บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนจากแหล่งธรรมชาติ โดยการคัดแยกจุลินทรีย์จากแหล่งที่มีการปนเปื้อนด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ และนำจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้มาทำการคัดเลือกเพื่อหาจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ได้ดีที่สุด และนำจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้นั้นไปทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียในแบบเอสบีอาร์ ผลการศึกษาที่ได้สรุปได้ดังนี้

1. สามารถคัดแยกจุลินทรีย์จากแหล่งธรรมชาติที่มีการปนเปื้อนด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ อาทิ จากน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ภายในอาคารดองร่างอาจารย์ใหญ่ น้ำในบ่อพักน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ ดินบริเวณรอบบ่อพักน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจากน้ำเสียกรณีเกิดน้ำล้น และตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อน ได้ทั้งหมด 16 ไอโซเลท ที่มีลักษณะโคโลนีและการติดสีแกรมที่แตกต่างกัน โดยใช้อาหารในการคัดแยก 3 ชนิด คือ FM I medium FM II medium และ YM medium

2. เมื่อทดสอบความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงที่สุดโดยสังเกตการเจริญของจุลินทรีย์ทั้ง 16 ไอโซเลท บนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ พบว่า มีจุลินทรีย์ 7 ไอโซเลท คือ FMIc1 YMw6 YMg1 YMg3 YMg4 FMIs1 และ FMIs3 ที่สามารถเจริญได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อทดสอบที่มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหารสูงสุด 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร

3. เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 7 ไอโซเลทที่มีความสามารถเจริญได้บนอาหารเลี้ยงเชื้อทดสอบที่มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหาร 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร มาทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร และมีการเติมสารอาหารลงไปตามสูตรอาหาร FMII พบว่า สามารถคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดี 4 ไอโซเลท คือ YMg1 YMg3 YMg4 และ YMw6 และมีเพียงจุลินทรีย์ YMw6 เท่านั้นที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงกว่า 99% ในทุกการทดสอบที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4.0-6.5 ดังนั้น YMw6 จึงถูกคัดเลือกให้เป็นจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการทนต่อฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีและมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีที่สุด

4. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 พบว่า พีเอชเริ่มต้นที่อยู่ในช่วง 4.0-9.0 ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร อัตราเร็วในการเขย่าให้อากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 จะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสูงสุด 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียมีค่าเป็น 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร

5. การศึกษาปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญและการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า แหล่งไนโตรเจน และแหล่งเกลือ $MgSO_4$ ที่เติมลงไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการเจริญและประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสเฟตบัฟเฟอร์ KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 pH 6.5 ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในเชื้อจุลินทรีย์ YMw6

6. การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ของเชื้อจุลินทรีย์ YMw6 ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์มีระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมเท่ากับ 18 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่จุลินทรีย์ YMw6 มีการเจริญเพิ่มขึ้นและสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบให้ลดลงได้เกินกว่า 99% นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดปริมาณซีโอดีและลดความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียลงได้กว่า 50% ที่เวลาในการกักเก็บ 18 ชั่วโมง

7. เมื่อทดสอบการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ในลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องจำนวน 2 รอบ การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีในการเดินระบบรอบแรก แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงในการเดินระบบรอบที่สอง ขณะที่ความสามารถในการบำบัดปริมาณซีโอดีในระบบยังคงให้ผลในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แม้คุณภาพของสีของน้ำจะจางลง แต่ความขุ่นของน้ำภายหลังการบำบัดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องปรับปรุงต่อไป

8. การนำตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลพุทธชินราชมาประยุกต์ใช้ร่วมกับจุลินทรีย์ YMw6 ที่คัดเลือกได้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้นจนสามารถมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ถึง 99.99% ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ภายในเวลา 18 ชั่วโมง และสามารถบำบัดความเข้มข้นของซีโอดีในระบบลงได้มากกว่า 98% แต่เรื่องของสีและความขุ่นของน้ำที่ได้ภายหลังการบำบัดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องปรับปรุงต่อไป

อภิปรายผล

1. การคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนจากแหล่งธรรมชาติ

การคัดแยกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่สามารถใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานในการเจริญจากบริเวณที่มีการปนเปื้อนด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ ได้แก่ น้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ น้ำในบ่อพักน้ำเสีย ดินบริเวณรอบบ่อพักน้ำเสียอาคารดองร่างอาจารย์ใหญ่ และตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อน โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ 3 ชนิด ซึ่งมีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหาร 150 มิลลิกรัม/ลิตร คือ formaldehyde enrichment medium (FMI) modified formaldehyde enrichment medium (FMII) และ YM medium ผลการคัดแยกที่ได้สามารถแยกเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด 16 ไอโซเลท ที่มีลักษณะโคโลนีแตกต่างกัน โดยแยกได้จากตัวอย่างน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ 2 ไอโซเลท คือ FMIc1และ YMc2 จากตัวอย่างน้ำในบ่อพักน้ำเสีย 6 ไอโซเลท คือ FMIIw1 FMIIw2 YMw3 YMw4 YMw5 และ YMw6 จากตัวอย่างดินบริเวณรอบบ่อพักน้ำเสีย 4 ไอโซเลท คือ YMg1 YMg2 YMg3 และ YMg4 และจากตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม 4 ไอโซเลท คือ FMIs1 FMIs2 YMs3 และ YMs4 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในตัวอย่างน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่มีความหลากหลายของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สามารถใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้น้อยที่สุด เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบที่สูงมาก ซึ่งจากผลการเก็บตัวอย่างน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ภายในบ่อที่อยู่ระหว่างกระบวนการดองเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำยาดอง (ไม่แสดงผลการทดลอง)พบว่ามีความความเข้มข้นที่มากกว่า 1,200 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงนี้จะมีผลไปยับยั้งการเจริญและการทำงานของจุลินทรีย์ (Grafstrom, et al., 1983) ที่ไม่สามารถเปลี่ยนฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีความเป็นพิษให้อยู่ในรูปอื่นซึ่งมีความเป็นพิษที่น้อยลงได้ ทำให้พบจุลินทรีย์ที่สามารถอยู่รอดและเจริญอยู่ในสภาวะนี้ได้น้อย ขณะที่น้ำเสียในบ่อพักน้ำเสีย ดินบริเวณรอบบ่อพักน้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมมีความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่มากกว่า เนื่องจากน้ำเสียที่ถูกปล่อยลงสู่บ่อพักน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการดองมีค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ลดต่ำลงอย่างมากเนื่องจากกระบวนการ oxidation ของฟอร์มาลดีไฮด์กับอากาศที่เกิดขึ้นเองได้ในระหว่างกระบวนการดอง อีกทั้งยังถูกเจือจางโดยน้ำที่อยู่ภายในบ่อพัก และอาจถูกเจือจางได้อีกโดยน้ำฝน นอกจากนี้จากการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีในน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนดองพบว่ามีค่าซีโอดีเพิ่มสูงขึ้นมาก อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์ภายใน

ร่างอาจารย์ใหญ่เกิดการซึมออกจากร่างมาปนเปื้อนกับน้ำยาดองในระหว่างกระบวนการดอง ทำให้มีความหลากหลายในแหล่งคาร์บอนที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Mirdamadi, et al. (2005) ที่ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ 2 ชนิดในการคัดแยกเชื้อจากตัวอย่างดินและน้ำเสียจากโรงงานผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถแยกเชื้อได้เพียง 19 ไอโซเลท นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัยในก่อนหน้าที่มีรายงานการคัดแยกจุลินทรีย์ที่สามารถใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นคาร์บอน 1 อะตอมเป็นแหล่งคาร์บอนได้ในการเจริญได้ อาทิ จุลินทรีย์ในกลุ่มของ methylotroph เช่น *Methylobacterium* sp. MF1 (Mitsui, et al., 2005) *Methyloversatilis universalis* (Kalyuzhnaya, et al., 2006) และ *Bacillus methanolicus* (Arfman, et al., 1992) เป็นต้น

2. การคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงที่สุด

จุลินทรีย์ทั้ง 16 ไอโซเลทที่คัดแยกได้ เมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงที่สุดโดยวิธี simple streak plate technique ลงบนอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการคัดแยกเชื้อ พบว่ามีจุลินทรีย์ 7 ไอโซเลทที่สามารถเจริญได้บนอาหารที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอนเข้มข้นในอาหาร 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร คือ FMlc1 YMw6 YMg1 YMg3 YMg4 FMls1 และ YMs3 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ทั้ง 7 ไอโซเลท นอกจากจะสามารถใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อในการเจริญได้แล้ว ยังมีความสามารถในการทนต่อฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่อยู่ในระดับที่มีความเป็นพิษสูงได้ดีอีกด้วย โดยในการศึกษาก่อนหน้านี้ นอกจากจะมีการคัดแยกจุลินทรีย์ในกลุ่มของ methylotroph แล้ว ยังเคยมีรายงานการคัดแยกกลุ่มของ formaldehyde resistant strains ที่สามารถเจริญและทนต่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในระดับสูงๆ ได้ เช่น *Escherichia coli* (Kaulfers and Marquardt, 1991) *Serratia marcescens* (Kaulfers and Laufs, 1985) *Halomonas* sp. (Azachi, et al., 1995) และ *Pseudomonas putida* (Kato, et al., 1984)

3. การคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่ดีที่สุด

เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง 7 ไอโซเลทที่คัดเลือกได้มาทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 6.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร และให้ผลการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อเวลาผ่านไป 36 ชั่วโมง ดังนี้ มีจุลินทรีย์ 4 ใน 7 ไอโซเลท คือ YMg1 YMg3 YMg4 และ YMw6 ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียได้สูงกว่า 90%

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลท มีกลไกหรือวิถีเมทาบอลิซึมที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ oxidation และกระบวนการ fixation หรือ assimilation ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ (Yurimoto, et al., 2005) ทำให้สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียได้ดี นอกจากนี้จากผลการทดสอบที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการศึกษาซึ่งเคยมีรายงานในก่อนหน้านี้ พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลทที่ปรากฏ มีประสิทธิในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่สูงกว่าเชื้อ *Pseudomonas putida Trichosporon penicillatum* และ *Pseudomonas cepacia* ที่สามารถย่อยสลายน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ภายในเวลา 30 36 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ (Glancer-soljan, et al., 2001) *Pseudomonas putida* A2 ที่สามารถย่อยสลายน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในความเข้มข้น 400 มิลลิกรัม/ลิตร (Adroer, et al., 1990) และ *Halomonas* sp. MA-C ที่สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร (Azachi, et al., 1995)

และจากผลการติดตามค่าพีเอชของระบบพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเริ่มต้นของระบบจาก 6.5 เป็น 4.5 ในเวลาที่รวดเร็วมากภายใน 30 นาที ซึ่งการศึกษาพบว่าค่าพีเอชที่ลดต่ำลงนั้นมีความสัมพันธ์กันกับค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ลดลง แต่เมื่อค่าพีเอชลดต่ำลงประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์กลับมีค่าลดต่ำลงไปด้วย สาเหตุเนื่องจาก ในวิถีเมทาบอลิซึมที่ใช้ในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์เริ่มต้นจากการเปลี่ยนฟอร์มาลดีไฮด์ให้กลายเป็นกรดฟอร์มิกโดยใช้เอนไซม์ formaldehyde dehydrogenase แล้วจึงเปลี่ยนกรดฟอร์มิกให้ กลายเป็นมวลชีวภาพหรือคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป (Crowther, et al., 2008) ซึ่งกรดฟอร์มิกที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการย่อยสลายนั้นจะมีผลทำให้ค่า พีเอชในระบบมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเมทาบอลิซึมภายในเซลล์จุลินทรีย์ (Lay, 2000) โดยเฉพาะกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ Formaldehyde dehydrogenase ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีในช่วงพีเอช 7.5-9.0 (Schutte, et al., 1976) ดังนั้นเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงพีเอชต่ำๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงนำจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลทซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีมาทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่างๆกัน โดยการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นและควบคุมค่าพีเอชในน้ำเสียให้มีค่าพีเอชตั้งแต่ 4.0 ถึง 6.5 ผลที่ได้ปรากฏว่าเชื้อจุลินทรีย์ YMw6 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงกว่า 99% ในทุกค่าพีเอชที่ใช้ทดสอบ แสดงให้

เห็นว่าไอโซเลท YMw6 เป็นจุลินทรีย์ที่มีช่วงการทำงานที่เหมาะสมของเอนไซม์ Formaldehyde dehydrogenase ที่กว้างกว่าจุลินทรีย์ตัวอื่นๆที่ทดสอบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดจริง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีในช่วงพีเอชที่กว้าง ทำให้ง่ายต่อการควบคุมค่าพีเอชในระบบ อีกทั้งจากการศึกษาส่วนผสมของน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ก่อนหน้านี้ยังพบว่ามีสารหนูซึ่งถูกนำมาใช้เป็นสารต่อต้านจุลินทรีย์เป็นส่วนประกอบอยู่ในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่อีกด้วย นั่นหมายถึงจุลินทรีย์ YMw6 ที่คัดเลือกได้นั้นนอกจากจะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในเรื่องของประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ซึ่งมีความเข้มข้นสูงได้ในช่วงพีเอชที่กว้างแล้ว ยังเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถทนต่อความเป็นพิษจากสารต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบภายในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ได้ดีอีกด้วย

4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ พบว่าค่าพีเอชในระบบที่อยู่ในช่วง 4.0-9.0 ไม่มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 อาจเนื่องจากจุลินทรีย์ YMw6 มีช่วงการทำงานของเอนไซม์ Formaldehyde dehydrogenase ที่กว้าง ดังที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้าในการอภิปรายผลการคัดเลือกสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่ดีที่สุด แต่จากการศึกษาอัตราเร็วในการเขย่าให้อากาศที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์ YMw6 พบว่าอัตราเร็วในการเขย่าให้อากาศที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ขณะที่ให้ผลการติดตามการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในลักษณะคงที่ ซึ่งจากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณอากาศที่เชื้อจุลินทรีย์ได้รับจากการเขย่านั้น ส่งผลกระทบต่อวิถีเมทาบอลิซึมที่จุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการทดสอบของ Costa, et al. (2001) ที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อปฏิกิริยาการเกิด methanol oxidation ในเชื้อกลุ่ม Obligate methanotrophic bacteria ที่ต้องใช้สารคาร์บอน 1 อะตอมในการเจริญเพียงอย่างเดียว ที่พบว่าปริมาณออกซิเจนที่ลดลงมีผลต่อการเปลี่ยนเมทานอลให้เป็นฟอร์มาลดีไฮด์และกรดฟอร์มิกที่ช้าลง นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ได้จากการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์และค่าพีเอชในระบบลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ ที่เป็นผลมาจากเมทาบอลิซึมที่จุลินทรีย์ใช้ในการลดความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีในระบบ ให้กลายเป็นสารตัวกลางตัวอื่น

เช่น กรดฟอร์มิกที่มีความเป็นพิษน้อยลดแต่มีค่าความเป็นกรดสูง และผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางชีวเคมีเบื้องต้นของเชื้อจุลินทรีย์ YMw6 นั้นพบว่า เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนเท่านั้นและสามารถสร้างเอนไซม์ Oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบได้ในจุลินทรีย์กลุ่ม Aerobic bacteria ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบขนส่งอิเล็คตรอนบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ และสามารถสร้างเอนไซม์ Catalase ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลาย H_2O_2 ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหายใจของเซลล์ในสภาวะที่มีอากาศได้อีกด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในก่อนหน้านี้นั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 มีความสัมพันธ์กันกับอัตราเร็วในการเขย่าให้อากาศ โดยอัตราเร็วในการเขย่าให้อากาศที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

และจากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์โดยจุลินทรีย์ YMw6 พบว่า จุลินทรีย์ YMw6 สามารถมีประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงกว่า 98% ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสูงสุด 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร และจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ลดลงเมื่อมีความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียเป็น 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ที่คัดเลือกได้นั้นเป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มของ Formaldehyde resistant bacteria ที่มีความสามารถในการทนต่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงถึง 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร และยังสามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นดังกล่าวได้สูงกว่า 98% ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อนำผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 ที่ได้ไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์กับเชื้อจุลินทรีย์อื่นๆ ที่ถูกทำการศึกษาก่อนหน้า อาทิ เชื้อ *Pseudomonas putida Trichosporon penicillatum* และ *Pseudomonas cepacia* ที่สามารถย่อยสลายน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ภายในเวลา 30 36 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ (Glancer-soljan, et al., 2001) *Hansenula polymorpha* ซึ่งเป็นเชื้อในกลุ่ม methylotrophic yeast ที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบที่ความเข้มข้น 1,725 มิลลิกรัม/ลิตร ในช่วงเวลาของการทดสอบ 24 ชั่วโมง หรือแม้แต่ *H.polymorpha* สายพันธุ์กลาย ที่มีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายอยู่ที่ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตร (Kaszycki, et al., 2001) พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ สายพันธุ์ YMw6 ล้วนแต่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าจุลินทรีย์เหล่านั้นทั้งหมด

5. การศึกษาสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญและการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์สายพันธุ์ที่คัดเลือก

จากการศึกษาปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญและการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารอาหารจากที่เป็นส่วนประกอบในสูตรอาหาร FMI ที่มี $(NH_4)_2SO_4$ เป็นแหล่งไนโตรเจน Yeast extract เป็นแหล่งไนโตรเจนและวิตามิน $MgSO_4$ เป็นแหล่งของเกลือ และมี KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 เป็นแหล่งไนโตรเจนและบัฟเฟอร์ โดยมีฟอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ภายในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีค่า C:N:P ในสูตรอาหารประมาณ 100:58:44 ผลที่ได้พบว่าทั้งชุดการทดสอบแหล่งไนโตรเจนที่เปรียบเทียบแหล่งไนโตรเจนระหว่าง $(NH_4)_2SO_4$ และ Yeast extract กับชุดควบคุมที่มีการเติมอาหารลงไปตามสูตรอาหาร FMI และเติมอาหารลงไปตามสูตรอาหาร FMI แต่ขาดแหล่งไนโตรเจน และชุดทดสอบแหล่งเกลือ $MgSO_4$ ที่เปรียบเทียบระหว่างชุดการทดสอบควบคุมที่มีการเติมอาหารลงไปตามสูตรอาหาร FMIและเติมอาหารลงไปตามสูตรอาหาร FMI แต่ขาด $MgSO_4$ ให้ผลของการเจริญและประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ YMw6 ที่ไม่แตกต่างกันในทุกชุดการทดสอบ ขณะที่การทดสอบแหล่งไนโตรเจนและปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตบัฟเฟอร์ KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 พีเอช 6.5 ที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดทดสอบที่เติม KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 ลงไปให้มีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น กับชุดทดสอบที่เติม KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 ลงไปตามสูตรอาหาร FMI และไม่เติมลงไป มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ สาเหตุอาจเนื่องจากในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่นั้นมีปริมาณของแหล่งไนโตรเจนที่เพียงพอต่อการเจริญของจุลินทรีย์อยู่แล้ว จึงทำให้ผลการทดสอบที่ออกมามีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้จากผลการศึกษาองค์ประกอบน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ที่ได้ทำการศึกษาภายใต้ทุนวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553 นั้นให้ผลที่สอดคล้องกันเนื่องจากพบว่า องค์ประกอบของน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่นั้นมีค่าของปริมาณไนโตรเจนในรูป TKN ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูงถึง 43.03 กรัม/ลิตร ซึ่งเมื่อนำมาเทียบอัตราส่วน C:N ratio ระหว่างค่าซีโอดีซึ่งสามารถตรวจพบในปริมาณที่สูงที่สุดถึง 8,929 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่นั้นมีค่า C:N ratio เท่ากับ 100:482 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มากเกินพอกับอัตราส่วน C:N ratio ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้อากาศที่มีค่าเท่ากับ 100:5 (Ammary, 2004) ขณะที่ผลการศึกษาปริมาณฟอสเฟตและความเข้มข้นของฟอสเฟตบัฟเฟอร์

KH_2PO_4 และ K_2HPO_4 พีเอช 6.5 ที่เหมาะสมต่อการเจริญและการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ในความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่เท่ากับ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าปริมาณบัฟเฟอร์ที่เติมลงไปในความเข้มข้นที่ต่างกันให้ผลของประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่แตกต่างกันในช่วง 3 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ แต่ไม่ต่างกันเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นที่เวลา 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าบัฟเฟอร์ไม่มีความจำเป็นต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในเชื้อ YMw6 นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ที่ให้ผลประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีในค่าพีเอชที่ใช้ทดสอบในช่วง 4.0-9.0 ขณะที่การเติมบัฟเฟอร์ในปริมาณที่เข้มข้นขึ้นกลับมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมบัฟเฟอร์ในปริมาณที่เข้มข้นขึ้นจะช่วยต้านความเป็นกรดอันเนื่องจากกรดฟอร์มิกที่ถูกผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ จึงทำให้สามารถรักษาระดับพีเอชในระบบไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ดีกว่าการทดสอบที่มีบัฟเฟอร์ในปริมาณที่น้อยกว่าหรือปราศจากบัฟเฟอร์ ผลที่ได้ทำให้กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการเจริญ เช่น เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างกรดอะมิโนต่างๆ ซึ่งสามารถทำงานได้เหมาะสมในช่วงพีเอช 6.0-8.0 (Gale และ Epps,1942) สามารถดำเนินต่อไปได้อย่างเป็นปกติ ดังนั้นหากคำนวณค่า C:N:P ที่เหมาะสมต่อการเจริญและการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์จากค่าซีโอดี ปริมาณไนโตรเจนในรูปแบบ TKN ที่ได้จากการวิเคราะห์ในก่อนหน้าและปริมาณฟอสเฟตที่เติมลงไปจะทำให้มีค่า C:N:P ที่ได้จากการคำนวณเป็น 100:482:28

6. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ของจุลินทรีย์ YMw6 ที่คัดเลือกได้ ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเท่ากับ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีการเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 6.5 ลงในน้ำเสียในความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 5 เท่า และเดินระบบโดยให้อากาศผ่านหัวกระจายก๊าซที่อยู่บริเวณด้านล่างถังบำบัดอย่างเต็มที่เพื่อให้จุลินทรีย์ได้รับอากาศอย่างทั่วถึง ผลการทดสอบที่ได้สามารถลดระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ระบบลงได้อย่างต่อเนื่องใน 18 ชั่วโมงของการเดินระบบ โดยให้ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เวลา 18 ชั่วโมง ได้มากกว่า 99% และคงที่เมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่เวลา 18 ชั่วโมงของการเดินระบบ คือระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการบำบัด

ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ของจุลินทรีย์ YMw6 ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ จากนั้นเมื่อทำการทดสอบการบำบัดโดยการเดินระบบบำบัดอย่างต่อเนื่องจำนวน 2 รอบ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ของจุลินทรีย์ที่ได้ในการบำบัดรอบแรก ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดเพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสม โดยสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียได้สูงกว่า 99% ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในระบบ 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ในเวลากักเก็บ 18 ชั่วโมง ขณะที่การเดินระบบในรอบสอง ถึงแม้จะมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในระบบลดลงเป็น 1,700 มิลลิกรัม/ลิตร แต่กลับมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงจากเดิมโดยสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบได้เพียง 84% ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของระบบเมื่อครบเวลากักเก็บที่กำหนดไว้ ระบบจะหยุดทำงานเป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบและเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำส่วนใสกับตะกอนจุลินทรีย์ ก่อนจะทำการปล่อยน้ำส่วนใสที่ปราศจากตะกอนจุลินทรีย์ออกไปในปริมาตร 40 ลิตร แล้วจึงเข้าสู่การบำบัดน้ำเสียในรอบใหม่โดยการปล่อยน้ำเสียใหม่เข้ามาทดแทนน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยออกไป ก่อนจะทำการเดินระบบใหม่อีกครั้ง ซึ่งจากการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนของจุลินทรีย์โดยการทดสอบปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ใน 30 นาที พบว่าไม่มีการตกตะกอนของจุลินทรีย์ จึงทำให้ไม่สามารถแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในระหว่างที่ระบบหยุดการทำงานเพื่อให้เกิดการตกตะกอนได้ ดังนั้นเมื่อระบบทำการปล่อยน้ำเสียรอบใหม่เข้าไปในระบบ นอกจากจะทำให้ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในระบบมีค่าลดลงจากความเข้มข้น 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 1,700 มิลลิกรัม/ลิตร แล้ว ยังทำให้จุลินทรีย์ในระบบมีปริมาณที่ลดลงไปจากเดิม 3 เท่า ด้วยเช่นกัน จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงเมื่อครบเวลากักเก็บที่ 18 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ของจุลินทรีย์ YMw6 โดยระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ที่ได้ ถือได้ว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงกว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคยมีรายงานในก่อนหน้าโดย กมลชนก แสงสว่าง และชลอ จารุสุทธิรักษ์ (2009) ที่สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น1,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ในรูปแบบการทดสอบแบบแบทช์ได้ 99.6% ที่เวลากักเก็บ 24 ชั่วโมง หรือมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียที่สูงกว่าระบบบำบัดแบบ anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่อยู่ในช่วงของความเข้มข้นเพียง 31.6 ถึง 1,104.4 มิลลิกรัม/ลิตร ได้ 99%

ในเวลา 8 ชั่วโมง (Pereira และ Zaiat, 2009) และหากพิจารณาถึงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียของจุลินทรีย์ YMw6 ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ที่สามารถบำบัดซีโอดีซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงมากจาก 7,337 มิลลิกรัม/ลิตร ให้เหลือเพียง 3,289 มิลลิกรัม/ลิตร ในเวลา 18 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการย่อยสลายได้ถึง 55.17% นั้น ให้ผลของประสิทธิภาพการบำบัด ซีโอดีที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ *Acinetobacter Bacillus* และ *Pseudomonas* ในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทั้งในเรื่องของปริมาณซีโอดีที่สามารถบำบัดได้และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ที่สามารถบำบัดซีโอดีเริ่มต้นในน้ำเสีย 1,038 มิลลิกรัม/ลิตร ลงได้ในช่วง 42.00-55.89% ในเวลา 14 วัน (Olukanni, et al., 2006) นอกจากนี้จากผลการติดตามปริมาณสารหนูซึ่งจัดเป็นสารโลหะหนักที่มีความเป็นพิษและพบการปนเปื้อนอยู่ในน้ำยาดองร่างอาจารย์ใหญ่ทั้งก่อนการบำบัดและหลังเสร็จสิ้นการบำบัด โดยในน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดจะถูกนำไปปั่นแยกเซลล์จุลินทรีย์ในน้ำออกก่อน ก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูคงเหลือ โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ AAS ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทุกรูปแบบ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบปนเปื้อนในน้ำทิ้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัด มีปริมาณที่ลดลงมากกว่า 50% แต่ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการตรวจวัดปริมาณของสารหนูภายในตะกอนเซลล์จุลินทรีย์ที่ถูกปั่นแยกออกไป ดังนั้นปริมาณสารหนูที่ลดลงนั้น จึงอาจเกิดขึ้นได้จากการที่จุลินทรีย์สามารถดูดซับหรือจับกับสารหนูได้ ทำให้เมื่อทำการปั่นแยกเซลล์ออก สารหนูที่ถูกจับโดยจุลินทรีย์จึงติดมากับเซลล์ด้วย หรืออาจเกิดขึ้นจากการที่สารหนูทำปฏิกิริยากับสารอื่นและเปลี่ยนรูปแบบไปและเกิดเป็นตะกอนขึ้น จึงทำให้เมื่อนำทำการปั่นแยกเซลล์ออก ตะกอนเหล่านั้นจึงถูกแยกออกมาด้วย ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการ coagulation-flocculation ซึ่งจะเป็นการเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก อาทิ aluminium sulfate ($Al_2(SO_4)_3$) ferric chloride ($FeCl_3$) หรือ ferric sulfate ($Fe_2(SO_4)_3$) มาจับกับสารหนูที่ปนเปื้อนและทำให้เกิดการตกตะกอน ก่อนทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือกรองเพื่อแยกออก (Cheng, et al., 1994; Sancha, 2006) แต่เนื่องจากการศึกษาส่วนประกอบของน้ำยาดองร่างอาจารย์ที่ใช้ในระหว่างการบำบัด ไม่มีส่วนประกอบของสารที่ช่วยให้เกิดการตกตะกอนเหล่านี้ได้จึงมีความเป็นไปได้ที่ว่าจุลินทรีย์ YMw6 ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ภายในระบบได้ จากการศึกษาที่มีการรายงานในก่อนหน้าพบว่า มีจุลินทรีย์อยู่หลายสายพันธุ์ที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อการกำจัดสารหนูในน้ำ โดยเริ่มต้นจากการรายงานวิธีเมทาบอลิซึมซึ่งพบในการใช้เพื่อในการกำจัดสารหนูโดย Green (1918) และสามารถแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Bacterium arenreducens* ที่สามารถรีดิวซ์

arsenate (AsO_4^{3-}) และ *B. arsenoxydans* ที่สามารถออกซิไดซ์ arsenite (AsO_3^{3-}) จากนั้นจึงมีรายงานการค้นพบจุลินทรีย์อื่นๆ ในกลุ่ม arsenite-oxidizing bacteria ตามแหล่งต่างๆ ที่มีการปนเปื้อนด้วยสารหนูอีกมากมาย อาทิ *Agrobacterium Alcaligenes Pseudomonas Sulfolobus Ochrobactrum* และ *Zoogloea* (Wang, 2004) นอกจากนี้ยังมีการนำจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่างๆมาใช้ในการศึกษาเพื่อกำจัดสารหนู อาทิเช่น การนำ *Lactobacillus acidophilus* มาใช้ในการกำจัดสารหนูในรูป As(III) ที่ปนเปื้อนในน้ำ ที่สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำลงได้จาก 2,000 ไมโครกรัม/ลิตร ให้เหลือ 600 ไมโครกรัม/ลิตร ในเวลา 3 ชั่วโมง (Singh and Sarma, 2010) *Aspergillus niger* ที่สามารถกำจัดสารหนูในรูป As(V) ได้ 95% และ As(III) ได้ 75%

แต่จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำทิ้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดทั้งเรื่องของสี และความขุ่นของน้ำจากการสังเกตด้วยสายตา แม้จะพบว่าน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดมีสีของน้ำที่จางลงจากสีของน้ำเสียก่อนการบำบัด แต่กลับมีความขุ่นของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากการเจริญของจุลินทรีย์ในระบบ จากผลการทดสอบทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ถึงแม้ YMw6 ที่นำมาใช้ในการบำบัดจะสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ให้อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีที่ปนเปื้อนปริมาณที่สูงในน้ำได้ในระดับหนึ่ง สามารถกำจัดสารหนูซึ่งมีความเป็นพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนี้ได้ อีกทั้งยังสามารถบำบัดสีในน้ำเสียให้จางลงได้ แต่ในเรื่องของความขุ่นของน้ำทิ้งภายหลังเสร็จสิ้นการบำบัดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ควรจะต้องมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถยอมรับได้ต่อไป โดยอาจประยุกต์ใช้เอาเทคโนโลยีการตรึงเซลล์ที่จะช่วยจำกัดพื้นที่ของจุลินทรีย์ให้อยู่ในวัสดุที่ใช้ตรึง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดความขุ่นของน้ำเสียที่เกิดจากเซลล์ของจุลินทรีย์ได้แล้ว ยังสามารถช่วยป้องกันเซลล์จากความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์และสารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำได้อีกด้วย อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ในการบำบัดซ้ำได้อีก หรืออาจนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้โดยทั่วไปในโรงบำบัดน้ำเสียเพื่อให้จุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้นี้ สามารถเจริญและอยู่ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์เหล่านั้นได้ ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้นและสามารถตกตะกอนมาพร้อมกับตะกอนจุลินทรีย์เหล่านั้น หรืออาจทำการบำบัดน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเพื่อกำจัดสารจุลินทรีย์แขวนลอยเหล่านั้น อีกครั้งด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การใช้คลอรีน เป็นต้น

7. การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ที่คัดเลือกในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ในระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลพุทธชินราช

เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำให้มีค่าความขุ่นของน้ำเสียภายหลังเสร็จสิ้นการบำบัดที่ลดลง ผู้วิจัยจึงได้เลือกเอาวิธีการนำตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียมาทดสอบการนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นวิธีการทางชีวภาพที่ไม่ต้องมีการใช้สารเคมี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายโดยไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งผลจากการนำจุลินทรีย์ YMw6 ที่คัดเลือกได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลพุทธชินราชโดยใช้ระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ในชุดการทดสอบที่มีจุลินทรีย์ YMw6 และตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดโรงพยาบาลพุทธชินราชอยู่ในระบบสามารถมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นจากชุดการทดสอบที่มีการใช้จุลินทรีย์ YMw6 หรือตะกอนจุลินทรีย์จากโรงพยาบาลพุทธชินราชในระบบบำบัดเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาในการกักเก็บผ่านไป 6 ชั่วโมง นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการบำบัดที่ระยะเวลาในการกักเก็บ 18 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้นเป็น 99.99% หรือสามารถบำบัดความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดให้สามารถระบายลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ผลการติดตามปริมาณซีโอดีในระบบที่เปลี่ยนแปลงไปยังพบว่าสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีในระบบให้มีค่าเหลือเพียง 86 มิลลิกรัม/ลิตร เท่านั้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่สามารถระบายลงสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร ได้ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในชุดการทดสอบที่ใช้จุลินทรีย์ YMw6 หรือตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ YMw6 ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลพุทธชินราชสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีให้ดีขึ้นอย่างชัดเจนในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากการมีจุลินทรีย์ YMw6 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่อาจมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์อื่นๆ ในระบบได้ดีและสามารถลดปริมาณความเข้มของฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบลงได้อย่างรวดเร็ว ทำให้จุลินทรีย์อื่นๆ ภายในตะกอนจุลินทรีย์ สามารถทำงานและลดปริมาณซีโอดีส่วนอื่นๆ ที่สามารถย่อยสลายลงได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ปริมาณซีโอดีในระบบมีการลดลงได้เร็วและมากกว่าในชุดการทดสอบอื่นๆ ที่มีจุลินทรีย์ YMw6 หรือตะกอน

จุลินทรีย์ในระบบเพียงอย่างเดียว ส่วนผลของการนำตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ไปศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนก่อนและหลังการบำบัดโดยการหา SVI ของทั้ง 2 ชุดการทดสอบ พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงจากประสิทธิภาพการตกตะกอนในระดับพอใช้เป็นระดับใช้ได้ แสดงให้เห็นว่าตะกอนจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ดีขึ้น สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลพุทธชินราชก่อนการบำบัดที่มีค่า SVI อยู่ในระดับพอใช้นั้น อาจเกิดจากสาเหตุของตะกอนไม่จมตัว (Bulking sludge) ที่เกิดขึ้นจากการเจริญที่มากเกินไปของแบคทีเรียเส้นสายในกลุ่ม filamentous bacteria ที่ทำให้ตะกอนลอยน้ำได้ดี ไม่จับตัวกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนได้ยากขึ้น (Filamentous bulking) หรือเกิดขึ้นจากการสร้างสารพวก Extracellular polysaccharide ซึ่งมีลักษณะเป็นเมือกลื่น (Slime) ในปริมาณที่มากเกินไปอันเนื่องจากการเจริญที่มากเกินของจุลินทรีย์ *Zoogloea ramigera* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่ในการสร้างเมือกเพื่อให้เกิดฟล็อก ส่งผลให้ฟล็อกมีลักษณะเป็นเมือก มีน้ำหนักเบา และตกตะกอนได้น้อยลง (Polysaccharide bulking/ Zoogloea bulking) (Richard, 2003) แต่จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำตะกอนจุลินทรีย์ในโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาล พุทธชินราชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ พบว่าตะกอนจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า อาจมีปัจจัยบางอย่างในระบบที่สามารถทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้ลดจำนวนลงหรือเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Ong, et al. (2006) พบว่าปริมาณความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่ไหลเข้าในระบบที่มากกว่า 75 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถควบคุมการก่อตัวของจุลินทรีย์ในกลุ่ม filamentous bacteria บน biofilm และนำไปสู่การสร้าง biofilm ที่เพิ่มขึ้น และการศึกษาของ Parker, et al. (1996) ที่ได้ทำการสกัดโครงสร้างในส่วนของ capsule จากเชื้อ *Microcystis flos-aquae* C3-40 ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Cyanobacterium เพื่อศึกษาผลกระทบของพีเอชที่มีผลต่อความหนืดของโครงสร้าง capsule ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มี polysaccharride ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเมือกและช่วยในการเกิดฟล็อกเป็นองค์ประกอบ ยังพบว่า ที่พีเอช 4.0 capsule จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมากกว่าที่พีเอช 6.0-11.0 ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวในข้างต้น จึงสอดคล้องกันกับผลการทดลองที่ได้เนื่องจาก น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่นั้นมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในระบบที่สูงถึง 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร จึงมีผลไปยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่ม filamentous bacteria ที่เป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาตะกอนไม่จมตัว หรือผลกระทบจากค่าพีเอชในระบบที่ลดลงอย่างรวดเร็วจากการเกิดการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ ไปมีผลทำให้ polysaccharride ที่เชื้อสร้างขึ้นเกิดความหนืดและเกาะตัวกัน

แน่นยิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนของจุลินทรีย์ที่ได้ภายหลังการบำบัดมีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากประสิทธิภาพการตกตะกอนก่อนการบำบัด นอกจากนี้จากผลการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียทั้งในเรื่องของสีและความขุ่นก่อนและหลังกระบวนการบำบัดระหว่างชุดการทดสอบทั้ง 2 ชุด พบว่าให้ผลคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดที่มีสีและความขุ่นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยในชุดการทดสอบที่มีการเติมเชื้อ YMw6 ลงไปนั้นมีสีที่เข้มกว่าและความขุ่นของน้ำที่มากกว่าชุดการทดสอบควบคุมที่ไม่มีการเติมเชื้อ YMw6 ลงไป ซึ่งให้ผลในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบที่มีเชื้อจุลินทรีย์ YMw6 ในระบบเพียงอย่างเดียว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแม้การนำเอาตะกอนจุลินทรีย์ในโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาลพุทธชินราชจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองร่างอาจารย์ใหญ่ได้มากขึ้น แต่ก็ไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของจุลินทรีย์ YMw6 ที่เติมลงไปให้ดียิ่งขึ้นได้ แต่การทดสอบในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการบำบัดเพียงรอบเดียว ซึ่งหากมีการทำการบำบัดในรอบต่อไป โดยใช้ตะกอนของจุลินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนที่ก้นถังได้ก่อนปล่อยน้ำทิ้งภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการบำบัดออก และทำการปล่อยน้ำเสียรอบให้เข้ามาแทนที่ อาจทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของตะกอนจุลินทรีย์ที่เหลือในระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากเกิดการเข้าไปอาศัยอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์สายพันธุ์ YMw6 ที่เติมลงไปในการทดสอบการบำบัดในรอบแรก