

# Zalecenia dotyczące bezpiecznego laboratoryjnego suszenia gruntów z wykorzystaniem mikrofal

## Recommendations for safe laboratory drying of soils using microwaves

dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska, prof. PŚ (ORCID: 0000-0003-0080-5784), Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, dr inż. Łukasz Kaczmarek (ORCID: 0000-0001-5207-3816), Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

DOI 10.5604/01.3001.0053.6999

**Streszczenie:** Brak klarownych wytycznych suszenia mikrofalowego dla określenia wilgotności czy tylko „podsuszania” gruntów przed właściwymi badaniami cech mechanicznych może prowadzić do niekontrolowanych zmian właściwości fizyko-mechanicznych gruntów. W niektórych przypadkach może to grozić nawet „eksplozją” materiału badawczego. Na podstawie licznych i szczegółowych badań wilgotności sformułowano wskazówki na temat optymalizacji parametrów bezpiecznego wykorzystania mikrofalówek w laboratorium geotechnicznym.

**Słowa kluczowe:** suszenie mikrofalowe, mikrotomografia komputerowa, grunty spoiste, grunty niespoiste, wilgotność.

**Abstract:** The use of microwave drying to determine the water content or only to “pre-drying” of the soils before the proper tests of their mechanical properties, need to be established in detailed way. Without knowledge of the basic criteria for such procedure, may lead to uncontrolled changes in the physical and mechanical properties of soils – even soil “explosion”. On the basis of detailed water content studies, the guidelines were formulated on optimizing the parameters for the safe use of a microwave oven in a geotechnical laboratory.

**Keywords:** microwave drying, computed microtomography, cohesive soils, non-cohesive soils, water content.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych badań w laboratorium geotechnicznym jest określanie wilgotności gruntu, do czego wykorzystuje się konwencjonalne suszarki laboratoryjne lub alternatywnie (dla przyspieszenia procesu) mikrofalówki. Należy jednak pamiętać, że bezkrytyczne wykorzystywanie suszenia mikrofalowego do wyznaczenia wilgotności lub tylko do „podsuszania” gruntów przed właściwymi badaniami cech mechanicznych, bez znajomości podstawowych kryteriów takiego postępowania, może prowadzić do niekontrolowanych zmian właściwości fizyko-mechanicznych gruntów, w tym m.in. do ich „eksplozji”. Na podstawie doświadczeń z realizacji obszernego cyklu badawczego sformułowano podstawowe wytyczne właściwego stosowania mikrofalówek w odniesieniu do gruntów spoiowych i niespoistych.

## 2. Promieniowanie mikrofalowe w zastosowaniach geotechnicznych

Powszechnie stosowaną metodą oznaczania wilgotności gruntów w Polsce i na świecie, zgodnie z obowiązującymi normami, jest poddawanie ich suszeniu w suszarce konwencjonalnej z wymuszonym obiegiem powietrza, w temperaturze 105°C, przez minimum 24 godz. Z uwagi

na czasochłonność tego procesu już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku zainteresowanie badaczy [1, 10, 28] skierowało się w stronę wykorzystania promieniowania mikrofalowego do ogrzewania gruntów. Później, kolejno pojawiały się prace m.in. [5, 7, 8, 12, 13, 14, 16, 17, 27]. Natomiast najnowsze publikacje pochodzą z lat 2012–2021 i obejmują m.in. prace [6, 9, 11, 18, 20, 21, 23, 24]. Wszyscy zgodnie potwierdzają skuteczność laboratoryjnego mikrofalowego suszenia oraz fakt korespondowania wyników zastosowania mikrofal z wynikami suszenia standardowego – przy zachowaniu odpowiednich warunków badań i uwzględnieniu pewnych ograniczeń, np. tych związanych z:

- gruntami organicznymi o zawartości części organicznych przekraczających 10% ([9, 23, 24]),
- gruntami bentonitowymi o wilgotności większej niż 110% ([9]),
- gruntami z dużą zawartością haloizytu, miki, montmorylonitu, gipsu i innych uwodnionych materiałów ([8]) lub
- ryzykiem przypalenia zbyt małych próbek ([3, 8, 15]), a także
- możliwością eksplodowania niektórych gruntów, zwłaszcza ilów, piasków drobnych, żwirów i spękanych skał ([14, 20, 21]).

W większości krajów metoda ogrzewania za pomocą promieniowania elektromagnetycznego nie jest znormalizowana. Wyjątek stanowią tu Stany Zjednoczone [3], Australia [2]

i Francja [25]. Z kolei w Kanadzie [4] i w Hong Kongu (obecnie części Chin) [8] pojawiły się obszerne raporty będące wynikiem projektów badawczych. To powoduje, że dobór parametrów suszenia za pomocą mikrofal jest na ogół arbitralną decyzją samego badacza, który musi przeanalizować szereg aspektów metodycznych, takich jak: rodzaj gruntu, masę próbki, liczbę próbek suszonych jednocześnie w kuchence mikrofalowej i sposób ich rozmieszczenia (w środku lub po obwodzie talerza), czas suszenia, interwały czasowe, w których kontroluje się zmianę masy próbki, moc kucharki mikrofalowej, rodzaj materiału, z jakiego wykonane jest naczynie zawierające badany grunt, ewentualne przykrycie próbki (np. perforowaną specjalistyczną folią, gdzie często wykorzystuje się folię spożywczą). Najczęściej powtarzane zalecenia odnoszą się do:

- stosowania mocy mikrofal z przedziału 700–900 W,
- suszenia próbek o masie ok. 150 g oraz
- zastosowania cyklu: pierwsze 2–3 min suszenia non-stop i dalej co 30 s – 1 min z pomiarami masy po każdym cyklu nagrzewania. Zbiorcze zestawienie najważniejszych wytycznych na podstawie dostępnej literatury można znaleźć w pracach [20] oraz [21].

Niniejsza praca ma na celu zidentyfikowanie oraz zrewidowanie najczęstszych zaleceń w celu ich praktycznego (i świadomego) wykorzystywania w laboratorium geotechnicznym. Ponadto, oprócz aspektów metodycznych, w artykule zwraca się uwagę na fundamentalne pytanie: czy mikrofalowe poduszanie zbyt wilgotnych gruntów przed właściwymi badaniami ich cech fizyko-mechanicznych nie wpływa na otrzymywane parametry? Mając to na uwadze przeprowadzono kilkietapowe szczegółowe badania przykładowych gruntów (spoiistych i niespoistych). W oparciu o uzyskane wyniki sformułowano wskazówki na temat optymalizacji parametrów bezpiecznego wykorzystania kucharki mikrofalowej oraz stwierdzono, które grunty i w jakim zakresie są bardziej wrażliwe na działanie promieniowania elektromagnetycznego.

### 3. Materiały i metody

Cykl badań podzielono na 3 etapy, z których każdy miał specyficzną funkcję. Z tego względu do każdego z etapów wytypowano inne rodzaje gruntów. Etap 1, określający wpływ poszczególnych parametrów suszenia na otrzymane wyniki wilgotności oraz na skrócenie czasu suszenia, opisano szczegółowo w pracy [20]. Etap 2, obejmujący identyfikację zmian strukturalnych suszonych gruntów, przedstawiono w pracy [21]. Z kolei etap 3 weryfikuje wnioski z etapu 1 w warunkach suszenia w powszechnie wykorzystywanych spożywczych uniwersalnych kuchenkach mikrofalowych.

#### 3.1. Etap 1 – identyfikacja kluczowych parametrów suszenia mikrofalowego

Do badań wytypowano dwa grunty niespoiste w stanie luźnym pochodzące z wykopów drogowych oraz jeden spoisty

pochodzący ze złóż triasowych w miejscowości Patoka koło Częstochowy. Według klasyfikacji zgodnej z normą PN-EN ISO 14688-2:2006 [26] są to odpowiednio:

- piasek drobny (FSa) –  $d_{10} = 0,10$  mm,  $d_{50} = 0,25$  mm,  $d_{90} = 0,70$  mm,  $C_c = 1,44$ ,  $C_u = 2,50$ ,  $f_{si} = 7\%$ ,  $f_{sa} = 90\%$ ,  $f_{gr} = 3\%$ ;
- żwir z piaskiem (saGr) –  $d_{10} = 0,40$  mm,  $d_{50} = 4,50$  mm,  $d_{90} = 9,50$  mm,  $C_c = 2,30$ ,  $C_u = 15,70$ ,  $f_{sa} = 28\%$ ,  $f_{gr} = 72\%$ ;
- ił z pyłem (siCl), o roboczej nazwie: ił czerwonawy (według pracy [22]) –  $d_{10} = 0,0008$  mm,  $d_{50} = 0,0045$  mm,  $d_{90} = 0,02$  mm,  $C_c = 0,063$ ,  $C_u = 100$ ,  $f_{cl} = 29\%$ ,  $f_{si} = 71\%$ ,  $w_p = 25\%$ ,  $w_L = 75\%$ ,  $FS = 31,50\%$ ,

gdzie:

$d_{10}$ ,  $d_{50}$  i  $d_{90}$  – średnice zastępcze;  $C_c$  to wskaźnik krzywizny;  $C_u$  – wskaźnik różnoziarnistości;

$w_p$  i  $w_L$  – granice Atterberga, odpowiednio plastyczności i płynności;  $f_{cl}$ ,  $f_{si}$ ,  $f_{sa}$ ,  $f_{gr}$  to zawartość frakcji, odpowiednio iłowej, pyłowej, piaskowej i żwirowej;

$FS$  – wskaźnik swobodnego pęcznienia.

Obszerny plan badawczy zakładał porównanie wyznaczonych wilgotności i przeznaczonych na to czasów podczas suszenia w dwóch kuchenkach mikrofalowych i konwencjonalnej suszarce laboratoryjnej. Do ogrzewania mikrofalowego wykorzystano kucharki: Moulinex, typ Y54 oraz Electric, model WD800AP20-6, obie pracujące w zakresach zadeklarowanej mocy od 80–800 W. Z kolei suszarka laboratoryjna reprezentowała standardową suszarkę konwekcyjną z wymuszonym obiegiem powietrza, działającą w temperaturze 105°C. Zmiennymi w kolejnych seriach suszenia były: wilgotność próbek z przedziału  $w = 3–103\%$  w interwale co 4–5%, masa próbek  $m = 25/50/75/100/125/300$  g, liczba próbek suszonych jednorazowo w kuchence mikrofalowej  $n = 1/2/3/5$  szt., sposób ułożenia próbek w kuchence mikrofalowej – w środkowej części lub po obwodzie, stosowanie lub nie folii (podziurkowanej) przykrywającej próbkę. Próbkę ważono co 30 s, przez 5 min i dalej co 1 min do końca. Wszystkie szczegóły i warianty zostały szczegółowo opisane w pracy [20].

#### 3.2. Etap 2 – identyfikacja zmian strukturalnych

Do badań wytypowano jeden grunt niespoisty w stanie luźnym pochodzący z wykopów drogowych na południu Polski oraz jeden spoisty pochodzący z Fabryki Porcelany w Tułowicach. Według klasyfikacji zgodnej z normą PN-EN ISO 14688-2:2006 [26] są to odpowiednio:

- piasek średni (MSa) –  $d_{10} = 0,20$  mm,  $d_{50} = 0,42$  mm,  $d_{90} = 1,15$  mm,  $C_c = 1,20$ ,  $C_u = 2,40$ ;  $f_{si} = 7\%$ ,  $f_{sa} = 90\%$ ,  $f_{gr} = 3\%$ ;
- ił z pyłem (siCl), o roboczej nazwie: kaolin (według [19]) –  $d_{10} = 0,0001$  mm,  $d_{50} = 0,0046$  mm,  $d_{90} = 0,05$  mm,  $C_c = 1,25$ ,  $C_u = 73$ ,  $f_{cl} = 38\%$ ,  $f_{si} = 60\%$ ,  $f_{sa} = 2\%$ ,  $w_p = 20\%$ ,  $w_L = 42\%$ .

Opracowany plan badawczy zakładał porównanie wpływu rodzaju suszenia gruntów na zmiany ich struktury. Badaniem referencyjnym był stan powietrzno-suchy próbki,

która nie była poddawana suszeniu w wysokiej temperaturze (suszenie przez 48 godz. w temp. 21°C). Dalszej ocenie podlegały zmiany występujące na skutek suszenia gorącym powietrzem w konwencjonalnej suszarce (24 godz. w temperaturze 105°C) oraz ogrzewania za pomocą mikrofal (800 W, ok. 7 min, przybliżona temperatura <math><200^{\circ}\text{C}</math> dla piasku i <math><400^{\circ}\text{C}</math> dla kaolinu). Do określenia zmian strukturalnych zastosowano nieinwazyjną i nieniszczącą rentgenowską mikrotomografię komputerową ( $\text{X}\mu\text{CT}$ ). Próbkę o masie  $m = 50$  g były ważone 2 razy co 30 s, i dalej co 1 min do końca suszenia (7 min). Wszystkie szczegóły zostały szczegółowo opisane w pracy [21].

### 3.3. Etap 3 – weryfikacja wilgotności w warunkach domowych

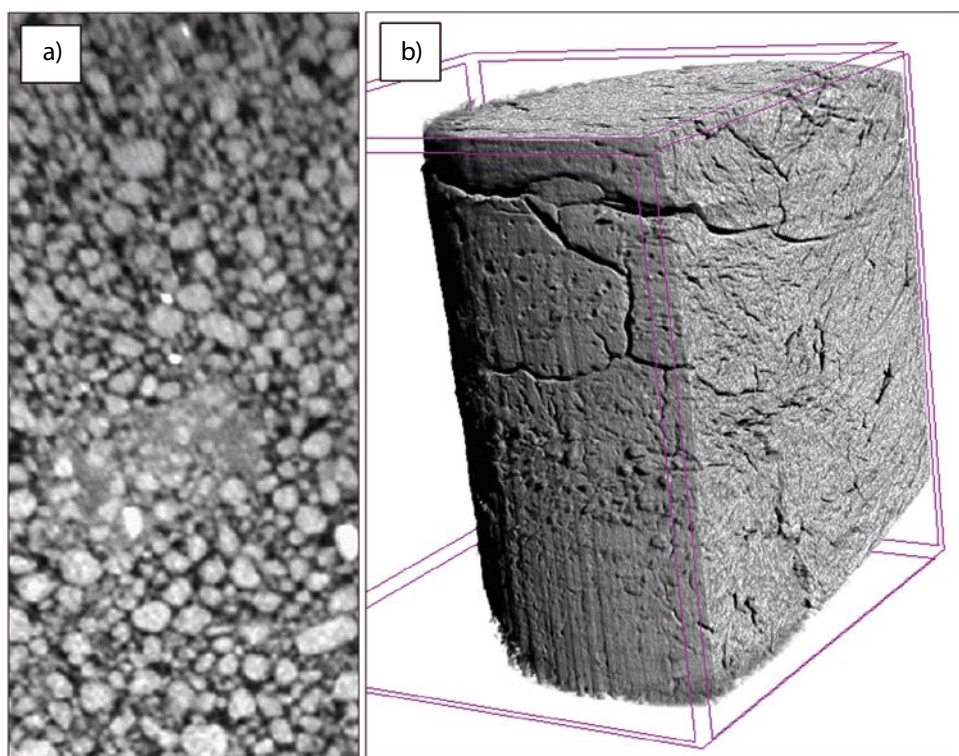
W ramach etapu 3 wykonano rozpoznanie podłoża gruntowego pod zabudowę jednorodziną na prywatnej działce budowlanej w okolicach Katowic. Przedmiotowy teren (zalewoy, sąsiedztwo potoku) graniczy bezpośrednio z uprawnymi polami. Podczas badań terenowych przeprowadzono analizę makroskopową na podstawie, której wydzielono warstwy ilów piaszczystych (saCl), ilów pylastych (siCl), ilów (Cl), pyłów (Si), piasków ilastych (clSa) w różnych stanach i barwach oraz warstwy piasków drobnych (FSa), średnich (MSa), grubych (CSa) o różnej wilgotności i stopniu zagęszczenia, częściowo z zawartością części organicznych oraz otoczek. Ze względu na okres całkowitej izolacji z powodu epidemii COVID-19 i utrudniony dostęp do laboratorium podjęto decyzję o wyznaczeniu wilgotności pobranych próbek gruntu w warunkach domowych. Wykorzystano do tego żaroodporne kokilki, kuchenkę mikrofalową Bosch 900 W oraz wagę kuchenną z dokładnością do całkowitych gramów. Na podstawie obserwacji dokonanych w etapach 1 i 2, zdecydowano o ważeniu próbek na dwa sposoby przez cały okres ich suszenia, przyjmując subiektywnie za kryterium wstępnie makroskopowo ocenioną wilgotność gruntu. W związku z tym grunty „bardziej suche” ważono od początku co 1 min (aż do końca

suszenia), natomiast w przypadku gruntów „bardziej wilgotnych” pierwszy pomiar wykonywano dopiero po 3–4 min, i dalej co 1 min, aż do końca suszenia (tab. 1). Średnia masa próbek w badaniu wilgotności wynosiła  $m = 80$  g.

### 3.4. Procesy zachodzące podczas suszenia gruntów

Procesy zachodzące podczas suszenia gruntów w suszarce konwencjonalnej lub w kuchence mikrofalowej różnią się od siebie. W standardowych suszarkach laboratoryjnych gorące suche powietrze opływa próbkę, ogrzewa jej zewnętrzną powierzchnię, a dalej w drodze konwekcji ciepło transferowane jest do jej wnętrza. W warunkach wysokiej i stałej temperatury (105°C) proces ten zachodzi na tyle wolno, że cała próbka ogrzewa się relatywnie równomiernie. Z kolei w gruntach suszonych w kuchence mikrofalowej mechanizm ogrzewania i transportu ciepła jest zupełnie inny. Promieniowanie elektromagnetyczne indukuje drgania cząsteczek wody w próbce, tworząc w ten sposób wewnętrzne źródło ciepła, które systematycznie przemieszcza się ku powierzchni zewnętrznej. W zależności od rodzaju gruntu, jego porowatości oraz początkowej wilgotności cały proces zachodzi z różną prędkością, w związku z czym próbka ogrzewa się nierównomiernie, podczas czego mogą zaistnieć różne, niepożądane efekty „uboczne”, takie jak eksplozowanie, przypalanie, żarzenie [20].

Mechanizm naturalnego suszenia gruntów w warunkach powietrzno-suchych jest oczywiście bardziej podobny do tego, jaki obserwuje się w suszarkach konwekcyjnych. Jednak ze względu na wartość temperatury otoczenia, która jest znacznie niższa od 105°C, proces suszenia zachodzi znacznie wolniej.



**Rys. 1.** Przykładowy fragment mikrotomograficznego przekroju próbki piasku średniego (a), przestrzenny obraz  $\text{X}\mu\text{CT}$  walcowej próbki kaolinu (po suszeniu za pomocą mikrofal), gdzie z prawej strony odsłonięto wewnętrzną strukturę (b)



**3.5. Mikrotomografia komputerowa: metoda analityczno-obszaryjny**

Mikrotomografia komputerowa to nieniszcząca uniwersalna metoda umożliwiająca analizy jakościowe oraz ilościowe kilkunastymetrowych próbek, najlepiej o cylindrycznej geometrii (w przywoływanych badaniach w [21] – o średnicy 25 mm i wysokości 50 mm). Analiza materiału badawczego z dokładnością do (najczęściej) kilkunastu-kilkudziesięciu mikrometrów (w [21] było to 28 mikronów) pozwala na charakterystykę elementów strukturalnych obecnych na powierzchni, jak również wewnątrz badanej próbki. Dzięki tej metodzie można na przykład ocenić jednorodność frakcyjną gruntów niespoistych (rys. 1a), czy też mineralogiczną. Co więcej, metoda ta umożliwia parametryzację struktury badanych materiałów – określenie porowatości, rozkłady wielkości porów, średnicy ziaren; określenie rozwarości sieci spękań i szczelin; określenie krętości połączeń porowo-szczelinowych. Wymienione elementy to tylko wybrane powszechnie stosowane parametry różnych materiałów, w tym gruntów i materiałów budowlanych o genezie naturalnej oraz antropogenicznej. W efekcie ok. 4 godz. naświetlenia pojedynczej próbki uzyskano 1601 radiografów, które przetworzono i wykorzystano do wygenerowania przestrzennych interaktywnych obrazów próbek

[21], tzn. takich, gdzie możliwe było m.in. poprowadzenie dowolnych przekrojów przez próbkę (rys. 1b).

**4. Wyniki i dyskusja**

Jedne z ważniejszych wątków, oprócz wskazówek metodycznych prezentowanych już wcześniej (dotyczących m.in. częstotliwości ważenia, przykrycia próbek, stosowanych mocy mikrofal, itd.; w oparciu o szeroką analizę literatury), które można wskazać na podstawie wyników suszenia z wykorzystaniem mikrofal, przedstawiono poniżej.

- Przeprowadzenie tak wielu serii badawczych pomogło sformułować cenne wskazówki praktyczne, bardzo rzadko występujące w literaturze przedmiotu. Zaczynając od najistotniejszych obserwacji – problemu gwałtownego i wysokoenergetycznego niebezpiecznego efektu „eksplozowania” gruntu w trakcie mikrofalowego suszenia i tym samym wysypywania się z naczynia, w którym się znajdował. Do takiego zjawiska dochodziło w trakcie suszenia w kuchence mikrofalowej próbki piasku drobnego (FSa) o wilgotności  $w > 23\%$ . Wymuszało to stosowanie przykrycia naczynia podziurkowaną folią ochronną, co aż 3-krotnie wydłużyło czas suszenia. Z kolei czerwony ił (siCl) nie wymagał

**Tabela 1.** Pomiar masy próbki podczas suszenia w kuchence mikrofalowej w warunkach domowych

| KUCHENKA MIKROFALOWA  |                   |                 |                               |                                       |  |          |          |          |          |          |          |          |
|---|-------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Rodzaj gruntu<br>(na podstawie<br>analizy<br>makroskopowej) | Oznaczenie próbki | Wilgotność, [%] | Masa próbki<br>wilgotnej, [g] | Masa próbki wilg.<br>z naczyniem, [g] | Masa próbki wilgotnej z naczyniem<br>w trakcie suszenia po czasie t, [g] |          |          |          |          |          |          |          |
|   |                   |                 |                               |                                       | 1<br>min   | 2<br>min | 3<br>min | 4<br>min | 5<br>min | 6<br>min | 7<br>min | 8<br>min |
|   |                   |                 |                               |                                       | $m_1$  | $m_2$    | $m_3$    | $m_4$    | $m_5$    | $m_6$    | $m_7$    | $m_8$    |
| saCl + or   | A1                | 15,7            | 81                            | 244                                   | -  | 235      | 233      | 233      | -        | -        | -        | -        |
| MSa    siSa   | A2                | 19,4            | 80                            | 239                                   | -  | -        | -        | 231      | 228      | 227      | 226      | 226      |
| siSa  | A3                | 15,9            | 80                            | 233                                   | -  | -        | -        | 224      | 222      | 222      | -        | -        |
| siCl    Cl  | A4                | 28,3            | 77                            | 234                                   | -  | -        | -        | 219      | 217      | 217      | -        | -        |
| Si + KO   | B1+B2             | 19,4            | 74                            | 235                                   | -  | -        | -        | 226      | 224      | 223      | 222      | 222      |
| siCl  | B3                | 20,3            | 77                            | 231                                   | -  | -        | -        | 221      | 220      | 219      | 218      | 218      |
| MSa    FSa  | B4                | 13,9            | 82                            | 238                                   | -  | -        | -        | 230      | 228      | 228      | -        | -        |
| saCl + or   | B5                | 16,0            | 116                           | 277                                   | -  | -        | 265      | 262      | 261      | 261      | -        | -        |
| MSa    siSa   | B6                | 18,5            | 64                            | 222                                   | -  | -        | -        | 215      | 214      | 212      | 212      | -        |
| CSa + MSa + KO  | C1                | 7,1             | 91                            | 249                                   | 249  | 249      | 248      | 247      | 246      | 244      | 243      | 243      |
| CSa    siSa + KO  | C2+C3             | 8,7             | 75                            | 238                                   | -  | 236      | 234      | 232      | 232      | 232      | -        | -        |
| saSi    Si  | C4                | 18,3            | 71                            | 230                                   | -  | -        | 222      | 219      | 219      | -        | -        | -        |
| siSa    saCl  | C5                | 14,5            | 95                            | 248                                   | -  | -        | -        | 238      | 237      | 236      | 236      | -        |
| MSa    siSa   | C6                | 17,3            | 88                            | 245                                   | -  | 238      | 234      | 232      | 232      | -        | -        | -        |

stosowania przykrycia, mimo eksplozowania przy dużych wilgotnościach, gdyż zjawisko to nie było intensywne, a naczynie stosunkowo wysokie. Natomiast w przypadku suszenia gruntów o większym uziarnieniu, np. żwiru z piaskiem (saGr), bez względu na wilgotność, nie obserwowano zjawiska eksplozji [20]. Badania zrealizowane w etapie 2 [21] i etapie 3 potwierdziły, że w zakresie wilgotności do 20%, w trakcie suszenia mikrofalowego żaden z gruntów, ani spoistych, ani niespoistych, nie eksploduje. Można więc przypuszczać, że zawartość kaolinitu [21], jak i niewielka zawartość części organicznych (do 2%) nie powodują niekorzystnych efektów w postaci eksplozowania gruntu.

- Innym interesującym zjawiskiem było sporadyczne żarzenie się próbek czerwonego iłu (siCl), związane przypuszczalnie z jego składem mineralogicznym, albo ich częściowe przypalenie wynikające ze zbyt dużej masy próbki (fakt nierównomiernego ogrzewania) lub zbyt długiego czasu suszenia [20]. Najprawdopodobniej zmniejszenie mocy grzania kuchenki jest odpowiednim rozwiązaniem tego problemu. Jednocześnie należy czujnie obserwować powierzchnię próbki i niepotrzebnie nie przedłużać procesu suszenia. O ile w przypadku suszenia konwekcyjnego (w stałej temperaturze) nie ma to znaczenia, o tyle pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego dochodzi do stałego wzrostu temperatury, co przy utracie całej wody skutkuje przypaleniami i żarzeniem. Zagadnienie to będzie przedmiotem przyszłych badań.

- Dla wilgotności  $w = 27\%$  proces suszenia przebiegał 3 razy szybciej dla czerwonego iłu (siCl) niż dla pozostałych badanych gruntów (FSa i saGr) [20]. Potwierdzenie tego faktu, jako prawidłowości, że przy znacznej wilgotności grunty spoiste suszą się szybciej niż grunty niespoiste, wymaga dalszych badań. Żaden z autorów zaawansowanych prac badawczych [9, 12, 17, 18] nie wypowiedział się w tym zakresie.

- Grunty suszone w warunkach domowych (etap 3, 900 W, średnia masa próbek  $m = 80$  g), mimo małej dokładności pomiaru masy (do pełnych gramów) potwierdziły zasadność stosowania kuchenki mikrofalowej do określania wilgotności (tab. 1). Znajomość podstawowych zasad rządzących procesami zachodzącymi podczas działania promieniowania elektromagnetycznego pozwoliła na ograniczenie czasu suszenia do  $t = 5-8$  min przy zachowaniu 1 min interwału pomiaru masy próbki (od początku lub od trzeciej/czwartej minuty grzania).

- Jeśli pierwszy pomiar masy próbki wykonuje się po 3–4 minutach grzania mikrofalowego (etap 3), warto chwilę odczekać, aż para nagromadzona we wnętrzu kuchenki wyleci na zewnątrz. W przypadku gdy się tego nie robi, można zaobserwować wahania masy (tzn. jej lekkie zwiększenie zamiast zmniejszenia się). Poczynione obserwacje pozostają w dużej zgodności z rekomendacjami pracy [9], w której przyjęto zasadę suszenia non-stop przez pierwsze 3 minuty i dalej co 1 minutę z pomiarami masy po każdym cyklu nagrzewania, zachowując 1-minutowy okres chłodzenia przed samym ważeniem.

Opisując efekty suszenia z wykorzystaniem mikrofal, istotne jest ujęcie zachodzących zmian strukturalnych materiału badawczego. W tym celu odwołano się do wstępnych badań porównawczych różnych metod suszenia przy zastosowaniu  $X\mu$ CT (szczegółowy opis badań przedstawiono w [21]). Badania te wskazały na zbliżone wyniki wilgotności gruntu, gdzie przy gruncie spoistym (kaolinie) rozpoznano zniszczenie struktury (powstanie licznych szczelin – rysunek 1b) po suszeniu właśnie przy zastosowaniu mikrofal. O ile w przypadku określania wilgotności może być to akceptowalne, o tyle już bezkrytyczne stosowanie mikrofal w przygotowywaniu materiału badawczego do dalszych badań jest błędem. Bardzo istotnym aspektem w ewaluacji wpływu stosowania promieniowania mikrofalowego na różnego rodzaju grunty w porównaniu z suszeniem konwencjonalnym jest liczebność badań referencyjnych oraz rzetelne określenie charakterystyk strukturalnych. Tutaj warto dodać, że dla analiz strukturalnych za pomocą mikrotomografu konieczne jest zastosowanie takiego pojemnika próbki, który będzie „transparentny” dla promieniowania rentgenowskiego, jak również odporny na bardzo wysokie temperatury oraz odpowiednio „mały”.

Ważnym aspektem w interpretacji wyników suszenia, w szczególności degradacji struktury gruntów ilastych, jest weryfikacja zachodzenia procesów dehydratacji minerałów ilastych, co „iluzorycznie” zwiększa wartość wilgotności gruntu (np. w przypadku zawartości kaolinitu tego typu proces zachodzi przy temperaturze  $400^{\circ}\text{C}$  [13]). Stąd rekomendacja przeprowadzenia nawet pojedynczego testu porównawczego (suszenie w mikrofalówce i w konwencjonalnej suszarce).

W przypadku ilościowych charakterystyk suszonych gruntów ważne jest, aby mieć świadomość, że parametry wyprowadzone z mikrotomograficznych badań (np. porowatość, wskaźnik porowatości) obarczone są pewnym niedoszacowaniem. Jest to związane z wielkością najmniejszego rejestrowanego elementu obrazu (tj. piksela, czy też voksela). Dla przykładu, w przywoływanych badaniach piksel miał bok o długości 28 mikronów; innymi słowy pory o mniejszych rozmiarach były „niewidoczne”. Określenie tej wartości w laboratoryjnych badaniach uzupełniających pozwoli na ocenę istotności niedoszacowania.

Obrazowanie mikrotomograficzne umożliwia analizy zawartości poszczególnych frakcji. Wykorzystywanie małych próbek badawczych pozwala na uzyskanie kilku-, kilkunastomikronowej dokładności obrazu. W sytuacji wielokrotnego wykorzystywania ograniczonej ilości materiału badawczego w różnych testach geotechnicznych i konieczności szybkiego przygotowywania takiego materiału poprzez osuszenie z zastosowaniem mikrofalówki (a następnie zadawanie pożądanej wilgotności w kontekście dalszych badań), może dochodzić do osłabienia ziaren, a nawet do ich kruszenia. Osłabienie szkieletu gruntowego oznacza obniżenie wartości charakterystyk wytrzymałościowych badanego gruntu.

Tego typu efekt można kontrolować za pomocą ilościowych interpretacji wyników naświetleń  $X_{\mu CT}$  – np. wykorzystując rozkład ekwiwalentnych średnic ziaren badanego materiału (przed suszeniem i po nim), jak również jakościowo – na obrazach mikrotomograficznych pojedynczych ziaren przy bardzo małych wielkościach pikseli.

## 5. Podsumowanie

Wykorzystywanie promieniowania mikrofalowego w badaniach geotechnicznych wymaga dostosowania procedury badań do danego rodzaju gruntu. Dzięki temu można uzyskać znaczne skrócenie czasu badań podstawowych właściwości materiału (wilgotności), jak również wieloletowych zaawansowanych badań gruntu. Niemniej nie zawsze suszenie w mikrofalówce może być zamiennie stosowane z suszeniem konwencjonalnym.

W trakcie planowania badań z zastosowaniem suszenia mikrofalami należy uwzględnić m.in. czas i intensywność suszenia, częstotliwość ważenia próbek, rodzaj stosowanego pojemnika na materiał badawczy, optymalną moc mikrofalówki, niebezpieczeństwo wystąpienia „eksplozji”, żarzenia się gruntu, czy jego przypalania. W pierwszych badaniach rekomenduje się wykorzystywanie wysokorozdzielczych rentgenowskich mikrotomografów komputerowych pozwalających na ilościowe i jakościowe charakterystyki zmian strukturalnych. W naświetleniach istotnymi aspektami są m.in.: dokładność obrazów mikrotomograficznych związana z wielkością materiału badawczego, geometria próbki, ustawienia techniczne mikrotomografu (czas naświetlania, moc lampy rentgenowskiej itd.), rodzaj materiału, z jakiego wykonany jest pojemnik, w którym umieszczono grunt. Wykorzystanie zaleceń i wskazówek dotyczących powyższych aspektów stosowania promieniowania mikrofalowego opartych na licznych badaniach umożliwi szybki optymalny dobór procedury suszenia.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Algee B. B., Callaghan J. C., Creelman A. E., Rapid Determination of Moisture Content in Soil Specimens Using High Power Microwaves, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-7(1)196, str. 941–943
- [2] AS 1289.2.1.4:2015 Methods of Testing Soils for Engineering Purposes. Method 2.1.4: Soil Moisture Content Tests – Determination of the Moisture Content of a Soil – Microwave-oven Drying Method (Subsidiary Method), Standards Australia: Sydney, Australia, 2015
- [3] ASTM D4643-08:2008 Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by microwave heating, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 2008
- [4] ATT-15/96 Moisture Content. Part IV. Microwave Oven Method, Available from Alberta Transportation Test Procedures, [www.transportation.alberta.ca](http://www.transportation.alberta.ca), 1996
- [5] Balscio C. C., Calibration of Microwave-Oven Drying Techniques versus Air-Oven Methods for Measurement of Peat Moss Moisture Content, *Applied Engineering in Agriculture*, 8(1)1992, str. 197–200
- [6] Berney IV E. S., Kyzar J. D. and Oyelami L. O., Device Comparison for Determining Field Soil Moisture Content. Geotechnical and Structures Laboratory. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Final report ERDC/GSL TR-11-42, 2012
- [7] Carter M., Bentley S., Practical Guidelines for Microwave Drying of Soils, *Canadian Geotechnical Journal* 23(4)1986, str. 598–601
- [8] Chung P., Ho T., Study on the Determination of Moisture Content of Soils by Microwave Oven Method, Hong Kong, Geo Report 221, 2008
- [9] Cormick A., Comparing Different Heating Methods for Determination of Moisture Content in Soils. Ph.D. Thesis in University of Southern Queensland, 2015
- [10] Creelman A. E., Vaughan V. E., Determination of Moisture Content of Soil Specimens by Microwave Heating. Proceedings of the Convention of the Canadian Good Roads Association, 1966
- [11] Daod H., Determination of Moisture Content and Liquid Limit of Foundations Soils, using Microwave Radiation, in the Different Locations of Sulaimani 98 Governorate, Kurdistan Region-Iraq. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6/2012, str. 1297–1303
- [12] Gaspard K. J., Rapid Drying Soils with Microwave Ovens. LTRC Project No. 99-3GT, State Project No. 736-99-0893 conducted for Louisiana Department of Transportation and Development, Louisiana Transportation Research Center, 2002, str. 74
- [13] Gilbert P. A., Computer Controlled Microwave Oven System for Rapid Water Content Determination. Geotechnical Laboratory, Department of the Army Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Technical Report GL-88-21, 1988, str. 121
- [14] Gilbert P. A., Rapid Water Content by Computer Controlled Microwave Drying *Journal of Geotechnical Engineering* 117(1)1991, str. 118–138
- [15] Gołębiwska A., Połoński M., Witkowski M., Soil Moisture Research with the Microwave Method (in Polish), *Acta Scientiarum Polonorum – Architectura* 2(1)2003, str. 63–78
- [16] Hagerty D. J., Ullrich C. R., Callan C. A., Microwave Drying of Highly Plastic and Organic Soils *Geotechnical Testing Journal*, 13(2)1990a, str. 142–145
- [17] Hagerty D. J., Ullrich C. R., Denton M. M., Microwave Drying of Soils *Geotechnical Testing Journal*, 13(2)1990b, str. 138–141
- [18] Jalilian J., Moghaddam S. S., Tagizadeh Y., Accelerating Soil Moisture Determination with Microwave Oven. *J. of Chinese Soil and Water Conserv.*, 48(2)2017, str. 101–103
- [19] Jastrzębska M., Tokarz K., Strength Characteristics of Clay – Rubber Waste Mixtures in Low-Frequency Cyclic Triaxial Tests. *Minerals*, 11, 315, 2021
- [20] Jastrzębska M., Practical Application of the Microwave Oven in the Geotechnical Laboratory. *Architecture, Civil Engineering, Environment* 12/2019, str. 91–104
- [21] Kaczmarek Ł., Jastrzębska M., Wejrzanowski T., The Impact of Microwave Drying on the Structure of Exemplary Soils – Insights Using X-ray Microtomography, *Materials* 2022, 15, 5891
- [22] Kowalska M., Jastrzębska M., Pęcznienie mieszanek gruntu spoistego z granulatem gumowym, monografia. Analizy i doświadczenia w geoinżynierii, praca zbiorowa pod redakcją J. Bzówki i M. Łupieżowca, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 651, 2017, str. 261–270
- [23] Kramarenko V. V., Nikitenkov A. N., Matveenkov I. A., Yu Molokov V. and Vasilenko Ye. S., Determination of Water Content in Clay and Organic Soil Using Microwave Oven. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 43, 2016, str. 1–7
- [24] Kramarenko V. V., Nikitenkov A. N., Yu Molokov V., Shramok A. V. and Pozdeeva G. P., Application of Microwave Method for Moisture Determination of Organic and Organic-Mineral Soils. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 33, 2016, str. 1–7
- [25] NF P 94-049-1: 1996 Sols: Reconnaissance et Essais – Détermination de la Teneur en Eau Pondérale des Matériaux – Partie 1: Méthode de la Dessiccation au Four à Micro-ondes. AFNOR Normalisation: La Plaine Saint-Denis, France, 1996
- [26] PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania. PKN, Warszawa, 2006
- [27] Routledge D. B. and Sabey B. R., Use of a Microwave Oven for Moisture Determination in a Soil Science Laboratory, *Journal of Agronomic Education* 5/1976, str. 25–27
- [28] Ryley M. D., The Use of a Microwave Oven for the Rapid Determination of Moisture Content of Soils. Report LR280, Road Research Laboratory, Crowthorne, England, 1969