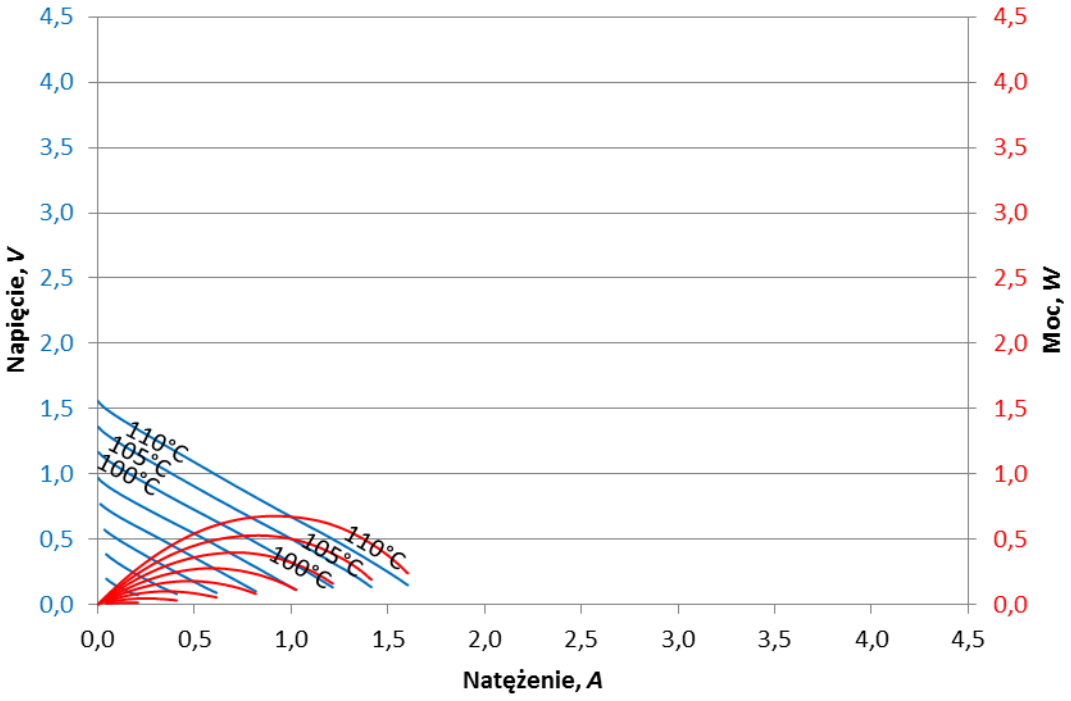
Rys. 10.27 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 60°C



Rys. 10.28 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 65°C



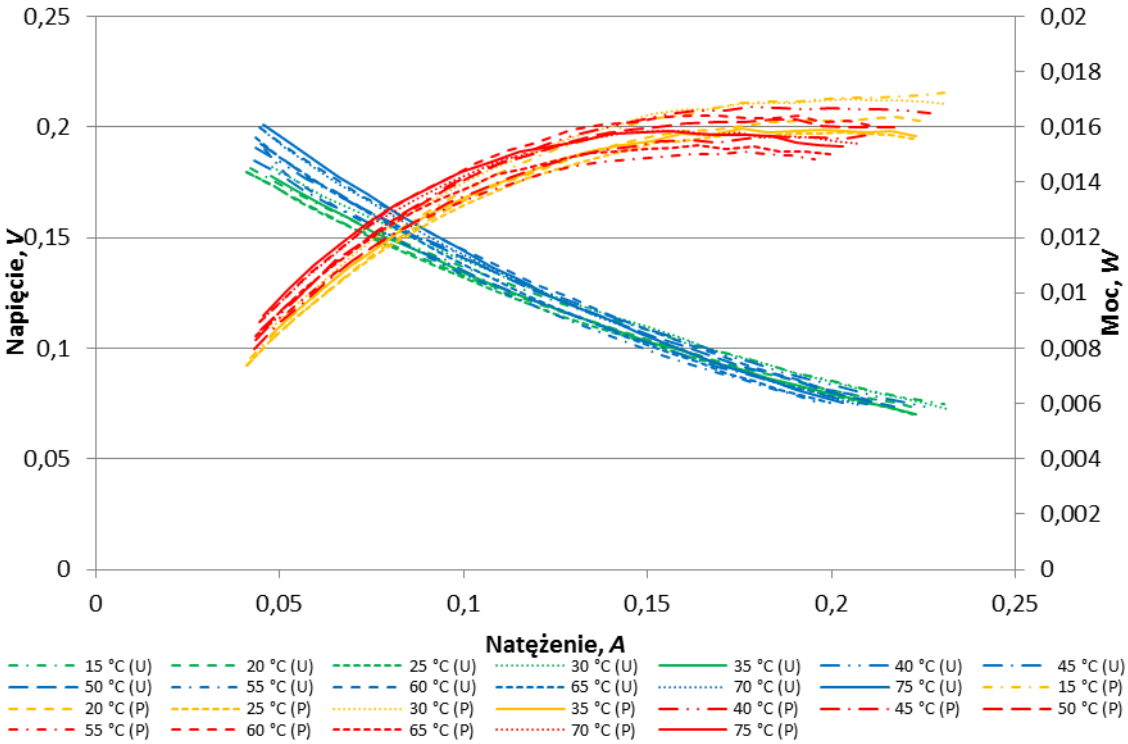
Rys. 10.29 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 70°C



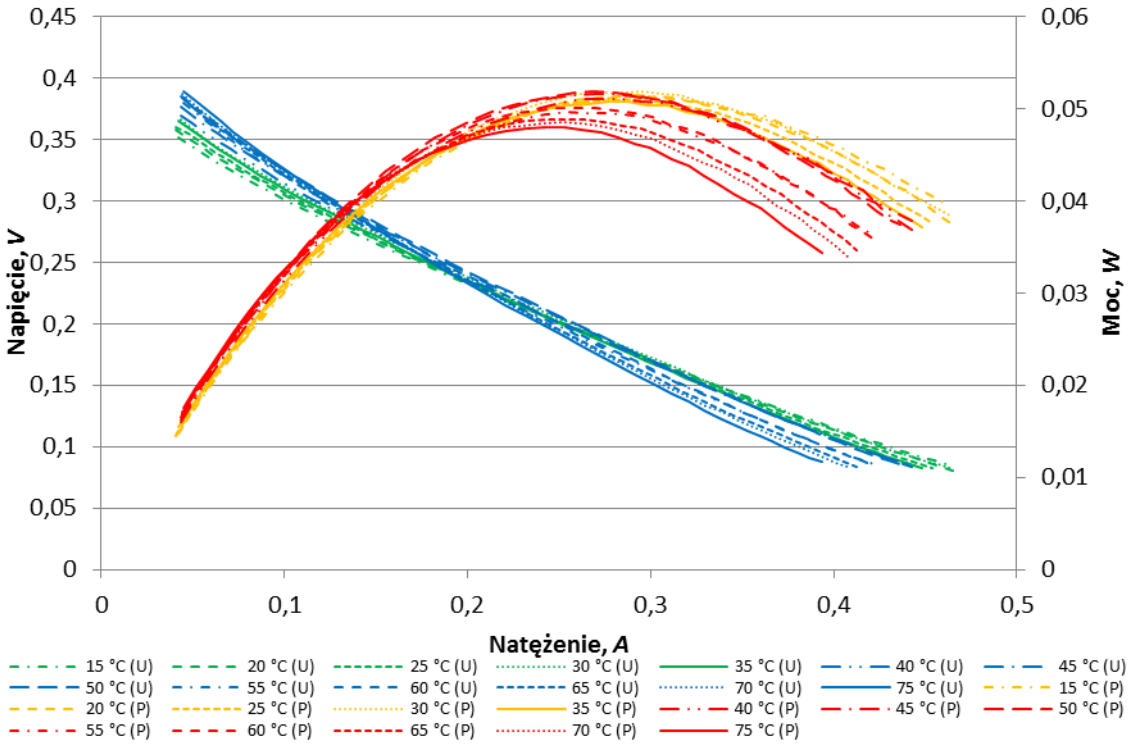
Rys. 10.30 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 75°C

Przedstawione charakterystyki prezentują wyniki szerokiego zakresu pomiarowego i są jednym z elementów, w oparciu o które została wyznaczona zależność matematyczna pozwalająca na określenie parametrów prądu elektrycznego generowanego przez ogniwo TEC1-12730.

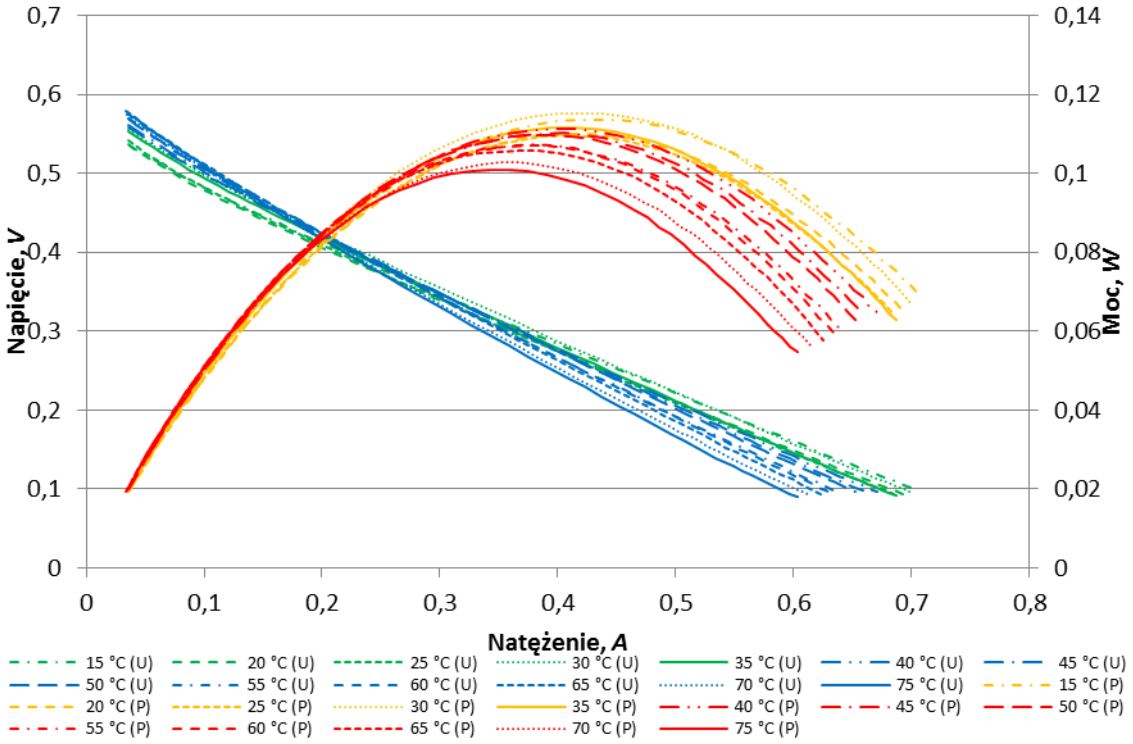
W celu określenia wpływu położenia różnicy temperatur (między temperaturą obiegu grzewczego, a temperaturą obiegu chłodzącego) na skali temperatur na parametry prądu generowanego przez ogniwo zestawiono charakterystyki elektryczne dla takich samych różnic temperatur, ale osiąganych przy różnych temperaturach w obiegach np.: temperatura w obiegu grzewczym (t_H) równa 110 °C, temperatura w obiegu chłodzącym (t_C) równa 40 °C; t_H = 105 °C, t_C = 35 °C; t_H = 100 °C, t_C = 30 °C itd. Na rysunkach Rys. 10.31 do Rys. 10.47 zestawiono otrzymane charakterystyki. Style krzywych odpowiadają odpowiednim temperaturom w obiegu chłodzącym.



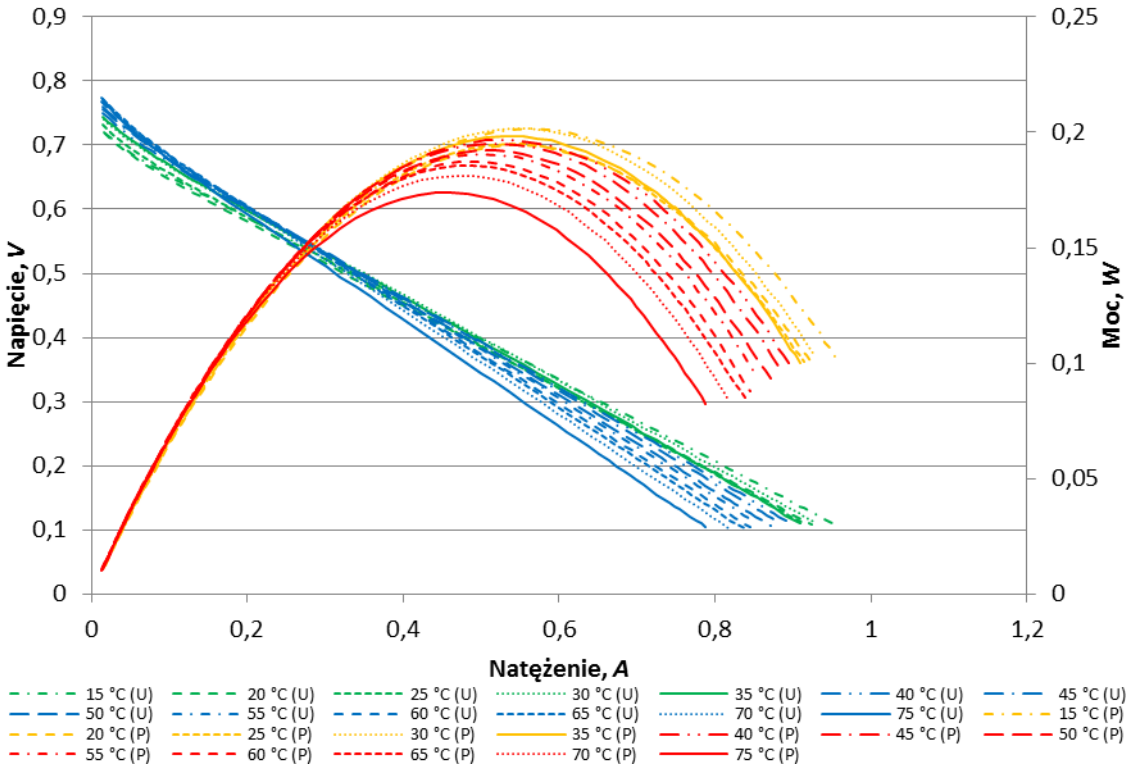
Rys. 10.31 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 5 °C



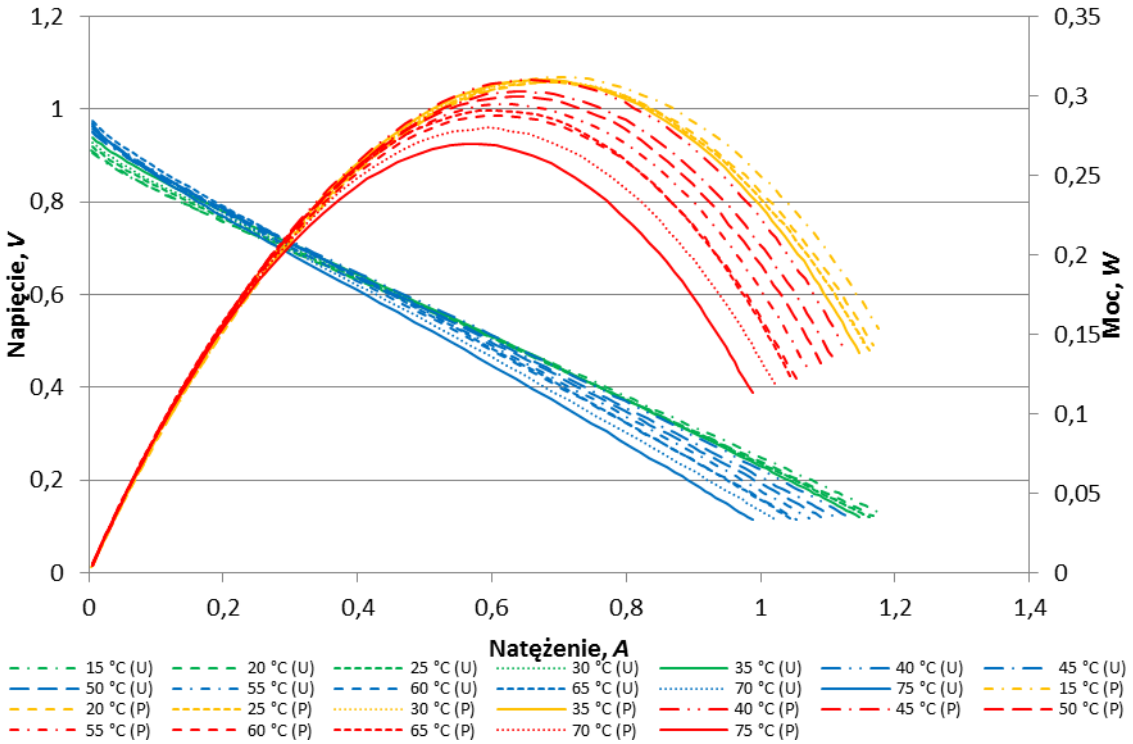
Rys. 10.32 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 10 °C



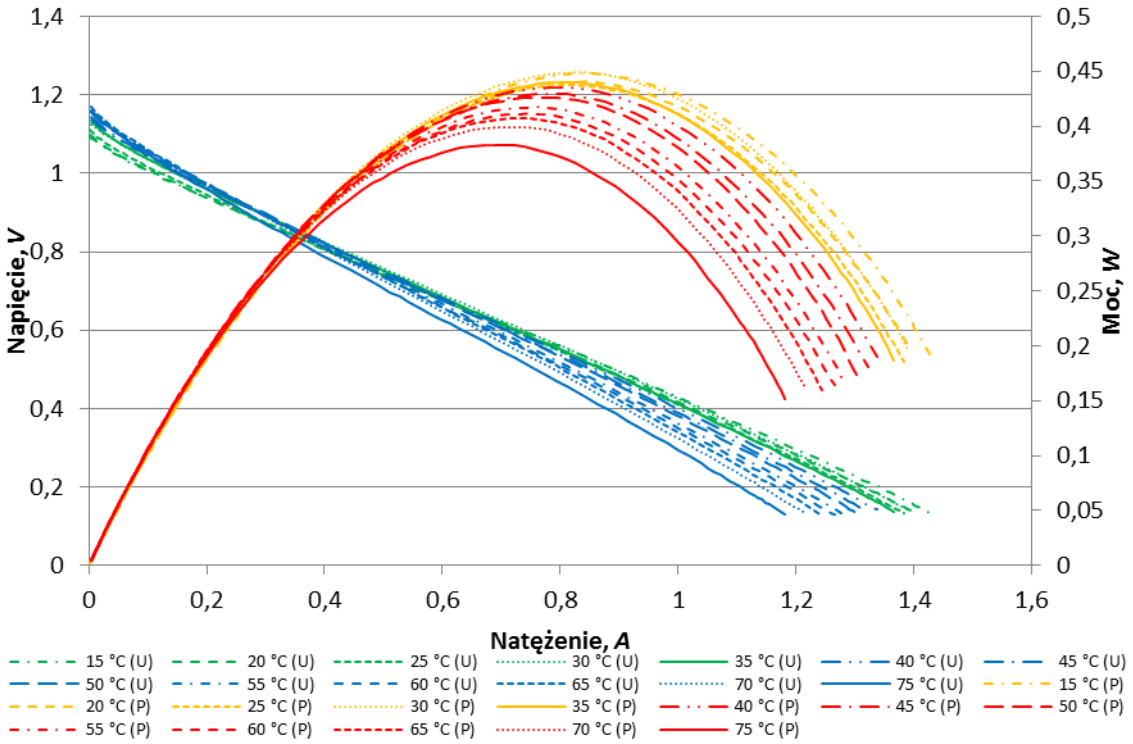
Rys. 10.33 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 15 °C



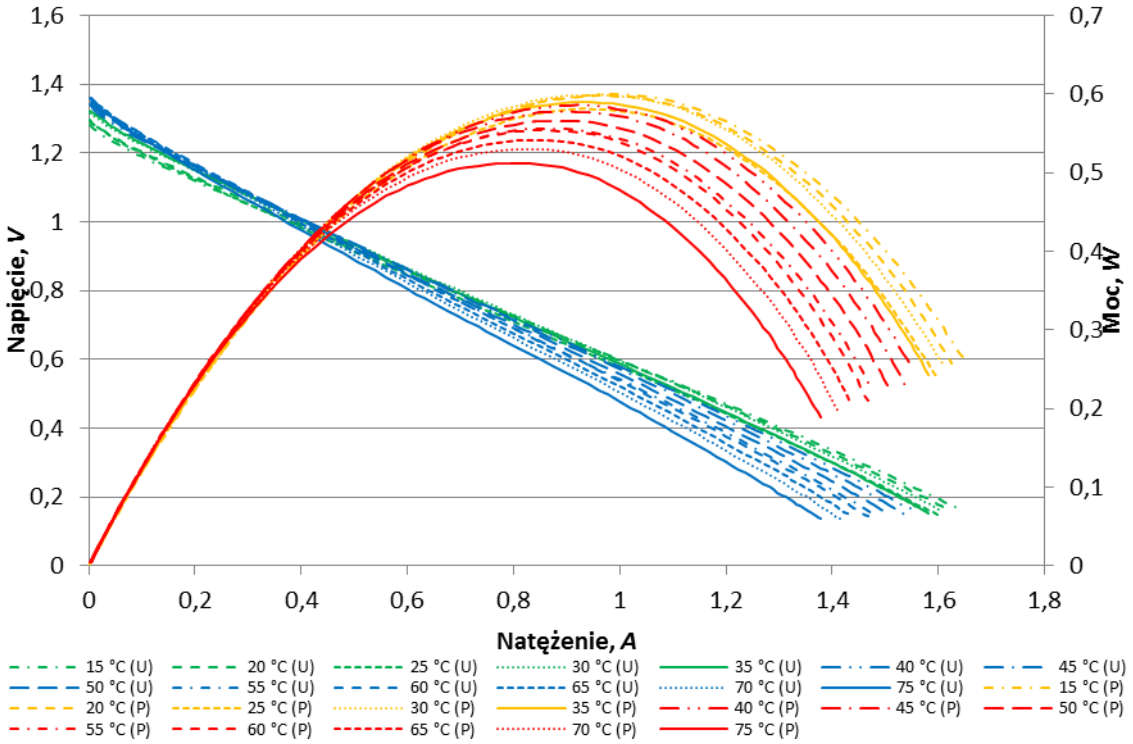
Rys. 10.34 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 20 °C



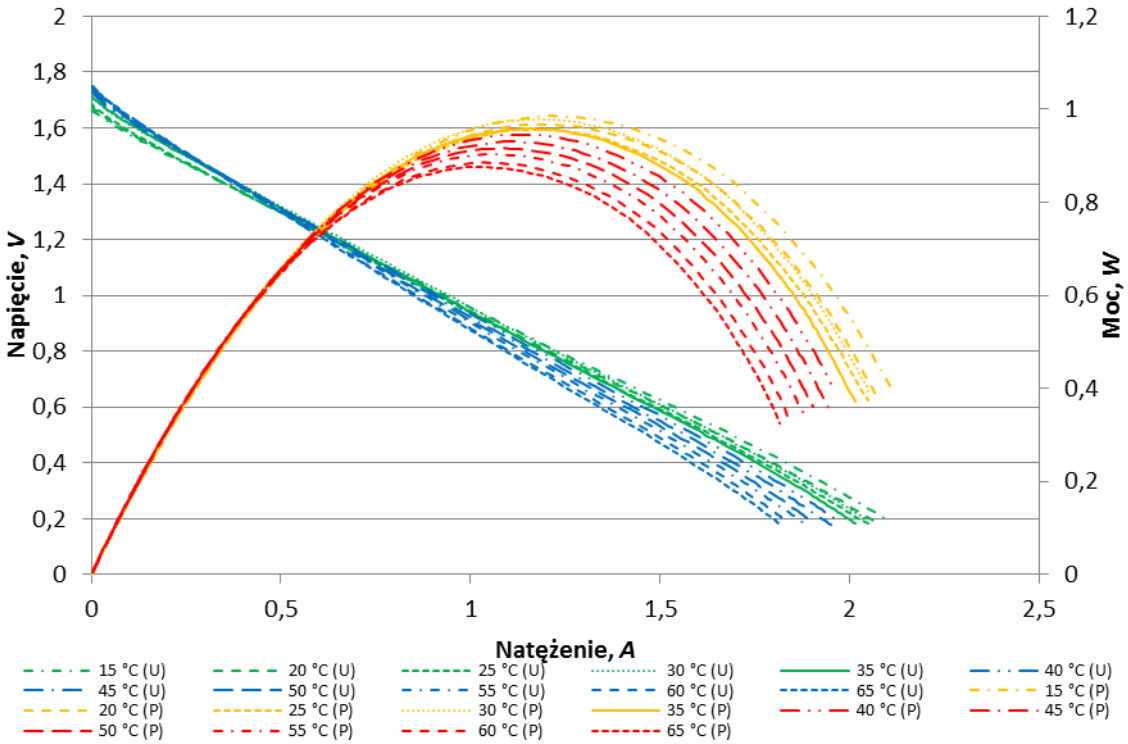
Rys. 10.35 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 25 °C



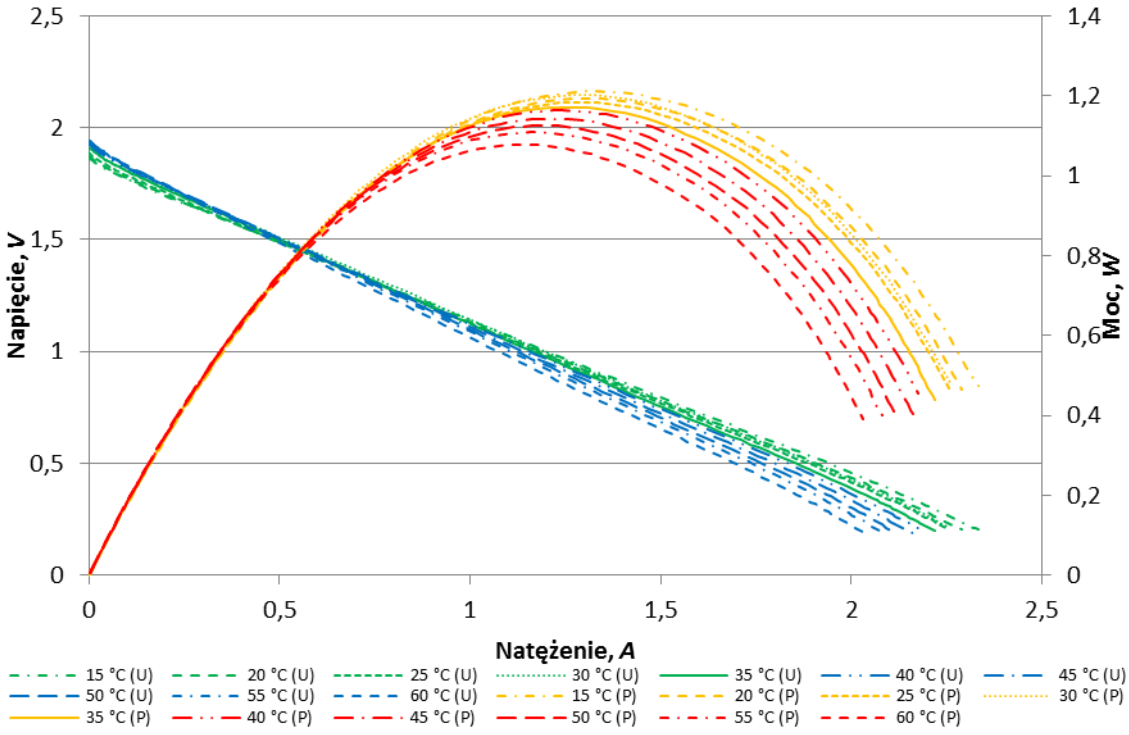
Rys. 10.36 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 30 °C



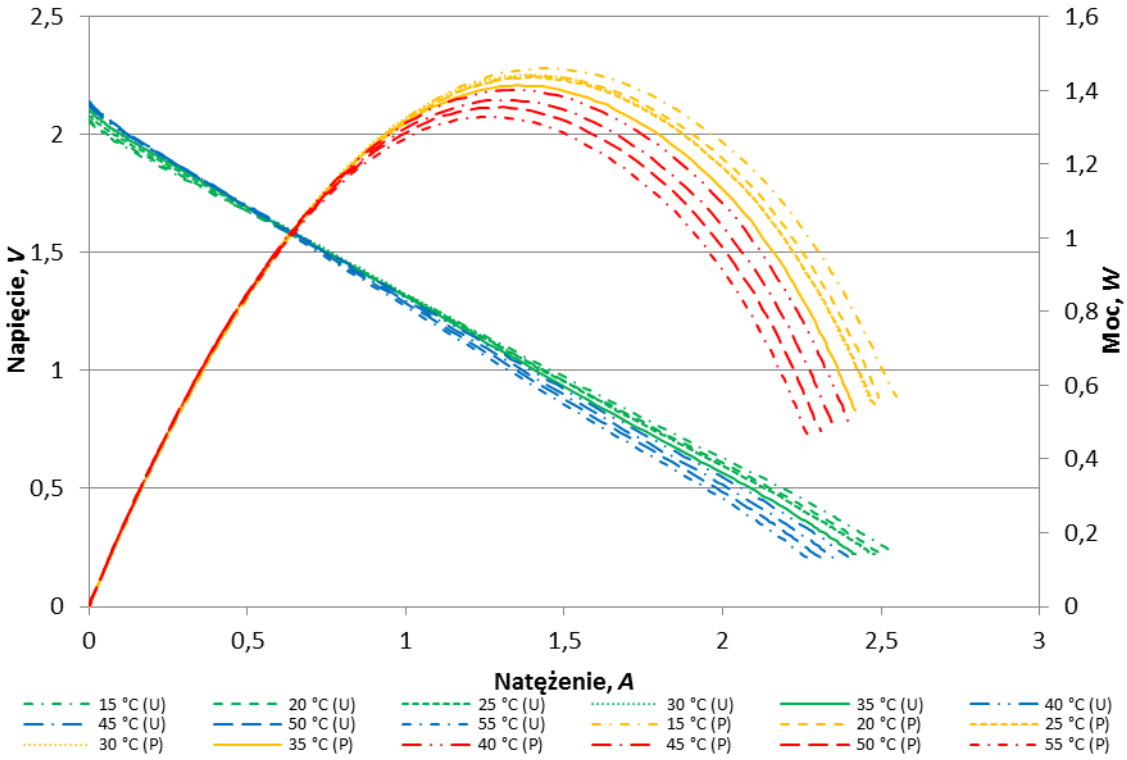
Rys. 10.37 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 35 °C



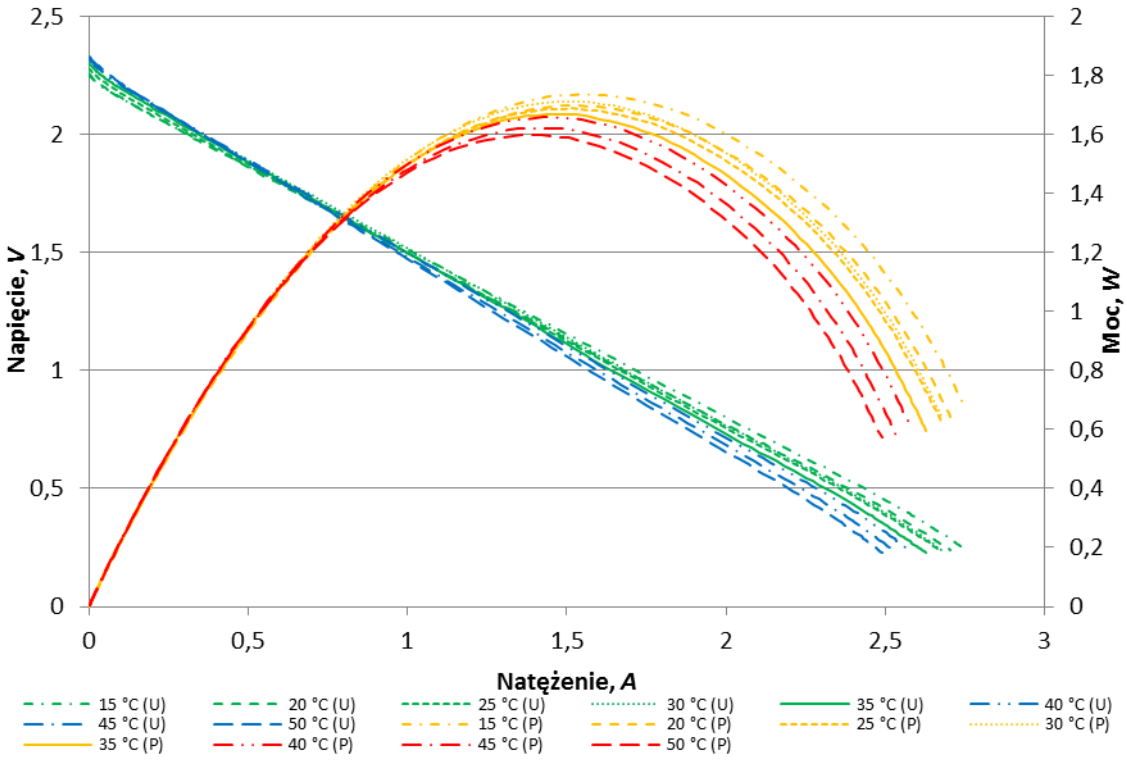
Rys. 10.38 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 40 °C



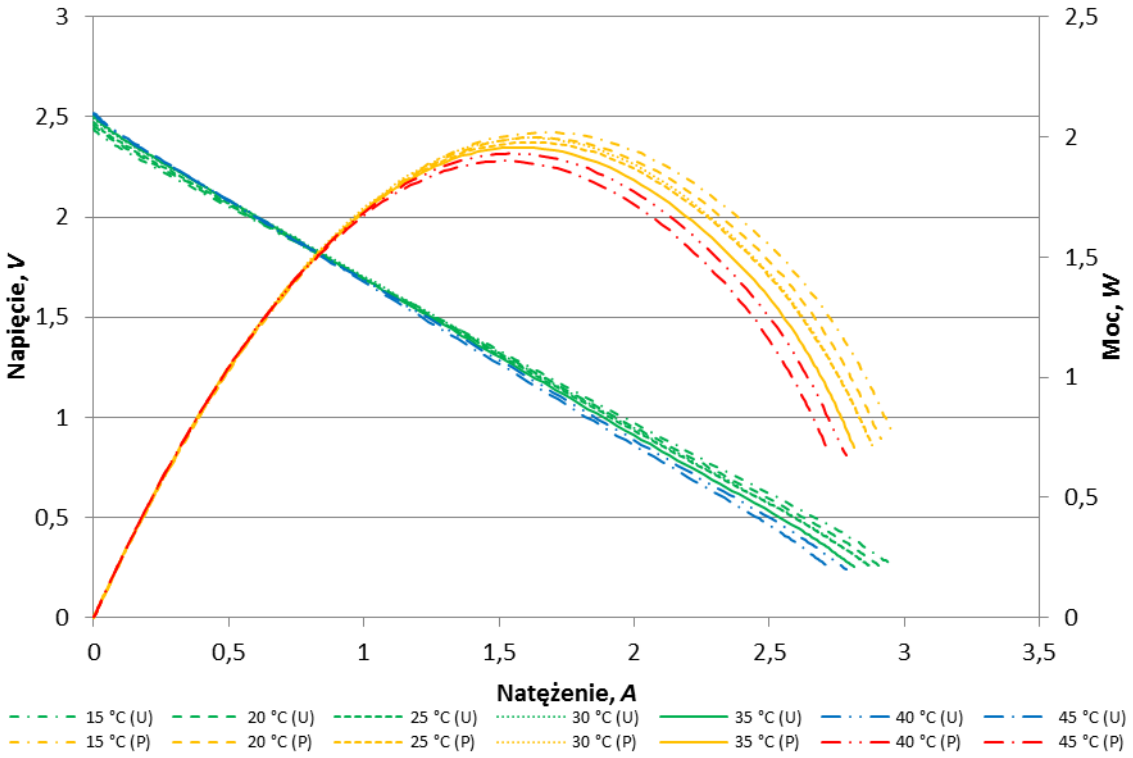
Rys. 10.39 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 45 °C



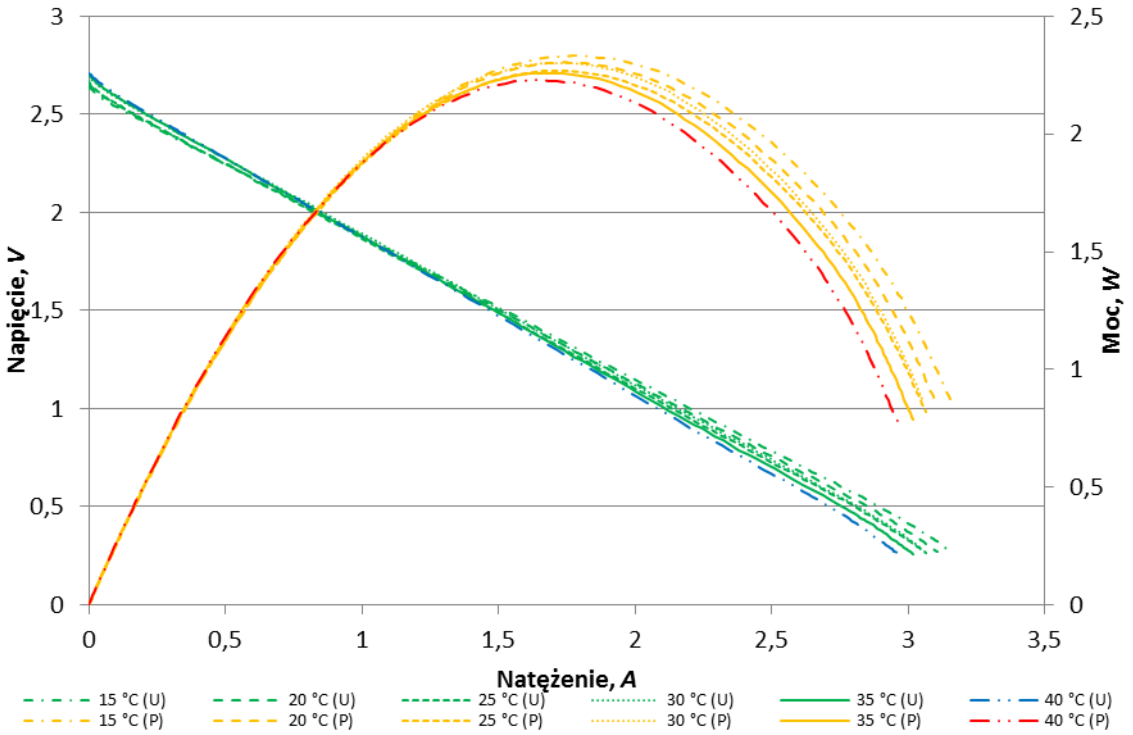
Rys. 10.40 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 50 °C



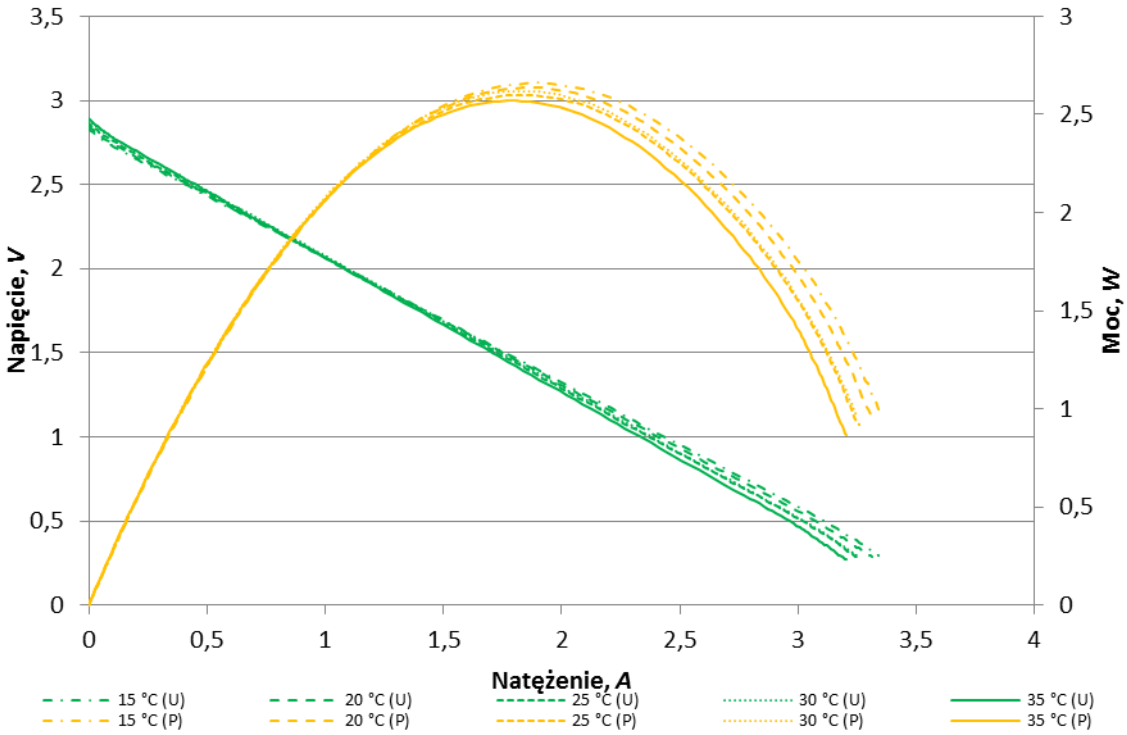
Rys. 10.41 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 55 °C



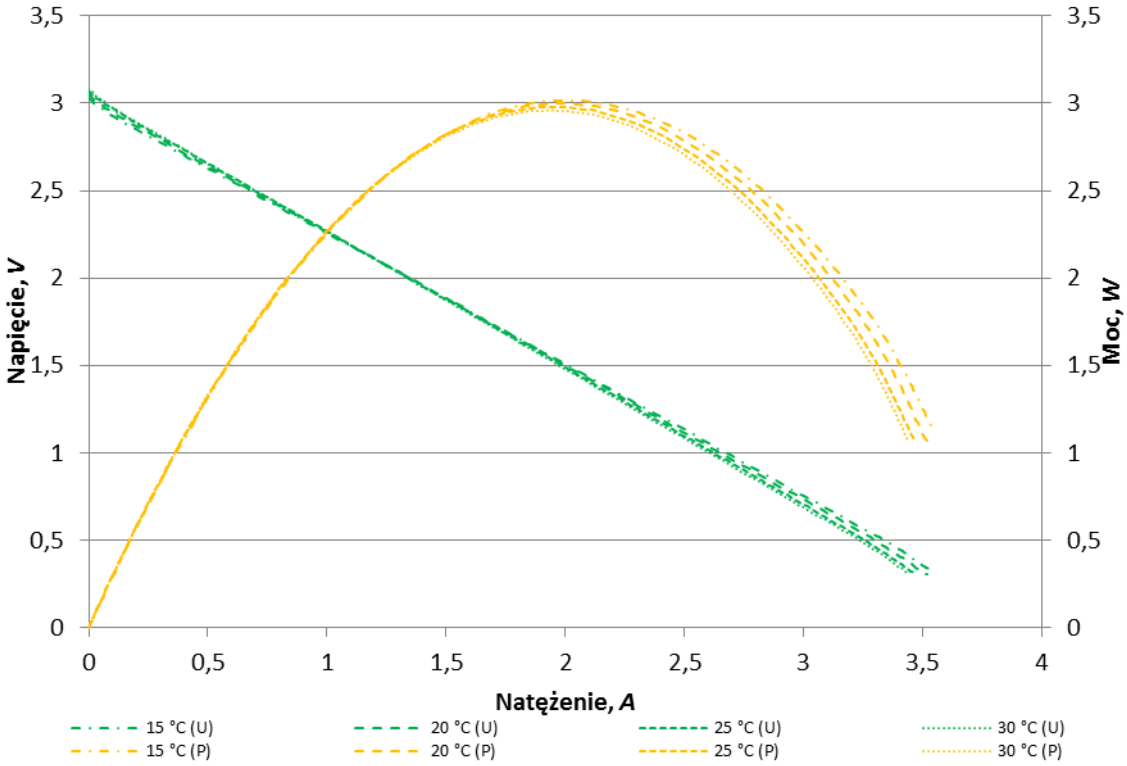
Rys. 10.42 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 60 °C



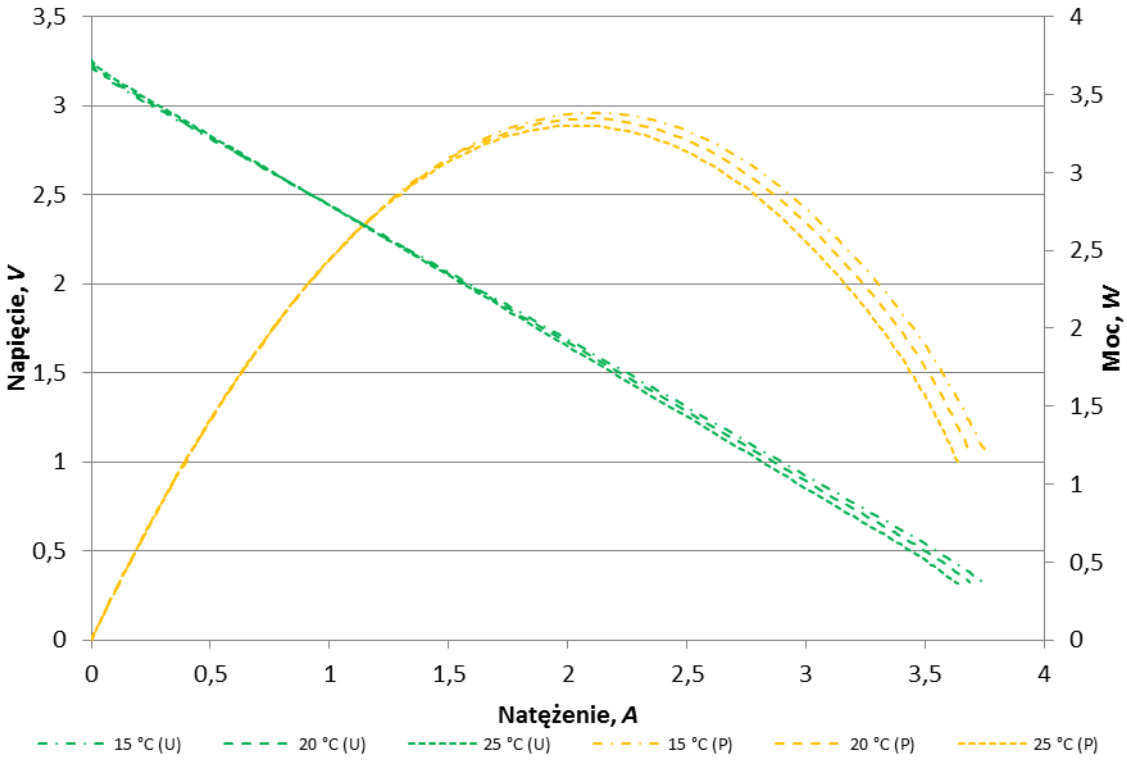
Rys. 10.43 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 65 °C



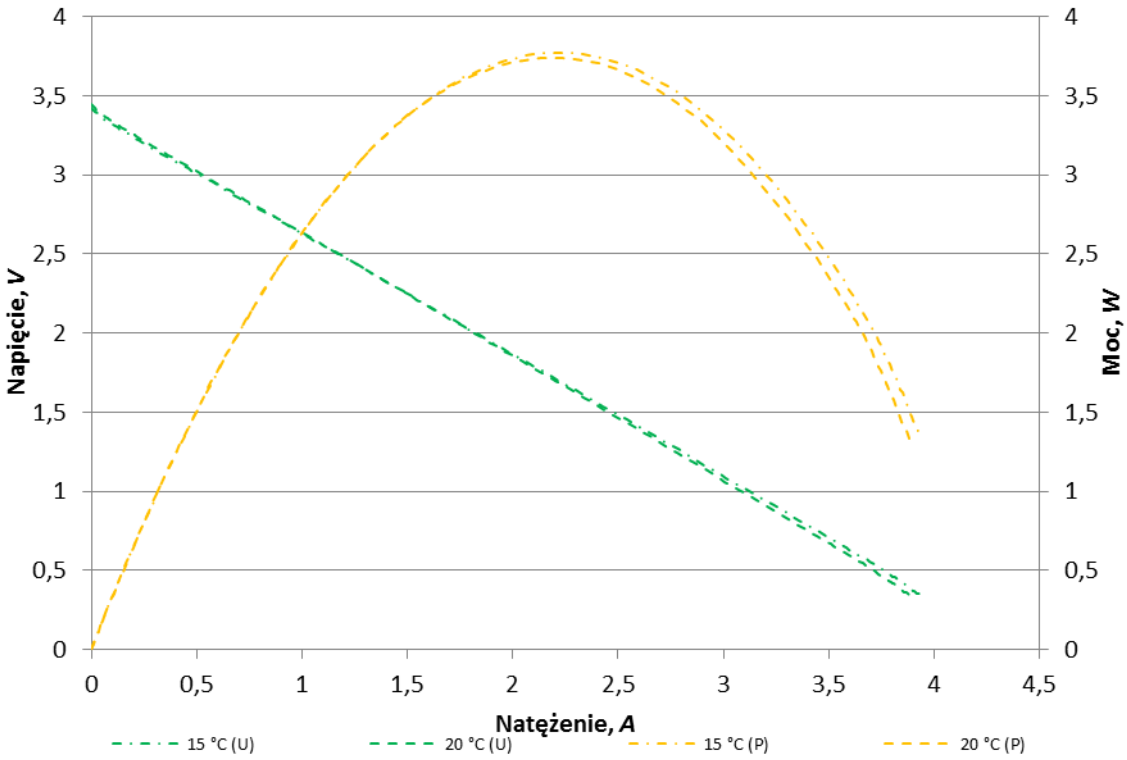
Rys. 10.44 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 70 °C



Rys. 10.45 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 75 °C



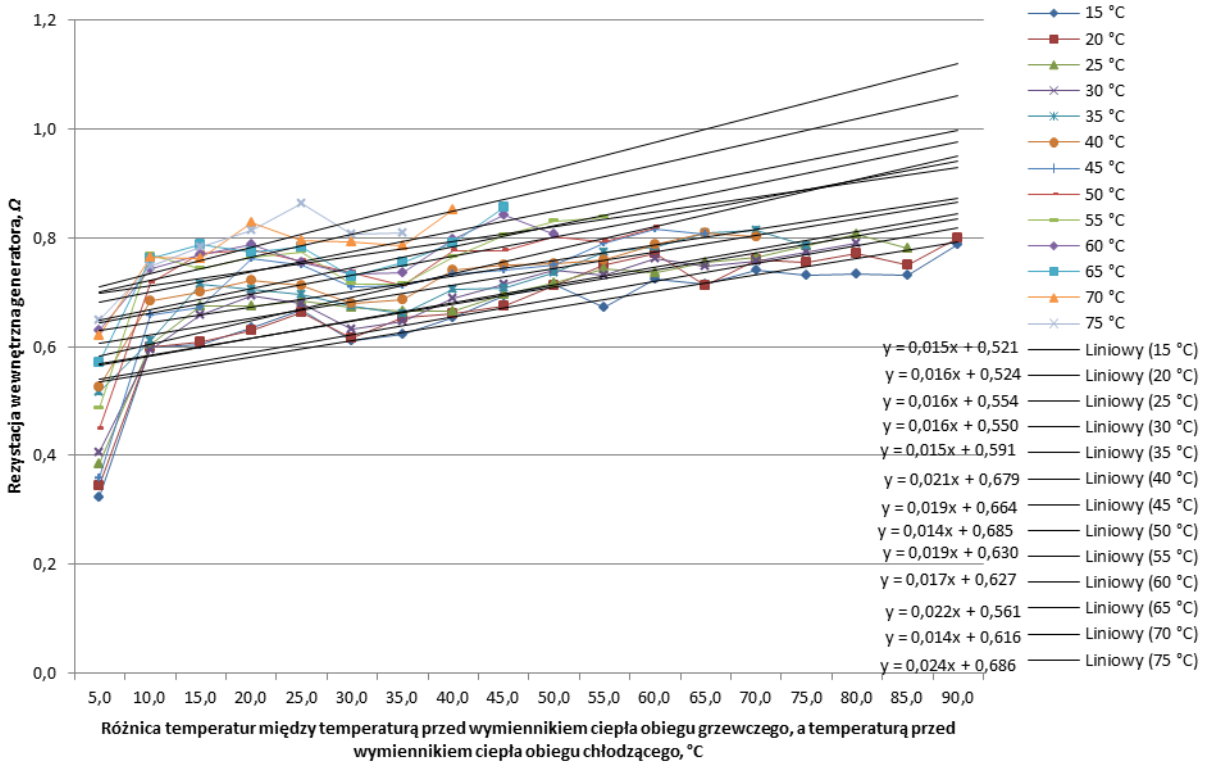
Rys. 10.46 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 80 °C



Rys. 10.47 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 85 °C

Zgodnie z przedstawionymi charakterystykami, w badanym zakresie temperatur, wydajność generatora TEC1-12730 maleje wraz z przesuwaniem różnicy temperatur w kierunku temperatury wyższej. Obserwowane zmiany dotyczą zarówno maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo jak również parametrów napięcia i natężenia prądu, przy których moc ta jest generowana. Dla określonej różnicy temperatur moc elektryczna generowana przy niższej temperaturze czynnika w obiegu chłodzącym osiąga swoją maksymalną wartości przy wyższym zarówno natężeniu jak i napięciu prądu. Zmiana maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przy różnym położeniu różnicy temperatur na skali temperatur może wynosić maksymalnie około 20 % na korzyść niższych temperatur odniesienia (Rys. 10.36 – maksymalna moc elektryczna przy temperaturze czynnika w obiegu chłodzącym równej 15 °C wynosi 0,45 W, ta sama moc przy temperaturze obiegu chłodzącego równej 75 °C jest równa 0,38 W).

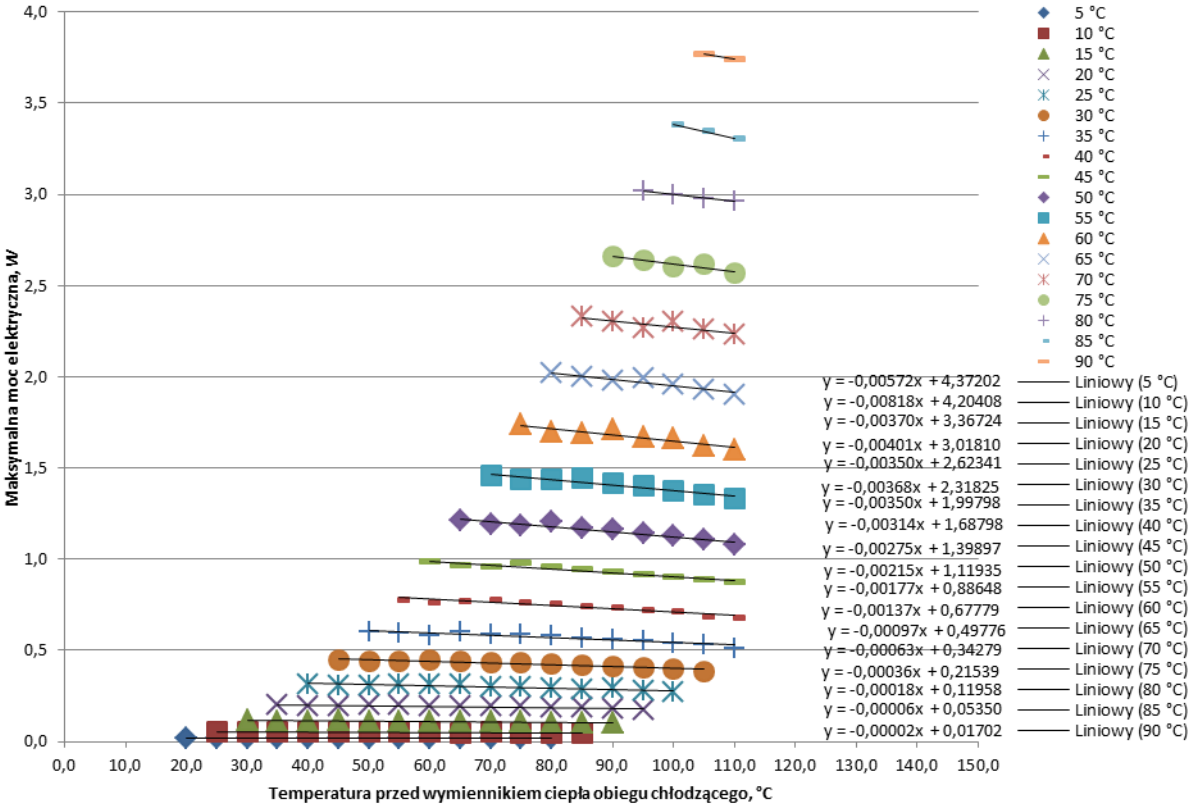
Zjawisko to jest związane z ze wzrostem rezystancji wewnętrznej, która rośnie zarówno ze względu na zwiększanie różnicy temperatur między obiegami, jak również ze względu na zwiększanie temperatury w obiegu chłodzącym, a tym samym zmianę wartości współczynnika Seebecka materiału termoelektrycznego (Rys. 10.48).



Rys. 10.48 Zależność rezystancji wewnętrznej ogniwa TEC1-12730 od różnicy między temperaturą przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego i temperaturą przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego dla ustabilizowanych temperatur obiegu chłodzącego

Celem wykazania charakteru zmian wartości maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo w zależności od położenia różnicy temperatur na skali temperatur, sporządzono wykres zależności mocy maksymalnej od temperatury czynnika przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego dla badanych zakresów różnic temperatur (Rys. 10.49). Ujemna wartość wszystkich współczynników kierunkowych linii trendu wyznaczonych dla punktów pomiarowych przy określonej różnicy temperatur, potwierdza wcześniejszy wniosek dotyczący spadku efektywności generatora TEC1-12730 wraz z przesuwaniem się różnicy temperatur w stronę temperatury wyższej.

Z uwagi na to, zależność pozwalająca na obliczenie parametrów prądu generowanego przez ogniwo musi odnosić się nie tylko do różnicy temperatur między czynnikiem w obiegach jako takiej, ale również do jej położenia na skali temperatur.

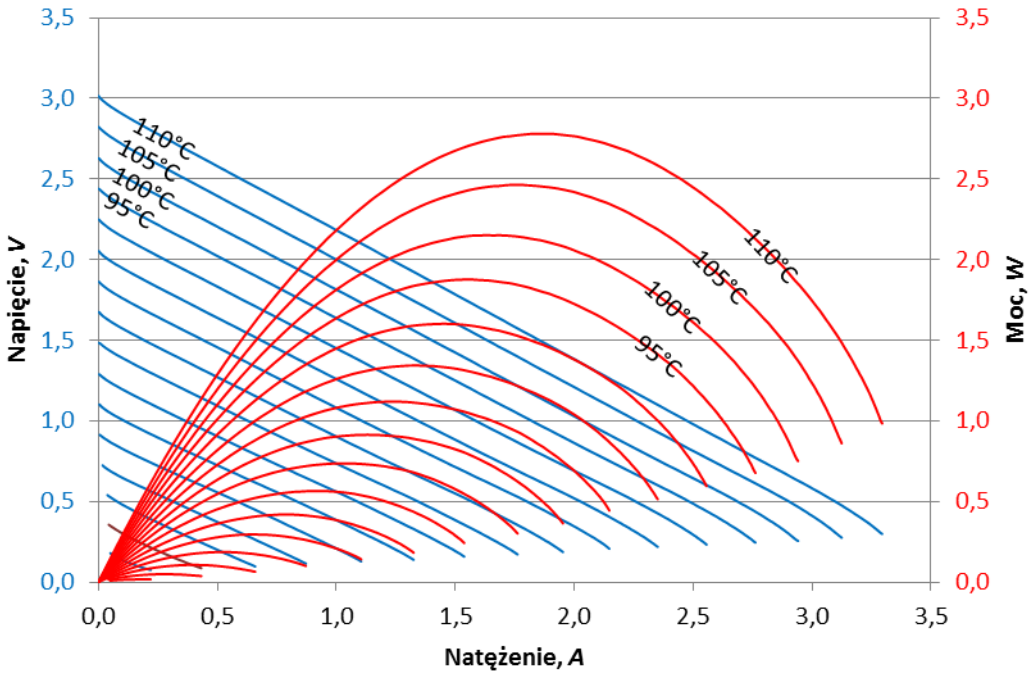


Rys. 10.49 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej od temperatury czynnika przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego dla wybranych różnic temperatur między obiegiem grzewczym, a chłodzącym

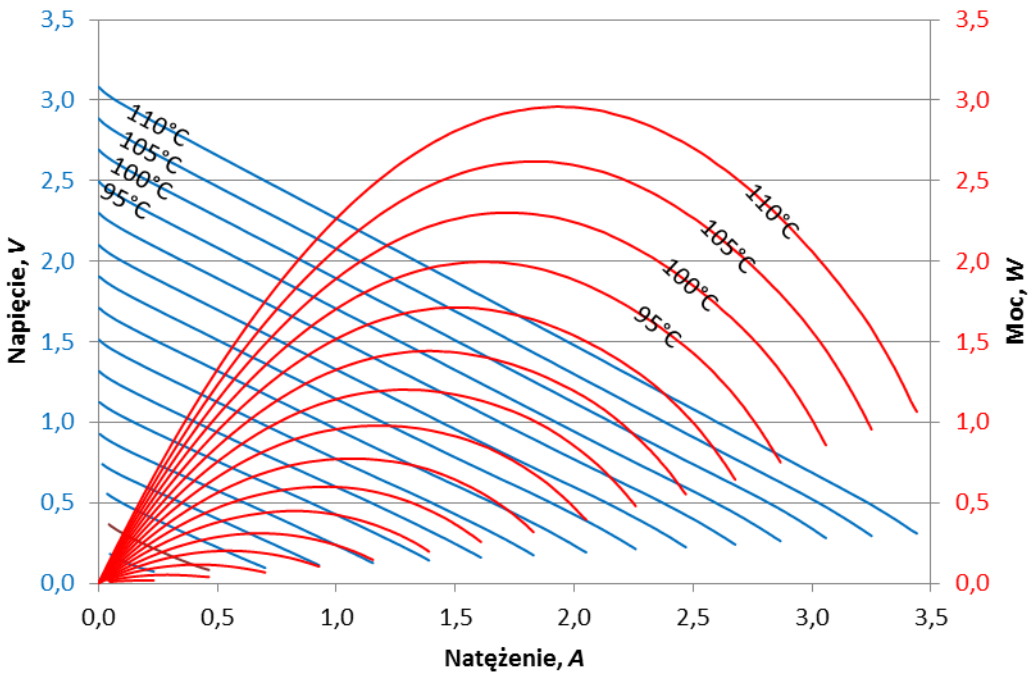
10.4.2. Wpływ strumienia przepływu czynnika w obiegach grzewczym i chłodzącym na parametry prądu elektrycznego generowanego przez ogniwo TEC1-12730

Kolejne badania dotyczyły określenia wpływu strumienia przepływu czynnika w obiegach na parametry prądu elektrycznego generowanego przez TEG. Wszystkie badania były prowadzone dla ustabilizowanej temperatury w obiegu chłodzącym równej 30 °C oraz temperatur w obiegu

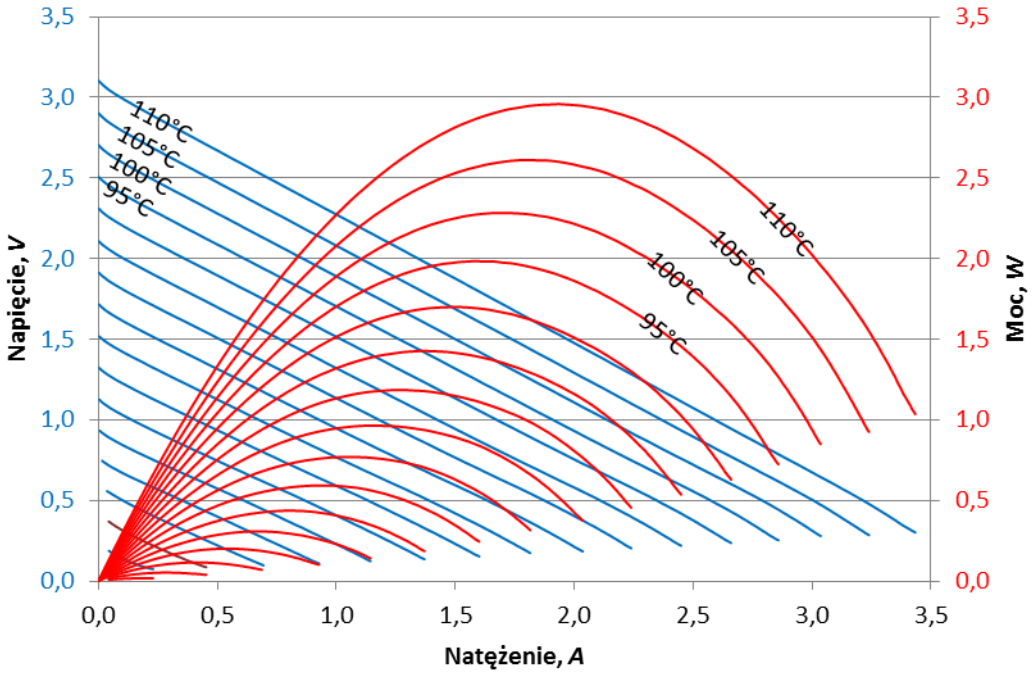
grzewczym równych kolejno 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105 oraz 110 °C. Dla każdej z różnic temperatur sporządzano charakterystykę elektryczną ogniwa. Pomiary wykonano dla następujących kombinacji przepływów w obiegu grzewczym (V_H) oraz w obiegu chłodzącym (V_C): V_H=0,100 m^3/h i V_C=0,100 m^3/h; V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h; V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h; V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h; V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h; V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h; V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h; V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h; V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h; V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach Rys. 10.50 do Rys. 10.59. Każdorazowo, kiedy w opisach wykresów występują wartości przepływów, pierwsza wartość odnosi się do przepływu czynnika w obiegu grzewczym, a druga do przepływu czynnika w obiegu chłodzącym.



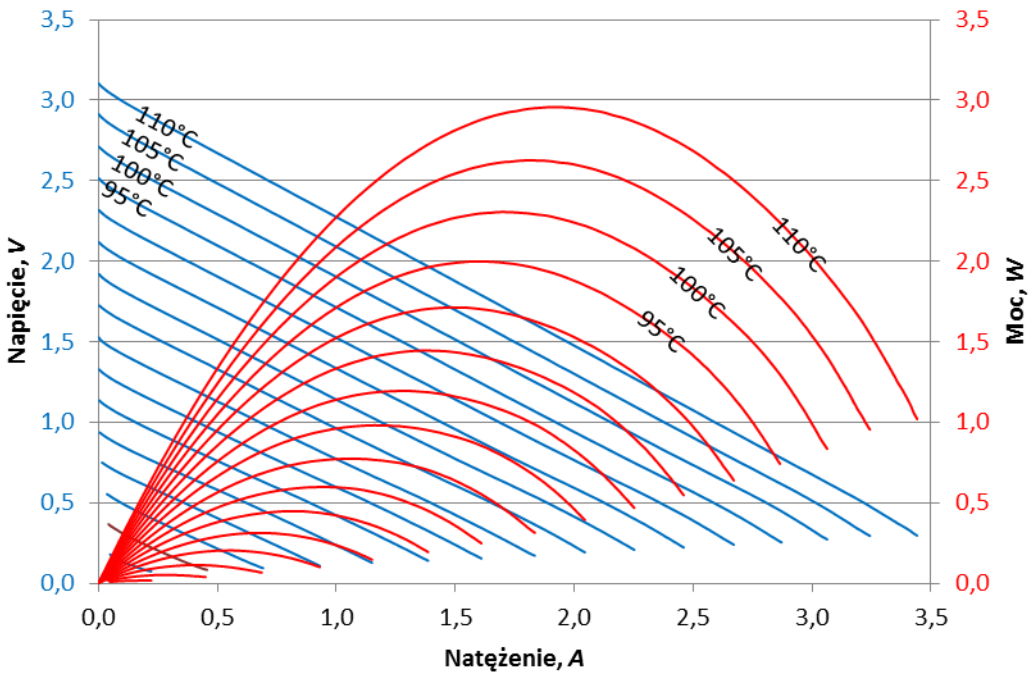
Rys. 10.50 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,100 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,100 m^3/h



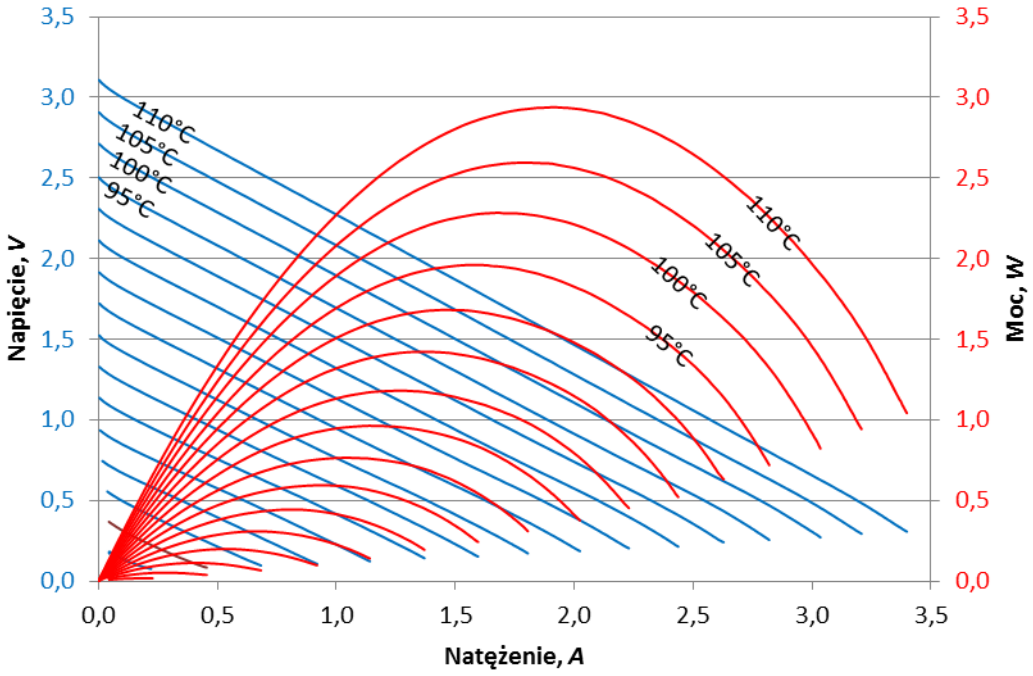
Rys. 10.51 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h



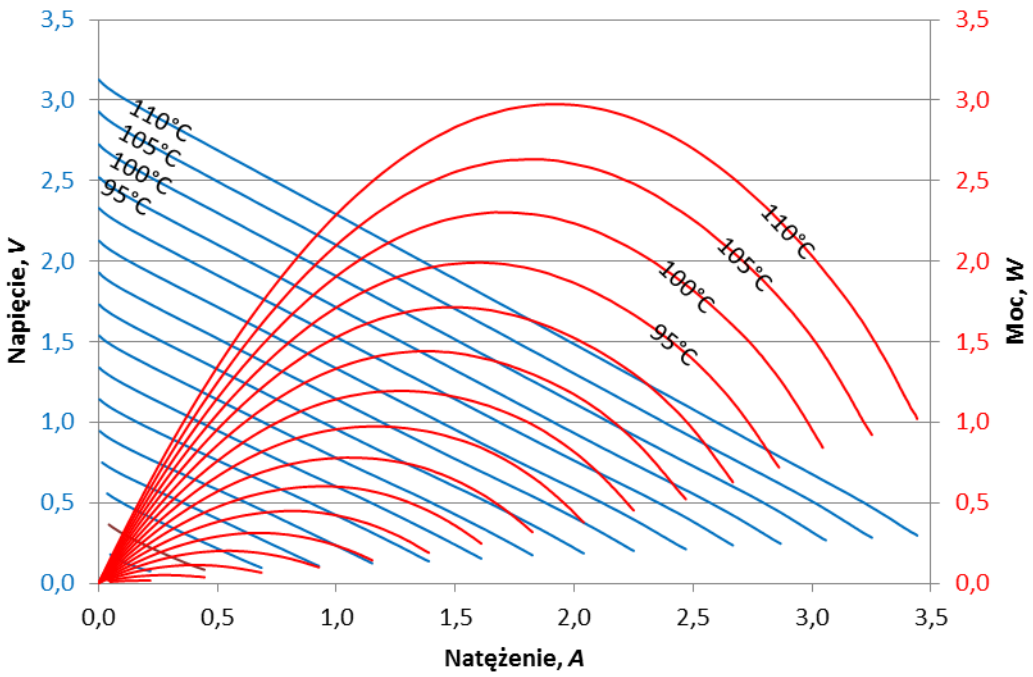
Rys. 10.52 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h



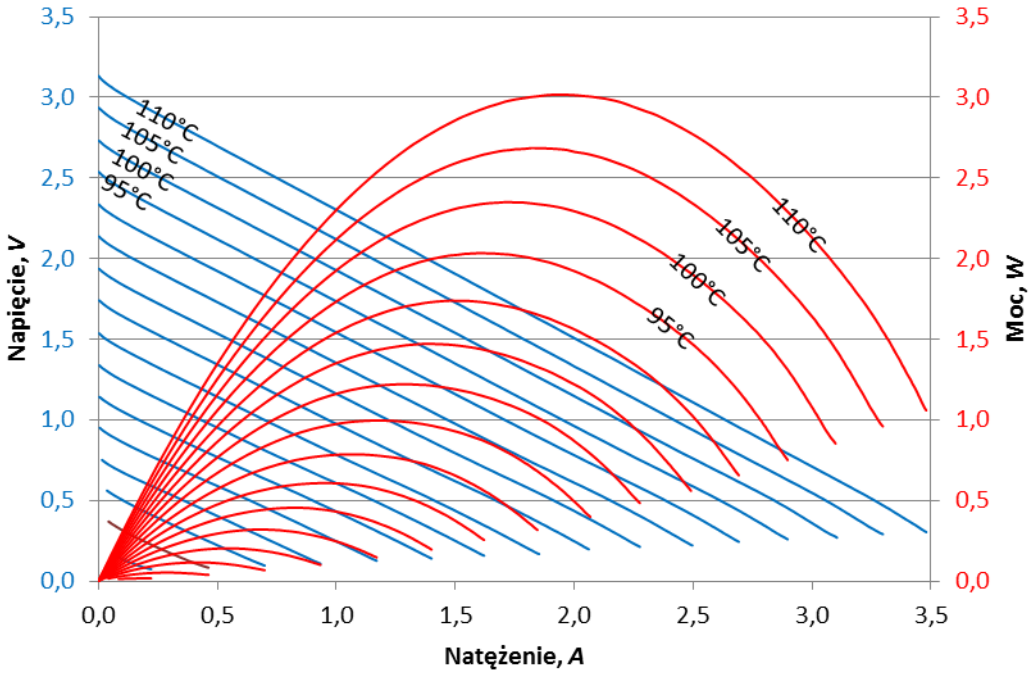
Rys. 10.53 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h



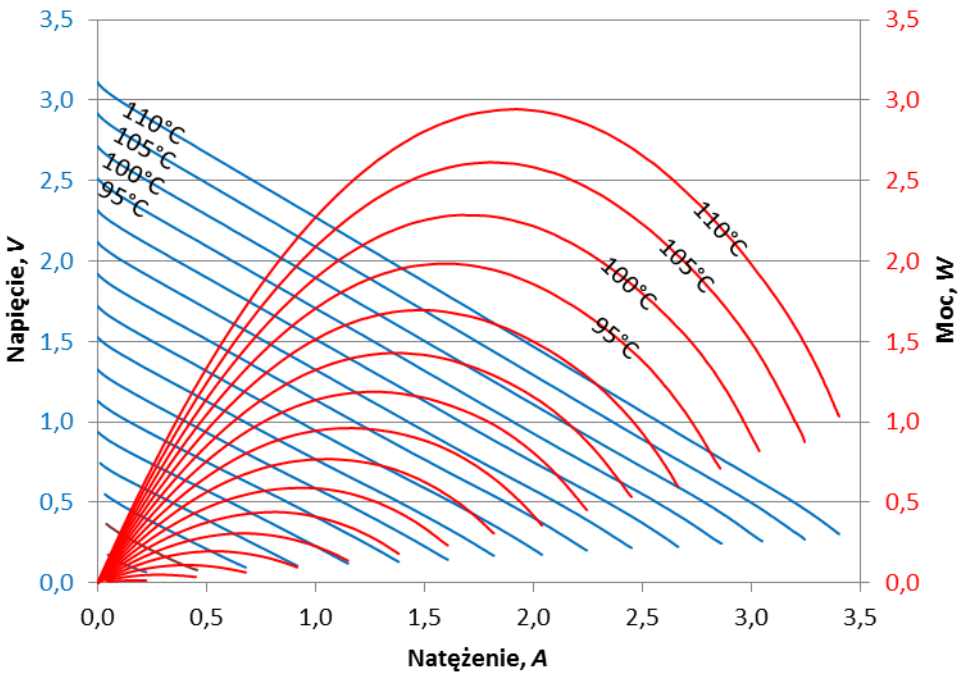
Rys. 10.54 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h



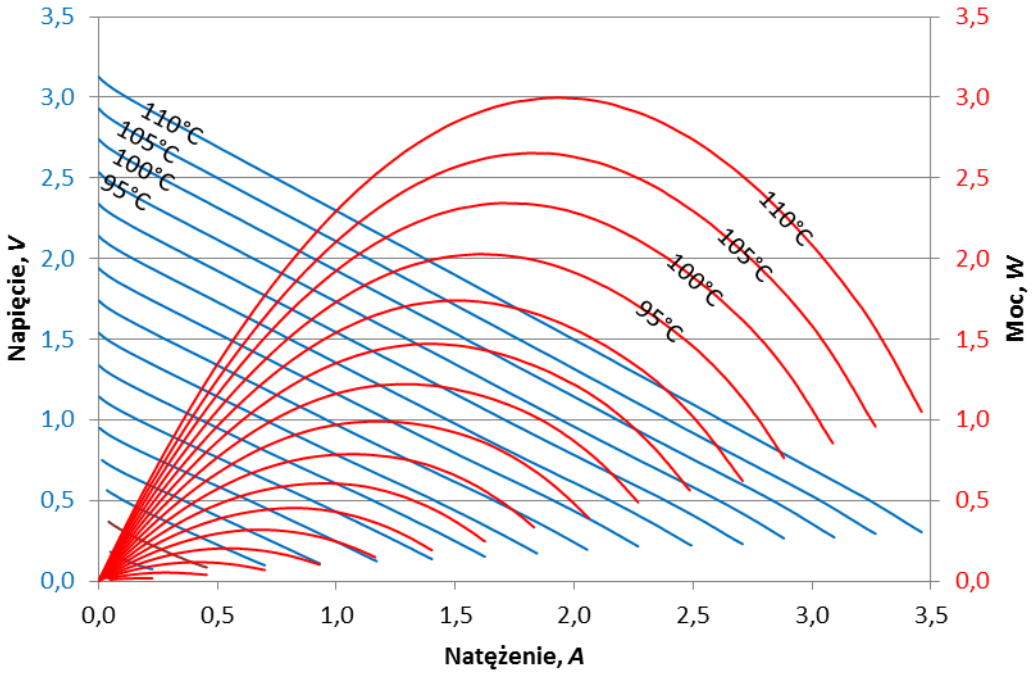
Rys. 10.55 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h



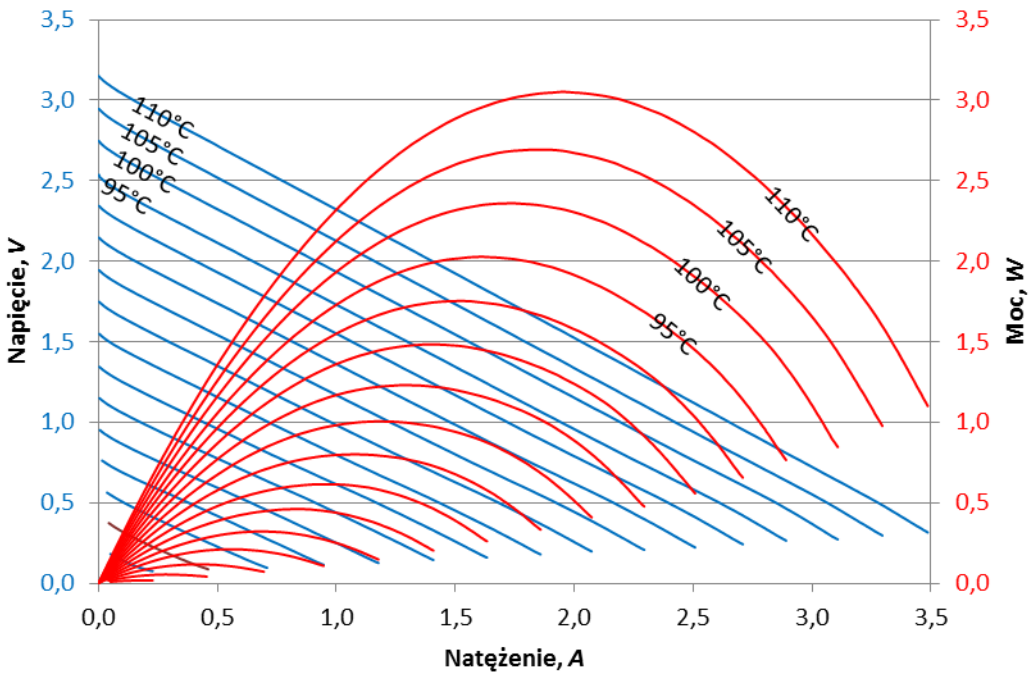
Rys. 10.56 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h



Rys. 10.57 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h

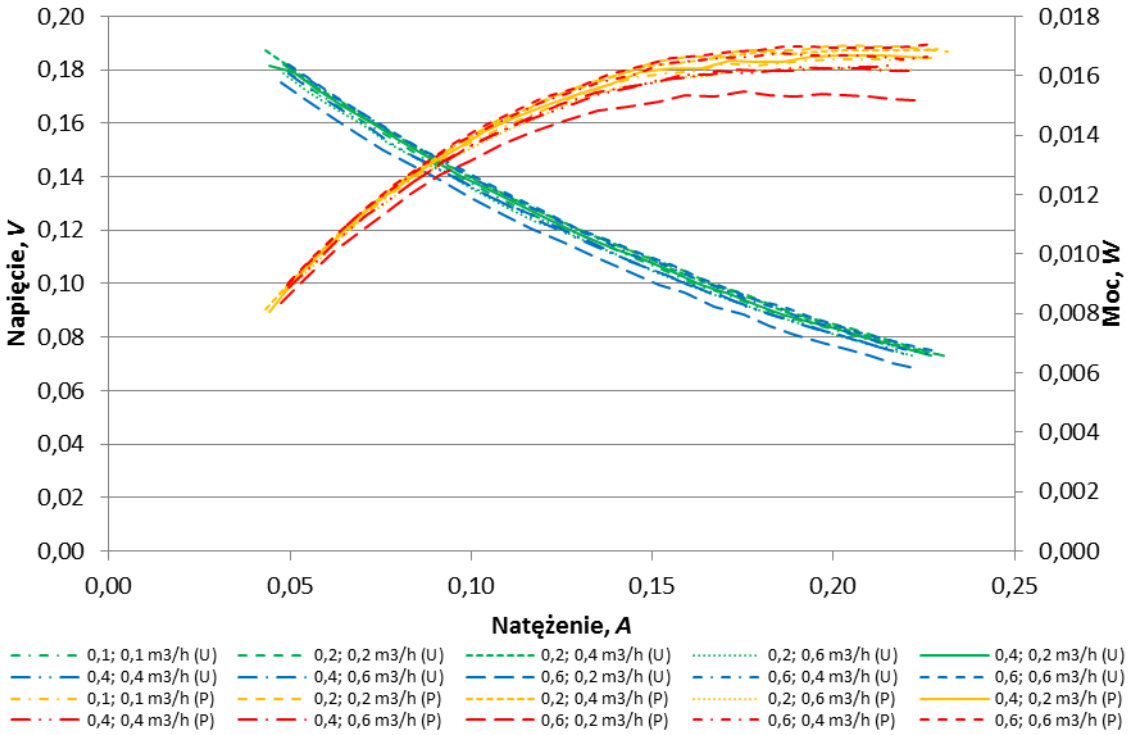


Rys. 10.58 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h

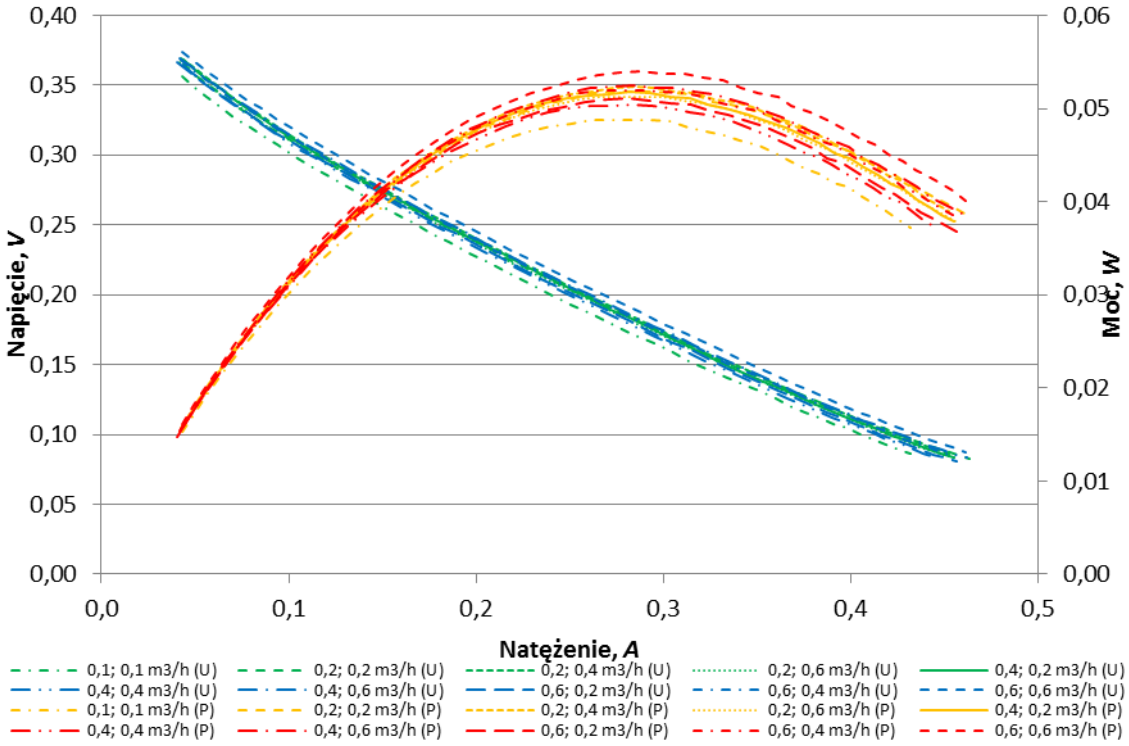


Rys. 10.59 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h

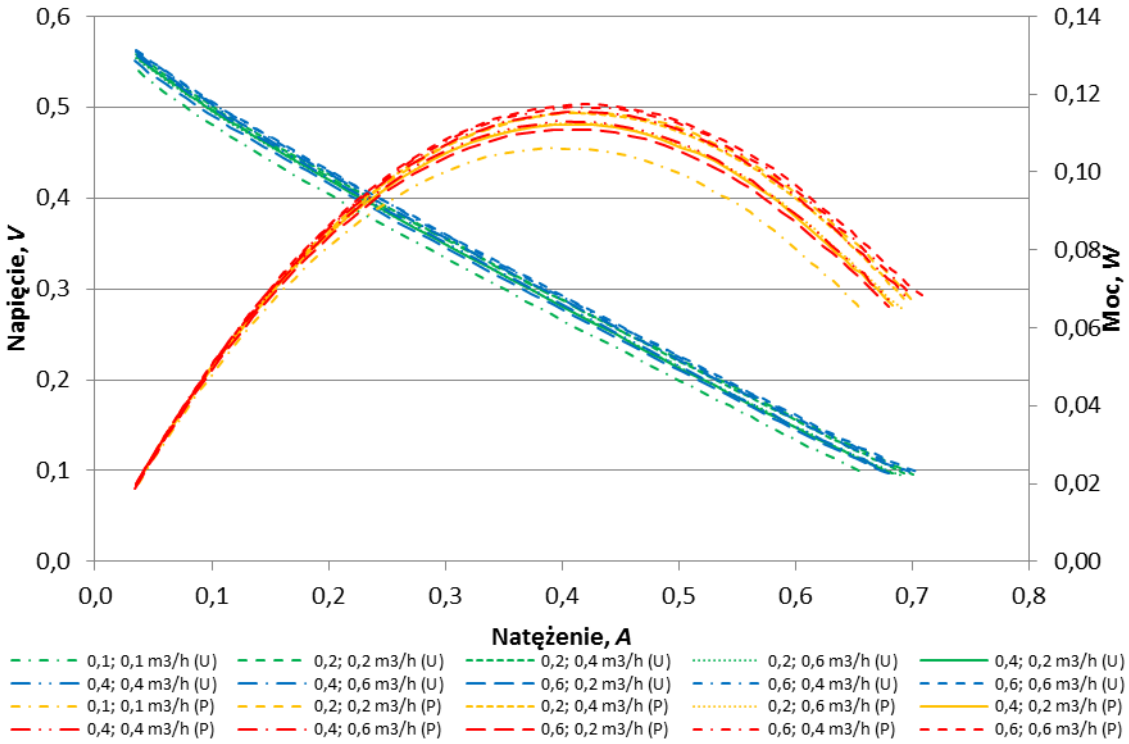
Przedstawione charakterystyki wskazują, że strumień przepływu czynnika zarówno w obiegu grzewczym jak i chłodzącym ma wpływ na efektywność pracy generatora termoelektrycznego. Aby lepiej zobrazować charakter zmienności parametrów elektrycznych prądu generowanego przez ogniwo przy zmiennych strumieniach przepływu czynnika w obiegach, sporządzono charakterystyki elektryczne dla różnych strumieni przepływu i tej samej różnicy temperatur między obiegiem chłodzącym i grzewczym (Rys. 10.60 - Rys. 10.75).



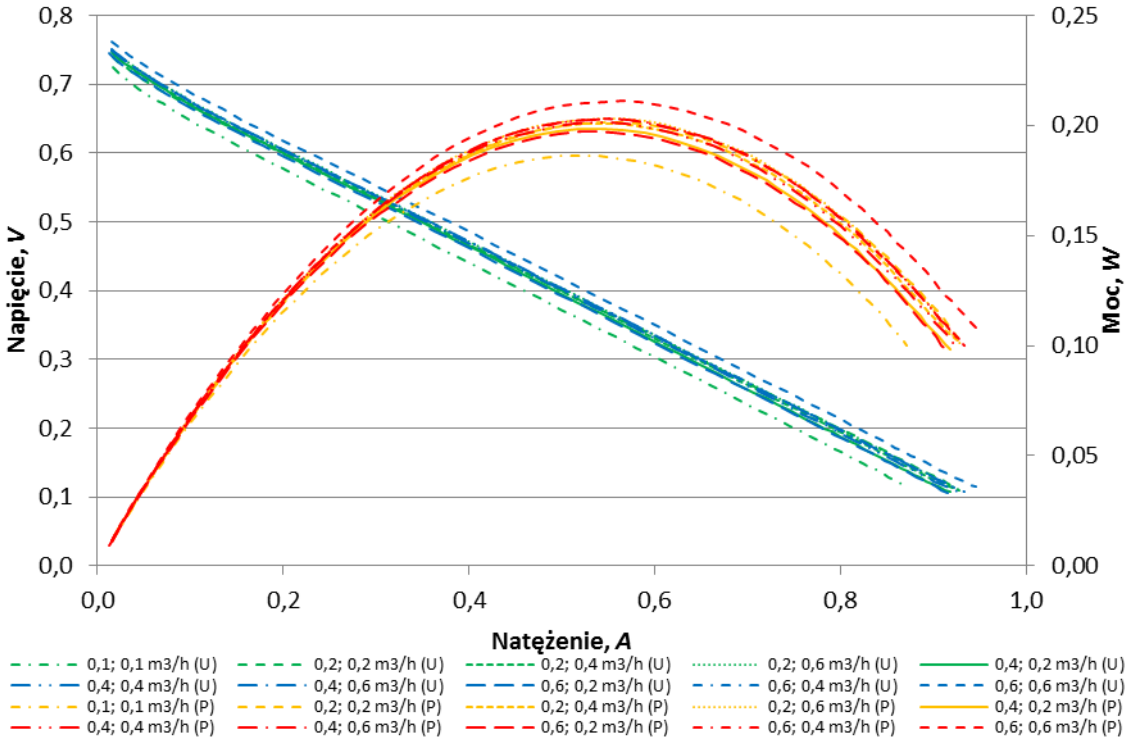
Rys. 10.60 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 5 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



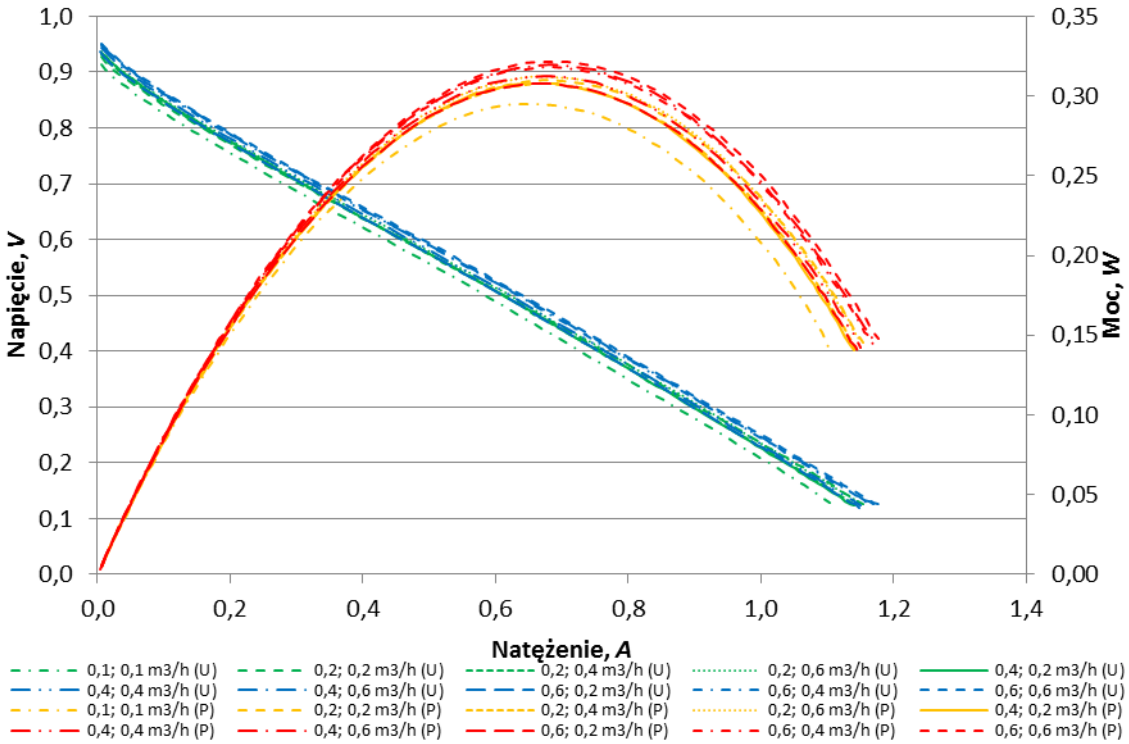
Rys. 10.61 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 10 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



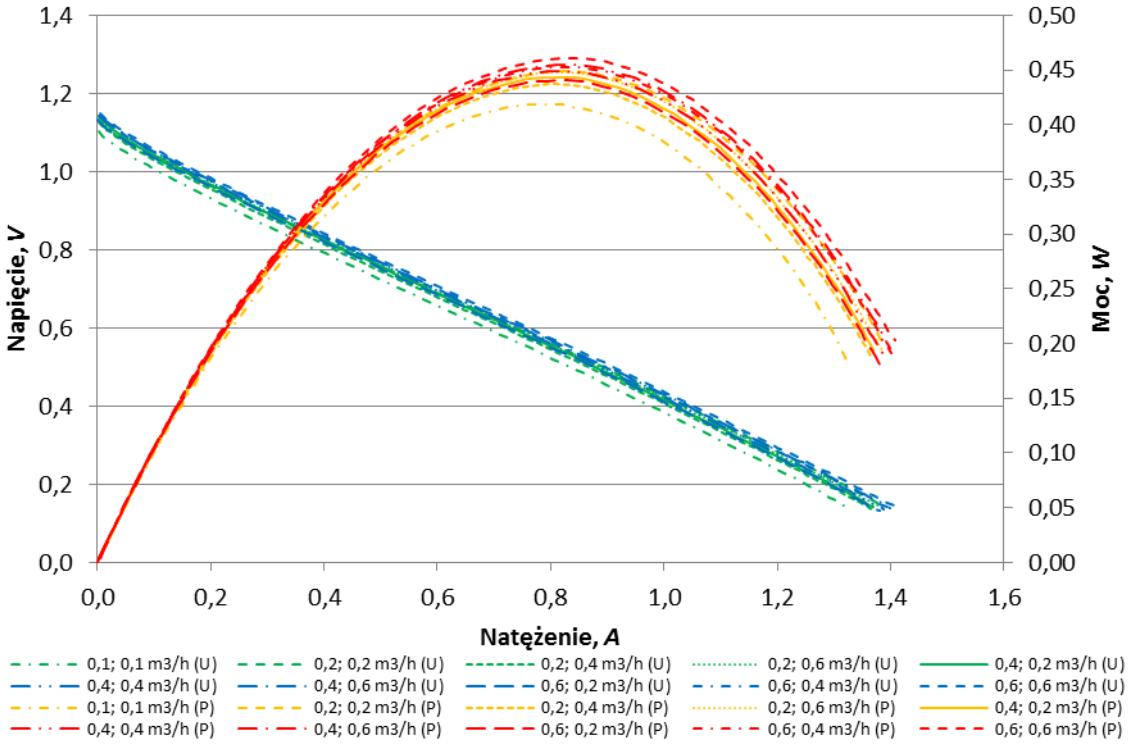
Rys. 10.62 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 15 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



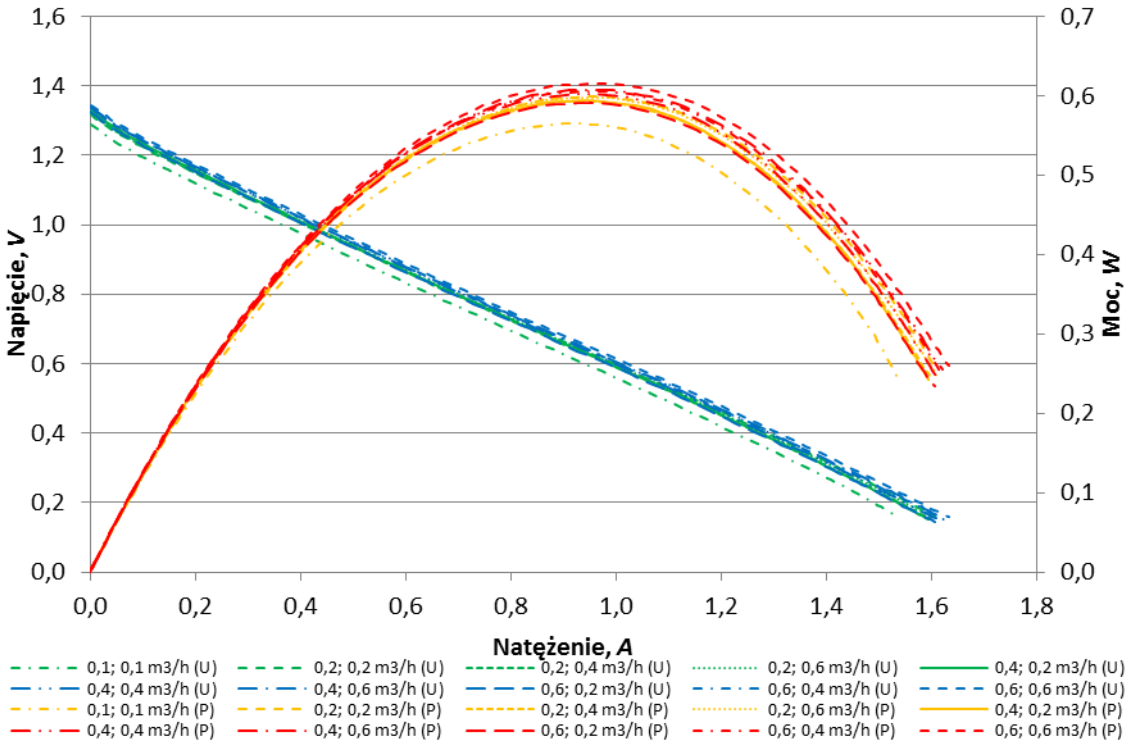
Rys. 10.63 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 20 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



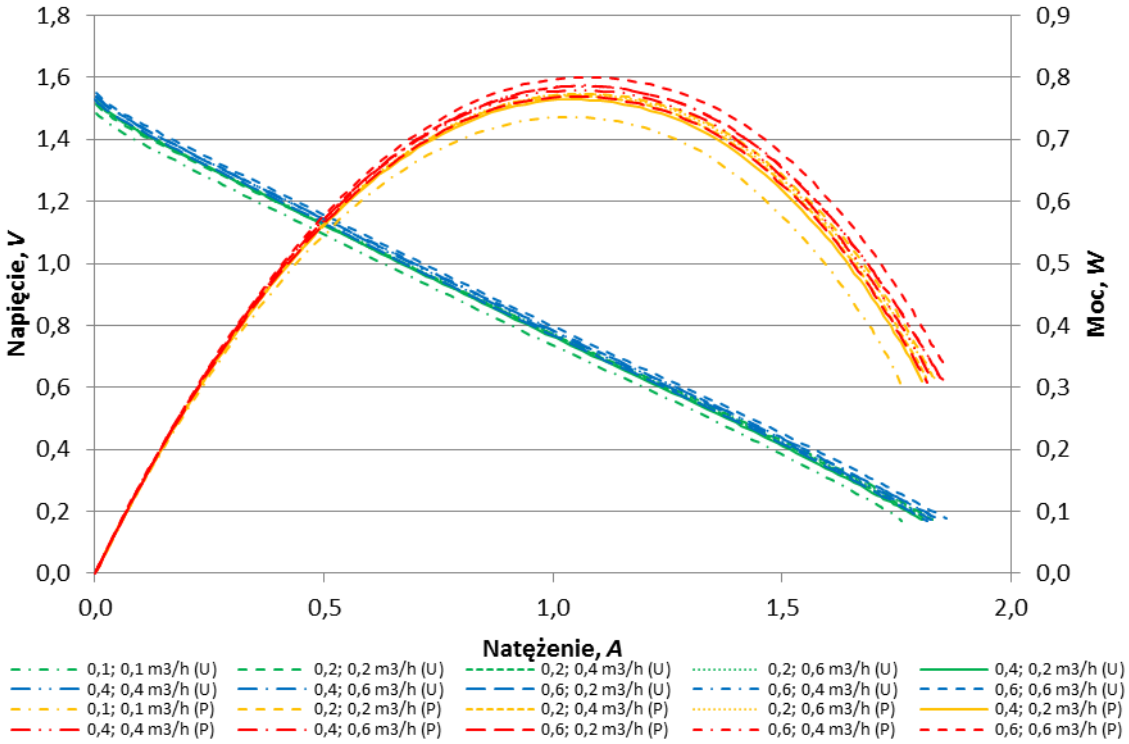
Rys. 10.64 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 25 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



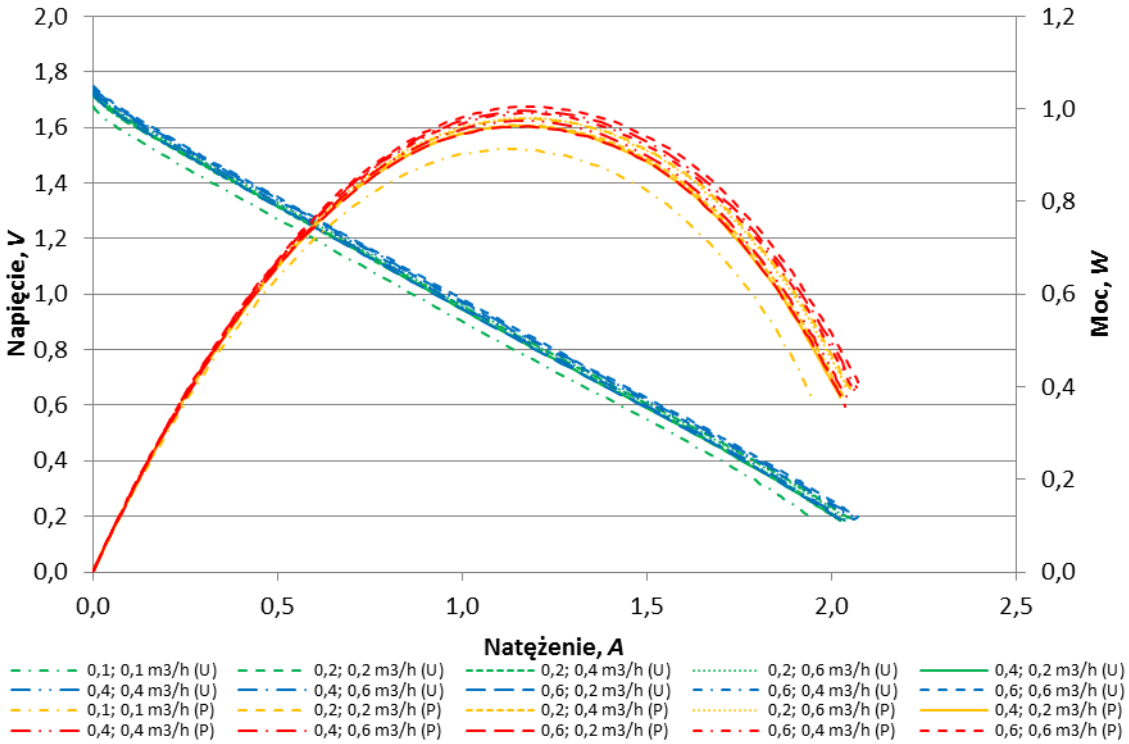
Rys. 10.65 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 30 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



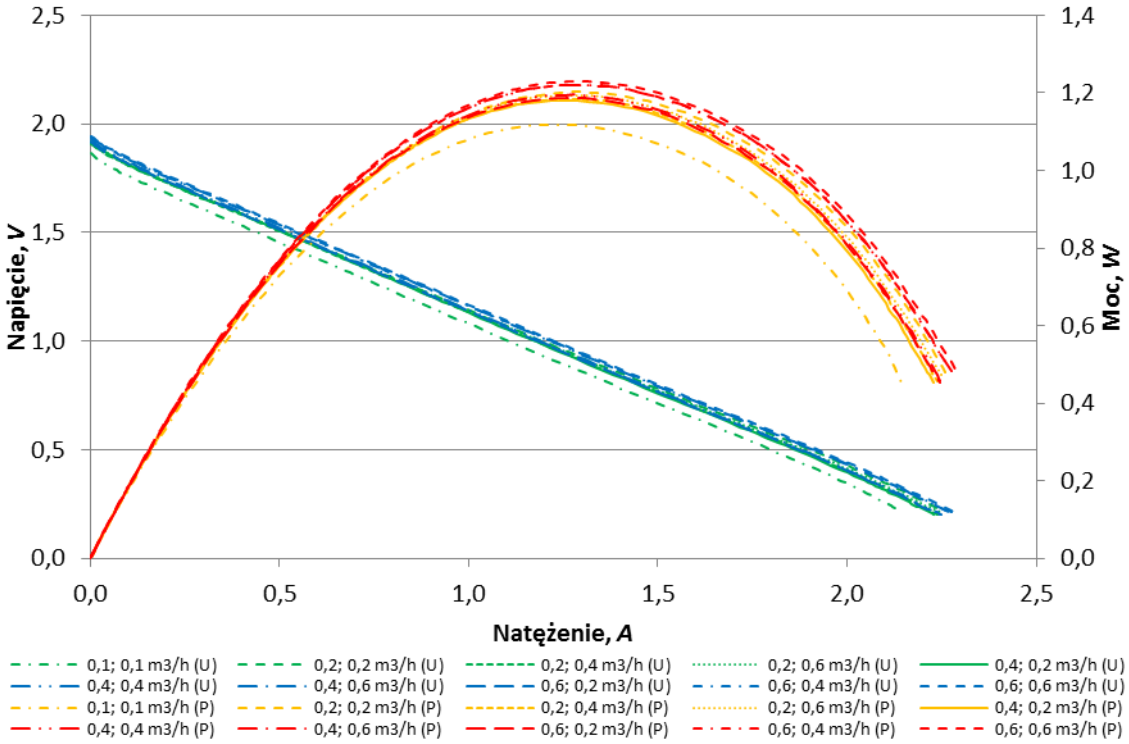
Rys. 10.66 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 35 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



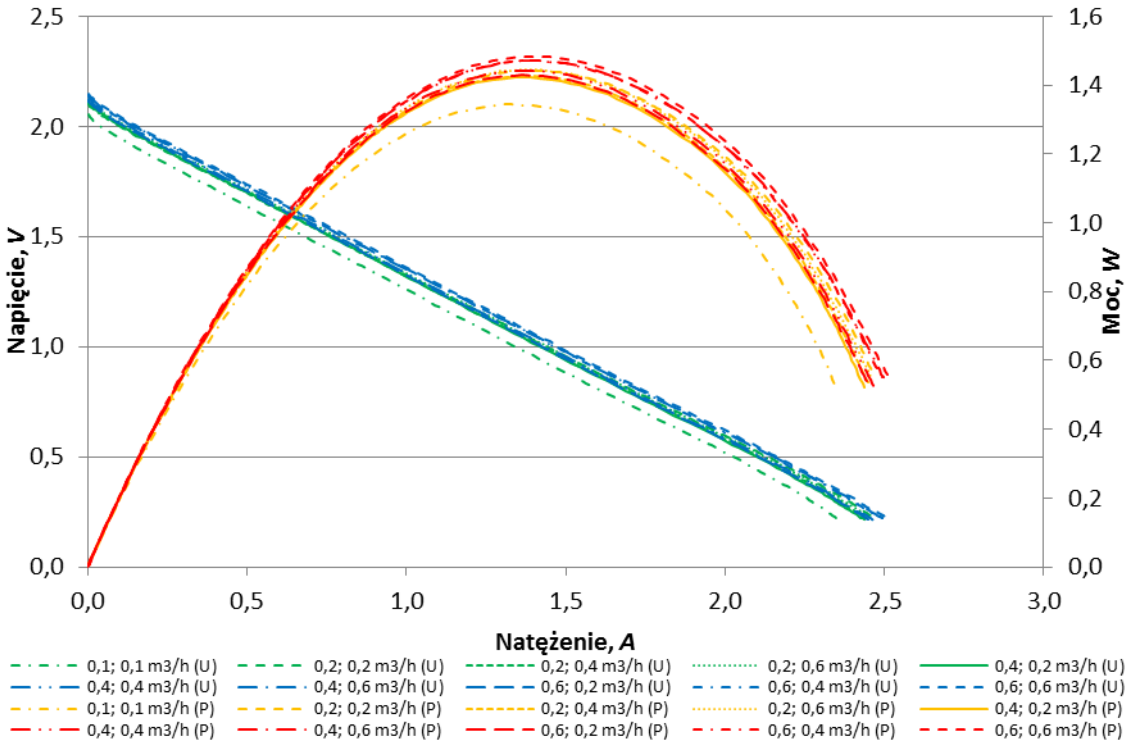
Rys. 10.67 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 40 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



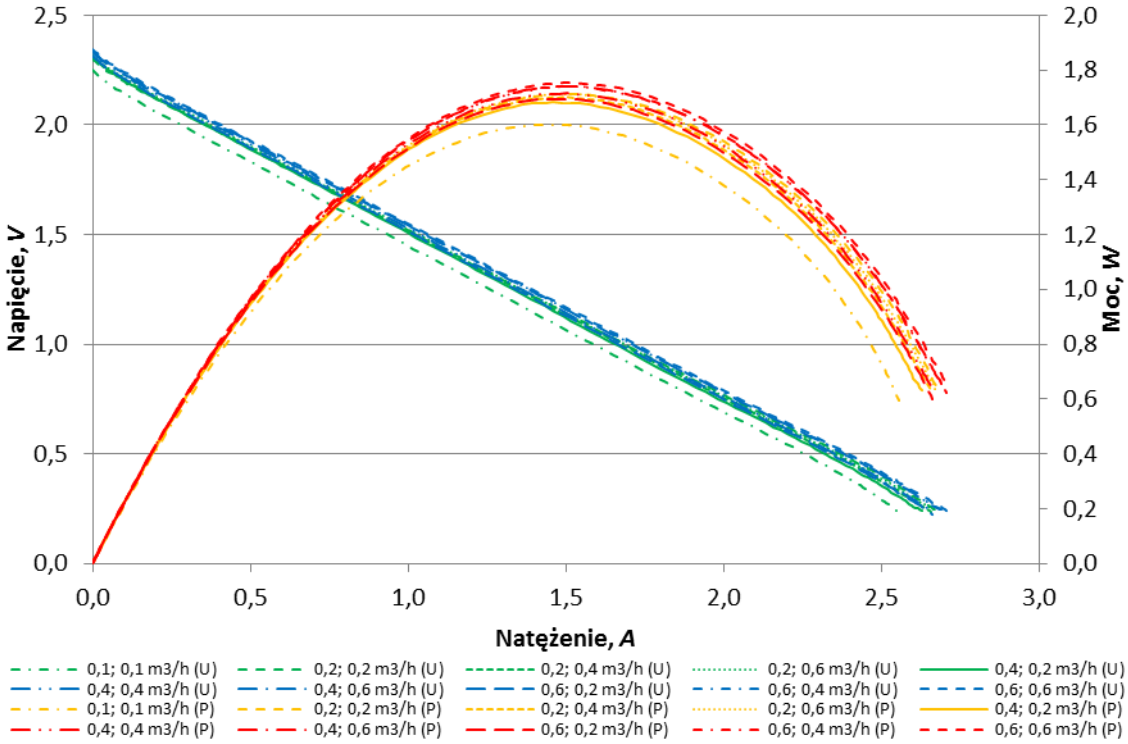
Rys. 10.68 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 45 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



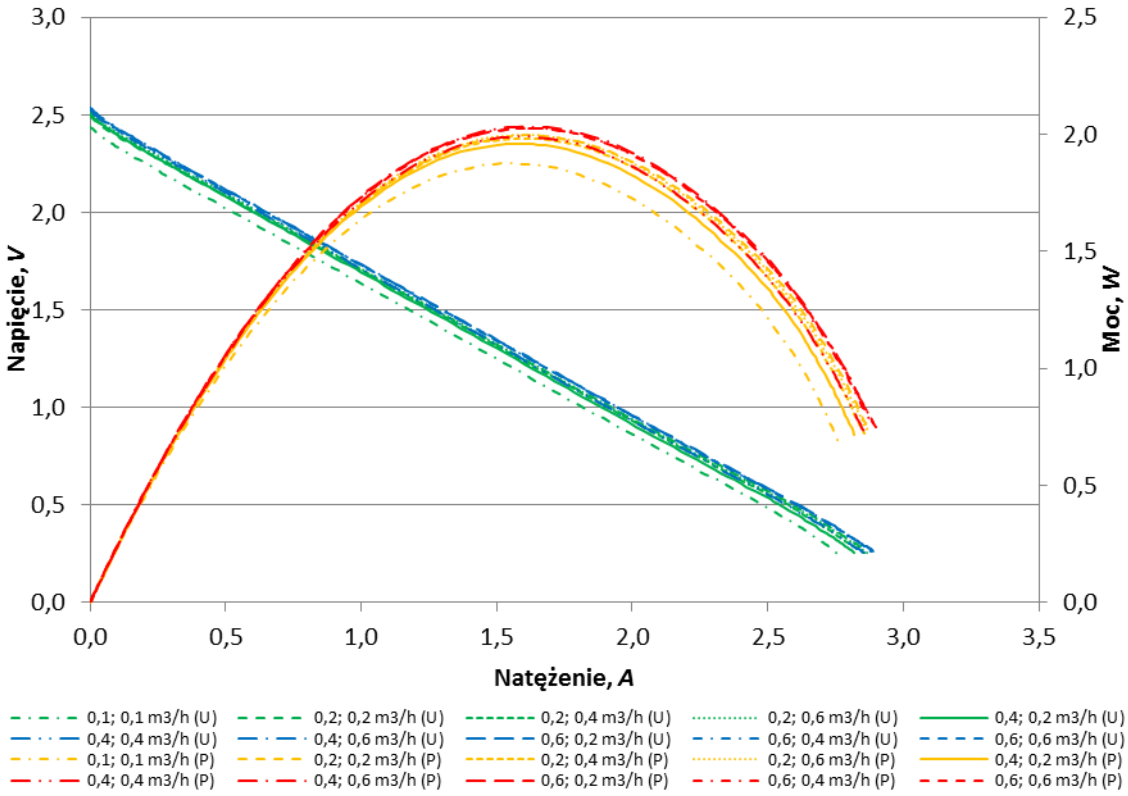
Rys. 10.69 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 50 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



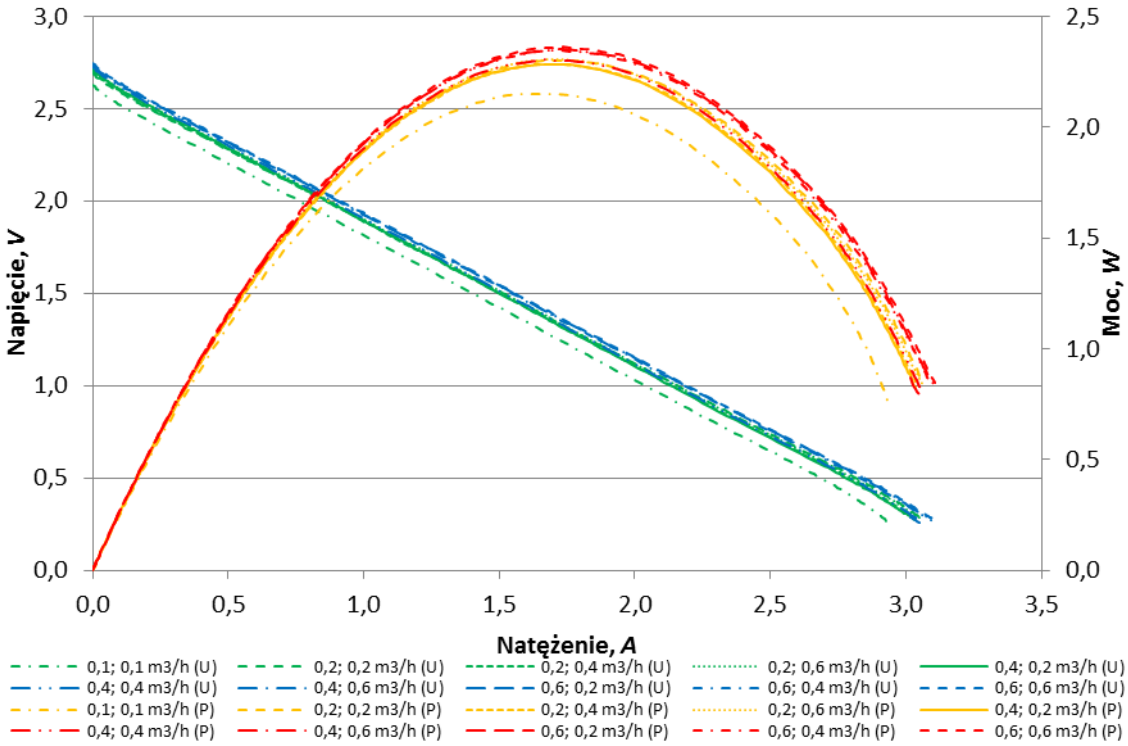
Rys. 10.70 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 55 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



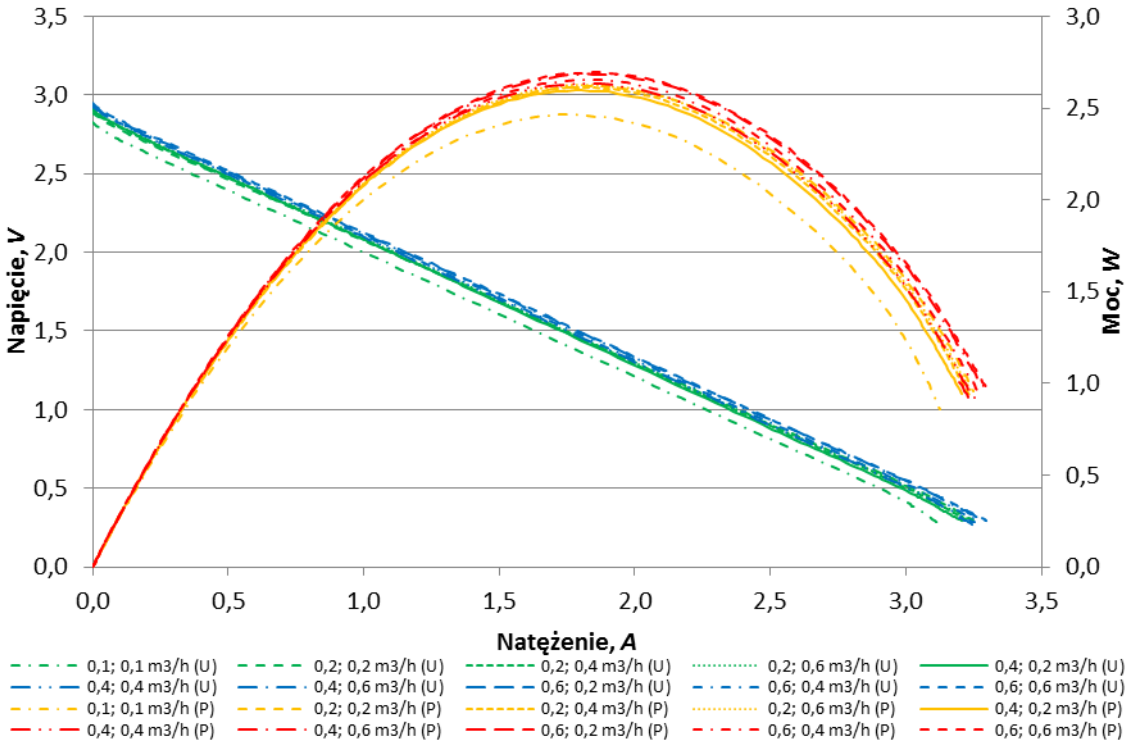
Rys. 10.71 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 60 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



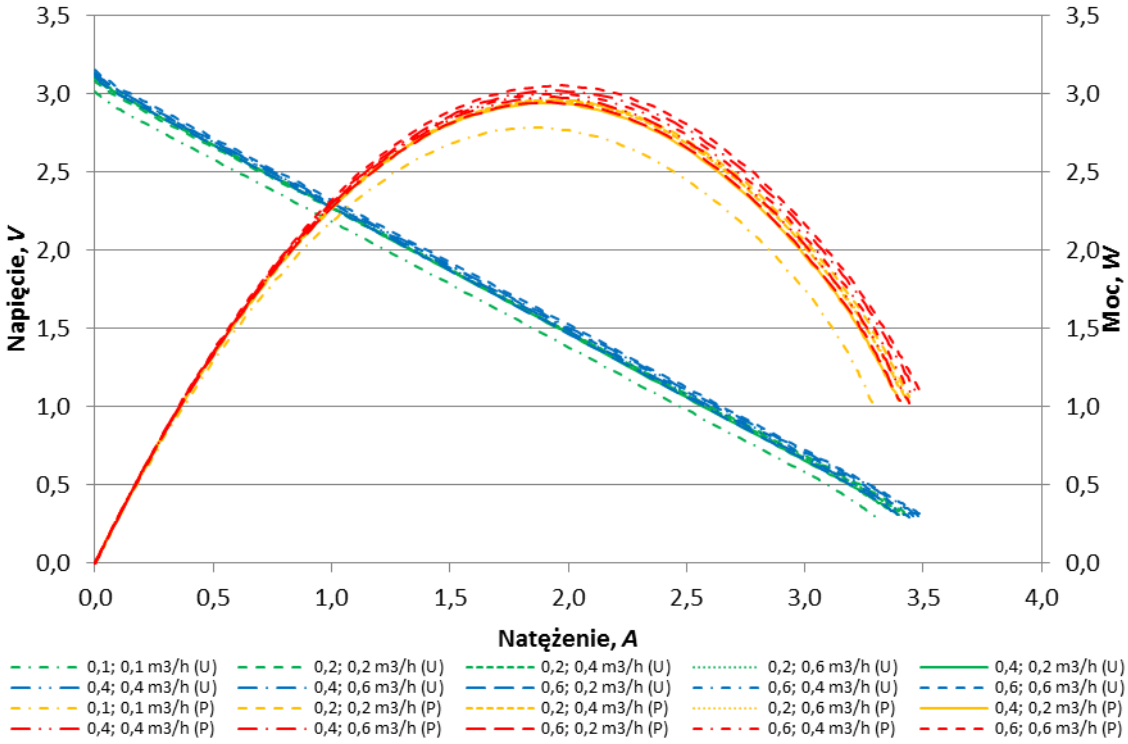
Rys. 10.72 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 65 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



Rys. 10.73 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 70 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



Rys. 10.74 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 75 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach



Rys. 10.75 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 80 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach

Analizując powyższe wykresy można stosunkowo łatwo wskazać wartości strumieni przepływu w obiegach, przy których wydajność ogniwa jest największa (V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h) i najmniejsza (V_H=0,100 m^3/h i V_C=0,100 m^3/h). W przypadku pozostałych wartości strumieni przepływów wytypowanie konkretnych wartości jest trudniejsze, ponieważ efektywności ogniwa przy tych przepływach są zbliżone. Niemniej jednak można wskazać pewien trend (od przepływu, który zapewnia najwyższą wartość mocy elektrycznej generowanej przez TEG do takiego, dla którego moc jest najmniejsza):

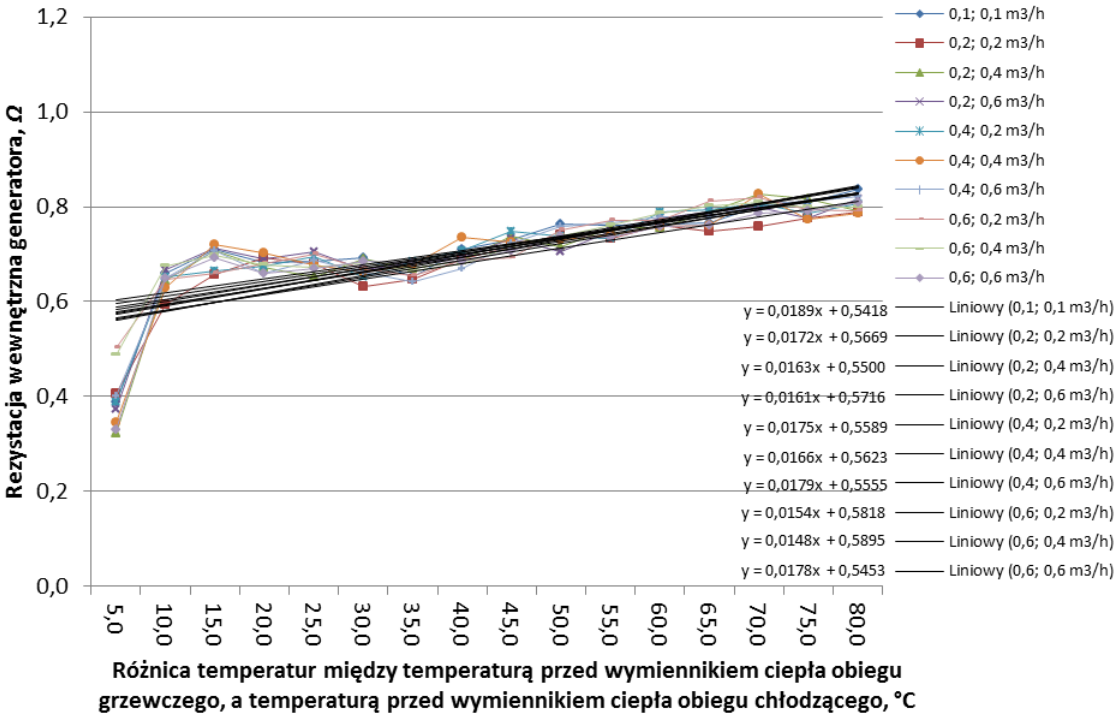
1. V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h
2. V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h
   V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h
   V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,600 m^3/h
3. V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h
   V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,400 m^3/h
4. V_H=0,600 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h
   V_H=0,400 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h
   V_H=0,200 m^3/h i V_C=0,200 m^3/h
5. V_H=0,100 m^3/h i V_C=0,100 m^3/h

Z powyższego wynika, że efektywność jest mocniej związana ze strumieniem przepływu czynnika w obiegu chłodzącym aniżeli ze strumieniem w obiegu grzewczym. Prawidłowość tą można utożsamiać z zależnością liczby Reynoldsa od temperatury (poprzez współczynnik lepkości kinematycznej) - Tab. 10-3. Z uwagi na to, że w obiegu chłodzącym zawsze występują niższe temperatury, prędkość przepływu przy, której charakter przepływu zmienia się na burzliwy jest większa aniżeli w przypadku obiegu grzewczego, w którym temperatury są wyższe. Analizując dane zawarte na powyższych charakterystykach oraz w Tab. 10-3 stwierdzono, że istotna zmiana parametrów przewodzenia następuje przy wartości liczby Reynoldsa równej około 300. Wynika to przede wszystkim z faktu, że przestrzenie, przez które przepływa czynnik są stosunkowo wąskie (około 1 mm), a więc na znaczeniu traci jakość przewodzenia między rdzeniem płynu a warstwą przyścienną. Należy podkreślić, że pomijając przepływy najniższe (V_H=0,100 m^3/h i V_C=0,100 m^3/h) wartość maksymalnej mocy elektrycznej zmienia się maksymalnie o 4 % w zależności od strumienia przepływu czynnika w obiegach.

Tab. 10-3 Zestawienie wartości liczby Reynoldsa w zależności od temperatury czynnika i prędkości przepływu dla zaprojektowanego wymiennika ciepła

Wartość liczby Reynoldsa								
strumień przepływu		*m^3/h*	*0,1*	*0,2*	*0,4*	*0,6*	*0,8*	*1*
prędkość		*m/s*	*0,07*	*0,13*	*0,26*	*0,39*	*0,52*	*0,66*
temperatura	**30**	°C	125	250	500	750	999	1249
	35		138	276	553	829	1106	1382
	40		152	304	608	912	1216	1519
	45		166	332	665	997	1329	1662
	50		181	361	723	1084	1445	1807
	55		196	391	782	1173	1564	1955
	60		211	421	843	1264	1686	2107
	65		225	451	901	1352	1802	2253
	70		242	484	968	1452	1936	2420
	75		255	511	1022	1533	2043	2554
	80		270	541	1082	1623	2163	2704
	85		287	575	1149	1724	2298	2873
	90		306	613	1226	1838	2451	3064
	95		322	644	1288	1932	2576	3220
	100		339	679	1357	2036	2714	3393
	105		359	717	1434	2151	2868	3585
	110		380	760	1520	2281	3041	3801

Dla porządku zweryfikowano również wpływ strumienia przepływu w obiegach na rezystancję wewnętrzną ogniwa. Wyniki pomiarów przedstawiono na Rys. 10.76.



Rys. 10.76 Rezystancja wewnętrzna ogniwa TEC1-12730 w badanym zakresie różnic temperatur, dla wybranych strumieni przepływu w obiegach grzewczym i chłodzącym

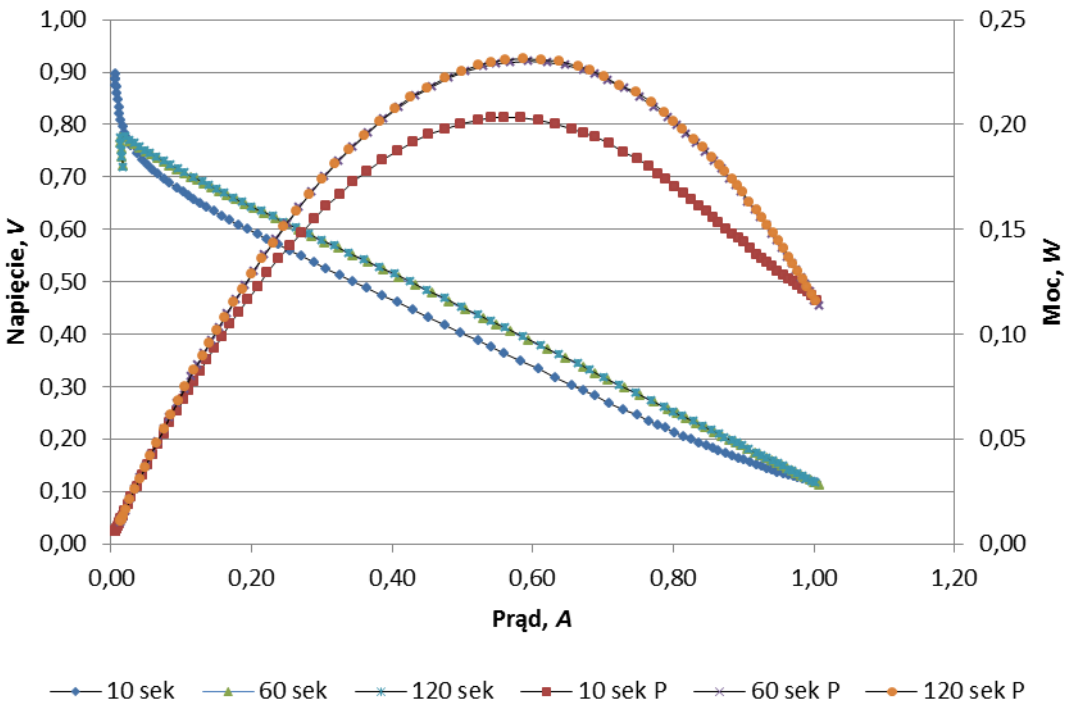
Porównując powyższy wykres z wykresem rezystancji dla badań wpływu temperatury (Rys. 10.48) widać, że w przypadku zmiany przepływów efekt w postaci zmiany rezystancji jest praktycznie niewidoczny. Inaczej niż w przypadku badań związanych z wpływem różnicy temperatur, tutaj wszystkie linie trendu dla wartości rezystancji przy określonych przepływach są bliskie równoległości i niewiele od siebie odległe. Wynika to przede wszystkim z faktu, że wszystkie badania dotyczące przepływów były wykonywane dla tej samej temperatury czynnika w obiegu chłodzącym, a więc i temperatury bezpośrednio oddziaływujące na ogniwo były zbliżone.

Wyżej przytoczone wyniki badań potwierdzają konieczność uwzględnienia wielkości strumienia przepływu czynnika w obiegach grzewczym i chłodzącym przy opracowywaniu zależności matematycznej pozwalającej na obliczenie mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo w oparciu o parametry pracy systemu cieplnego.

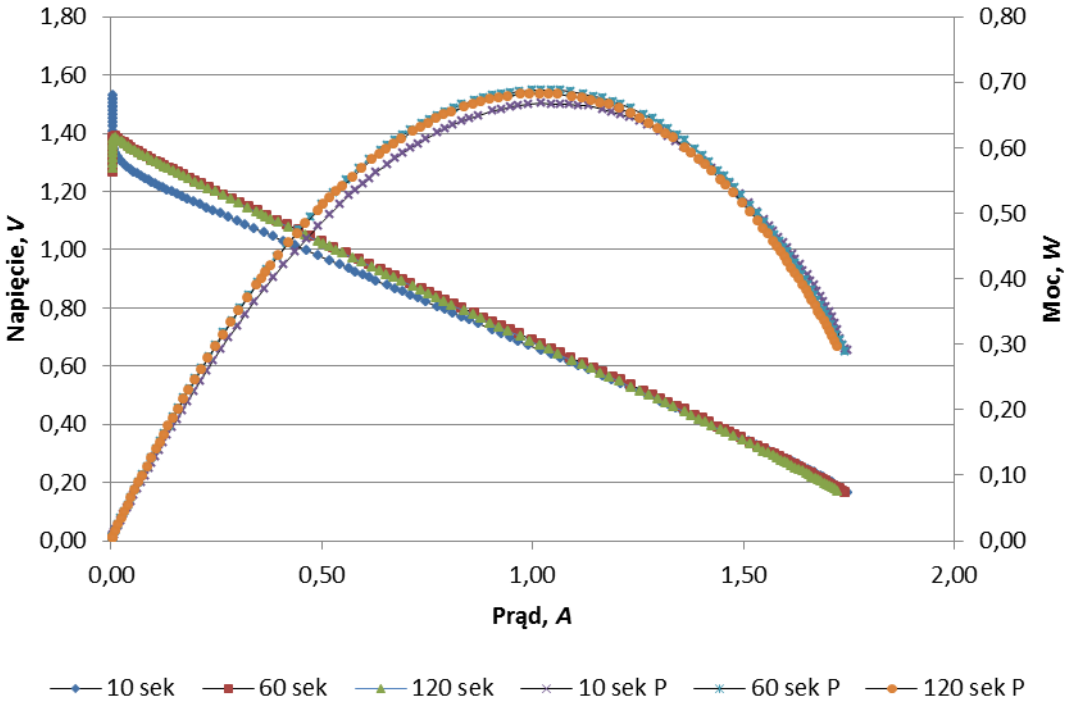
10.4.3. Określenie bezwładności rozruchowej modułu termoelektrycznego z ogniwem TEC1-12730 przy generowaniu prądu elektrycznego

Celem badań jest określenie bezwładności rozruchowej określającej czas, który mija od momentu podania czynnika o określonej temperaturze na wymienniki ciepła, których temperatury są równe.

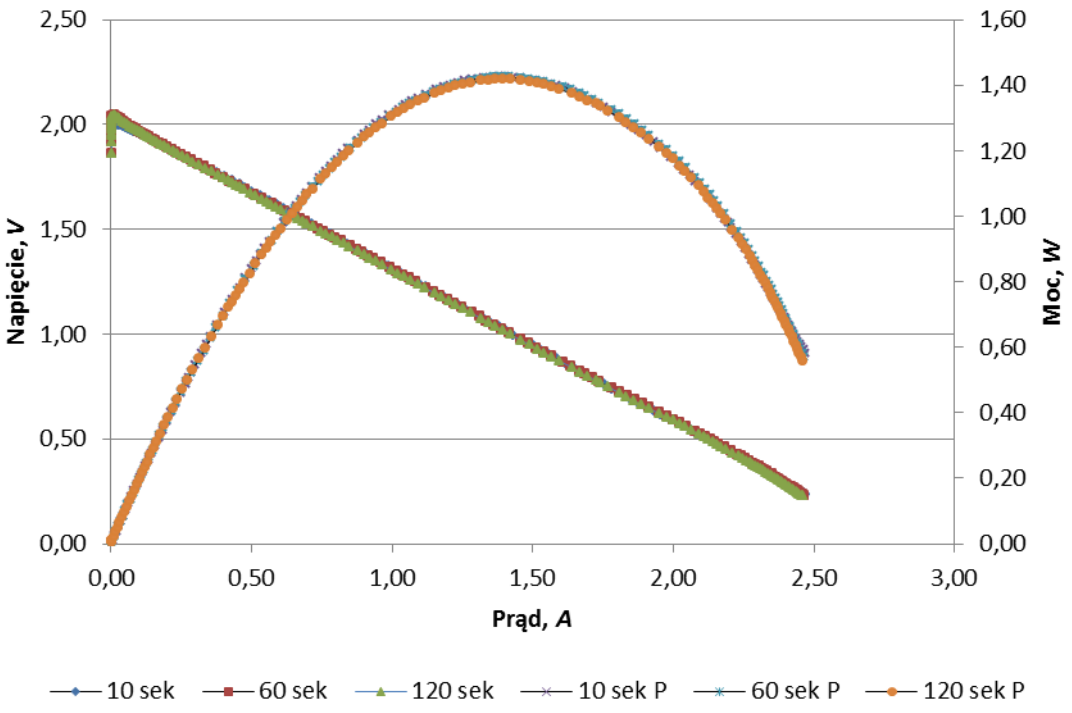
Przed rozpoczęciem badań zamykano zawory przy wymiennikach, a otwierano te znajdujące się na ich obejściu. Dzięki temu uzyskiwano możliwość zmiany temperatury czynnika w obiegach przy stałej temperaturze wymienników ciepła równej w przybliżeniu temperaturze otoczenia. Następnie po ustabilizowaniu temperatur w obiegach na określonym poziomie (t_h = 50 °C, t_c = 25 °C; t_h = 70 °C, t_c = 25 °C; t_h = 90 °C, t_c = 25 °C) otwierano zawory przed wymiennikami i zamykano zawory na ich obejściach. Od momentu zamknięcia zaworów odpowiednio po 10, 60 oraz 120 sekundach sporządzano charakterystyki elektryczne. Strumienie przepływu czynnika przy przepływie przez obejścia wynosiły odpowiednio: V_h = 0,318 m^3/h, V_c = 0,284 m^3/h oraz V_h = 0,372 m^3/h, V_c = 0,226 m^3/h przy przepływie przez wymienniki. Otrzymane charakterystyki przedstawiono na Rys. 10.77, Rys. 10.78 oraz Rys. 10.79.



Rys. 10.77 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 50 °C oraz 25 °C



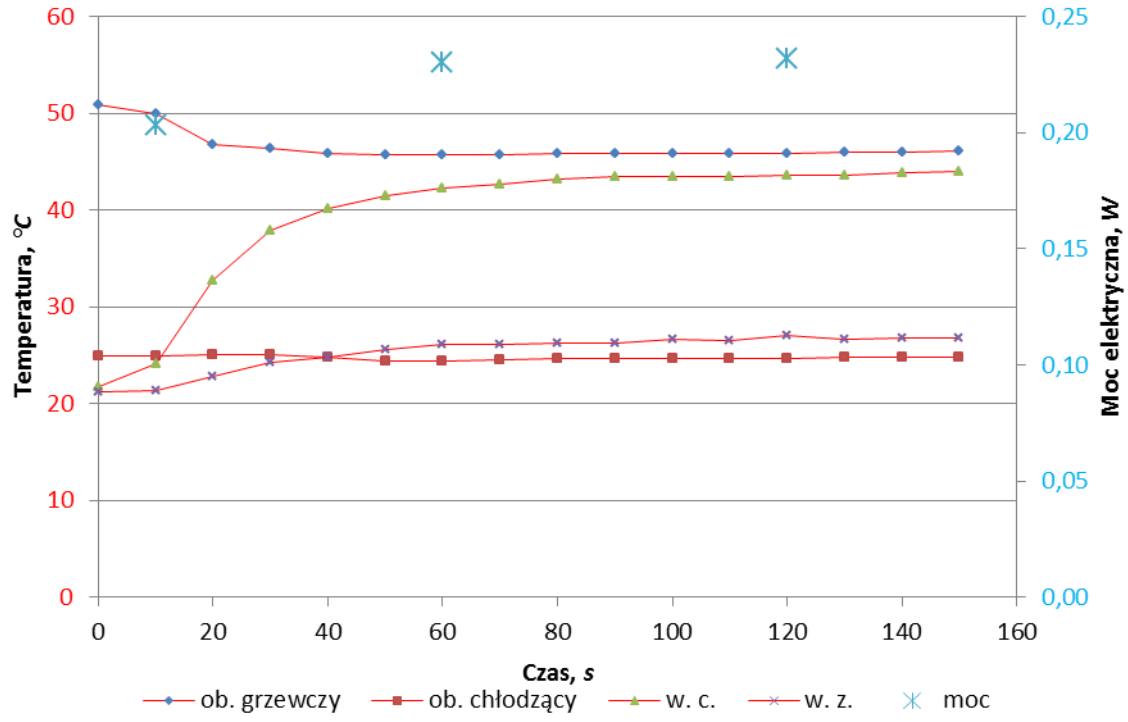
Rys. 10.78 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 70 °C oraz 25 °C



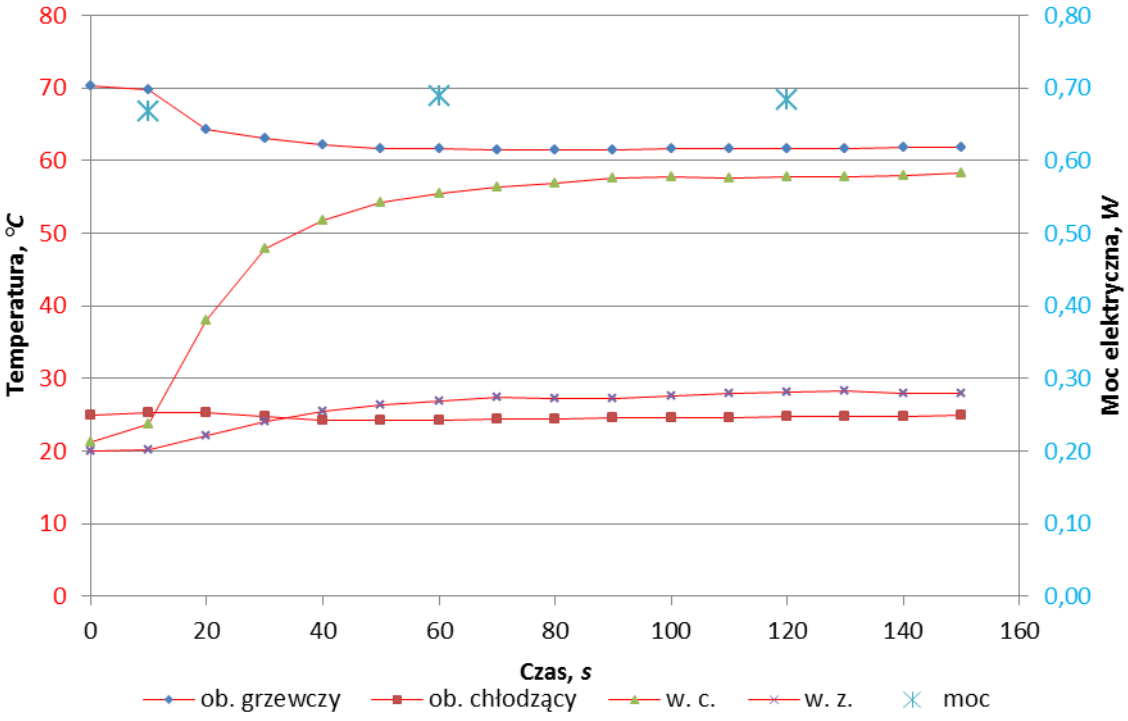
Rys. 10.79 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 90 °C oraz 25 °C

Na podstawie powyższych charakterystyk należy stwierdzić, że zespół złożony z autorskich wymienników ciepła oraz ogniwa TEC1-12730 charakteryzuje się bardzo małą bezwładnością pracy. Jedynie dla temperatury obiegu grzewczego równej 50 °C maksymalna moc elektryczna uzyskiwana po 10 sekundach jest mniejsza o około 12 % w stosunku do mocy maksymalnej dla danych warunków temperaturowych uzyskanej po 120 sekundach. Przy wyższych temperaturach moc uzyskiwana po 10 sekundach jest praktycznie równa mocy maksymalnej dla danego zakresu temperatur.

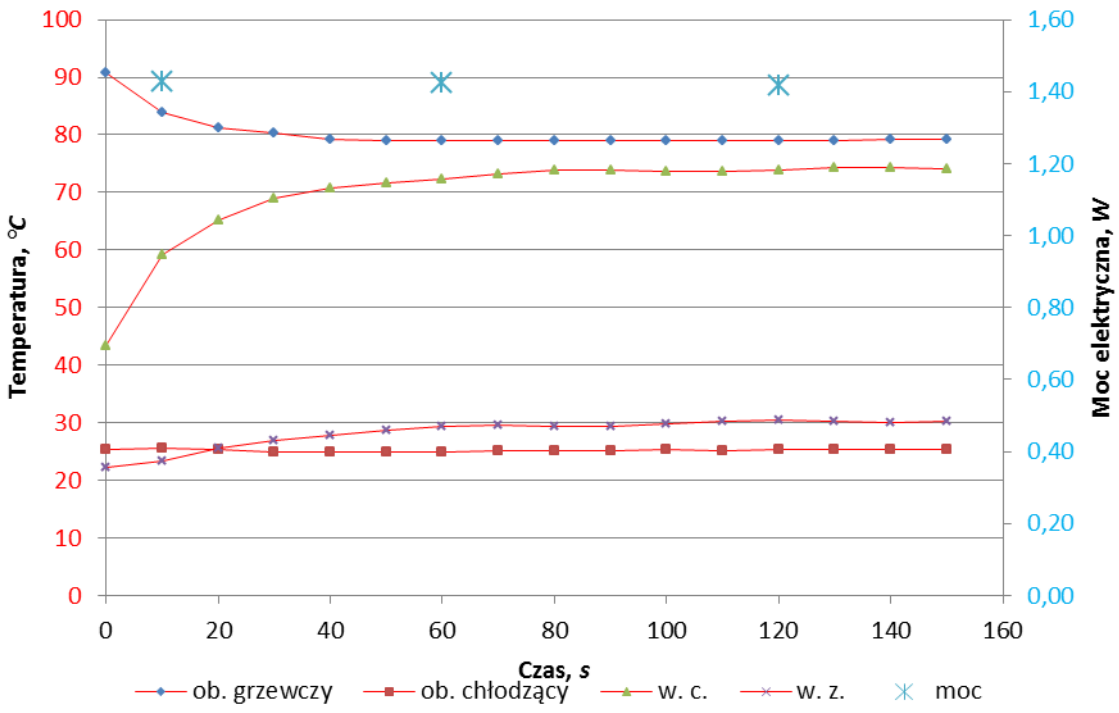
W celu przenalizowania zmienności temperatury w czasie badań i jej oddziaływania na maksymalną moc elektryczną sporządzone dodatkowe wykresy wiążące ze sobą poszczególne temperatury w obiegach oraz maksymalną moc elektryczną uzyskiwaną po określonym czasie (Rys. 10.80, Rys. 10.81, Rys. 10.82).



Rys. 10.80 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 50 °C oraz t_c = 25 °C



Rys. 10.81 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 70 °C oraz t_c = 25 °C



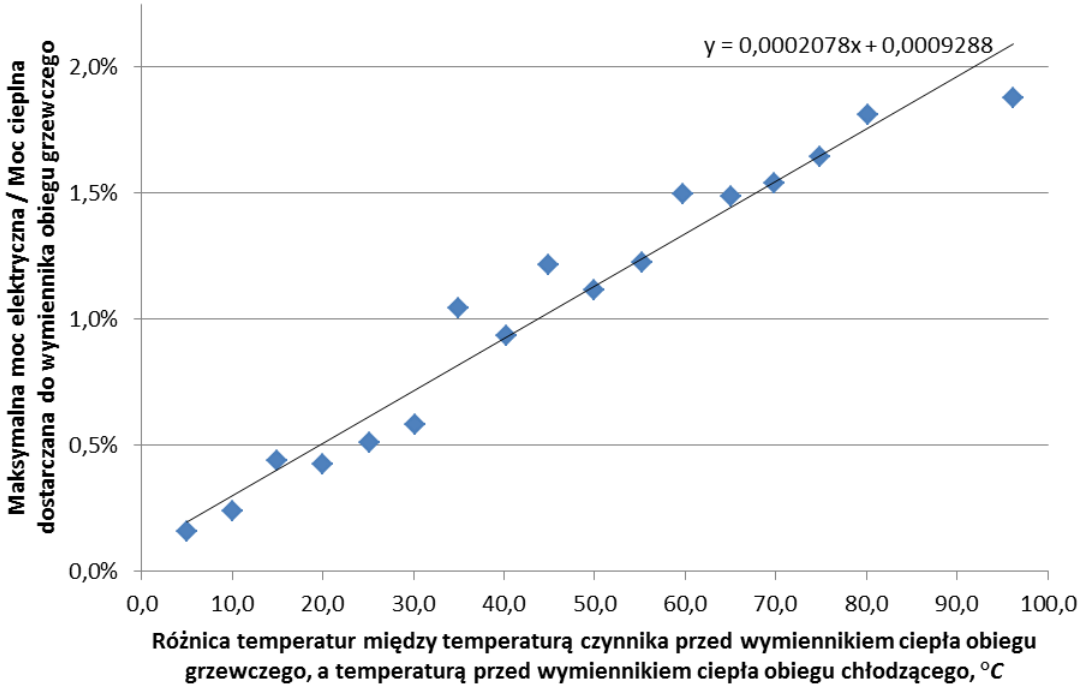
Rys. 10.82 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 90 °C oraz t_c = 25 °C

Przedstawione wykresy potwierdzają niewielką bezwładności pracy generatora termoelektrycznego TEC1-12730. Należy zauważyć, że większą bezwładnością niż samo ogniwo charakteryzują się czujniki mierzące temperaturę w układzie.

10.4.4. Efektywności pracy generatora termoelektrycznego TEC1-12730

Aby określić wydajność generatora termoelektrycznego TEC1-12730 przeprowadzono serię badań, które polegały na pomiarze strumienia ciepła dostarczanego do wymiennika ciepła obiegu grzewczego oraz sporządzeniu charakterystyk elektrycznych dla ustalonych warunków temperaturowych. Jako efektywność przyjęto stosunek maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo TEG do mocy cieplnej dostarczanej do ogniwa przez obieg grzewczy. Pomiar strumienia ciepła dostarczanego do generatora odbywał się przy użyciu ciepłomierza Engelmann Sensostar 2. Temperatura w obiegu chłodzącym była stabilizowana na poziomie 30 °C, natomiast temperatura w obiegu grzewczym w zakresie 35 °C – 110 °C ze skokiem 5 °C.

Na Rys. 10.83 przedstawiono wykres efektywności ogniwa TEC1-12730.



Rys. 10.83 Efektywność termogeneratora TEC1-12730 w funkcji różnicy temperatur

Analizując przedstawiony wykres należy zwrócić uwagę na stosunkowo niską wartość współczynnika efektywności. Powodem tego jest duża wartość strumienia ciepła dostarczanego do ogniwa. Wynika to z faktu, że układ stworzony do pomiarów wyposażony był w mało wydajną izolację termiczną wymienników ciepła. Przy projektowaniu wymienników do zastosowań komercyjnych niezbędny jest taki dobór parametrów materiału izolacyjnego, które pozwolą w znaczący sposób obniżyć straty ciepła w układzie.

10.4.5. Wyznaczenie zależności matematycznej pozwalającej na określenie mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo TEC1-12730 pracującego jako termogenerator przy danych parametrach pracy systemu cieplnego.

Implementacja systemów termoelektrycznych w systemie cieplnym wymaga wyprowadzenia funkcji matematycznej, która pozwala na określenie parametrów pracy generatora termoelektrycznego w zależności od parametrów pracy systemu cieplnego.

Najprostszym sposobem określenia mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo jest znajomość natężenia prądu elektrycznego przy danym napięciu. Znając tę wartość można obliczyć moc elektryczną korzystając z równania (8.1). Wyniki badań przedstawione w poprzednich rozdziałach pokazują, że parametry te uzależnione są od wielu zmiennych. Potwierdzono ich zależność zarówno od różnicy temperatur czynnika w obiegach grzewczym i chłodzącym, położenia tej różnicy na skali temperatur, jak również od strumieni przepływu czynnika w obiegach.

Użytkownik rozważający implementację systemu termoelektrycznego w danym systemie cieplnym powinien znać jego parametry pracy tj.: temperatury w obiegach dostarczającym i odbierającym ciepło z generatora termoelektrycznego oraz strumienie przepływu czynnika w tychże obiegach. Dodatkowo niezbędna jest znajomość napięcia zasilania urządzeń pomocniczych wchodzących w skład danego systemu cieplnego.

Otrzymane wyniki badań przeanalizowano z użyciem funkcji regresji wieloparametrowej. Funkcja ta pozwala na ilościowe ujęcie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi (nazywanymi zmiennymi objaśniającymi), a zmienną zależną (objaśnianą). W przypadku omawianych badań jako zmienne objaśniające przyjęto napięcie prądu, temperaturę w obiegu dostarczającym ciepło do termogeneratora, temperaturę w obiegu odbierającym ciepło z termogeneratora oraz strumienie przepływu czynnika w obiegach. Celowo zrezygnowano z różnicy temperatur, na rzecz temperatur składowych, aby wykazać zależność funkcji również od położenia tej różnicy na skali temperatur. Zmienną objaśnianą było natężenie prądu.

Równanie określające natężenie prądu elektrycznego przyjęło następującą postać:

$$I = 0{,}0484 \cdot t_h - 0{,}0499 \cdot t_c + 0{,}0609 \cdot V_h + 0{,}0890 \cdot V_c - 1{,}3010 \cdot U + 0{,}0559,\ W \qquad (10.1)$$

Gdzie:

t_h – temperatura czynnika w obiegu dostarczającym ciepło do generatora,

t_c – temperatura czynnika w obiegu odbierającym ciepło z generatora,

V_h – strumień przepływu czynnika w obiegu dostarczającym ciepło do generatora,

V_c – strumień przepływu czynnika w obiegu odbierającym ciepło z generatora,

U – napięcie pracy urządzeń pomocniczych systemu cieplnego.

W Tab. 10-4 przedstawiono szczegółowo wyniki regresji, a w Tab. 10-5 oraz Tab. 10-6 odpowiednio statystyki przeprowadzonej regresji oraz analizę wariancji.

Tab. 10-4 Wyniki regresji

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p
Wyraz wolny	0,055920	0,001196	46,764389	0
U	-1,300996	0,000380	-3427,758754	0
t_c	-0,049861	0,000021	-2414,186494	0
t_h	0,048410	0,000014	3548,607350	0
V_h	0,060920	0,001677	36,325100	0
V_c	0,088965	0,001682	52,899337	0

Tab. 10-5 Statystyki regresji

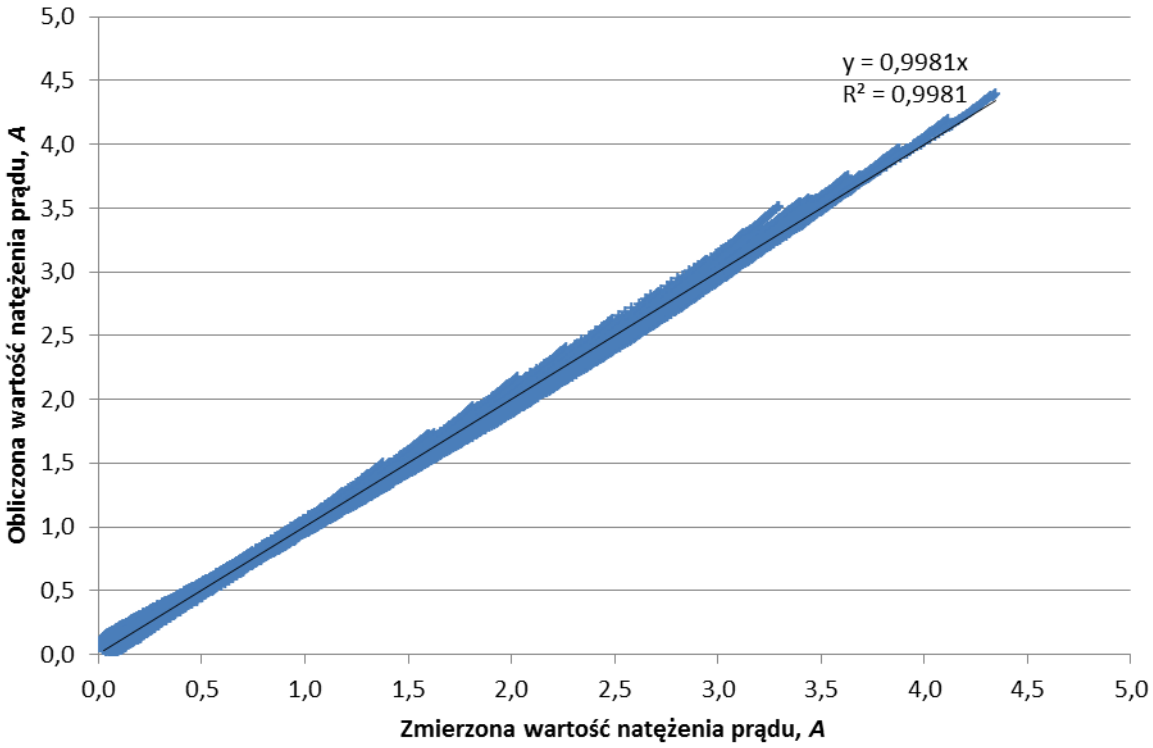
Wielokrotność R	0,999068813
R kwadrat	0,998138494
Dopasowany R kwadrat	0,998138189
Błąd standardowy	0,040295346
Obserwacje	30563

Tab. 10-6 Analiza wariancji przeprowadzonej regresji

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	5	26603,99075	5320,79815	3276928,86	0
Resztkowy	30557	49,61585558	0,001623715		
Razem	30562	26653,6066			

Powyższe dane są dowodem na dobre odwzorowanie poszukiwanej wartości przez wyprowadzone równanie. Analizując poszczególne współczynniki korelacji, można wyciągnąć kilka wniosków. Największą wartość ma współczynnik korelacji dla napięcia – jego wartość jest większa od jednego, podczas gdy pozostałe współczynniki mieszczą się w zakresie od 0,05 do 0,1. Wynika to przede wszystkim z niskiej wartości samego napięcia, która nie przekracza 5 V. Dla temperatur współczynniki te wynoszą około 0,05, jednak temperatury mają wartości o rząd wielkości wyższe. Istotny jest również fakt, że wartości współczynników korelacji dla temperatur są zbliżone i są odwrotnego znaku. Gdyby były równe można by wprowadzić do równania wartość różnicy temperatur. Wyższa wartość współczynnika dla temperatury w obiegu chłodzącym sugeruje jej istotniejszy wpływ na poszukiwany parametr – potwierdza tym samym znaczenie położenia różnicy temperatur na skali temperatur. Współczynniki dla przepływów czynnika w obiegach co do wartości są zbliżone do współczynników dla temperatur, jednak wartości samych przepływów są o dwa rzędy wielkości mniejsze od wartości temperatur. Zauważalny jest również silniejszy wpływ przepływu czynnika w obiegu chłodzącym, co również zostało zaobserwowane w toku badań.

Na Rys. 10.84 przedstawiono zależność między obliczonymi wartościami natężenia prądu a wartościami zmierzonymi.



Rys. 10.84 Zależność miedzy obliczonymi wartościami natężenia prądu, a wartościami zmierzonymi

Powyższy wykres potwierdza bardzo dobre odwzorowanie wartości zmierzonych poprzez obliczenie ich z wykorzystaniem wyprowadzonej formuły. U podstaw dobrego dopasowania formuły do warunków pomiarów leży przede wszystkim bardzo duża liczba punktów pomiarowych, które zostały przeanalizowane z użyciem funkcji regresji – ponad 30 tysięcy pomiarów.

Wyprowadzony wzór jest prawdziwy dla zakresu parametrów, który został uwzględniony w badaniach, czyli:

t_h = (20 °C; 110 °C)

t_c = (25 °C; 75 °C)

V_h = (0,1 m^3/h; 0,6 m^3/h)

V_c = (0,1 m^3/h; 0,6 m^3/h)

U = (0,01 V; 4,00 V)

Aby otrzymać wartość mocy elektrycznej generowanej przez ogniwo TEC1-12730 w przedstawionym wyżej zakresie parametrów wejściowych, należy pomnożyć wartość obliczoną w oparciu o funkcję regresji przez wartość napięcia prądu. Ostatecznie wzór na moc elektryczną generatora termoelektrycznego przyjmuje postać:

$$P = U \cdot (0{,}0484 \cdot t_h - 0{,}0499 \cdot t_c + 0{,}0609 \cdot V_h + 0{,}0890 \cdot V_c - 1{,}3010 \cdot U + 0{,}0559),\ W \quad (10.2)$$

Przedstawiona formuła jest prawdziwa dla pojedynczego ogniwa TEG. W przypadku wykorzystania zespołów termogeneratorów należy uwzględnić również spadki temperatur na każdym z nich. W oparciu o otrzymane wyniki badań i korzystając z funkcji regresji wieloparametrowej wyprowadzono wzory pozwalające na określenie spadku temperatury odpowiednio dla wymiennika ciepła obiegu grzewczego (9.3) oraz wymiennika ciepła obiegu chłodzącego (9.4) w zależności od różnicy temperatur między czynnikami oraz ich strumieni przepływu:

$$\Delta t_h = 0{,}0087 \cdot (t_h - t_c) - 1{,}2576 \cdot V_h + 0{,}3435, \text{°C} \tag{10.3}$$

$$\Delta t_c = 0{,}0060 \cdot (t_h - t_c) - 0{,}8001 \cdot V_c + 0{,}2028, \text{°C} \tag{10.4}$$

W oparciu o powyższe zależności opracowano dedykowany arkusz kalkulacyjny umożliwiający wymiarowanie zestawów termoelektrycznych zawierających do 40 ogniw.

Na Rys. 10.85 przedstawiono zrzut ekranu interfejsu użytkownika.

Napięcie zasilania	U_{zas}	12	*V*
Moc elektryczna zainstalowanych urządzeń	P_{elek}	40	*W*
Strumień przepływu czynnika w obiegu dostarczającym ciepło	V_h	0,6	m^3/h
Temperatura czynnika w obiegu dostarczającym ciepło	t_h	80	*°C*
Strumień przepływu czynnika w obiegu odbierającym ciepło	V_c	0,6	m^3/h
Temperatura czynnika w obiegu odbierającym ciepło	t_c	20	*°C*
Liczba ogniw		40	
Typ połączenia elektrycznego ogniw w module		równoległe	
Typ połączenia elektrycznego między modułami		szeregowe	
Sumaryczna moc elektryczna wytwarzana przez zespół TEG	$P_{układu}$	42,31	*W*

Rys. 10.85 Interfejs użytkownika arkusza do wymiarowania modułów termoelektrycznych złożonych z ogniw TEC1-12730

Zadaniem użytkownika jest wprowadzenie wartości oznaczonych kolorem żółtym. Na tej podstawie w arkusz oblicza całkowitą moc elektryczną oraz podaje parametry temperaturowe i prądowe dla każdego z ogniw (Rys. 10.86).

Parametry temperaturowe na kolejnych członach			**Parametry prądu generowanego przez ogniwo**		
Nr członu	temp. czynnika grzewczego na wlocie do członu	temp. czynnika chłodzącego na wlocie do członu	*Nr ogniwa*	Napięcie na ogniwie	Natężenie na ogniwie
1	80,0	26,1	*1, 2*	0,60	1,84
2	79,5	25,8	*3, 4*	0,60	1,83
3	79,0	25,5	*5, 6*	0,60	1,83
4	78,5	25,2	*7, 8*	0,60	1,82
5	78,0	24,8	*9, 10*	0,60	1,81

Parametry temperaturowe na kolejnych członach			**Parametry prądu generowanego przez ogniwo**		
Nr członu	temp. czynnika grzewczego na wlocie do członu	temp. czynnika chłodzącego na wlocie do członu	*Nr ogniwa*	Napięcie na ogniwie	Natężenie na ogniwie
6	77,5	24,5	*11, 12*	0,60	1,80
7	77,0	24,2	*13, 14*	0,60	1,79
8	76,5	23,9	*15, 16*	0,60	1,78
9	76,0	23,6	*17, 18*	0,60	1,78
10	75,5	23,2	*19, 20*	0,60	1,77
11	75,0	22,9	*21, 22*	0,60	1,76
12	74,5	22,6	*23, 24*	0,60	1,75
13	74,0	22,3	*25, 26*	0,60	1,74
14	73,4	21,9	*27, 28*	0,60	1,73
15	72,9	21,6	*29, 30*	0,60	1,73
16	72,4	21,3	*31, 32*	0,60	1,72
17	71,9	21,0	*33, 34*	0,60	1,71
18	71,4	20,6	*35, 36*	0,60	1,70
19	70,9	20,3	*37, 38*	0,60	1,69
20	70,4	20,0	*39, 40*	0,60	1,68

Rys. 10.86 Parametry temperaturowe i prądowe dla każdego z ogniw wchodzącego w skład zespołu termoelektrycznego

Odpowiednio modyfikując typ połączeń elektrycznych oraz liczbę ogniw, użytkownik może dostosować sposób działania modułu termoelektrycznego do swoich potrzeb.

Przy programowaniu przedstawionego wyżej arkusza przyjęto pewne założenia:

1. Maksymalna liczba ogniw w module wynosi 40 szt.
2. Moduł złożony jest z powtarzalnych członów.
3. W każdym członie znajdują się 2 ogniwa.
4. Ogniwa znajdujące się w pojedynczym członie pracują w tych samych warunkach temperaturowych i elektrycznych.
5. Przy równoległym połączeniu elektrycznym członów, napięcia na każdym z członów są równe.

Pierwsze założenia wynika z chęci ograniczenia geometrycznych wymiarów modułu. Drugie jest związane ze zmniejszeniem stopnia skomplikowania modułu. Trzecie jest wynikiem analizy optymalnego ułożenia ogniw w celu zminimalizowania strat ciepła. Czwarte wynika z budowy członu. Piąte jest pewnym uproszczeniem, które ułatwia obliczanie modułu. W rzeczywistości jeśli ogniwa znajdują się w różnych warunkach temperaturowych to zmienna jest również ich rezystancja wewnętrzna, od której zależy generowane napięcie. Z uwagi na niewielką zmienność temperatury, a tym samym niewielką zmienność rezystancji wewnętrznej ogniwa przyjęto założenie jak powyżej.

11. Niepewność pomiarów

Wartość zmierzona dowolnej wielkości fizycznej zwykle różni się od jej wartości rzeczywistej. Parametrem charakteryzującym odstępstwo wartości mierzonej od wartości rzeczywistej jest niepewność pomiaru. Pomiary wielkości fizycznych dzieli się na pośrednie i bezpośrednie. Przy pomiarach bezpośrednich porównuje się wartość mierzoną z odpowiednią miarą wzorcową - wartość liczbowa odczytywana jest wprost ze skali przyrządu pomiarowego. W przypadku pomiarów pośrednich, określenie wartości polega na pomiarze kilku wielkości, które są związane z wielkością mierzoną poprzez pewną zależność matematyczną.

Istnieją dwie podstawowe metody określania niepewności pomiaru: ocena niepewności pomiaru typu A oraz ocena niepewności pomiaru typu B. Ocena typu A polega na określeniu niepewności pomiaru z wykorzystaniem analizy statystycznej serii wyników pomiarów. W przypadku oceny typu B niepewność określa się na podstawie klasy dokładności przyrządu pomiarowego lub elementarnej działki tego przyrządu (149).

11.1. Niepewność standardowa i rozszerzona pomiarów

W sytuacji, kiedy dysponuje się tylko jednym pomiarem, lub gdy seria pomiarów nie wykazuje rozrzutu, niepewność standardową pomiaru *u(x)* szacuje się w oparciu o ocenę typu B na podstawie niepewności wzorcowania przyrządu pomiarowego *⊿x* zgodnie z zależnością:

$$u(x) = \frac{\Delta \mathrm{x}}{\sqrt{3}} \tag{11.1}$$

W przypadku pomiarów pośrednich wielkość mierzoną y oblicza się w oparciu o związek funkcyjny postaci:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \tag{11.2}$$

Jako $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ oznacza się *n* wielkości mierzonych bezpośrednio. Aby obliczyć niepewność konieczna jest znajomość zarówno wyników pomiarów poszczególnych wielkości jak i ich niepewności standardowych. Złożoną niepewność standardową $u_c(y)$ oblicza się korzystając z prawa przenoszenia niepewności pomiarów bezpośrednich nie skorelowanych zgodnie z zależnością:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \tag{11.3}$$

Aby ocenić zgodność wyników pomiarów z innymi rezultatami oraz do celów komercyjnych wprowadza się dodatkowo pojęcie niepewności rozszerzonej, która jest miarą pewnego przedziału otaczającego wynik pomiaru. Niepewność rozszerzoną *U(x)* wartości mierzonej *x* oblicza się zgodnie z zależnością:

$$U(x) = k \cdot u(x) \tag{11.4}$$

Wartość współczynnika *k* zwanego bezwymiarowym współczynnikiem rozszerzenia dla typowych pomiarów przyjmuje się równą 2.

11.2. Niepewność pomiarów wykonanych na stanowisku pomiarowym

Dokładność większości przyrządów pomiarowych użytych w trakcie badań była podana w postaci procentowej, uzależnionej od samej wartości pomiaru jak i zakresu pomiarowego. Z uwagi na to niepewności wielkości mierzonych zostały określone jako względne zgodnie z zależnością:

$$U_w(x) = \frac{U(x)}{x} \cdot 100\% \tag{11.5}$$

Wartości niepewności rozszerzonych względnych rozszerzonych wielkości mierzonych bezpośrednio zestawiono w Tab. 11-1, natomiast wartości mierzonych pośrednio w Tab. 11-2.

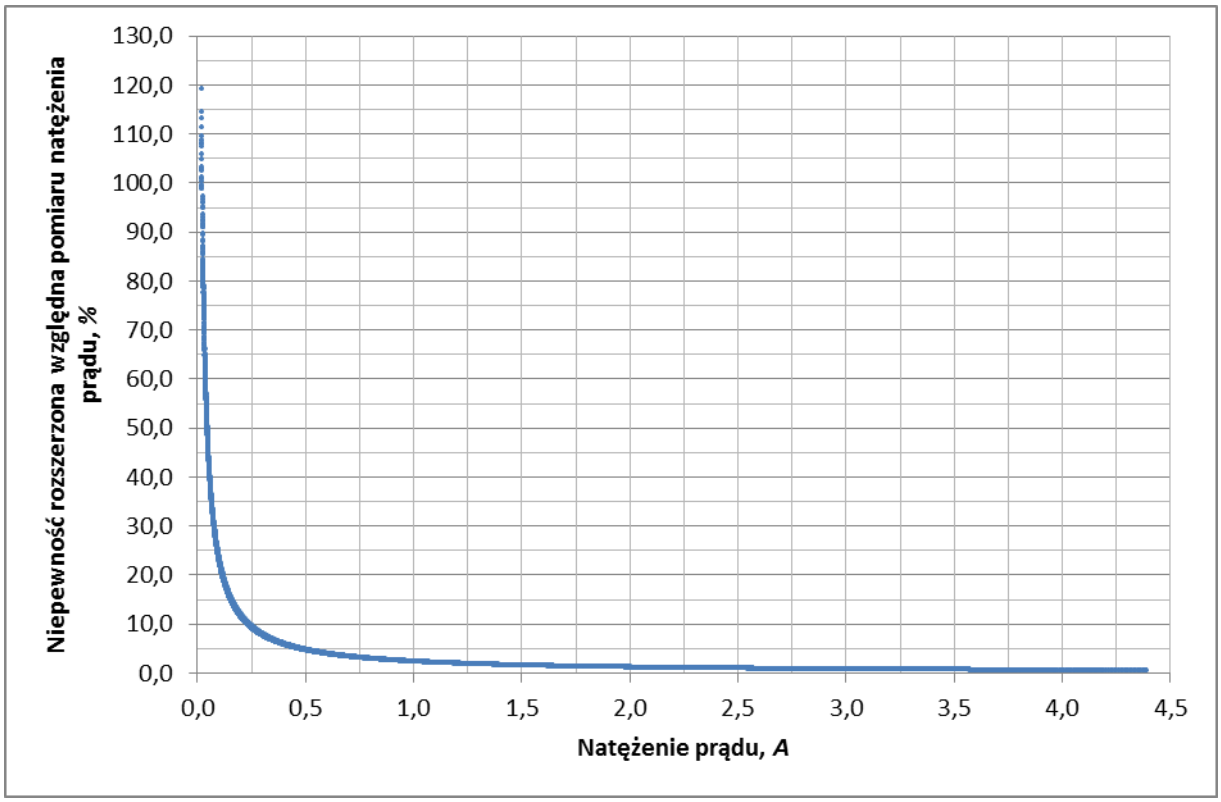
Tab. 11-1 Niepewności rozszerzone względne wielkości mierzonych bezpośrednio

L. p.	Nazwa	Jednostka	Niepewność rozszerzona względna, %		
			Min	Średnia	Max
1	Temperatura	°C	± 0,45	± 1,15	± 2,91
2	Strumień przepływu	m^3/h	± 2,36	± 2,42	± 2,58
3	Napięcie prądu	V	± 0,15	± 0,36	± 1,81
4	Natężenie prądu	A	± 0,28	± 0,89	± 9,97
5	Rezystancja	Ω	± 0,12	± 0,72	± 2,89

Tab. 11-2 Niepewności rozszerzone względne wartości mierzonych pośrednio

L. p.	Nazwa	Formuła obliczeniowa	Jednostka	Niepewność rozszerzona względna, %		
				Min	Średnia	Max
1	Moc elektryczna	(7.1)	A	± 0,36	± 1,03	± 9,98
2	Natężenie prądu	(9.1)	W	± 0,53	± 6,32	± 119,06

Ze względu na bardzo wysoką wartość maksymalnej niepewności rozszerzonej względnej natężenia prądu sporządzono wykres zależności niepewności rozszerzonej względnej pomiaru natężenia od wartości natężenia prądu (Rys. 11.1).



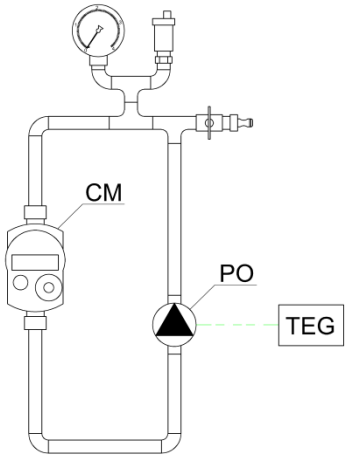
Rys. 11.1 Zależność niepewności rozszerzonej względnej pomiaru natężenia prądu w funkcji wartości natężenia prądu

Zgodnie z danymi zawartymi na wykresie można określić, że pomiary poniżej wartości prądu wynoszącej 0,25 A, charakteryzują się bardzo dużą niepewnością względną. Powyżej tej wartości niepewność względna nie przekracza 10 %, a powyżej 0,5 A spada do 5 %. Z punktu widzenia zastosowań praktycznych generatorów termoelektrycznych, przedział wartości poniżej 0,25 A jest przedziałem nieistotnym ze względu na fakt, że przy takiej wartości natężenia prądu osiągana wartość mocy elektrycznej jest niewielka.

Podsumowując należy uznać wartości niepewności pomiarowych zarówno wielkości mierzonych bezpośrednio jak i pośrednio za zadowalające.

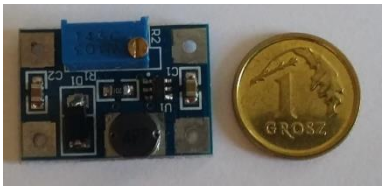
12. Zastosowanie modułu termoelektrycznego do wytwarzania elektrycznej energii pomocniczej w rzeczywistych warunkach pracy systemu cieplnego

W oparciu o uzyskane wyniki badań podjęto próbę praktycznego zastosowania generatora termoelektrycznego do zasilania wybranego urządzenia pomocniczego. W tym celu zbudowano prosty układ hydrauliczny (Rys. 12.1) złożony z ciepłomierza (CM), pompy cyrkulacyjnej Fotton FT5 15PV (PO) zasilanej prądem stałym oraz zestawu niezbędnych elementów odcinających i kontrolnych. Układ ten symulował prosty obieg hydrauliczny. Zastosowany ciepłomierz umożliwiał pomiar strumienia przepływu czynnika oraz odgrywał rolę oporu miejscowego, natomiast za wymuszenie przepływu była odpowiedzialna wcześniej opisana pompa.



Rys. 12.1 Schemat hydrauliczny układu z pompą obiegową zasilaną za pomocą generatora termoelektrycznego

Wykorzystując stanowisko pomiarowe opisane we wcześniejszych rozdziałach oraz generator TEC1-12730 przeprowadzono badania, których celem było ustalanie, czy możliwe jest zasilenie z wykorzystaniem generatora termoelektrycznego wyżej wymienionej pompy. Z uwagi na fakt, że TEG wytwarza prąd elektryczny o napięciu maksymalnie 4,0 V, między generatorem a pompą zastosowano przetwornicę napięcia DC – DC Step up typ SX 1308 (Fot. 12-1), która umożliwia podniesienie napięcia wejściowego z zakresu 2 – 24 V do dowolnej wartości napięcia z zakresu 2 – 28 V. Na podstawie pomiarów określono minimalne napięcie zasilania pompy jako 10,5 V i taką wartość ustawiono na przetwornicy.



Fot. 12-1 Porównanie wielkości przetwornicy napięcia DC -DC Step up SX 1308 z monetą jednogroszową

Pomiary właściwe polegały na określeniu minimalnych parametrów temperaturowych przy jakich nastąpi uruchomienie pompy wraz z podaniem osiąganej wartości strumienia przepływu czynnika. Wyniki pomiarów zestawiono w Tab. 12-1.

Tab. 12-1 Zależność strumienia przepływu pompy Fotton Ft5 15PV od temperatur w obiegach grzewczym i chłodzącym

L. p.	Temperatura czynnika grzewczego	Temperatura czynnika chłodzącego	Strumień przepływu czynnika	Uwagi
	°C	°C	m3/h	
1	110	30	0,150	uruchomienie pompy
2	110	27	0,223	-
3	110	24	0,237	-
4	110	16	0,275	-

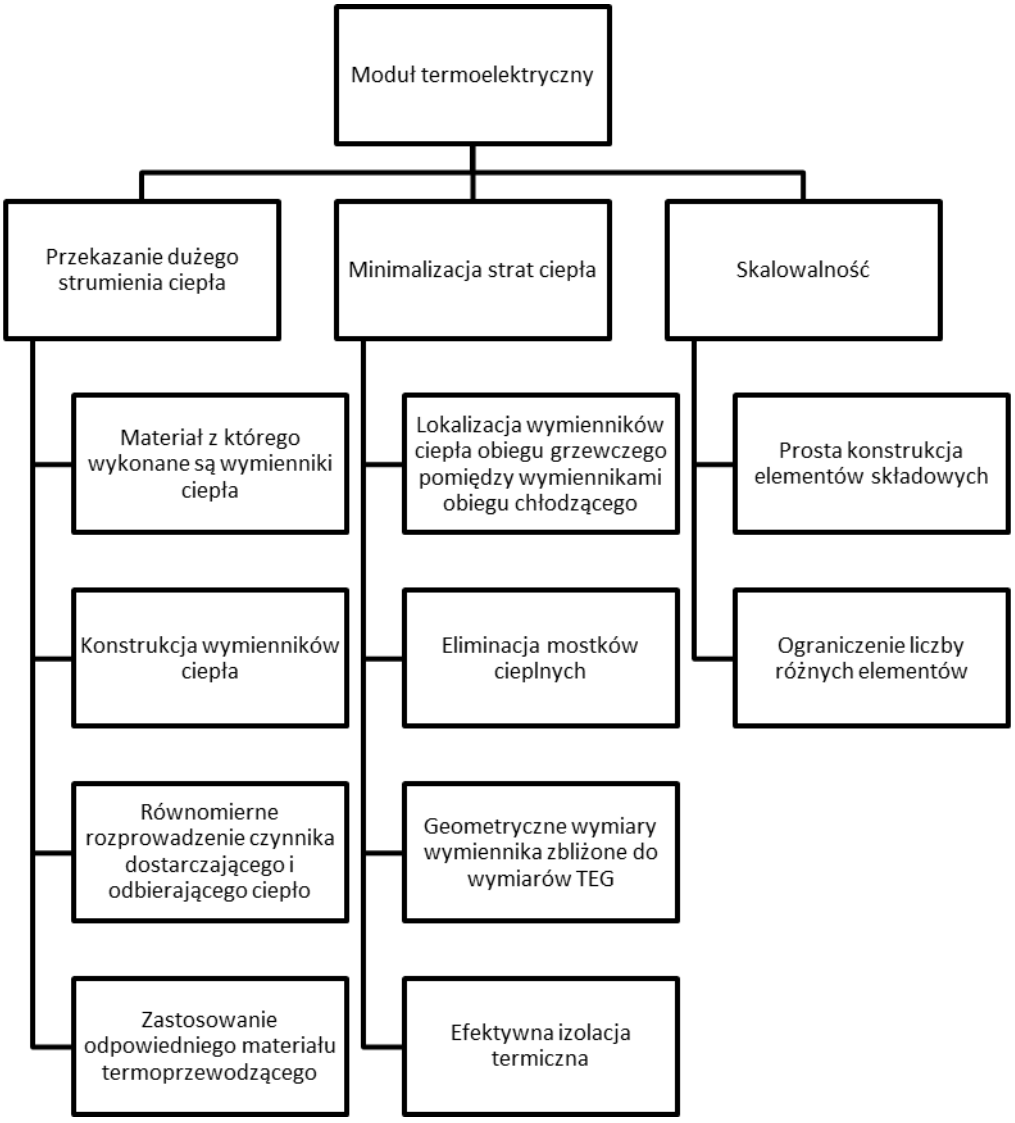
Uzyskane wyniki potwierdzają, że możliwe jest zasilenie pompy obiegowej wykorzystując generator termoelektryczny. Warunki temperaturowe przy których pompa została uruchomiona są dość wysokie, ale należy podkreślić, że wykorzystano tylko jedno ogniwo termoelektryczne. Zwiększenie liczby wykorzystanych ogniw znacząco obniży wymagania temperaturowe. Zasilenie pompy wiązało się z wykorzystaniem dodatkowej przetwornicy, ale jej koszt (około 9 PLN) jest na tyle niski, że nie wpływa na zasadność stosowania generatora termoelektrycznego.

Badany generator wraz z pompą można wykorzystać do zabezpieczenia na wypadek utraty zasilania układu przygotowania ciepłej wody użytkowej wyposażonego w kolektory słoneczne. W sytuacji utraty napięcia, pompa obiegowa układu solarnego zatrzymuje się. Wobec braku odbioru ciepła, przy stałej jego dostawie temperatura czynnika solarnego (najczęściej glikol propylenowy) zaczyna gwałtownie rosnąć, aż osiągnie poziom, przy którym następuje rozkład glikolu na czynniki składowe. Taki glikol traci swoje właściwości i powinien być wymieniony na nowy. Zastosowanie generatorów termoelektrycznych z dodatkową pompą obiegową umożliwia zabezpieczenie takiego układu. W sytuacji gdy temperatura czynnika osiągnie określoną wartość, prąd elektryczny wytwarzany przez generator będzie miał parametry, które pozwolą na uruchomienie pompy. Po obniżeniu temperatury w układzie nastąpi wyłączenie pompy, aż do kolejnego wzrostu temperatury. Moment uruchomienia pompy może być dowolnie modyfikowany przez zmianę liczby generatorów oraz ustawienia przetwornicy. Zaletą takiego układu jest brak konieczności stosowania jakiegokolwiek systemu sterowania, ponieważ uruchomienie pompy związane jest jedynie z osiągnięciem przez czynnik solarny określonej temperatury.

Przedstawiona implementacja jest jednym z wielu możliwych zastosowań generatorów termoelektrycznych do zasilania urządzeń pomocniczych, ale przykład ten obrazuje sposób w jaki moduł termoelektryczny może zostać użyty w systemie cieplnym.

13. Projekt techniczny uniwersalnego, skalowalnego modułu termoelektrycznego

Na podstawie wyników badań były stworzono koncepcję, a następnie projekt techniczny uniwersalnego modułu termoelektrycznego uwzględniający specyfikę pracy TEG. Celem jest przekazanie na okładkę ogniwa TEG jak największego strumienia ciepła przy minimalnych stratach ciepła w module TEG. Pożądaną w zastosowaniach praktycznych cechą modułu TEG jest uniwersalność implementacji i skalowalność jego wielkości. Projekt modułu TEG musi więc spełniać nie pojedyncze wymagania, lecz ich zespół. Schemat wymagań jakie musi spełnić moduł termoelektryczny i czynników za nie odpowiedzialnych przedstawiono na Rys. 13.1.



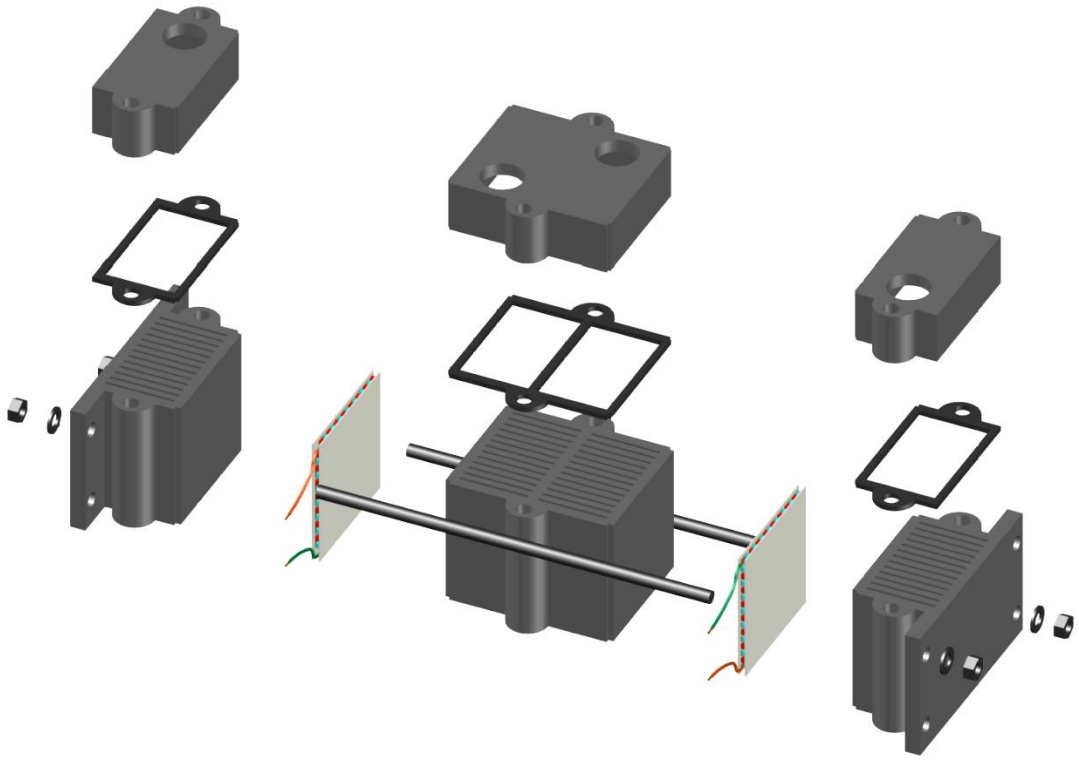
Rys. 13.1 Wymagania dotyczące uniwersalnego i skalowalnego modułu termoelektrycznego

Przeprowadzone badania potwierdziły dużą efektywność zaprojektowanych wymienników ciepła oraz zastosowanego materiału termoprzewodzącego. Z tego względu w projekcie uniwersalnego modułu zastosowano tą samą geometrię i materiał wymienników ciepła oraz pastę termoprzewodzącą.

Równomierne rozprowadzenie czynników grzewczego i chłodzącego między członami zapewniono połączeniami w układzie Tichelmanna.

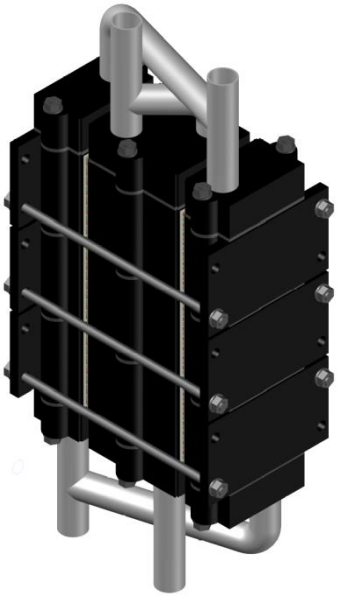
Na ograniczenie strat ciepła w module TEG składają się: właściwy układ wymienników w powtarzalnym członie, brak łączników będących mostkami cieplnymi oraz zewnętrzna izolacja cieplna całego modułu TEG. W module TEG ograniczenie strat ciepła osiągnięto przez „otoczenie" wymienników ciepła obiegu grzewczego wymiennikami obiegu chłodzącego. Z tego względu podstawowy, powtarzalny człon modułu składa się z 2 generatorów termoelektrycznych i 3 wymienników ciepła. W celu ograniczenia strat ciepła wynikających z wymiany ciepła poza generatorem (między dwoma wymiennikami na drodze konwekcji i promieniowania) wymiary geometryczne wymienników ciepła muszą odpowiadać wymiarom generatorów. Z tego samego względu istotny jest sposób łączenia wymienników ciepła – należy wyeliminować łączniki mechaniczne mające kontakt z wymiennikami obiegu chłodzącego i grzewczego. Moduł jako całość wyposażono w efektywną zewnętrzną izolację termiczną.

Podstawowym elementem składowym modułu jest powtarzalny człon złożony z dwóch generatorów termoelektrycznych i trzech wymienników ciepła. Rozwiązanie to zapewnia uniwersalność implementacji i teoretycznie nieograniczoną skalowalność modułu oraz ograniczenie kosztów wykonania i budowy. Wizualizację 3D poszczególnych elementów członu wraz z elementami złącznymi, kończącymi oraz uszczelkami przedstawiono na Rys. 13.2.

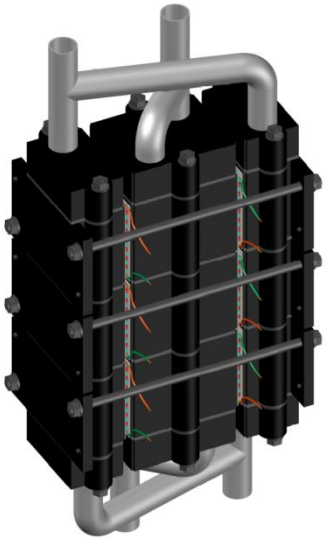


Rys. 13.2 Elementy podstawowe członu modułu termoelektrycznego

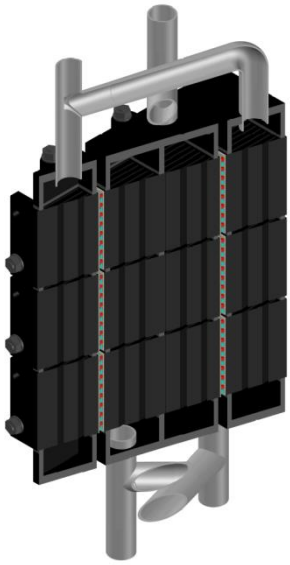
Wizualizację 3D autorskiego, uniwersalnego, skalowalnego modułu termoelektrycznego przedstawiono na rysunkach: Rys. 13.3, Rys. 13.5, Rys. 13.4.



Rys. 13.3 Autorski moduł termoelektryczny – rzut 1



Rys. 13.4 Autorski moduł termoprzewodzący - rzut 2



Rys. 13.5 Autorski moduł termoelektryczny – przekrój

Na powyższych rysunkach przedstawiono moduł termoelektryczny składający się z 3 członów. W każdym z członów pracują po 2 ogniwa TEG. Moduł złożony z 6 ogniw ma wymiary 200 mm x 140 mm x 85 mm bez izolacji cieplnej. Odpowiednie prowadzenie kanałów wodnych (układ Tichelmana) zapewnia równomierne dostarczanie czynnika grzewczego i chłodzącego do każdego z modułów. Projektowany moduł składa się z małej liczby elementów podstawowych tj.: dwóch typów elementów kończących, dwóch typów wymienników wewnętrznych oraz dwóch typów uszczelek. Elementy zostały zaprojektowane do wykonania z aluminium lub miedzi, a ich budowa została zoptymalizowana do wycinania w maszynie typu WaterJet. Izolację termiczną modułu zaprojektowano z pianki poliuretanowej.

14. Wnioski

1. Odpowiednio zaprojektowany zespół TEG jest w stanie częściowo lub w całości zasilać system cieplny w energię pomocniczą. Dzięki temu możliwe jest zbudowanie nowoczesnego, w pełni zautomatyzowanego systemu cieplnego niezależnego od zasilania w energię pomocniczą z zewnątrz.
2. Parametry pracy modułów TEG zależą nie tylko od strumienia ciepła przepływającego przez TEG. Istotny jest również poziom odniesienia przy którym występuje różnica temperatur między okładkami generatora.
3. Opracowana zależność umożliwia zaprojektowanie zespołu TEG dostosowanego do dostępnych parametrów cieplnych i wymaganych parametrów elektrycznych.
4. Istnieją dalsze obszary badań zastosowania zespołów TEG w systemach cieplnych.

15. Podsumowanie pracy

Obecnie temat wykorzystania generatorów termoelektrycznych do wytwarzania prądu elektrycznego jest obiektem dużego zainteresowania naukowców na całym świecie, czego dowodem jest szczegółowy przegląd literaturowy przedstawiony w rozdziale 5. Wykorzystanie generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii elektrycznej wpisuje się we współczesny trend poszukiwania nowych technologii ograniczających zużycie energii pierwotnej ze źródeł nieodnawialnych.

W prowadzonych dotychczas badaniach naukowych dotyczących efektywności pracy generatorów termoelektrycznych oraz ich implementacji w systemach cieplnych brak kompleksowej i szczegółowej wieloparametrowej analizy umożliwiającej określenie potencjału zastosowania generatorów w dowolnym systemie cieplnym.

W pracy szczegółowo przeanalizowano całkowite zapotrzebowanie na elektryczną energię pomocniczą współczesnych systemów cieplnych oraz poszczególnych urządzeń pomocniczych niezbędnych do prawidłowej pracy systemu cieplnego. Wnioski płynące z przeprowadzonej analizy wskazują jednoznacznie, że obecnie produkowane systemy cieplne oraz ich elementy składowe charakteryzują się wysoką energooszczędnością, co sprzyja zastosowaniu generatorów termoelektrycznych do ich zasilania.

Sformułowany problem badawczy dotyczący określenia wpływu parametrów cieplnych i elektrycznych na pracę generatorów termoelektrycznych oraz wyznaczenia zależności matematycznej do doboru i wymiarowania złożonych modułów termoelektrycznych rozwiązano poprzez wykonanie wielu serii pomiarów oraz szczegółową analizę otrzymanych wyników. Dowiedziono, że wpływ na pracę generatora termoelektrycznego ma nie tylko wartość strumienia ciepła dostarczanego i odbieranego z generatora. Istotny jest również poziom odniesienia, przy którym występuje różnica temperatur między okładkami generatora. Każda z temperatur składowych ma bezpośredni wpływ na zjawiska termoelektryczne (współczynnik Seebecka, czy rezystancja wewnętrzna generatora).

Odpowiedni dobór badanych zmiennych w postaci temperatur w obiegach oraz strumieni przepływu czynnika wraz ze szczegółowością przeprowadzonych badań umożliwiły stworzenie precyzyjnej, ale przy tym prostej zależności matematycznej do doboru i wymiarowania modułów termoelektrycznych na podstawie elementarnych parametrów, charakterystycznych dla dowolnego systemu cieplnego. Dzięki temu użytkownik może szybko ocenić możliwość i potencjał zastosowania generatorów termoelektrycznych w wybranym systemie cieplnym.

Autorskie wymienniki ciepła stworzone na potrzeby prowadzenia eksperymentu cechowały się wysoką wydajnością w porównaniu do rozwiązań opisanych w innych pracach naukowych. W oparciu o doświadczenia z przeprowadzonych badań wykonano projekt techniczny uniwersalnego, skalowalnego modułu termoelektrycznego. Umożliwia on budowę systemów termoelektrycznych o wielkości i parametrach dostosowanych do warunków i potrzeb dowolnego systemu cieplnego.

W pracy zaprezentowano również przykład zastosowania generatora termoelektrycznego do zasilania pompy obiegowej systemu cieplnego. Tym samym udowodniono możliwość i przydatność stosowania rozwiązań termoelektrycznych we współczesnych systemach cieplnych. Otwiera to szerokie pole badań nad potencjalnymi zastosowaniami TEG w systemach cieplnych.

BIBLIOGRAFIA

1. BP Statistical Review of World Energy 2015. London: BP; 2015.

2. IEA-Unit Converter [Internet].: International Energy Agency; 2016 []. Available from: http://www.iea.org/statistics/resources/unitconverter/.

3. Shafiee S, Topal E. When will fossil fuel reserves be diminished? Energy Policy. 2009 1;37(1):181-9.

4. Zaporowski B. Technologie wytwarzania energii elektrycznej dla polskiej elektroenergetyki. Polityka Energetyczna. 2015;18.

5. van de Bor DM, Infante Ferreira CA, Kiss AA. Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles. Energy. 2015 9;89:864-73.

6. Cao X, Yang W, Zhou F, He Y. Performance analysis of different high-temperature heat pump systems for low-grade waste heat recovery. Appl Therm Eng. 2014 10/5;71(1):291-300.

7. Kwon O, Cha D, Park C. Performance evaluation of a two-stage compression heat pump system for district heating using waste energy. Energy. 2013 8/1;57:375-81.

8. Söylemez MS. Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery. J Food Eng. 2006 6;74(3):292-8.

9. Song Z, Chen J, Yang L. Heat transfer enhancement in tubular heater of Stirling engine for waste heat recovery from flue gas using steel wool. Appl Therm Eng. 2015 8/5;87:499-504.

10. Lecompte S, Huisseune H, van den Broek M, Vanslambrouck B, De Paepe M. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015 7;47:448-61.

11. Muhammad U, Imran M, Lee DH, Park BS. Design and experimental investigation of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam. Energy Conversion and Management. 2015 10;103:1089-100.

12. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/125/WE, z dnia 21 października 2009 r., ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią, 2009).

13. ROZPORZĄDZENIE DELEGOWANE KOMISJI (UE) NR 811/2013 z dnia 18 lutego 2013 r., uzupełniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/30/UE w odniesieniu do etykiet efektywności energetycznej dla ogrzewaczy pomieszczeń, ogrzewaczy wielofunkcyjnych, zestawów zawierających ogrzewacz pomieszczeń, regulator temperatury i urządzenie słoneczne oraz zestawów zawierających ogrzewacz wielofunkcyjny, regulator temperatury i urządzenie słoneczne, 2013).

14. ROZPORZĄDZENIE DELEGOWANE KOMISJI (UE) NR 812/2013 z dnia 18 lutego 2013 r., uzupełniające dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/30/UE w odniesieniu do etykiet efektywności energetycznej dla podgrzewaczy wody, zasobników ciepłej wody użytkowej i zestawów zawierających podgrzewacz wody i urządzenie słoneczne, 2013).

15. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 813/2013 z dnia 2 sierpnia 2013 r., w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla ogrzewaczy pomieszczeń i ogrzewaczy wielofunkcyjnych, 2013).

16. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 814/2013 z dnia 2 sierpnia 2013 r., w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla podgrzewaczy wody i zasobników ciepłej wody użytkowej, 2013).

17. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 641/2009 z dnia 22 lipca 2009 r., w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla pomp cyrkulacyjnych bezdławnicowych wolnostojących i pomp cyrkulacyjnych bezdławnicowych zintegrowanych z produktami, 2009).

18. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2010/30/UE z dnia 19 maja 2010 r., w sprawie wskazania poprzez etykietowanie oraz standardowe informacje o produkcie, zużycia energii oraz innych zasobów przez produkty związane z energią, 2010).

19. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 622/2012 z dnia 11 lipca 2012 r., zmieniające rozporządzenie (WE) nr 641/2009 w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla pomp cyrkulacyjnych bezdławnicowych wolnostojących i pomp cyrkulacyjnych bezdławnicowych zintegrowanych z produktami, 2012).

20. Kristen H, Rakitzis Z. Technical Report No. 713008515, Rev. 0. Frankfurt: TUV SUD Product Service GmbH; 2013.

21. Markowski P. Właściwości termoelektryczne kompozytów grubowarstwowych [dissertation]. Politechnika Wrocławska Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki; 2008.

22. Goldsmid HJ. Intorduction to thermoelectricity. Berlin: Springer-Verlag; 2010.

23. Rowe DM, editor. CRC Handbook of Thermoelectrics. London: CRC Press; 1996.

24. Sawieliew IW. Wykłady z fizyki. TOM 3. Warszawa: PWN; 1998.

25. Nolas G, Sharp J, Goldsmid H. Thermoelectrics – basic principles and new materials developments . Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2001.

26. Pollock DD. Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool. Ann Arbor: American Society for Testing and Materials; 1985.

27. Vieira da Rosa A. Fundamentals of Renewable Energy Processes . Burlington: Elsevier; 2005.

28. Rowe DM, editor. Thermoelctronics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: Taylor and Francis; 2006.

29. Biswas K, He J, Blum ID, Wu CI, Hogan TP, Seidman DN, et al. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. Nature. 2012;489:414-8.

30. Liu H, Shi X, Xu F, Zhang L, Zhang W, Chen L, et al. Copper ion liquid-like thermoelectrics. . 2012 05//print;11(5):425.

31. Liu H, Yuan X, Lu P, Shi X, Xu F, He Y, et al. Ultrahigh Thermoelectric Performance by Electron and Phonon Critical Scattering in Cu2Se1-xIx. Adv Mater. 2013;25(45):6607-12.

32. Yu B, Liu W, Chen S, Wang H, Wang H, Chen G, et al. Thermoelectric properties of copper selenide with ordered selenium layer and disordered copper layer. Nano Energy. 2012 5;1(3):472-8.

33. Zhao L, Lo S, Zhang Y, Sun H, Tan G, Uher C, et al. Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals. . 2014 04/17/print;508(7496):377.

34. Zhong B, Zhang Y, Li W, Chen Z, Cui J, Li W, et al. High superionic conduction arising from aligned large lamellae and large figure of merit in bulk Cu1.94Al0.02Se. Appl Phys Lett. 2014;105(12):123902.

35. Viessmann Sp. z o.o. Instrukcja serwisowa dla wykwalifikowanego personelu VIESMANN Vitocrossal 300 Typ CU3A, 19 do 60 kW. Mysłowice: Viessmann Sp. z o.o.; 2015.

36. DeDietrich technika grzewcza. Instrukcja instalowania i konserwacji. Innovens Pro MCA 45 - 65 - 90 - 115. Wrocław: DeDietrich technika grzewcza.

37. August Broetje GmbH. Instrukcja instalacji. EcoTherm Plus WGB EVO 15 – 28 H. Rastede: August Broetje GmbH; 2015.

38. August Broetje GmbH. Instrukcja instalacji. EcoCondens BBS EVO 15 – 28 H. Rastede: August Broetje GmbH; 2015.

39. August Broetje GmbH. Instrukcja instalacji. IntroCondens WHBS 14 -30, WHBC 22/24 i 28/33. Rastede: August Broetje GmbH; 2016.

40. August Broetje GmbH. Instrukcja instalacji. EcoTherm Plus WGB 50 – 110 H. Rastede: August Broetje GmbH; 2015.

41. August Broetje GmbH. Instrukcja instalacji. EcoTherm Plus WGB 15 – 38 H. Rastede: August Broetje GmbH; 2015.

42. August Broetje GmbH. Podręcznik montażu. EcoTherm Kompakt WBS 14 - 22 H. Rastede: August Broetje GmbH; 2015.

43. DeDietrich technika grzewcza. Instrukcja instalowania, obsługi i konserwacji. MCR3 Plus 24S - 24T - 35S - 24/28MI - 30/35MI. Wrocław: DeDietrich technika grzewcza; 2015.

44. Viessmann Sp. z o.o. Dane techniczne VITODENS 050-W Typ BPJD. Mysłowice: Viessmann Sp. z o.o.; 2015.

45. DeDietrich technika grzewcza. Instrukcja techniczna instalowania i obsługi. Innovens MCA 15 - MCA 25 MCA 25/28 MI. Wrocław: DeDietrich technika grzewcza; 2009.

46. estyma electronic. INSTRUKCJA OBSŁUGI REGULATORA KOTŁAigneo slim. Giżycko: estyma electronic; 2011.

47. P.P.U.H JUMAR Jerzy Podhajski. MIKROPROCESOROWY STEROWNIK KOTŁA CO, REG – 07 wersja 1.0, INSTRUKCJA MONTAŻU I OBSŁUGI. Racibórz: P.P.U.H JUMAR Jerzy Podhajski.

48. P.P.U.H JUMAR Jerzy Podhajski. MIKROPROCESOROWY REGULATOR PALNIKA PELET, REG-30 wersja 1.0. Racibórz: P.P.U.H JUMAR Jerzy Podhajski.

49. TECH Sp. j. Instrukcja ST-80. Wieprz: TECH Sp. j.

50. TECH Sp. j. ST-88zPID Instrukcja obsługi. Wieprz: TECH Sp. j.

51. TECH Sp. j. Instrukcja ST-880 zPID. Wieprz: TECH Sp. j.

52. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-22N. Wieprz: TECH Sp. j.

53. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-37N RS. Wieprz: TECH Sp. j.

54. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-81. Wieprz: TECH Sp. j.

55. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-480. Wieprz: TECH Sp. j.

56. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-580. Wieprz: TECH Sp. j.

57. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-717. Wieprz: TECH Sp. j.

58. TECH Sp. j. MIKROPROCESOROWY REGULATOR TEMPERATURY do kotła na zgazowanie drewna, ST–58zPID. Wieprz: TECH Sp. j.

59. P.H.P.U. AS. EUROSTER EUNI3 Pogodowy sterownik instalacji grzewczej. Krobia: P.H.P.U. AS.

60. Viessmann Sp. z o.o. Vitotronic, Regulatory kaskadowe i obiegu kotła do dwusystemowych instalacji grzewczych. Wytyczne projektowe. Mysłowice: Viessmann Sp. z o.o.; 2014.

61. Viessmann Sp. z o.o. Instrukcja montażu i serwisu Vitotronic 200. Mysłowice: Viessmann Sp. z o. o.; 2011.

62. P.H.P.U. AS. EUROSTER 813 Sterownik systemu solarnego. Krobia: P.H.P.U. AS.

63. Weishaupt Polska Sp. z o.o. Instrukcja montażu i eksploatacji regulator solarny WCM-SOL 1.0. Warszawa: Weishaupt Polska Sp. z o.o.; 2012.

64. DeDietrich technika grzewcza. Instrukcja techniczna instalowania i obsługi. Diemasol Ci. Wrocław: DeDietrich technika grzewcza; 2009.

65. Viessmann Sp. z o.o. Instrukcja montażu i serwisu. VITOSOLIC 100. Mysłowice: Viessmann Sp. z o.o.; 2015.

66. Viessmann Sp. z o.o. Instrukcja montażu i serwisu. Vitosolic 200. Mysłowice: Viessmann Sp. z o.o.; 2014.

67. TECH Sp. j. ST-21 SOLAR Instrukcja obsługi. Wieprz: TECH Sp. j.

68. TECH Sp. j. Instrukcja ST-401N. Wieprz: TECH Sp. j.

69. TECH Sp. j. Instrukcja ST-460. Wieprz: TECH Sp. j.

70. P.H.P.U. AS. EUROSTER E11K. Sterownik kominka z płaszczem wodnym. Krobia: P.H.P.U. AS.

71. Plum. Instrukcja obsługi i montażu. Regulator ecoKOM 200T. Kleosin: Plum; 2013.

72. Plum. Instrukcja obsługi i montażu ecoKOM 260 do kominków z płaszczem wodnym. Kleosin: Plum; 2013.

73. Zakład elektroniczny TATAREK Jerzy Tatarek. Instrukcja obsługi TATAREK RT-08 G. Wrocław: Zakład elektroniczny TATAREK Jerzy Tatarek; 2015.

74. Zakład elektroniczny TATAREK Jerzy Tatarek. Instrukcja obsługi TATAREK RT-08 K. Wrocław: Zakład elektroniczny TATAREK Jerzy Tatarek; 2008.

75. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-390zPID. Wieprz: TECH Sp. j.

76. TECH Sp. j. Instrukcja obsługi ST-392zPID. Wieprz: TECH Sp. j.

77. DEUTSCHE VORTEX GMBH & CO. KG. VORTEX HIGH EFFICIENCY DOMESTIC HOT WATER PUMPS. BLUE5ONE 12V DIRECT CURRENT VERSION. Ludwigsburg: DEUTSCHE VORTEX GMBH & CO. KG; 2013.

78. FOTTON SYSTEMY SOLARNE - CENTROPOL. FOTTON FT5 Niskonapięciowa pompa obiegowa. Gliwice: FOTTON SYSTEMY SOLARNE - CENTROPOL.

79. Xylem inc. D5 Brass DC Electronically Commutated Spherical Motor Centrifugal Pumps. Fresno: Xylem inc.; 2013.

80. Viessmann Sp. z o.o. Mieszacz ogrzewania i silniki mieszaczy. Dane techniczne. Wrocław: Viessmann Sp. z o.o.; 2004.

81. ESBE HYDRONIC SYSTEMS SP. Z O.O. Zawory obrotowe z siłownikami. SIŁOWNIKI SERIA 90 3-PUNKTOWE. Poznań: ESBE HYDRONIC SYSTEMS SP. Z O.O.

82. ESBE HYDRONIC SYSTEMS SP. Z O.O. Zawory obrotowe Z SIŁOWNIKAMI. SIŁOWNIKI SERIA ARA600 3-PUNKTOWE. Poznań: ESBE HYDRONIC SYSTEMS SP. Z O.O.

83. Danfoss LPM Sp. z o.o. Arkusz Informacyjny. Siłowniki sterowane sygnałem analogowym. Chwaszczyno: Danfoss LPM Sp. z o.o.; 2007.

84. IMI International Sp. z o.o. Siłowniki TA-MC. Olkusz: IMI International Sp. z o.o.; 2015.

85. Honeywell Sp. z o. o. VRM SIŁOWNIK DO ZAWORÓW MIESZAJĄCYCH Z SYGNAŁEM CIĄGŁYM. KARTA KATALOGOWA. Warszawa: Honeywell Sp. z o. o.

86. Wyniki wyszukiwania słowa 'thermoelectric' w tytułach w bazie artykułów naukowych Web of Science [Internet].: Thomson Reuters; 2016 [updated 31.03;]. Available from: http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=UA&SID=R2EYoZp134GYeu2luBl&search_mode=GeneralSearch&prID=a33fcca3-7ac4-48ae-8e6a-e47c9184efa7.

87. Wyniki wyszukiwania słowa 'Seebeck' w tytułach w bazie artykułów naukowych Web of Science [Internet].: Thomson Reuters; 2016 [updated 31.03;]. Available from:

http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=UA&SID=R2EYoZp134GYeu2luBl&search_mode=GeneralSearch&prID=f79ae560-5058-4707-ab00-dec9cb841a6f.

88. Wyniki wyszukiwania słowa 'thermoelectric generator' w tytułach w bazie artykułów naukowych Web of Science [Internet].: Thomson Reuters; 2016 [updated 31.03;]. Available from: http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=UA&SID=R2EYoZp134GYeu2luBl&search_mode=GeneralSearch&prID=0050f619-ba0f-41c2-94f6-43c72df26a54.

89. Wyniki wyszukiwania słowa 'TEG' w tytułach w bazie artykułów naukowych Web of Science [Internet].: Thomson Reuters; 2016 [updated 31.03;]. Available from: http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=UA&SID=R2EYoZp134GYeu2luBl&search_mode=GeneralSearch&prID=8e8515e4-7c67-48b4-9ba7-0a52fc39c93b.

90. Niu X, Yu J, Wang S. Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. J Power Sources. 2009 MAR 15 2009;188(2):621-6.

91. Casano G, Piva S. Experimental investigation of the performance of a thermoelectric generator based on Peltier cells. Exp Therm Fluid Sci. 2011 MAY 2011;35(4):660-9.

92. Lesage FJ, Page-Potvin N. Experimental analysis of peak power output of a thermoelectric liquid-to-liquid generator under an increasing electrical load resistance. Energy Conversion and Management. 2013 FEB 2013;66:98-105.

93. Liu C, Chen P, Li K. A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study. Int J Hydrogen Energy. 2014 SEP 23 2014;39(28):15497-505.

94. Chen A, Madan D, Wright PK, Evans JW. Dispenser-printed planar thick-film thermoelectric energy generators. J Micromech Microengineering. 2011 OCT 2011;21(10):104006.

95. Crane DT. An Introduction to System-Level, Steady-State and Transient Modeling and Optimization of High-Power-Density Thermoelectric Generator Devices Made of Segmented Thermoelectric Elements. J Electron Mater. 2011 MAY 2011;40(5):561-9.

96. Lee H, Yang HJ, We JH, Kim K, Choi KC, Cho BJ. Thin-Film Thermoelectric Module for Power Generator Applications Using a Screen-Printing Method. J Electron Mater. 2011 MAY 2011;40(5):615-9.

97. Takezawa A, Kitamura M. Geometrical design of thermoelectric generators based on topology optimization. Int J Numer Methods Eng. 2012 JUN 15 2012;90(11):1363-92.

98. Al-Merbati AS, Yilbas BS, Sahin AZ. Thermodynamics and thermal stress analysis of thermoelectric power generator: Influence of pin geometry on device performance. Appl Therm Eng. 2013 JAN 10 2013;50(1):683-92.

99. Fan P, Zheng Z, Cai Z, Chen T, Liu P, Cai X, et al. The high performance of a thin film thermoelectric generator with heat flow running parallel to film surface. Appl Phys Lett. 2013 JAN 21 2013;102(3):033904.

100. Sahin AZ, Yilbas BS. The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation. Energy Conversion and Management. 2013 JAN 2013;65:26-32.

101. Hadjistassou C, Kyriakides E, Georgiou J. Designing high efficiency segmented thermoelectric generators. Energy Conversion and Management. 2013 FEB 2013;66:165-72.

102. Ali H, Sahin AZ, Yilbas BS. Thermodynamic analysis of a thermoelectric power generator in relation to geometric configuration device pins. Energy Conversion and Management. 2014 FEB 2014;78:634-40.

103. Meng J, Zhang X, Wang X. Multi-objective and multi-parameter optimization of a thermoelectric generator module. Energy. 2014 JUL 15 2014;71:367-76.

104. Li Y, Buddharaju K, Singh N, Lo GQ, Lee SJ. Chip-Level Thermoelectric Power Generators Based on High-Density Silicon Nanowire Array Prepared With Top-Down CMOS Technology. IEEE Electron Device Lett. 2011 MAY 2011;32(5):674-6.

105. Liu Y, Yao H, Chen Y. Atomic-Scale Field-Effect Transistor as a Thermoelectric Power Generator and Self-Powered Device. Journal of Physical Chemistry C. 2011 AUG 4 2011;115(30):14988-96.

106. Chen Y, Chen K, Bai H, Li L. Electrochemically reduced graphene porous material as light absorber for light-driven thermoelectric generator. Journal of Materials Chemistry. 2012 2012;22(34):17800-4.

107. Li Y, Buddharaju K, Singh N, Lee SJ. Top-Down Silicon Nanowire-Based Thermoelectric Generator: Design and Characterization. J Electron Mater. 2012 JUN 2012;41(6):989-92.

108. Li Y, Buddharaju K, Bui Cong Tinh, Singh N, Lee SJ. Improved Vertical Silicon Nanowire Based Thermoelectric Power Generator With Polyimide Filling. IEEE Electron Device Lett. 2012 MAY 2012;33(5):715-7.

109. Suemori K, Hoshino S, Kamata T. Flexible and lightweight thermoelectric generators composed of carbon nanotube-polystyrene composites printed on film substrate. Appl Phys Lett. 2013 OCT 7 2013;103(15):153902.

110. Bubnova O, Crispin X. Towards polymer-based organic thermoelectric generators. Energy & Environmental Science. 2012 NOV 2012;5(11):9345-62.

111. Madan D, Chen A, Wright PK, Evans JW. Dispenser printed composite thermoelectric thick films for thermoelectric generator applications. J Appl Phys. 2011 FEB 1 2011;109(3):034904.

112. Madan D, Wang Z, Chen A, Juang R, Keist J, Wright PK, et al. Enhanced Performance of Dispenser Printed MA n-type Bi2Te3 Composite Thermoelectric Generators. Acs Applied Materials & Interfaces. 2012 NOV 2012;4(11):6117-24.

113. Baranowski LL, Snyder GJ, Toberer ES. Concentrated solar thermoelectric generators. Energy & Environmental Science. 2012 OCT 2012;5(10):9055-67.

114. Chen W, Wang C, Hung C, Yang C, Juang R. Modeling and simulation for the design of thermal-concentrated solar thermoelectric generator. Energy. 2014 JAN 1 2014;64:287-97.

115. McEnaney K, Kraemer D, Ren Z, Chen G. Modeling of concentrating solar thermoelectric generators. J Appl Phys. 2011 OCT 1 2011;110(7):074502.

116. Kraemer D, McEnaney K, Chiesa M, Chen G. Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications. Solar Energy. 2012 MAY 2012;86(5):1338-50.

117. Chen G. Theoretical efficiency of solar thermoelectric energy generators. J Appl Phys. 2011 MAY 15 2011;109(10):104908.

118. He W, Su Y, Riffat SB, Hou J, Ji J. Parametrical analysis of the design and performance of a solar heat pipe thermoelectric generator. Appl Energy. 2011 DEC 2011;88(12):5083-9.

119. Kraemer D, Poudel B, Feng H, Caylor JC, Yu B, Yan X, et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. Nature Materials. 2011 JUL 2011;10(7):532-8.

120. Deng YD, Fan W, Ling K, Su CQ. A 42-V Electrical and Hybrid Driving System Based on a Vehicular Waste-Heat Thermoelectric Generator. J Electron Mater. 2012 JUN 2012;41(6):1698-705.

121. Kim S, Park S, Kim S, Rhi S. A Thermoelectric Generator Using Engine Coolant for Light-Duty Internal Combustion Engine-Powered Vehicles. J Electron Mater. 2011 MAY 2011;40(5):812-6.

122. Kumar S, Heister SD, Xu X, Salvador JR, Meisner GP. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis. J Electron Mater. 2013 APR 2013;42(4):665-74.

123. Liang X, Sun X, Tian H, Shu G, Wang Y, Wang X. Comparison and parameter optimization of a two-stage thermoelectric generator using high temperature exhaust of internal combustion engine. Appl Energy. 2014 OCT 1 2014;130:190-9.

124. Liu X, Deng YD, Zhang K, Xu M, Xu Y, Su CQ. Experiments and simulations on heat exchangers in thermoelectric generator for automotive application. Appl Therm Eng. 2014 OCT 5 2014;71(1):364-70.

125. Lu H, Wu T, Bai S, Xu K, Huang Y, Gao W, et al. Experiment on thermal uniformity and pressure drop of exhaust heat exchanger for automotive thermoelectric generator. Energy. 2013 JUN 1 2013;54:372-7.

126. Wang Y, Dai C, Wang S. Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source. Appl Energy. 2013 DEC 2013;112:1171-80.

127. Weng C, Huang M. A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator. International Journal of Thermal Sciences. 2013 SEP 2013;71:302-9.

128. Baskaya S, Karaaslan S, Calisir T, Yilmazoglu MZ, Yilmaz TO. Experimental and Numerical Study on Thermoelectric Generator Performance Applied to a Condensing Combi Boiler. Heat Transfer Eng. 2015 SEP 22 2015;36(14-15):1292-302.

129. Brazdil M, Pospisil J. Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler. J Electron Mater. 2013 JUL 2013;42(7):2198-202.

130. Champier D, Bedecarrats JP, Kousksou T, Rivaletto M, Strub F, Pignolet P. Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. Energy. 2011 MAR 2011;36(3):1518-26.

131. Kristiansen NR, Snyder GJ, Nielsen HK, Rosendahl L. Waste Heat Recovery from a Marine Waste Incinerator Using a Thermoelectric Generator. J Electron Mater. 2012 JUN 2012;41(6):1024-9.

132. Francioso L, De Pascali C, Farella I, Martucci C, Creti P, Siciliano P, et al. Flexible thermoelectric generator for ambient assisted living wearable biometric sensors. J Power Sources. 2011 MAR 15 2011;196(6):3239-43.

133. Jo SE, Kim MK, Kim MS, Kim YJ. Flexible thermoelectric generator for human body heat energy harvesting. Electron Lett. 2012 AUG 2 2012;48(16):1015-6.

134. Kim SJ, We JH, Cho BJ. A wearable thermoelectric generator fabricated on a glass fabric. Energy & Environmental Science. 2014 JUN 2014;7(6):1959-65.

135. Settaluri KT, Lo H, Ram RJ. Thin Thermoelectric Generator System for Body Energy Harvesting. J Electron Mater. 2012 JUN 2012;41(6):984-8.

136. Hsu C, Huang G, Chu H, Yu B, Yao D. Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators. Appl Energy. 2011 APR 2011;88(4):1291-7.

137. Shu G, Zhao J, Tian H, Liang X, Wei H. Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123. Energy. 2012 SEP 2012;45(1):806-16.

138. Chavez-Urbiola EA, Vorobiev YV, Bulat LP. Solar hybrid systems with thermoelectric generators. Solar Energy. 2012 JAN 2012;86(1):369-78.

139. Gao X, Andreasen SJ, Chen M, Kaer SK. Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery. Int J Hydrogen Energy. 2012 MAY 2012;37(10):8490-8.

140. Bjork R, Nielsen KK. The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system. Solar Energy. 2015 OCT 2015;120:187-94.

141. Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. Energy. 2010 FEB 2010;35(2):935-42.

142. POLSKIE GÓRNICTWO NAFTOWE I GAZOWNICTWO SA ODDZIAŁ CENTRALNE LABORATORIUM POMIAROWO-BADAWCZE. ŚWIADECTWO WZORCOWANIA Termometr elektryczny - miernik temperatury typ DS18B20, producent Dallas Semiconductor. Warszawa: POLSKIE GÓRNICTWO NAFTOWE I GAZOWNICTWO SA ODDZIAŁ CENTRALNE LABORATORIUM POMIAROWO-BADAWCZE; 2008.

143. Jadwiszczak P, Sidorczyk M. Produkcja energii elektrycznej z ciepła za pomocą ogniw TEG – charakterystyki termoelektryczne termogeneratorów. Rynek Instalacyjny. 2016;4:38-44.

144. TECTEG MFR. Specifications TEG Module TEG1-12611-6.0. TECTEG MFR; 2016.

145. TECTEG MFR. Specifications TEG Module TEG-12611-8.0. TECTEG MFR; 2016.

146. Tellurex. G2-56-0352 Thermoelectric Power Generation mModule Specifications. Tellurex; 2016.

147. Tellurex. G2-56-0375 Thermoelectric Power Generation Module Specifications. Tellurex; 2016.

148. Tellurex. G2-56-0570 Thermoelectric Power Generation Module Specifications. Tellurex; 2016.

149. Mulas E, Rumianowski R. Rachunek niepewności pomiaru w pracowni fizycznej. Nowa kodyfikacja. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2004.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Zużycie energii pierwotnej na świecie w latach 1965-2014, w Mtoe(1) 7
Rys. 1.2. Zużycie energii pierwotnej w rozbiciu na nośniki energii, Mtoe (1).....7
Rys. 1.3 Sposoby ograniczenia zużycia konwencjonalnej energii pierwotnej.....8
Rys. 1.4 Schemat produkcji energii elektrycznej z ciepła dla układów: a) z turbiną ORC, b) z silnikiem Stirlinga, c) z generatorem termoelektrycznym.....9
Rys. 1.5 Idea wykorzystania generatorów termoelektrycznych w systemie cieplnym: a) schemat przepływu energii w konwencjonalnym systemie cieplnym, b) wykorzystanie ciepła odpadowego do zasilania TEG, c) wykorzystanie ciepła użytecznego do zasilania TEG 10
Rys. 2.1. Ilustracja zjawiska Peltiera..... 11
Rys. 2.2. Obwód termoelektryczny 13
Rys. 2.3. Dyfuzja elektronów w jednorodnym przewodniku, którego końce znajdują się w różnych temperaturach 14
Rys. 2.4. Bezwymiarowy współczynnik dobroci termoelektrycznej ZT najpopularniejszych materiałów półprzewodnikowych w funkcji temperatury (27)..... 18
Rys. 2.5. Schemat termostosu złożonego z n=4 termopar..... 18
Rys. 2.6. Schemat budowy półprzewodnikowego generatora termoelektrycznego 19
Rys. 4.1 Elementy kotła kondensacyjnego wykorzystujące energię pomocniczą..... 21
Rys. 4.2 Czynniki sprzyjające zastosowaniu TEG do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej..... 25
Rys. 5.1 Artykuły naukowe zawierające słowo thermoelectric w tytule, według bazy Web of Science (86) 26
Rys. 5.2 Artykuły naukowe zawierające słowo Seebeck w tytule, według bazy Web of Science (87) .. 26
Rys. 5.3 Artykuły naukowe zawierające słowa thermoelectric generator w tytule, według bazy Web of Science (88) 27
Rys. 5.4 Artykuły naukowe zawierające słowo TEG w tytule, według bazy Web of Science (89)..... 27
Rys. 5.5. Aktualne kierunki badań dotyczące generatorów termoelektrycznych..... 28
Rys. 5.6 Moc elektryczna w funkcji oporu dla różnicy temperatur wynoszącej 99 °C, strona zimna 62 °C, strona ciepła 161 °C (wyniki eksperymentalne) (141)..... 31
Rys. 5.7 Napięcie i moc elektryczna w funkcji różnicy temperatur przy oporności wynoszącej 2 (wyniki eksperymentalne) (141)..... 31
Rys. 5.8 Moc elektryczna w funkcji różnicy temperatur dla 4 generatorów termoelektrycznych połączonych szeregowo (wyniki eksperymentalne) (141) 32
Rys. 5.9 Bilans energetyczny badanego generatora termoelektrycznego (141)..... 32
Rys. 5.10 Stanowisko badawcze modułu termoelektrycznego (91)..... 33
Rys. 5.11 Zmierzone i obliczone wartości mocy elektrycznej w funkcji różnicy temperatur (91) 33

Rys. 5.12 Porównanie mocy elektrycznej w funkcji oporu elektrycznego dla ogniwa Peltiera oraz różnych TEG (91) 34
Rys. 5.13 Schemat efektywnej energetycznie wielofunkcyjnej glinianej kuchni (130) 34
Rys. 5.14 Działająca kuchnia z wbudowanym układem termoelektrycznym (130) 35
Rys. 5.15 Temperatura strony ciepłej i zimnej ogniwa oraz moce elektryczne w czasie eksperymentu (130) 35
Rys. 5.16 Mierzona moc elektryczna i moc obliczona w oparciu o model (130) 36
Rys. 5.17 Szacowane koszty implementacji generatora termoelektrycznego w kuchni opalanej drewnem (130) 36
Rys. 5.18 Projekt modułowego wymiennika ciepła do montażu w strumieniu spalin ze spalarni odpadów (131) 37
Rys. 5.19 Optymalne rozwiązania w odniesieniu do mocy elektrycznej i kosztów jednostkowych (131) 37
Rys. 5.20 Maksymalna moc elektryczna w funkcji kosztów za 1 W (131) 38
Rys. 5.21 Maksymalna moc elektryczna generowana przez TEG przy zmiennym współczynniku ZT oraz koszcie wytworzenia 1 W energii elektrycznej (131) 38
Rys. 5.22 Aluminiowy moduł termoelektryczny typu woda-woda (92) 39
Rys. 5.23 Temperatury przed i za wymiennikami ciepła (92) 39
Rys. 5.24 Wpływ zwiększania oporu elektrycznego na moc elektryczną (92) 39
Rys. 5.25 Wpływ zmiany oporu elektrycznego na względną moc elektryczną (92) 40
Rys. 5.26 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji różnicy temperatur (92) 40
Rys. 5.27 Temperatury wlotowe oraz wylotowe z wymienników ciepła (92) 41
Rys. 5.28 Wpływ zmiany strumienia przepływu czynnika grzewczego na względną moc elektryczną (92) 41
Rys. 5.29 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji strumienia przepływu w wymienniku dostarczającym ciepło do TEG (92) 41
Rys. 5.30 Temperatury wlotowe oraz wylotowe z wymienników ciepła (92) 42
Rys. 5.31 Wpływ zmiany strumienia przepływu czynnika chłodzącego na względną moc elektryczną (92) 42
Rys. 5.32 Maksymalna moc elektryczna oraz odpowiadająca jej oporność elektryczna w funkcji strumienia przepływu w wymienniku odbierającym ciepło z TEG (92) 42
Rys. 5.33 Projekt modułu termoelektrycznego do zastosowania w kotle na biomasę (129) 43
Rys. 5.34 Pojedyncza sekcja modułu termoelektrycznego (129) 43
Rys. 5.35 Prototyp modułu termoelektrycznego (129) 43

Rys. 5.36 Prąd w funkcji napięcia dla wybranych temperatur strony ciepłej generatorów (129) 44
Rys. 5.37 Moc elektryczna w funkcji natężenia dla wybranych temperatur strony ciepłej generatorów (129) 44
Rys. 5.38 Właściwości badanych TEG (93) 45
Rys. 5.39 Schemat modułu testowego (93) 45
Rys. 5.40 Maksymalna moc elektryczna generowana przez różne TEG (93) 45
Rys. 5.41 Wpływ zastosowanego materiału termoprzewodzącego na maksymalną moc elektryczną generowaną przez TEG (93) 46
Rys. 5.42 Zależność między mocą elektryczną, a różnicą temperatur (93)..... 47
Rys. 5.43 Zależność między mocą elektryczną a różnicą temperatur (93)..... 47
Rys. 5.44 Projekt wymiennika ciepła (a), moduł testowy (b) (128) 48
Rys. 5.45 Zależność napięcia obwodu otwartego od różnicy temperatur (a) zależność napięcia ładowania od oporu elektrycznego dla różnych nastaw autotransformatora (b) (128)..... 49
Rys. 5.46 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej od oporu dla różnych nastaw autotransformatora (a) zależność maksymalnej mocy oraz napięcia od różnicy temperatur przy oporze równym 0,47 Ω (b) (128) 49
Rys. 5.47 Rozkład temperatur w wymienniku po stronie spalin, rozkład temperatur w wymienniku po stronie wodnej (b) (128)..... 50
Rys. 5.48 Różne proponowane lokalizacje TEG w wymienniku ciepła kotła kondensacyjnego (128) .. 50
Rys. 5.49 Rozkład temperatury po stronie ciepłej TEG (a), rozkład temperatury po stronie zimnej TEG (b) (128)..... 50
Rys. 5.50 Temperatura strony ciepłej oraz zimnej TEG, dla wybranych lokalizacji w wymienniku ciepła kotła kondensacyjnego (128) 51
Rys. 6.1 Czynniki wpływające na efektywność pracy generatora termoelektrycznego..... 52
Rys. 7.1 Projekt aluminiowego wymiennika ciepła (wariant 1 – „wysoki”) 55
Rys. 7.2 Projekt aluminiowego wymiennika ciepła (wariant 2 – „niski”)..... 55
Rys. 8.1 Schemat stanowiska pomiarowego..... 60
Rys. 8.2 Tryb 1 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury. 62
Rys. 8.3 Tryb 2 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej bez stabilizacji temperatury..... 63

Rys. 8.4 Tryb 3 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej ze stabilizacją temperatury. 63
Rys. 8.5 Tryb 4 pracy stanowiska: w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz odbieranie ciepła z ogniwa strumieniem sieciowej wody wodociągowej ze stabilizacją temperatury. 64
Rys. 8.6 Tryb 5 pracy stanowiska: praca obiegów na obejściach wymienników ciepła - w obiegu grzewczym (czerwony) praca grzałki ze stabilizacją temperatury oraz rozpraszanie ciepła w obiegu chłodzącym (niebieski) za pomocą chłodnicy wodnej bez stabilizacji temperatury. 64
Rys. 8.7 Schemat ideowy układu pomiarowego do sporządzania charakterystyk elektrycznych TEG . 66
Rys. 8.8 Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa TEG 67
Rys. 9.1. Plan eksperymentu 69
Rys. 10.1 Schemat rozmieszczenia czujników temperatur 71
Rys. 10.2 Temperatura w określonych punktach układu w trakcie badań zasadności stosowania materiału termoprzewodzącego 72
Rys. 10.3 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEC1-12730 od różnicy temperatur między powierzchniami wymienników ciepła, dla pasty termoprzewodzącej Arctic MX-2 oraz Arctic MX-4 73
Rys. 10.4 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej generowanej przez TEC1-12730 od różnicy temperatur między powierzchniami wymienników ciepła, dla wymiennika niskiego i wysokiego 74
Rys. 10.5 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych firmy Tellurex 76
Rys. 10.6 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów termoelektrycznych firmy TECTEG 77
Rys. 10.7 Charakterystyka cieplno-elektryczna generatora TEC1-12730 78
Rys. 10.8 Charakterystyki cieplno-elektryczne generatorów G2-56-0352, TEG1-12611-6.0 oraz TEC1-12730 79
Rys. 10.9 Charakterystyki elektryczne badanych termogeneratorów przy różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego równej 80 °C (143) 80
Rys. 10.10 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEC1-12730 81
Rys. 10.11 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEG1-12611-6.0 82
Rys. 10.12 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora TEG1-12611-8.0 82
Rys. 10.13 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0352 83
Rys. 10.14 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0375 83
Rys. 10.15 Pełna charakterystyka elektryczna termogeneratora G2-56-0570 84

Rys. 10.16 Wykres zależność rezystancji wewnętrznej badanych termogeneratorów od różnicy temperatur między powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu grzewczego, a powierzchnią wtórną wymiennika ciepła obiegu chłodzącego 85
Rys. 10.17 Schemat miejsc pomiaru temperatur oraz obiegu czynnika chłodzącego termogenerator, przy chłodzeniu z wykorzystaniem chłodnicy 87
Rys. 10.18 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 15°C 88
Rys. 10.19 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 20°C 89
Rys. 10.20 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 25°C 89
Rys. 10.21 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 30°C 90
Rys. 10.22 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 35°C 90
Rys. 10.23 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 40°C 91
Rys. 10.24 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 45°C 91
Rys. 10.25 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 50°C 92
Rys. 10.26 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 55°C 92
Rys. 10.27 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 60°C 93
Rys. 10.28 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 65°C 93
Rys. 10.29 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 70°C 94
Rys. 10.30 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze w obiegu chłodzącym równej 75°C 94
Rys. 10.31 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 5 °C 95
Rys. 10.32 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 10 °C 96

Rys. 10.33 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 15 °C 96
Rys. 10.34 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 20 °C 97
Rys. 10.35 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 25 °C 97
Rys. 10.36 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 30 °C 98
Rys. 10.37 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 35 °C 98
Rys. 10.38 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 40 °C 99
Rys. 10.39 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 45 °C 99
Rys. 10.40 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 50 °C 100
Rys. 10.41 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 55 °C 100
Rys. 10.42 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 60 °C 101
Rys. 10.43 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 65 °C 101
Rys. 10.44 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 70 °C 102
Rys. 10.45 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 75 °C 102
Rys. 10.46 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 80 °C 103
Rys. 10.47 Charakterystyki elektryczne przy różnicy temperatur czynnika między obiegiem grzewczym i chłodzącym równej 85 °C 103
Rys. 10.48 Zależność rezystancji wewnętrznej ogniwa TEC1-12730 od różnicy między temperaturą przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego i temperaturą przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego dla ustabilizowanych temperatur obiegu chłodzącego..... 104

Rys. 10.49 Zależność maksymalnej mocy elektrycznej od temperatury czynnika przed wymiennikiem ciepła obiegu grzewczego dla wybranych różnic temperatur między obiegiem grzewczym, a chłodzącym 105
Rys. 10.50 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,100 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,100 m^3/h 106
Rys. 10.51 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h 107
Rys. 10.52 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h 107
Rys. 10.53 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,200 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h 108
Rys. 10.54 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h 108
Rys. 10.55 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h 109
Rys. 10.56 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,400 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h 109
Rys. 10.57 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,200 m^3/h 110
Rys. 10.58 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,400 m^3/h 110
Rys. 10.59 Pełna charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy temperaturze przed wymiennikiem ciepła obiegu chłodzącego równej 30 °C oraz przepływach: w obiegu grzewczym równym 0,600 m^3/h, w obiegu chłodzącym równym 0,600 m^3/h 111
Rys. 10.60 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 5 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 112

Rys. 10.61 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 10 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 112
Rys. 10.62 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 15 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 113
Rys. 10.63 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 20 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 113
Rys. 10.64 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 25 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 114
Rys. 10.65 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 30 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 114
Rys. 10.66 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 35 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 115
Rys. 10.67 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 40 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 115
Rys. 10.68 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 45 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 116
Rys. 10.69 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 50 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 116
Rys. 10.70 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 55 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 117
Rys. 10.71 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 60 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 117
Rys. 10.72 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 65 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 118
Rys. 10.73 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 70 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 118
Rys. 10.74 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 75 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 119
Rys. 10.75 Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730 przy różnicy temperatur między obiegami równej 80 °C dla wybranych przepływów czynnika w obiegach 119
Rys. 10.76 Rezystancja wewnętrzna ogniwa TEC1-12730 w badanym zakresie różnic temperatur, dla wybranych strumieni przepływu w obiegach grzewczym i chłodzącym 121
Rys. 10.77 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 50 °C oraz 25 °C 123

Rys. 10.78 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 70 °C oraz 25 °C 123
Rys. 10.79 Charakterystyki elektryczne generatora TEC1-12730 przy badaniu bezwładności dla temperatur w obiegach grzewczym oraz chłodzącym odpowiednio 90 °C oraz 25 °C 124
Rys. 10.80 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 50 °C oraz t_c = 25 °C 125
Rys. 10.81 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 70 °C oraz t_c = 25 °C 125
Rys. 10.82 Zależność temperatur oraz maksymalnej mocy elektrycznej od czasu przy badaniu bezwładności ogniwa TEC1-12730 dla t_h = 90 °C oraz t_c = 25 °C 126
Rys. 10.83 Efektywność termogeneratora TEC1-12730 w funkcji różnicy temperatur 127
Rys. 10.84 Zależność miedzy obliczonymi wartościami natężenia prądu, a wartościami zmierzonymi 130
Rys. 10.85 Interfejs użytkownika arkusza do wymiarowania modułów termoelektrycznych złożonych z ogniw TEC1-12730 131
Rys. 10.86 Parametry temperaturowe i prądowe dla każdego z ogniw wchodzącego w skład zespołu termoelektrycznego 132
Rys. 11.1 Zależność niepewności rozszerzonej względnej pomiaru natężenia prądu w funkcji wartości natężenia prądu 135
Rys. 12.1 Schemat hydrauliczny układu z pompą obiegową zasilaną za pomocą generatora termoelektrycznego 136
Rys. 13.1 Wymagania dotyczące uniwersalnego i skalowalnego modułu termoelektrycznego 139
Rys. 13.2 Elementy podstawowe członu modułu termoelektrycznego 140
Rys. 13.3 Autorski moduł termoelektryczny – rzut 1 141
Rys. 13.4 Autorski moduł termoprzewodzący - rzut 2 141
Rys. 13.5 Autorski moduł termoelektryczny – przekrój 141

SPIS FOTOGRAFII

Fot. 7-1 Wymiennik ciepła (wariant 1) 56
Fot. 7-2 Wymiennik ciepła (wariant 2) 56
Fot. 8-1 Stanowisko pomiarowe wraz z modułem stabilizacji temperatury w obiegu chłodzącym – widok od strony połączeń hydraulicznych 59
Fot. 8-2 Stanowisko pomiarowe wraz z modułem stabilizacji temperatury w obiegu chłodzącym - widok od strony urządzeń 59
Fot. 12-1 Porównanie wielkości przetwornicy napięcia DC -DC Step up SX 1308 z monetą jednogroszową 136

SPIS TABEL

Tab. 2-1. Wartości współczynnika Seebecka dla metali, w temperaturze 300K, µV/K (27) 16
Tab. 4-1 Zapotrzebowanie na energię pomocniczą wybranych gazowych kondensacyjnych kotłów grzewczych 22
Tab. 4-2 Zapotrzebowanie na moc elektryczną wybranych sterowników cyfrowych 23
Tab. 4-3 Zapotrzebowanie na moc elektryczną urządzeń pomocniczych 24
Tab. 10-1 Podstawowe parametry badanych generatorów termoelektrycznych 75
Tab. 10-2 Porównanie maksymalnej mocy elektrycznej i rezystancji wewnętrznej wynikających z pomiarów z danymi producenta 86
Tab. 10-3 Zestawienie wartości liczby Reynoldsa w zależności od temperatury czynnika i prędkości przepływu dla zaprojektowanego wymiennika ciepła 121
Tab. 10-4 Wyniki regresji 128
Tab. 10-5 Statystyki regresji 129
Tab. 10-6 Analiza wariancji przeprowadzonej regresji 129
Tab. 11-1 Niepewności rozszerzone względne wielkości mierzonych bezpośrednio 134
Tab. 11-2 Niepewności rozszerzone względne wartości mierzonych pośrednio 134
Tab. 12-1 Zależność strumienia przepływu pompy Fotton Ft5 15PV od temperatur w obiegach grzewczym i chłodzącym 137