

# ROLA BAKTERII UREOLITYCZNYCH W PROCESACH BIOCEMENTACJI GRUNTÓW – AKTUALNY STAN BADAŃ

Katarzyna MISIOŁEK\*

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

**Streszczenie:** Celem artykułu jest przedstawienie mikrobiologicznego procesu otrzymywania osadu wapnia (MICP, z ang. *Microbially Induced Calcite Precipitation*). Podstawą technologii MICP jest aktywność komórek bakterii, które są w stanie zmagazynować produkt metaboliczny  $\text{CO}_3^{2-}$ , który następnie reaguje z jonami wapnia w środowisku naturalnym, w wyniku czego uzyskiwana jest struktura minerału. Bakterie ureolityczne, prowadzące proces hydrolizy mocznika przy udziale enzymu ureazy, okazały się najefektywniejsze przy tworzeniu osadu węglanu wapnia, a tym samym najbardziej odpowiednie do celów biocementacji gruntów. Artykuł przedstawia przegląd metod hodowli bakterii oraz prac eksperymentalnych mających na celu osiągnięcie najlepszych parametrów wytrzymałościowych badanego materiału.

*Słowa kluczowe:* bakterie ureolityczne, biocementacja, ureaza, MICP.

## 1. Wprowadzenie

Bakterie należą do organizmów prokariotycznych, charakteryzują się niewielkimi rozmiarami od dziesiątych części do kilkunastu mikronów. Podstawowymi formami morfologicznymi są formy kuliste, cylindryczne i spiralne (Kańska i in., 2006). Bakterie izolowane są z każdego środowiska. Można je zaobserwować w glebie, wodzie i powietrzu. Dodatkowo, występują w bardzo dużym przedziale stref temperaturowych, od Antarktydy po Afrykę, a nawet na terenach radioaktywnych. Komórki bakterii, oprócz prostej budowy, charakteryzują się również częstymi podziałami, co umożliwia utrzymanie wielu organizmów w krótkim czasie i przy niskich kosztach. W nauce, tak jak w środowisku, bakterie pełnią ważną rolę, cały czas znajdując nowe zastosowania.

Pod wpływem działania określonych typów bakterii zauważono polepszenie właściwości geotechnicznych gruntów, to jest współczynnika filtracji, wilgotności, wytrzymałości na ścinanie, modułu ścisłości i stopnia zagęszczenia. Aplikowanie mikroorganizmów w miejsca, gdzie planowana jest budowa, może pozwolić na uniknięcie osuwisk, nadmiernej filtracji i nadmiernego osiadania. Standardowe metody stosowane w celu wzmocnienia gruntów z użyciem betonu czy zawiesziny twardniejącej, to jest metoda wgłębnego mieszania gruntu, ścianki szczelne, ściany szczelinowe trwale modyfikują środowisko oraz są kosztowne (Furstenberg i in., 1983; Koda i in., 1988; Hapton i Edil, 1998; Yang i in., 1998; Jelusic i Leppanen, 1999; Edil, 2003; Celik i Canakci, 2011).

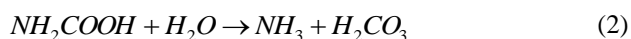
Celem artykułu jest przedstawienie mikrobiologicznego procesu otrzymywania osadu wapnia (MICP, z ang. *Microbially Induced Calcite Precipitation*) w celu polepszenia podstawowych fizycznych i mechanicznych parametrów podłoża: wytrzymałości na ścinanie, filtracji i modułu ścisłości.

## 2. Mikrobiologiczne uzyskiwanie węglanu wapnia

Proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia jest coraz powszechniejszą metodą powstawania ekologicznego materiału budowlanego, stwarzającą nowe perspektywy w zakresie ekologicznego wzmocnienia gruntów. Ekologicznego, ponieważ bez użycia chemii budowlanej, a jedynie z wykorzystaniem dostępnych w środowisku naturalnym związków. Predyspozycje do wykorzystania zjawiska wytwarzania ureazy w celu pozyskiwania węglanu wapnia w procesach mikrobiologicznych są badane od lat osiemdziesiątych XX wieku (Hammes i in., 2003). Wiele źródeł potwierdziło, że proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia jest bardzo skuteczny, powoduje wzrost parametru naprężenia ścinającego oraz spadek parametru przepuszczalności w gruntach żwirowych i piaszczystych (Van Paassen i in., 2010a). Należy jednak pamiętać, że proces MICP nadal jest w fazie badawczej i nie był jeszcze aplikowany na skalę techniczną (przemysłową). Dlatego wskazane są dalsze badania nad tą metodą w celu jej dopracowania i wprowadzenia na rynek budowlany.

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: katarzyna\_misiolek@is.pw.edu.pl

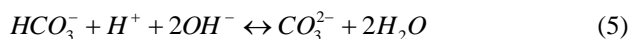
Proces MICP opiera się na naturalnej metodzie wytwarzania minerałów w środowisku naturalnym. Metoda tworzenia osadu węglanu wapnia przez mikroorganizmy jest nieskomplikowany i szybko prowadzi do uzyskania wysokich zawartości  $\text{CaCO}_3$ . W reakcji hydrolizy bakterie poprzez rozkład jednego jona mocznika uzyskują jeden jon kwasu karbaminowego i jeden jon amoniaku (1), po czym wskutek ponownej reakcji hydrolizy kwasu karbaminowego powstaje jeden jon kwasu węglowego i jeden jon amoniaku (2):



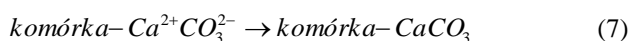
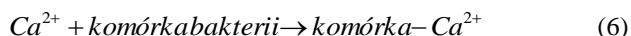
Uzyskane produkty (to jest  $\text{NH}_3$  i  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) w dalszym procesie są równoważone w wodzie, co prowadzi do uzyskania wodorowęglanu (3), dwóch jonów amonowych i dwóch wodorotlenkowych (4):



Jony wodorotlenkowe powodują wzrost pH, co może zmienić stan równowagi dwuwęglanów, w wyniku czego powstaje jon węglanowy (5). To powoduje wytrącenie jonów wapnia. Związki  $\text{NH}_4^+$  lokalnie podnoszą odczyn pH, co prowadzi do nagłego tworzenia węglanu wapnia:



Przy wystarczającym stężeniu  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{CO}_3^{2-}$  na powierzchni komórki bakterii tworzy się osad  $\text{CaCO}_3$  (6, 7):



Obecność komórek bakterii odgrywa istotną rolę w produkcji osadu  $\text{CaCO}_3$ , ponieważ stanowią miejsce zarodkowania i wpływają na typ formowanego minerału (Jimenez-Lopez i in., 2007).

### 3. Bakterie wykorzystywane w procesie mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia

Mikrobiologiczne uzyskiwanie osadu węglanu wapnia, będące podstawą technologii MICP opiera się na aktywności komórek bakterii. W procesie MICP wybrane mikroorganizmy magazynują produkt metaboliczny  $\text{CO}_3^{2-}$ , który następnie reaguje z jonami wapnia w warunkach naturalnych, dzięki czemu powstaje struktura minerału. Opisaną sekwencję można z łatwością odtworzyć w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem takich elementów metabolizmu drobnoustrojów jak fotosynteza, hydroliza mocznika, redukcja siarczanów i wiele innych. Najskuteczniejsza okazała się metoda tworzenia węglanu wapnia przy udziale bakterii prowadzących proces hydrolizy mocznika

przy udziale enzymu ureazy (De Muynck i in., 2010).

Jednym z najważniejszych punktów badań podczas pracy nad procesem biocementacji gruntów jest znalezienie bakterii, które produkują dużą ilość enzymu ureazy, dzięki czemu powstaje środowisko zasadowe korzystne dla tworzenia osadu (Douglas i Beveridge, 1998; Ciurli i in., 1999; Warthmann i in., 2000; Roden i in., 2002; Karatas i in., 2008; Dejong i in., 2010; Van Passen i in., 2010b; Hamdan i in., 2011; Weaver i in., 2011).

W wielu badaniach nad biocementacją wykorzystano bakterie *Bacillus pasteurii*, które są bardzo aktywne przy rozkładzie mocznika, a tym samym idealnie nadają się do procesu mikrobiologicznego uzyskiwania węglanu wapnia (Bang i in., 2001; Dejong i in., 2006; Dejong i in., 2010). Według nowej taksonomii nazwa bakterii *Bacillus pasteurii* została zmieniona na *Sporosarcina pasteurii* (Welland, 19/07/2010). W tabeli 1 przedstawiono najbardziej aktywne kultury bakterii pod względem wytwarzania ureazy.

Tab. 1. Kultury bakterii wytwarzające enzym ureazy (Sarda i in., 2009)

Kultury bakterii	Ilość wytwarzanej ureazy (urea/ml*)
<i>Bacillus pasteurii</i>	17,5
<i>Brevibacterium ammoniagenes</i>	12,5
<i>Bacillus lentus</i>	0,0

Objaśnienia: \* – jedna jednostka ureazy jest zdefiniowana jako ilość enzymu hydrolizującego 1 mikromol mocznika/min/ml (Smith i in., 1999).

#### 3.1. Metody laboratoryjne izolacji i hodowli bakterii wykorzystywanych w procesie MICP

Pozyskanie opisanych szczepów bakterii nie jest trudne i można tego dokonać na dwa sposoby. Pierwszy z nich, zdecydowanie kosztowniejszy, to zakup szczepów komercyjnych (na przykład z kolekcji DSMZ – Deutsche Sammlung von Mikroorganismen Und Zellkulturen lub ATCC – American Type Culture Collection). Drugim sposobem jest samodzielna izolacja szczepów ze środowiska naturalnego. Bakterie przydatne w procesach biocementacji najłatwiej znaleźć przy wapiennych kamieniach, w glebach, w mułach lub osadach (Dick i in., 2006; De Muynck i in., 2010). Źródła literaturowe podają różne lokalizacje, gdzie udało się wyizolować szczepy o wysokiej wydajności węglanowej, na przykład region Sakarya w Turcji (Canakci i in., 2015), czy region Bhuj w północnozachodnich Indiach (Welland, 2009).

W Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechniki Warszawskiej wyizolowano szczepy produkujące enzym ureazy, z okolic miejsc prowadzonych prac budowlanych lub z okolic składowisk materiałów budowlanych w Warszawie i Mińsku Mazowieckim. Próbkę gruntu zebrano

do jałowych pojemników, około 100 g każdy, i szczelnie zamykano. Pojemniki przechowywano w warunkach chłodniczych (+8°C) do momentu wykonania posiewów.

Z każdej próbki wykonano izolację szczepów bakterii. Izolacje przeprowadzono metodą płytkową Kocha na podłoże agarowe (Wzbogacony LAB-AGAR firmy BIOCOPRP). Bakterie wysiewano stosując posiew powierzchniowy w postaci zawiesiny w wodzie jałowej, następnie inkubowano przez 24 h w temperaturze 37°C. Dominujące szczepy przesiano metodą posiewu redukcyjnego na podłoże agarowe według Christensena (Podłoże z mocznikiem według Christensena firmy BTL sp z o.o.). Posiewy inkubowano przez 24 h w 20°C i 26°C. Zmiana zabarwienia podłoża na kolor różowy świadczyła o wytwarzaniu enzymu ureazy przez szczepy bakterii (rys. 1).



Rys. 1. Podłoże agarowe według Christensena zabarwione na kolor różowy wskutek posiewu bakterii charakteryzujących się zdolnością wytwarzania enzymu ureazy

Ze względu na brak opisów w literaturze warunków izolacji i inkubacji szczepów bakterii, w artykule zamieszczono jeden konkretny przykład warunków hodowli.

#### 4. Przygotowanie próbek

##### 4.1. Przygotowanie podłoża namnażającego

W celu wprowadzenia wybranych szczepów do próbek gruntu, bakterie należy namnożyć. Przygotowano podłoże namnażające składające się z bulionu 3 g/l, NaHCO<sub>3</sub> i mocznika 10 g/l (Canakci i in. 2015). Do podłoża wprowadzono szczepy bakterii i pozostawiono na wytrąsarsce przez 48 h w temperaturze pokojowej.

##### 4.2. Przebieg doświadczenia biocementacji próbek

Według źródeł literaturowych proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu węglanu wapnia najlepiej jest przeprowadzić w piaskach i żwirach (Van Paassen i in., 2010a; Canakci i in., 2015). W ramach badań analizowano cztery próbki piasku pod kątem wytrzymałości na ścinanie oraz cztery próbki pod kątem oceny zjawiska konsolidacji.

Wykonano próbki o wymiarach 60×60×20 mm do badań wytrzymałości na ścinanie, gdzie do trzech wprowadzono trzy różne szczepy bakterii, natomiast czwarta próbka była próbką testową. Do pomiaru konsolidacji wykonano próbki cylindryczne o średnicy 75 mm i grubości 20 mm. Podobnie jak do poprzedniego badania, do trzech próbek piasku dodano trzy różne szczepy bakterii, natomiast czwartą próbkę pozostawiono jako kontrolną. Wszystkie próbki inkubowano w temperaturze 80°C przez 30 minut w celu zniszczenia mikroorganizmów, które mogły by mieć wpływ na doświadczenie. Po tym czasie do sześciu próbek wprowadzono szczep bakterii *Bacillus pasteurii*, mocznik oraz CaCl<sub>2</sub> i pozostawiono je na 12 h w temperaturze 28°C w celu przyłączenia się do cząstek piasku. W przenośni można to wytłumaczyć jako budowanie szkieletu przez bakterie na cząstkach piasku, dlatego bardzo ważne jest pozostawienie próbek w nienaruszonym stanie. Przez kolejne cztery doby co 6 h do próbek wprowadzano podłoże do zestalania. Podłoże zestalające zawierało bulion 3 g/l, NaHCO<sub>3</sub> 2,12 g/l, NH<sub>4</sub>Cl 10 g/l oraz mocznik 20 g/l. Przez cały czas próbki pozostawały w temperaturze 28°C, bez mieszania czy naruszania piasku. Następnie próbki przechowywano w temperaturze 25°C przez kolejne pięć dni. Po tym czasie próbki były gotowe do pomiaru konsolidacji oraz do badania wytrzymałości na ścinanie.

#### 5. Skuteczność MICP w zwiększaniu parametrów wytrzymałościowych gruntu wg dotychczasowych prac badawczych

Skuteczność MICP w zwiększaniu parametrów wytrzymałościowych gruntu zależy głównie od poziomu pH, temperatury w środowisku, typu bakterii i intensywności przeprowadzania hydrolizy mocznika. W formie tabelarycznej przedstawiono zestawienie dotychczasowych prac badawczych nad procesem MICP (tab. 2). Natomiast w dalszej części artykułu szczegółowo opisano osiągnięte wyniki badaczy Canakci i in. (2015).

##### 5.1. Zmiany pH

Canakci i in. (2015) przeprowadzili analizy pH próbek ze szczepami bakterii oraz na próbce zerowej. Początkowy poziom pH próbek mieścił się w przedziale od 7,5 do 8,0, a po 12 h od wprowadzenia szczepów bakterii, mocznika oraz CaCl<sub>2</sub>, wartość pH w zaszczipionych próbkach wynosiła około 9,3. Osiągnięty wynik daje bardzo obiecujący rezultat, ponieważ podwyższony poziom pH jest kluczowym parametrem do tworzenia się osadu węglanu wapnia (Hammes i Verstraete, 2002). Autorzy dokładnie wyjaśnili przyczyny lokalnego podwyższenia parametru pH. W środowisku silnie zasadowym komórki bakterii stanowią miejsce zarodkowania i wpływają na typ formowanego minerału.

Tab. 2. Zestawienie prac badawczych nad procesem MICP

Autorzy	Szczep bakterii	Osiągnięte efekty
Gorospe i in. (2013)	<i>Sporosarcina pasteurii</i> ( <i>Bacillus pasteurii</i> )	powstanie scementowanych bloczków piasku, które po czasie uległy zniszczeniu ze względu na użycie martwych komórek bakterii. W rezultacie bakterie zestaliły próbkę, jednak nietrwale, na bardzo krótki okres czasu.
Anbu i in. (2016)	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	zagęszczenie ziarenek piasku na skutek działania podłoża zestalającego, brak dokładniejszych badań
Canakci i in. (2015)	<i>Sporosarcina pasteurii</i> ( <i>Bacillus pasteurii</i> )	uzyskanie zestalonych bloczków piasku; zbadanie wytrzymałości na ścinanie oraz pomiar konsolidacji próbek piasku (opis w artykule)

### 5.2. Badania wytrzymałości na ścinanie

Wytrzymałość na ścinanie określa się na podstawie dwóch parametrów, to jest spójności i kąta tarcia wewnętrznego. Canakci i in. (2015) w celu porównania próbek ze szczepami bakterii z próbką testową, przebadali je wszystkie w aparacie skrzynkowym. Próbkę została poddana trzem wartościom naprężenia 13,6 kPa, 20,4 kPa oraz 27,2 kPa. Najlepsze wyniki zaobserwowano przy naprężeniu 13,6 kPa oraz przemieszczeniu poziomym 2 mm. Maksymalne przemieszczenie osiągnięte w badaniach to 6 mm. Autorzy zauważyli przyrost kohezji oraz kąta tarcia wewnętrznego w próbkach mikrobiologicznych w porównaniu do próbki testowej. Próbki ze szczepami bakterii osiągnęły wartość kohezji o 23% większą od próbki testowej, natomiast kąt tarcia wewnętrznego był o 21% większy w próbkach mikrobiologicznych. Wyniki dowodzą, że bakterie *Bacillus pasteurii* swoją aktywnością spowodowały wzrost wytrzymałości gruntu na ścinanie.

### 5.3. Pomiary konsolidacji próbek piasku

Pomiary konsolidacji próbek piasku przeprowadzono (Canakci i in., 2015) na próbkach ze szczepami bakterii (mikrobiologicznych) oraz na próbce kontrolnej w celu porównania wyniku. Podczas badań przy małej wartości naprężenia (między 10 a 50 kPa) wyraźnie widać różnice między próbkami mikrobiologicznymi a próbką testową. Dla próbek mikrobiologicznych w zakresie naprężenia między 10 a 50 kPa różnica wskaźnika porowatości jest mniejsza niż dla próbki kontrolnej i wynosi 0,2 (maleje z poziomu 2,2 do 2,0). Różnica wskaźnika porowatości dla próbki testowej w zakresie od 10 do 50 kPa wynosi 0,4 (maleje z poziomu 2,5 do 2,1). Przy naprężeniu powyżej 50 kPa wskaźnik porowatości maleje w podobny sposób we wszystkich próbkach.

## 6. Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie stanu wiedzy dotyczącej wykorzystania procesu mikrobiologicznego do uzyskiwania osadu wapnia w celu zwiększenia parametrów wytrzymałościowych gruntów. Przegląd literatury został wykonany w celu opracowania założeń pracy dotyczącej wykorzystania MICP w polskich warunkach. Przedstawiono proces przygotowywania

próbek piasku do badań, inkubacji z bakteriami oraz wyniki badań wytrzymałościowych. Uzyskane wyniki wskazują, że metoda MICP korzystnie wpływa na parametry wytrzymałościowe gruntów. Proces mikrobiologicznego uzyskiwania osadu wapnia może mieć zastosowanie w przyszłości ze względu na aspekty ekologiczne. Stwarza on perspektywę dla innowacyjnej biocementacji gruntów. Metoda ta odnajdzie zastosowanie w budownictwie wyłącznie, gdy stanie się łatwo dostępną, wydajną i wygodną, a proponowane metodyki zostaną udoskonalone w badaniach iniekcyjnych w skali technicznej.

## Literatura

- Anbu P., Kang Ch.-H., Shin Y.-J., So J.-S. (2016). Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus. Springer Open Journal*, Vol. 5, Issue 250, DOI 10.1186/s40064-016-1869-2.
- Bang S.S., Galiant J.K., Ramakrishnan V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, Issues 4-5, 404-409.
- Canakci H., Sidik W., Kilic I.H. (2015). Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. *Soils and Foundations*, Vol. 55, Issue 5, 1211-1221.
- Celik F., Canakci H. (2011). Shear strength properties of organic soil with Sand column. W: *Proceedings of the International Balkan Conference on Challenges of Civil Engineering*, EPOKA University Tirane, Albania.
- Ciurli S., Benini S., Rypniewski W.R., Wilson K.S., Miletti S., Mangani S. (1999). Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms. *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 190, 331-355.
- Dejong J.T., Fritzsche M.B., Nusslein K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, Issue 11, 1381-1392.
- Dejong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 197-210.
- De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. (2010). Microbial carbonate precipitation In construction materials: a review. *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 118-136.
- Dick J., De Windt W., De Graef B., Saveyn H., Van der Meeren P., De Belie N., Verstraete W. (2006). Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone

- by *Bacillus* species. *Biodegradation*, Vol. 17, No. 4, 357-367.
- Douglas S., Beveridge T.J. (1998). Mineral formation by bacteria in natural communities. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 26, No. 2, 79-88.
- Edil T.B. (2003). Recent advances in geotechnical characterization and construction over peats and organic soils. W: *Proceedings of the 2nd International Conference in Soft Soil Engineering and Technology*, Putrajaya, Malaysia, 1-6.
- Furstenberg A., Lechowicz Z., Szymanski A., Wolski W. (1983). Effectiveness of vertical drains in organic soils. W: *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, Vol. 2, 611-616.
- Gorospe C.M., Han S.H., Kim S.G., Park J.Y., Kang C.H., Jeong J.H., So J.S. (2013). Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 18, No. 5, 903-908.
- Hamdan N., Kavazanjian E. Jr., Ritmann B.E., Karatas I. (2011). Carbonate mineral precipitation for soil improvements through microbial denitrification. W: *Proceedings of the GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, TX, ASCE Geotechnical Special Publication 211, 3925-3934.
- Hammes F., Verstraete W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 1, No. 1, 3-7.
- Hammes F., Seka A., Hege K.V., de Wiele T.V., Vanderdeelen J., Siciliano S.D., Verstraete W. (2003). Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic CaCO<sub>3</sub> precipitation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, Vol. 78, No. 6, 670-677.
- Hampton M.B., Edil T.B. (1998). Strength gain of organic ground with cement-type binders. W: *Soil Improvement for Big Digs*, 135-148.
- Jelisić N., Leppänen M. (1999). Mass stabilization of peat in road and railway construction. W: *Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm, Sweden, 59-66.
- Jimenez-Lopez C., Rogríguez-Navarro C., Pinar G., Carrillo-Rousua F.J., Rodríguez-Gallego M., Gonzalez-Munoz M.T. (2007). Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone. *Chemosphere*, Vol. 68, Issue 10, 1929-1936.
- Kańska Z., Grabińska-Łoniewska A., Łebkowska M., Rzechowska E. (2006). Ćwiczenia laboratoryjne z biologii sanitarnej. Część I. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Karatas I., Kavazanjian E. Jr., Ritmann B.E. (2008). Microbially induced precipitation of calcite using *Pseudomonas* denitrificans. W: *Proceedings of the 1st International Conference on Biotechnical Engineering*, Delft, The Netherlands (CDROM).
- Koda E., Szymanski A., Wolski W. (1989). Behaviour of geodrains in organic subsoil. W: *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 1377-1380.
- Roden E.E., Leonardo M.R., Ferris F.G. (2002). Immobilization of strontium during iron biomineralization coupled to dissimilatory hydrous ferric oxide reduction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, Issue 16, 2823-2839.
- Sarda D., Choonia H.S., Sarode D. D., Lele S. S. (2009). Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: a novel application. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, Vol. 36, Issue 8, 1111-1115.
- Smith K., Ferry J.G. (1999). A plant type (L class) carbonic anhydrase from the thermophilic methanoarchaeon *Methanobacterium thermoautotrophicum*. *Journal of Bacteriology*, Vol. 181, Issue 20, 6247-6253.
- Van Paassen L.A., Daza M.C., Staal M., Sorokin D.Y., Van der Zon W., Van Loosdrecht M.C. (2010a). Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecological Engineering*, Vol. 36, Issue 2, 168-175.
- Van Paassen L.A., Ghose R., Van der Linden T.J.M., Van der Star W.R.L., Van Loosdrecht M.C.M. (2010b). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 12, 1721-1728.
- Warthmann R., Van Lith Y., Vasconcelos C., McKenzie J.A., Karpoff A.M. (2000). Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments. *Geology*, Vol. 28, No. 12, 1091-1094.
- Welland M., throughthesandglass.typepad.com., post z dnia 19/07/2010.
- Yang D.S., Yagihashi J.N., Yoshizawa S.S. (1998). Stabilization of very soft soils and organic soils. W: *Soil Improvement for Big Digs*, 96-110.

#### ROLE OF UREASE ACTIVE BACTERIA IN THE PROCESSES OF SOIL BIOCEMENTATION

**Abstract:** The aim of the paper is to present and describe the use of microbially induced calcite precipitation process (MICP). The basis of MICP process is bacterial metabolic activity which thereby promotes the precipitation of calcium carbonate in the form of calcite. Ureolytic bacteria that hydrolyze urea, proved to be the most effective to perform precipitation of calcium carbonate. Therefore their application seems to be beneficial in the processes biocementation of soils. The paper presents the methods of obtaining the urease active bacteria and describes laboratory methods in order to achieve the best strength parameters of tested soil.

Praca powstała pod opieką promotorów dr. hab. inż. Pawła Popielskiego, profesora PW, oraz dr Katarzyny Affek na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.