

Materiały alternatywne i nowoczesne technologie stosowane w zrównoważonej geoinżynierii

Alternative materials and modern technologies used in sustainable geoengineering



prof. dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska

Politechnika Śląska
malgorzata.jastrzebska@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-0080-5784



dr inż. Anna Olma

Politechnika Śląska
anna.olma@polsl.pl
ORCID: 0000-0003-4731-0623

Streszczenie

W artykule przedstawiono zwięźle materiały odpadowe, biomateriały i biotechnologie stosowane w zrównoważonej geoinżynierii do wzmacniania słabego podłoża gruntowego. Więcej uwagi poświęcono dynamicznie rozwijającym się technologiom opartym na nanomateriałach, mikroorganizmach (metody MICP, EICP) i lignosulfon

nianach. Wskazano podstawowe zastosowania poszczególnych rozwiązań, ich wady i zalety. Zwrócono uwagę na konieczność weryfikacji wyników badań laboratoryjnych w warunkach terenowych oraz przeprowadzenia niezbędnych analiz wykonalności ekonomicznej i śladu węglowego.

Słowa kluczowe nanomateriały, MICP, EICP, lignosulfonian, geoinżynieria zrównoważona, grunty słabe

Abstract

This article briefly presents waste materials, biomaterials, and biotechnologies used in sustainable geoengineering to improve weak subsoil. More attention is paid to the dynamically developing technologies based on nanomaterials, microorganisms (MICP and EICP methods), and lignosulfon

ates. The basic applications of all solutions, their advantages and disadvantages were outlined. Attention is drawn to the need to verify laboratory test results in field conditions and conduct the necessary economic feasibility and carbon footprint analyses.

Keywords nanomaterials, MICP, EICP, lignosulfonate, sustainable geoengineering, weak soils

WPROWADZENIE

W praktyce inżynierskiej popularność zyskują materiały i technologie, które w ramach Europejskiego Zielonego Ładu wpisują się w unijną strategię gospodarki niskoemisyjnej oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Tym samym realizowany jest plan zrównoważonego rozwoju (ang. sustainable development), który zakłada uniezależnienie od paliw kopalnych, ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i zużycia surowców naturalnych oraz wytwarzania

odpadów. W Polsce taka działalność regulowana jest przez projekt Narodowego Programu Rozwoju Gospodarki Niskoemisyjnej z 2015 r. z późniejszymi zmianami [1].

Takie podejście, w kontekście stosowania nowych materiałów lub technologii oraz materiałów odpadowych albo pochodzących z odzysku itp., spowodowało intensywny rozwój zrównoważonej geotechniki (geoinżynierii) [2–5]. W zależności od kategorii materiałów czy technologii nazywa się je biomateriałami i materia-

łami alternatywnymi oraz biotechnologiami. Ich coraz powszechniejsze stosowanie jest przedmiotem badań i dyskusji szeroko prezentowanych w literaturze naukowej [6].

PODZIAŁ MATERIAŁÓW I TECHNOLOGII STOSOWANYCH W GEOINŻYNIERII

Materiały **alternatywne** używane w geoinżynierii (rys. 1) pochodzą z:

- wydobywania kopalin i eksploatacji węgla kamiennego oraz brunatnego;



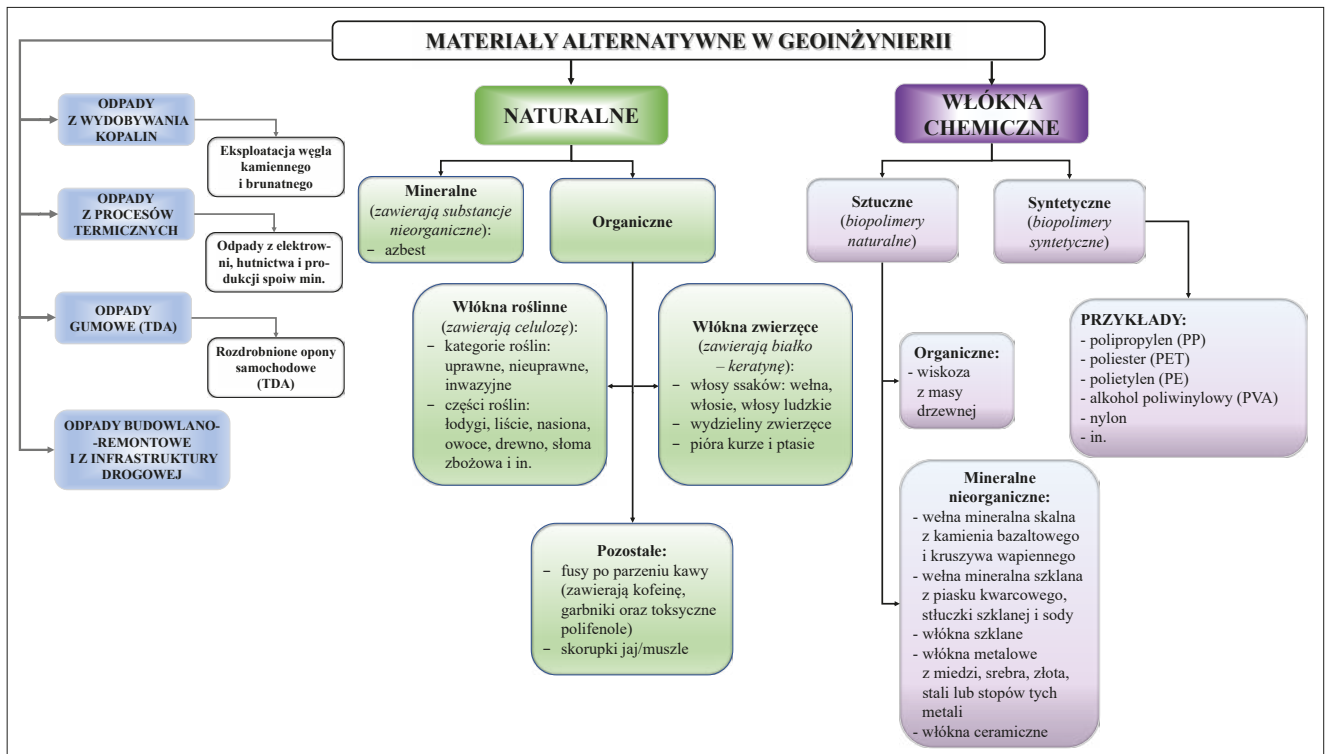
- procesów termicznych w elektrowniach, hutnictwie i z produkcji spoiw mineralnych;
- recyklingu materiałów gumowych, głównie opon samochodowych;
- robót budowlano-remontowych oraz infrastruktury drogowej;

- różnych gatunków roślin;
- zwierząt;
- celowej produkcji sztucznych i syntetycznych włókien chemicznych.

Kolejne dwie obszerne grupy tworzą **biomateriały i biotechnologie** (rys. 2),

które w inżynierii geotechnicznej są stosowane do wzmacniania podłoża, zwłaszcza pod infrastrukturę komunikacyjną. Do biomateriałów zalicza się nanomateriały obejmujące:

- nanorurki węglowe w postaci grafenu,



Rys. 1. Podział materiałów alternatywnych stosowanych w geoinżynierii

- nanocząstki, czyli krzemionkę koloidalną, nanobentonit i inne nanogrunty, laponit.

Z kolei biotechnologie to technologie wykorzystujące zjawisko biocementacji wskutek:

- mikrobiologicznego wytrącania węglanu wapnia CaCO_3 (metodą MICP; ang. microbially induced calcium-carbonate precipitation),
- enzymatycznego wytrącania CaCO_3 (metodą EICP; ang. enzymatic induced calcium-carbonate precipitation),
- elektrostatycznego zagęszczania macierzy gruntu z użyciem lignosulfonianu.

Bez względu na rodzaj odpadu czy technologii ich skuteczność potwierdza się eksperymentalnie na podstawie badań:

- podstawowych cech fizycznych (np. wilgotności, ciężaru objętościowego),
- parametrów uziarnienia (C_u , C_c , d_{50}),

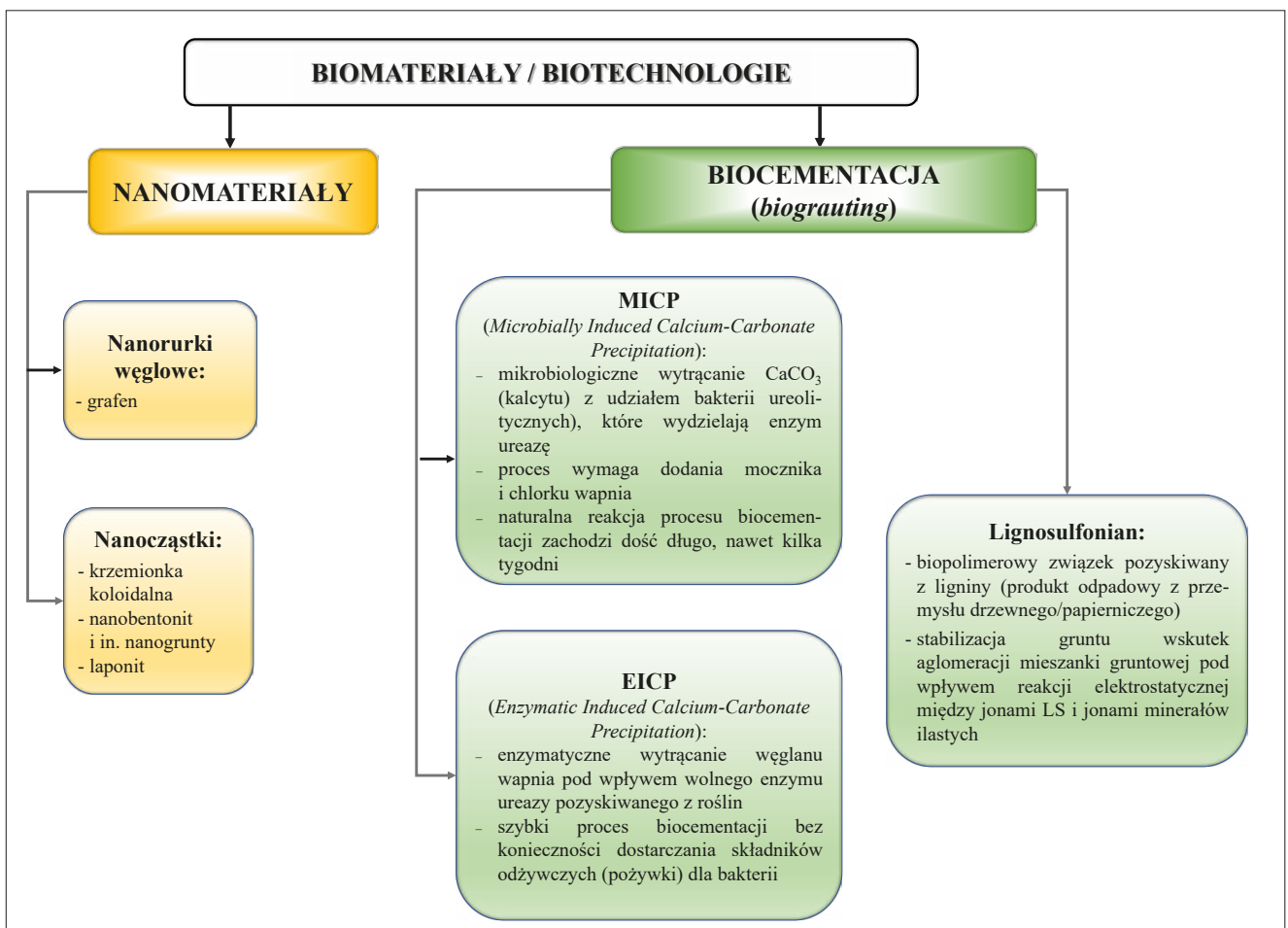
- granic konsystencji (w_L , w_p , w_s),
- parametrów pęcznienia (np. wskaźnika swobodnego pęcznienia),
- parametrów zagęszczenia w aparacie Proctora (w_{opt} , ρ_{dmax}),
- wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (UCS),
- wytrzymałości na rozciąganie (T),
- modułu sprężystości przy rozciąganiu (E),
- kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR),
- (rzadziej) parametrów wytrzymałościowych (ϕ , c) w aparacie bezpośredniego ściskania i trójosiowego ściskania.

NANOMATERIAŁY JAKO INTEGRALNY SKŁADNIK NANOTECHNOLOGII

Nanotechnologia jest pojęciem interdyscyplinarnym, które odnosi się do niemal wszystkich dziedzin nauk przyrodniczych i technologii. Ogólnie obejmuje ono pro-

jektowanie, wytwarzanie, modyfikowanie i zastosowanie materiałów oraz urządzeń w skali nano, czyli na poziomie atomów i cząsteczek. Pożądane właściwości inżynierskie nanomateriałów są związane z ich bardzo dużą powierzchnią właściwą oraz wysoką aktywnością powierzchniową. Dzięki temu znajdują one szerokie zastosowanie w inżynierii lądowej/budownictwie do:

- ulepszania podstawowych właściwości materiałów,
- potencjalnego zmniejszania wpływu na środowisko i zużycia energii przez konstrukcje i procesy budowlane,
- poprawy bezpieczeństwa i zmniejszania kosztów związanych z infrastrukturą lądową,
- kontrolowania awarii dróg poprzez ograniczanie uszkodzeń spowodowanych przesiąkaniem wody i pęknięć nawierzchni indukowanych termicznie,



Rys. 2. Podział biomateriałów i biotechnologii stosowanych w geoinżynierii

Rys. autorów

• ulepszenia podłoża gruntowego zwłaszcza w warstwach konstrukcyjnych/podbudowie infrastruktury transportu drogowego oraz na obszarach osuwiskowych.

Nanorurki węglowe

Nanorurki węglowe (CNT; ang. carbon nanotubes), powszechnie nazywane grafenem, ze względu na złożony charakter oraz wciąż wysoki koszt produkcji znajdują zastosowanie głównie w sferze badań eksperymentalnych. W zadaniach geoinżynierskich nanorurki węglowe wykorzystuje się przede wszystkim jako domieszki do cementu w procesie chemicznej stabilizacji podłoża. Mechanizm wzmocnienia opiera się na przewidywanym zmniejszeniu odstępów między ziarnami szkieletu gruntowego, co zwiększa sztywność całego układu [7].

Nieliczne badania wskazują, że dodanie CNT do gruntu prowadzi do wzrostu kąta tarcia wewnętrznego i zmniejszenia spójności [8], a także do zwiększenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w zakresie 77–185% [7]. Dotychczas badaniami objęto: piaski gliniaste, pyły organiczne, organiczne piaski gliniaste oraz pyły piaszczyste [np. 9]. Najczęściej przyjmowane stężenia roztworu grafenu wynosiły 0,001–3,000 wt%. Badacze wykazali również konieczność stosowania surfaktantów, czyli środków powierzchniowo czynnych zapobiegających naturalnej tendencji nanorurek węglowych do agregacji.

Grafen może także być używany jako dodatek do mieszanek mineralno-asfaltowych, betonów asfaltowych i cementowych w infrastrukturze drogowej [np. 10]. Wówczas służy do diagnozowania uszkodzeń nawierzchni, monitorowania natężenia i struktury ruchu, zwiększania wytrzymałości na obciążenia cykliczne i regulacji temperatury nawierzchni.

Nanocząstki – krzemionka koloidalna

Krzemionka koloidalna (KK) jest wodną zawiesiną nanocząsteczek krzemionki wytwarzaną z nasyconych roztworów kwasu krzemowego (H_4SiO_4). Taki roz-

twór ma początkowo niską lepkość, która z czasem wzrasta, a powstały w ten sposób koloidalny żel krzemionkowy twardnieje. Żel KK pełni funkcję wypełniacza/spoiwa pomiędzy ziarnami szkieletu gruntowego, stabilizując go. Pod kątem zastosowań w geoinżynierii dotychczas objęto badaniami: piaski (w tym wapienne, krzemionkowe, pochodzące z kamieniołomów), pyły organiczne oraz gliny piaszczyste. Najczęściej używane stężenia KK mieszczą się w przedziale 1–20 wt% w stosunku do masy wody [11]. Badacze wykazali [np. 12]:

- wzrost odporności gruntu na upłynięcie po iniekcji KK,
- wzrost wytrzymałości gruntu w warunkach obciążenia monotonicznego (efekt nasila się wraz ze wzrostem zawartości KK i czasem utwardzania żelu),
- wzrost wskaźnika CBR o 38,0–82,0% dla ilu z zawartością 0,5–1,0 wt% KK,
- nasilenie dyatacji pod obciążeniem monotonicznym,
- znaczny spadek przewodnictwa hydraulicznego gruntu po iniekcji KK,
- zwiększenie ściśliwości gruntu poddanego działaniu KK.

Podjęmowano też próby modelowania zjawiska iniekcji nanokrzemionkowej pod kątem wrażliwości podłoża na upłynięcie w warunkach obciążeń cyklicznych/sejsmicznych [np. 13].

Nanocząstki – nanobentonit i inne nanogrunty

Nanobentonit to nanocząsteczkowa wersja naturalnej gliny bentonitowej, charakteryzująca się lepszymi niż ona właściwościami w zakresie absorpcji wilgoci i pęcznienia. Metody uzyskiwania nanobentonitu opierają się na wieloetapowej procedurze mielenia bentonitu [14]. Inne nanogrunty otrzymuje się w proce-

sie wysokoenergetycznego mielenia kulowego gruntu naturalnego (spoiowego lub niespoiowego).

Dotychczasowe badania [np. 15–17] wykazały, że:

- już niewielki dodatek nanogruntu znacząco poprawia właściwości geotechniczne gruntu naturalnego;
- grunty piaszczyste reagują korzystnie na dodatek własnych nanocząstek;
- dodanie zaledwie 1–4% nanogruntu zwiększa wytrzymałość gruntu piaszczystego na ścinanie (o 20–60%) oraz na ściskanie (o 3–40%), a także poprawia jego

Pożądane właściwości inżynierskie nanomaterialów są związane z ich dużą powierzchnią właściwą i aktywnością powierzchniową.

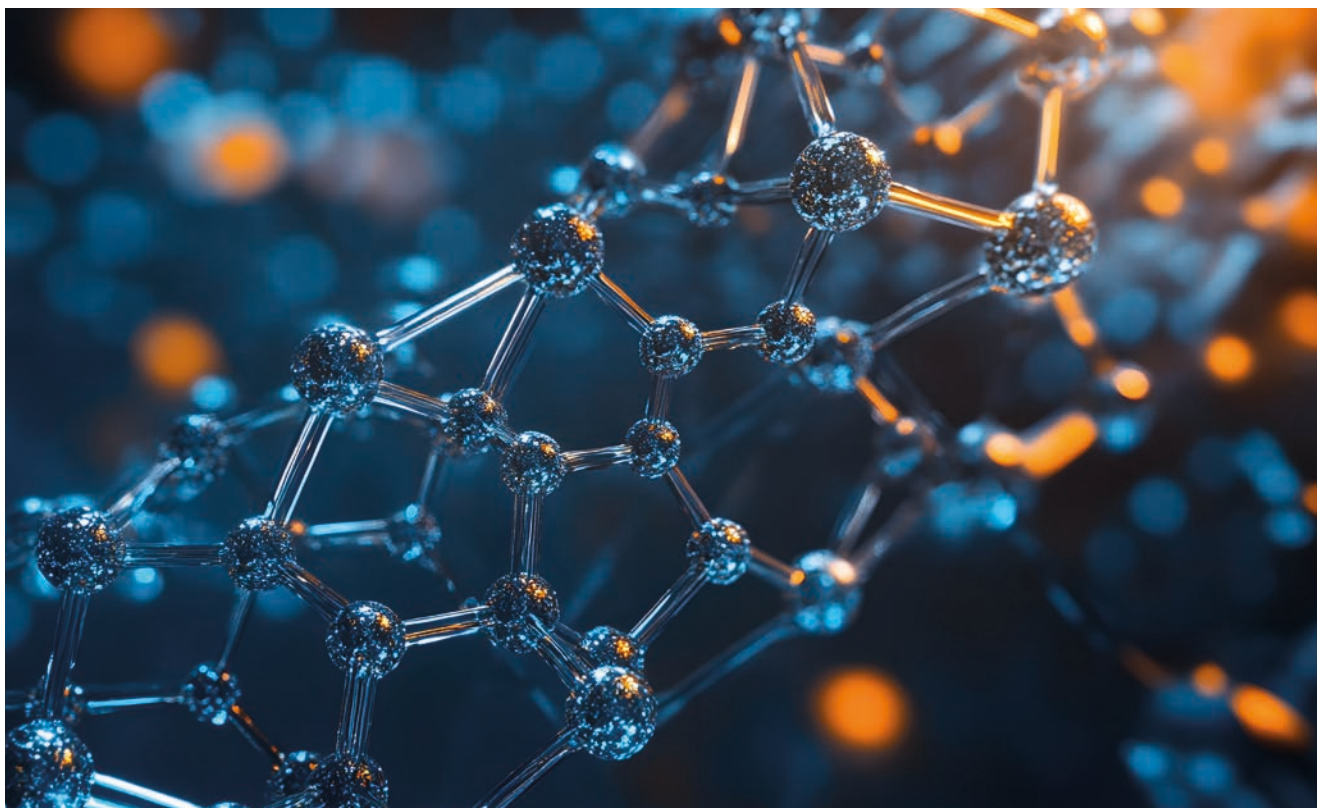
właściwości hydrofizyczne, dielektryczne i elektryczne;

- korzystne efekty przynosi łączenie nanogrunty z włóknami naturalnymi (np. ryżowymi, bananowymi) lub syntetycznymi – zmienia charakterystykę zniszczenia gruntu z kruchej na ciągliwą.

Nanocząstki – laponit

Laponit (L) jest produkowany z syntetycznego arkusza nanocząstek krzemianów sodu, magnezu i litu. Występuje w postaci proszku, który po zmieszaniu z wodą pęcznieje i tworzy przeźroczysty żel koloidalny. Wskaźnik plastyczności laponitu ($I_p = 1200\%$) jest ok. 2 razy większy niż bentonitu. Częstki laponitu są 5–10 razy mniejsze niż bentonitu, a jego początkowa lepkość i gęstość są podobne do parametrów wody [18].

Do podstawowych zalet laponitu zalicza się zdolność (jeszcze większą niż w przypadku krzemionki koloidalnej) do zwiększania wytrzymałości gruntu na upłynięcie poprzez spowolnienie generowania nadmiernego ciśnienia w porach [np. 19, 20]. Wykazano, że dodatek 1–5 wt% laponitu podnosi odporność czystych piasków i piasków pylastych na upłynięcie o 60–90%.



Wskazuje to na potencjał jego zastosowania do łagodzenia wstrząsów sejsmicznych i ulepszania systemów izolacji drgań dla mostów, dróg oraz innych wrażliwych konstrukcji.

Ponadto stwierdzono, że grunty z dodatkiem 3% laponitu mają podobną odporność na upłynnienie jak grunty z dodatkiem 10% krzemionki koloidalnej, co może kompensować wyższą cenę jednostkową laponitu.

Interesującym rozwiązaniem jest wykorzystanie laponitu jako tzw. przezroczystego gruntu do symulowania różnych zagadnień związanych z upłynnieniem. W modelowaniu geotechnicznym stanowi on substytut słabego iltu [np. 21].

STABILIZACJA PRZEZ BIOCEMENTACJĘ METODAMI MICP I EICP

Zjawisko biocementacji w geoinżynierii metodami MICP (microbially induced calcite precipitation) i EICP (enzyme induced calcite precipitation) ma zastosowanie przede wszystkim do gruntów niespoistych, słabych piasków i żwirów ze

względem na łatwość penetracji roztworów. Mimo tej oczywistej przesłanki badaniami objęto również grunty spoiste, w tym pęczniące, organiczne, piaski pylaste i gliniaste oraz popioły lotne. Wyniki eksperymentów wykazały skuteczność metod MICP i EICP w stabilizacji gruntów m.in. na terenach osuwiskowych oraz w zabezpieczaniu ścian wykopów i konstrukcji hydrotechnicznych [np. 22–25].

Metoda MICP polega na mikrobiologicznym wytrącaniu węglanu wapnia CaCO_3 z udziałem bakterii ureolitycznych (najczęściej *Sporosarcina/Bacillus pasteurii*), które wydzielają enzym o nazwie ureaza. Proces ten wymaga dodania mocznika i chlorku wapnia, a jego skuteczność zależy m.in. od procesów komórkowych i szybkości metabolizmu, właściwych dla mikroorganizmów. W przypadku tej metody naturalna biocementacja zachodzi dość długo, nawet przez kilka tygodni [24].

Metoda EICP polega na wytrącaniu węglanu wapnia CaCO_3 pod wpływem wolnego enzymu ureazy pozyski-

wanego z roślin (nasion arbuza, soi, dyni oraz fasoli skrzydlatej lub fasoli Jacka). Enzym ma postać proszku rozpuszczalnego w wodzie, o rozmiarze rzędu 12 nm, co ułatwia penetrację wewnątrz porów gruntu. W odróżnieniu od metody MICP proces biocementacji zachodzi bardzo szybko i nie wymaga dostarczania składników odżywczych (pożywki) dla podtrzymania aktywności bakterii.

Przebieg procesu biocementacji i jego efekt zależą od:

- stężenia ureazy i mocznika;
- temperatury – im wyższa, tym lepsze efekty;
- odczynu pH – środowisko alkaliczne sprzyja efektywniejszemu wytrącaniu CaCO_3 ;
- lepkości roztworu;
- metody aplikacji (uzależnionej od uziarnienia i porowatości gruntu);
- głębokości, na której oczekiwany jest efekt wzmocnienia.

Wśród metod aplikacji roztworu można wyróżnić:

- wtrysk/iniekcję – pozwala na uzyskanie kolumn wzmocnionego gruntu;
- mieszanie mechaniczne i zagęszczanie – wskazane do zastosowań terenowych, np. przy budowie nawierzchni i ulepszeniu powierzchniowym;
- przesiąkanie powierzchniowe – wymaga kilku serii podawania roztworu, ale zapewnia mocniejsze (niż w metodzie mieszania i zagęszczania) wiązanie kalcytu z cząstkami gruntu, choć nie tak równomierne;
- natryskiwanie – gdy konieczne jest jedynie wzmocnienie powierzchni.

STABILIZACJA PRZEZ ŻELOWANIE LIGNOSULFONIANEM

Lignosulfonian (LS) to biopolimerowy związek pozyskiwany w procesie chemicznej modyfikacji ligniny, która jest naturalnym polimerem występującym w roślinach (np. w drewnie). W zależności od rodzaju procesu i zastosowanych alkaliów otrzymuje się lignosulfonian wapnia (najczęściej łączony z gruntami), lignosulfonian sodu albo magnezu (które są dodawane jako plastyfikatory do mieszanek betonowych). Proces biocementacji w podłożu zachodzi na skutek reakcji elektrostatycznych między dodatnimi jonami LS i ujemnie naładowanymi minerałami ilastymi. Dochodzi wówczas do aglomeracji mieszanek, czyli tworzenia się kłaczków i łańcuchów polimerowych zagęszczających macierz gruntu.

Największe zalety LS zawdzięcza swojemu pochodzeniu – są to m.in.: nietoksyczność, niekorozyjność oraz niebiodegradowalność (nie ulega rozkładowi pod wpływem bakterii, drożdży ani grzybów) [np. 26]. Badania wykazują, że dodatek zaledwie 0,4% LS znacząco spowalnia erozję gruntu. Dodanie 3% LS (do piasku gliniastego) może zredukować wskaźnik podatności gleby na erozję wodną o prawie 100%.

Podstawowe zastosowania geoinżynierne lignosulfonianu obejmują wykorzystanie go jako [np. 27–30]:

- głównego stabilizatora dróg nieutwardzonych i rolniczych oraz podłoża dróg o dużym natężeniu ruchu i autostrad;

- dodatku poprawiającego odporność na erozję wewnętrzną (zwłaszcza w przypadku piasków pylastych lub gliniastych) np. na nasypach drogowych lub nasypach zapór wodnych (zwłaszcza po przelaniu);
- korzystnej domieszki w bioinżynierii zboczy, przede wszystkim gdy jest on mieszany wgłębnie, a nie rozpylany powierzchniowo.

Należy jednak uwzględnić ryzyko wypłukiwania LS z powierzchni stabilizowanego podłoża w określonych warunkach pogodowych (takich jak: wilgotne środowisko, intensywne opady, topniejący śnieg). Mimo to udokumentowano pozytywne zastosowanie LS jako środka stabilizującego w dziewięciu projektach drogowych o łącznej długości 115 km, realizowanych w latach 1984–1988 w Alabamie [31].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Syntetycznie przedstawiono metody i materiały alternatywne stosowane w geoinżynierii do ulepszenia podłoża gruntowego. Więcej uwagi poświęcono biomateriałom oraz biotechnologiom. Oczekiwany efektami ich użycia są: zwiększenie wytrzymałości i sztywności, ograniczenie pęcznienia lub upłynniania oraz zmiany właściwości hydraulicznych.

Do tej pory poprawa tych cech była weryfikowana głównie badaniami laboratoryjnymi. Nieliczne zespoły badawcze wykazują skuteczność proponowanych

informacji o trwałości zastosowanych materiałów. Twarde wyliczenia dokumentujące „zrównoważone działania” w geoinżynierii pojawiają się w literaturze niezwykle rzadko [np. 32, 33].

Należy pamiętać, że każde z proponowanych nowych rozwiązań, obok zalet, ma również wady. Można je niwelować poprzez kombinację różnych technologii i materiałów. Przykładem tego są metody biocementacji często łączone z zastosowaniem włókien roślinnych, które zmniejszają kruche pękanie gruntów poddawanych wyłącznie biocementacji.

Do interesujących rozwiązań należy połączenie:

- piasku, włókien konopnych i metody EICP [24];
- nanokrzemionki oraz włókien bananowych [34];
- gruntów marglowo-gliniastych, włókien szklanych (0,75%), wapna (6,00%) i nanogliny (1,00%) [35];
- gruntów gliniastych, włókien roślin ryżowych i nanogliny [16];
- piasku przybrzeżnego, włókien węglowych (0,40%), bazaltu (0,40%), polipropylenu (0,20%) oraz metody MICP [36].

Na podstawie dokonanego przeglądu można stwierdzić, że w dobie kurczenia się surowców naturalnych i postępującej degradacji środowiska nowe metody i biotechnologie będą coraz częściej brane pod uwagę jako alternatywne rozwiązania problemów inżynierskich.

Twarde wyliczenia dokumentujące „zrównoważone działania” w geoinżynierii pojawiają się w literaturze niezwykle rzadko.

rozwiązań w warunkach terenowych, gdzie największym wyzwaniem jest wprowadzenie odpowiedniego dodatku na pewną głębokość i stworzenie mieszaniny w skali makro.

Wdrażaniu nowych metod nie sprzyja brak rzetelnej analizy wykonalności ekonomicznej, analizy śladu węglowego czy

Więcej informacji na temat wybranych materiałów i metod można znaleźć w pierwszym tomie *Zrównoważonej geotechniki* [2], w którym obszernie omówiono odpady pochodzące z procesów termicznych, odpady gumowe, a także naturalne pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Planowany drugi tom tej

publikacji obejmie swoim zakresem zagadnienia odpadów z wydobywania kopalin, budowlano-remontowych i z infrastruktury drogowej, a także włókien biopolimerowych, biomateriałów i metod biocementacyjnych. ■

Literatura

- [1] Ministerstwo Środowiska, *Narodowy Program Rozwoju Geotermii w Polsce* (projekt), Warszawa, 2023 [dostęp: 1.08.2023] w: CIRE, https://www.cire.pl/pliki/1/2018/nprgn_konsultacje_2.pdf.
- [2] Jastrzębska M. i in., *Zrównoważona geotechnika – wybrane materiały alternatywne*, t. 1, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2024.
- [3] Jastrzębska M., „Rozwiązania ekologiczne w geotechnice” w: *Inżynier Budownictwa*, nr 7/8, 2024, s. 50–55.
- [4] Jastrzębska M. i in. (red.), *New Frontiers in Sustainable Geotechnics*, Basel, 2023 [dostęp: 2.11.2023] w: MDPI, <https://www.mdpi.com/books/reprint/6801-new-frontiers-in-sustainable-geotechnics>.
- [5] Mickowski S., „Sustainable Geotechnics—Theory, Practice, and Applications” w: *Sustainability*, t. 13, nr 9, 2021, art. nr 5286, <https://doi.org/10.3390/su13095286>.
- [6] Jastrzębska M., „Use of Alternative Materials in Sustainable Geotechnics: State of World Knowledge and Some Examples from Poland” w: *Applied Sciences*, t. 15, nr 6, 2025, art. nr 3352, <https://doi.org/10.3390/app15063352>.
- [7] Correia A.A.S. i in., „Key-Parameters in Chemical Stabilization of Soils with Multiwall Carbon Nanotubes” w: *Applied Sciences*, t. 11, nr 18, 2021, art. nr 8754, <https://doi.org/10.3390/app11188754>.
- [8] Liu G. i in., „Comparison of Nanomaterials with Other Unconventional Materials Used as Additives for Soil Improvement in the Context of Sustainable Development: A Review” w: *Nanomaterials*, t. 11, nr 1, 2021, art. nr 15, <https://doi.org/10.3390/nano11010015>.
- [9] Wang E. i in., „Effects of carbon nanotubes treatment on engineering properties of sandy fine-grained soils subject to freeze–thaw cycles” w: *Research in Cold and Arid Regions*, t. 17, nr 2, 2025, s. 383–392, <https://doi.org/10.1016/j.rcar.2025.03.003>.
- [10] Kostrzanowska-Siedlarz A., „Inteligentne nawierzchnie drogowe i konstrukcje z nanomateriałami” w: *Magazyn Autostrady*, nr 8–9, 2017.
- [11] Vranca A., Tika T., „The Mechanical Response of a Silty Sand Stabilized with Colloidal Silica” w: *Geotechnics*, t. 1, nr 2, 2021, s. 243–259, <https://doi.org/10.3390/geotechnics1020013>.
- [12] Kumar A., Devi K., „Application of Nanotechnology in Soil Stabilization” w: *Journal of Building Material Science*, t. 5, nr 2, 2023, s. 25–36, <https://doi.org/10.30564/jbms.v5i2.5913>.
- [13] Spagnoli G., Collico S., „Multivariate analysis of a grouted sand with colloidal silica at different dilution stages” w: *Transportation Geotechnics*, t. 40, 2023, art. nr 100987, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100987>.
- [14] Erdoğan Y., Kök O., „Production and characterization of nanobentonite from sodium bentonite with mechanical grinding” w: *Fresenius Environmental Bulletin*, t. 28, nr 11, 2019, s. 8141–8150.
- [15] Alkhazal'eh H. i in., „Nanoparticles in Soil Reclamation: A Review of Their Role in Reducing Soil Compaction” w: *Air, Soil and Water Research*, t. 18, 2025, s. 1–13, <https://doi.org/10.1177/11786221241311725>.
- [16] Arabani M. i in., „The influence of rice Fiber and Nanoclay on Mechanical Properties and Mechanisms of Clayey Soil Stabilization” w: *Construction and Building Materials*, t. 407, 2023, art. nr 133542, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133542>.
- [17] Jiang P. i in., „Unconfined Compressive Strength and Splitting Tensile Strength of Lime Soil Modified by Nano Clay and Polypropylene Fiber” w: *Crystals*, t. 12, nr 2, 2022, art. nr 285, <https://doi.org/10.3390/cryst12020285>.
- [18] Tobar G., Orens R., „Geotechnical Properties of Laponite-Treated Sands in Reliquefaction Events” w: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, t. 148, nr 2, 2022, s. 34–42, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002901](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002901).
- [19] Huang Y., Wang L., „Experimental Studies on Nanomaterials for Soil Improvement: A Review” w: *Environmental Earth Sciences*, t. 75, 2016, art. nr 497, <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5118-8>.
- [20] Siddique S. i in., „The Application of Laponite Nanoparticle to Lessen the Risks of Liquefaction: An Emerging Technique for Sand Improvement (A Review)” w: *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, t. 60, 2023, s. 149–157, <https://doi.org/10.1007/s11204-023-09876-1>.
- [21] Zhang J. i in., „Soil improvement with laponite: effects on soil-structure interaction in liquefiable sands” w: *Computers and Geotechnics*, t. 185, 2025, art. nr 107360, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107360>.
- [22] Almajed A. i in., „State-of-the-Art Review of the Applicability and Challenges of Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP) and Enzyme-Induced Calcite Precipitation (EICP) Techniques for Geotechnical and Geoenvironmental Applications” w: *Crystals*, t. 11, nr 4, 2021, art. nr 370, <https://doi.org/10.3390/cryst11040370>.
- [23] Arab M. G. i in., „State-of-the-Art Review of Enzyme-Induced Calcite Precipitation (EICP) for Ground Improvement: Applications and Prospects” w: *Geosciences*, t. 11, nr 12, 2021, art. nr 492, <https://doi.org/10.3390/geosciences11120492>.
- [24] Iamchaturapatr J. i in., „Characteristics of Sandy Soil Treated Using EICP-Based Urease Enzymatic Acceleration Method and Natural Hemp Fibers” w: *Case Studies in Construction Materials*, t. 16, 2022, art. nr e00871, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00871>.
- [25] Wasil M. i in., „Effect of Ureolytic Bacteria on Compressibility of the Soils with Variable Gradation” w: *Architecture Civil Engineering Environment*, t. 16, nr 4, 2023, s. 131–139, <https://doi.org/10.2478/acee-2023-0040>.
- [26] Vakili A. i in., „Treatment of Highly Dispersive Clay by Lignosulfonate Addition and Electro-osmosis Application” w: *Applied Clay Science*, t. 152, 2018, s. 1–8, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.039>.
- [27] Amulya G. i in., „Sustainable Binary Blending for Low-Volume Roads—Reliability-Based Design Approach and Carbon Footprint Analysis” w: *Materials*, t. 16, nr 5, 2023, art. nr 2065, <https://doi.org/10.3390/ma16052065>.
- [28] Gratchev I. i in., „Application of Lignin for Slope Bioengineering: Effect on Soil Improvement and Plant Growth” w: *Applied Sciences*, t. 15(8), 2025, art. nr 4173, <https://doi.org/10.3390/app15084173>.
- [29] Loranger B. i in., „Mechanical and Freezing Behavior of Quarry Waste Sands Stabilized with Two Nontraditional Additives” w: *Cold Regions Science and Technology*, t. 221, 2024, art. nr 104168, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104168>.
- [30] Indraratna B. i in., „Estimating the Rate of Erosion of a Silty Sand Treated with Lignosulfonate” w: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, t. 139, nr 5, 2013, s. 701–714, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000766](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000766).
- [31] Hicks R.G., „Evaluation of Soil Stabilization Practices in Alaska. Phase I – Interim Report”, Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Juneau, 2002 [dostęp: 31.05.2025] w: State of Alaska DOT, https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/fhwa_ak_rd_01_06a.pdf.
- [32] Nadeem M. i in., „Evaluation of engineering properties of clayey sand bio-mediated with terrazyme enzyme” w: *Frontiers in Materials*, t. 10, 2023, art. nr 1195310, <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1195310>.
- [33] van Paassen L.A. i in., „Quantifying Biome-mediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrowth Experiment” w: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, t. 136, nr 12, 2010, s. 1721–1728, <https://doi.org/10.1061/ASCEGT.1943-5606.0000382>.
- [34] Kannan G., Sujatha E., „Effect of Nano Additive on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Soil” w: *Journal of Natural Fibers*, t. 20, nr 1, 2023, art. nr 2143980, <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2143980>.
- [35] Salimi M. i in., „Effect of Glass Fiber (GF) on the Mechanical Properties and Freeze-thaw (F-T) Durability of Lime-nanoclay (NC)-stabilized Marl Clayey Soil” w: *Construction and Building Materials*, t. 416, 2024, art. nr 135227, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135227>.
- [36] Rawat V., Satyam N., „Enhancing the Durability of Coastal Soil Treated with Fiber-Reinforced Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP)” w: *Applied Ocean Research*, t. 150, 2024, art. nr 104106, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104106>.