

## Modułowy system pomiarowy do monitoringu wilgotności spągu w kopalni soli

PAWEŁ JAMRÓZ , KATARZYNA SOCHA 

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

### Streszczenie

W artykule przedstawiono proces integracji i badania prototypowego systemu pomiarowego, dedykowanego do pomiaru wilgotności spągu w środowisku podziemnego rezerwatu przyrody „Groty Kryształowe”, zlokalizowanego w Kopalni Soli „Wieliczka”. Powstanie systemu typu „low cost” uwarunkowane było możliwością zastosowania w nim pojemnościowych czujników wilgotności gleby, wykorzystywanych w rolnictwie. Badania takie przeprowadzono z uwagi na złożoną budowę geologiczną Grot cechującą się silną anizotropowością ośrodka związaną z obecnością różnego typu skał, osadów i halitu. Wykazano w nich efekt zmiany zakresu pomiarowego czujnika pojemnościowego w zależności od stopnia zasolenia ośrodka.

**Słowa kluczowe:** wilgotność gleby, czujnik pojemnościowy, system pomiarowy

### 1. Wstęp

Dotychczasowe systemy pomiarowe projektowane i wykonywane w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN [1,2] wykorzystują wielozadaniowe karty pomiarowe, współpracujące z powszechnie stosowanymi systemami operacyjnymi. Takie zastosowanie powoduje duże ograniczenia w możliwości wykorzystania modułów pomiarowych, z uwagi na konieczność ich integracji z komputerami przenośnymi o ograniczonym czasie działania. Dodatkowo działania tych systemów w znacznym stopniu utrudniają wykonywanie wbudowanych algorytmów pomiarowych (np. algorytm fali cieplnej) lub wymuszają stosowania zaawansowanych i drogich w użytkowaniu układów pomiarowych. Dlatego konieczne stało się opracowanie narzędzi pozwalających na szybką integrację dedykowanych systemów pomiarowych do zastosowań w prowadzonych badaniach eksperymentalnych, zarówno na terenie Instytutu Mechaniki Górotworu PAN [3,4], jak również poza jego siedzibą [5,6].

Jednym z takich zastosowań, które wymaga opracowania spersonalizowanego systemu pomiarowego, jest pomiar wilgotności spągu w rezerwacie przyrody nieożywionej „Groty Kryształowe”. Rezerwat znajduje się we wschodniej części Kopalni Soli „Wieliczka”, na głębokości około 80 m. W skład tego rezerwatu wchodzi: Przedśionek, Dolna Grota Kryształowa, Komora Pośrednia i Górna Grota Kryształowa. Groty pokryte są unikatowymi kryształami halitu. Występują tam też różne formy krasu solnego. Groty zostały odkryte w 1898 roku i stanowią dzisiaj niezwykle cenne pod względem przyrodniczym, a szczególnie geologicznym miejsce [7]. Niemalże od momentu ich odkrycia zauważano potrzebę ochrony tego miejsca. Podejmowano liczne próby, żeby z mocy prawa ograniczyć, na początku, pozyskiwanie okazów, a później degradację kryształów. Szczegóły tych zmagających opisano w pracach [8,9]. Od wielu lat prowadzone natomiast są prace badawcze, monitoring stanu atmosfery i aktywna ochrona przed degradacją.

Od roku 2017 Instytut Mechaniki Górotworu PAN prowadzi badania nad migracją powietrza w Grotach, wykonując eksperymenty związane z analizą rozkładu temperatury i wilgotności wewnątrz rezerwatu [10] (Rys. 1). W trakcie prowadzenia eksperymentów zaobserwowano okresowo pojawiające się zawilgocenia, zarówno w obszarze pokrywy halitowej, jak i spągu. Dotyczyło to w szczególności przedśionka prowadzącego do Groty Dolnej i Górnej. Z uwagi na dość restrykcyjną politykę dostępu do tego obiektu, nie ma możliwości częstej i regularnej weryfikacji stanu zawilgocenia. Z uwagi na to, konieczne stało się opracowanie



Rys. 1. Groty Kryształowe KS „Wieliczka”

systemu, który pozwoli na prowadzenie monitoringu w sposób automatyczny, a wyniki uzyskane za jego pośrednictwem będą możliwe do skorelowania z innymi czynnikami mogącymi stanowić źródło tej wilgoci.

## 2. Modułowe systemy elektroniczne

W ostatnim dziesięcioleciu, na poboczu dużych komercyjnych rozwiązań z zakresu automatyki i pomiarów, energicznie rozwijają się otwarte projekty związane z tworzeniem modułowych układów elektronicznych zarządzanych przez jednostki wyposażone w mikrokontrolery, cyfrowe i analogowe linie wejścia/wyjścia oraz interfejsy wykorzystywane do połączeń z komputerem lub innymi modułami, takimi jak: moduły komunikacyjne (bluetooth, Wi-fi...), czujniki wielkości fizycznych, obiekty sterowania itp. Pośród takich otwartych projektów wyróżnić można w szczególności 3 platformy komputerowe:

- ARDUINO

Otwarty system prototypowania układów elektronicznych, dedykowanych do różnych zastosowań, zapoczątkowany w 2005 roku. Arduino może być wykorzystany do tworzenia samodzielnych interaktywnych zadań, takich jak: układy sterowania, układy pomiarowe, kontrolery itp. Układy oparte na Arduino mogą pracować samodzielnie lub współpracować z komputerem – hostem. Typowa płyta Arduino zawiera kontroler, cyfrowe i analogowe linie wejścia/wyjścia oraz interfejs UART lub USB dla połączeń z komputerem. Komputer jest wykorzystywany do programowania kontrolera oraz do interakcji w czasie działania z Arduino.

- RASPBERRY PI

Raspberry Pi to platforma komputerowa składająca się z pojedynczego obwodu drukowanego, która została wymyślona, by wspierać naukę podstaw informatyki. Jego premiera miała miejsce 29 lutego 2012. Z czasem platforma ta rozwinęła się w kierunku profesjonalnego zastosowania, nie tylko w projektach edukacyjnych, ale również znalazła zastosowanie w profesjonalnie tworzonych projektach z zakresu elektroniki cyfrowej i robotyki. Zawdzięcza to kolejnym, coraz wydajniejszym generacjom minikomputerów, spełniających wysokie wymagania techniczne i zapewniające nieprzeciętną, jak na skalę urządzenia moc obliczeniową.

- MICRO BIT

Ostatnią z najpopularniejszych i najmłodszych platform programowalnych systemów komputerowych jest Micro Bit. Stworzona przez BBC w 2015 roku, podobnie jak Raspberry Pi, początkowo wykorzystywana była w celach edukacyjnych. Z czasem uzupełniona o kompatybilne moduły, również znalazła zastosowanie w różnych projektach z dziedziny automatyki i robotyki.

Wszystkie przedstawione platformy są platformami typu open-source, dzięki czemu pozwalają na wykonywanie własnych projektów z użyciem niezliczonych modułów dedykowanych do różnych zastosowań. Wszystkie umożliwiają programowanie z wykorzystaniem popularnych środowisk programistycznych lub oferują własne zintegrowane środowisko programistyczne (IDE).

### 3. Pomiary wilgotności gleby

Problematyka detekcji wilgotności spągu wiąże się ściśle z metodami pomiaru wilgotności gleby, opracowywanymi w celu zapewnienia roślinom optymalnych warunków rozwoju. Badania nad tymi metodami pozwalają przypuszczać, że mogłyby one również zostać wykorzystane w zagadnieniu detekcji zawilgoceń dolnej powierzchni warstwy skalnej, znajdującej się w grotach. Do metod tych należą:

- *Metoda grawimetryczna*, polegająca na pobieraniu i ważeniu próbek gleby nasączonych wodą oraz po odparowaniu. W ten sposób zawartość wody w glebie zostaje wyznaczona w sposób bezpośredni.
- *Metoda tensjometryczna*, polegająca na pomiarze potencjału wody w glebie, a dokładnie siły ssącej gleby. Wykorzystuje się do tego rurkę wypełnioną wodą zakończoną ceramicznym elementem, przez który przesącza się woda. Całość połączona jest z manometrem. W przypadku, gdy jest sucho gleba wyciąga wodę z tensjometru wytwarzając podciśnienie, które jest mierzone przez wakuometr. To podciśnienie odpowiada sile ssącej gleby.
- *Metoda pomiaru rezystancji* znana również pod nazwą, *metoda bloków gipsowych*, wykorzystująca dwie elektrody zanurzone w bloku materiału porowatego (najczęściej gipsu). Sondę taką umieszcza się w glebie, a wartość jej rezystancji zależna jest od zawartości wody w porowatym bloku, której zawartość zmienia się wraz z zawartością wody w glebie.
- *Metoda pomiaru przenikalności elektrycznej (pojemnościowa)*, wykorzystująca zmianę wartości stałej dielektrycznej ośrodka, w którym umieszczona jest sonda, zależnej od zawartości wody. Metoda charakteryzuje się dużą dokładnością. Jest to metoda, która sprawdza się w systemach pomiarowych, a współczesny rozwój techniki pozwala na jej powszechne stosowanie. Metoda ta wymaga jednak kalibracji w zależności od rodzaju podłoża.
- *Metoda neutronowa* wykorzystuje zjawisko spowalniania neutronów przez jądra pierwiastków lekkich, głównie wodoru zawartego w wodzie. W zależności od wilgotności gleby proces spowalniania neutronów jest różny i różna jest liczba zliczanych neutronów. Metoda ta wymaga zastosowania sond pomiarowych, będących jednocześnie źródłem promieniowania, co wiąże się z wykorzystaniem pierwiastków radioaktywnych np. cezu, Cs-137.
- *Metoda neutronów kosmicznych* opiera się na odkryciu zależności intensywności niskoenergetycznych neutronów promieniowania kosmicznego od zawartości wodoru w środowisku. Wykorzystanie tego zjawiska pozwoliło na prowadzenie pomiarów już nie punktowo, jak to ma miejsce we wszystkich poprzednich metodach, lecz dzięki wszechobecności neutronów kosmogenicznych możliwe jest wykonanie sieci monitoringu wilgotności mapujących znaczne obszary [11].

Większość stosowanych metod pomiaru zawartości wody w glebie wymaga wcześniejszej kalibracji w zależności od rodzaju gleby, dla której dana metoda ma być zastosowana.

### 4. Integracja modułowego systemu pomiarowego do badania wilgotności gleby

#### 4.1. Założenia dla systemu pomiarowego

W trakcie prowadzenia prac, mających na celu analizę wilgotności i temperatury powietrza w Grotach Kryształowych, zauważono okresowo pojawiające się zawilgocenie spągu PrzedSIONKA. Zawilgocenie to stanowi jeden z elementów mikroklimatu, który wpływa na stan zachowania kryształów. Analiza parametrów powietrza wentylacyjnego, w tych okresach, nie wskazywała na możliwe źródło zawilgocenia w postaci skroplin pary wodnej zawartej w powietrzu. Jednym z możliwych wytłumaczeń takiego stanu rzeczy jest kapilarne podciąganie wody w określonym rejonie rezerwatu przyrodniczego. Aby możliwe było wykrycie tych momentów, konieczne było zaprojektowanie systemu pomiarowego, pozwalającego na detekcję stopnia zawilgocenia spągu. Głównym założeniem w trakcie jego projektowania była konieczność mapowania określonej powierzchni podłoża Grot Kryształowych w zakresie wilgotności, co wiąże się z jego stałym monitoringiem wielopunktowym.

## 4.2. Komponenty systemu

W ramach zadania przewidzianego na rok 2020 opracowany został prototyp systemu pomiarowego, bazującego na platformie sprzętowo programistycznej Arduino. Platforma ta została wybrana z uwagi na bardzo dużą popularność. Dzięki temu istnieje mnóstwo modułów i rozwiązań, pozwalających na swobodne dostosowywanie wybranych komponentów do bieżących potrzeb pomiarowych, stosowanych czujników i układów pomiarowych.

Zaprojektowany, pojedynczy moduł pomiarowy składa się z kontrolera w postaci miniaturowego układu Arduino Uno Rev 3 (Rys. 2a), zawierającego mikrokontroler AVR ATmega328. Posiada on 32 kB pamięci Flash, 2 kB RAM, 14 cyfrowych wejść/wyjść, z czego 6 można wykorzystać jako kanały PWM, 6 wejść analogowych oraz popularne interfejsy komunikacyjne.

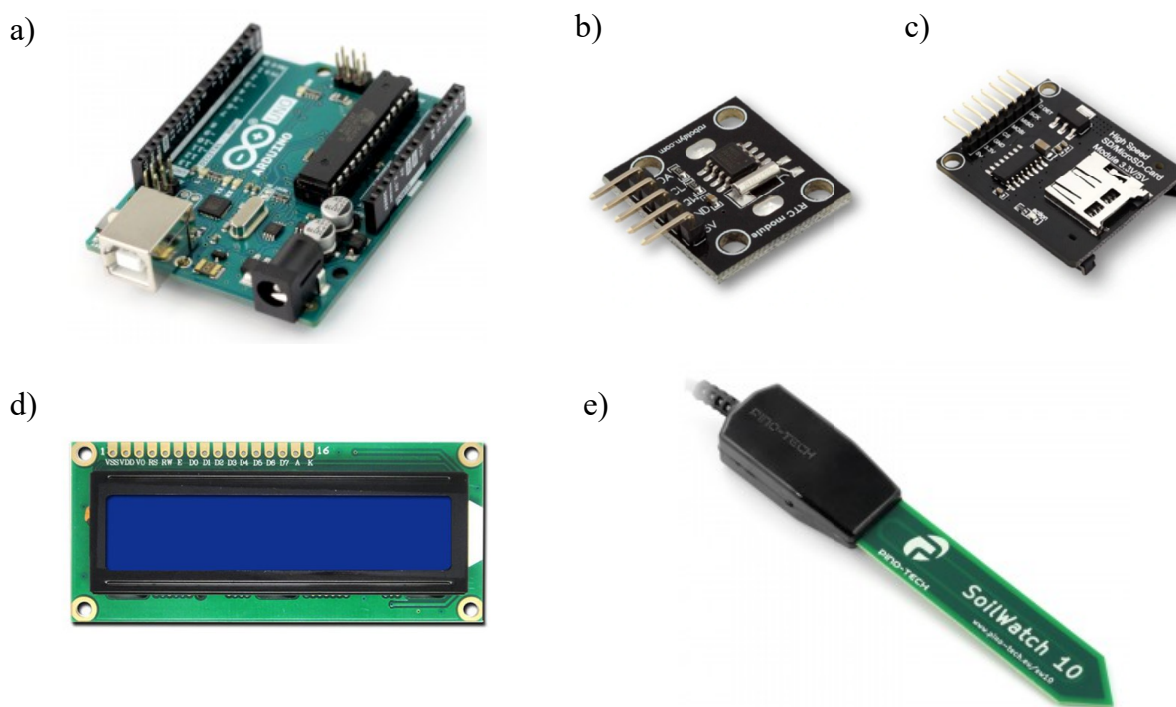
Układ ten wyposażony został w zegar czasu rzeczywistego RTC, DS1307 (Rys. 2b). Jest to moduł z zegarem czasu rzeczywistego. Pozwala na odczyt czasu w postaci godziny, minuty i sekundy oraz daty: miesiąc dzień, rok. Jego komunikacja z kontrolerem odbywa się po magistrali I<sup>2</sup>C. Dostępne jest również wyprowadzenie z sygnałem SQW - jest to wyjście sygnału prostokątnego z wybraną częstotliwością.

Zapis danych pomiarowych odbywa się bezpośrednio na kartę SD, dzięki dołączonemu modułowi czytnika kart SD (Rys. 2c). Układ ten wyposażony jest w dwa rodzaje gniazd, dzięki czemu umożliwia współpracę z najpopularniejszymi formatami kart: SD oraz microSD.

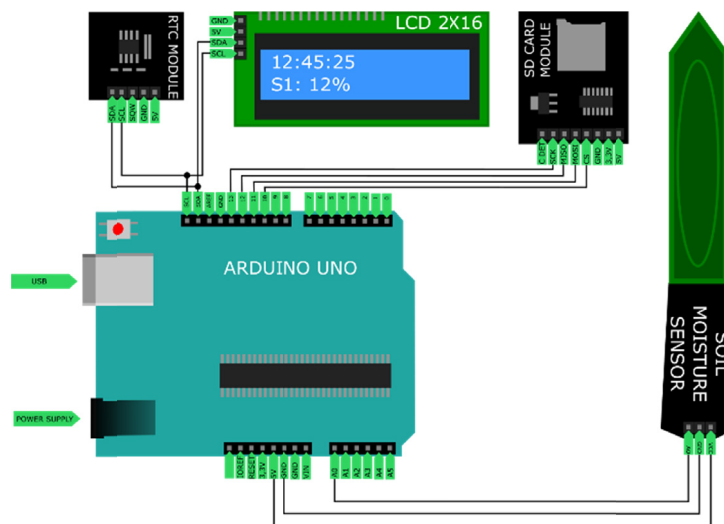
Komunikację z użytkownikiem umożliwia alfanumeryczny wyświetlacz LCD 2x16 znaków (Rys. 2d). Jego komunikacja z mikrokontrolerem zapewniona jest, podobnie jak w przypadku zegara czasu rzeczywistego, za pośrednictwem magistrali I<sup>2</sup>C.

Jako czujnik pomiarowy zastosowano pojemnościowy czujnik wilgotności gleby SoilWatch 10 (Rys. 2e). Jest on zasilany napięciem od 3,1 V do 5 V, a sygnał pomiarowy mieści się w zakresie 0 do 3V. Dodatkową zaletą czujnika jest brak odsłoniętych elektrod i zabezpieczenie elektroniki przed wpływem wilgoci, co powinno pozwolić na jego bezawaryjną pracę na obszarach o dużym zasoleniu. Działanie podobnych czujników zostało szczegółowo omówione w publikacji [12]. Układ Arduino dysponuje 10-cio bitowym przetwornikiem A/D, co przy zakresie pomiarowym 0÷5V daje rozdzielczość pomiaru na poziomie 0,005 V. Z uwagi na napięciowy sygnał pomiarowy i ograniczoną liczbą wejść analogowych w Arduino, każdy osobny moduł pomiarowy będzie umożliwiał współczesną akwizycję danych pomiarowych maksymalnie z 6-ciu czujników wilgotności.

Omówione komponenty systemu połączono zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.



Rys. 2. Elementy zaprojektowanego systemu pomiarowego: a) Arduino Uno Rev 3, b) zegar czasu rzeczywistego, c) czytnik kart SD, d) wyświetlacz LCD 2×16 linii, e) czujnik wilgotności gleby

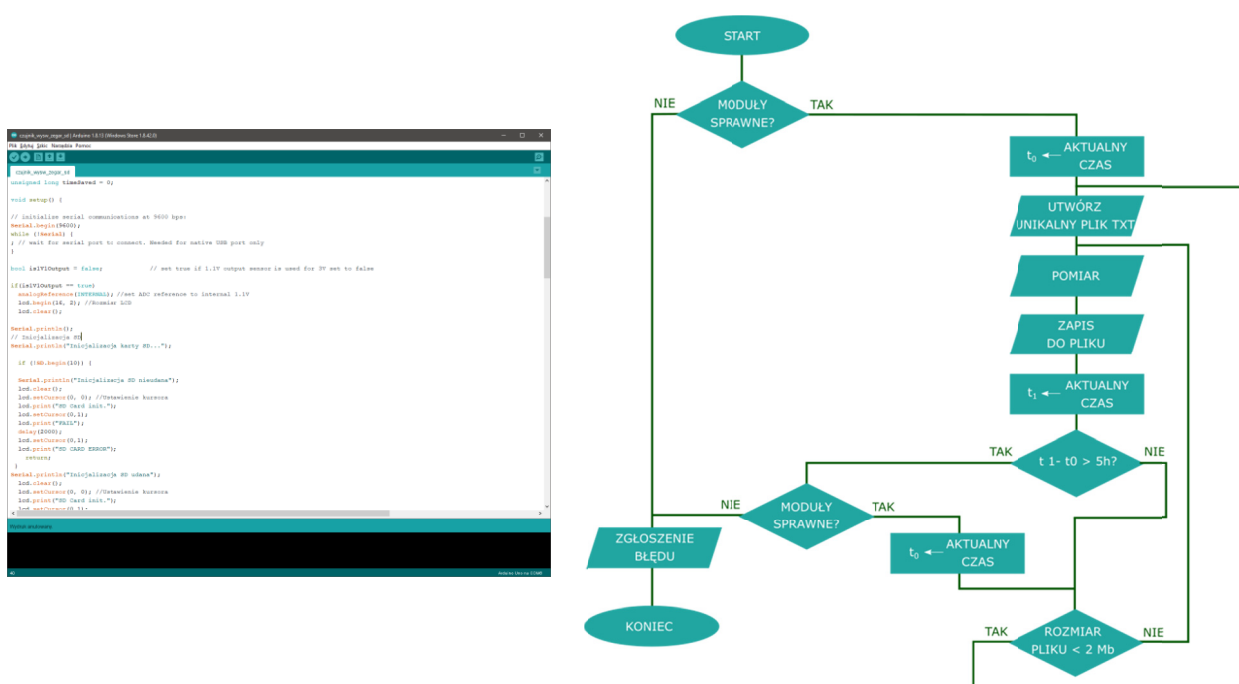


Rys. 3. Schemat systemu pomiarowego

Działanie systemu pomiarowego opiera się na zasadzie pomiaru napięcia wyjściowego pojemnościowego czujnika wilgotności gleby. Zasada działania takiego czujnika polega na detekcji zmian pola elektrycznego pomiędzy dwoma elektrodami umieszczonymi w czujniku. Działa on wtedy jak kondensator, pomiędzy którego okładzinami (elektrodami) znajduje się materiał (ośrodek) o właściwej sobie wartości względnej przenikalności elektrycznej (stałej dielektrycznej)  $\epsilon_r$ . Zmiany jej wartości wraz ze zmianami zawartości wody powodują reakcję czujnika i zmianę jego sygnału wyjściowego zależną od pojemności tak utworzonego kondensatora. Przy stosowaniu tego typu czujników należy wziąć pod uwagę, że względna przenikalność dielektryków zależna może być od ich temperatury, przyłożonego ciśnienia, natężenia oraz częstotliwości przyłożonego pola elektrycznego.

### 4.3. Oprogramowanie

W celu integracji systemu pomiarowego wykonane zostało oprogramowanie w środowisku Arduino IDE, zarządzające autonomicznym działaniem systemu. Na rysunku 4 przedstawiono fragment kodu oraz schemat blokowy programu realizowanego przez mikrokontroler w trakcie wykonywania pomiarów.



Rys. 4. Oprogramowanie

W fazie początkowej, po uruchomieniu układu, testowana jest poprawność działania poszczególnych modułów. Gdy układ potwierdzi ich operatywność, rozpoczęty zostaje proces pomiaru, na który składają się operacje związane z: działaniem na plikach (tworzenie plików o unikatowych nazwach, powiązanych z okresem wykonywania pomiarów, kontrolą ich wielkości oraz z samym zapisem danych pomiarowych), wykonywaniem pomiarów oraz okresową kontrolą poprawności działania systemu.

## 5. Testowanie systemu pomiarowego

Czujniki pojemnościowe dedykowane do pomiaru wilgotności gleby, do których należy analizowany SoilWatch 10, wykorzystywane są w glebach różnego typu. Proste wyznaczenie charakterystyki statycznej dla takich czujników polega na pomiarze odpowiedzi napięciowej czujnika umieszczonego w suchym powietrzu, a następnie zarejestrowanie tej samej odpowiedzi dla czujnika zanurzonego w wodzie. Na tej podstawie możliwe jest wykreślenie liniowej regresji przybliżającej jego charakterystykę statyczną. Dostępna literatura, opisująca działanie takich czujników, wskazuje na zależność ich charakterystyki przetwarzania od składu chemicznego ośrodka, w którym zostają umieszczone. Z uwagi na nietypowe zastosowanie i warunki, w których planowane jest wykorzystanie takich czujników (zwięzłość skały płonnej, duże zasolenie i anizotropia ośrodka), konieczne było wykonanie serii badań, pozwalających na określenie wrażliwości charakterystyki statycznej na zewnętrzne warunki pomiarowe.

Jako zbiór argumentów dla wyznaczanych charakterystyk przyjęto wilgotność wagową  $W$ , definiowaną jako stosunek masy wody zawartej w glebie  $M_w$  do masy fazy stałej gleby  $M_s$  wyrażonej w procentach (1):

$$W = \frac{M_w}{M_s} * 100\% \quad (1)$$

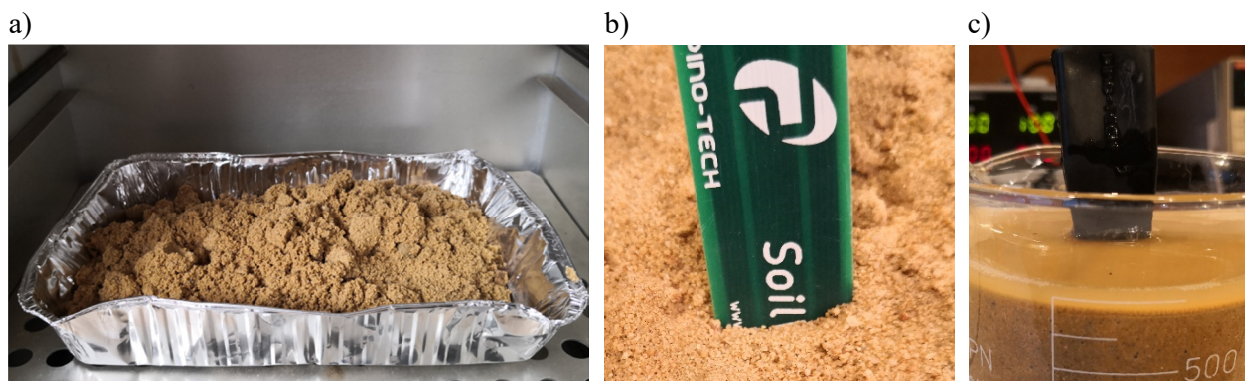
Mieszaninę o odpowiedniej wilgotności uzyskiwano poprzez mechaniczne zmieszanie piasku z odpowiednią ilością cieczy o określonej wadze, zapewniającej uzyskanie wilgotności wagowej na zakładanym poziomie (metoda grawimetryczna). Wszystkie wykonane eksperymenty rozpoczynały się od wysuszenia materiału przeznaczonego do testów. Suszenie wykonywano w piecu w temperaturze ok. 110°C (Rys. 5a). Następnie z tak przygotowanego ośrodka przygotowywano próbki, zawierające różną ilość wody. W celu zminimalizowania wpływu porowatości materiału na uzyskiwane wyniki, dokonywano mechanicznego zagęszczania każdej przygotowanej próbki.

### 5.1. Badania systemu pomiarowego

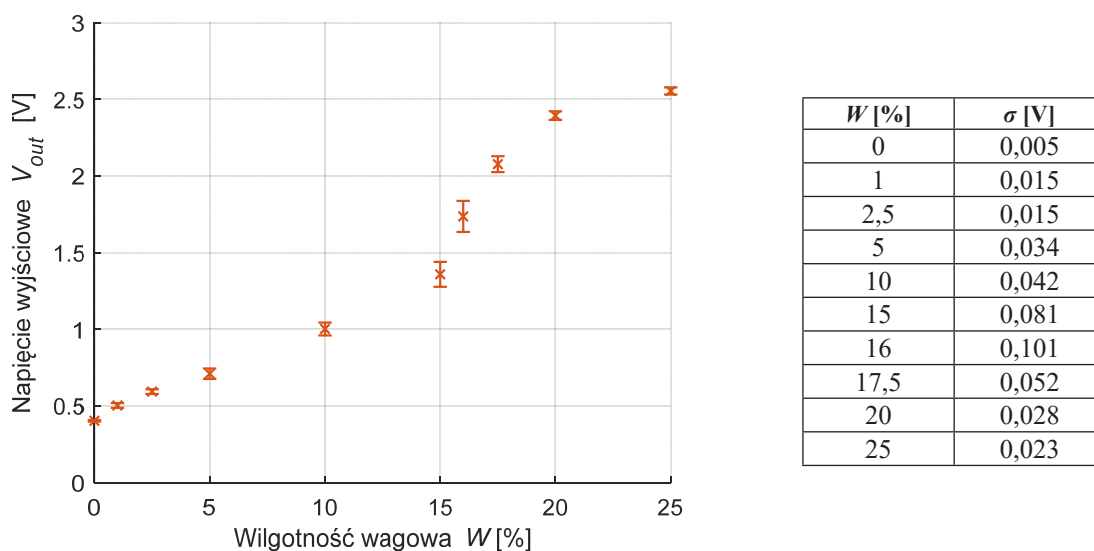
Dostępna literatura, opisująca własności pojemnościowych czujników wilgotności, pokazuje silny wpływ porowatości ośrodka, w którym wykonywane są pomiary. Zwraca też uwagę na możliwe odchyłki związane ze zmianami temperatury. Docelowym zastosowaniem dla testowanego czujnika będzie jednak środowisko o bardzo zwartej strukturze spągu oraz stałych warunkach termicznych panujących w Grotach przez cały rok. Mając na uwadze dotychczasowe wyniki badań, eksperymenty wykonane w ramach projektu skupiły się na reakcji systemu pomiarowego na różny skład chemiczny ośrodka, w którym planowane jest prowadzenie docelowych eksperymentów.

Badania systemu pomiarowego przeprowadzono w jednorodnym, izotropowym ośrodku. Do tego celu wybrano piasek suszony – kwarcowy o uziarnieniu od 0,063 mm do 1,8 mm (Rys. 5a). W suszonym piasku utrzymana jest jednorodność parametrów fizyko-chemicznych przy stabilnej zawartości kwarcu w przedziale 96-98%. Eksperymenty rozpoczęto od zwilżania piasku wodą destylowaną. W ten sposób otrzymywano mieszaninę w zakresie wilgotności od 0 do 25%. Badania wykonane zostały dla następujących punktów wilgotności wagowej: 0; 1; 2,5; 5; 10; 15; 16; 17,5; 20; 25%. W każdym z analizowanych punktów wykonano 11 pomiarów, polegających na umieszczeniu czujnika w różnych obszarach analizowanej próbki (Rys. 5b). Następnie dla każdej z serii pomiarowej wyznaczono wartość średnią rejestrowanego napięcia sygnału wyjściowego z czujnika oraz odchylenie standardowe serii pomiarowej. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.

Uzyskana charakterystyka dla mieszaniny piasku z wodą destylowaną wykazała cechy silnej nieliniowości w dwóch różnych przedziałach: od 0 do 15% wilgotności wagowej oraz od 15 do 25%. Podział ten może być spowodowany utratą zdolności chłonięcia wilgoci przez piasek powyżej pewnej granicy



Rys. 5. Badania systemu pomiarowego



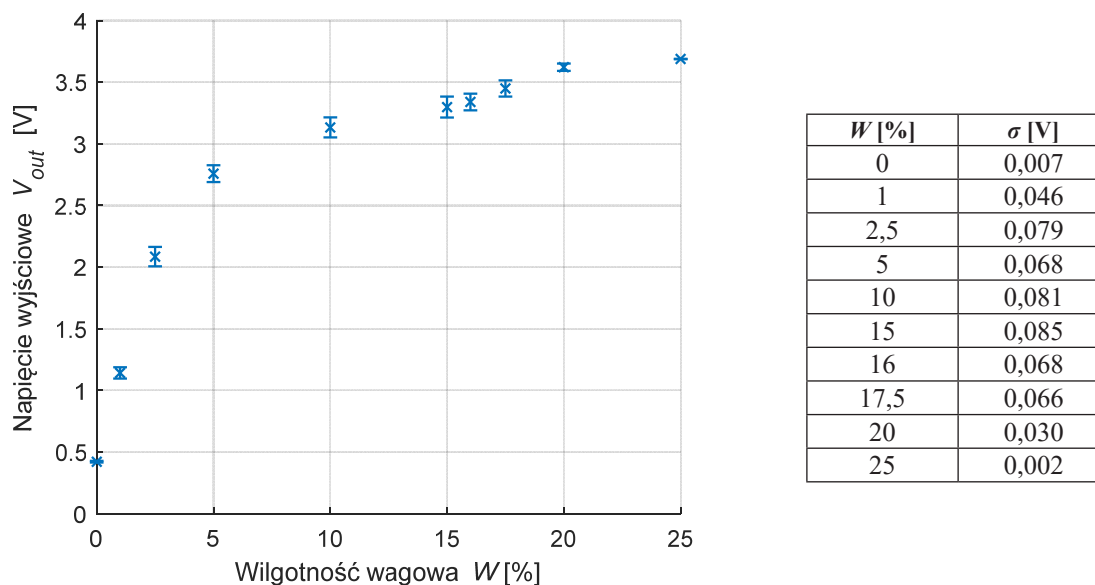
Rys. 6. Wyniki badań systemu pomiarowego (woda destylowana)

wilgotności. Zauważono, że powyżej 15% wilgotności wagowej następowało rozdzielenie frakcji piasku i wody, która gromadziła się na powierzchni badanej próbki (Rys. 5c). Od granicy 15% nastąpiło również skokowe zwiększenie niepewności uzyskiwanych wyników, reprezentowane przez odchylenie standardowe uzyskanych wyników kolejnych serii pomiarowych. Przedstawiona charakterystyka zmierza asymptotycznie do wartości 2,6 V.

W docelowym zastosowaniu czujnika należy wziąć pod uwagę rodzaj cieczy nasączającej ośrodek. W przypadku Kopalni Soli „Wieliczka” mamy do czynienia z solankami o znacznym stężeniu soli, często powyżej nasycenia, w wyniku czego na terenie Grot dochodzi do zjawiska wtórnej krystalizacji. Aby możliwe było prowadzenie badań wilgotności spągu, konieczne było przeprowadzenie eksperymentu z wykorzystaniem roztworu NaCl. W tym celu przygotowano roztwór o stężeniu 20% i powtórzono eksperyment. Jego wyniki przedstawiono na rysunku 7.

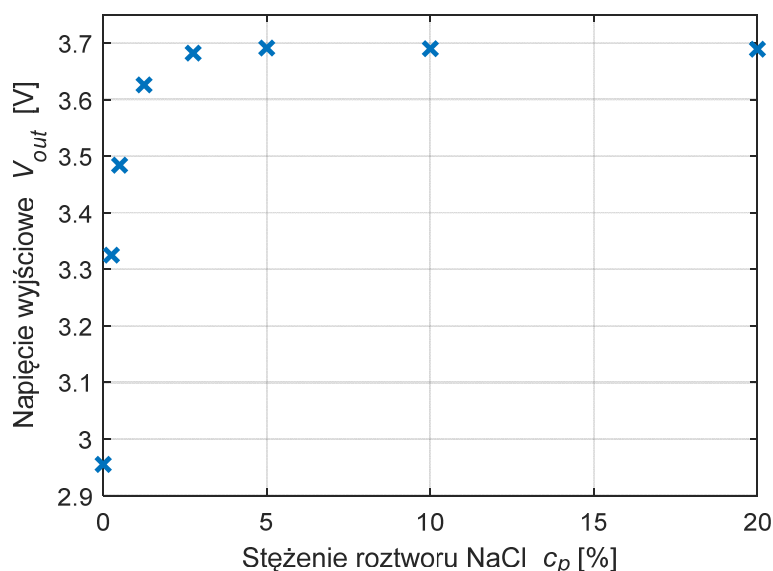
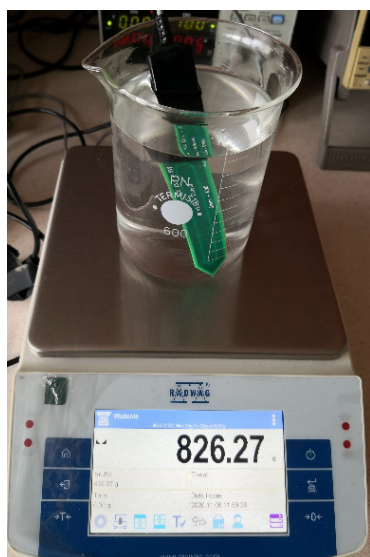
Kształt uzyskanej charakterystyki jest podobny, jak w przypadku eksperymentu z nasączaniem piasku wodą destylowaną. Również w tym przypadku zaobserwowano podział na 2 zakresy 0÷15% oraz 15÷25%. W przypadku nasączania piasku 20% roztworem chlorku sodu w zakresie 0 do 15% wilgotności wagowej, pochodna charakterystyki jest znacznie większa. Przy wilgotności wagowej 10% przekroczony zostaje nominalny zakres pomiarowy czujnika wilgotności (3 V). Maksymalna wartość uzyskana w tym eksperymencie to 3,685 V. Wykazano w ten sposób, że domieszka chlorku sodu do cieczy nasączającej górotwór może spowodować zmianę zakresu pomiarowego czujnika, co może w konsekwencji doprowadzić do niemożliwości jego zastosowania w środowisku o nieznanym stężeniu roztworu NaCl.

Aby odpowiedzieć na pytanie: jak chlorek sodu wpływa na zmianę zakresu pomiarowego pojemnościowego czujnika, przeprowadzono eksperyment, w którym badano maksymalną wartość sygnału napięciowego generowanego przez czujnik w zależności od stężenia roztworu chlorku sodu.



Rys. 7. Wyniki badań systemu pomiarowego (roztwór 20% NaCl)

W tym celu przygotowano 8 próbek zawierających roztwory o stężeniach od 0 do 20%. Stężenie 20% dla eksperymentalnych warunków pomiarowych (20°C, 998,25 hPa) było bliskie stężeniu roztworu nasyconego. Wyniki przedstawione na rysunku 8 pokazują, że dla niskich stężeń roztworu (od 0,25 do 2,75%) następuje skokowa zmiana zakresu sygnału napięcia wyjściowego czujnika wilgotności. Powyżej wartości 5% zakres ten osiąga swoją maksymalną wartość 3,690 V i pozostaje niezmienny. Daje to możliwość zastosowania takiego czujnika w środowisku, w którym występuje duże zasolenie bez obawy o zmiany charakterystyki statycznej czujnika w zależności od zmian stężeń roztworu nasączającego spąg (do określonej granicy).



Rys. 8. Wyniki badań zakresu systemu pomiarowego w roztworze NaCl

## 6. Wnioski

W trakcie przeprowadzonych badań uzyskano wiedzę na temat możliwości zastosowania czujników pojemnościowych w procesie analizy wilgotności spągu w środowisku o dużej zawartości NaCl. Zaobserwowano zjawisko zmiany zakresu czujnika w przypadku pomiarów w glebach zasolonych i stwierdzono konieczność kompensacji w przypadku niskich stężeń soli.



Przeprowadzone badania wykazały również, że oprócz zmiany zakresu napięcia wyjściowego czujnika, zmianie może ulegać również kształt charakterystyki czujnika w zależności od zawartości cieczy nasączającej, wpływającej na anizotropowość środowiska pomiarowego.

Opracowany system pomiarowy w wersji finalnej wykorzystany zostanie do przeprowadzenia badań w Grotach Kryształowych. Uzyskane wyniki zostaną skorelowane z danymi wentylacyjnymi, na podstawie których wykonana zostanie próba określenia obszarów i źródeł wilgoci w Grotach.

Praca została wykonana w roku 2020 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

### Literatura

- [1] Krawczyk J., Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., 2011: *Advanced hot-wire anemometric measurement systems in investigation of the air flow velocity fields in mine headings*. Archives of Mining Sciences **56** (4), 683-699.
- [2] Ligęza P., 2007: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Rev. Sci. Instrum. **78**, 75104.
- [3] Rachalski A., Bujalski M., Ligęza P., Poleszczyk E., 2015: *Absolute Flow Velocity Measurements by Means of the Thermal Waves*. Measurement 2015, Proceedings of the 10th International Conference, Smolenice, Slovakia.
- [4] Ligęza P., Jamróz P., Ostrogórski P., 2020: *Methods for dynamic behavior improvement of tachometric and thermal anemometers by active control*. Measurement 166, 108147 July 2020.
- [5] Skotniczny P., 2014: *Transient states in the flow of the air-methane mixture at the longwall outlet, induced by a sudden methane outflow*. Archives Of Mining Sciences **59** (4), 887-896.
- [6] Skotniczny P., Ostrogorski P., 2018: *Three-dimensional air velocity distributions in the vicinity of a mine heading's sidewall*. Archives Of Mining Sciences **63** (2), 335-352.
- [7] Charkot J., Jaworski W., Wiewiórka J., 1999: *Odkrycie Groty Kryształowej w Wieliczce*. Studia i Mater. do Dziejów Żup Solnych w Polsce, 19, 23-45.
- [8] Alexandrowicz Z. (red.), 2000: *Grot Kryształowe w Kopalni Soli Wieliczka*. Studia Naturae 46, PAN, Instytut Ochrony Przyrody, Kraków, ss. 205.
- [9] Brzeźniak E., 1994: *Warunki termiczno-wilgotnościowe Grot Kryształowych*. Chrońmy Przyrodę Ojczystą 50.
- [10] Dziurzyński W., Skotniczny P., Jamróz P., Ostrogórski P., 2018. *Environmental monitoring of the underground Crystal Caves Nature Reserve in the Wieliczka Salt Mine*. In 18. Altbergbau – Kolloquium, ISBN: 978-3-938390-22-1.
- [11] Zreda M., Shuttleworth W. J., Zeng X., Zweck C., Desilets D., Franz T., Rosolem R., 2012: *COSMOS: the Cosmic-ray Soil Moisture Observing System*. Hydrol. Earth Syst. Sci., **16**, 4079-4099.
- [12] Placidi P., Gasperini L., Grassi A., Cecconi M., Scorzoni A., 2020: *Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks*. Sensors **20**, 3585; doi:10.3390/s20123585

## Modular measuring system for floor moisture testing in a salt mine

### Abstract

The article presents integration and testing process of a prototype system dedicated to measuring floor moisture in the Crystal Caves – underground nature reserve, located in the „Wieliczka” Salt Mine. This „low cost” system was conditioned by the possibility of using capacitive soil moisture sensors routinely used in agriculture and environmental tests. Research was carried out due to the geological structure of destined measurement area, which is characterized by a strong anisotropy of the soil related to the presence of various types of rocks, sediments and halite crystals. Experiments showed the effect of changing the measuring range of the capacitive sensor depending on the salt content in the floor.

**Keywords:** soil moisture, capacitive sensor, measuring system