

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. จากการเปรียบเทียบการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ของ จุลินทรีย์ผสมจากตะกอนเร่งภายใต้สภาวะต่าง ๆ 4 สภาวะ ในระยะเวลา 75 วัน พบว่าสภาวะ แอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน สามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนได้ดีที่สุด โดยสามารถลดปริมาณสีลง ได้ 55.07%
2. หลังจากทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันในระยะเวลา 7 วัน พบว่าจุลินทรีย์ในชุดทดลองสามารถย่อย สลายสีมาลาไคน์กรีนได้โดยสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้ 68.18% ส่วนในชุด ไร้เชื้อจะทำหน้าที่ดูดซับสีมาลาไคน์ได้โดยพบว่า ทำให้ซีโอดีลดลงได้เพียง 33.33% ทั้งในชุด ไร้เชื้อและชุดทดลองในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันไม่สามารถลดปริมาณโซเดียมคลอไรด์ได้
3. เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนแบบต่อเนื่อง โดยในขั้นแรกทำการ ศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนภายใต้สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันเป็นระยะเวลา 7 วัน แล้วนำส่วนน้ำจากสภาวะดังกล่าวมาทำการย่อยสลายต่อภายใต้สภาวะแอโรบิก ดีไนตริฟิเคชัน และเมทาโนจีนิก เป็นระยะเวลา 7 วัน เช่นเดียวกัน พบว่าภายใต้สภาวะแอโรบิกสามารถย่อย สลายสีมาลาไคน์กรีนได้ดีที่สุด โดยสามารถลดปริมาณสีมาลาไคน์กรีนได้ 51.47% และลดค่า ซีโอดีได้ 65.09%
4. ในการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนโดยตะกอนเร่ง สามารถทำการบำบัดสีได้ ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน เนื่องจากสภาวะดังกล่าวไม่ต้องเตรียมระบบให้ยุ่งยากเหมือน การบำบัดภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และสภาวะดังกล่าวยังสามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์ได้ดี ในระยะเวลาอันสั้น

อภิปรายผลการทดลอง

1. ตะกอนเร่ง

1.1 pH ของตะกอนเร่ง สภาพเป็นกรดหรือสภาพเป็นด่างมีความสำคัญต่อระบบบำบัดทางชีววิทยา ถ้าเป็นกรดหรือด่างมากเกินไปจะทำให้ระบบการทำงานได้ไม่ดี จากผลการทดลองในตาราง 1 พบว่าค่า pH ของตะกอนเร่งก่อนการ acclimated มีค่า 6.69 แต่หลังจากทำการ acclimated ตะกอนเร่งให้อยู่ภายใต้สภาวะต่าง ๆ 4 สภาวะ คือ สภาวะแอโรบิก, แอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน, ดีไนตริฟิเคชัน และเมทาโนเจนิก พบว่าตะกอนเร่งมี pH สูงขึ้นในทุกสภาวะ ซึ่งค่า pH ที่สูงขึ้นหลังจากการ acclimated ทุกสภาวะน่าจะมาจากการเติมเกลือโซเดียมเบนโซเอทให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 มิลลิโมลาร์ เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของตะกอนเร่ง ทำให้จุลินทรีย์ในตะกอนเร่งสามารถใช้แหล่งคาร์บอนดังกล่าวในการเจริญและทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในองค์ประกอบของเซลล์ (ควงพร คันธโชติ, 2545) ซึ่งในการเลือกโซเดียมเบนโซเอทมาเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นเนื่องจากโซเดียมเบนโซเอทมีโครงสร้างเป็น aromatic ring ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของสีมาลาโคไนกรีน และเพื่อให้จุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการย่อยสลายสีมาลาโคไนกรีนสามารถปรับตัวให้คุ้นเคยกับสีมาลาโคไนกรีนได้รวดเร็วขึ้น และช่วยให้มีการย่อยสลายสีมาลาโคไนกรีนโดยใช้เป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป

ค่า pH หลังการ acclimated ตะกอนเร่งให้อยู่ภายใต้สภาวะต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสภาวะ และในแต่ละสภาวะมีค่า pH ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปน่าจะเกิดจากสารอาหารที่เติมไปในขณะ acclimated และค่า pH ที่ได้หลังการ acclimated อยู่ในช่วง 8.51 - 9.08 ซึ่งค่า pH ดังกล่าวอยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง ความเป็นด่างนี้สามารถยับยั้งการทำงานของเชื้อราและยีสต์ เนื่องจากเชื้อราจะเจริญได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดมีค่า $\text{pH} < 6.5$ (สุวสานวนิชกูร, 2538) จุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่เป็นด่าง คือแบคทีเรีย (บัญญัติสุขศรีงาม, 2534)

การ acclimated ตะกอนเร่งจะมีความสำคัญช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ (Limbergen, Top, & Verstraete, 1998) และสภาวะหลังจากการ acclimated นี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการศึกษการย่อยสลายด้วยตะกอนเร่งต่อไป เนื่องจากแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญที่สุดในระบบบำบัดน้ำทางชีววิทยาสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งชนิดที่ละลายน้ำและชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535)

1.2 ค่า Sludge Volume Index (SVI) จากผลการทดลองในตาราง 2 จะเห็นได้ว่าค่า SVI ที่วิเคราะห์ได้จากตะกอนเร่งหลังการ acclimated ให้อยู่ในสภาวะต่าง ๆ ทั้ง 4 สภาวะจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสภาวะที่ให้ค่า SVI มากที่สุดคือ สภาวะแอโรบิก 86.55 มล./กรัม รองลงมาคือสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน 69.53 มล./กรัม, สภาวะเมทาโนจีนิก 53.33 มล./กรัม และสภาวะดีไนตริฟิเคชัน 51.89 มล./กรัม ซึ่งค่า SVI ที่วัดได้ทั้ง 4 สภาวะอยู่ในช่วง 50-150 มล./กรัม ซึ่งเป็นช่วงปกติของตะกอนเร่ง (Atlas & Batha, 1998) ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดซึ่งถือได้ว่ามีประสิทธิภาพดีและมีค่าการตกตะกอนที่ดี (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535)

ความแตกต่างของค่า SVI ที่วัดได้ในทั้ง 4 สภาวะ อาจเนื่องจากความสามารถของจุลินทรีย์ในตะกอนเร่งมีการเจริญเติบโตในสภาวะต่าง ๆ ได้แตกต่างกันคือ

1.2.1 สภาวะที่มีออกซิเจนจะมีการเจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะสภาวะแอโรบิกจะมีมวลจุลินทรีย์มากที่สุด และมีการให้อากาศทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้สารที่เติมเข้าไปเป็นอาหารและแหล่งพลังงานในการดำรงชีพและใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ส่วนสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน มีการให้อากาศและเติมสารอาหารทั้งแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน ซึ่งแหล่งไนโตรเจนที่เพิ่มเข้ามาคือ โพแทสเซียมไนเตรท ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน สามารถใช้ทั้งออกซิเจนและไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเนื่องจากจุลินทรีย์สามารถสร้างเอนไซม์เพอร์ฟลาสมิคไนเตรทรีดักเตส ซึ่งออกซิเจนจะไม่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ตัวนี้ได้ ทำให้ในสภาวะที่มีออกซิเจนจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้ไนเตรทแล้วผ่านเข้าไปเซลล์ทางไซโตพลาสซึมเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้เช่นเดียวกับออกซิเจน ซึ่งเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์เหล่านี้ว่า aerobic nitrate respiration (Carter, Hsiao, Spiro, & Richardson, 1995) และเนื่องจากไนเตรทมีค่าพลังงานน้อยกว่าออกซิเจน (Brock, Madigan, Martinko, & Parker, 1994) ถ้าจุลินทรีย์เลือกใช้ไนเตรทแล้วจะได้พลังงานออกมาน้อย ทำให้การสร้างเซลล์ใหม่น้อย มวลจุลินทรีย์ที่ได้จากสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันก็น้อยกว่าสภาวะแอโรบิก ซึ่งจากการวัดค่า SVI ในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน มีค่าน้อยกว่าสภาวะแอโรบิก อาจแสดงให้เห็นว่าในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน ตัวรับอิเล็กตรอนจะมีได้ทั้งออกซิเจนและไนเตรท (Robertson, Niel, Torremans, & Kuenen, 1988)

1.2.2 ส่วนสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะมีค่า SVI น้อยกว่าสภาวะที่มีออกซิเจนมาก เนื่องจากในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจุลินทรีย์ในตะกอนเร่งไม่ได้ใช้ออกซิเจนในการรับอิเล็กตรอน ทำให้แบคทีเรียในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนสร้างพลังงานได้น้อย (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2537)

ทำให้การสร้างเซลล์ใหม่ได้น้อย ซึ่งก็คือมีอัตราการสร้างตะกอนสลัดจ์ต่ำมาก (มันลิน คันทุล เวศม์, 2542)

1.2.3 จากการบันทึกผลการทดลองสีของน้ำในตะกอนเร่งในแต่ละสภาวะที่เรา มองเห็น พบว่ามีสีที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำและสิ่งทีละลายในน้ำ แตกต่างกันทำให้เรามองเห็นสีต่างกัน (นัทธิดา สรรพณิ, 2541) และสีของตะกอนในสภาวะที่มี ออกซิเจนจะมีสีเทาดำ แต่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะมีสีดำสาเหตุที่เป็นเช่นนั้นน่าจะมาจากการที่ขาด ออกซิเจน ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ (สุรพล สายพานิช, 2538)

2. การย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนโดยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะต่าง ๆ จากผลการศึกษา การย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนภายใต้สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 4 สภาวะ คือ สภาวะแอโรบิก, สภาวะ แอโรบิกดีไนตริฟิเคชั่น, สภาวะดีไนตริฟิเคชั่น และสภาวะเมทาโนจีนิก พบว่าสภาวะแอโรบิก ดีไนตริฟิเคชั่นสามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนได้ดีที่สุดและเร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะ อื่น ๆ ในช่วงเวลาเท่ากัน กล่าวคือ

2.1 สภาวะแอโรบิก เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนเป็นเวลา 75 วัน ภายใต้สภาวะนี้จุลินทรีย์จากตะกอนเร่งไม่สามารถย่อยสลายสีได้เพราะความเข้มข้นของสีไม่ลดลง (ภาพที่ 14) ซึ่งจากการทดลองให้ผลเช่นเดียวกันทั้งในชุดไร้เชื้อและชุดทดลอง โดยสรุปใน สภาวะแอโรบิกทั้งชุดไร้เชื้อและชุดทดลองไม่มีความสามารถในการลดความเข้มข้นของสีมาลาไคน์ กรีนได้ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของ เฮนเดอร์สัน และคณะ (Henderson et al., 1997) ที่ศึกษาพบว่าสีมาลาไคน์กรีนจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากลำไส้ของ คนและหนูภายใต้สภาวะแอนอกซิก โดยสามารถรีดิวซ์สีมาลาไคน์กรีนไปเป็น Leuco malachite green

2.2 สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชั่น เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน (ภาพที่ 15) พบว่าในระยะเวลา 7 วัน จุลินทรีย์ในตะกอนเร่งของชุดทดลองสามารถทำให้สี มาลาไคน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเข้มน้ำทะเลเป็นสีเขียว อ่อนใสได้และตะกอนเป็นสีดำออกเขียวและมีปริมาณตะกอนมากกว่าในชุดไร้เชื้อ หลังจากที่มีความ เข้มของสีมาลาไคน์กรีนลดลงแล้ว เพื่อเป็นการยืนยันว่าตะกอนเร่งสามารถย่อยสลายสีได้จริง จึงมี การเติมสีมาลาไคน์กรีนเพิ่มเข้าไปอีก โดยให้มีความเข้มข้นเป็น 2 มิลลิโมลาร์ พบว่าหลังจากการ เติมสีไปเป็นเวลา 12 วัน ความเข้มข้นของสีก็ลดลงอีกจนเป็นสีเขียวอ่อนใสและเมื่อปล่อยให้เกิดการ ย่อยสลายต่อไปจนถึงวันที่ 75 ของการทดลอง ความเข้มข้นของสียังคงไม่เปลี่ยนแปลง

ส่วนในชุดไร้เชื้อพบว่า ในระยะเวลา 7 วัน ก็สามารถลดความเข้มข้นของสีมาลาไคน์กรีน ได้เช่นเดียวกัน แต่น้อยกว่าในชุดทดลองและตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นสีเขียว ซึ่งจากผลการทดลองที่

เกิดขึ้นอาจบอกได้ว่าจุลินทรีย์ในซูดไร้เชื่อว่าจะมีคุณสมบัติในการดูดซับสีเกิดขึ้น เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์จะสัมผัสอยู่กับน้ำตลอดเวลาทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับน้ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตะกอนต่อกระบวนการทางเคมี (นัทธรา สรรณณ, 2541) และสีมาลาไคน์กรีนมีคุณสมบัติเป็นแคตไอออน และสามารถละลายน้ำได้ ทำให้สีมาลาไคน์กรีนสามารถถูกจุลินทรีย์ในซูดไร้เชื่อดูดซับไว้ แม้จุลินทรีย์ในซูดไร้เชื่อจะไม่มีชีวิตแต่การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ที่บริเวณผนังเซลล์ซึ่งคล้ายกับการข้อมสีแกรม ทำให้เรามองเห็นตะกอนเป็นสีเขียว

ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ในซูดทดลองน่าจะทำหน้าที่ทั้งดูดซับและย่อยสลายสี เนื่องจากจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสีลดลงจนเป็นสีเขียวอ่อนใสและตะกอนมีสีค้ำออกเขียว แสดงให้เห็นว่าในส่วนที่เราเห็นตะกอนเป็นสีเขียวน่าจะเกิดจากการดูดซับที่ผนังเซลล์ ส่วนที่เราเห็นตะกอนเป็นสีค้ำน่าจะเกิดจากจุลินทรีย์สามารถนำสารอินทรีย์มาคิดที่ผนังเซลล์และส่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็ก พอที่จะซึมผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ หรือจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสีได้และสารที่ย่อยสลายไปก็ถูกนำมาใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้จุลินทรีย์มีปริมาณมากขึ้นและมีน้ำหนักรวมจนเกิดการตกตะกอน และเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสีได้จึงทำให้น้ำใสขึ้น

จากผลการทดลองการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีในตรีพีเคชั่น สามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนได้ดีกว่าสภาวะแอโรบิก อาจเนื่องจากในสภาวะแอโรบิกดีในตรีพีเคชั่นมีกลไกการทำงานที่สามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถที่จะบอกได้ว่ากลไกการย่อยสลายภายใต้สภาวะแอโรบิกดีในตรีพีเคชั่นมีกลไกการทำงานอย่างไร แต่จากผลการศึกษาปริมาณไนเตรทที่เติมลงไป ในสภาวะนี้ (ภาพที่ 16) สามารถนำมาสนับสนุนผลการศึกษาในสภาวะนี้ได้ โดยพบว่าในซูดทดลองความเข้มข้นของไนเตรทลดลงอย่างเห็นได้ชัด (จาก 3.35 ไปเป็น 0.41 มิลลิโมลาร์ ในเวลา 3 วัน) และความเข้มข้นของไนไตรท์ก็เพิ่มขึ้น (จาก 0.12 ไปเป็น 1.31 มิลลิโมลาร์ ในเวลา 3 วัน) และเมื่อมีการเติมไนเตรทเพิ่มขึ้นก็พบว่าปริมาณไนเตรทก็ลดลงเช่นเดิม (จาก 6.66 ไปเป็น 0.4 มิลลิโมลาร์ในเวลา 6 วัน) ซึ่งผลที่ได้นี้อาจบอกได้ว่าจุลินทรีย์ในสภาวะดังกล่าวสามารถใช้ไนเตรทในการเจริญเติบโตหรืออาจนำไปใช้เพื่อการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน

ส่วนในซูดไร้เชื่อความเข้มข้นของไนเตรทลดลงเล็กน้อย (จาก 3.75 ไปเป็น 3.53 มิลลิโมลาร์ในเวลา 6 วัน) และพบไนไตรท์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (จาก 0 ไปเป็น 0.76 มิลลิโมลาร์ในเวลา 6 วัน) การที่ความเข้มข้นของไนเตรทลดลงและไนไตรท์เพิ่มขึ้นของซูดไร้เชื่อ นั้น อาจเป็นเพราะว่าไนเตรทเกิดการสลายตัวทางกายภาพและเกิดเป็นไนไตรท์ขึ้นเอง

ส่วนการวัดปริมาณแก๊สภายในขวดทดลองทั้งชุดไร้เชื้อและชุดทดลองไม่พบแก๊สเกิดขึ้น อาจเป็นผลมาจากการย่อยสลายสียนั้นเกิดไม่สมบูรณ์ คือ ผลผลิตสุดท้ายที่ได้ไม่ใช่แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (มันลีน ดัฒนกุลเวศม์, 2542) หรืออาจเป็นผลมาจากมีจุลินทรีย์บางกลุ่มที่อยู่ในตะกอนเร่งที่ใช้ในการทดลองสามารถใช้แก๊สที่เกิดจากการย่อยสลายสียได้ โดยสรุปในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันในชุดทดลองจะมีความสามารถในการลดความเข้มข้นของสีมาลาโคไนน์กรีนได้ดีกว่าชุดไร้เชื้อ

2.3 สภาวะดีไนตริฟิเคชัน เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนเป็นเวลา 75 วัน จุลินทรีย์ในตะกอนเร่งของชุดไร้เชื้อและชุดทดลองไม่สามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ได้ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าความเข้มข้นของไนเตรทที่เติมลงไปในชุดทดลองจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (จาก 3.34 ไปเป็น 0.31 มิลลิโมลาร์ในเวลา 1 วัน) ซึ่งเร็วกว่าในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน (จาก 3.35 ไปเป็น 0.41 มิลลิโมลาร์ในเวลา 3 วัน) และพบปริมาณไนไตรท์และแก๊สเกิดขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในสภาวะดีไนตริฟิเคชันน่าจะมีจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียทำงาน (Zissi & Lyberatos, 1996) แต่จุลินทรีย์ในกลุ่มดังกล่าวไม่มีความสามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนได้ ซึ่งจุลินทรีย์ในสภาวะนี้อาจใช้สารอาหารที่อยู่ในตะกอนเร่งในการเจริญเติบโตแต่ไม่สามารถใช้สีเป็นอาหารได้

2.4 สภาวะเมทาโนจีนิก เมื่อทำการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ พบว่าจุลินทรีย์ในชุดไร้เชื้อสามารถดูดซับสีมาลาโคไนน์กรีนได้ภายในระยะเวลา 7 วัน (ภาพที่ 19) แต่จุลินทรีย์ในชุดทดลองสามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนได้ในระยะเวลา 27 วัน ซึ่งมีระยะเวลาที่นานกว่าสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งในการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมภายใต้สภาวะเมทาโนจีนิก จากรายงานของ ราโซ ฟลออร์ และคณะ (Razo-Flores et al., 1997) และเบคิลโล, พาลอสทาทิส และทินเชอร์ (Beydilli, Pavlostathis, & Tincher, 1998) พบว่าในการย่อยสลายสีอะโซซึ่งเป็นสีที่มีโครงสร้างเป็น aromatic ring ซึ่งคล้ายกับสีมาลาโคไนน์กรีน ภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถย่อยสลายสีอะโซได้แต่ต้องใช้เวลาานาน และต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับสภาวะนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันที่ไม่ต้องควบคุมสภาพแวดล้อมและระบบมากนัก สภาวะนี้จึงน่าที่จะนำมาทำการย่อยสลายสีย้อมมากกว่าสภาวะเมทาโนจีนิก

3. เปรียบเทียบการลดลงของสีมาลาโคไนน์กรีนโดยตะกอนเร่งภายใต้ 4 สภาวะ จากผลการศึกษาในข้อ 2 และผลการทดลองในภาพที่ 7 พบว่าในการศึกษาการลดลงของสีมาลาโคไนน์กรีนที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยตะกอนเร่งภายใต้สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 4 สภาวะ เมื่อทำการ

ติดตามผลการทดลองด้วยการ scan สี โดยดูผลการศึกษาค่าแอมพลิจูดตั้งแต่ วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่เจ็ดของการทดลองพบว่า

3.1 เมื่อศึกษาที่ความยาวคลื่น 320–900 นาโนเมตร (ภาพที่ 20) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีมาลาไคน์กรีนในแต่ละสภาวะ พบว่าสภาวะแอโรบิกดีในครีฟิเคชั่นเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดทั้งในชุดไร้เชื้อและชุดทดลองกล่าวคือ ในชุดไร้เชื้อเมื่อสังเกตจากกราฟของวันที่เริ่มต้นเปรียบเทียบกับวันที่เจ็ดของการทดลอง จะพบว่าในวันที่เจ็ดของการทดลองมีค่าแอมพลิจูดลดลงในทุก ๆ ความยาวคลื่น แต่ในชุดทดลองค่าแอมพลิจูดของวันที่เจ็ดของการทดลองจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 320–455 นาโนเมตร และหลังจากความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร จะมีค่าลดลงจากวันที่เริ่มต้นการทดลอง และในชุดทดลองจะแสดงพีกสูงสุดที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ซึ่งตามทฤษฎีความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถดูดซับสีมาลาไคน์กรีนได้คือ 616.9 นาโนเมตร (Windholz et al., 1976) จากผลการทดลองที่ได้นำจะบอกได้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเกิดขึ้นกับสีมาลาไคน์กรีนในชุดทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์เข้าไปทำลายพันธะโครงสร้างสีให้เป็นองค์ประกอบย่อย (Carliell, Barclay, Naidoo, & Buckley, 1995) และในชุดไร้เชื้ออาจเกิดจากการดูดซับสีของจุลินทรีย์แต่ไม่เกิดการทำลายพันธะโครงสร้างสี (Shaul, Holdworth, Dempsey, & Dostal, 1987; วรวิทย์ เหลืองคิลก และธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2541) ส่วนในสภาวะอื่น ๆ จะพบว่ามีเปลี่ยนแปลงทั้งในชุดไร้เชื้อและชุดทดลองเพียงเล็กน้อย

3.2 เมื่อศึกษาที่ความยาวคลื่น 616.9 นาโนเมตร (ภาพที่ 21) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถดูดซับสีมาลาไคน์กรีนได้ ซึ่งในการศึกษาที่ความยาวคลื่นนี้เพื่อศึกษาถึงปริมาณสีมาลาไคน์กรีนที่เปลี่ยนไปเล็กน้อยเพียงใด จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถลดความเข้มของสีได้คือ สภาวะแอโรบิกดีในครีฟิเคชั่น เนื่องจากสภาวะนี้มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสีมากที่สุดคือ 55.07% รองลงมาคือสภาวะเมทาโนจีนิก สามารถลดความเข้มของสีได้ 43.33% ส่วนสภาวะแอโรบิกสามารถลดปริมาณสีได้ 19.05% และดีในครีฟิเคชั่นสามารถลดความเข้มของสีได้ 35.42% สีลดลงในช่วงแรกและยังปล่อยให้เกิดการย่อยสลายนานขึ้นสีก็ยังคงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ เทคโนวานิช, พรรณสวัสดิ์, และอโนทัย (Technovanich, Panswad, & Anotai, 2000) ที่พบว่าในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสามารถกำจัดสีได้ ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งเท่านั้น แต่สภาวะแอโรบิกดีในครีฟิเคชั่นสีจะจางลงเรื่อย ๆ แม้สภาวะเมทาโนจีนิกจะสามารถย่อยสลายสีได้เหมือนสภาวะแอโรบิกดีในครีฟิเคชั่นแต่ต้องใช้เวลา นานกว่า ความเข้มของสีที่ลดลงอาจเกิดจากจุลินทรีย์เข้าไปทำลายโครงสร้างของสีในกลุ่มอะคอม ที่เรียกว่า โครโมฟอร์ เมื่อกลุ่มอะคอมนี้ถูกทำลายไปการเกิดสีจึงลดลง เนื่องจากกลุ่มอะคอมนี้จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวไว้บางแถบแสงและ

ปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีข้อมมีโทนสีแตกต่างกัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ แนปปี และนิวบาย (Knapp & Newby, 1995) ที่พบว่า จุลินทรีย์สามารถที่จะกำจัดสีข้อมได้โดยจะเข้าไปทำลายกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ทำให้ความเข้มของสีข้อมลดลงได้

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีนที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะต่าง ๆ กันทั้ง 4 สภาวะ ในช่วงเวลาเท่ากัน จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ สภาวะแอโรบิกดีในตรีฟิเคชั่น

4. การศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีในตรีฟิเคชั่นเป็นเวลา 7 วัน

หลังจากที่ทราบแล้วว่าสภาวะแอโรบิกดีในตรีฟิเคชั่นเป็นสภาวะที่ดีที่สุด จึงทำการศึกษาการย่อยสลายอีกครั้ง แต่ใช้เวลา 7 นาที่ หลังจากนั้นนำเฉพาะส่วนใสที่มีสีเหลืออยู่ในชุดทดลองไปทำการย่อยสลายต่อในสภาวะอื่น ๆ คือ สภาวะแอโรบิก, สภาวะดีในตรีฟิเคชั่น และสภาวะเมทาโนจินิกเพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีนที่เหลือ เพื่อให้ทราบว่าสภาวะใดจะสามารถย่อยสลายสีต่อได้ และเพื่อศึกษาถึงกระบวนการย่อยสลายแบบต่อเนื่องเพื่อเป็นแนวทางใหม่ในการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีนซึ่งในการศึกษานี้จะวัดผลการศึกษาจากคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ซีไอดี, เอสเอส, ทีดีเอส, ไนเตรท, ไนไตรท์และโซเดียมคลอไรด์ นอกจากนั้นยังติดตามการย่อยสลายสีด้วย HPLC (Cha, Doerge, & Cerniglia, 2001) เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีน โดยเปรียบเทียบพิกที่ที่เกิดขึ้นในวันที่เริ่มต้นการทดลองกับวันที่เจ็ดของการทดลอง (Sahinkaya & Dilek, 2002)

จากผลการศึกษาในภาพที่ 22 ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของการย่อยสลายสีมาลาโคไนต์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีในตรีฟิเคชั่นของชุดไร้เชื้อและชุดทดลองเป็นเวลา 7 วัน พบว่าในชุดไร้เชื้อมีปริมาณซีไอดีเหลืออยู่ 66.67% ซึ่งเหลือในปริมาณมากกว่าชุดทดลองคือ ในชุดทดลองมีปริมาณซีไอดีเหลือเพียง 31.82% ส่วนปริมาณเอสเอสของชุดไร้เชื้อและชุดทดลองเหลือเพียง 42.79% และ 41.83% ตามลำดับ ซึ่งในทั้งสองชุดนั้นพบว่าปริมาณเอสเอสที่เหลืออยู่มีปริมาณใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อสังเกตจากสีของตะกอนพบว่าในชุดไร้เชื้อมีตะกอนเป็นสีเขียว แต่ในชุดทดลองตะกอนจะมีสีดำ ส่วนปริมาณทีดีเอสของชุดไร้เชื้อและชุดทดลองลดลงเพียงเล็กน้อยคือเหลือ 79.69% และ 88.51% ตามลำดับ ส่วนปริมาณโซเดียมคลอไรด์ทั้งในชุดไร้เชื้อและชุดทดลองสามารถทำให้ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ลดลงได้เพียงเล็กน้อยหรือเกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ในชุดไร้เชื้อเมื่อผลการย่อยสลายจาก HPLC ดังภาพที่ 23 เปรียบเทียบระหว่างวันที่ เริ่มต้นการทดลองกับวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่าฟิสิกที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 วันของการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อดูจากความเข้มของสีมาลาโคไนน์กรีนพบว่าสีลดลงจากสีเขียวเข้มน้ำทะเล เป็นสีเขียวอ่อนใส และเมื่อดูผลของคุณสมบัติทางเคมีพบว่า ในชุดไร้เชื้อสามารถลดปริมาณซีโอดี และเอสเอสได้บางส่วน ผลการทดลองที่ได้อาจหมายถึงว่ามีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเกิดขึ้นในชุด ไร้เชื้อเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ซึ่งอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตยังมีความสามารถในการดูดซับสี ได้ทำให้สารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไป (Panswad & Luangdilok, 2000) อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของสีข้อมไปเป็นสารอินทรีย์อีกรูป จึงทำให้พบปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดได้ใน รูปของซีโอดี

ในชุดทดลองเมื่อผลการย่อยสลายจาก HPLC ดังภาพที่ 24 เปรียบเทียบระหว่างวันที่ เริ่มต้นการทดลองกับวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดหรืออาจจะ บอกได้ว่าในชุดทดลองนี้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์ และเมื่อ ดูจากคุณสมบัติทางเคมี การใช้ไนเตรท การสร้างไนไตรท์ การเกิดแก๊สและผลจาก HPLC ใน สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันสามารถบอกได้ว่า จุลินทรีย์จากตะกอนเร่งของชุดทดลองมีการใช้ ไนเตรทและสารอินทรีย์ที่มีอยู่ จุลินทรีย์ดังกล่าวน่าจะเป็นแอโรบิกดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่ สามารถเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ได้ (Jensen, Sloth, Risgaard-Petersen, Rysgaard, & Revsbech, 1994) และสารอินทรีย์ดังกล่าวอาจเป็นสีมาลาโคไนน์กรีนที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญ เติบโตหรือสามารถย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีน โดยสามารถดูได้จากผลของปริมาณซีโอดีและ เอสเอสที่ลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ พรรณสวัสดิ์ และเหลือคิดถ (Panswad & Luangdilok, 2000) ที่พบว่าจุลินทรีย์ที่มีชีวิตจะมีความสามารถกำจัดสีและซีโอดีได้ สูงกว่าจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต การย่อยสลายที่เกิดขึ้นอาจไม่สมบูรณ์ แต่จุลินทรีย์เหล่านี้ก็สามารถย่อย สลายสีมาลาโคไนน์กรีนได้ส่วนหนึ่ง และการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์อาจเกิดการสร้างสารตัวกลางขึ้น แม้ว่าการบำบัดสีจะไม่สามารถทำให้น้ำใสได้ แต่จากการทดลองก็สามารถทำให้ความเข้มของสี ลดลงไม่เป็นที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็นหรือสามารถลดมลพิษทางทัศนียภาพได้เช่นเดียวกัน

หลังจากที่ทำการย่อยสลายสีมาลาโคไนน์กรีนภายใต้สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันเป็น ระยะเวลา 7 วัน แล้วนำส่วนใสของชุดทดลองมาย่อยสลายต่อในสภาวะอื่น ๆ 3 สภาวะ (ขั้นที่ 2) คือ สภาวะดีไนตริฟิเคชัน, แอโรบิกและเมทาโนเจนิก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสี : ตะกอนเร่ง = 1 : 3 ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีมาลาโคไนน์กรีนใน เฉพาะส่วนน้ำ และการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสีแบบต่อเนื่อง เนื่องจากจากการ รายงานที่ผ่านมามีพบว่าการย่อยสลายสีข้อมโดยจุลินทรีย์ บางครั้งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลาย

สีย้อมได้อย่างสมบูรณ์ (O'Neill et al., 2000) เช่น จากรายงานของ ซิสซี และไลเบอร์ราทอส (Zissi & Lyberatos, 1996) ได้ทำการย่อยสลายสีย้อมในกลุ่มอะโซภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยใช้จุลินทรีย์ผสม พบว่าหลังการศึกษาการย่อยสลายสีดังกล่าวพบสารตัวกลางเกิดขึ้นคือ อะโรมาติกเอมีน ซึ่งสารตัวกลางนี้เป็นสารก่อนมะเร็งที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและไม่สามารถย่อยสลายต่อไปภายใต้สภาวะเดิม แต่จากรายงานการศึกษาของ ราจากูรู และคณะ (Rajaguru et al., 2000) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสีอะโซแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและตาม ด้วยสภาวะที่มีออกซิเจนโดยใช้จุลินทรีย์ผสม พบว่าในการย่อยสลายแบบ 2 ขั้นตอน สามารถย่อยสลายสีอะโซได้สมบูรณ์ (mineralization) เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งจากรายงานการศึกษาที่พบข้างต้น สามารถเป็นต้นแบบของการศึกษาการย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

5. การย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีน (ขั้นที่ 2) ภายใต้สภาวะต่าง ๆ

5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของการย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีน (ขั้นที่ 2)

ภายใต้สภาวะต่าง ๆ จากผลการทดลองในภาพที่ 25-26 ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของการย่อยสลายสีมาลาโคไนท์กรีนภายใต้สภาวะต่าง ๆ ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อดูจากปริมาณซีไอดี พบว่าในชุดทดลองสามารถลดปริมาณซีไอดีได้มากกว่าชุดไร้เชื้อ โดยในสภาวะแอโรบิกสามารถลดปริมาณซีไอดีได้มากที่สุด (65.09%) รองลงมาคือสภาวะดีไนตริฟิเคชัน (32.36%) และสภาวะเมทาโนจีนิก (18.4%) ตามลำดับ ส่วนปริมาณเอสเอสในชุดไร้เชื้อและชุดทดลองจะมีปริมาณเอสเอสแตกต่างกัน คือ ในชุดไร้เชื้อปริมาณเอสเอสจะลดลงจากวันที่เริ่มต้นการทดลอง แต่ในชุดทดลองจะมีปริมาณเอสเอสเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สามารถบอกได้ว่า ปริมาณเอสเอสที่เพิ่มขึ้นในชุดทดลองน่าจะมาจากการที่จุลินทรีย์ในชุดทดลองมีการย่อยสลายสารในระบบเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตจึงทำให้มีมวลจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น

ส่วนปริมาณทีดีเอสของทั้ง 3 สภาวะ ในช่วง 4 วันแรก ลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน ส่วนปริมาณโซเดียมคลอไรด์ในทั้ง 3 สภาวะ เกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง โดยภาพรวมแล้วเมื่อเปรียบเทียบจากประสิทธิภาพของการบำบัดหรือจากคุณสมบัติทางเคมีแล้ว สภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถลดปริมาณสีมาลาโคไนท์กรีนหรืออินทรีย์สารได้คือสภาวะแอโรบิก ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานการศึกษาหลาย ๆ ฉบับที่ทำการศึกษากการย่อยสลายสีย้อมในกลุ่มอะโซซึ่งมีโครงสร้างเป็น aromatic rings ที่คล้ายกับสีมาลาโคไนท์กรีน โดยทำการย่อยสลายแบบต่อเนื่อง ในขั้นแรกของการทดลองเป็นการย่อยสลายเพื่อกำจัดสีของสีย้อม หลังจากนั้นทำการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารตัวกลางที่เกิดขึ้น โดยสามารถอ้างอิงการย่อยสลายสารตัวกลางจากการวิเคราะห์ด้วยค่าซีไอดีที่ลดลง (O'Neill et al.,

2000; Rajaguru et al., 2000; Cruz & Bultron, 2001) นอกจากคุณสมบัติทางเคมีที่ได้นำมาสนับสนุนผลการศึกษาว่าสภาวะแอโรบิกสามารถย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนในขั้นที่สองได้ดีที่สุดแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลจาก HPLC มาวิเคราะห์ควบคู่ไปด้วย ซึ่งให้ผลการทดลองในแต่ละสภาวะดังนี้

5.2 ผลจาก HPLC ของการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน (ขั้นที่ 2) ภายใต้สภาวะดีไนตริฟิเคชัน เมื่อคุณผลการย่อยสลายจาก HPLC พบว่าในชุดไร้เชื้อเมื่อถูกจากฟัดในวันที่เริ่มต้นการทดลองเปรียบเทียบกับวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 28) ให้ผลแตกต่างกัน และเมื่อคุณคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดไร้เชื้อสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคงเหลือถึง 73.05% ซึ่งมีปริมาณมากกว่าในชุดทดลอง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของพรรณสวัสดิ์ และ เหลืองดิลก (Panwasd & Luangdilok, 2000) ที่พบว่าปริมาณซีโอดีที่ลดลงในชุดไร้เชื้อเกิดจากการดูดซับสีของจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต และพบว่าในช่วง 2 วันแรก ในชุดไร้เชื้อปริมาณไนเตรทลดลงอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 27) และพบปริมาณไนโตรเจนมากขึ้นด้วย แต่หลังจากนั้นไนเตรทก็หมดไปพร้อมกับไม่พบปริมาณ ไนโตรเจนหรือแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการหมุนเวียนของสารประกอบไนโตรเจนไปเป็นสารอื่น ๆ (Rosswall, 1978) จากผลการทดลองดังกล่าวอาจบอกได้ว่าในชุดไร้เชื้อจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางกายภาพเกิดขึ้น หรือในบางส่วนอาจเกิดการย่อยสลายทางชีววิทยา เนื่องจากในขณะที่น่าส่วนใสที่มีสีมาทำการย่อยสลายยังคงมีจุลินทรีย์ของชุดทดลองติดมาด้วยและเกิดการย่อยสลายสารนั้น ๆ ไป ซึ่งสารเหล่านั้นอาจจะมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการนำไปใช้

ในชุดทดลองเมื่อคุณผลจาก HPLC เปรียบเทียบระหว่างวันที่เริ่มต้นการทดลองและวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 29) จะพบว่ามีความแตกต่างกันโดยยังคงพบว่ามีฟักเกิด และเมื่อคุณคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดทดลองสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคงเหลือถึง 67.64% ซึ่งใกล้เคียงกับชุดไร้เชื้อ, เอสเอสเพิ่มขึ้น 54.13% ซึ่งมากกว่าในชุดไร้เชื้อ, ทีดีเอส และโซเดียมคลอไรด์ไม่เปลี่ยนแปลง และพบว่าในชุดทดลองปริมาณไนเตรทค่อย ๆ ลดลง และพบปริมาณไนโตรเจนมากขึ้น และพบแก๊สเกิดขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 30) จากผลการทดลองอาจบอกได้ว่าในชุดทดลองนี้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตมากขึ้นและมีการย่อยสลายเกิดขึ้น โดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย บางส่วนของการย่อยสลายอาจเกิดอย่างสมบูรณ์ตามปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้เกิดแก๊สขึ้น (Zissi & Lyberatos, 1996) และจากผลการทดลองพบว่ามีปริมาณไนโตรเจนมาก ไนโตรเจนที่พบมากอาจเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย (ควงพร คันธโชติ, 2545) และเป็นผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารได้หมดจึงยังคงเห็นฟักเกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วย HPLC

เมื่อเปรียบเทียบผลของ HPLC ในวันที่ 7 ของการทดลองระหว่างชุดไร้เชื้อและชุดทดลอง พบว่าฟักที่เกิดขึ้นมีช่วงเวลาการเกิดฟักแตกต่างกัน สามารถแสดงให้เห็นว่าในชุดไร้เชื้อ

และชุดทดลองมีการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งในชุดไร่เชื้ออาจเกิดจากการดูดซับของจุลินทรีย์ไปทำให้โครงสร้างทางเคมีของสารเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเมื่อดูจากปริมาณซีโอดีที่ยังคงเหลืออยู่พบว่าชุดทดลองสามารถลดปริมาณซีโอดีของสารได้มากกว่าชุดไร่เชื้อ จากผลดังกล่าวน่าจะสนับสนุนว่าในชุดทดลองน่าจะเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารเกิดขึ้น แต่สภาวะนี้อาจจะไม่เหมาะสมทำให้การย่อยสลายสีไม่สมบูรณ์

5.3 ผลจาก HPLC ของการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน (ขั้นที่ 2) ภายใต้สภาวะแอโรบิก เมื่อดูผลการย่อยสลายจาก HPLC พบว่าในชุดไร่เชื้อเมื่อดูจากฟิคในวันที่เริ่มต้นการทดลองเปรียบเทียบกับวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 30) ให้ผลแตกต่างกัน และเมื่อดูผลคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดไร่เชื้อสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคงเหลือถึง 75.72%, เอสเอสยังคงเหลือถึง 64.58%, ทึบเอสในช่วง 4 วันแรกมีค่าลดลงหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเกือบเท่าวันที่เริ่มต้นการทดลองและโซเดียมคลอไรด์ไม่คงที่ จากผลการทดลองดังกล่าวอาจบอกได้ว่าในชุดไร่เชื้ออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทางกายภาพเกิดขึ้น (Panswad & Luangdilok, 2000)

ในชุดทดลองเมื่อดูผลจาก HPLC เปรียบเทียบระหว่างวันที่เริ่มต้นการทดลองและวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 31) จะพบว่ามีความแตกต่างกันมาก คือ ความสูงของฟิค, จำนวนและเวลาการเกิดฟิคแตกต่างกัน โดยพบว่าฟิคที่เหลืออยู่หลังจากการศึกษการย่อยสลายเป็นเวลา 7 วัน ฟิคที่เหลืออยู่มีขนาดและความสูงน้อยมากจนเกือบจะได้กราฟเป็นเส้นตรง และเมื่อดูผลคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดทดลองสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคงเหลือเพียง 34.91%, เอสเอสเพิ่มขึ้น 20.92%, ทึบเอสและโซเดียมคลอไรด์ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อดูผลจาก HPLC และค่าซีโอดีที่เหลืออยู่ในชุดทดลองนี้ น่าจะบอกได้ว่าในชุดทดลองนี้จุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์

5.4 ผลจาก HPLC ของการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน (ขั้นที่ 2) ภายใต้สภาวะเมทาโนจีนิก เมื่อดูผลการย่อยสลายจาก HPLC พบว่าในชุดไร่เชื้อเมื่อดูจากฟิคในวันที่เริ่มต้นการทดลองเปรียบเทียบกับวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 32) ให้ผลคล้ายกันและเมื่อดูผลคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดไร่เชื้อสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคงเหลือถึง 77.73%, เอสเอสยังคงเหลือถึง 45.19%, ทึบเอสในช่วง 4 วันแรกมีค่าลดลงหลังจากนั้นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเกือบเท่าวันที่เริ่มต้นการทดลองและโซเดียมคลอไรด์มีปริมาณไม่คงที่

ในชุดทดลองเมื่อดูผลจาก HPLC เปรียบเทียบระหว่างวันที่เริ่มต้นการทดลองและวันที่ 7 ของการทดลอง (ภาพที่ 33) จะพบว่าในชุดทดลองนี้สามารถย่อยสลายสารได้ซึ่งดูได้จากการลดลงของฟิคในวันที่ 7 ของการทดลอง ซึ่งเหลือฟิคน้อยลงมากเมื่อเทียบกับวันที่เริ่มต้นการทดลอง แต่เมื่อดูผลจากคุณสมบัติทางเคมีพบว่าในชุดทดลองสามารถทำให้ปริมาณซีโอดียังคง

เหลือถึง 81.60%, เอสเอสเพิ่มขึ้น 56.44%, ทีดีเอส และโซเดียมคลอไรด์ไม่เปลี่ยนแปลง โดยถ้าดูผลจาก HPLC และเอสเอสในชุดทดลองนี้น่าจะบอกได้ว่าจุลินทรีย์ในสภาวะนี้มีการเจริญเติบโตได้ดี และน่าจะเกิดการย่อยสลายได้ดี แต่การย่อยสลายที่เกิดขึ้นอาจเปลี่ยนจากสารตั้งต้นไปเป็นสารตัวกลางอื่นๆ ทำให้ปริมาณซีโอไซด์ยังคงมีอยู่

6. การศึกษาความแตกต่างของการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนภายใต้สภาวะต่างๆ จากผลของ HPLC ในภาพที่ 34-I1 ที่แสดงถึงผลของการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนในสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชัน เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน จะพบว่าเมื่อนำผลการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่าการย่อยสลายยังไม่สมบูรณ์ ยังคงมีองค์ประกอบของสารเคมี อาจจะเป็นสีมัลลาไคน์กรีนหรือสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์หลงเหลืออยู่ ซึ่งอาจจะเป็น leuco malachite green ที่เป็นสารอนุพันธ์ของสีมัลลาไคน์กรีน ดังการรายงานของ เฮนเดอร์สัน และคณะ (Henderson et al., 1997) และชา และคณะ (Cha et al., 2001)

หลังจากนั้นจึงนำเฉพาะส่วนสีที่ยังคงมีสีมาศึกษาการย่อยสลายต่อในสภาวะอื่นๆ อีก 3 สภาวะคือ สภาวะดีไนตริฟิเคชัน, แอโรบิกและเมทาโนจีนิก แต่ในการศึกษาการย่อยสลายในขั้นที่ 2 นี้ ไม่สามารถจะเปรียบเทียบผลได้จากสีที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงนำผลของ HPLC มาเปรียบเทียบ (ภาพที่ 34 I2-4) พบว่าในแต่ละสภาวะให้ผลที่แตกต่างกันคือ ช่วงเวลาการเกิดฟีด ความกว้างและความสูงของพีคแตกต่างกัน อาจบอกได้ว่ากลไกการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในแต่ละสภาวะต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบผลของ HPLC ในขั้นที่ 2 ของการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนจะพบว่าสภาวะแอโรบิก น่าจะเกิดการย่อยสลายสารที่หลงเหลือมาจากขั้นตอนที่ 1 ได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ โอเนล และคณะ (O'Neill et al., 2000) ราจากูรู และคณะ (Rajaguru et al., 2000) และครุซ และบิวตรอน (Cruz & Bultron, 2001) ที่พบว่าในขั้นที่สองของการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนสามารถย่อยสลายสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่หนึ่งได้

และสอดคล้องกับค่าแอมซอพแบนซ์ที่ความยาวคลื่น 616.9 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ภาพที่ 35) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีมัลลาไคน์กรีน พบว่าในสภาวะแอโรบิกจะสามารถลดปริมาณสีมัลลาไคน์กรีนได้มากที่สุด (51.47%)

สรุปได้ว่า ในการศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะต่างๆ 4 สภาวะ เป็นเวลา 75 วัน พบว่าสภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันสามารถย่อยสลายสีได้ดีที่สุด หลังจากนั้นทำการศึกษาการย่อยสลายสีมัลลาไคน์กรีนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์อีกครั้ง ภายใต้สภาวะแอโรบิกดีไนตริฟิเคชันเป็นเวลา 7 วัน พบว่ายังคงมีส่วนสีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หลงเหลืออยู่ จึงนำส่วนสีมาย่อยสลายต่อที่สภาวะแอโรบิก พบว่าในขั้น

ต่อเนื่องนี้สามารถที่จะย่อยสลายสารตัวกลางที่เหลือได้ โดยสามารถวัดผลทางกายภาพได้จากค่า ซีไอคี่ที่ลดลง, การลดลงของสีที่ได้วัดได้จากค่าแอบซอพเพนซ์ที่ความยาวคลื่น 616.9 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และผลจาก HPLC ซึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมาของการย่อยสลายสีย้อมแบบต่อเนื่อง ส่วนใหญ่พบว่าในขั้นแรกจะทำการย่อยสลายภายใต้สถานะที่ไม่มีออกซิเจนและต่อด้วยสถานะที่มีออกซิเจน ดังเช่นรายงานของ โอเนล และคณะ (O'Neill et al., 2000) ราจากูรู และคณะ (Rajaguru et al., 2000) และครุซ และบิวตรอน (Cruz & Bultron, 2001) ซึ่งต่างจากผลการศึกษาในครั้งนี้ที่ทำการย่อยสลายสีในขั้นต้นด้วยสถานะแอโรบิกคี่ในตริฟิเคชั่นซึ่งเป็นสถานะใหม่ที่ยังไม่มีผู้ใดทำการศึกษากการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนภายใต้สถานะนี้ โดยในสถานะนี้มีข้อดี คือ เป็นสถานะที่ไม่ต้องดูแลระบบมากนัก เช่น ไม่ต้องทำให้ระบบอยู่ในสถานะไร้อากาศซึ่งเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก และไม่จำเป็นที่จะต้องเติมอากาศตลอดเวลา เนื่องจากในสถานะแอโรบิกคี่ในตริฟิเคชั่นสามารถใช้ออกซิเจนหรือไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนก็ได้ จึงสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบได้อีกประการหนึ่ง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษากลไกการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนโดยการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องแมสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อจะได้ทราบโครงสร้างของสารเมตาโบไลต์ที่เกิดขึ้น และทราบกลไกการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีน
2. ในการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสีย้อมด้วยตะกอนเร่ง ควรจะเพิ่มขั้นตอนการกำจัดสีด้วยวิธีทางกายภาพก่อน เช่น นำวัสดุเหลือใช้ที่สามารถดูดซับสีได้มาบำบัดในขั้นต้น เพื่อเป็นการลดระยะเวลาการย่อยสลายสีมาลาไคน์กรีนโดยตะกอนเร่ง