

Cyfrowe obrazowanie zjawiska kondensacji powierzchniowej pary wodnej

TYMOTEUSZ PIGA , PAWEŁ JAMRÓZ 

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe umożliwiające rejestrację kondensacji pary wodnej na powierzchni materiału badanego. Stanowisko wykorzystuje dynamiczną komorę klimatyczną, cyfrowy aparat fotograficzny o wysokiej rozdzielczości oraz termohigrometr punktu rosy. Na przykładzie kryształu halitu przetestowano możliwość rejestrowania optycznych zmian na powierzchni materiału wynikających z pojawiania się na nim wody. Eksperymenty przeprowadzono w zależności od czasu i wilgotności, dzięki czemu zarejestrowano zmiany obrazu powierzchni kryształu powodowane przez warunki środowiskowe oraz wynikające z osiągnięcia przez powierzchnię kryształu stanu równowagi fizykochemicznej (przy stałych parametrach środowiskowych). Wstępnie zaproponowano dwie metody statystycznej analizy obrazu, które mogą odwzorować zmiany zachodzące na powierzchni badanego materiału. Dodatkowo przeprowadzono wstępną analizę czynników mogących wpływać na niepewność pomiarową metody. Stanowisko służy do określania i definiowania stanów w jakich znajdują się powierzchnie materiałów oddziaływujących aktywnie z parą wodą w zależności od zadanych warunków termicznych i wilgotnościowych. W zależności od częstotliwości wykonywania zdjęć możliwe jest rejestrowanie dynamicznych zmian zachodzących na tych powierzchniach (podczas zmiany parametrów klimatycznych) lub zmiany quasi-statyczne związane z osiągnięciem równowagi powierzchni (dla stałych warunków klimatycznych).

Słowa kluczowe: komora klimatyczna, kondensacja powierzchniowa, wilgotność, punkt rosy, higroskopijność, obrazowanie cyfrowe

Wstęp

Podstawą funkcjonowania wszystkich organizmów żywych jest woda, bez której nie powstałoby życie. Coraz silnie zauważalne skutki zmian klimatu takie jak zmniejszone ilości opadów, podwyższona temperatura i susza motywują naukę i technologię do opracowywania nowych i lepszych sposobów pozyskiwania wody w warunkach jej niedoboru w glebie. Od tysięcy lat radzą sobie z takimi warunkami rośliny żyjące w miejscach skrajnie nieprzyjaznych (słonnych lub suchych) takich jak stepy i pustynie. Rośliny te często wykorzystują naturalne, dobowe zmiany temperatury i wilgotności względnej do wychwytywania wody zawartej w powietrzu. Najprostszym przykładem takiego zjawiska jest powstawanie rosy na trawie. Lokalne obniżenie temperatury powietrza poniżej poziomu tzw. punktu rosy powoduje wykroplenie wody na liściach traw. Jest to spowodowane osiągnięciem stanu nasycenia powietrza, a później przesylenia parą wodną. Aby poradzić sobie w warunkach niedoboru wody, niektóre rośliny wykształciły w sobie mechanizmy ułatwiające zbieranie jej z powietrza na przykład poprzez korzenie powietrzne które zbudowane są z hydrofilowej celulozy oraz odpowiedniej warstwy hydrofobowej ligniny, np. storczyki. Budują one porowaty korzeń, który może efektywnie wychwytywać wodę z powietrza i transportować ją do łodygi kwiatka [1]. Liście niektórych roślin charakteryzują się silną hydrofobowością, gdy woda kondensuje na takich liściach tworzy jednorodną kulę lub krople, a jej całość może swobodnie stoczyć się w dół do ziemi, w której posadowiona jest roślina – taki mechanizm pozwala na efektywne doprowadzanie wody do korzeni i jednocześnie utrzymuje liście rośliny w czystości. Efekt hydrofobowości w tym przypadku uzyskiwany jest poprzez film woskowy oraz mikro włoski i chropowatości na powierzchni liści [2]. Najlepiej przystosowanymi do życia w suchym klimacie są rośliny kserofilne, które wytworzyły wiele sposobów na radzenie sobie w trudnych,

suchych warunkach. Na przykład tamaryszek bezlistny wydziela na swojej powierzchni sole, pobrane z gleby, które mają właściwości higroskopijne pozwalające na efektywny wychwyt molekuł H₂O z powietrza [3], dodatkowo obecność gruczołów solnych pozwala na wydalenie z organizmu rośliny substancji dla niej szkodliwych [4]. Zjawisko to zachodzi cyklicznie – dobowo ze zmieniającą się temperaturą i wilgotnością względną powietrza. Opracowanie i badanie nowych, niekonwencjonalnych źródeł wody jest kluczowym kierunkiem umożliwiającym adaptacje ludzi do zmian klimatycznych na ziemi. Badania nad materiałami hydrofilowymi prowadzone są również w kierunku potencjału astrobiologicznego. Rozpływanie się soli NaCl zapewnia dobre źródło wody dla procesów biologicznych, co zostało zaobserwowane na pustyni Atakama, na której mimo ekstremalnie suchych warunków możliwe jest znalezienie organizmów żywych – sinic i bakterii z nimi powiązanych, żyjących między kryształami soli [5]. To odkrycie zapoczątkowało badania nad sorpcją soli NaCl w kontekście życia na Marsie, na którego powierzchni w roku 2015 odkryto obecność soli [6]. Wytwarzanie i badanie takich materiałów jest niezwykle istotne z punktu widzenia nowoczesnej inżynierii. Na przykład możliwe jest wyprodukowanie szkła/powierzchni nieparującej, materiałów filtrujących wodę z oleju i innych zanieczyszczeń lub osuszających powietrze i wielu innych [7].

Cel

Opis teoretyczny zjawiska zwilżania powierzchni hydrofobowych i hydrofilowych jest zagadnieniem interdyscyplinarnym i na przestrzeni lat zjawisko to doczekało się wielu modeli analitycznych przedstawiających ten proces. Modele opisujące te zjawiska przedstawiają je zazwyczaj na dwa sposoby: mikroskopowo – od zjawiska adsorpcji par wody na powierzchni oraz makroskopowo – od powstających kropeł na powierzchni materiału [7-9]. Zjawisko to zachodzi często na naturalnych minerałach takich jak halit lub kwarc, które są materiałami higroskopijnymi. Badanie jakościowe takich zjawisk bardzo często wykonywane jest w sposób wizualny. Znaczące ilości wody kondensującej na powierzchni można obserwować gołym okiem, a niewielkie jej ilości powinny móc być obserwowalne metodami obrazowania cyfrowego. Umieszczając badany materiał w komorze klimatycznej możliwe jest zadanie wilgotności i temperatury oddziałującej na powierzchnie materiału. Pojawianie się wody (kondensacja) na badanej powierzchni lub parowanie z niej może być rejestrowane z wykorzystaniem poklatkowego aparatu fotograficznego zsynchronizowanego ze wskazaniem termohigrometru umieszczonego w pobliżu badanej powierzchni. Praca komory klimatycznej symuluje warunki środowiskowe odpowiadające dynamicznym zmianom wilgotności na przykład: cyklom dnia i nocy lub utrzymuje stałą wartość w celu określenia czasu stabilizacji badanych powierzchni. W ten sposób do zbadania jest również zjawisko histerezy w przypadku jego zaistnienia dla danego materiału. W przypadku powierzchni higroskopijnych stanowisko takie umożliwia określenie lub wytypowanie charakterystycznych stanów powierzchni w funkcji temperatury i wilgotności otoczenia, co może być istotne w wielu zagadnieniach inżynierii środowiska.

Celem pracy było opracowanie optycznej metody pomiarowej umożliwiającej jakościowe lub ilościowe badanie powierzchni, na których może kondensować woda. Najbardziej interesujące z punktu widzenia inżynierii są materiały o powierzchni czynnej – czyli takiej, od której wymaga się pewnych właściwości hydrofobowych lub hydrofilowych. Zaproponowana metoda pozwala na symulowanie rzeczywistych warunków w jakich mogą znajdować się takie materiały. Mogą to być dynamiczne zmiany wilgotności i temperatury, warunki stałe lub wahania warunków środowiskowych w okolicy stanu równowagi powierzchni czynnej. Wykorzystanie aparatu fotograficznego, obniża koszty stanowiska i pozwala na badanie większego fragmentu powierzchni kryształu. Zastosowanie metod spektroskopii podczerwonej lub metod pomiaru wielkości elektrycznych jest punktowe przez co uwzględnienie globalnego wpływu różnorodności powierzchni jest trudniejsze [10-12]. Dodatkowym atutem zaproponowanej metody jest wykorzystanie dynamicznej komory klimatycznej, która umożliwia różne warianty symulacji zmian środowiskowych oddziałujących na badane powierzchnie. Eksperyment przeprowadzony na makroskopowym obiekcie, może prowadzić do uzyskania wyników bardziej odpowiadającym warunkom rzeczywistym. Uzyskanie wyników dla niewielkiej próbki lub małego jej obszaru może prowadzić do zwiększenia niepewności pomiaru.

Metoda

Kondensacja pary wodnej na powierzchniach może następować przy różnych wilgotnościach względnych specyficznych dla konkretnego materiału, na przykład w przypadku soli mówi się o krytycznej

wartości wilgotności względnej, której przekroczenie skutkuje rozpuszczaniem się tych soli [13]. Proces ten zaczyna się może w warunkach wilgotności znacznie poniżej wilgotności krytycznej. Początkuje go zjawisko adsorpcji par wody na powierzchni materiałów higroskopijnych. W przypadku materiałów neutralnych polarnie kondensacja następuje dopiero po przejściu temperatury powierzchni przez punkt rosy. Adsorpcja pary wodnej na powierzchniach zachodzi na poziomie molekularnym dlatego możliwe jest jej zarejestrowanie metodami takimi jak mikroskopia atomowa lub spektroskopia podczerwieni [10,11,14-16]. Gdy ilość zebranej na powierzchni wody osiągnie poziom, w którym siły oddziaływania między molekułami wody są silniejsze niż oddziaływania molekuł wody z powierzchnią proces zaczyna przechodzić w zjawisko kondensacji [17,18]. Woda zebrana na badanym materiale może przybierać różne formy w zależności od charakteru jego powierzchni. W przypadku materiałów hydrofilowych na powierzchni obserwowalne jest powstawanie filmu wodnego na całej jego powierzchni, natomiast w przypadku materiałów hydrofobowych formować się będą krople wody. Obecność wody zmienia parametry optyczne powierzchni. Aby możliwe było zaobserwowanie takich zmian w spektrum widzialnym, ilość zebranej wody lub efekty przez nią spowodowane muszą osiągać wymiary geometryczne przekraczające długości fal rejestrowanych przez matrycę aparatu. A więc w spektrum widzialnym możliwe jest zaobserwowanie tylko kondensacji pary wodnej na badanej powierzchni. Rejestracja tego zjawiska może pomóc w określeniu stanów powierzchni, które występują w funkcji wilgotności środowiska w jakim się znajduje. Z wykorzystaniem opracowanego stanowiska możliwa jest obserwacja zmian na powierzchni kryształu w dziedzinie czasu – osiąganie stanu równowagi fizykochemicznej między filmem roztworu wody z solą na powierzchni kryształu a powietrzem, w którym się znajduje. Typowymi zjawiskami, które zachodzą na warstwie wody (lub kroplel) pośredniczącej między powietrzem, a badanym materiałem będą [19]: Refrakcja rozproszenie, odbicie interferencja i polaryzacja.

Subtelne zmiany optyczne, jakie będą towarzyszyły początkowym fazom procesu zwilżania możliwe są do klasyfikacji z wykorzystaniem metod analizy tekstury obrazu. Tekstury definiuje się jako przestrzenne rozłożenie intensywności lub koloru pikseli na zdjęciu [20]. Dziedzina ta rozwijana jest od wielu lat i jej podstawą jest wydzielanie ze zdjęć statystycznie istotnych parametrów, które wykorzystywać można do identyfikacji powierzchni, rozpoznawania wzorców, klasyfikacji struktur itp. [21]. Analiza powierzchni często rozpoczyna się od ekstrakcji cech tekstury ze zdjęć. W ostatnich latach zdefiniowano bardzo wiele statystycznych parametrów opisujących zdjęcia. Podstawowe i jedne z pierwszych, szeroko stosowane cechy to tak zwane parametry Halicka [22] i są to między innymi: kontrast, równomierność, korelacja, energia i spójność. Te i inne parametry wykorzystuje się do oceny zmian na badanej powierzchni, z zastosowaniem np. uczenia maszynowego [21,23]. Innym możliwym podejściem jest tak zwana detekcja wartości nietypowych. Polega ona na analizie wartości znacząco odbiegających od wartości średnich [24]. Takie podejście, w przypadku badań laboratoryjnych, kiedy można liczyć na wysoką powtarzalność kadrów, wymiarów zdjęć i natężenia (lub równomierności) światła powinno być wystarczające do scharakteryzowania intensywności i stabilności procesów kondensacji zachodzących na powierzchni materiału. Stanowisko testowe składało się z komory klimatycznej, termohigrometru, aparatu cyfrowego i kryształu halitu.

Wyniki

Weryfikacja optycznej rejestracji zmian na powierzchni kryształu została przeprowadzona na różnych cyklach pracy komory klimatycznej dla stałej temperatury wynoszącej 12°C. Czas stabilizacji temperatury wykorzystywanej próbki kryształu wynosił 2 godziny, w czasie których próbka była schładzana od tzw. temperatury pokojowej do zadanej temperatury 12°C. Wszystkie cykle pomiarowe poprzedzał okres stabilizacji termicznej kryształu. Podczas eksperymentów regulowana była tylko wilgotność względna powietrza otaczającego obiekt testowy. Przeprowadzono cztery eksperymenty: 3 w stałej wilgotności oraz jeden dla wilgotności zmiennej w 9 punktach pomiarowych z zakresu od 70 do 80%rh.

Pierwsze badanie z wykorzystaniem aparatury dotyczyło stworzenia zdjęć w stałej wilgotności względnej powietrza 58%. W takich warunkach spodziewane było uzyskanie w funkcji czasu takich samych zdjęć (stan dynamicznie ustalony, w którym nie powinny być obserwowane zmiany). W tej wilgotności kondensacja na powierzchni halitu nie powinna zachodzić w sposób widoczny dla aparatu fotograficznego.

W następnym etapie przeprowadzono eksperyment dla 9 punktów z zakresu od 70 do 80% wilgotności względnej powietrza. Pomiar został przeprowadzony w jednym cyklu. To znaczy: komora klimatyczna została zaprogramowana w taki sposób, aby krokowo zwiększała wilgotność w zadanych punktach pomiarowych.

Warunki mikroklimatyczne charakteryzujące każdy z punktów były utrzymywane przez 20 minut. Pierwsze wyraźne zmiany na powierzchni kryształu można zaobserwować po przekroczeniu wilgotności względnej powietrza wynoszącej 76%. Każda następną zmianą wilgotności skutkowało coraz bardziej wyraźnymi zmianami na powierzchni kryształu. Celem tego eksperymentu było wyznaczenie charakterystycznych punktów stanu powierzchni kryształu, przez które przechodzi ona podczas zmiany parametrów powietrza.

Przeprowadzono również eksperyment prowadzący do formowania się kropli, którą można zaobserwować już po 5 godzinach, natomiast po 10 godzinach można zaobserwować zerwanie się kropli z krawędzi kryształu. Na samej powierzchni kryształu film wody stabilizuje i jego grubość jest w stanie ustalonym.

Analiza jasności zdjęć

Uzyskanie informacji o charakterze ilościowym jest możliwe do zrealizowania przy pomocy metod statystycznych lub metod analizy obrazu i jego tekstury. Zdjęcia z eksperymentu drugiego dla różnych wilgotności zostały przeanalizowane statystycznie. Jako parametry określające zmiany na powierzchni kryształu wybrano:

- średnią arytmetyczną,
- ilość pikseli znacząco odstających od średniej.

W pierwszym przypadku za parametr opisujący globalne zmiany na powierzchni wybrano średnią arytmetyczną wartości pikseli zdjęć w skali szarości (0-255). Jest to parametr proporcjonalny do jasności zdjęcia. Innym parametrem opisującym zmiany jest ilość pikseli, których jasność odstaje od jasności zdjęcia referencyjnego. W tym przypadku średnia wartość jasności zdjęcia wraz z odchyleniem standardowym została policzona dla zdjęcia przedstawiającego kryształ w wilgotności 70%. Następnie dla kolejnych zdjęć przedstawiających powierzchnię kryształu dla innych wartości wilgotności względnej powietrza zliczono ilość pikseli, których jasność jest większa lub mniejsza od wcześniej wyznaczonej wartości średniej jasności pikseli (\pm) odchylenie standardowe.

Wraz z wzrostem grubości filmu roztworu wody z solą na powierzchni kryształu zwiększa się jego przejrzystość, co skutkuje większą ilością światła przechodzącego przez kryształ (mniej światła odbitego trafiającego do matrycy aparatu). Zjawisko to widoczne jest w średniej jasności zdjęcia. Zmiany te są bardzo subtelne. Zmiany zachodzące na powierzchni kryształu definiuje ilość pikseli, których wartość przekracza zakres referencyjny. Parametr ten dobrze oddaje zmiany jasności, uwzględniając szumy pochodzące z matrycy aparatu i drgań komory klimatycznej. Wskaźnik ten uwzględnia również niejednorodność procesu kondensacji pary wodnej na badanej powierzchni, co spowodowane jest jej pierwotną strukturą. Dodatkowo charakter zjawiska może się zmieniać. Powstawanie jednorodnego filmu prowadzi do zwiększenia przejrzystości powierzchni kryształu. Proces ten jednak nie przebiega jednorodnie, ze względu na obecność zanieczyszczeń i chropowatość powierzchni. Może to prowadzić do powstawania punktów silnie odbijających światło co obserwować można na zdjęciach. Zwilżanie powierzchni powoduje równocześnie rozjaśnienie i przyciemnienie różnych pikseli (lokalnie). Wykorzystanie algorytmu wartości odstających pozwala uchwycić oba zjawiska równocześnie. W przypadku zastosowania algorytmu opartego jedynie o średnią arytmetyczną zwilżanie powierzchni w szczególnym przypadku mogłoby pozostać niezauważone z uwagi na równoważenie się jaśniejszych i ciemniejszych pikseli.

Podsumowanie

W toku prac przetestowano zarys metody optycznego obrazowania zmian na powierzchni materiału powstających w wyniku kondensacji pary wodnej na powierzchni kryształu halitu. W tym celu opracowano odpowiednie stanowisko pomiarowe. Metodę tą można przenosić na inne materiały, na których może zachodzić wykraplanie pary wodnej. W zależności od zjawiska i właściwości optycznych materiału, należy odpowiednio dobrać metodę analizy obrazu, która będzie różna dla materiałów transparentnych i nietransparentnych. Charakter materiału hydrofobowy/hydrofilowy również powinien być ważnym czynnikiem brany pod uwagę podczas doboru metody analizy obrazu. W zależności od potrzeb możliwe jest uzupełnienie stanowiska o sterowane oświetlenie umożliwiające symulacje dnia i nocy (uwzględnienie promieniowania słonecznego). Z punktu widzenia jakościowego i ilościowego pomiaru zmian na powierzchni kryształu istotna jest identyfikacja źródeł błędów dla opisywanej metody. Zmiany jasności poszczególnych pikseli mogą być

spowodowane nie tylko szumami matrycy aparatu fotograficznego. Zmiany ich jasności mogą być również silnie skorelowane z drganiami aparatu fotograficznego lub obiektu badanego. Drgania te bezpośrednio przenoszą się z pracującej komory klimatycznej. Innymi silnymi źródłami błędów mogą być: niejednorodne oświetlenie (zmienne w czasie, „falujące”) lub automatyka procesora graficznego przetwarzającego zdjęcia z matrycy. Wstępne prace nad metodą pokazały jej skuteczność w aspekcie rejestracji zjawiska powierzchniowej kondensacji pary wodnej. Przyszłe badania powinny zostać przeprowadzone w kierunku dalszej identyfikacji i sposobów minimalizacji niepewności pomiarowej równocześnie testując inne materiały. W tym kontekście należy dobrać odpowiednie metody analizy obrazu oraz przetestować ich skuteczność. Interesującym kierunkiem badań jest wykorzystanie sieci neuronowych lub uczenia maszynowego w celu identyfikacji stanów, badanych powierzchni. Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak: inżynieria materiałowa, ochrona środowiska i technologia klimatyczna.

Literatura

- [1] F. Hauber, W. Konrad, A. Roth-Nebelsick, *Aerial roots of orchids: the velamen radicum as a porous material for efficient imbibition of water*. Appl. Phys. A, t. 126, nr 11, s. 885, lis. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04047-7>
- [2] H. Wang, H. Shi, Y. Wang, *The Wetting of Leaf Surfaces and Its Ecological Significances*. [w] Wetting and Wettability, M. Aliofkhaezaei, Red., InTech, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5772/61205>
- [3] M.B. Al-Handawi, P. Commins, R.E. Dinnebier, M. Abdellatif, L. Li, P. Naumov, *Harvesting of aerial humidity with natural hygroscopic salt excretions*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., t. 120, nr 45, s. e2313134120, lis. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2313134120>
- [4] F. Yuan, B. Leng, i B. Wang, *Progress in Studying Salt Secretion from the Salt Glands in Recretohalophytes: How Do Plants Secrete Salt?* Front. Plant Sci., t. 7, cze. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00977>
- [5] J. Wierzchos, C. Ascaso, C.P. McKay, *Endolithic Cyanobacteria in Halite Rocks from the Hyperarid Core of the Atacama Desert*, Astrobiology, t. 6, nr 3, s. 415-422, cze. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2006.6.415>
- [6] J. Jänchen, N. Feyh, U. Szewzyk, J.-P.P. De Vera, *Provision of water by halite deliquescence for Nostoc commune biofilms under Mars relevant surface conditions*. International Journal of Astrobiology, t. 15, nr 2, s. 107-118, kwi. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1017/S147355041500018X>
- [7] D. Ahmad, I. Van Den Boogaert, J. Miller, R. Presswell, H. Jouhara, *Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, t. 40, nr 22, s. 2686-2725, lis. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1511642>
- [8] O.P. Murphy, M. Vashishtha, P. Palanisamy, K.V. Kumar, *A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time*. ACS Omega, t. 8, nr 20, s. 17407-17430, maj 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>
- [9] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller, *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers*. J. Am. Chem. Soc., t. 60, nr 2, s. 309-319, luty 1938. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- [10] M.C. Foster, G.E. Ewing, *Adsorption of water on the NaCl(001) surface. II. An infrared study at ambient temperatures*. The Journal of Chemical Physics, t. 112, nr 15, s. 6817-6826, kwi. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.481256>
- [11] Z. Zhang, G.E. Ewing, *Attenuated Partial Internal Reflection Infrared Spectroscopy*. Anal. Chem., t. 74, nr 11, s. 2578-2583, cze. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac011288t>
- [12] L. Yang i in., *Nanoscale characterization of the water vapor-salt interfacial layer reveals a unique biphasic adsorption process*. Sci. Rep., t. 6, nr 1, s. 31688, sie. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep31688>
- [13] J. Richard Adams, A.R. Merz, *Hygroscopicity of Fertilizer Materials and Mixtures*. Ind. Eng. Chem., t. 21, nr 4, s. 305-307, kwi. 1929. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50232a003>
- [14] D.J. Dai, S.J. Peters, G.E. Ewing, *Water Adsorption and Dissociation on NaCl Surfaces*. J. Phys. Chem., t. 99, nr 25, s. 10299-10304, cze. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1021/j100025a035>
- [15] Q. Dai, J. Hu, M. Salmeron, *Adsorption of Water on NaCl (100) Surfaces: Role of Atomic Steps*. J. Phys. Chem. B, t. 101, nr 11, s. 1994-1998, mar. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp9625772>
- [16] X. Li, L. Liu, J. Zhao, J. Tan, *Optical Properties of Sodium Chloride Solution within the Spectral Range from 300 to 2500 nm at Room Temperature*. Appl. Spectrosc., t. 69, nr 5, s. 635-640, maj 2015. DOI: <https://doi.org/10.1366/14-07769R>
- [17] R.A. Lad, *Adsorption of water on sodium chloride: The effect of prior exposure to hydrogen chloride, carbon dioxide and water vapor*. Surface Science, t. 12, nr 1, s. 37-45, wrz. 1968. DOI: [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(68\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0039-6028(68)90005-8)
- [18] M. Yeşilbaş, J.-F. Boily, *Particle Size Controls on Water Adsorption and Condensation Regimes at Mineral Surfaces*. Sci. Rep., t. 6, nr 1, s. 32136, sie. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep32136>

- [19] O.S. Heavens, *Optical properties of thin films*. Rep. Prog. Phys., t. 23, nr 1, s. 1-65, sty. 1960. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/23/1/301>
- [20] L.G. Shapiro, G.C. Stockman, *Computer vision*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [21] L. Liu, J. Chen, P. Fieguth, G. Zhao, R. Chellappa, M. Pietikäinen, *From BoW to CNN: Two Decades of Texture Representation for Texture Classification*. Int. J. Comput. Vis., t. 127, nr 1, s. 74-109, sty. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11263-018-1125-z>
- [22] R. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein, *Textural Features for Image Classification*. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., t. SMC-3, nr 6, s. 610-621, lis. 1973. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- [23] X. Liu, C. Aldrich, *Deep Learning Approaches to Image Texture Analysis in Material Processing*. Metals, t. 12, nr 2, s. 355, luty 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020355>
- [24] C.C. Aggarwal, *Outlier analysis*. Second edition. Cham: Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3>

Digital imaging of surface condensation phenomena

Abstract

This paper presents a test rig for observing condensation on the surface of the test material. The stand uses a dynamic climate chamber, a high-resolution digital camera and a dew-point thermo-hygrometer. Using a halite crystal as an example, the possibility of recording optical changes on the surface of the material resulting from the appearance of water on it was tested. Experiments were conducted as a function of time and humidity, thus recording changes in the image of the crystal surface caused by environmental conditions and those resulting from the crystal surface reaching a state of physicochemical equilibrium (at constant environmental parameters). Two methods of statistical image analysis were initially proposed that could map the changes occurring on the surface of the material under study. In addition, a preliminary analysis of factors that may affect the measurement uncertainty of the method was carried out. The stand is used to determine and define the states in which the surfaces of materials actively interacting with water vapor are located, depending on the given thermal and humidity conditions. Depending on the frequency of taking photographs, it is possible to record dynamic changes occurring on these surfaces (during changes in climatic parameters) or quasi-static changes associated with reaching surface equilibrium (for constant climatic conditions).

Keywords: climate chamber, surface condensation, humidity, dew point, hygroscopicity, digital imaging