บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอสและการชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนต

จากการศึกษาสามารถคัดแยกแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอสและชักนำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ โดยพบว่าไอโซเลท G27 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างท่อน สร้างเอนโดสปอร์ได้ สามารถเคลื่อนที่ได้ และสามารถผลิตเอนไซม์คาตาเลสได้ ให้ประสิทธิภาพกิจกรรมของเอนไซม์ยูรีเอสดีที่สุดที่ pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 7 และมีระดับความเข้มข้นของยูเรียที่เหมาะสม 50-100 มิลลิโมลาร์ และ $CaCl_2$ 30 มิลลิโมลาร์ และสามารถชักนำให้เกิดตะกอนคาร์บอเนตได้น้ำหนัก 3.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยมีอัตราการสร้างตะกอนเท่ากับ 0.19 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อต่อชั่วโมง และจากผลการทดลองดังกล่าวจะได้นำไปศึกษาเพื่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

การศึกษาการชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอส *Sporosarcina koreensis* G27

แบคทีเรีย *S. koreensis* G27 สามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวหินอิฐตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวเม็ดทรายสูงถึง 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัมของทรายต่อวัน และสามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวอิฐตัวอย่าง โดยมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตใหม่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแข็งแกร่งซึ่งสามารถลดการผุกร่อนจากการทำลายโดยวิธีจำลองด้วยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

การศึกษาและพัฒนารูปแบบการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอส *Sporosarcina koreensis* G27 ในการชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตบนพื้นผิววัสดุก่อสร้าง

จากการศึกษาและพัฒนารูปแบบการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอสและชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตบนพื้นผิววัสดุก่อสร้าง ซึ่งใช้อิฐตัวอย่างเป็นตัวแทน พบว่าแบคทีเรีย *S. koreensis* G27 สามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวอิฐตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจับตัวกันหนาติดอยู่ตามผนังรูพรุนหรือตามผนังหลุม เป็นเหตุให้สามารถลดโอกาสการผุพังของอิฐตัวอย่างได้ โดยลดการดูดซึมน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการผุพังของอิฐตัวอย่าง ทั้งในรูปแบบของการใช้ประโยชน์โดยวิธีการฉีดพ่นและวิธีการทาด้วยของเหลวที่ได้จากการใช้หัวเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ($2.0x10^7$ CFUต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ) ผสมกับอาหาร urea-$CaCl_2$ broth ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยทั้งสองรูปแบบมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนน้ำลดลงใกล้เคียงกัน

อภิปรายผลการวิจัย

การคัดแยกแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์ยูรีเอสและชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนต

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสในแบคทีเรีย ไอโซเลท G2, G9, G27, P30, S12, S14 พบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่ ให้ผลการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสดีที่สุดที่ pH 7 (ตาราง 5) ความเข้มข้นของยูเรีย 50 ถึง 100 มิลลิโมลาร์ (ตาราง 6) และความเข้มข้นของ $CaCl_2$ 30 มิลลิโมลาร์ (ตาราง 7) โดยแบคทีเรียไอโซเลท G27 มีการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสสูงสุดในสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสม ซึ่งให้น้ำหนักแห้งของตะกอนคาร์บอเนตสูงที่สุด 3.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อ (ภาพ 12 และภาพ 13) และมีอัตราการเกิดตะกอนเท่ากับ 0.19 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรของอาหารเลี้ยงเชื้อต่อชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจาก pH 7 เป็นสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมกับการเจริญและกิจกรรมชีวเคมีของแบคทีเรีย (Wiley and Stokes, 1962, pp. 730-734; Wiley and Stokes, 1963, pp. 1152-1156) โดยแบคทีเรียไอโซเลท G27 เมื่อเพิ่มจำนวนมากขึ้นจึงมีการสร้างเอนไซม์ยูรีเอสมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิสยูเรียได้เป็นผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ซึ่ง NH_4^+ นี้เป็นผลให้ระดับ pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อมีค่าสูงขึ้น (pH ประมาณ 8) ทำให้ CO_3^{2-} เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) เป็นปริมาณมาก (Atkins and Paula, 2002, unpaged) จึงทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน

(Ca^{2+}) ได้มากขึ้น ทำให้มีการตกตะกอนของ $CaCO_3$ มากขึ้นไปด้วย สำหรับไอโซเลท P30 และ S14 ที่ให้น้ำหนักแห้งของตะกอนคาร์บอเนตน้อยกว่า ถึงแม้ว่าค่าการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสสูงก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากมีการไฮโดรไลซิสของยูเรียได้เป็นผลิตภัณฑ์เป็น CO_3^{2-} และ NH_4^+ มากและ NH_4^+ ที่มากนั้นเป็นผลให้ pH สูงขึ้นมาก (pH>8.5) ทำให้ CO_3^{2-} เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ HCO_3^- เป็นปริมาณน้อยจึงทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ได้น้อยลง จึงเป็นผลให้มีการตกตะกอนของ $CaCO_3$ น้อยลงไปด้วย สำหรับไอโซเลท G9 พบว่าระดับ pH สุดท้ายของอาหารมีค่าต่ำ (pH ประมาณ 6.5) เป็นเหตุให้ CO_3^{2-} เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ HCO_3^- ปริมาณน้อย จึงทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ได้น้อยลง เป็นเหตุให้มีการตกตะกอนของ $CaCO_3$ ลดลงไปด้วย

การศึกษาการชักนำให้เกิดการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอส *Sporosarcina koreensis* G27

จากผลการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวเม็ดทราย ในชุดของการทดลองซึ่งใช้เชื้อแบคทีเรียให้อาหาร urea-$CaCl_2$ broth ซึ่งมีอัตราการเกิดตะกอนคาร์บอเนตสูงถึง 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัมของทรายต่อวัน ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียมีกระบวนการไฮโดรไลซิสของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอส แล้วทำให้การเกิด MCP ขึ้นได้ เนื่องจากมีคาร์บอเนตไอออนและแอมโมเนียมไอออนเกิดขึ้น ซึ่งทำให้มีค่า pH เป็นด่างเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมีแคลเซียมปรากฏอยู่ในอาหารจึงสามารถเกิดตะกอนคาร์บอเนตได้ทันทีภายใต้สภาวะแวดล้อมดังกล่าว (Fujita, et al., 2000, pp. 305-318; Muynck, et al., 2008, pp. 875-885; Taino, et al., 1999, pp. 139-145) เมื่อทำการศึกษาทางกายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเซลล์แบคทีเรียถูกเคลือบด้วยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเซลล์ของแบคทีเรียจะทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์รวมที่ทำให้เกิดการตกตะกอน (nucleation sites) (Hammes and Verstraete, 2002, pp. 3-7) ซึ่งเซลล์ของแบคทีเรียนั้นถือว่าเป็น nucleation sites ที่ดีมากสำหรับเป็นศูนย์รวมของการเกิดแร่ธาตุต่างๆ (Ferris, et al., 1987, pp. 225-232) และเมื่อแบคทีเรียเพิ่มจำนวนเจริญปกคลุมบนพื้นผิวเม็ดทราย จึงทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคเม็ดทรายขนาดเล็กกับใหญ่ด้วยตะกอนคาร์บอเนต ส่วนชุดการทดลองที่ใช้เชื้อแบคทีเรียและให้อาหาร urea broth พบว่ามีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ปริมาณเล็กน้อย (0.01 มิลลิกรัมต่อกรัมของทรายต่อวัน) เนื่องจากมีไอออนบวกอื่นๆ ในเม็ดทรายที่หลุดออกมาและสามารถรวมตัวกับ (HCO_3^-) ซึ่งได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของยูเรีย จึงทำให้ยังสามารถเห็นแบคทีเรียถูกเคลือบด้วยตะกอนคาร์บอเนตได้เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาทางกายภาพ และในส่วนของชุดควบคุมที่ไม่มีเชื้อแบคทีเรียซึ่งใช้อาหาร urea-$CaCl_2$ broth พบว่ามีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (0.03 มิลลิกรัมต่อกรัมของทรายต่อวัน) ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนการให้อาหารทุกวัน

เป็นเวลามากกว่า 30 วัน จึงอาจทำให้เชื้อแบคทีเรียชนิดอื่น มีโอกาสเจริญปนเปื้อนได้ในชุดควบคุม ซึ่งสังเกตจากภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งยังมีแบคทีเรียชนิดอื่นที่สามารถทำให้เกิด MCP ได้เนื่องจากมีความสามารถในการไฮโดรไลซิสของยูเรียประกอบกับการมี $CaCl_2$ ในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งเป็นแหล่ง (Ca^{2+}) จึงทำให้พบตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาด้านการเสริมประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *S. koreensis* G27 เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสภาวะแวดล้อมจริงในธรรมชาติ และเมื่อมีการอยู่ร่วมกันกับกลุ่มจุลินทรีย์ประจำถิ่น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการช่วยเสริมสร้างความแข็งแกร่งและป้องกันการผุกร่อนของโบราณสถาน โบราณวัตถุได้ต่อไป

จากผลการศึกษาการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวอิฐ โดยการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของชิ้นอิฐตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น พบว่าชิ้นอิฐตัวอย่างขนาดเล็กมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มเป็นเวลา 10, 15 และ 20 วัน เนื่องจากการบ่มแบบเขย่าเป็นสภาวะที่เอื้อต่อการเจริญ ทั้งในด้านอาหารและการแลกเปลี่ยนก๊าซ ทำให้แบคทีเรีย *S. koreensis* G27 เจริญได้ดีและชักนำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจับตัวสะสมที่พื้นผิวชิ้นอิฐตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เมื่อบ่มเป็นเวลา 30 วันพบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของชิ้นอิฐลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่า pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อมีค่าต่ำกว่า 8.0 จึงทำให้ CO_3^{2-} มีปริมาณลดลง เพื่อให้เกิดสมดุลปฏิกิริยา HCO_3^- จึงต้องเปลี่ยนไปเป็น CO_3^{2-} เพิ่มขึ้น และเมื่อ HCO_3^- ลดลงเพื่อให้เกิดสมดุลปฏิกิริยาอีกครั้ง $CaCO_3$ จึงละลายกลับเพื่อให้ได้ HCO_3^- เพิ่มมากขึ้น จากการเกิดสมดุลปฏิกิริยาย้อนกลับ จึงเป็นเหตุให้ $CaCO_3$ มีปริมาณลดลง (Atkins and Paula, 2002, unpaged) สำหรับชิ้นอิฐตัวอย่างขนาดใหญ่ มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่ต่ำกว่าจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นน้อยเมื่อครบระยะเวลาบ่ม ส่วนในชุดควบคุมของชิ้นอิฐตัวอย่างทั้งสองขนาดมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก เนื่องจากเป็นการตกตะกอนทางเคมีโดยมีการรวมตัวกันของ HCO_3^- กับ Ca^{2+} ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ประกอบกับไอออนอื่นๆ ในชิ้นอิฐตัวอย่างที่ละลายออกมาภายหลังจึงทำให้มีตะกอนของคาร์บอเนตได้เล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้จากรูปถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชี้ให้เห็นว่าพื้นผิวมีลักษณะที่เรียบมากขึ้น เมื่อเทียบกับรูปถ่ายของพื้นผิวชิ้นอิฐตัวอย่างฆ่าเชื้อก่อนนำมาทดลอง ส่วนลักษณะของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในชุดทดลองที่มีการทับถมกัน เกิดจากการเกาะตัวเชื่อมต่อกันของตะกอนที่เคลือบอยู่บนผิวเซลล์แบคทีเรียและปลอกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตลักษณะคล้ายรังไหมซึ่งเซลล์แบคทีเรียตายและได้หลุดออกไปแล้ว (Castanier, et al., 1999, pp. 9-23; Castanier, et al., 2000b, pp. 32-39)

จากผลการทดสอบความแข็งแกร่งของชิ้นอิฐตัวอย่าง โดยการวัดน้ำหนักที่หายไปของชิ้นอิฐตัวอย่างหลังจากผ่านการ sonication พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปของชิ้นอิฐตัวอย่างขนาดเล็กใกล้เคียงกับชุดควบคุมหลังจากบ่มเป็นเวลา 5 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตทับถมกันน้อยและจับตัวกันไม่แข็งแรงพอกับพื้นผิวของอิฐตัวอย่าง แต่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 15 วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปน้อยลงเนื่องจากมีการทับถมกันของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตหนาแน่นและการยึดเกาะกันดีขึ้น และเมื่อบ่มเป็นระยะเวลา 20 และ 30 วัน เปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปมากขึ้นเนื่องจาก ที่ระยะเวลา 20 วัน มีปริมาณตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมากที่สุดจึงมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปมากเช่นกัน และที่ระยะเวลาการบ่ม 30 วัน มีการละลายกลับของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากค่า pH มีค่าต่ำกว่า 8.0 ทำให้การยึดเกาะตัวกันของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ดีพอจึงทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปมาก สำหรับของชิ้นอิฐตัวอย่างขนาดใหญ่พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปน้อยกว่าชุดควบคุมเนื่องจากมีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตทับถมและยึดเกาะกันดีกว่าสังเกตได้จากรูปภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มพบว่ามีน้ำหนักหายไปไม่ต่างกันมาก เนื่องมาจากสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำจึงมีการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหายไปน้อย ซึ่งการทดลองนี้ให้ผลคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Rodriguez-Navarro, et al., 2003, pp. 2182-2193

การศึกษาและพัฒนารูปแบบการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอส *Sporosarcina koreensis* G27 ชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตบนพื้นผิววัสดุก่อสร้าง

จากผลการศึกษาและพัฒนารูปแบบการใช้ประโยชน์ของแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอส *S. koreensis* G27 ชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตบนพื้นผิววัสดุก่อสร้าง (อิฐตัวอย่างขนาด 6x12x6 เซนติเมตร) ในชุดควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 100 มิลลิลิตร เป็นของเหลวในการฉีดพ่นหรือทา พบว่าด้านที่ไม่ได้ทาสารเคลือบใสพื้นผิวโดยรวมมีคราบตะกอนสีขาวปรากฏอยู่ปริมาณน้อยมาก และเมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอพบว่ามีตะกอนสีขาวติดอยู่ตามผนังรูพรุนหรือตามผนังหลุมค่อนข้างบาง เนื่องจากมีการตกตะกอนคาร์บอเนตได้เองของไอออนที่หลุดออกมาจากองค์ประกอบของวัสดุซึ่งใช้เป็นส่วนผสมอิฐตัวอย่างโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Jimenez-Lopez, et al., 2008, pp. 352–363) อีกทั้งสภาวะที่เป็นด่างอันเกิดจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร่วมด้วย (Muynck, et al., 2008, pp. 875–885) จึงทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนคาร์บอเนตได้แต่มีปริมาณน้อย และเมื่อมีตะกอนสะสมไม่มากพอที่จะส่งผลให้ผนังรูพรุนมีขนาดเล็กลง จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนน้ำของพื้นผิวอิฐ

ตัวอย่างมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองและชุดควบคุมที่ใช้อาหาร urea-$CaCl_2$ broth 100 มิลลิลิตร เป็นของเหลวในการฉีดพ่นหรือทา ในส่วนของชุดควบคุมที่ใช้อาหาร urea-$CaCl_2$ broth 100 มิลลิลิตร เป็นของเหลวในการฉีดพ่นหรือทา พบว่าด้านที่ไม่ได้ทาสารเคลือบใสพื้นผิวโดยรวมมีคราบตะกอนสีขาว และเมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอพบว่ามีตะกอนสีขาวติดอยู่ตามผนังรูพรุนหรือผนังหลุมหนาแน่นกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นปราศจากเชื้อ เนื่องมาจากพื้นผิวของอิฐตัวอย่างยังมีเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่สามารถใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ urea-$CaCl_2$ broth และเมื่อทำการให้อาหารใหม่ในทุกๆวัน จึงสามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตได้อย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้พบตะกอนสีขาวจับตัวสะสมเกิดขึ้นได้ ซึ่งให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับงานวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่าน (Le Métayer-Levrel, et al., 1999, pp. 25-34; Jimenez-Lopez, et al., 2008, pp. 352–363; Muynck, et al., 2010, pp. 118–136) แต่เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตไม่มากพอ เมื่อเทียบกับแบคทีเรีย *S. koreensis* G27 ดังนั้นจึงมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในชุดทดลอง จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของพื้นผิวอิฐตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าในชุดทดลอง แต่มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 100 มิลลิลิตร เป็นของเหลวในการฉีดพ่นหรือทา สำหรับชุดทดลองของรูปแบบการฉีดพ่นและรูปแบบของการทา ที่ใช้หัวเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมกับอาหาร urea-$CaCl_2$ broth ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พบว่าพื้นผิวโดยรวมมีคราบตะกอนสีขาวปรากฏอยู่ปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุมทั้งสอง เนื่องจากพื้นผิวอิฐตัวอย่างมีการเจริญของแบคทีเรีย *S. koreensis* G27 อีกทั้งยังได้รับเชื้อใหม่พร้อมกับอาหารเลี้ยงเชื้อเพิ่มในทุกวันจึงสามารถชักนำให้เกิดการตกตะกอนคาร์บอเนตได้อย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุให้พบตะกอนสีขาวจับตัวสะสมกันอย่างหนาแน่นติดอยู่ตามผนังรูพรุนหรือตามผนังหลุมเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และเมื่อมีตะกอนสะสมหนาแน่นติดอยู่ตามผนังรูพรุนส่งผลให้ขนาดของรูพรุนที่ปรากฏในส่วนของพื้นผิวอิฐตัวอย่างมีขนาดเล็กลง หรืออาจตกตะกอนสะสมปิดรูพรุนได้ในกรณีที่รูพรุนมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของพื้นผิวอิฐตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยในชุดการทดลองที่ใช้หัวเชื้อแบคทีเรียทั้งรูปแบบ SUG และ PUG เป็นของเหลวในการฉีดพ่นหรือทานั้นให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของพื้นผิวอิฐตัวอย่างแตกต่างกันอย่างไม่มีอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อเสนอแนะ

1. การนำแบคทีเรียที่ผลิตเอนไซม์ยูรีเอสและชักนำให้เกิดตะกอนคาร์บอเนตไปประยุกต์ใช้ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนคาร์บอเนตกับตัวอย่างพื้นผิวหินในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ

2. ควรมีการศึกษารูปแบบการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียที่สามารถชักนำให้เกิดตะกอนคาร์บอเนตกับกลุ่มจุลินทรีย์ประจำถิ่น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการช่วยเสริมสร้างความแข็งแกร่งและป้องกันการผุกร่อนของโบราณสถาน และโบราณวัตถุ

3. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนคาร์บอเนตโดยประยุกต์ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อที่หาได้ง่ายตามธรรมชาติหรือราคาถูก