

Assessment of the possibility of using selected media for granulation of bulk materials

Ocena możliwości zastosowania wybranych mediów do granulacji materiałów sypkich



DOI: 10.15199/62.2025.8.2

An assessment of the potential use of beet molasses, water glass, polyvinyl alcohol, and lignosulfonate as binding liqs. in the granulation of bulk materials was presented. Basic phys.-chem. properties of these liqs. were examined, such as d_s , surface tension, and apparent viscosity, which allows for the assessment of their fluidity. Based on the obtained results, the tested liqs. were ranked according to their increasing binding capabilities for bulk materials undergoing the granulation process.

Keywords: binder liquids, flowability, granulation

Przedstawiono ocenę możliwości zastosowania melasy buraczanej, szkła wodnego, alkoholu poliwinylowego i lignosulfonianu jako cieczy wiążących w procesie granulacji materiałów sypkich. Badano podstawowe właściwości fizyczno-chemiczne tych cieczy, takie jak gęstość właściwa, napięcie powierzchniowe i lepkość pozorna, która umożliwia ocenę ich płynności. Na podstawie uzyskanych wyników uszeregowano przebadane ciecze wg ich rosnących możliwości wiążących materiały sypkie poddawane procesowi granulacji.

Słowa kluczowe: ciecze wiążące, płynność, granulacja

Spośród wielu materiałów sypkich obecnych na rynku na szczególną uwagę zasługują nawozy sypkie, które są najbardziej uniwersalną kategorią nawozów. Te łatwe w użyciu preparaty o wydłużonym działaniu, przeznaczone do stosowania posypowego, zajmują jedno z najważniejszych miejsc w podręcznym arsenale każdego rolnika, ogrodnika i działkowca. Nawozy sypkie dostarczają roślinom podstawowych składników pokarmowych, wpływając na szybkość wzrostu i jakość roślin. Dostarczane są w formach błyskawicznie przyswajalnych, wykazują zatem znacznie szybsze działanie niż obornik i kompost. Obecnie na rynku handlowym dostępne są dwa rodzaje nawozów wolno działających¹⁻³: (i) nawozy o niekontrolowanym uwalnianiu składników, których działanie wynika z rodzaju związków i wiązań chemicznych w nich występujących, i (ii) nawozy o kontrolowanym działaniu; szybkość i czas uwalniania

zawartych w nich składników zależą od rodzaju otoczki, którą pokryty jest nawóz.

Nawozy o kontrolowanym działaniu ze względu na swoją postać strukturalną należą do grupy nawozów stałych granulowanych. Nawozy te mają wiele zalet: nie zbrylają się trwale, mają zdolność przechodzenia w materiał mazisty lub gruzelkowaty pod wpływem działania mieszadeł, łatwo się je przechowuje, są odporne na uderzenia, łatwe w użyciu i precyzyjnej aplikacji¹⁻³.

Stale nawozy o kontrolowanym działaniu powstają podczas procesu granulacji. Jest to proces aglomeracji małych cząstek w większe zespoły, który prowadzony jest w obecności cieczy nawilżającej. Granulacja materiałów sproszkowanych i towarzyszące jej procesy, takie jak mieszanie i rozdrabnianie, zależą w znacznym stopniu od właściwości fizycznych i reologicznych materiałów biorących w niej



Dr inż. Bogdan DERBISZEWSKI (ORCID: 0000-0001-8684-077X) w roku 1976 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, kierunek instalacyjny. W 1983 r. uzyskał stopień doktora. W 1988 r. odbył staż naukowo-badawczy w Technical University of Denmark w Kopenhadze, gdzie prowadził badania komfortu cieplnego pomieszczeń biurowych. Posiada uprawnienia projektowe i wykonawcze oraz rzeczoznawcy PZITS. Od 2003 r. jest zatrudniony w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu (obecnie Uniwersytet Kaliski), obecnie na stanowisku adiunkta. Specjalność – inżynieria środowiska (wentylacja) i inżynieria procesowa.



Dr hab. inż. Magdalena ORCZYKOWSKA (ORCID: 0000-0002-0109-2563) ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, na którym pracuje do chwili obecnej. Specjalność – zagadnienia związane z właściwościami reologicznymi, a zwłaszcza lepkosprężystymi biomateriałów stosowanych w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i kosmetycznym.

* Adres do korespondencji:

Wydział Politechniczny, Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego, pl. Wojciecha Bogusławskiego 2, 62-800 Kalisz, b.derbiszewski@uniwersytetkaliski.edu.pl

udział. Ciecżą granulacyjną, wiążącą jest zwykle woda^{4, 5)} lub roztwór wodny (np. cukier⁶⁾ lub lignosulfonian⁷⁾) w połączeniu z rozpuszczonymi w niej mikrododatkami, takimi jak roztwór gumy arabskiej, roztwór żelatyny, roztwór kleju, a także melasa⁸⁾, kleiki skrobiowe⁹⁾, szkło wodne i alkohol poliwinylowy¹⁰⁾. Dotychczasowe badania wykazały, że właściwości cieczy nawilżającej mają wpływ na zarodkowanie i w konsekwencji na efekt granulacji, zwłaszcza gdy chodzi o utworzenie aglomeratów z materiałów trudno łączących się, takich jak mieszanki biomasy i materiałów mineralnych. To właśnie ciecz wiążąca odpowiada za wytworzenie granulowanego produktu o pożądanych właściwościach. Zastosowana w procesie granulacji ciecz wiążąca powinna umożliwiać stosunkowo szybki rozpad wytworzonych granул po aplikacji na wilgotną glebę^{11, 12)}.

Celem pracy było omówienie możliwości zastosowania wybranych cieczy wiążących do procesu granulacji jednolub wieloskładnikowych materiałów sypkich na podstawie analizy ich właściwości reologicznych.

Część doświadczalna

Materiały

Materiał badawczy stanowiły następujące ciecze wiążące: melasa buraczana otrzymana bezpośrednio z cukrowni w Gliniojecku, szkło wodne i alkohol poliwinylowy (WARCHEM) oraz lignosulfonian (CENTRO-CHEM). Melasa buraczana jest produktem ubocznym z procesu wytwarzania cukru spożywczego. To bardzo gęsta i lepka ciecz o najmniejszej zawartości cukru, ale bogata w składniki mineralne. Szkło wodne jest natomiast bezbarwną cieczą o konsystencji syropu i silnie zasadowym odczynie. Alkohol poliwinylowy (PVA) jest cieczą bezbarwną i bezwoną, charakteryzującą się higroskopijnością i odpornością na rozciąganie. Lignosulfonian, będący produktem ubocznym w procesie ekstrahowania celulozy drewna, jest brunatną i lepłą cieczą, zawierającą m.in. magnez, wapń i sól.

Metodyka badań

W celu poznania możliwości zastosowania wybranych cieczy wiążących do procesu granulacji przygotowano ich roztwory wodne o określonych stężeniach procentowych. Dla PVA przygotowano roztwory o stężeniach: 5, 6, 7 i 8%, dla melasy buraczanej i lignosulfonianu były to roztwory o stężeniach: 33, 50, 66, 75 i 100%, a dla szkła

wodnego sporządzono tylko 3 roztwory o stężeniach: 20, 30 i 40%. Wszystkie roztwory przygotowano w ten sam sposób. Odmierzano naważkę badanej substancji i uzupełniono wodą do objętości 100 mL, a następnie wymieszano. Uzyskano w ten sposób roztwory wodne o założonych stężeniach procentowych, które są stężeniami masowo/objętościowymi (m/v). Stężenia te są zatem stosunkiem masy substancji rozpuszczonej do objętości roztworu, wyrażonym w procentach (%). Dla wszystkich tak uzyskanych roztworów badanych cieczy wiążących oznaczono gęstość, napięcie powierzchniowe i właściwości lepkie. Tym samym przebadano wpływ stężenia każdego z roztworów na ich gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe. Wszystkie pomiary przeprowadzono w temp. 20°C.

Oznaczenie gęstości wykonywano metodą piknometryczną, polegającą na oznaczeniu masy pustego i suchego piknomietru, piknomietru wypełnionego cieczą wzorcową (wodą) i piknomietru wypełnionego badaną cieczą, stosując równanie (1)¹³⁾:

$$\rho_c = \rho_w \frac{m_{pc} - m_p}{m_{pw} - m_p} \quad (1)$$

w którym ρ_c oznacza gęstość badanej cieczy, kg/m³, m_w masę wody, kg, ρ_w gęstość wody, kg/m³, m_c masę badanej cieczy, kg, m_p masę piknomietru, kg, m_{pc} masę piknomietru napełnionego badaną cieczą, kg, a m_{pw} masę piknomietru napełnionego wodą, kg.

Pomiar napięcia powierzchniowego przeprowadzono metodą pierścieniową du Noüya, polegającą na mierzeniu siły odrywanego pierścienia od powierzchni badanej cieczy, za pomocą tensjometru firmy Krüss K-100.

Właściwości reologiczne badanych próbek wyznaczono za pomocą reometru rotacyjnego Physica MCR 301 firmy Anton Paar w układzie pomiarowym typu stożek-płytką o średnicy stożka równej 50 mm, kącie nachylenia 1° i odległości między elementami pomiarowymi (czyli stożkiem a płytką) równej 0,048 mm. Przeprowadzono badania reologiczne polegające na pomiarze właściwości lepkich próbek wszystkich badanych cieczy wiążących w zakresie szybkości ścinania 0,1–100 1/s, czyli w zakresie 3 dekad logarytmicznych, pobierając 7 punktów pomiarowych dla każdej dekady szybkości ścinania. W badaniach reometrycznych próbkę cieczy wiążącej umieszczano w układzie pomiarowym reometru rotacyjnego i pozostawiano ją w spoczynku przez 30 min w stałej temperaturze, aby osiągnęła równowagę termiczną i mechaniczną.

Do opisu otrzymanych pomiarów reometrycznych krzywych płynięcia i lepkości zastosowano model potęgowy Ostwalda i de Waele'a opisany równaniami (2) i (3)¹⁴⁾.

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

w których τ oznacza naprężenie styczne, Pa, $\dot{\gamma}$ szybkość ścinania, 1/s, η lepkość pozorną, Pa·s, k współczynnik konsystencji, Pa·sⁿ, a n charakterystyczny wskaźnik płynięcia.



Dr hab. inż. Andrzej OBRANIAK, prof. PŁ, w roku 1989 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. W 2002 r. uzyskał stopień doktora, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska tej samej uczelni, gdzie obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Aparatury Procesowej. Specjalność – inżynieria chemiczna i procesowa, mechanika.

Dodatkowo, aby ocenić przydatność cieczy wiążącej do procesu granulacji materiałów sypkich, określono jej płynność f , która jest odwrotnością lepkości cieczy i opisana jest równaniem (4)¹⁵⁾:

$$f = \frac{1}{\eta} \quad (4)$$

w którym f oznacza płynność, 1/(Pa·s).

Płyn o większej lepkości pozornej ma mniejszą płynność, a zatem trudniej płynie. Płyn o dużej płynności, czyli mniejszej lepkości pozornej, jest łatwy do przelania, wylewania, łatwiej się rozlewa i przepływa, w związku z tym łatwiej można go rozprowadzić po powierzchni materiału sypkiego poddawanego granulacji¹⁵⁾.

W celu oceny poprawności opisu danych doświadczalnych równaniem modelowym Ostwalda i de Waele'a przeprowadzono ocenę statystyczną dopasowania krzywych modelowych do krzywych doświadczalnych odniesioną do wartości uzyskanego bezpośrednio z pomiarów reometrycznych naprężenia stycznego τ . Ocenę tę przeprowadzono przez oszacowanie efektywności modelowania R^2 .

Wyniki badań i ich omówienie

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiaru gęstości badanych cieczy wiążących. Stwierdzono, że największą wartością gęstości charakteryzowały się roztwory melasy buraczanej, zaś najmniejszą roztwory alkoholu poliwinylowego. Oznaczona gęstość mieściła się w przedziale 959–1468 kg/m³. Gęstość każdego z badanych roztworów wzrastała wraz ze wzrostem jego stężenia.

W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiaru napięcia powierzchniowego dla PVA, melasy buraczanej, lignosulfonianu i szkła wodnego. Po przeprowadzeniu analizy wyników stwierdzono, że wartość napięcia powierzchniowego badanych cieczy malała wraz ze wzrostem stężenia ich roztworów. Zmierzone napięcie powierzchniowe mieściło się w zakresie 33,921–54,384 mN/m. Najmniejszą wartością napięcia powierzchniowego charakteryzował się lignosulfonian, a największą PVA. Przy zwiększaniu stężenia roztworów alkoholu poliwinylowego o 1% obserwowano obniżenie wartości napięcia powierzchniowego o 5–7%. W przypadku melasy buraczanej zauważono, że zwiększenie stężenia o 17% prowadziło do obniżenia wartości napięcia powierzchniowego o 9%. Podobnie zachowywały się roztwory lignosulfonianu. Natomiast wzrost wartości stężenia o 10% roztworów szkła wodnego powodował obniżenie wartości napięcia powierzchniowego o ok. 3%.

W tabeli 3 i na rys. 1–4 przedstawiono wyniki badań reologicznych. Z analizy danych przedstawionych w tabeli 3 wynika, że roztwory PVA były płynami newtonowskimi, których wskaźnik charakterystyczny płynięcia n był bliski jedności i mieścił się w zakresie 0,951–1,014. Wartość współczynnika konsystencji k rosła wraz ze wzrostem stężenia alkoholu poliwinylowego w roztworze.

W roztworach melasy buraczanej wartość parametru n modelu potęgowego Ostwalda i de Waele'a oscylowała

blisko jedności dla stężeń w zakresie 33–75%, co oznacza, że roztwory te wykazywały cechy płynu newtonowskiego. Podobnie jak w przypadku PVA, współczynnik konsystencji rósł wraz ze wzrostem stężenia melasy w roztworze. Jednak jego wartości były mniejsze od wartości tego współczynnika dla PVA. Surowa melasa buraczana (100%) charakteryzowała się parametrem n o wartości 0,810, co świadczy

Table 1. Density values of the tested binding liquids

Tabela 1. Wartości gęstości badanych cieczy wiążących

Ciecz wiążąca	Stężenie, %	Gęstość właściwa, kg/m ³
Alkohol poliwinylowy	5	959
	6	974
	7	1016
	8	1045
Melasa buraczana	33	1034
	50	1180
	66,7	1214
	75	1283
	100	1468
Lignosulfonian	33	1015
	50	1043
	66,7	1076
	75	1118
	100	1221
Szkło wodne	20	1014
	30	1054
	50	1159

Table 2. Surface tension values of the tested binding liquids

Tabela 2. Wartości napięcia powierzchniowego badanych cieczy wiążących

Ciecz wiążąca	Stężenie, %	Napięcie powierzchniowe, mN/m
Alkohol poliwinylowy	5	57,384
	6	54,261
	7	49,878
	8	46,253
Melasa buraczana	33	46,972
	50	42,617
	66,7	38,736
	75	36,374
	100	34,518
Lignosulfonian	33	43,684
	50	39,510
	66,7	36,219
	75	34,867
	100	33,921
Szkło wodne	20	51,137
	30	49,211
	50	47,826

Table 3. Rheological parameters of the Ostwald de Waele power-law model of the tested binding liquids

Tabela 3. Parametry reologiczne modelu potęgowego Ostwalda i de Waele'a badanych cieczy wiążących

Ciecz wiążąca	Stężenie, %	Model potęgowy Ostwalda i de Waele'a		
		n	$k, \text{Pa}\cdot\text{s}^n$	R^2
Alkohol poliwinylowy	5	1,014	0,048	0,999
	6	0,995	0,143	0,999
	7	0,973	0,192	0,995
	8	0,959	0,252	0,996
Melasa buraczana	33	1,010	0,003	0,999
	50	0,994	0,006	0,999
	66,7	0,987	0,023	0,999
	75	0,983	0,058	0,998
	100	0,810	22,689	0,995
Lignosulfonian	33	1,000	0,002	0,998
	50	1,000	0,004	0,997
	66,7	0,979	0,010	0,998
	75	0,971	0,019	0,997
	100	0,759	4,864	0,995
Szkło wodne	20	0,997	0,001	0,996
	30	0,995	0,002	0,997
	50	0,991	0,005	0,996

o tym, że była ona płynem nienewtonowskim rozrzedzanym ścinaniem, gdyż parametr ten był wyraźnie mniejszy od jedności. Ponadto charakteryzowała się bardzo wysoką wartością współczynnika konsystencji k , którego wartość wynosiła 22,689 Pa·sⁿ i była najwyższa ze wszystkich badanych cieczy wiążących.

Analogicznie do melasy buraczanej zachowywał się lignosulfonian, który w zakresie stężeń 33–75% również wykazywał cechy płynu newtonowskiego o wartości parametru n bliskiego jedności. W tym zakresie stężeń współczynnik konsystencji k również wzrastał wraz ze wzrostem stężenia roztworu lignosulfonianu, ale jego wartości były mniejsze od wartości tego parametru dla melasy buraczanej. Jednak 100-proc. lignosulfonian był płynem nienewtonowskim rozrzedzanym ścinaniem, dla którego parametr n przyjmował wartość 0,759. Jego współczynnik konsystencji k był natomiast o ponad 4,5 razy niższy niż współczynnik dla 100-proc. melasy buraczanej.

Roztwory szkła wodnego były cieczami newtonowskimi o charakterystycznym wskaźniku płynięcia bardzo zbliżo-

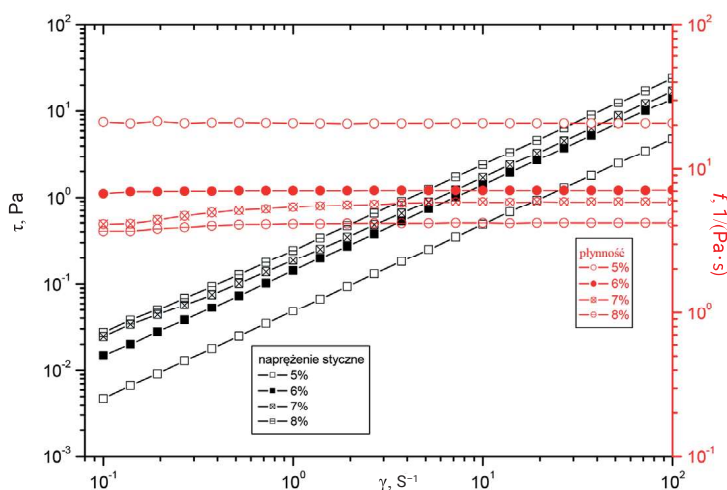


Fig. 1. Flow curve and fluidity curve for polyvinyl alcohol

Rys. 1. Krzywa płynięcia i krzywa płynności alkoholu poliwinylowego

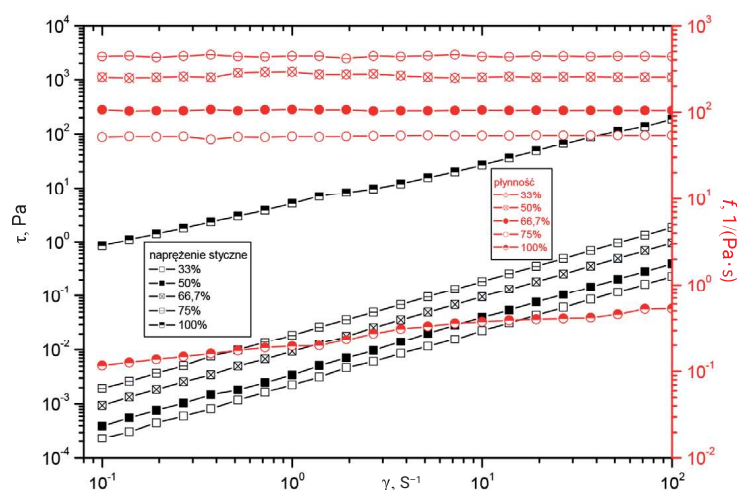


Fig. 3. Flow curve and fluidity curve for lignosulfonate

Rys. 3. Krzywa płynięcia i krzywa płynności lignosulfonianu

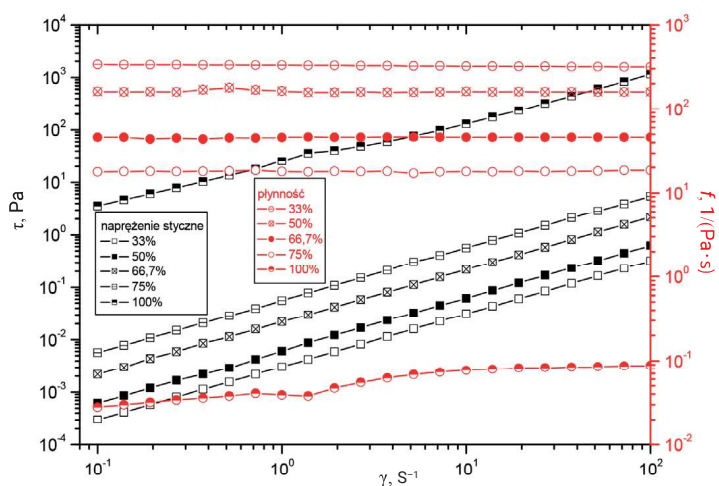


Fig. 2. Flow curve and fluidity curve for beet molasses

Rys. 2. Krzywa płynięcia i krzywa płynności melasy buraczanej

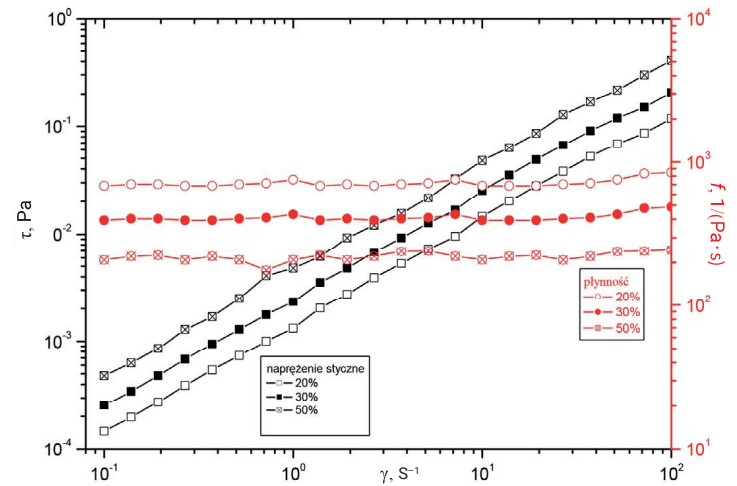


Fig. 4. Flow curve and fluidity curve for water glass

Rys. 4. Krzywa płynięcia i krzywa płynności szkła wodnego

nym do jedności, bowiem ich wartości mieściły się w granicach 0,991–0,997. Parametr k modelu potęgowego przyjmował bardzo niskie wartości, w przedziale 0,001–0,005 Pa·sⁿ, i były to wartości najniższe ze wszystkich przebadanych cieczy wiążących.

Z danych zaprezentowanych na rys. 1–4, a przedstawiających krzywe płynięcia i krzywe płynności badanych cieczy, wynika, że PVA charakteryzował się stosunkowo niskimi wartościami płynności, co może przejawiać się w trudnym rozprowadzeniu tego medium po powierzchni granulowanego materiału sypkiego.

Stuprocentowa surowa melasa buraczana wykazywała najmniejszą płynność nieprzekraczającą wartości 0,11/(Pa·s), co oznacza, że praktycznie nie będzie można jej wykorzystać do procesu granulacji, gdyż nie uda się jej rozprowadzić po powierzchni materiału sypkiego. Natomiast wraz ze zmniejszającym się stężeniem melasy w roztworze malała jej lepkość pozorna, a wzrastała w związku z tym jej płynność, która osiągała wartość maksymalną dla 33-proc. melasy.

Analogiczna sytuacja wystąpiła w przypadku 100-proc. lignosulfonianu, którego płynność wahała się w granicach 0,1–0,5 1/(Pa·s), co wskazuje, że również i ta ciecz w surowej postaci nie nadaje się do procesu granulacji materiałów sypkich. Podobnie jak w przypadku melasy buraczanej, tak i dla lignosulfonianu jego płynność rosła wraz z malejącym stężeniem w roztworze, aczkolwiek jej wartości były wyższe niż dla melasy buraczanej, aby przy 33-proc. roztworze lignosulfonianu osiągnąć wartość ok. 436 1/(Pa·s).

Szkło wodne w całym zakresie przebadanych stężeń charakteryzowało się bardzo wysokimi wartościami płynności, które mieściły się w przedziale 220–850 1/(Pa·s), co pokazuje, że jest to medium, które jest bardzo łatwe do rozprowadzenia po powierzchni materiału sypkiego.

Dla porównania, lepkość wody w temp. 20°C wynosi 0,001 Pa·s, co daje płynność równą 1000 1/(Pa·s). Woda bardzo dobrze zwilża powierzchnię materiałów sypkich. Zatem w odniesieniu do wody jako cieczy wiążącej porównywalne z nią pod względem płynności są roztwory melasy buraczanej i lignosulfonianu w zakresie stężeń 33–75%, jak również roztwory szkła wodnego w całym analizowanym zakresie stężeń 20–50%, przy czym to 20-proc. roztwór szkła wodnego osiągał najwyższą z uzyskanych i najbardziej zbliżoną do wody płynność równą ok. 850 1/(Pa·s).

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących pomiaru gęstości właściwej, napięcia powierzchniowego i właściwości reologicznych wybranych do procesu granulacji materiałów sypkich cieczy wiążących, którymi były alkohol poliwinylowy, melasa buraczana, lignosulfonian i szkło wodne stwierdzono, że lignosulfonian w zakresie stężeń 33–75% jest tym medium, które może posłużyć do granulacji materiałów sypkich, gdyż w tym zakresie stężeń wykazuje bardzo dużą płynność, która umożliwia równomierne rozprowadzenie go po powierzchni materiału

poddawanego granulacji. Dodatkowo to właśnie lignosulfonian charakteryzuje się najmniejszą wartością napięcia powierzchniowego i ma w związku z tym mniejszą skłonność do tworzenia kropeł i zachowania swojej powierzchni. W rezultacie to roztwór lignosulfonianu łatwiej będzie się rozprzestrzeniał po powierzchni, lepiej zwilżał i łatwiej wnikał w głąb materiału sypkiego sprzyjając jego granulacji.

Melasa buraczana jest również przydatną cieczą wiążącą w przedziale stężeń 33–75%, o porównywalnej do lignosulfonianu płynności, ale już o nieznacznie większych wartościach napięcia powierzchniowego, co może nieco utrudnić rozprowadzanie jej po powierzchni materiałów sypkich.

Szkło wodne wydaje się być także korzystnym medium, dobrym jako ciecz wiążąca pod kątem jego płynności, jednak wartości napięcia powierzchniowego wskazują, że zauważalne zaczynają być siły przyciągania między cząsteczkami tej cieczy, które są silniejsze niż siły przyciągania między tą cieczą a poddawanym granulacji materiałem sypkim.

Alkohol poliwinylowy jest najmniej korzystnym medium do procesu granulacji materiałów sypkich, bowiem charakteryzuje się bardzo małą płynnością na tle pozostałych badanych cieczy, a ponadto to właśnie to medium charakteryzuje się największą wartością napięcia powierzchniowego, co wskazuje, że PVA ma tendencję do minimalizowania swojej powierzchni, tworząc kuliste krople utrudniające zwilżenie powierzchni materiału sypkiego. W rezultacie, także ze względu na niewielką płynność, jest tą cieczą, która będzie sprawiała trudności przy równomiernym rozprowadzaniu jej po powierzchni materiału sypkiego poddawanego procesowi granulacji.

Reasumując, można przedstawić uszeregowanie przebadanych cieczy wg ich rosnących możliwości wiążących materiały sypkie poddawane procesowi granulacji następująco:

alkohol poliwinylowy < szkło wodne <
< melasa buraczana < lignosulfonian.

Otrzymano: 25-06-2025

Zrecenzowano: 04-07-2025

Zaakceptowano: 22-07-2025

Opublikowano: 11-08-2025

LITERATURA

- [1] E. Domian, Ł. Milczarski, *Acta Sci. Pol. Technol. Alim.* 2003, **2**, 37.
- [2] J. Kubiak, *Inż. Rolnicza* 2007, **9**, 79.
- [3] B. Matysiak, *Szkółkarstwo* 2004, **4**, 1.
- [4] A. Obraniak, K. Ławińska, *Granular Matter*. 2018, **20**, 7.
- [5] A. Obraniak, *Przem. Chem.* 2017, **96**, nr 1, 241.
- [6] A. Obraniak, T. Gluba, *Chem. Proc. Eng.* 2017, **2**, 295.
- [7] R. Siuda, J. Kwiatek, S. Szufa, A. Obraniak, P. Piersa, Ł. Adrian, R. Modrzewski, K. Ławińska, K. Siczek, T.P. Olejnik, *Minerals* 2021, **11**, 119.
- [8] R. Siuda, J. Kwiatek, A. Obraniak, T. Gluba, T.P. Olejnik, A. Marszałek-Gubiec, T. Pietrasik, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1550.
- [9] A. Obraniak, M. Orczykowska, T.P. Olejnik, *Powder Technol.* 2019, **342**, 328.
- [10] J. Kwiatek, R. Siuda, T. Gluba, T.P. Olejnik, A. Obraniak, A. Marszałek-Gubiec, T. Pietrasik, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1542.
- [11] S. Nastaj, *Chemik* 2008, **9**, 391.
- [12] T. Leszczuk, *Postępy Nauk Rolniczych* 2011, **5**, 103.
- [13] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fizyka*, t. I, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [14] M. Dziubiński, T. Kiljański, J. Sęk, *Podstawy reologii i reometrii płynów*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009.