

ZASTOSOWANIE PSYCHROMETRU PELTIERA DO POMIARU POTENCJAŁU WODY: PROTOTYP PRZYRZĄDU POMIAROWEGO

W. Skierucha, H. Sobczuk, M.A. Malicki

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: skieruch@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono budowę prototypowego termoelektrycznego psychrometru Peltiera. Przedstawiono również kalibrację przyrządu na roztworach NaCl. Prototypowy przyrząd zbudowany na bazie nowoczesnych, zintegrowanych podzespołów elektronicznych umożliwia rejestrację i pomiar potencjału wody w zakresie, w którym inne czujniki zawodzą (od $-0,4$ do -6 MPa). Możliwość komputerowej analizy krzywych obrazujących generowany skok temperatury powodują, że ta obiecująca metoda pomiaru może stać się standardową w przemyśle budowlanym. Osiągnięty cel upoważnia do podjęcia kroków w celu poszerzenia zakresu pomiaru potencjału wody w glebie do wartości powyżej $-0,4$ MPa.

Słowa kluczowe: potencjał wody, psychrometr Peltiera, termozłącze.

WPROWADZENIE

Psychrometr Spannera, inaczej zwany psychrometrem Peltiera, od nazwiska odkrywcy zjawiska fizycznego obserwowanego w termoparze, mierzy wilgotność względną powietrza w równowadze termodynamicznej z próbką wilgotnego materiału. Para wodna w badanym materiale porowatym musi być również w równowadze z parą w powietrzu otaczającym termozłącze. Metoda ta używana jest w fizyce gleby do wyznaczania wodnego potencjału gleby oraz roślin.

W przemyśle budowlanym wartość wilgotności względnej jest ważnym parametrem wskazującym zakres bezpiecznych warunków determinujących poprawne zachowanie się materiałów budowlanych. Jeżeli wilgotność względna wzrasta, wywołuje to kondensację wody i w konsekwencji wyzwolenie procesów niszczą-

cych materiał budowlany. Ten ważny etap powinien być monitorowany i prezentowany, a ulepszony psychrometr termozłączowy mógłby być tam zastosowany.

Celem pracy było opracowanie i wykonanie sterowanego cyfrowo układu (interfejsu) termoelektrycznego psychrometru Spannera (z wykorzystaniem efektu Peltiera) do pomiaru potencjału wody. Zamierzoną konsekwencją osiągnięcia tego celu mogłoby być poszerzenie zakresu pomiaru potencjału wody w glebie do wartości powyżej $-0,4$ MPa.

Termozłącze jest utworzone z dwóch różnych metali połączonych razem. Występują w nim dwa fizyczne zjawiska, których efektem jest wymiana energii. Zjawisko Seebecka polega na generowaniu napięcia i jest wykorzystywane w pomiarach temperatury. Jeżeli oba końce przewodów tworzących termozłącze zostaną połączone w obwód zamknięty, to popłynie przez nie prąd elektryczny, gdy rozważane złącza będą w różnej temperaturze. Wielkość spadku napięcia powodującego przepływ prądu zależy od różnicy temperatur między złączami. Przez pomiar tego prądu lub napięcia można określić różnicę temperatur między złączami.

Zjawisko Peltiera polega na chłodzeniu lub ogrzewaniu termozłącza przez płynący przez nie prąd elektryczny. Gdy prąd elektryczny płynie przez złącze dwóch różnych metali, dodatkowe ciepło zostanie na tym złączu zaabsorbowane bądź wyzwolone. Jeżeli prąd płynie w tym samym kierunku, co prąd wygenerowany zjawiskiem Seebecka na gorącym złączu, to ciepło będzie absorbowane. Jeżeli prąd płynie w kierunku przeciwnym, to ciepło jest wyzwolane.

Oba efekty wykorzystywane są w metodzie psychrometrycznego pomiaru względnej prężności pary wodnej, e/e_0 , która jest powiązana z chemicznym potencjałem wody następującą zależnością:

$$\Psi = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{e}{e_0} \quad (1)$$

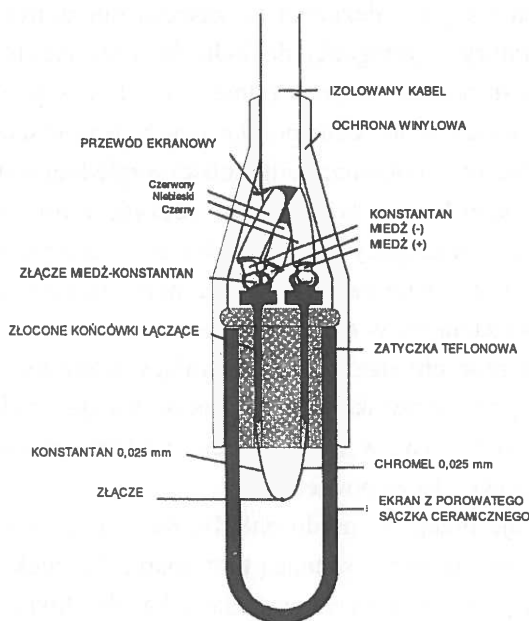
gdzie: Ψ jest potencjałem wody (Pa), R jest uniwersalną stałą gazową ($8,3143 \text{ J} \times \text{mol} \times \text{K}^{-1}$), e/e_0 jest wilgotnością względną wyrażoną w postaci ułamka, T jest temperaturą w stopniach Kelvina, V_w jest objętością mola wody ($1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \times \text{mol}^{-1}$).

Zjawisko Peltiera wykorzystywane jest przy chłodzeniu złącza tak, aby jego temperatura spadła poniżej punktu rosy, co powoduje kondensację pary na złączu termopary. Po wyłączeniu prądu chłodzenia, woda, która zwilżyła złącze termo-

pary paruje do otoczenia chłodząc je. Aktualna temperatura termozłącza, mierzona przy wykorzystaniu zjawiska Seebecka, pozostaje na tym samym poziomie do momentu aż skondensowana na nim woda całkowicie wyparuje. Wtedy temperatura złącza ulega podwyższeniu do temperatury otoczenia. Obserwowana różnica temperatury zależy od wilgotności względnej otaczającego powietrza; im mniejsza wilgotność względna, tym szybciej paruje skondensowana na termozłączu woda i tym większa jest różnica temperatur między termozłączem i otoczeniem. Po przeprowadzeniu kalibracji powyżej opisanego urządzenia możliwy jest pomiar wilgotności względnej materiału w równowadze termodynamicznej z powietrzem otaczającym termoparę chromel-konstantan psychrometru Peltiera.

BUDOWA CZUJNIKA POTENCJAŁU WODY

Budowa czujnika psychrometrycznego do pomiaru potencjału wody w glebie przedstawiona jest na Rys. 1.



Rys. 1. Czujnik psychrometryczny Peltiera [1].

Fig. 1. Peltier psychrometer sensor [1].

Przewody chromelu i konstantanu, których bezwładność termiczna jest zminimalizowana poprzez zastosowanie cienkich drutów o średnicy 0,025 mm, tworzą złącze termopary używane do pomiaru wilgotności względnej. Termozłącze z miedzi i konstantanu używane jest do odczytu temperatury otoczenia w miejscu, gdzie umieszczony jest czujnik. Dwa przewody z miedzi umożliwiają zasilanie złącza odpowiednim prądem chłodzenia oraz dostarczają do mikrowoltomierza sygnał elektryczny.

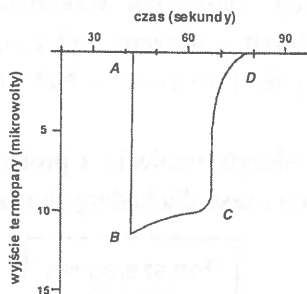
Oba termozłącza oraz zatyczka będąca elementem nośnym przekryte są kapturkiem. Kapturek ten wykonany jest z porowatej ceramiki bądź siatki ze stali nierdzewnej posiadającej otwory na tyle małe, aby nie przedostała się przez nie woda i na tyle duże, że możliwa jest swobodna wymiana pary wodnej.

ZASADA POMIARU

Cykl pomiarowy składa się z kilku etapów kontrolowanych przez mikrokontroler. Etapy te różnią się w zależności od zakresu mierzonych wartości potencjału wody, temperatury, wymaganej dokładności oraz czasu trwania pomiaru. Optymalizacja procesu pomiarowego w odniesieniu do różnych ograniczeń może prowadzić do różnorodnych procedur pomiarowych. Najprostsza sekwencja zdarzeń w psychrometrycznym pomiarze wilgotności względnej jest opisana poniżej.

1. Termozłącze chromel-konstantan w stanie początkowym jest w równowadze termodynamicznej z otaczającym go powietrzem, oraz z próbką materiału, którego wilgotność jest mierzona, a prężność pary wodnej w sąsiedztwie termozłącza jest taka sama jak w rozważanej próbce.
2. Generowany jest prąd chłodzenia przepływający przez termozłącze chromel-konstantan. W wyniku zjawiska Peltiera złącze zostaje oziębione do temperatury niższej niż punkt rosy, w wyniku czego na termozłączu skrapla się para wodna z otaczającego złącze powietrza.
3. Przerwany zostaje przepływ prądu chłodzenia i monitorowane jest napięcie elektryczne generowane przez schnącą termoparę. Rysunek 2 przedstawia napięcie termopary podczas opisywanego zjawiska. Po chwilowym stanie przejściowym (punkt *B*) po ustaniu chłodzenia, termopara osiąga temperaturę termometru wilgotnego (krzywa *B-C*). W tym czasie parowanie wody z termopary powoduje jej chłodzenia. Różnica temperatur powoduje przepływ ciepła z otoczenia do termopary. Parowanie wody, które absorbuje ciepło z termo-

pary oraz ciepło z otoczenia tworzą dynamiczny stan równowagi, trwający pewien czas. Proces parowania trwa dopóki osiągnięty zostanie punkt *D*. W tym momencie cała woda zgromadzona za termozłączu wyparowała i temperatura złącz termopary wyrównuje się.



Rys. 2. Napięcie wyjściowe w funkcji czasu dla termoelektrycznego psychrometru Peltiera.

Fig. 2. Output voltage as a function of time for thermoelectric Peltier psychrometer.

PROTOTYP TERMIELEKTRYCZNEGO PSYCHROMETRU PELTIERA I JEGO KALIBRACJA

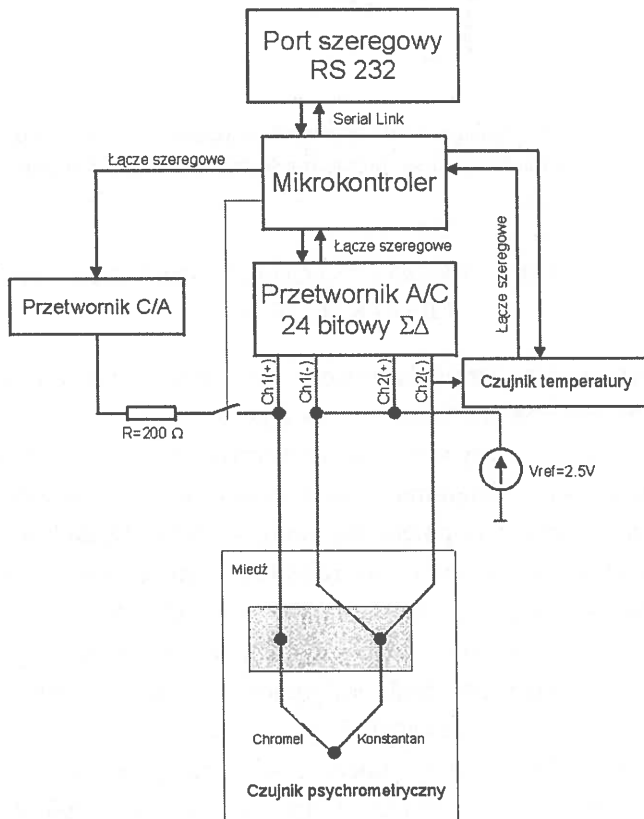
Prototyp termometru termozłączowego do pomiaru wilgotności względnej w zakresie 95–99,9% jest przedstawiony na Rys. 3.

Przyrząd został wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie w ramach udziału w V Ramowym Programie Unii Europejskiej. Zastosowany czujnik [2] jest przeznaczony do pomiaru potencjału wody w glebie. Dodatkowe termozłącze konstantan-miedź czujnika służy do rejestracji temperatury otoczenia, która w sposób istotny wpływa na pomiar. Na podstawie odczytu napięcia na tym złączu korygowana jest formuła przeliczania napięcia z termopary chromel-konstantan na potencjał wody, bądź wilgotność względną według formuły (1). Czujnik połączony jest do dwukanałowego, 24-bitowego analogowo-cyfrowego przetwornika Sigma-Delta, który mierzy skok napięcia na chłodzonym termozłączu oraz temperaturę czujnika. Półprzewodnikowy czujnik temperatury, mierzący temperaturę złącza odniesienia umieszczony jest w miejscu przymocowania przewodu z konstantanu. Przetwornik cyfrowo-analogowy (D/A), opornik ograniczający prąd, *R*, oraz przełącznik zastosowane są w celu sterowania wartością prądu chłodzenia, który wprowadzany jest do złącza chromel-konstantan.

Praca przedstawionego układu pomiarowego sterowana jest mikrokontrolerem. Wartości zmierzonych napięć przesyłane są, za pośrednictwem szeregowego portu RS232C, do komputera stacjonarnego, gdzie przeprowadzana jest obróbka danych pomiarowych.

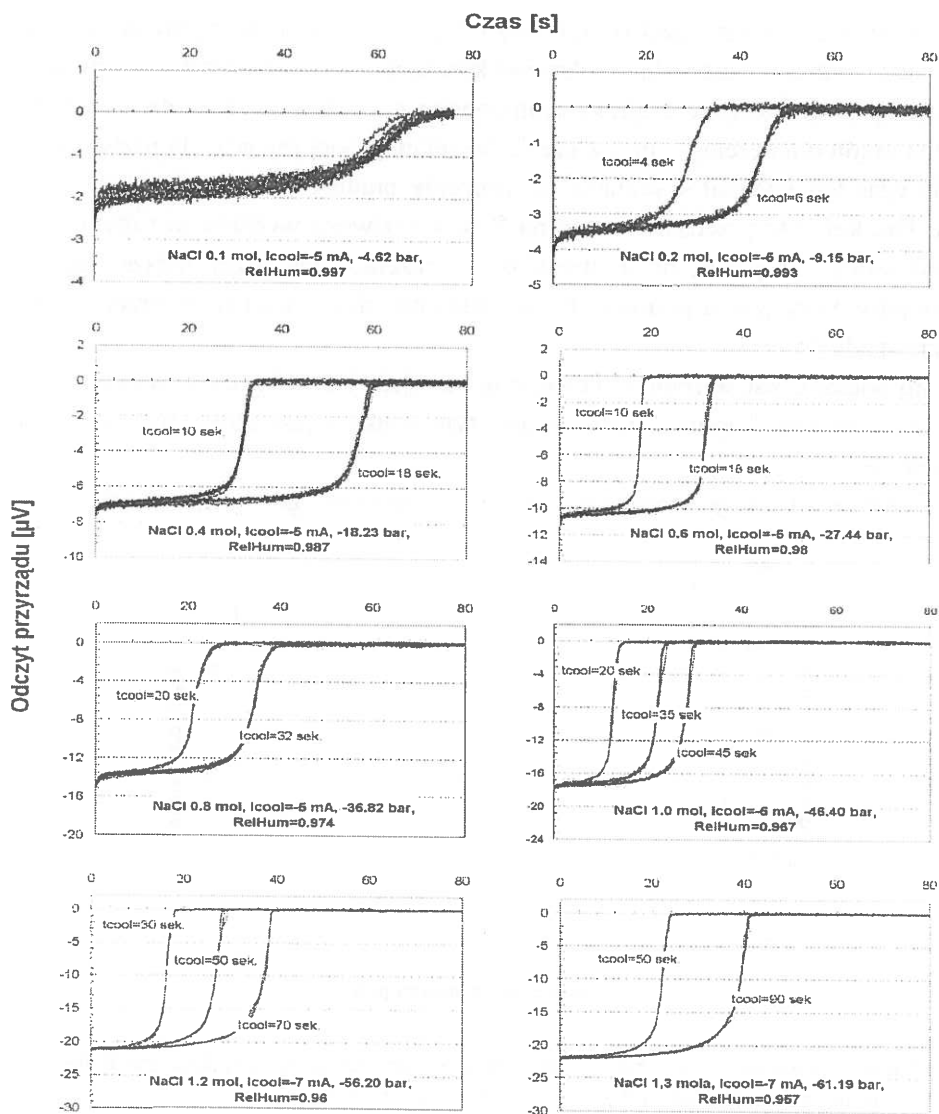
Kalibrację przedstawionego przyrządu wykonano stosując roztwory NaCl o różnych stężeniach, w których zanurzany był czujnik. Wartości potencjałów wody dla badanych kalibracyjnych roztworów NaCl o różnych stężeniach molowych pochodzą z [3].

Rysunek 4 przedstawia odczyty napięcia z prototypowego termozłączowego psychrometru Peltier w funkcji czasu dla badanych roztworów NaCl.



Rys. 3. Schemat prototypu psychrometru termozłączowego.

Fig. 3. Diagram of the prototype thermocouple psychrometer.



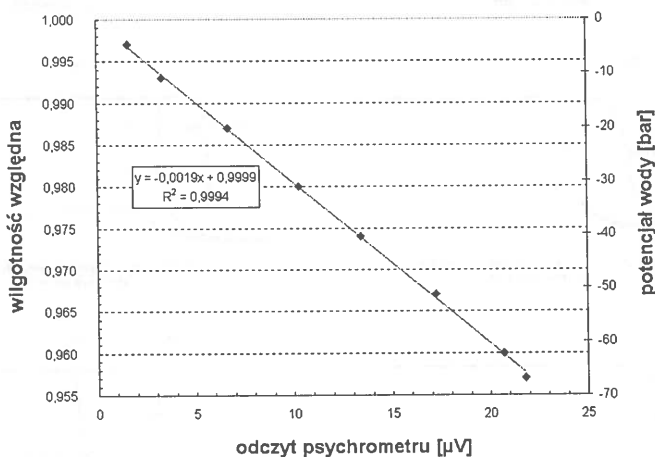
Rys. 4. Napięcie generowane przez omawiany układ psychrometru Peltiera w funkcji czasu dla roztworów NaCl o różnych stężeniach. Ψ jest potencjałem wody badanych roztworów NaCl, t_{cool} jest czasem chłodzenia termopary.

Fig. 4. Voltage generated by presented Peltier psychrometer as a function of time for different NaCl solutions. Ψ stands for water potential of tested NaCl solutions, t_{cool} stands for the thermocouple cooling time.

Wraz ze spadkiem stężenia molowego, czas chłodzenia niezbędny do skroplenia pary wodnej na termozłączu chromel-konstantan jest coraz krótszy. Aby skroplić parę na termozłączu czujnika zanurzonego w 1,3 molowym roztworze NaCl, trzeba prądu o natężeniu 7 mA w czasie 50 sekund, podczas gdy dla roztworu 0,2 mola czas ten wyniósł 4 sekundy, a natężenie prądu zostało zmniejszone do 5 mA. Dla każdego przedstawionego na Rys. 4 roztworu wyraźny jest efekt parowania wody skroplonej na termozłączu, reprezentowany przez niższe napięcie termopary na początku pomiaru. Po wyschnięciu złącza wartość mierzonego napięcia spada do zera.

Im większe jest stężenie molowe, tym mniejsza jest wilgotność względna powietrza wewnątrz kapturka ochronnego i tym większy jest skok napięcia na termozłączu.

Rysunek 5 ilustruje formułę przetwarzania omawianego psychrometru.



Rys. 5. Ilustracja formuły przetwarzania omawianego termoelektrycznego psychrometru Peltiera.

Fig. 5. The conversion formula for the presented Peltier psychrometer.

Ograniczenia stosowanej metody pomiaru potencjału wody są dwójakiego rodzaju. Osiągnięcie wilgotności względnej powietrza mniejszej niż 95% wymaga większych wartości prądów chłodzenia termozłącza. W przypadku cienkich przewodów powoduje to wydzielanie się na nich nadmiernego ciepła. Osiągany jest zatem efekt przeciwny do zamierzonego procesu chłodzenia termopary. Dla wilgotności bliskich 100% napięcie termopary jest bardzo małe, rzędu 1 µV lub

mniej, zbliżając się do rozdzielczości przyrządu pomiarowego, którego czułość i stabilność powinna być wystarczająco dobra (poniżej 50 nV). Istotnym jest uniezależnienie pomiaru od innych czynników takich jak zmiany temperatury otoczenia, wpływ substancji pokrywających czujnik, itp., które zaburzają pomiar. Zmusza to do rozwoju nowych metod interpretacji odczytu wspomaganym wiedzą o fizycznych procesach wpływających na rozważany pomiar. Nie wszystkie możliwości prezentowanego prototypu zostały jednakże wykorzystane. Z Rys. 4 widać, że czas parowania skroplonej na termozłączu pary wodnej zależy od jej ilości, która jest skorelowana z wartością i czasem płynięcia prądu chłodzenia. Efekt ten będzie badany w kontekście pomiarów potencjałów wody powyżej wartości $-0,4$ MPa.

PODSUMOWANIE

Prototypowy przyrząd zbudowany na bazie nowoczesnych, zintegrowanych podzespołów elektronicznych umożliwia rejestrację i pomiar potencjału wody w zakresie, w którym inne czujniki zawodzą (od $-0,4$ do -6 MPa). Możliwość komputerowej analizy krzywych obrazujących generowany skok temperatury powodują, że ta obiecująca metoda pomiaru może stać się standardową w przemyśle budowlanym. Osiągnięty cel upoważnia do podjęcia kroków w celu poszerzenia zakresu pomiaru potencjału wody w glebie do wartości powyżej $-0,4$ MPa.

PIŚMIENNICTWO

1. **Brown R.W., Collins J.M.:** A screen-caged thermocouple psychrometer and calibration chamber for measurements of plant and soil water potential. *Agron. J.*, 72, 851–854, 1980.
2. **Water Potential Systems.** WESCOR Scientific Products Catalog, 1998.
3. **Lang A.R.G.:** Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40°C. *Aust. J. Chem.*, 20, 2017–2023, 1967.

APPLICATION OF PELTIER PSYCHROMETER FOR WATER POTENTIAL MEASUREMENT: PROTOTYPE OF MEASURING DEVICE

W. Skierucha, H. Sobczuk, M.A. Malicki

Institute of Agrophysics PAS, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27. Poland

Summary. The study presents a prototype thermocouple Peltier psychrometer. Also the calibration of the device on NaCl solutions is presented. The prototype device is built on the base of new integrated electronic components and it enables to measure water potential in the range where other sensors are not applicable (from -0.4 to -6 MPa). The computer analysis of received curves presenting the temperature difference makes it possible to use this method as a standard in building industry. The results achieved form a good basis for further work to enlarge the measurement range of soil water potential to the values above -0.4 MPa.

Key words: water potential, Peltier psychrometer, thermocouple.