

KONCEPCJA METODY WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA POROWATOŚCI MATERIAŁÓW O BUDOWIE KOMÓRKOWEJ

Gabriel Czachor

Institut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Opracowano metodę wyznaczenia współczynnika porowatości materiałów o budowie komórkowej, w których dominuje porowatość zamknięta. Określono warunki realizacji testów pomiarowych oraz sformułowano wymagania dotyczące dokładności wykonania próbek oraz połączenia tłok-cylinder. Wyznaczona tą metodą porowatość tkanki chrzanu, opisana wartością współczynnika porowatości, wynosiła $0,5 \pm 13,0\%$.

Słowa kluczowe: współczynnik porowatości, materiał o budowie komórkowej

Wstęp

Porowatość jest właściwością substancji stałych polegającą na istnieniu w nich porów, tj. przestrzeni niewypełnionych daną substancją. Porowatość na ogół charakteryzuje się poprzez podanie ilości i wielkości porów oraz opis ich rozmieszczenia w badanej przestrzeni próbki. Tak postępuje się w odniesieniu do materiałów glebowych, także materiałów ceramicznych i porowatych tworzyw sztucznych. Najczęściej objekty te badane są metodą porozymetrii rtęciowej oraz poprzez analizę obrazu utrwalonej struktury, np. przy pomocy żywicy lub stopu Wood'a [Konstankiewicz 1998; Czachor 2005; Małolepszy 2004]. Możliwe jest również wyznaczenie objętościowego udziału fazy gazowej w odniesieniu do objętości całej badanej próbki, czyli określenie wartości współczynnika porowatości [Pazdro 1983]. Dotyczy to materiałów będących w stanie rozdrobnienia (np. siewki traw, słomy), materiałów o strukturze włóknistej (wytwory włókiennicze), masy skalne [Żák 1988; Leśnikowski 2002].

W przypadku porowatości otwartej, dominującej w wymienionych wyżej materiałach, wykorzystywane są możliwości penetracyjne medium, które nie wnikając w materię badanej substancji, wypełnia istniejące pory. Najczęściej są to gazy obojętne lub powietrze oraz ciecze, np.: woda, rtęć, propanol, toluen. W metodach tych wykorzystano prawa przemian gazowych, Boyle-Mariotta, lub prawo Archimedesesa [Konstankiewicz 1998; Żák 1988, Leśnikowski 2002].

Nie można jednak zastosować powyższych metod w odniesieniu do materiałów roślinnych o budowie komórkowej, zawierających znaczne ilości wody. Istniejący w tych roślinach układ przewietrzający jest niezwilżalny. Do wypełnienia przestworów międzykomórkowych cieczą, konieczne jest wytworzenie podciśnienia. Istotne jest również to, że system

kanałów, komór i por może stanowić oddzielne bloki ze względu na wielkości występujących w nich elementów [Hejnowicz 2002]. Tym samym w omawianych strukturach dominuje porowatość zamknięta. Struktury takie badane są metodami nieinwazyjnymi poprzez analizę obrazu, np. przy wykorzystaniu mikroskopu konfokalnego [Konstankiewicz 2003].

Ograniczona skala tych analiz oraz zróżnicowanie anatomiczne badanych tkanek uzasadniały potrzebę opracowania metody wyznaczania wskaźnika charakteryzującego badany obiekt w skali makro. Zaproponowano metodę ściskania próbki w szczelnym cylindrze, stosowaną między innymi do wyznaczania współczynnika Poissona [Hughes 1972].

Cel pracy

Celem badań było opracowanie metody wyznaczania współczynnika porowatości mięszu wybranego warzywa, obejmującej opracowanie koncepcji konstrukcji przyrządu oraz optymalizację warunków realizacji pomiarów. Przyjęto przy tym następujące założenia:

- w układzie tłok-próbka-cylinder elementem odkształcalnym jest badana tkanka,
- w trakcie pomiaru nie ma ubytku masy próbki.

Sformułowano hipotezę: zmiany zależności $\sigma=f(\varepsilon)$ oraz $d\sigma/d\varepsilon=f(\varepsilon)$ rejestrowane podczas ściskania próbki w cylindrze, charakteryzują proces ujednorodnienia struktury badanej tkanki.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach, w których stopniowo zwiększano wymiar charakterystyczny (średnicę zastępczą), uzyskując bardziej precyzyjnie dopasowanie do komory pomiarowej.

Ściskanie próbek realizowano w przyrządzie, którego konstrukcja została opisana w zgłoszeniu patentowym [Czachor 2007a]. Grubość ścianki walcowej części cylindra wynosiła 8 mm, luz w parze kinematycznej tłok-cylinder wynosił 0,02 mm oraz 0,09 mm. Dla zapewnienia równomiernego usuwania fazy gazowej z tkanki ustalono prędkość ściskania obiektu równą $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Obiektem badań był korzeń chrzanu odmiany Czeski, którego aerenchymatyczna tkanka cechuje się znaczną porowatością. Wycinano próbki w kształcie walca o średnicach zastępczych zmieniających się w przedziale od ϕ 12 mm do ϕ 14 mm. Wysokość próbki stanowiła 1,5 krotność średnicy. Wartość średnicy zastępczej obliczono na podstawie pomiarów dokonywanych w oparciu o metodykę opisaną w zgłoszeniu patentowym [Czachor 2006]. Do weryfikacji wykorzystano pomiar objętości próbki dokonywany na zestawie do wyznaczania gęstości ciał stałych i cieczy (waga hydrostatyczna) firmy Nadwag. Oszacowany błąd wyznaczenia średnicy zastępczej wynosił odpowiednio $\pm 0,02$ mm oraz $\pm 0,03$ mm.

W opracowanej metodzie zasadniczą rolę odgrywa dopasowanie próbki do komory pomiarowej przyrządu. Stopień dopasowania określono współczynnikiem ξ , definiowanym jako stosunek wartości średnicy zastępczej d_z do średnicy cylindra d_c .

Testy ściskania realizowano na maszynie Instrona 5566, z głowicą pomiarową 10 kN. Rejestrowano wartości siły i przemieszczenia osiowego, do opisanego przebiegu zmian

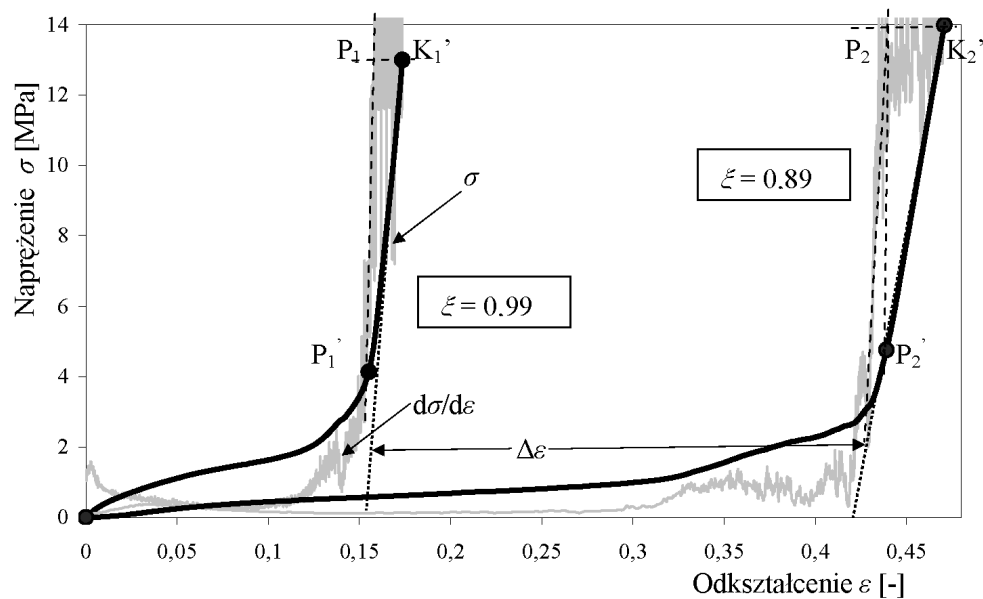
naprężenie–odkształcenie. Na każdym wykresie $\sigma(\varepsilon)$ wyznaczono położenie punktu umownego P (yield point), od którego pochodna $d\sigma/d\varepsilon = \text{const}$. Można przyjąć, że jest to moment, w którym badana próbka wykazuje cechy układu dwufazowego.

Istota opracowanej metody polega na sporządzeniu charakterystyki $\rho = f(\sigma)$ określającej zmianę chwilowej wartości gęstości ściskanej próbki w funkcji naprężenia. Do sporządzenia tej charakterystyki dodatkowo mierzono masę próbki oraz masę wyciskanej cieczy z dokładnością $\pm 0,0001\text{g}$. Metodę wyznaczenia względnej masy cieczy μ_c opisano w zgłoszeniu patentowym [Czachor 2007b].

Wyniki testów opracowano z wykorzystaniem programu Statistica 7.0.

Wyniki badań

Na rysunku 1 zestawiono przykładowe przebiegi $\sigma = f(\varepsilon)$ oraz ich pochodnych $d\sigma/d\varepsilon$ dla wartości współczynnika ξ 0,99 oraz 0,89. Natomiast na rysunku 2 zestawiono odpowiadające tym przebiegom zmiany wartości gęstości ρ w funkcji naprężenia σ . Dla tej funkcji wyznaczono odcinek P''-K'', w którym $\rho(\sigma)$ ma przebieg liniowy. Odpowiada to odcinkowi P'-K' (rys. 1), dla którego $d\sigma/d\varepsilon = \text{const}$. Punkty: P', P'' oraz K'' są kolejnymi transformacjami położenia punktów charakterystycznych P, K' w różnych układach współrzędnych.

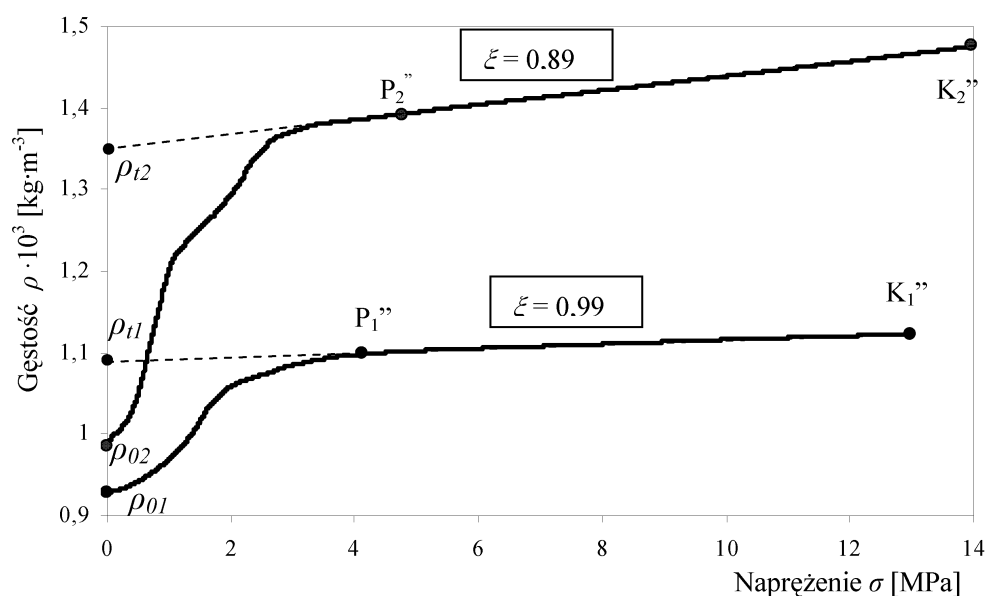


Rys. 1. Zestawienie przykładowych przebiegów $\sigma(\varepsilon)$ oraz $d\sigma/d\varepsilon$ dla różnych wartości współczynnika ξ , luz 0,02 mm

Fig. 1. Exemplary courses of $\sigma(\varepsilon)$ and $d\sigma/d\varepsilon$ for various values of the coefficient ξ , 0.02 mm clearance

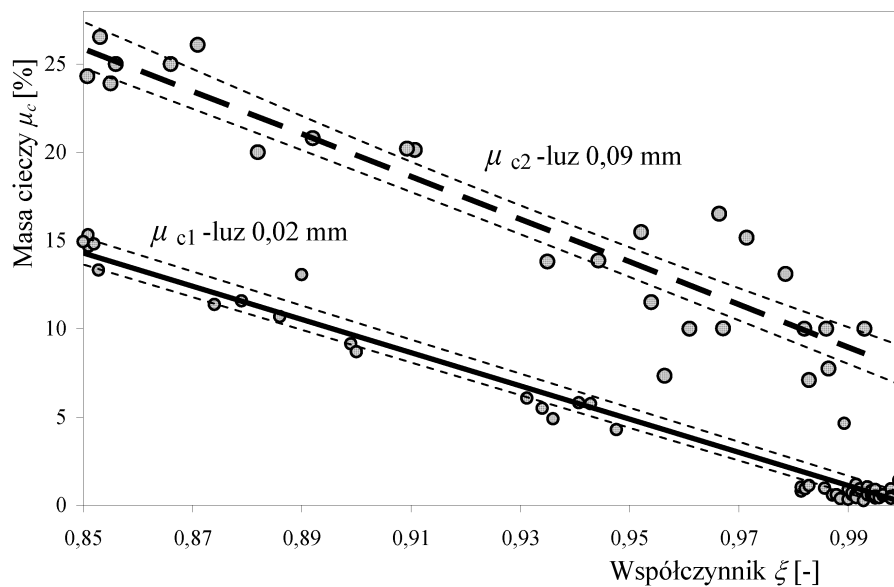
Stałe przyrosty wartości gęstości ρ , rejestrowane począwszy od punktu P'', mogą być konsekwencją zaniku fazy gazowej. Oznacza to likwidację porowatej struktury, oraz stopniowe zagęszczanie samej materii tkanki. Aproksymacja odcinka P''-K'' prostą, pozwala wyznaczyć wartość gęstości teoretycznej ρ_t a na tej podstawie obliczyć wartość współczynnika porowatości Φ . Metodyka wyznaczania wartości współczynnika Φ została przedstawiona w zgłoszeniu patentowym [Czachor 2007a].

Na rysunku 3 zestawiono zmiany ilości cieczy wyciskanej z próbek, testowanych w układzie tłok-cylinder o luzie 0,02 mm oraz 0,09 mm w zależności od wartości współczynnika ξ . Natomiast na rysunku 4 przedstawiono zależność współczynnika porowatości Φ od wartości współczynnika ξ .

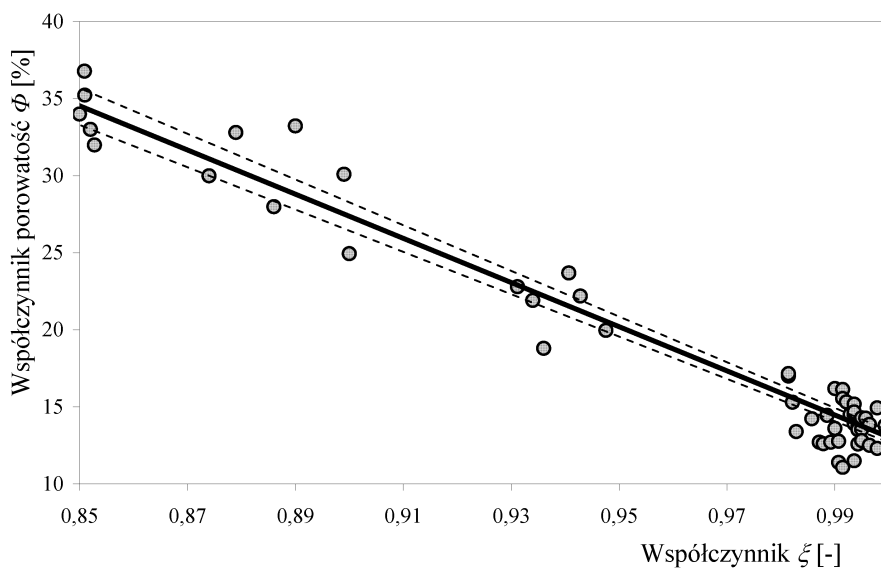


Rys. 2. Przykładowe zmiany wartości gęstości ρ w zależności od naprężenia σ dla różnych wartości współczynnika ξ , luz 0,02 mm

Fig. 2. Exemplary changes in the values of the density p , depending on the stress σ for various values of the coefficient ξ , 0.02 mm clearance



Rys. 3. Zestawienie zmian masy cieczy μ_c w zależności od wartości współczynnika ξ
 Fig. 2. Changes in the mass of the liquid $\mu_{c,s}$, depending on the value of the coefficient ξ



Rys. 4. Zależność współczynnika porowatości Φ od wartości współczynnika ξ
 Fig. 2. Dependence of the porosity coefficient Φ on the value of the coefficient ξ

Tabela 1. Wartości współczynników równania $y = a \cdot x + b$ dla następujących zależności
 Table 1. Values of the coefficients of the equation $y = a \cdot x + b$ for the following dependencies

Zależność	a	b	R^2
$\mu_{c1} = f(\xi)$	-94,17	94,34	0,972
$\mu_{c2} = f(\xi)$	-120,80	128,54	0,870
$\Phi = f(\xi)$	-143,34	156,38	0,950

Źródło: obliczenia własne autora

Analiza przebiegów przedstawionych na rysunku 1 potwierdza istotny wpływ na charakter zmian $\sigma = f(\varepsilon)$ stopnia dopasowania próbki do komory pomiarowej, określonego wartością współczynnika ξ . Szczególnie uwidacznia się to w przebiegu fazy quasi-swobodnego ściskania, w której próbka o średnicy zastępczej znacznie mniejszej od nominalnej, podlega jednoczesnej deformacji objętościowej i postaciowej. W efekcie faza intensywnego wzrostu oporów, opisana odcinkiem $P_2' - K_2'$, występuje przy odkształceniu osiowym, powiększonym o wartość $\Delta\varepsilon$.

Stopień dopasowania próbki do komory pomiarowej opisany wartością współczynnika ξ wpływa w sposób zasadniczy na przebieg funkcji $\rho(\sigma)$, rysunek 2. Ma to ścisły związek z charakterem odkształceń, jakim podlegają próbki ściskane w szczelnym cylindrze. Tkanika próbki podlegającej deformacji objętościowej i postaciowej traci znaczne ilości cieczy, rysunek 3. Dlatego wartości ρ_{11} oraz ρ_{12} różnią się znacznie.

Zapewnienie szczelności połączenia tłok-cylinder, obciążonego do poziomu 14 MPa, takiej, aby możliwy był wypływ gazów, wymagało określenia optymalnego luzu. Warunki takie spełniało pasowanie H7/h6. Jak wynika z rysunku 3 zależność pomiędzy względną masą cieczy μ_c wyciskanej z próbki a wartością współczynnika ξ jest istotna. Dla próbek o średnicach zastępczych zbliżonych do 12 mm ($\xi \approx 0,85$) ubytek ich masy wynosił dla następujących wartości luzu: 0,02 mm oraz 0,09 mm, odpowiednio $14,3 \pm 1,1\%$ oraz $25,9 \pm 2,2\%$. Dla próbek o średnicy zastępczej równej 14 mm wartości μ_c wynosiły odpowiednio $0,2 \pm 0,2\%$ oraz $7,8 \pm 1,7\%$.

Średnia wartość μ_c wyliczona dla wyników testu ściskania próbek w cylindrze o luzie 0,02 mm dla średnic d_z zawierających się w przedziale od 13,95 do 14,0 mm wynosiła 0,55%. Wartość tą można przyjąć jako dopuszczalny błąd proponowanej metody wyznaczania wartości współczynnika porowatości Φ . Jak wynika z rysunku 4 zmniejszenie wartości współczynnika ξ odpowiada wzrostowi wartości współczynnika Φ . W rzeczywistości zmiana ta jest pozorna, ponieważ przyrost osiowego odkształcenia próbki $\Delta\varepsilon$ nie może być miarą przyrostu porowatości. Dla luzu 0,02 mm oraz przy wartości $\xi = 1$ porowatość tkanki chrzanu, opisana wartością współczynnika Φ wynosiła $13,0 \pm 0,5\%$.

Podsumowanie

Opracowana metoda umożliwiła poprzez wykonanie serii testów, wyznaczenie wartości współczynnika porowatości materiałów o budowie komórkowej, w których dominuje porowatość zamknięta. Zaprojektowany do badań przyrząd, zapewniał zachowanie stałych

warunków pomiaru, co pozwalało na uzyskanie powtarzalnych wyników. Istotna jest dokładność wykonania próbek oraz połączenia tłok-cylinder. Dokładniejsze dopasowanie próbek do komory pomiarowej, opisane wartością współczynnika ξ , skutkuje zmniejszeniem wypływu cieczy. Dla próbek o średnicy zastępczej równej nominalnej ($\xi=1$) ubytek jej masy wynosił 0,55%. Wyznaczona tą metodą wartość współczynnika porowatości dla tkanki chrzanu wynosiła $13,0\pm 0,5\%$.

Bibliografia

- Czachor H.** 2005. Próba zastosowania stopu Wood'a do oznaczeń makroporowatości gleby. *Acta Agrophysica*. 6(1). s. 43-52.
- Czachor G.** 2006. Przyrząd do pomiaru odkształceń próbek, zwłaszcza z materiałów o budowie komórkowej. Akademia Rolnicza we Wrocławiu. Wrocław. Polska. Opis zgłoszenia patentowego P-378593 z 29.12.2005. Opubl. BUP. 13. s. 32.
- Czachor G.** 2007a. Przyrząd do wyznaczania współczynnika porowatości próbek oraz sposób jego wyznaczania. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Wrocław. Polska. Opis zgłoszenia patentowego P-381393 z 27.12.2006. Opubl. BUP. 13. s. 23.
- Czachor G.** 2007b. Przyrząd do pobierania cieczy wyciskanej z próbki oraz sposób określania jej ilości. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Wrocław. Polska. Opis zgłoszenia patentowego P-381737 z 12.2.2007. Opubl. BUP. 16. s. 23-24.
- Hejnowicz Z.** 2002. Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych. Organy wegetatywne. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa. s. 110-117.
- Hughes H., Segerlind L.J.** 1972. A rapie mechanical metod for determining Poisson's ratio in biological materials". *ASAE*. s. 72-310.
- Konstankiewicz K., Księżopolska A., Skawiński J.** 1998. Zastosowanie porozymetrii rtęciowej do badań mikrostruktury materiałów rolniczych. *Zeszyty PPNR*. z.461. s. 503-521.
- Konstankiewicz K. i in.** 2003. Wyznaczenie minimalnej liczby komórek do analizy geometrycznych parametrów struktury tkanki bulwy ziemniaka. *Agrophysica*. 2. s. 579-587.
- Leśnikowski J.** 2002. Przyrząd do pomiaru porowatości wykorzystujący metodę objętościowo-ciśnieniową. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. 7-8. s. 65-68.
- Małolepszy J.** (red) 2004. Materiały budowlane. Podstawy technologii i metody badań. Wyd. AGH. Kraków. s. 155-168.
- Pazdro Z.** 1983. Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa. s. 60-65.
- Žák K., Bain J.** 1988. Pórovitost roslinných materiálů. *Zemědělska Technica*. 34, s. 481-491.

A METHOD FOR DETERMINING THE POROSITY COEFFICIENT OF CELLULAR MATERIALS

Abstract. A method for determining the porosity coefficient of cellular materials, in which closed porosity predominates, has been developed. The conditions for measuring tests are specified and the requirements concerning the accuracy in making samples and the piston-cylinder connection are formulated. The porosity of the horseradish tissue determined that way, described by the value of the porosity coefficient, was $13.0 \pm 0.5\%$.

Key words: porosity coefficient, cellular material

Adres do korespondencji:

Gabriel Czachor; e-mail: czachor@imr.ar.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chełmińskiego 37/41
51-630 Wrocław