

Charakterystyka hydrożelowych podłoży jako alternatywy dla naturalnych gleb w monitorowaniu rozwoju systemu korzeniowego roślin w precyzyjnym rolnictwie

Piotr Szatkowski¹, Ewa Szczepanik¹,
Edyta Molik²

¹Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki,
Katedra Biomateriałów i Kompozytów

²Uniwersytet Rolniczy w Krakowie,
Wydział Hodowli i Biologii Zwierząt,
Katedra Żywienia, Biotechnologii Zwierząt i Rybactwa

Wstęp

Konsekwencje wzrostu temperatury na Ziemi objawiają się między innymi zwiększeniem częstotliwości występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych i klimatycznych takich jak burze, wichury, pożary czy długotrwałe susze. Globalne ocieplenie przekłada się na zmianę warunków panujących dotąd w ekosystemach lądowych i oceanicznych [13]. Warunki klimatyczne w wielu rejonach świata przestaną sprzyjać rolnictwu, gdyż może nastąpić podniesienie poziomu wód lądowych [14]. W świetle przedstawionych prognoz pokrycie globalnego zapotrzebowania na żywność stanowi wyzwanie dla rolnictwa. Czynnikiem potęgującym tę trudność jest również stale rosnąca i mająca ulec podwojeniu przed rokiem 2100 liczba ludności [2, 15]. Wymaga to podjęcia działań umożliwiających dostosowanie do nowych warunków klimatycznych wydajności produkcji rolniczej [19]. Długotrwałe susze i towarzysząca im ograniczona dostępność wody są nieuniknioną konsekwencją wzrostu temperatury. Adaptacja do postępującego ocieplenia klimatu powinna więc uwzględniać przede wszystkim rozwiązanie dla problemu, jaki stanowi niedobór wody [17]. Jest to główny czynnik stresowy ograniczający wzrost roślin. Kluczowa rola w pobieraniu wody oraz substancji odżywczych, a tym samym determinacja wzrostu całej rośliny przypada systemowi korzeniowemu. Dobrze rozwinięty i efektywnie działający

system korzeniowy może zatem zapewnić wystarczające zaopatrzenie rośliny w wodę nawet w warunkach jej niedoboru. Z tej przyczyny zasadne jest ukierunkowanie rolnictwa na rośliny, które ze względu na swoją budowę lepiej asymilują zasoby glebowe. Dobór gatunków roślin uprawnych o największym potencjale wytwarzania plonów o wysokiej wartości rynkowej w wymagających warunkach, można przeprowadzić poprzez fenotypowanie systemów korzeniowych [22]. Proces ten może być przeprowadzony w mediach innych niż gleba np. stałe matryce żelowe [4]. Zaletą tego typu podłoży jest ich przepuszczalność dla światła, która umożliwia trójwymiarową obserwację systemu korzeniowego. Opracowanie substytutu gleby o zbliżonych właściwościach do gleby i wysokiej transparentności może okazać się przełomowym osiągnięciem w fenotypowaniu systemu korzeniowego [7]. Wspólną cechą wszystkich gleb, jest ich nieprzezroczystość. Brak przepuszczalności światła widzialnego uniemożliwia obserwację deformacji i procesów zachodzących wewnątrz gleby bez użycia specjalistycznej aparatury. Badaniem, które pomagają przezwyciężyć problem braku transparentności, są: tomografia komputerowa (CT), rezonans magnetyczny (MRI) lub badanie RTG. Rozwiązaniem dla przedstawionych trudności są transparentne gleby, czyli syntetyczne substytuty naturalnych gleb przepuszczalne dla światła widzialnego [16].

Transparentne gleby to dwufazowe media składające się z części stałej stanowiącej szkielet gleby i wypełniającej ją fazy ciekłej, o pasującym współczynniku załamania światła (RI) [5]. Fundamentalnym założeniem przy projektowaniu transparentnych gleb jest uzyskanie podobieństwa do naturalnej gleby. Najczęściej podobieństwo nie musi obejmować wszystkich cech gleby naturalnej, a jedynie tych, które są istotne ze względu na konkretne zastosowanie. W modelowaniu geotechnicznym znaczenie mają głównie właściwości fizyczne, takie jak wytrzymałość na ściskanie, odporność na kruche pękanie oraz inne właściwości związane z odkształceniem i siłą, natomiast dla zastosowań botanicznych ważne jest zarówno podobieństwo właściwości fizycznych, jak i chemicznych. Typowymi obszarami badawczymi dla zastosowań przezroczystych gleb są: deformacja gleby, przemieszczenie struktur glebowych spowodowanych wykopaliskami (tunele, studnie), efektywność wzmocnień ścian wykopów, przenikaniem zanieczyszczeń w glebie i skałach [27]. W badaniach geotechnicznych transparentne gleby umożliwiają przeprowadzenie symulacji konkretnych problemów inżynierskich, wykorzystując cyfrową rejestrację obrazu. Jedną z szeroko stosowanych metod badawczych jest metoda anemometrii obrazowej DPIV (ang. digital particle image velocimetry), która wykorzystuje cząstki znacznikowe oraz cyfrową korelację obrazu DIC (ang. digital image correlation). Analiza obrazów pozwala na ustalenie wektorów prędkości i przemieszczenia cząstek znacznikowych [27]. Stosowane transparentne podłoża wymagają dobrania odpowiedniego zestawu składników. Najczęściej wykorzystywanymi substancjami w modelowaniu skła-

du transparentnych gleb są: amorficzna krzemionka, żel krzemionkowy, topiony kwarc oraz tzw. aquabeads, czyli hydrożele. **Krzemionka amorficzna** występuje w postaci proszku, składającego się z bardzo drobnych cząstek o średnicy 2 μm . Cząstki mogą formować porowate agregaty. Jest to materiał bezbarwny, jednak z powodu dyfrakcji i refrakcji światła ludzkie oko postrzega go jako biały. Indeks załamania światła dla krzemionki wynosi od 1,41 do 1,46. Jako płyn porowy wykorzystuje się stechiometryczną mieszaninę oleju mineralnego oraz rozpuszczalnika parafinowego o pasującym indeksie RI 1,447 (w temperaturze 24°C) [5]. W związku z tym, że krzemionka amorficzna jest higroskopijna, może absorbować płyn porowy i wypierać uwięzione między cząstkami powietrze, zwiększając tym samym przezroczystość układu. Właściwości mechaniczne podłoża składającego się z krzemionki krystalicznej i płynu porowego zależą od wielkości cząstek oraz metody produkcji. Krzemionka krystaliczna jest materiałem używanym głównie do imitacji gliny, ponieważ prezentuje zbliżone właściwości sprężyste dla odkształceń mniejszych niż 15% [27]. **Żel krzemionkowy** jest amorficzną formą krzemionki otrzymywaną na drodze częściowej dehydratacji kwasu metasilowego. Żel krzemionkowy ma postać transparentnych cząstek o wielkości od ok. 0,5 mm do 5 mm. Cechuje się wysoką porowatością w postaci sieci wewnętrznych mikroporów. Podobnie jak w przypadku proszkowej krzemionki amorficznej płynem wypełniającym jest mieszanina oleju mineralnego i rozcieńczalnika parafinowego. Gruboziarnisty żel krzemionkowy wykazuje wysokie wartości odkształceń już przy niewielkich naprężeniach, co jest typowe dla piasku. Dla

niewielkich naprężeń do modelowania piasku można używać obu form żelu [5]. **Topiony kwarc** to forma szklistej krzemionki, otrzymywana na drodze topienia i chłodzenia naturalnego kwarcu. Topiony kwarc cechuje się twardością, obojętnością i wysoką transparentnością. Istnieją dwie formy tego materiału: drobnoziarnista o wielkości 0,33 mm i gruboziarnista o wielkości 1,68 mm [27]. Płynem porowym łączącym się z topionym kwarcem może być mieszanina dwóch olejów mineralnych, roztwór sacharozy lub roztwór STISI (ang. sodium thio-sulfate-treated sodium-iodide). Ich cechą wspólną jest niska lepkość i niewielka wrażliwość na zmiany temperatury. Transparentne podłoża na bazie topionego kwarcu można recyklingować i ponownie wykorzystywać do kolejnych testów, co jest bardzo korzystne w produkcji roślinnej [16]. **Aquabeads**, pierwotnie zwane KI-GEL 201 K-F2 to hydrożele polimerowe mające zdolność do wchłaniania wody stanowiącej 200-krotność ich masy. Indeks załamania światła dla tej rodziny hydrożeli wynosi 1,333, czyli tyle samo, ile dla wody. Dzięki temu woda stanowi idealny płyn wypełniający, a to wpływa na ekonomiczność tego rozwiązania. Surowcem do produkcji aquabeads są polimery takie jak poliakrylamid. Aquabeads mogą być łatwo rozdrabniane, co umożliwi manipulację ich rozmiarem [16]. Aquabeads są stosowane głównie do modelowania przepływu charakterystycznego dla gleb lub bardzo słabych osadów morskich [27].

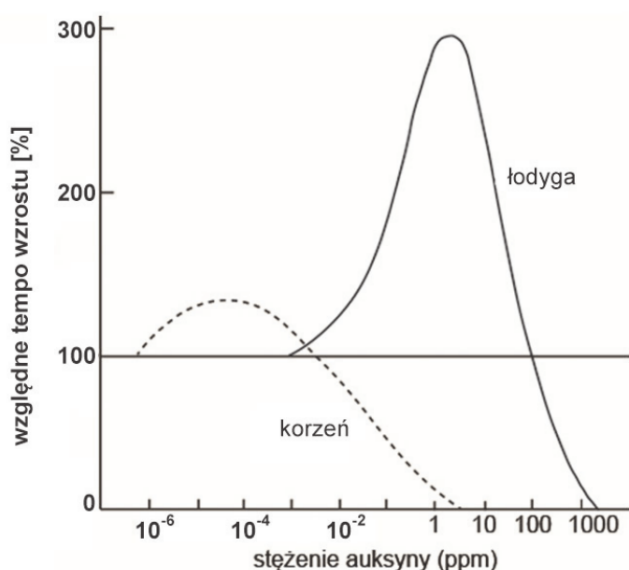
Konkretna substancja może zostać użyta jak substrat do produkcji podłoży transparentnych w hodowli roślin, jeśli spełnia odpowiednie kryteria takie jak dostarczenie mikro, makroskładników, witamin czy regulatorów wzrostu niezbędnych do rozwoju. Makroskładniki to pierwiastki

Tabela 1

Porównanie właściwości transparentnej gleby na bazie krzemionki amorficznej, żelu krzemionkowego, kwarcu topionego oraz aquabeads

	Krzemionka amorficzna	Żel krzemionkowy	Kwarc topiony	Aquabeads
Imitowane podłoże	Glina	Piasek	Piasek	gleba/słabe osady morskie
Indeks załamania światła	1,442	1,442	1,458	1,333
Ciecz porowa	Mieszanina oleju mineralnego i rozpuszczalnika parafinowego lub solanka bromku wapni		Mieszanina olejów mineralnych, roztwór sacharozy lub roztwór STISI	Woda
Lepkość w temp. pokojowej [Pa*s] V	0,005-0,0036	0,0009	0,0009	0,0022-0,2012
Masa nasyconej jednostki [kN/m ³]	9,4-16	11-14	13,4-16,4	10
Moduł Younga [MPa]	-	24-84	72	-
Wady	-	Rozbudowana sieć porów wewnętrznych	Obecność zanieczyszczeń	Otrzymywany z poliakrylamidu
Zalety	-	-	Wysoka transparentność	-

chemiczne, które powinny występować w stężeniu większym niż 0,5 mM/L. Makroskładniki pochodzą z soli azotu (N), potasu (K), fosforu (P), wapnia (Ca), magnezu (Mg) i siarki (S). Pełnią one istotne funkcje w organizmie roślinnym, które obejmują między innymi: syntezę białek (N, S), syntezę nukleotydów (S, N, P), syntezę ścian komórek (Ca), zapewnianie spójności błon komórkowych, czy obecność kofaktorów enzymów (Mg). Natomiast mikroskładniki to pierwiastki takie jak: żelazo (Fe), mangan (Mn), cynk (Zn), bor (B), miedź (Cu), czy molibden (Mo). Równie ważnym elementem transparentnych gleb jest obecność witamin jako kofaktorów, czy składników enzymów. Dla uzyskania optymalnego wzrostu podłoże powinno być szczególnie bogate w witaminy z grupy B: B1, B3, B6 i B5, witaminę C, E, adeninę oraz mio-inozytol. Ważnym elementem w podłożach transparentnych jest węgiel jako źródło energii dla roślin. Najczęściej jest dostarczany z cukrów takich jak sacharoza, fruktoza, glukoza, maltoza czy rafinoza, przy czym dostępność pochodzącego z nich węgla jest różna, a najbardziej efektywnym jego źródłem jest sacharoza. Węgiel jest szczególnie istotny w początkowych etapach rozwoju rośliny, kiedy nie jest ona w stanie wytworzyć pożywienia w procesie fotosyntezy z powodu niedostatecznie rozwiniętych tkanek i komórek. Dodatkowo sacharoza wspiera zachowanie odpowiedniego ciśnienia osmotycznego i magazynowanie wody w komórkach. Podłoże transparentne musi być wzbogacone w regulatory wzrostu, czyli związki odpowiedzialne za stymulację podziału komórek, a w konsekwencji regulację wzrostu i różnicowania tkanek. W przypadku roślin największe znaczenie mają hormony takie jak cytokiny oraz auksyny, których stężenie wpływa na tempo wzrostu korzenia i łodyg (rys.1). Auksyny w niskim stężeniu sprzyjają wzrostowi korzeni, natomiast w wysokim stężeniu stymulują wzrost tkanki kalusowej oraz działają jak selektywne herbicydy.



Rys. 1 Wpływ stężenia auksyny na tempo wzrostu łodygi i korzenia [23]

Cytokiny natomiast są pochodnymi adeniny i indukują podziały komórkowe, a także wzrost pędów. W podłożach występują także gibereliny, które wspomagają wydłużanie międzywęźli oraz wzrost tkanki twórczej, natomiast hamują rozrost korzeni bocznych [23]. Projektując podłoża transparentne, należy pamiętać o zapewnieniu odpowiedniego pH. Optymalna wartość wynosi od 5,6 do 5,8 a wartości niższe i wyższe niż podany zakres, wpływają na hamowanie wzrostu roślin. Należy pamiętać, że wartość pH zmienia się w trakcie inkubacji na skutek procesów utleniania, jak również ciągłego pobierania i wydzielania substancji przez hodowaną roślinę. Wartość pH reguluje także zdolność do żelowania podłoża, pobór składników mineralnych, rozpuszczalność soli w medium oraz zachodzenie reakcji chemicznych [8].

Właściwości fizyczne podłoża także modulują właściwy rozwój rośliny. Wynika to z faktu, iż podłoże nie tylko magazynuje substancje odżywcze i wodę dla roślin, ale także pełni funkcję stabilizującą roślinę oraz zapewnia środowisko dla wymiany gazowej części podziemnych rośliny. Dlatego w projektowaniu podłoży transparentnych istotne jest zachowanie właściwości fizycznych, a szczególnie:

a) porowatości określanej jako sumaryczna ilość wolnych przestrzeni w objętości medium, które mogą być zajęte przez ciecze lub gazy. Porowatość jest ściśle związana z natlenieniem. Najmniejszą porowatość aeracyjną obserwuje się w glebach o wysokim stopniu zagęszczenia. Niewystarczające natlenienie podłoża skutkuje gromadzeniem kwasu abszynowego w częściach nadziemnych roślin, a co za tym idzie zamykaniem się szparek. Konsekwencją tego jest zmiana bilansu cieplnego rośliny i spowolnienie transpiracji, oddychania i fotosyntezy. Jeśli niedotlenienie utrzymuje się przez dłuższy czas, to dochodzi do obumierania korzeni.

b) gęstości właściwej podłoża, czyli stosunku jego masy do objętości. Badania wykazały, iż nadmierne zagęszczenie podłoża powoduje ograniczenie długości systemu korzeniowego i jego głębokości. Ponadto w glebach o wysokim stopniu zagęszczenia odległość między korzeniami maleje, natomiast wzrasta nierównomierność rozmieszczenia korzeni, co jest wynikiem większej zmienności struktury podłoża [11].

c) zwięzłości, czyli zdolności do stawiania oporu względem prób jej rozklinowania lub rozcięcia. Jest to właściwość mechaniczna znacząco wpływająca na proces rozrostu części podziemnej rośliny. Zwięzłość, w połączeniu z gęstością podłoża determinuje kształt oraz wielkość korzeni głównych i pobocznych, ponieważ przekłada się na opór mechaniczny, jaki podłoże stawia rosnącej roślinie. Wykazano, że rosnące korzenie i pędy zużywają więcej asymilatów w podłożach, w których panuje zwiększony opór mechaniczny, niż w podłożach luźnych. Wyraźne ograniczenie lub całkowite zahamowanie wzrostu korzeni obserwuje się już przy oporze mechanicznym wynoszącym 2-3 MPa. Ograniczenie wzrostu systemu korzeniowego przekłada się bezpośrednio na wielkość plonów. Struktura – w kontekście

agrofizyki jest rozumiana jako rozmieszczenie przestrzenne składników podłoża, opisuje także wielkość agregatów. W glebach złożonych z dużych agregatów (powyżej 3 mm) wzrost korzeni jest słabszy, ponieważ wewnętrzne części agregatów nie są penetrowane przez korzenie [11].

Zapewnienie optymalnych warunków do wzrostu i rozwoju roślin wymaga syntezy podłoża bogatego we wszystkie wymagane substancje odżywcze oraz wprowadzenie substancji żelujących, których stężenie wynosi zazwyczaj od 0,6% do 1%. Jest to optimum zapewniające wystarczającą zwięzłość podłoża, dzięki czemu roślina może się w nim utrzymać i jednocześnie wciąż możliwa jest efektywna dyfuzja substancji odżywczych do tkanek. Od środka żelującego wymaga się, by był obojętny względem rośliny i pozostałych składników podłoża oraz stabilny w temperaturach użytkowania. Wymagane kryteria spełniają polisacharydy takie jak agar, agaroz, guma gellan czy żelatyna [9]. Istotnymi elementami gleby transparentnej są hydrokoloidy jako biopolimery o wysokiej masie cząsteczkowej i charakterze hydrofilowym. Pod względem chemicznym są najczęściej polisacharydami, jednak wśród koloidów znajdują się także białka. Prezentują unikalne właściwości reologiczne, dzięki którym są wykorzystywane jako substancje żelujące i stabilizujące w różnych gałęziach przemysłu [6].

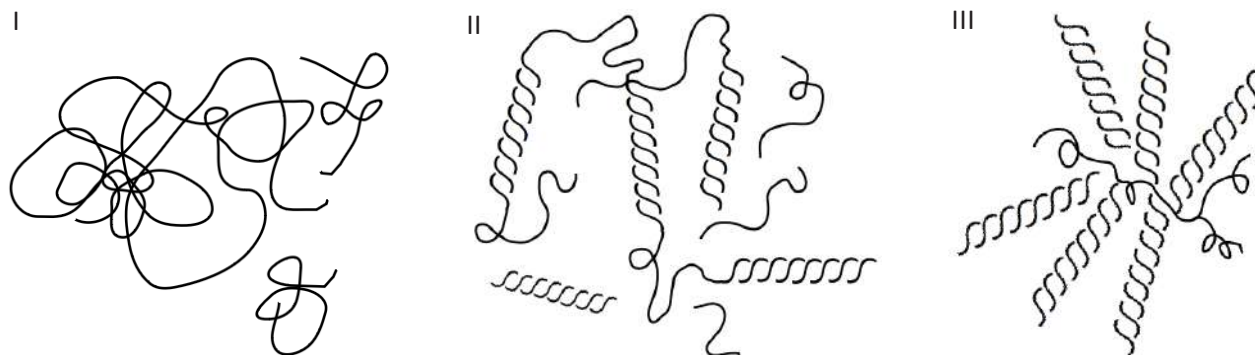
Żelowanie hydrokoloidów polega na tworzeniu trójwymiarowej sieci przestrzennej na skutek powstawania oddziaływań międzyłańcuchowych, a także mechanicznych splątań łańcuchów. Rozciągająca się na całą objętość roztworu sieć, unieruchamia ciekły rozpuszczalnik. Dla większości polisacharydów siła żelowania zmienia się proporcjonalnie do masy cząsteczkowej (rośnie wraz ze wzrostem ciężaru cząsteczkowego, natomiast spada wraz ze wzrostem stopnia rozgałęzienia). Polisacharydy mogą formować stabilne, uporządkowane struktury głównie dzięki obecności grup funkcyjnych, które mogą oddziaływać ze sobą nawzajem, z innymi łańcuchami i cząsteczkami [18]. Aby mogło dojść do sieciowania, polisacharyd musi zostać rozpuszczony w roztworze i poddany działaniu określonych warunków.

W momencie wprowadzenia hydrokoloidu do odpowiedniego rozpuszczalnika następuje samoistna zmiana

na konformacji łańcuchów – łańcuch zwija się w heliksę o regularnej budowie. Jest to efekt dążenia do minimum energii wewnętrznej układu. Porządkujące działanie na strukturę mają grupy polarne, np. karboksylowe. W zależności od mechanizmu sieciowania dzielimy na fizyczne i chemiczne [18].

Sieciowanie fizyczne polega na stabilizacji struktury hydrokoloidu poprzez słabe oddziaływania, takie jak siły elektrostatyczne lub wiązania wodorowe. Hydrokoloidy fizyczne są nietrwałe i ich struktura może ulec zniszczeniu na skutek ogrzewania [18]. W obrębie sieciowania fizycznego można wyróżnić sieciowanie jonowe, które może przebiegać na drodze dyfuzji kationów do roztworu hydrokoloidu lub żelowania z czynnikiem aktywującym. Czynnikiem aktywującym w tym przypadku może być np. zmiana wartości pH, która jest dokonywana dopiero w momencie osiągnięcia pełnej dyspersji jonów. Dzięki temu, ryzyko nieuzyskania homogeniczności jest niskie nawet dla hydrokoloidów gwałtownie żelujących. Fizyczne sieciowanie dyfuzyjne często skutkuje brakiem homogeniczności hydrokoloidu i ograniczonym żelowaniem [6]. Natomiast niskotemperaturowe żelowanie fizyczne przebiega dwuetapowo: najpierw roztwór hydrokoloidu jest podgrzewany, aby uzyskać pełną dyspersję i uwodnienie, a następnie chłodzony, co pozwala uzyskać stabilizowaną entalpicznie asocjację międzyłańcuchową. Jest to mechanizm, według którego sieciuje się większość hydrokoloidów, m.in. agar i żelatyna. Wysokotemperaturowe żelowanie, podobnie jak niskotemperaturowe, wymaga ogrzania, które powoduje rozwinięcie struktur molekularnych hydrokoloidów, a następnie ich przegrupowanie. Dalsze ogrzewanie prowadzi do chwilowego spadku lepkości, po czym następuje jej gwałtowny wzrost po osiągnięciu temperatury żelowania [12].

Sieciowanie chemiczne różni się od sieciowania fizycznego obecnością czynnika sieciującego. Hydrokoloidy sieciowane chemicznie tworzą strukturę, w której występują trwałe wiązania kowalencyjne wewnątrzcząsteczkowe i międzycząsteczkowe. Struktura stabilizowana kowalencyjnie cechuje się wyższą wytrzymałością mechaniczną i termiczną niż struktura stabilizowana fizycznie. Proces sieciowania chemicznego kontrolo-



Rys. 2. Etapy fizycznego sieciowania hydrożelu

wany jest poprzez stężenie oraz rodzaj czynnika sieciującego [1].

Ilość oraz rodzaj wiązań sieciujących decyduje o finalnej zawartości wody w hydrożelu, gdyż stan uwodniony jest wynikiem oddziaływań między łańcuchami polisacharydu a wodą. Zróżnicowanie siły oddziaływań w cząsteczce hydrożelu powoduje, że wodę występującą w strukturze można podzielić na wodę silnie związaną, luźno związaną i wodę wolną. Przy niskim stopniu uwodnienia całość wody jest silnie związana z siecią polimeru głównie poprzez wiązania wodorowe z grupami funkcyjnymi o wysokim powinowactwie do wody. W miarę wzrostu zawartości wody w cząsteczce ilość wody luźnej rośnie, ponieważ liczba miejsc wiążących w strukturze spada na skutek zajęcia ich przez inne cząsteczki H₂O. Cząsteczki wody, które tworzą wiązania o niższej energii z grupami funkcyjnymi polimeru, określa się jako wodę luźno związaną. Woda wolna natomiast nie tworzy żadnych bezpośrednich połączeń z siecią polimeru [25]. Całkowity stopień uwodnienia materiału definiuje się wzorem:

$$EWC = \frac{m_o - m_k}{m_o} * 100\%$$

gdzie:

m_o – masa początkowa (uwodnionego) polimeru

m_k – masa końcowa (suchego) polimeru

Projektując hydrokoloidy dla rozwoju systemu korzeniowego roślin, należy zadbać o właściwości fizyczne takie jak:

- elastyczność – wraz ze wzrostem liczby wiązań w cząsteczce elastyczność spada, a nawet hydrokoloid może stać się kruchy;
- lepkość – ponieważ mostki między łańcuchami uniemożliwiają ruch łańcuchów względem siebie, obserwowany jest spadek lepkości. Z tej samej przyczyny, dla której maleje lepkość, rośnie natomiast odporność na pełzanie;
- rozpuszczalność – nieusieciowane hydrokoloidy są rozpuszczalne w wodzie, a usieciowane tracą tę zdolność, natomiast wciąż możliwe jest absorbowanie wody;
- właściwości mechaniczne – sieciowanie prowadzi do wzrostu temperatury zeszklenia na skutek zmiany upakowania molekularnego. Zwiększeniu ulega także wytrzymałość i twardość otrzymanych struktur [18].

Naturalnie występujące polisacharydy mogą mieć różne pochodzenie: roślinne, zwierzęce oraz bakteryjne. Występujące między nimi różnice we właściwościach fizycznych i chemicznych determinują ich zastosowanie. Zestawienie najpopularniejszych polisacharydów przedstawiono w tabeli 2 [21, 26, 28].

Na szczególną uwagę zasługuje ksantan, alginian oraz kwas hialuronowy i guma gellan ze względu na ich szeroką aplikacyjność w wielu gałęziach przemysłu. Ksantan – najpopularniejszy na rynku konsumenckim polisacharyd, który jest syntezowany przez bakterie *Xan-*

thomonas campestris, tworzy pseudoplastyczne roztwory już przy bardzo niskich stężeniach, dlatego jest szeroko stosowany w przemyśle spożywczym, kosmetycznym i farmaceutycznym. Lepkość roztworów ksantanu w niewielkim stopniu zależy od pH i temperatury, uzależniona jest natomiast od masy molowej oraz stopnia pirogronowania i acetylowania. Lepkość roztworu jest tym wyższa, im masa cząsteczkowa, stopień podstawienia i stężenie elektrolitów jest większe. Ksantan jest odporny zarówno na ogrzewanie, jak i chłodzenie do temperatur ujemnych. Nie tworzy żeli, ale wykazuje działanie synergistyczne z gluko- bądź galaktomannanem przy procesie żelowania [21, 24]. Kwas alginowy jako liniowy egzopolisacharyd jest syntezowany przez brunatnice oraz bakterie: *Pseudomonas aeruginosa* i *Azotobacter vinelandii*. Jednostkami budulcowymi kwasu alginowego są: reszty kwasów uronowych β-D-mannopiranouronowego (M), która może być częściowo O-acetylowana w pozycji 2 i 3 oraz α-L-gulopiranouronowego (G) [24]. Stosunek M/G decyduje o właściwościach kwasu alginowego, przy czym silniejsze wiązanie z kationami, a także sztywniejszy żel tworzą reszty G. Sole kwasu alginowego są stosowane jako zagęszczacze w przemyśle spożywczym, gdzie oznacza się je symbolami od E-400 do E-404. W medycynie stosowane są jako składniki opatrunków do ran oraz jako leki w chorobach układu pokarmowego. Alginiany znajdują także zastosowanie w drukarstwie i impregnacji tkanin. Kwas hialuronowy jest wysokocząsteczkowym liniowym polisacharydem zbudowanym z kwasu D-glukopiranouronowego oraz reszt 2-acetamido-2-deoksy-D-glukopiranozy. Kwas ten występuje naturalnie w międzykomórkowym płynie maziowym skóry, w przestrzeni ciała szklistego oka. HA może być pozyskiwany np. z grzebieni kogucich, jednak coraz częściej izoluje się go z bakterii *Streptococcus zooepidemicus*, *Pasturella multocida* oraz *Streptococcus thermophilus* [24]. Kwas hialuronowy jest polisacharydem biozgodnym, dlatego jest wykorzystywany w medycynie m.in. do produkcji soczewek, kropli nawilżających, do redukcji blizn i zmarszczek, a w ortopedii jako materiał pokrywający protezy i wykorzystywany do leczenia chorób zwyrodnieniowych stawów [24].

Guma gellan (GG) jest zewnątrzkomórkowym polisacharydem, należącym do grupy egzopolisacharydów. Jest wytwarzana przez bakterie *Sphingomonas elode* w procesie fermentacji tlenowej. Jednostką powtarzającą się w liniowej budowie gumy gellan jest tetrasacharyd zbudowany z glukozy, kwasu glukuronowego i rannozy, gdzie ich stosunek molowy to: 2:1:1 [3, 10]. Substancja ta jest szeroko stosowana w przemyśle spożywczym i kosmetycznym ze względu na swoje zdolności żelujące. Biokompatybilność, nietoksyczność i biodegradowalność gumy gellan pozwalają na jej zastosowanie nie tylko w podłożach transparentnych, ale także w biotechnologii i medycynie, np., jako nośnik substancji odżywczych. Jej funkcjonalne właściwości ujawniają się już w tak niskich stężeniach, jak 0,01% i dają się modyfikować poprzez zmianę warunków sieciowania

Tabela 2

Charakterystyka wybranych polisacharydów

Pochodzenie		Polisacharyd	Zastosowanie
Roślinne	Rośliny	Skrobia	W przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, papierniczym i tekstylnym
	Rośliny	Celuloza	W przemyśle papierniczym, do wyrobu klejów, lakierów, materiałów wybuchowych, sztucznego jedwabiu, sztucznej skóry, membran akustycznych
	Nasiona	Guma guar	W przemyśle spożywczym, papierniczym, do produkcji materiałów wybuchowych
Algi	Czerwone koralowce	Agar	W przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, jako podłoże do hodowli tkankowych, do produkcji odlewów szczękowych, żeli odświeżających powietrze
	Brazowe koralowce	Alginian	W przemyśle farmaceutycznym do produkcji hipoalergicznym preparatów opatrunkowych, jako matryca stabilizująca do przechowywania komórek i enzymów, do produkcji powłok nawozów, pestycydów i sadzonek
Bakteryjne	<i>Xanthomonas campestris</i>	Ksantan	W przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym, spożywczym jako środek żelujący, stabilizujący i zagęszczający, w drukarstwie
	<i>Sphingomonas elodea</i>	Guma gellan	W wyrobach piekarniczych, jako substancje żelujące, produkcja kapsulek, folii, włókien
	<i>Agrobacterium radiobacter</i> , <i>Agrobacterium biovar</i>	Kurdlan	W przemyśle spożywczym jako środek stabilizujący, żelujący i zagęszczający
Zwierzęca	Grzebienie kogucie, skóra rekina, gałka oczna kręgowców, pępowina	Kwas hialuronowy	W przemyśle farmaceutycznym i medycynie do pokryć implantów, do produkcji kosmetyków, jako środek nawilżający oraz wypełniający zmarszczki i blizny
	Ściany komórkowe grzybów, egzoszkielety organizmów morskich	Chitozan – Chitosan	W medycynie do produkcji opatrunków oraz środek leczniczy w leczeniu m.in. otyłości, stanów zapalnych dziąseł, nośnik leków, w rolnictwie jako nawóz

[20]. Właściwości mechaniczne, lepko-sprężyste i optyczne są ściśle związane z obecnością grup acylowych. Wysokoacylowana guma gellan tworzy elastyczne, miękkie i lepkie żele, podczas gdy niskoacylowana guma gellan tworzy żele o niskiej lepkości, kruche i twarde [29].

Metody i techniki inżynierii materiałowej oraz znajomość uwarunkowań fizykochemicznych substancji stosowanych do tworzenia podłoży transparentnych, pozwala na opracowanie hydrożelowych gleb sprecyzowanych do określonych wymagań roślin. Wprowadzenie transparentnej gleby jako medium o wysokiej uniwersalności pozwala na precyzyjne kontrolowanie poziomu uwodnienia środowiska do potrzeb rośliny, dzięki czemu może być wykorzystane do uprawy wielu gatunków roślin. Hydrożelowe podłoża pozwalają na precyzyjne kontrolowanie ilości oraz rodzaju substancji odżywczych, które są dostarczane do układu po nadaniu hydrożelowi ostatecznej postaci. Dzięki temu makroelementy, mikroelementy, witaminy i hormony mogą być

dobierane indywidualnie do etapu rozwoju rośliny i dynamicznie zmieniających się wymagań. Na każdym etapie rozwoju systemu korzeniowego można dokonać ingerencji, np. wymieniając podłoże. Forma hydrożelu (sfery o wielkości ok. 2 mm) pozwala na nieinwazyjne przeprowadzenie procesu, dzięki czemu system korzeniowy roślin pozostaje nienaruszony. Wprowadzanie transparentnych gleb pozwoli na monitorowanie wzrostu roślin, rozwoju systemu korzeniowego i odpowiedni dobór sadzonek.

W rolnictwie precyzyjnym ważnym elementem jest kompleksowy system gospodarowania, dostosowujący konkretne elementy agrotechniki do zmieniających się warunków na poszczególnych częściach pola. Proces uzależniony jest nie tylko od obecnego stanu rozwoju roślin, ale również właściwości glebowych.

Literatura: 1. Ahmad N.H, Shuhaimi M., Che Man Y.B., 2014 – Microbial Polysaccharides and Their Modification Approaches: A Review 2(18): 332-347. 2. Aiguo D., 2010 – Drought under

- global worming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2, 45-65. **3. Bacelar A.H., Silva-Correia J., Oliveira J.M., Reis L.R.**, 2016 – Recent progress in gellan gum hydrogels provided by functionalization strategies. *Journal of Materials Chemistry B* 4(37): 6164-6174. **4. Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett P.D., Valentine T.A.**, 2011 – Root elongation, water stress and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62, 59-69. **5. Bingxiang Y., Lei X., Lihua Z., Yuefeng Z., Gongfa Ch., Xing G.**, 2019 – Transparent Synthetic Soil and Its Application in Modeling of Soil-Structure Interaction Using Optical System. *Frontiers in Earth Science* 276, 7. **6. Burey P., Bhandari B.R., Howes T., Gidley M.J.**, 2008 – Hydrocolloid gel particles: formation, characterization, and application. *Critical reviews in Food Science and Nutrition* 48(5): 361-377. **7. Czepińska-Kamińska D** (red.) praca zbiorowa 2011 – Roczniki Gleboznawcze. GPT. Systematyka gleb Polski, wydanie 5, 62. **8. Douglas H.G Qingbin G.**, 2019 – The Role of Hydrocolloids in the Development of Food Structure. *Handbook of Food Structure Chapter 1*, 1-28. **9. Downie H., Holden N., Otten W., Spiers A.J., Tracy A.V., Diupuy. I.X.** 2012 – Transparent Soil for Imaging the Rhizosphere. *PLOS ONE* 7(9): e44276. **10. Edwin R., Morris, Kat-suyoshi N., Marguerite Rinaudo** 2012 – Gellation of gellan – A review. *Food Hydrocolloids* 28, 373-411. **11. Gliński J., Horabik J., Lipiec J., Sławiński C.**, 2014 – Agrofizyka – procesy, właściwości, metody. Alfa-Graf Lublin, 36-40. **12. Goff H.D., Guo Q.**, 2019 – Handbook of Food Structure Development. *Food Chemistry, Function and Analysis* 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1039/9781788016155>. **13.** <https://www.ipcc.ch/>, 2018 – Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels*. Genewa, Szwecja: World Meteorological Organization 32. **14.** <https://www.flood.firetree.net/>. [Online] **15.** <https://www.un.org/en/development/desa/population/> United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2019 – *World Population Prospects 2019: Highlights*. ST/ESA/SER.A/423. **16. Iskander, M., Bathurst, R.J., Omidvar M.**, 2015 – Past, Present, and Future of Transparent Soils. *Geotechnical Testing Journal* 38, 5. **17. Krausmann F., Karl-Heinz E., Gingrich S., Helmut H., Bondeau A., Gaube V., Lauk Ch., Plutzer Ch., Searchinger T.D.**, 2003 – Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 25, 10324-10329. **18. Maitra J., Kumar Shukla V.**, 2014 – Cross-linking in Hydrogels – A Review. *American Journal of Polymer Science* 4(2): 25-31. **19. Manyi-Loh Ch., Mamphweli S., Meyer E., Okoh A.**, 2018 – Antibiotic Use in Agriculture and Its Consequential Resistance in Environmental Sources: Potential Public Health Implications. *Molecules* 23, 4. **20. Orczykowska M., Budzyński P., Dziubiński M.**, 2011 – Wpływ gumy gellan na właściwości reologiczne roztworów skrobi o różnym pochodzeniu botanicznym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1, 31-32. **21. Pragnesh N.D., Gor A.**, 2018 – Natural Polysaccharide – Based Hydrogels and Nanomaterials: Recent Trends and Their Applications. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Gujarat, India : Department of Chemistry, Sardar Patel University, Vallabh Vidyanagar 6-66. **22. Rybka K.**, 2017 – Fenotypowanie roślin. Konferencja EPPN 2020 w Tartu, 287, 161-174. **23. Saurabh B.**, 2015 – Plant Tissue Culture. [book auth.] *Modern Applications of Plant Biotechnology in Pharmaceutical Sciences* 5, 157-207. **24. Samaszko-Fiertek J., Kuźma M., Dmochowska B., Ślusarz R., Madaj J.**, 2016 – Egzopolisacharydy bakteryjne: budowa i funkcje. *Wiadomości Chemiczne* 70(7-8): 473-496. **25. Sekine Y., Ikeda-Fukuzawa T.**, 2009 – Structural changes of water in a hydrogel during dehydration. *The Journal of Chemical Physics* 130(3): 034501. **26. Tanga J., Mao R., Tung M.A., Swanson B.G.**, 2001 – Gelling temperature, gel clarity and texture of gellan gels containin fructose or sucrose. *Carbohydrate Polymers* 44, 197-209. **27. Zhang W., Gu X., Zhong W., Ma Z., Ding X.**, 2020 – Review of transparent soil model testing technique for underground construction: Ground visualization and result digitalization. *Underground Space* 7(4): 702-723. **28. Zhang H., Zhang F., Yuan R.**, 2020 – Applications of natural polymer-based hydrogels in the food industry. *Hydrogels Based on Natural Polymers* 357-410. **29. Zihao Xu., Zhuqing Li., Shan J., Kaitlin, Brattie M.**, 2018 – Chemically Modified Gellan Gum Hydrogels with Tunable Properties. *ASC Omega* 3, 6998-7007.

Characteristics of hydrogel substrates as alternatives to natural soils in monitoring of the development of the root system of plants in precision agriculture

Piotr Szatkowski, Ewa Szczepanik, Edyta Molik

Summary

Climate change, including drought, necessitates the search for solutions to support agricultural production. The root system of plants plays an important role in the uptake of water and nutrients. A well-developed and effectively functioning root system can provide a sufficient supply of water to the plant even under conditions of water scarcity. For this reason, it is reasonable to orient agriculture towards plants whose structure allows them to better assimilate soil resources. The introduction of transparent soil in agricultural production enables precise control of the development of the root systems. Materials engineering tools currently enable the development of transparent substrates designed for specific soil types.

KEY WORDS: hydrogel substrates, precision agriculture, soils