บรรณาธิการปริทัศน์/Editorial Corner

ความเป็นไปได้ของการใช้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแบคทีเรียในวัสดุซีเมนต์
Potential Use of Calcium Carbonate Deposits from Bacteria in Cement Materials

ปิติ สุคนธสุขกุล* และ สทารัชว์ เพียรเฟื่องฟู
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สุมนต์ทิพย์ คงตันจันทร์ฟัก
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Piti Sukontasukkul* and Satharat Pianfuengfoo
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Sumonthip Kongtunjunphuk
Department of Biotechnology Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: piti.s@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.002
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

ในปัจจุบัน สืบเนื่องมาจากปัญหามลพิษที่รุนแรงทำให้โครงสร้างคอนกรีตส่วนมากเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็น การซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตจึงขยับขึ้นมาเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่สำคัญ เมื่อเทียบกับงานก่อสร้างประเภทอื่น โดยวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตรวมถึงการเลือกวัสดุซ่อมนั้นขึ้นกับประเภทของความเสียหาย ขนาดของความเสียหาย และสาเหตุ

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซมการแตกร้าวของคอนกรีต นั้น ในปัจจุบันก็มีมากหลายประเภททั้งที่เป็นวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใย ซีเมนต์ไม่หดตัว และวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยวัสดุซ่อมรอยร้าวเหล่านี้มักมีองค์ประกอบของวัสดุเชื่อมประสาน เช่น ซีเมนต์ อะคริลิก อิพ็อกซี ในสัดส่วนค่อนข้างสูง ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการผลิตค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวของวัสดุซีเมนต์เอง

จึงได้มีความพยายามในการพัฒนาวัสดุซ่อมทางเลือกที่มีความเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อมมากขึ้น การใช้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแบคทีเรียเองก็เป็นหนึ่งในทางเลือกนั้น บทความนี้เป็นการแนะนำเบื้องต้นถึงแนวทางดังกล่าว โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการประยุกต์ใช้บางส่วนที่อยู่ในรูปของงานวิจัย

1. การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตของแบคทีเรีย

1.1 การชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

การชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นกระบวนการให้แร่ธาตุทางธรรมชาติของแบคทีเรียประเภท *Ureolytic bacteria, Denitrification, Ferric iron reduction, and Sulfate reduction* [1] โดยผลผลิตจากกระบวนการให้แร่ธาตุของแบคทีเรียแต่ละประเภทเป็นการสังเคราะห์แร่ธาตุที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ชนิดผลึก และอสัณฐาน ซึ่งอาจมีสารประกอบอินทรีย์ร่วมด้วย [2] การตกตะกอนของแร่ธาตุแบ่งเป็นสองลักษณะ คือ 1) การตกตะกอนภายใน

การอ้างอิงบทความ: ปิติ สุคนธสุขกุล, สทารัชว์ เพียรเฟื่องฟู และ สุมนต์ทิพย์ คงตันจันทร์ฟัก, "ความเป็นไปได้ของการใช้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแบคทีเรียในวัสดุซีเมนต์," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 3, หน้า 379–383, ก.ค.–ก.ย. 2564.

เซลล์ โดย Konishi และคณะ [3] ศึกษาการใช้ *Shewanella algae* ในการตกตะกอนอนุภาคทองคำระดับนาโน 2) การตกตะกอนภายนอกเซลล์ คือ การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตของแบคทีเรีย

1.2 ชนิดของแบคทีเรีย

- แบคทีเรียชนิด *Ureolytic bacteria* คือแบคทีเรียที่ใช้เอนไซม์ *Urease* เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา *Urea hydrolysis* เช่น *Proteus mirabilis, Proteus vulgaris, Bacillus sp., Bacillus thuringiensis, Bacillus megaterium* [4], [5]
- แบคทีเรียชนิด *Denitrification* คือแบคทีเรียที่ใช้ NO_3^- ในการหายใจ เช่น *Diaphorobacter nitroreducens, Pseudomonas aeruginosa* [6]
- แบคทีเรียชนิด *Ferric iron reduction bacteria* เป็นการตกตะกอน Fe^{3+} แทนที่การตกตะกอน Ca^{2+} เช่น *Bacillus sp.* VS1 [7] และ แบคทีเรียชนิด *Sulfate reduction* เป็นแบคทีเรียที่อาศัย *Sulfate* ในการให้ผลิตภัณฑ์ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate; $2HCO_3^-$) 2 โมเลกุล เช่น *Desulfobacter, Desulfovibrio* [8]

1.3 กลไกชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

การชักนำการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่เกิดจาก *Ureolytic bacteria* ที่มีเอนไซม์ยูรีเอส (Urease) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Urea Hydrolysis ที่มียูเรีย (Urea; $CO(NH_2)_2$) เป็นสารตั้งต้น โดยมีน้ำไปสลายพันธะของยูเรีย ผลที่ได้ คือ กรดคาร์บามิก (Carbamic Acid; NH_2COOH) และแอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) ดังแสดงในสมการที่ (1) [9]

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow NH_2COOH + NH_3 \quad (1)$$

ตามธรรมชาติแล้วกรดคาร์บามิก (Carbamic Acid; NH_2COOH) จะทำปฏิกิริยา Hydrolysis เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid; H_2CO_3) และแอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) ดังแสดงในสมการที่ (2) [10]

$$NH_2COOH + H_2O \rightarrow H_2CO_3 + NH_3 \quad (2)$$

ผลิตภัณฑ์ข้างต้นคือกรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid; H_2CO_3) และแอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) พยายามปรับสมดุลในน้ำ เกิดเป็นไบคาร์บอเนต (Bicarbonate; HCO_3^-) และแอมโมเนียม (Ammonium; NH_4^+) ดังสมการที่ (3) และ (4) [11]

$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad (3)$$

$$2NH_3 + 2H_2O \leftrightarrow 2NH_4^+ + 2OH^- \quad (4)$$

เมื่อมีไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Ion; OH^-) จากสมการที่ (4) ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นจนรบกวนและเปลี่ยนสมดุลของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate; HCO_3^-) เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่คือคาร์บอเนต (Carbonate; CO_3^{2-}) ดังสมการที่ (5) [11]

$$HCO_3^- + H^+ + 2OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + 2H_2O \quad (5)$$

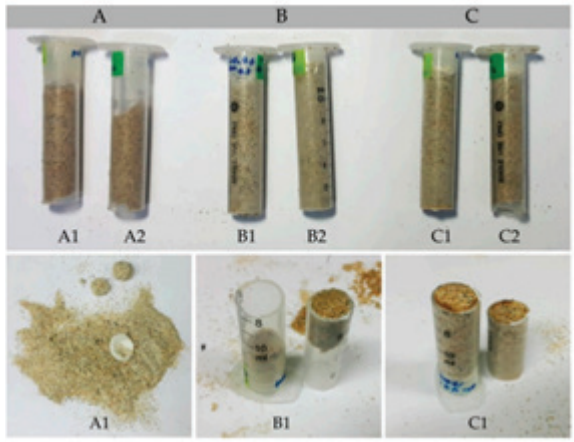
การเกิดของแอมโมเนียม (Ammonium; NH_4^+) ส่งผลให้ค่า pH บริเวณโดยรอบของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มขึ้น ร่วมกับปริมาณแคลเซียม (Calcium; Ca_2^+) และคาร์บอเนต (Carbonate; CO_3^{2-}) ที่เพียงพอ ทำให้ปฏิกิริยาในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; $CaCO_3$) เป็นไปอย่างต่อเนื่องตามธรรมชาติ ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$Ca^{2+} + Bacteria\ cell \rightarrow Cell{\cdot}Ca^{2+} \quad (6)$$

$$Cell.Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow Cell.CaCO_3 \quad (7)$$

2. การนำมาประยุกต์ใช้งานในวัสดุซีเมนต์

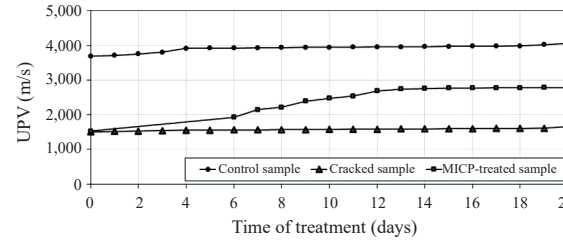
Lee และคณะ [12] ค้นพบว่า ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นสามารถก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของทรายได้ โดยทำการศึกษาการยึดเหนี่ยวของทราย



รูปที่ 1 ตัวอย่างทรายที่ผ่านการสร้างแรงยึดเหนี่ยวด้วยแบคทีเรีย [12]

ในกระบอกเข็มฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร โดยแบคทีเรียที่ใช้คือ *Sporosarcina pasteurii* ทำการแปรเปลี่ยน 1) ความเข้มข้นของสารละลายยูเรีย 0.12 โมลาร์, 0.4 โมลาร์, 1.5 โมลาร์ 2) ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไลด์ ($CaCl_2$) 0.055 โมลาร์, 0.2 โมลาร์, 0.75 โมลาร์ 3) ความเข้มข้นของเซลล์ 1X, 10X เมื่อ X หมายถึงความเข้มข้นของแบคทีเรียจากค่า OD_{600} = 2.5 เพื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการสร้างการยึดเหนี่ยวไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ผลการทดสอบพบว่า การต้านทานการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น และการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างลดต่ำลง ตามความเข้มข้นของสารละลายยูเรีย ปริมาณเซลล์แบคทีเรีย และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไลด์ที่สูงขึ้น [12] (รูปที่ 1)

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Chahal และคณะ [13] ได้พบว่าตะกอนที่ได้จากแบคทีเรีย *S. pasteurii* ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้น โดยทำการผสมแบคทีเรียที่ความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรีย 0, 103, 105 และ 107 เซลล์/มิลลิลิตร เข้าไปในตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 150 × 150 × 150 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตสูงที่สุดที่ปริมาณเซลล์แบคทีเรีย 105 เซลล์/มิลลิลิตร หลังจากนั้นมีลดต่ำลง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเนื่องมาจากการเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีต (Matrix) ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (ตารางที่ 1)



รูปที่ 2

ตารางที่ 1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน [13]

Mixture no.	Bacteria Concentration (cells/mL)			
	0	10^3	10^5	10^7
M-1 (0% fly ash)	24	25	28	26
M-2 (10% fly ash)	23	24	27.6	25
M-3 (20% fly ash)	22	23	26	24
M-4 (30% fly ash)	21	22	25	23

ในส่วนของการซ่อมแซมคอนกรีต พิชชา และคณะ [14] ได้ศึกษาการซ่อมแซมรอยร้าวในมอร์ตาร์ด้วยแบคทีเรียชนิด *B. sphaericus* โดยเตรียมตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 150 × 150 × 150 มิลลิเมตร และทำการสร้างรอยร้าวด้วยแผ่นทองแดงที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตร กว้าง 120 มิลลิเมตร และลึก 20 มิลลิเมตร ทำการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

ผลการศึกษาพบว่า การเติมแบคทีเรีย *B. sphaericus* ส่งผลให้เกิดการเติมเต็มช่องว่างของรอยร้าวที่เตรียมไว้ โดยการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงได้ความเร็วคลื่นเสียงที่สูงขึ้น (รูปที่ 2) และพบการซึมผ่านของน้ำลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมของแบคทีเรีย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น

Khaliq และ Ehsan [15] ศึกษาการใช้ *B. subtilis* ในการซ่อมแซมรอยร้าวและเปรียบเทียบการใช้พาหะ ผู้วิจัยใช้พาหะในการนำแบคทีเรียเข้าไปภายในคอนกรีตคือ 1) Graphite Nanoplatelets 2) มวลรวมเบา โดยนำพาหะไปดูดซึมแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาผสมลงในคอนกรีต ส่วนผสมคอนกรีตแบ่งเป็น 4 ชนิด 1) ไม่ผสม

แบคทีเรีย 2) ผสมแบคทีเรียโดยตรง 3) ใช้มวลรวมเบาเป็นพาหะในการผสม และ 4) ใช้ Graphite Nanoplatelets เป็นพาหะในการผสม และทำให้เกิดรอยร้าวหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้วที่ 3, 7, 14, และ 28 วัน การติดตามรอยร้าวด้วย Crack Measuring Microscope

จากผลการทดสอบพบว่า การใช้มวลรวมเบาเป็นพาหะให้ความสม่ำเสมอในการซ่อมแซม เป็นผลให้การซ่อมแซมรอยร้าวในระยะยาวยังคงดำเนินต่อไปอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับพาหะชนิด Graphite Nanoplatelets ที่ซ่อมแซมรอยร้าวได้ภายในระยะสั้น [15]

3. สรุป

จากการศึกษาด้วยการสืบค้นข้อมูลในเบื้องต้นพบว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตโดยพัฒนาเป็นวัสดุใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าวที่มีความเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อมได้ โดยสามารถนำแบคทีเรียเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ในหลายรูปแบบซึ่งให้ประสิทธิผลต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Z. Wang, N. Zhang, G. Cai, Y. Jin, N. Ding, and D. Shen, “Review of ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP),” *Marine Georesources and Geotechnology*, vol. 35, no. 8, pp. 1135–1146, 2017.

[2] N. Yoshida, E. Higashimura, and Y. Saeki, “Catalytic biomineralization of fluorescent calcite by the thermophilic bacterium *Geobacillus thermoglucosidasius*,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 76, no. 21, pp. 7322–7327, 2010.

[3] Y. Konishi, T. Tsukiyama, K. Ohno, N. Saitoh, T. Nomura, and S. Nagamine, “Intracellular recovery of gold by microbial reduction of AuCl4– ions using the anaerobic bacterium *Shewanella algae*,” vol. 81, no. 1, pp. 24–29, 2006.

[4] A. Talaiekhozani, A. Keyvanfar, R. Andalib, M. Samadi, A. Shafaghat, H. Kamyab, M. W. Hussin, “Application of Proteus mirabilis and Proteus vulgaris mixture to design self-healing concrete,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 19–21, pp. 3623–3630, 2013.

[5] P. Anbu, C.-H. Kang, Y.-J. Shin and J.-S. So, “Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications,” *SpringerPlus*, vol. 5, pp. 250, 2016.

[6] Y. Ç. Erşan, E. Hernandez-Sanabria, N. Boon, and N. de Belie, “Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 70, pp. 159–170, 2016.

[7] V. Ivanov, J. Chu, and V. Stabnikov, “Iron- and calcium-based biogrouts for porous soils,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 167, no. 1, pp. 36–41, 2014.

[8] M. L. Coleman, D. B. Hedrick, D. R. Lovley, D. C. White, and K. Pye, “Reduction of Fe(III) in sediments by sulphate-reducing bacteria,” *Nature*, vol. 361, pp. 436–438, 1993.

[9] R. A. Burne and Y.-Y. M. Chen, “Bacterial ureases in infectious diseases,” *Microbes and Infection*, vol. 2, no. 5, pp. 533–542, 2000.

[10] F. Hammes, N. Boon, J. de Villiers, W. Verstraete, and S. D. Siciliano, “Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 69, no. 8, pp. 4901–4909, 2003.

[11] Y. Fujita, J. L.Taylor, T. L. T. Gresham, M. E. Delwiche,

F. S. Colwell, T. L. McLing, and R. W. Smith, "Stimulation of microbial urea hydrolysis in groundwater to enhance calcite precipitation," *Environmental Science and Technology*, vol. 42, no. 8, pp. 3025–3032, 2008.

[12] C. Lee, H. Lee, and O. B. Kim, "Biocement fabrication and design application for a sustainable urban area," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, pp. 1–17, 2018.

[13] N. Chahal, R. Siddique, and A. Rajor, "Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 351–356, 2011.

[14] P. Jongvivatsakul, K. Janprasit, P. Nuaklong, W. Pungrasmi, and S. Likitlersuang, "Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method," *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 737–744, 2019.

[15] W. Khaliq and M. B. Ehsan, "Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques," *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 349–357, 2016.

ศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุคนธสุขกุล
กองบรรณาธิการ

คุณสทารัชว์ เพียรเฟื่องฟู

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมนต์ทิพย์ คงตันจันทร์ฟัก