

Effect of imbibition on the volume fraction of grains in the suspension and changes in its physical properties

Wpływ imbibicji na udział objętości ziaren w zawieszynie oraz zmiany jej cech fizycznych



DOI: 10.15199/62.2026.9.2

The results of measurements of the actual vol. fraction and d_p of porous grains in the suspension were presented. Nine org. materials with varying water absorption and imbibition susceptibility were used, as well as 2 liqs. with different polar properties. The results of studies on the viscosity of the suspension of water-swelling hemp fibers were also presented. It was demonstrated that the actual vol. fraction of grains in the suspension should not be detd. solely based on their dry mass. The hemp suspension proved to be a non-Newtonian fluid, despite its low dry solid content.

Keywords: suspension, porous grains, imbibition, volume fraction, density, viscosity

Przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistego udziału objętości i gęstości porowatych ziaren w zawieszynie. Wykorzystano dziewięć materiałów organicznych o różnej nasiąkliwości oraz podatności na imbibicję, a także dwie ciecz o odmiennych cechach polarnych. Przedstawiono też wyniki badań lepkości zawiesiny pęczniejących w wodzie włókien konopnych. Wykazano, że rzeczywisty udział objętości ziaren w zawieszynie nie powinien być wyznaczany jedynie na podstawie ich masy w stanie suchym. Z kolei zawiesina konopi okazała się płynem nienewtonowskim, pomimo małej zawartości suchej fazy stałej.

Słowa kluczowe: zawiesina, ziarna porowate, imbibicja, udział objętości, gęstość, lepkość

Skład mieszanin dwufazowych zawierających ciało stałe, a szczególnie zawiesin, zwyczajowo przyjęło się wyrażać masą ziaren w stanie suchym. Takie podejście ma uzasadnienie praktyczne i wynika ze sposobu komponowania zawiesin lub przyjętej metody pomiaru ich składu. Najczęściej porcja mieszaniny tworzona jest w wyniku rozproszenia określonej masy suchych ziaren w odmierzanej objętości cieczy. Z kolei ustalając skład zawiesiny, zazwyczaj pobiera się jej próbkę o danej objętości, wstępnie ją odwadnia, a następnie suszy i wyznacza masę końcową wydzielonych ziaren. Jednak niekiedy rzeczywisty udział faz w układzie ciecz-ciało stałe może być zupełnie inny, a tym samym inne będą jego właściwości fizyczne. Ich prawidłowe prognozowanie jest niezbędne dla właściwego projektowania i eksploatacji np. układów transportu hydraulicznego¹⁾, instalacji do produkcji paliw zawiesinowych²⁾ lub materiałów na bazie celulozy³⁾. Liczną grupę zawiesin

stanowią ścieki przemysłowe i komunalne, a także płynne substancje zawierające rozdrobniony materiał roślinny⁴⁾, czyli tzw. biomasę.

Przyczyną różnic w ocenie składu jest porowatość ziaren, zwłaszcza takich, których materiał ulega procesowi imbibicji. W jej wyniku struktura ziaren, zawierająca otwarte i początkowo zamknięte pory, ulega rozluźnieniu, a to zwiększa ilość wchłanianej cieczy. Rośnie też nieco rozmiar ziaren, jednak głównym powodem wzrostu udziału ich objętości jest spadek ilości cieczy wolnej (niezwiązanej), a tym samym objętości całej zawiesiny. W sposób poglądowy przebieg procesu ilustruje schemat pokazany na rys. 1. W chwili początkowej zawiesinę o objętości V_0 tworzy ciecz wolna o objętości $V_{cw,0}$ oraz porowate ziarna. Po pewnym czasie pory te wypełniają się jednak cieczą, zatem jej wolna ilość zmniejsza się o ΔV_1 . Jeżeli dodatkowo materiał ziaren będzie ulegał imbibicji, to do ich wnętrza „wessana” zostanie kolejna ilość cieczy. W stanie końcowym objętość zawiesiny wyniesie V_2 , a cieczy wolnej pozostanie w niej $V_{cw,2}$. Masa ziaren, a tym samym ich gęstość, zwiększy się, przy czym masa i objętość rzeczywistej fazy stałej nie ulegnie zmianie.

Przedstawiony efekt ujawnia się szczególnie wyraźnie w odniesieniu do rozproszonych w wodzie materiałów pochodzenia roślinnego, czyli dużej grupy tzw. biozawiesin. Jeżeli zmiany udziału faz będą duże, to substancja dwufazowa klasyfikowana początkowo jako rozcieńczona⁵⁾ w rzeczywistości taka nie będzie. Matematyczny opis procesów realizowanych z jej udziałem staje się wtedy zazwyczaj inny. Problemem jest



Dr hab. inż. Jerzy HAPANOWICZ, prof. PO (ORCID: 0000-0002-0238-2597), w roku 1988 ukończył studia w Instytucie Budowy Maszyn ówczesnej Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu (obecnie Politechnika Opolska). Pracuje na stanowisku profesora i kieruje Katedrą Inżynierii Procesowej i Środowiska na Wydziale Mechanicznym tejże uczelni. Specjalność – procesy wymiany pędu, ciepła i masy w inżynierii środowiska, zjawiska zachodzące w układach dwufazowych i reologia.

* Adres do korespondencji:

Katedra Inżynierii Procesowej i Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. Mikolajczyka 5, 45-219 Opole, tel.: (77) 449-83-69, e-mail: j.hapanowicz@po.edu.pl

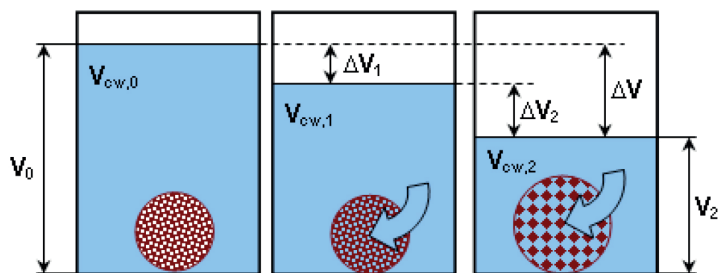


Fig. 1. Changes in the volume of liquid phase in a suspension of porous and swelling grains

Rys. 1. Zmiany objętości fazy ciekłej w zawieszynie porowatych i pęczniających ziaren

również poprawne oszacowanie podstawowych właściwości substancji dwufazowej, takich jak jej gęstość lub zdolność do płynięcia⁶⁾. Okazuje się bowiem, że w proponowanych do tego równaniach uwzględniany jest często właśnie udział objętości fazy rozproszonej, a nie jej masy.

W pracy podjęto próbę eksperymentalnej oceny zmiany udziału objętości ziaren w zawieszynie na skutek wchłaniania przez nie cieczy, tworzącej jednocześnie w danym układzie dwufazowym środowisko rozpraszające.

Część doświadczalna

Materiały

W trakcie eksperymentów stosowano 3 ciecze. Pierwszą był izopropanol, którego użyto podczas wyznaczania rzeczywistej (materiałowej) gęstości ziaren fazy stałej. Ciecz drugą stanowiła zdemineralizowana i odgazowana woda. Za jej pomocą wykonano zarówno kalibrację objętości piknometrów, jak i spreparowano jedną z grup badanych zawiesin. Trzecią cieczą był olej wrzecionowy o małej lepkości. Został wykorzystany do sporządzenia drugiej grupy zawiesin, jako niewywołująca imbibicji ciecz hydrofobowa. Jako fazę stałą wykorzystano kilka materiałów. Każdy z nich charakteryzował się porowatą lub włóknistą strukturą, jednak różnił pochodzeniem, stopniem przetworzenia oraz potencjalną podatnością na imbibicję. Wyjątek stanowiły drobne jednorodne kulki szkła, które wykorzystano do weryfikacji poprawności przyjętej metodyki prowa-

dzenia badań. Rzeczywisty widok materiałów (już po ich rozdrobnieniu) ilustrują fotografie przedstawione na rys. 2.

Jako fazę stałą wykorzystano: łodygi konopi (M1), słomę (M2) i siano (M6) – jako typowe materiały roślinne, łupiny orzecha włoskiego (M4), wyłoki buraków (M5), fusy palonej kawy ziarnistej (M3) i trociny (M7) – będące przykładem bioodpadów poprodukcyjnych, możliwych do dalszego przetwarzania w formie zawiesin, biomasę alg (M9), osad ściekowy (M8) – jako składniki biozawiesin spotykanych np. przy produkcji biopaliw lub w inżynierii środowiska. Osad ściekowy nie był aktywny biologicznie, gdyż korzystano z poddanego chemicznej higienizacji i suszeniu wysokotemperaturowemu produktu odpadowego z oczyszczalni ścieków. Również algi nie były organizmami żywymi. W ich przypadku korzystano z odwodnionego mechanicznie, a następnie wysuszonego materiału, będącego dodatkiem do paliw alternatywnych. Z kolei drobne kulki szklane (M10) stanowiły jednolity, nienasiąkliwy materiał porównawczy.

Każdy surowiec wymagał wstępnej preparacji oraz ustalenia rzeczywistej gęstości materiałowej w stanie suchym.

Metodyka badań

Realizacja przyjętego planu eksperymentów wymagała użycia kilku zestawów pomiarowych, których większość przedstawiono na rys. 3. Pomiary masy wykonano za

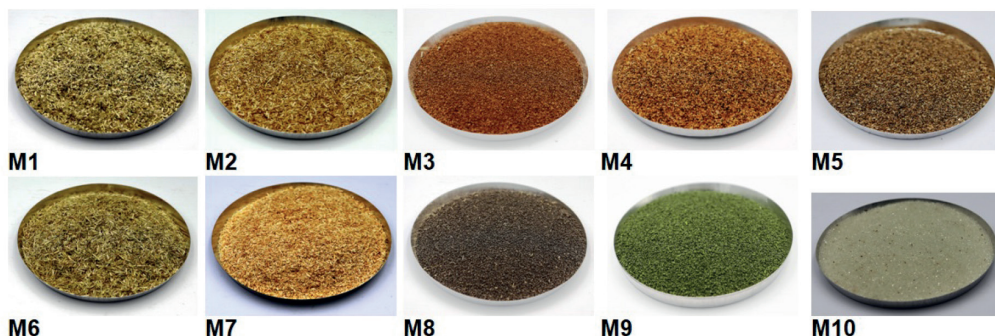


Fig. 2. Materials used for research; description of symbols in the text

Rys. 2. Materiały wykorzystane do badań; opis symboli w tekście

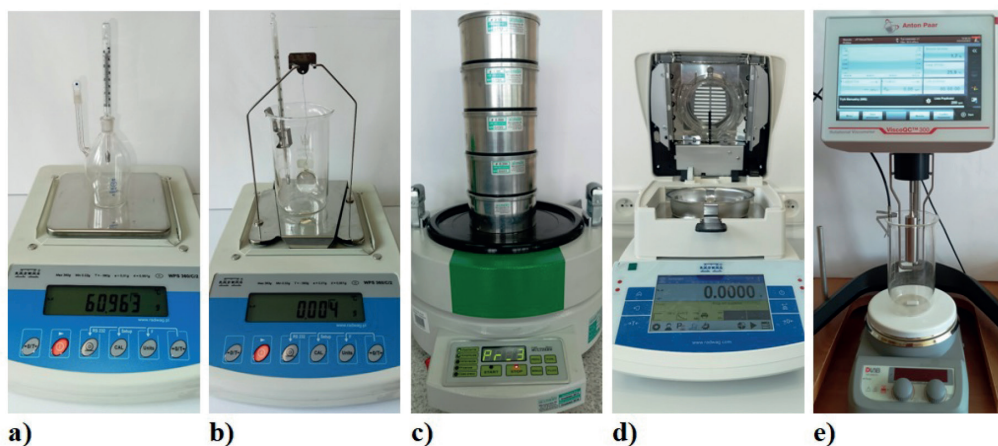


Fig. 3. General view of the sets used for: a) calibrating pycnometers and measuring changes in suspension density, b) measuring the density of pure liquids, c) determining grains size, d) obtaining dry material, e) measuring the viscosity of liquids and suspensions

Rys. 3. Widok ogólny zestawów wykorzystanych do: a) kalibracji piknometrów oraz pomiaru zmian gęstości zawiesin, b) pomiaru gęstości czystych cieczy, c) ustalenia rozmiaru ziaren, d) uzyskania materiału suchego, e) pomiaru lepkości cieczy i zawiesiny

pomocą elektronicznej wagi laboratoryjnej klasy II firmy RADWAG o symbolu WPS 360/C/2, zakresie pomiarowym do 360 g, działce legalizacyjnej 10 mg i dokładności wskazań 1 mg. Waga posiadała funkcję tarowania, co pozwalało na bezpośredni pomiar różnicy mas i zmniejszało jego niepewność. Poza tym dostarczona przez producenta wagi specjalistyczna przystawka umożliwiała pomiar gęstości cieczy jednorodnej, co również wykorzystano w trakcie badań.

Do oznaczania gęstości stosowano zestaw kilku szklanych piknometrów o pojemności nominalnej 100 mL, wyposażonych w termometry rtęciowe o dokładności wskazań $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Dzięki łączeniu „na szlif” możliwe było ich zastąpienie króćcem umożliwiającym połączenie piknometrów z instalacją próżniową. Pojemność każdego piknometrów została zweryfikowana poprzez dokładną kalibrację jego objętości.

Do rozdrabniania stosowano laboratoryjny udarowy młynek tnący o pojemności przestrzeni roboczej 100 mL i prędkości obrotowej noża 20000 rpm.

Używano wstrząsarki wibracyjnej firmy MULTISERW, z zestawem sit o rozmiarze oczek w przedziale wartości 2,0–0,25 mm.

Stosowano wagosuszkę firmy RADWAG o symbolu MA 50/1.X2.A, dopuszczalnym obciążeniu 50 g, dokładności wskazań 0,1 mg i zakresie temperatur do 140°C .

Wykorzystano lepkościomierz rotacyjny firmy Anton Paar o symbolu Visco QC 300L z wrzecionami do pomiaru lepkości w zakresie $0,1\text{--}6 \cdot 10^6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (w badaniach stosowano jednak tylko 1 wrzeciono L2) oraz wbudowanym układem do pomiaru temperatury i automatyczną akwizycją danych. Lepkościomierz wyposażono w typowe laboratoryjne mieszadło magnetyczne.

Stosowana cieplarka laboratoryjna o pojemności 18 L była wyposażona w termostat zapewniający utrzymywanie zadanej temperatury z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Dla zachowania stałych warunków temperaturowych eksperymentu wszystkie wykorzystane ciecze, przygotowane ziarna fazy stałej, a szczególnie piknometry ze spreparowanymi zawieszinami przechowywano w komorze cieplnej. Panowała w niej temp. 22°C , którą przyjęto jako jedną stałą temperaturę dla całości eksperymentów. Pomiary z wykorzystaniem wagi odbywały się poza komorą, ale również wtedy temperatura badanej substancji podlegała kontroli. W efekcie pozwalało to uniknąć konieczności uwzględniania wpływu zmian temperatury na objętość piknometrów, właściwości cieczy oraz warunki potencjalnej imbibicji.

Pomiar gęstości cieczy

Do ustalenia właściwości fizycznych cieczy (głównie ich gęstości) nie wykorzystano danych tablicowych. Wyznaczono je, wykonując własne oznaczenia. Ustalenie gęstości cieczy za pomocą wagi sprowadzało się do pomiaru zmiany masy Δm_n niezanurzonego i całkowicie zanurzonego w niej szklanego nurnika o objętości $V_n = 9,7819 \text{ cm}^3$. Gęstość cieczy ρ_c wyrażało równanie (1):

$$\rho_c = \Delta m_n / V_n \quad (1)$$

które równocześnie stanowiło bazę do obliczenia niepewności złożonej pomiaru metodą różniczki zupełnej.

Dla pełniejszej charakterystyki cieczy oznaczono również jej lepkość η_c oraz napięcie powierzchniowe σ_c . Nie miały one jednak bezpośredniego znaczenia dla ilościowej oceny wyników zasadniczej części badań, zatem nie wymagały ustalenia niepewności pomiaru, który wykonano lepkościomierzem rotacyjnym i stalagmometrem.

Kalibrację rzeczywistej objętości piknometrów V_p wykonano za pomocą cieczy o gęstości ρ_c , którą była woda. Pomiary sprowadzały się do ustalenia przyrostu masy piknometrów pustego $m_{p,0}$ o masę wypełniającą go całkowicie wody Δm_p . Jego objętość oraz niepewność kalibracji wyznaczano, korzystając z równania (2):

$$V_p = \Delta m_p / \rho_c \quad (2)$$

Pomiar gęstości rzeczywistej fazy stałej

Przygotowanie materiałów do spreparowania badanych zawieszin, a szczególnie do uprzedniego wyznaczenia ich materiałowej gęstości rzeczywistej, przebiegało w 2 etapach. W 1. etapie materiały (oprócz szkła) rozdrobniono w młynku udarowym, a następnie przesiano przez zestaw sit umieszczonych na wstrząsarce. W ten sposób wyodrębniono frakcje ziaren o rozmiarze 0,5–1 mm, wykorzystane w dalszej części eksperymentów. W 2. etapie ziarna poddano długotrwałemu suszeniu, w celu usunięcia naturalnie zaadsorbowanej w ich porach wilgoci. Suszenie prowadzono za pomocą wagosuszkarki w temp. 104°C do chwili, w której przez 5 min nie był już przez nią wskazywany ubytek masy materiału. Dla przypomnienia, dokładność wskazań wagosuszkarki wynosiła 0,1 mg. Po zakończeniu suszenia materiał trafiał do hermetycznego pojemnika, który po odesianiu powietrza przechowywano w komorze cieplnej. Warto dodać, że długotrwałe suszenie fazy stałej w temperaturze powyżej 100°C skutkowało równocześnie niszczeniem obecnych w niej drobnoustrojów (dezynfekcja termiczna). Dzięki temu eliminowano ich rozwój w warunkach późniejszego kontaktu materiału z wodą, a tym samym jego biodegradacji lub fermentacji.

Do wyznaczenia rzeczywistej gęstości fazy stałej wykorzystano metodę piknometrów cieczowego⁷⁾. W 1. kroku do wykalibrowanego piknometrów o znanej masie i objętości wprowadzano porcję przechowywanego w komorze cieplnej materiału. Zmierzony przyrost masy piknometrów odpowiadał masie zawartego w nim materiału, czyli masie rzeczywistej fazy stałej m_{fs} . W 2. kroku piknometr do ok. 1/3 jego pojemności wypełniono izopropanolem, jako cieczą piknometryczną o znanej gęstości ρ_{cp} oraz właściwościach zapewniających dobrą zwilżalność i penetrację porowatej struktury ziaren. Wyjątek stanowiła woda, którą stosowano w odniesieniu do kulek szkła. W celu usunięcia powietrza z przestrzeni między ziarnami oraz z porów w samych ziarnach, w piknometrze przez 1 min wytwa-

rzano podciśnienie rzędu 45 kPa. Zabieg ten realizowano, łącząc piknometr bezpośrednio z pompą próżniową poprzez króciec umieszczany w miejsce termometru. Wartość podciśnienia kontrolowano wakuometrem tarczowym o klasie dokładności 0,5, zabudowanym wraz z upustowym zaworem regulacyjnym na króciec ssącym pompy próżniowej. Odgazowana warstwa ziaren opadała na dno piknometru, co pozwalało łatwo dopełnić go izopropanolem. Masa cieczy m_{cp} wynikała z przyrostu masy napełnionego ostatecznie piknometru, w porównaniu z chwilą, gdy zawierał on tylko porcję suchego materiału. Gęstość rzeczywistą fazy stałej ustalano na podstawie zależności (3):

$$\rho_{fs} = \frac{m_{fs}}{V_{fs}} = \frac{m_{fs}}{V_p - V_{cp}} = \frac{\rho_{cp} \cdot m_{fs}}{\rho_{cp} \cdot V_p - m_{cp}} \quad (3)$$

Pomiar udziału objętości faz

Zasadniczą część badań wykonano w kilku krokach zilustrowanych na rys. 4, wykorzystując wykalibrowane wcześniej piknometry oraz wagę. W 1. kroku do piknometru wprowadzano porcję ziaren i mierzono ich masę. W 2. kroku piknometr częściowo wypełniano cieczą i usuwano powietrze z warstwy zanurzonych w niej ziaren, łącząc go na krótko (kilka sekund) z pompą próżniową. W 3. kroku piknometr dopełniano cieczą, przy czym montaż termometru sprawiał, że jej nadmiar wylewał się kapilarą. Po zamknięciu jej kapturkiem i dokładnym osuszeniu całego zestawu był on ważony, w celu ustalenia całkowitej masy początkowej spreparowanej zawiesiny. W dalszej kolejności termometr nieznacznie unoszono i blokowano w gnieździe. Zabieg ten pozwalał rozhermetyzować wnętrze piknometru, przy niemal całkowitym zaniku efektu parowania cieczy. Przygotowany w ten sposób piknometr z zawiesiną umieszczano na ok. 100 h (4 doby) w komorze cieplnej o wskazanej temperaturze. Czas ten przyjęto arbitralnie jako wystarczający dla całkowitego zakończenia procesu imbibicji i wnikanía cieczy do wnętrza ziaren. Po jego upływie objętość substancji w piknometrze zmniejszała się o wartość, która odpowiadała objętości cieczy wchłoniętej przez porowate i zmieniające swoją strukturę ziarna. Z kolei

masa substancji w piknometrze stanowiła wtedy sumę masy cieczy wolnej, cieczy wchłoniętej przez ziarna oraz rzeczywistej fazy stałej. Objętość wchłoniętej cieczy ustalano również metodą wagową. W tym celu uzupełniano ubytek cieczy w piknometrze i zwracając uwagę na zachowanie stałej temperatury, powtórnie go ważono. Objętość dodanej cieczy wynikała z jej gęstości i przyrostu masy zawartości piknometru.

Pomiar lepkości zawiesiny

Pomiary lepkości miały charakter wstępnych badań rozpoznawczych i dlatego wykonano je tylko dla 1 zawiesiny. Spreparowano ją z wody i rozdrobnionych łodyg konopi, czyli tych samych materiałów, które wykorzystano w badaniach zmian udziału objętości faz. Budowa lepkościomierza rotacyjnego wymusiła dysponowanie większą objętością zawiesiny niż w przypadku piknometru. Zatem w zlewce o pojemności 400 mL przygotowano ją w takiej ilości, która zapewniała wymagane zanurzenie wrzeciona pomiarowego lepkościomierza. Założony skład początkowy zawiesiny uzyskano metodą wagową, wykorzystując znaną gęstość wody i konopi. Ich masy dobrano w taki sposób, aby początkowy udział objętości suchej fazy stałej wynosił $\varphi_{fs,0} = 0,05$. Według ogólnie przyjętych zasad⁵⁾ taka wartość pozwala kwalifikować zawiesinę jako rozcieńczoną. Dla ograniczenia parowania cieczy zlewkę przykryto folią i umieszczono w komorze cieplnej na ok. 100 h, czyli tak samo jak piknometry. Po jego upływie wykonano pomiary lepkości. Wrzeciono lepkościomierza zanurzone bezpośrednio w substancji zawartej w zlewce, przy czym była ona ustawiona na płycie roboczej mieszadła magnetycznego. Dzięki niemu okresowo ujednarodniano zawiesinę, przy czym na czas pomiaru lepkości mieszadło było wyłączone. Lepkość wyznaczono przy kilku prędkościach obrotowych wrzeciona, kontrolując w sposób ciągły temperaturę badanej substancji.

Wyniki badań i ich omówienie

Końcowe wyniki oznaczeń gęstości cieczy zestawiono w tabeli 1, wyniki kalibracji piknometrów przedstawiono w tabeli 2, a eksperymentalnie wyznaczone gęstości rzeczywiste fazy stałej w tabeli 3. Wskazane w nich niepewności pomiarów ustalono metodą różniczki zupełnej. Z kolei w tabeli 4 zestawiono wszystkie przygotowane do badań mieszaniny dwufazowe. Ich symbol wskazuje na rodzaj materiału stałego i cieczy. W tabeli zawarta jest również zmierzona masa suchych ziaren w danej mieszaninie, czyli masa rzeczywistej fazy stałej $m_{fs,0}$, jej objętość $V_{fs,0}$ oraz udział tej objętości w przestrzeni danego piknometru $\varphi_{fs,0}$.

Udział objętości ziaren i ich gęstość

W analizie wyników pomiarów wykorzystano kilka parametrów, które w odniesieniu do badanych substancji dwufazowych należało wyraźnie rozróżniać i interpretować. Pod pojęciem fazy ciekłej o objętości V_{fc} , masie m_{fc} i gęstości ρ_{fc} rozumiano tę część cieczy, która nie była



Fig. 4. Next steps of the experiment

Rys. 4. Kolejne kroki eksperymentu

Table 1. Properties of liquids at test temperature, $t = 22^{\circ}\text{C}$ Tabela 1. Właściwości cieczy w temperaturze badań, $t = 22^{\circ}\text{C}$

Symbol	Ciecz	$\rho_c, \text{g/cm}^3$	$\eta_c, \text{mPa}\cdot\text{s}$	$\sigma_c, \text{mN/m}$
C1	izopropanol	0,7834±0,0005	2,251	21,71
C2	woda	0,9978±0,0005	0,966	73,43
C3	olej	0,8109±0,0005	2,531	41,86

Table 2. Pycnometers calibration results

Tabela 2. Wyniki kalibracji piknometrów

Symbol	$\rho_c, \text{g/cm}^3$	$m_{p,0}, \text{g}$	V_p, cm^3
P1	0,9978±0,0005	40,198	98,814±0,055
P2		40,403	99,610±0,055
P3		42,921	98,459±0,055
P4		41,004	99,537±0,055
P5		41,325	99,453±0,055
P6		60,954	99,575±0,055

Table 3. Experimentally determined real density of solid phase

Tabela 3. Wyznaczona eksperymentalnie gęstość rzeczywista fazy stałej

Symbol	Rodzaj	Piknometr	m_{fs}, g	$\rho_{fs}, \text{g/cm}^3$
M1	łodygi konopi	P1	5,246	1,2797±0,0393
M2	słoma	P3	3,350	1,3943±0,0734
M3	fusy kawy	P2	12,686	1,2619±0,0154
M4	łupiny orzechów	P1	6,820	1,4083±0,0304
M5	wytłoki buraków	P2	10,162	1,4739±0,0265
M6	siano	P4	4,194	1,3966±0,0581
M7	trociny	P5	5,009	1,4797±0,0552
M8	osad ściekowy	P5	30,151	1,5787±0,0951
M9	biomasa alg	P4	15,881	1,3439±0,0138
M10	szkło	P6	34,145	2,4574±0,0183

Table 4. Tested mixtures of solid and liquid phases; $t = 22^{\circ}\text{C}$ Tabela 4. Badane mieszaniny fazy stałej i cieczy; $t = 22^{\circ}\text{C}$

Symbol	Piknometr	$m_{fs,0}, \text{g}$	$V_{fs,0}, \text{cm}^3$	$\varphi_{fs,0}$
M1/C2	P-3	4,229	3,305	0,034
M2/C2	P-3	3,746	2,687	0,027
M3/C2	P-2	7,313	5,795	0,058
M4/C2	P-5	5,915	4,200	0,042
M5/C2	P-4	11,268	7,645	0,077
M6/C2	P-2	3,288	2,354	0,024
M7/C2	P-1	3,478	2,351	0,024
M8/C2	P-5	19,672	12,461	0,125
M9/C2	P-4	20,031	14,905	0,150
M10/C2	P-6	33,477	13,623	0,137
M11/C3	P-3	4,616	3,607	0,037
M12/C3	P-2	2,999	2,151	0,022
M13/C3	P-5	10,158	7,529	0,076
M14/C3	P-4	12,97	9,651	0,097

związana z materiałem ziaren, czyli w zawiesinie stanowiła dla nich środowisko rozpraszające. Objętość wchłoniętej przez ziarna cieczy ΔV_c ustalano eksperymentalnie. Jej masa była związana z gęstością identycznej fazy ciekłej, czyli $m_c = \Delta V_c \cdot \rho_{fc}$. Jednocześnie o wartość ΔV_c zmniejszała się

objętość zajmowana w piknometrze przez całą substancję. Masa ziaren w stanie suchym $m_{z,0}$ była tożsama z masą fazy stałej m_{fs} o rzeczywistej gęstości ρ_{fs} i objętości V_{fs} . Po wchłonięciu cieczy objętość ziaren wynosiła V_z , a ich masa m_z .

W stanie początkowym (przed wchłonięciem cieczy) udział objętości fazy ciekłej $\varphi_{fc,0}$ oraz ziaren $\varphi_{z,0}$ w piknometrze o objętości V_p rozumiano jako (4):

$$\varphi_{fc,0} = 1 - \varphi_{z,0} = \frac{V_{fc,0}}{V_p} = \frac{m_{fc,0} / \rho_{fc}}{V_p} \quad (4)$$

Wartość $m_{fc,0}$ ustalano eksperymentalnie jako masę cieczy koniecznej do początkowego dopełnienia cieczą piknometru zawierającego porcję ziaren o masie m_{fs} . W stanie końcowym objętość zajmowana przez ziarna odpowiadała sumie objętości tworzącego je materiału stałego V_{fs} oraz wchłoniętej cieczy ΔV_c . Udział objętości ziaren wynikał wtedy z równania (5):

$$\varphi_{z,1} = \frac{V_{fs} + \Delta V_c}{V_p - \Delta V_c} = \frac{m_{fs} / \rho_{fs} + \Delta V_c}{V_p - \Delta V_c} \quad (5)$$

Badania wykonywano dla porcji materiałów o różnej masie, a tym samym różnym początkowym udziale objętości. Z tego względu dla porównania otrzymanych wyników stosowano względny przyrost udziału objętości wg zależności (6):

$$\delta\varphi_z = \frac{\varphi_{z,1} - \varphi_{z,0}}{\varphi_{z,0}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Wartości tego parametru ($\delta\varphi_z$) ilustruje wykres pokazany na rys. 5. Jak z niego wynika, duży przyrost udziału objętości ujawnił się w przypadku łodyg roślin (konopie M1, słoma M2, trociny drzewne M7), które zawierały tylko. Z kolei korzeń buraka (M5) to w stanie naturalnym głównie tylko, z bardzo dużą ilością wody. Po wysuszeniu jego struktura znacznie się kurczyła, jednak przy ponownym kontakcie z wodą łatwo ulegała odbudowie. Mniejszy przyrost udziału objętości elementów rozdrobnionego siana (M6) można tłumaczyć właśnie mniejszą ilością łyka w liściach traw niż w łodygach roślin. Najmniejsze zmiany udziału objętości dotyczyły łupin orzecha (M4) oraz biomasy alg (M9). Materiał łupin nie zawierał łyka i był zwarty, co utrudniało penetrację jego struktury przez ciecz. Z kolei algi są organizmami beztkankowymi, a w formie żywej ich głównym składnikiem jest ciecz otoczona cienką ścianą komórkową. Po zniszczeniu komórek i ich wysuszeniu pozostały materiał nie był już w stanie wchłoniąć dużej ilości wody. Fusy kawy M3 i osady ściekowe M8 to też materiały porowate, jednak ze względu na swój charakter nie musiały ulegać imbibicji, gdyż zawierały potencjalnie niewielkie ilości celulozy.

Zatem okazuje się, że niekiedy zmiana udziału objętości ziaren może być znacząca, a to rzutuje na właściwości całego układu dwufazowego ciecz-ciało stałe oraz parametry samych ziaren. Jednym z nich jest ich gęstość, co wynika m.in. z zajęcia przez ciecz pustych początkowo

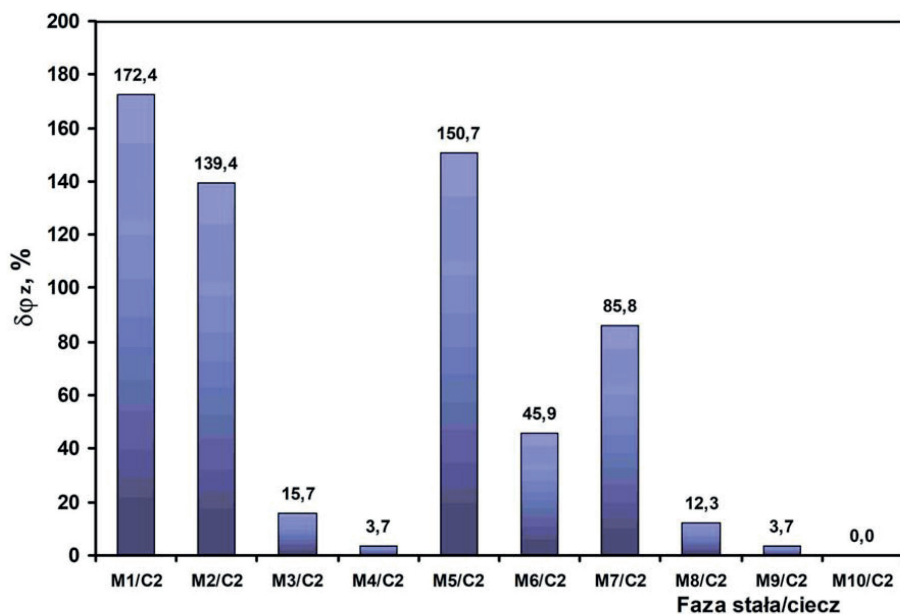


Fig. 5. Relative change in the volume fraction of grains in water

Rys. 5. Względna zmiana udziału objętości ziaren w wodzie

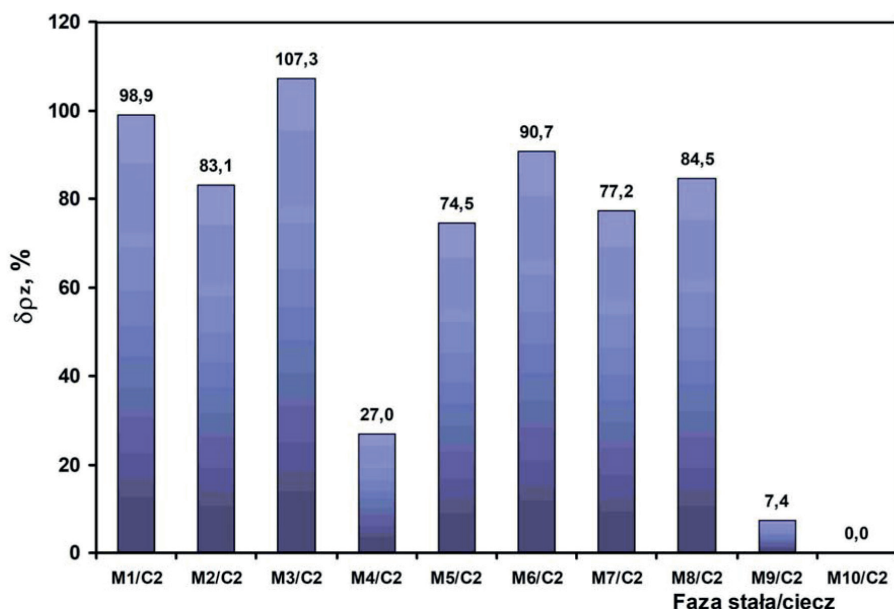


Fig. 6. Relative change in grains density due to water absorption

Rys. 6. Względna zmiana gęstości ziaren wywołana wchłonięciem wody

porów. Gęstość ziaren suchych (nie mylić z gęstością fazy stałej) wynikała z danych pomiarowych i opisana jest zależnością (7):

$$\rho_{z,0} = \frac{m_{fs}}{V_p - V_{fc,0}} \quad (7)$$

a ziaren nasączonych wodą zależnością (8):

$$\rho_{z,1} = \frac{m_{fs} + m_c}{V_{fs} + \Delta V_c} = \frac{m_{fs} + \Delta V_c \cdot \rho_{fc}}{m_{fs} / \rho_{fs} + \Delta V_c} \quad (8)$$

Zatem względną zmianę gęstości ziaren opisuje równanie (9):

$$\delta\rho_z = \frac{\rho_{z,1} - \rho_{z,0}}{\rho_{z,0}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Wartości względnej zmiany gęstości ziaren ilustruje wykres pokazany na rys. 6, zbudowany na podstawie wyników eksperymentów. Jak z niego wynika, zmiany gęstości ziaren mogą być duże, zatem wymagają uwzględnienia nie tylko w opisie procesu sedymentacji, ale też innych operacji mechanicznych, np. mieszania. Warto przypomnieć, że początkowa gęstość ziaren $\rho_{z,0}$ to nie rzeczywista gęstość fazy stałej. Poza tym okazało się, że im większa była wspomagana imbibicją ich porowatość oraz mniejsza gęstość tworzącej je fazy stałej, tym względny przyrost gęstości nasiąkniętych ziaren stawał się większy.

Wyrażana procentowo nasiąkliwość materiału to zazwyczaj relacja masy wchłoniętej cieczy m_c do jego masy lub objętości w stanie suchym. Standardowo^{8, 9)} pomiar nasiąkliwości prowadzi się w odniesieniu do jednego kawałka materiału o stosunkowo dużych gabarytach i regularnym kształcie. Jest on okresowo całkowicie zanurzany w cieczy i kilkakrotnie ważony po usunięciu wilgoci powierzchniowej. Jednak do własnych eksperymentów stosowano materiał rozdrobniony i dlatego masę wchłoniętej przez niego cieczy ustalono na podstawie mierzonego ubytku jej objętości określonego zależnością (10):

$$N_m = \frac{m_c}{m_{z,0}} = \frac{\Delta V_c \cdot \rho_{fc}}{m_{fs}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Zmierzone wartości tak rozumianej nasiąkliwości masowej ziaren N_m ilustruje wykres pokazany na rys. 7. Jak z niego wynika, największą nasiąkliwość wykazały materiały pochodzenia

roślinnego zawierające pęczniejące łyko (konopie M1, słoma M2, wytloki buraków M5, trociny M7). Ich porowatość nie była stała i rosła na skutek imbibicji. Z kolei zwarta struktura łupin orzecha M4 lub wysuszona biomasa ścian komórkowych alg M9 wchłaniały wodę w niewielkim stopniu.

Ocenę wpływu imbibicji na zmianę porowatości materiału oparto na ustaleniu jego nasiąkliwości cieczą hydrofobową, która imbibicji nie wywołuje. W tym celu stosowano olej wrzecionowy o małej lepkości i napięciu powierzchniowym, co zapewniało dobrą penetrację struktury ziaren. Jednak korzystanie z cieczy o innej gęstości sprawiało, że przy ocenie porównawczej w miejsce nasiąkliwości masowej stosowano nasiąkliwość objętościową. Rozumiano ją jako relację pomiędzy objętością wchłoniętej fazy ciekłej

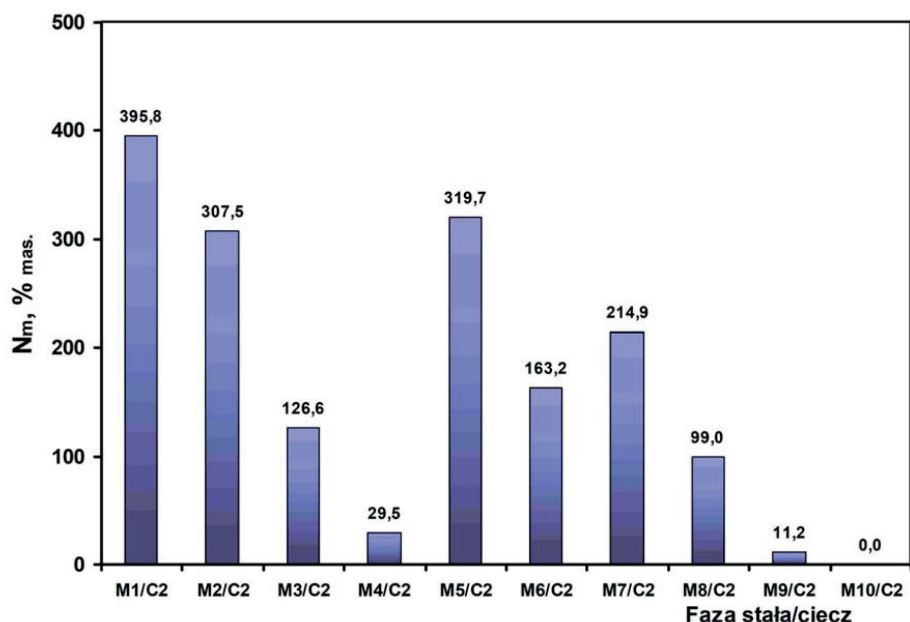


Fig. 7. Measured mass water absorption of grains

Rys. 7. Zmierzona nasiąkliwość masowa ziaren dla wody

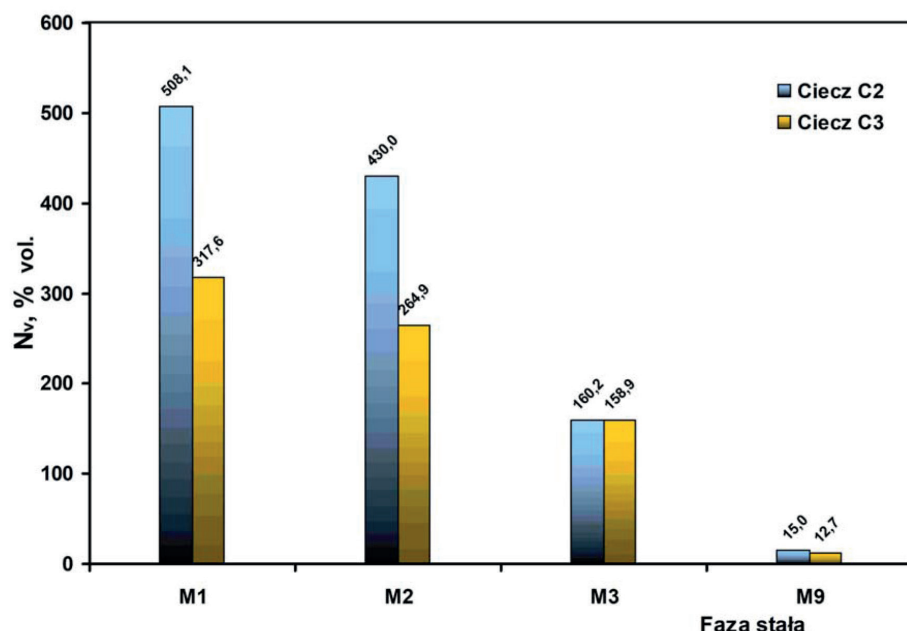


Fig. 8. Comparison of the volumetric water absorption of grains for water and oil

Rys. 8. Porównanie nasiąkliwości objętościowej ziaren dla wody i oleju

ΔV_c (tym razem oleju) do objętości materiału stanowiącego fazę stałą V_{fs} (11):

$$N_v = \frac{\Delta V_c}{V_{fs}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Przedstawione na rys. 8 porównanie nasiąkliwości wodą C2 i olejem C3 dotyczyło 4 materiałów. Konopie M1 oraz słomę M2 wybrano jako takie, dla których zmiany udziału objętości ziaren i nasiąkliwość wodą były duże. Okazało się jednak, że ich nasiąkliwość olejem była zdecydowanie mniejsza. Różnicę należy tłumaczyć wprost brakiem imbibicji, czyli stałą porowatością ziaren. Były one zdolne do wchłonięcia mniejszej objętości cieczy, w tym przypadku oleju. Fusy kawy M3 wybrano dlatego, że materiał ten powinien zawierać niewielkie ilości tłuszczów. Zatem ich obecność

w strukturze ziaren mogła sprzyjać wiązaniu hydrofobowych molekuł fazy olejowej, a tym samym wywoływać efekt podobny do imbibicji. Tymczasem z wykresu wynika, że nasiąkliwość tego materiału obiema cieczami była niemal identyczna, zatem porowatość ziaren nie ulegała zmianie. Taki sam efekt zaobserwowano w przypadku biomasy alg M9, przy czym jej nasiąkliwość w obu przypadkach była niewielka.

Mimo braku imbibicji, ziarna wchłaniały także pewną ilość oleju, co rzutowało na udział ich objętości w danym układzie dwufazowym. Względny udział tego udziału pokazano na rys. 9. Jak z niego wynika, zmiany te nie były tak duże jak dla wody, jednak czasem także mogły być istotne.

Należy podkreślić, że prezentowany względny przyrost udziału objętości ziaren był związany wprost z ich udziałem początkowym. Jeżeli zatem początkowa ilość suchego materiału była większa, to wchłonił on proporcjonalnie większą ilość cieczy, stanowiącej w danym układzie dwufazowym ciągle środowisko rozpraszające. O ile w zawiesinach rozcieńczonych zmiana udziału faz była stosunkowo mała, to w stężonych przeciwnie. Przykładowo, jeżeli przyjąć $\delta\varphi_z = 150\%$, to przy $\varphi_{z,0} = 0,05$ udział objętości nasączonych ziaren wynosił $\varphi_z = 0,075$. Jednak przy $\varphi_{z,0} = 0,30$ udział ten wzrósł już do $\varphi_z = 0,45$. Zatem przy określonej ilości suchego materiału może on całkowicie wchłonić fazę ciekłą zawiesiny. Uwzględniając przebieg pomiarów i przyjęte wcześniej oznaczenia, odpowiadający takiej sytuacji krytyczny udział objętości ziaren $\varphi_{z,1,kr}$

wyraża warunek $V_{fc,0} = \Delta V_c$, a zatem określony jest zależnością (12):

$$\varphi_{z,1,kr} = \frac{V_{fs,kr} + V_{fc,0}}{V_p - V_{fc,0}} = \frac{m_{fs,kr} / \rho_{fs} + \Delta V_c}{V_p - \Delta V_c} \quad (12)$$

Przy danej nasiąkliwości materiału N_m konieczną do wchłonięcia takiej ilości cieczy krytyczną masę suchej fazy stałej wskazuje zależność (13):

$$m_{fs,kr} = \frac{V_{fc,0} \cdot \rho_c}{N_m} \quad (13)$$

Łącząc zależności (10) i (11), otrzymano zależność (14):

$$\varphi_{z,1,kr} = \frac{\varphi_{fc,0}}{(1 - \varphi_{fc,0})} \cdot \frac{N_m + \rho_c / \rho_{fs}}{N_m} = \frac{1 - \varphi_{z,0}}{\varphi_{z,0}} \cdot \frac{N_m + \rho_c / \rho_{fs}}{N_m} \quad (14)$$

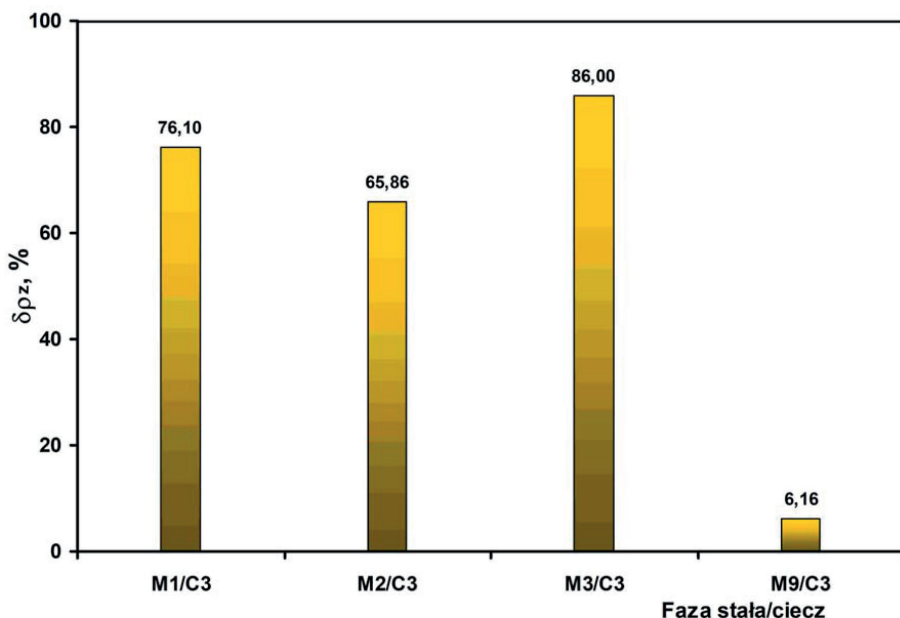


Fig. 9. Relative change in grains density due to oil absorption

Rys. 9. Względna zmiana gęstości ziaren wywołana wchłonięciem oleju

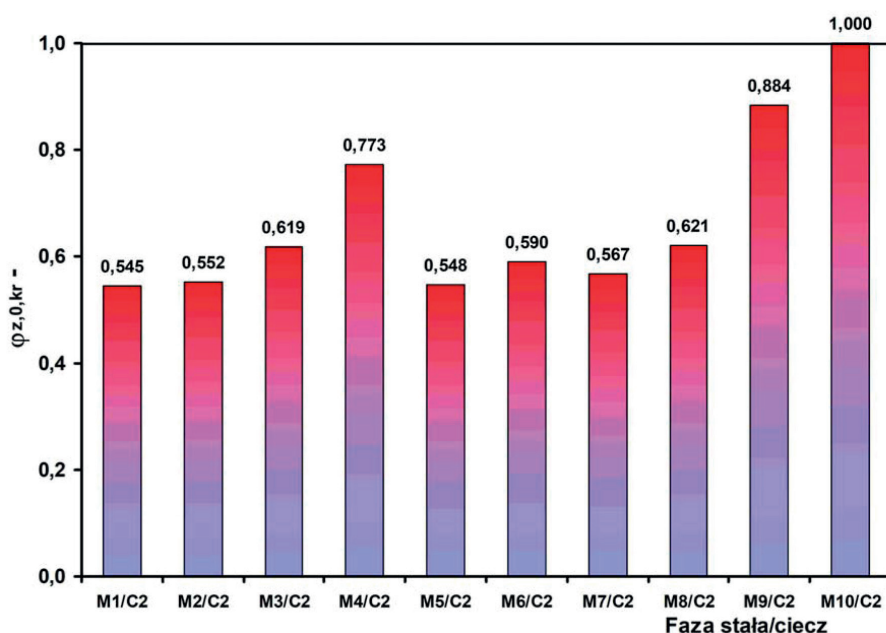


Fig. 10. Critical initial grain volume fraction in water

Rys. 10. Krytyczny początkowy udział objętości ziaren w wodzie

Brak fazy ciekłej oznacza, że udział objętości nawilżonych ziaren w rozpatrywanej substancji (już nie zawiesinie) wynosił 100%, a zatem wg (15):

$$\varphi_{z,1,kr} = 1 = \frac{1 - \varphi_{z,0}}{\varphi_{z,0}} \cdot \frac{N_m + \rho_c / \rho_{fs}}{N_m} \quad (15)$$

Kilka prostych przekształceń pozwala ostatecznie stwierdzić, że początkowy krytyczny udział objętości ziaren przedstawia zależność (16):

$$\varphi_{z,0,kr} = \frac{N_m + \rho_c / \rho_{fs}}{2 \cdot N_m + \rho_c / \rho_{fs}} \quad (16)$$

Wartości tego parametru ($\varphi_{z,0,kr}$) dla ziaren wchłaniających wodę przedstawiono na rys. 10. Wynika z niego, że dla

większości materiałów udział krytyczny wynosił już nieco ponad 50%, co ma znaczenie przy próbach preparacji stężonych zawiesin. Należy też pamiętać, że całkowicie wchłonięta faza ciekła nie wypełniała przestrzeni pomiędzy ziarnami. Zatem cała substancja nie tylko nie była zawiesiną, ale nawet wysoko skoncentrowaną pastą. Tworzyły ją jedynie nasiąknięte cieczą ziarna, a te pozbawione były cech płynu.

Na koniec warto dodać, że wskazane na wykresach parametry układów tworzonych z udziałem kulek szklanych M10 stanowiły jedynie wartości kontrolne, potwierdzające prawidłowość interpretacji wyników pomiarów. Szkło nie jest porowate i nie ulega imbibicji, zatem zmiana udziału jego objętości i gęstości była zerowa. Z kolei krytyczny udział ziaren odpowiadał sytuacji, w której ich materiał całkowicie wypełniałby określoną przestrzeń.

Lepkość

Wzrost udziału objętości ziaren w układzie dwufazowym ciecz-ciało stałe wywołuje jednocześnie wzrost jego lepkości. W literaturze⁵⁾ podanych jest wiele równań empirycznych dotyczących lepkości zawiesiny, które zwyczajowo wyrażają relację pomiędzy jej lepkością η_{susp} i lepkością ciekłej fazy ciągłej η_{fc} . Tak rozumiana lepkość względna η_{wzg} uzależniana jest w różny sposób od udziału objętości rozproszonych ziaren φ_z . Korzystanie właśnie z udziału ich objętości (a nie masy) wynika stąd, że jest to parametr powiązany z rozmiarem i odległością pomiędzy ziarnami. Tym samym w sposób pośredni wyraża poziom

potencjalnych oddziaływań pomiędzy nimi. Z kolei wzrost sił i naprężeń wewnętrznych w płynie (niezależnie od ich źródła) jest powszechnie interpretowany⁵⁾ jako wzrost jego lepkości. Równania proponowane do obliczania lepkości zawiesin rozcieńczonych dają niemal identyczne wyniki^{10,11)}, a zatem wybór konkretnego spośród nich jest w dużej mierze dowolny. Przykładem może być obowiązująca w zakresie do $\varphi_z < 30\%$ zależność (17):

$$\eta_{wzg} = \eta_{susp} / \eta_{fc} = 1 + 2,5 \varphi_z + 7,17 \varphi_z^2 + 16,2 \varphi_z^3 \quad (17)$$

Dla oceny jej skuteczności badaniom poddano specjalnie spreparowaną w tym celu wodną zawiesinę łądyg konopi

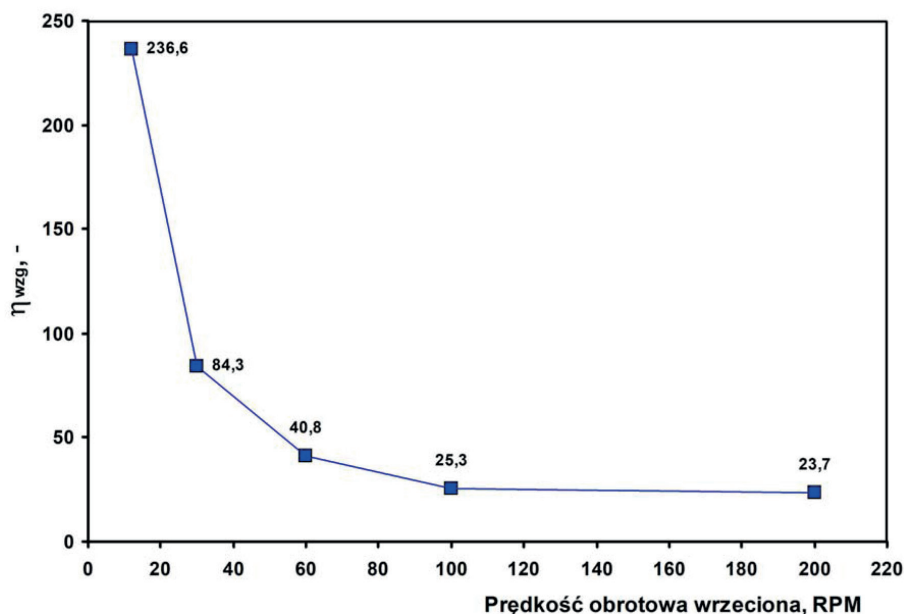


Fig. 11. Measured relative viscosity of the aqueous hemp suspension at $\varphi_{z,0} = 0.05$

Rys. 11. Zmierzona lepkość względna wodnej zawiesiny konopi przy $\varphi_{z,0} = 0,05$

M1, czyli materiału o dużej nasiąkliwości. Udział objętości suchych ziaren w zawiesinie wynosił $\varphi_{z,0} = 0,05$, co pozwalało traktować ją jako rozcieńczoną. Przy takim udziale obliczona na podstawie równania (17) lepkość względna wynosiła $\eta_{wzg,0} = 1,145$. Przedstawione wcześniej wyniki pomiaru udziału objętości ziaren po wchłonięciu wody wykazały dla konopi $\delta\varphi_z = 172,4\%$ (rys. 5). Zatem w spreparowanej zawiesinie udział objętości ziaren nasączonych wodą powinien wynosić $\varphi_{z,1} = 0,136$, natomiast jej obliczona lepkość względna $\eta_{wzg,1} = 1,514$. Tymczasem pokazane na rys. 11 wyniki pomiarów wskazują na wartości zdecydowanie większe. Co prawda nie obserwowano wpływu czasu trwania kolejnych pomiarów na wartość lepkości, jednak nie była ona stała i malała wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wrzeciona, stabilizując się dopiero przy dużych wartościach tej prędkości. Już takie zachowanie substancji świadczyło o jej nienewtonowskim charakterze⁽¹¹⁾, a ten nie powinien ujawniać się przecież w przypadku zawiesin rozcieńczonych. Można zatem przyjąć, że w wyniku wspomaganego imbibicją wchłaniania wody przez porowate ziarna zmienił się nie tylko ich udział objętości, ale też charakter reologiczny całej substancji. Nasączone cieczą elementy miały większą bezwładność, zmieniały nieco swoje rozmiary oraz niekiedy kształt. Na dodatek zwiększała się ich koncentracja w fazie ciągłej, co w sumie wywołało większe zapotrzebowanie na energię konieczną do wywołania efektu płynięcia substancji. Zgodnie z podstawami reologii⁽⁵⁾ takie cechy są typowe dla skoncentrowanych zawiesin włóknistych, przy czym zanikają w wyniku porządkowania się elementów fazy rozproszonej pod wpływem ścinania.

Badania lepkości miały jedynie charakter rozpoznawczy i dlatego pomiary wykonano tylko dla 1 zawiesiny. Jednak należy oczekiwać, że podobne efekty ujawnią się w przypadku innych układów dwufazowych, zwłaszcza takich,

w których porowatość ziaren fazy stałej i jej podatność na imbibicję będą duże.

Podsumowanie

Wnioskowanie o parametrach zawiesiny jedynie na podstawie masy zawartego w niej materiału suchego może być ryzykowne i prowadzić do błędnej oceny przebiegu zachodzących w niej zjawisk i procesów. Szczególną uwagę należy zwracać na ziarna porowate, a zwłaszcza takie, których materiał łatwo ulega imbibicji. W jego efekcie mogą one wchłoniąć znaczną ilość cieplego środowiska, w którym zostały rozproszone, co w istotnym stopniu zmienia wzajemny udział faz i ich gęstość. Aczkolwiek do imbibicji dochodzi głównie przy kontakcie z wodą materiałów pochodzenia

roślinnego, to jednak efekt wywołanych tym zjawiskiem zmian ich struktury bywa różny i ma bardzo indywidualny charakter. Z tego względu próby stworzenia ogólnego opisu ilościowego zmian parametrów ziaren w zawiesinie na skutek ich kontaktu z cieczą raczej nie są obiecujące. Pozostają jednak odpowiednio prowadzone eksperymenty, dotyczące zarówno nasiąkliwości konkretnego materiału daną cieczą, jak i właściwości określonego układu dwufazowego. To właśnie ich wyniki będą miały wystarczające i wymierne znaczenie aplikacyjne. Na szczególną uwagę zasługuje nie tylko gęstość ziaren i ich udział w rozważanej zawiesinie, ale też eksperymentalne ustalenie jej właściwości reologicznych, często o złożonym charakterze.

Artykuł zawiera wyniki prac własnych autora, wykonanych w laboratoriach Katedry Inżynierii Procesowej i Środowiska na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.

Otrzymano: 08-07-2026

Zrecenzowano: 22-07-2026

Zaakceptowano: 01-08-2026

Opublikowano: 17-09-2026

LITERATURA

- [1] R. Wang, Q. Ma, X. Ye, Ch. Li, Z. Zhao, *Sci. Total Environ.* 2019, **650**, 1678.
- [2] W. Li, W. Li, H. Liu, *Fuel* 2010, **89**, 965.
- [3] B. Derakhshandeh, R.J. Kerekes, S.G. Hatzikiriakos, C.P.J. Bennington, *Chem. Eng. Sci.* 2011, **66**, 3460.
- [4] S. Gharehkhani, S.F.S. Shirazi, H. Yarmand i in., *Carbohydr. Polym.* 2018, **184**, 376.
- [5] M. Dziubiński, J. Prywer, *Mechanika płynów dwufazowych*, WNT, Warszawa 2010.
- [6] L.F. Pease, R.C. Daniel, C.A. Burns, *Chem. Eng. Sci.* 2019, **199**, 628.
- [7] PN-EN 1936:2010, *Metody badań kamienia naturalnego*.
- [8] PN-88/B-06250, *Charakterystyka i wymagania betonu zwykłego*.
- [9] PN-59/D-04119, *Fizyczne i mechaniczne właściwości drewna. Oznaczanie nasiąkliwości*.
- [10] J. Hapanowicz, *Powder Technol.* 2022, **410**, nr 31, 117912.
- [11] J. Hapanowicz, A. Szydłowska, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 6, 171.