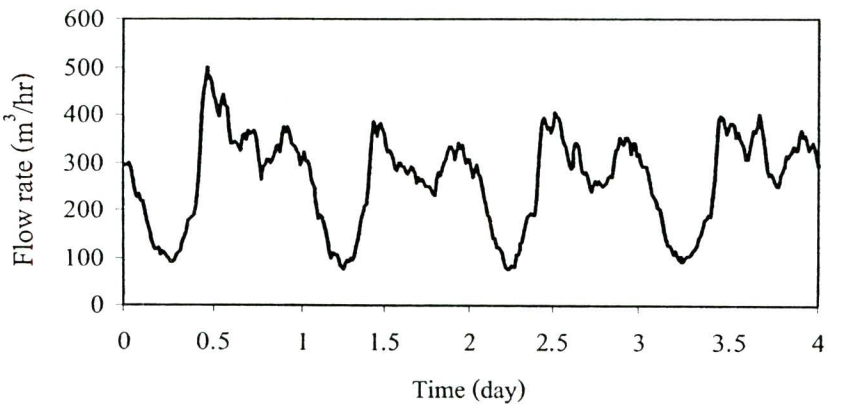
บทที่ 1
บทนำ

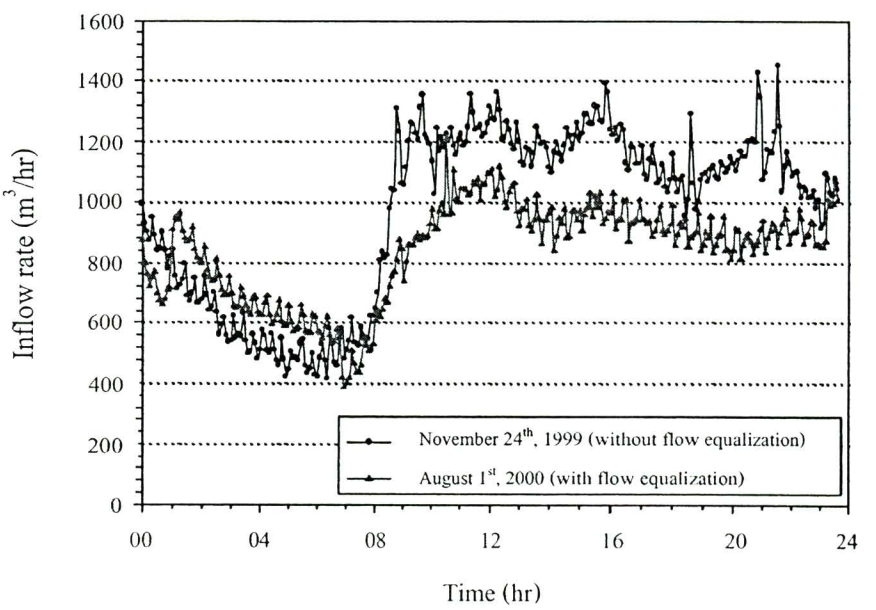
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดธาตุอาหารในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ลดต่ำลงคือ สภาวะการผันแปรของปริมาณการไหลและภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียเข้าระบบที่เกิดขึ้นในรอบวันหรือในช่วงระยะเวลา 24 ชม. รูปที่ 1.1 แสดงแนวโน้มการผันแปรของปริมาณการไหลในช่วงระยะเวลา 4 วัน ปริมาณการไหลของน้ำเสียจะลดลงต่ำสุดในช่วง 05.00 น. – 06.00 น. และจะเพิ่มขึ้นสูงสุดอีกครั้งในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. – 12.00 น. ปริมาณการไหลจะผันแปรขึ้นลงในลักษณะนี้อีกครั้ง ในช่วงเวลา 12.00 น. – 22.00 น. แต่เกิดขึ้นแคบกว่าการผันแปรในช่วงแรกและพบว่าลักษณะการผันแปรของปริมาณการไหลในแต่ละวันมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน (Grady, Daigger, and Lim, 1999; Sin, 2004) และในขณะเดียวกันภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในน้ำเสียก็มีลักษณะแนวโน้มการผันแปรเช่นเดียวกับการผันแปรของปริมาณการไหล (Grady *et al.*, 1999; Petersen, 2000; Metcalf and Eddy, 2003; Water Environment Federation (WEF) and American Society of Civil Engineers (ASCE)/Environmental and Water Resource Institute (EWRI), 2006) ในบางช่วงเวลาระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กมีความแตกต่างระหว่างค่าภาระบรรทุกต่ำสุดและสูงสุดประมาณ 10 – 16 เท่า ขณะที่ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่มีความแตกต่างประมาณ 3 – 5 เท่า (Qasim, 1999; Metcalf and Eddy, 2003; WEF and ASCE/EWRI, 2006)



รูปที่ 1.1 ลักษณะการผันแปรปริมาณการไหลของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจริงในช่วง 4 วันที่มีแน้วโน้มคล้ายคลึงกัน (Sin, 2004)

วิธีปฏิบัติโดยทั่วไปเพื่อลดการผันแปรของปริมาณการไหลและภาระบรรทุกคือการติดตั้งถังปรับสภาพการไหล (Equalization tank, EQ) มาเก็บพักน้ำเสียก่อนที่จะทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามถังปรับสภาพการไหลก็ยังไม่สามารถทำให้การผันแปรของปริมาณการไหลและลักษณะน้ำเสียหมดไปได้ (WEF and ASCE/EWRI, 2006) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถังปรับสภาพการไหลยังมีข้อจำกัดในการใช้งานในภาคสนามจริงรวมถึงวิธีการควบคุมเครื่องสูบน้ำเสียและอุปกรณ์ที่ติดตั้งในถังปรับสภาพการไหล การเพิ่มปริมาตรถังปรับสภาพการไหลให้สูงขึ้นเพื่อที่จะเดินระบบให้ได้ตามทฤษฎีจึงเป็นข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่าข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรมและไม่สามารถเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียจริงจึงยังคงมีสภาวะผันแปรเกิดขึ้นตลอดเวลาและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบลักษณะการผันแปรของปริมาณการไหลของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดน้ำเสียในรอบวันที่ไม่ผ่านและผ่านถังปรับสภาพการไหล (Comas matas, 2000)

การผันแปรของปริมาณการไหลส่งผลกระทบโดยตรงต่อสภาวะทางชลศาสตร์ของระบบ แต่การผันแปรของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งประกอบไปด้วย อินทรีย์คาร์บอน อินทรีย์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยเฉพาะการผันแปรของภาระบรรทุกอินทรีย์ไนโตรเจนจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการทางชีววิทยาของระบบ (WEF and ASCE/EWRI, 2006) เนื่องจากออโตทรอฟิกแบคทีเรีย (Autotrophic bacteria, X_{BA}) หรือไนตริฟายอิงแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) (กระบวนการกำจัดไนโตรเจน) มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ โดยมีช่วง

ระยะเวลาการแบ่งตัวประมาณ 2 – 3 วัน (Gerardi, 2002) ซึ่งนานกว่าช่วงระยะการผันแปรของภาระบรรทุกไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในรอบ 24 ชม. การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าเร็วกว่าระยะเวลาการแบ่งตัวในขณะที่ออโตทรอฟิกแบคทีเรียที่อยู่ในระบบมีปริมาณต่ำเพียงร้อยละ 3 – 10 เท่านั้น (Gerardi, 2002) จึงไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงและกำจัดไนโตรเจนได้ทัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำทิ้งออกเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยและมีแนวโน้มเหมือนกับลักษณะการผันแปรของความเข้มข้นในน้ำเสียเข้า (Petersen, 2000; Viraj de Silva and Rittmann, 2000; Sin, 2004)

การบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจะให้ความสำคัญเฉพาะการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนเท่านั้น ดังนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังคงมีปริมาณสารประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มปริมาณของสาหร่ายอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำและยังคงทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเริ่มปรากฏให้เห็นมากขึ้นพร้อมกับการเติบโตของเมืองและอุตสาหกรรมจนยากที่จะแก้ไขได้ภายในเวลาอันสั้น ทำให้ปัญหาเรื่องมลภาวะทางน้ำของประเทศยังไม่สามารถแก้ไขได้อย่างจริงจังและสัมฤทธิ์ผลเนื่องจากต้นเหตุของปัญหาของน้ำเสียยังไม่ได้ถูกลดทอนลงไป ตลอดจนการขาดเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและเข้ากันได้ดีกับสภาพสิ่งแวดล้อมภายในประเทศ

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ได้แก่ การเพิ่มปริมาตรถังปฏิกิริยา การเพิ่มอายุสลัดจ์ของระบบ และการเพิ่มจำนวนถังปฏิกิริยา ซึ่งวิธีดังกล่าวล้วนแต่เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากต้องก่อสร้างและขยายขนาดของถังปฏิกิริยาและอาจจะมีข้อจำกัดถ้าเป็นการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเดิมที่มีประสิทธิภาพต่ำและเดินระบบมาก่อนแล้ว จากข้อมูลเปรียบเทียบการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดาเพื่อให้ระดับความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำทิ้งออกมีค่าต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบด้วยรูปแบบกระบวนการกำจัดไนโตรเจนแบบธรรมดาต้องเพิ่มปริมาตรของระบบทั้งหมดขึ้นประมาณ 2.3 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบด้วยกระบวนการเพิ่มพูนจุลินทรีย์ (Bio-Augmentation) ต้องเพิ่มปริมาตรของระบบทั้งหมดขึ้นเพียง 0.8 เท่า เท่านั้น (Salem, Barends, Heijnen, and van Loosdrecht, 2002)

Salem, Barends, van Loosdrecht, and Heijnen (2003) ได้ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่อายุสลัดจ์ของระบบต่ำเพียง 3.3 วัน ซึ่งต่ำกว่าค่าอายุสลัดจ์ที่กำหนดต่ำสุดในการเดินระบบสำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชันร้อยละ 50 โดยใช้เทคนิคการเพิ่มพูนจุลินทรีย์ในกระบวนการสายรอง (Side-stream) ของระบบโดยได้แบ่งสลัดจ์จากระบบหมุนเวียนประมาณร้อยละ 0.5 – 10 มาทำการเพิ่มจำนวนของออโตทรอฟิกแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาเฉพาะโดยใช้น้ำทิ้งจากระบบบำบัดสลัดจ์แบบแอนแอโรบิกเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการเจริญเติบโตของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต

ของออโตทรอฟิกแบคทีเรีย หลังจากนั้นจึงป้อนสลัดจ์กลับเข้าสู่กระบวนการสายหลัก (Main-stream) ซึ่งเรียกกระบวนการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียนี้ว่า กระบวนการเพิ่มพูนจุลินทรีย์ (Bio-Augmentation Batch Enhanced, BABE)

จากผลศึกษาดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนารูปแบบของกระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพขึ้นใหม่ให้มีศักภาพสูงยิ่งขึ้นและนำข้อดีของกระบวนการเพิ่มพูนจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหากับกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดธาตุอาหารต่ำโดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนจากสภาวะการผันแปรของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในรอบวัน และนำเอาแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนภายในระบบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลัดจ์ส่วนเกินแบบแอนแอโรบิกมาช่วยทำให้ระบบบำบัดมีศักยภาพในการกำจัดธาตุอาหารสูงขึ้นแทนที่จะเป็นการเพิ่มภาระให้กับระบบบำบัด เพราะกระบวนการเพิ่มพูนจุลินทรีย์ทำให้มีสัดส่วนของออโตทรอฟิกแบคทีเรียในระบบสูงขึ้นและสามารถเดินระบบที่ค่าอายุสลัดจ์ต่ำเพื่อให้ระบบมีปริมาณจุลินทรีย์ไวงาน (Active biomass) เพิ่มมากขึ้นโดยที่ระบบยังมีความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนได้เหมือนกับการเดินระบบที่อายุสลัดจ์สูง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มระดับความสามารถของกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์เพื่อรองรับกับสภาวะผันแปรของภาระบรรทุกไนโตรเจนได้ซึ่งจะช่วยทำให้ค่าไนโตรเจนในน้ำทิ้งออกคงที่แม้ว่าจะเกิดการผันแปรของปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าก็ตาม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนารูปแบบและศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดธาตุอาหารของกระบวนการบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพที่ใช้แหล่งคาร์บอนและไนโตรจนภายใน

1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดอัตราการหายใจและประมาณค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพที่สำคัญจากข้อมูลอัตราการหายใจ ได้แก่ ยีลด์ (Yield, Y) ค่าคงที่อิ่มตัวสำหรับสารอาหาร (Saturation constant for substrate, K) อัตราการเน่าเปื่อย (Decay rate, b) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate, μ_{max})

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอกทิเวเต็ดสลัดจ์นำร่องโดยใช้กระบวนการเอ็มแอลอี (Modified Ludzack-Ettinger, MLE) ซึ่งเป็นกระบวนการสำหรับกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพทั้งในกระบวนการสายหลักและกระบวนการสายรอง ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยของซีโอดี (COD) ทีเคเอ็น (TKN) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) เท่ากับ 239, 32.5 และ 4.4 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

1.3.2 การศึกษานี้พิจารณาการตอบสนองของระบบเฉพาะซีโอดี (คาร์บอน) และไนโตรเจนเท่านั้น

1.3.3 อัตราการใช้ออกซิเจนของตัวอย่างสลัดจ์ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด และการประมาณค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและแอมโมเนียมออกซิไดซิงแบคทีเรียจากข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนและแปลผลแบบเชิงเส้นตรงบนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่ 1 (Activated Sludge Model no. 1, ASM1) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 กระบวนการกำจัดธาตุอาหาร (ไนโตรเจน) รูปแบบใหม่

การวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดลองเพื่อหาแนวทางอันเหมาะสมในการเพิ่มศักยภาพระบบบำบัดน้ำเสียชนิดแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีมากกว่าร้อยละ 50 ของระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้ก่อสร้างและเดินระบบแล้วในประเทศ โดยได้เลือกใช้กระบวนการ MLE (Modified Ludzack-Ettinger) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพแบบพื้นฐานและมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน กล่าวคือสามารถที่จะปรับปรุงกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดา (Conventional activated sludge) ที่ได้ก่อสร้างและเดินระบบมาก่อนแล้วได้ในทันที

กระบวนการ MLE เป็น Pre-denitrification กล่าวคือไนเตรทที่เกิดขึ้นในถังเติมอากาศจะหมุนเวียนกลับมายังถังแอนอกซิกและใช้คาร์บอนจากน้ำเสีย (คาร์บอนจากแหล่งภายนอก) เป็นตัวให้อิเล็กตรอนซึ่งจะเกิดขึ้นในกระบวนการสายหลัก ส่วนในกระบวนการสายรองระบบจะได้คาร์บอนและไนโตรเจนจากน้ำทิ้งการบำบัดสลัดจ์ส่วนเกินและการหายใจแบบเอ็นโดจีนัสของจุลินทรีย์ในระบบหมุนเวียนสลัดจ์ ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียรูปแบบที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จึงเป็นการนำเอาคาร์บอนและไนโตรเจนจากแหล่งภายในมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม

รูปแบบกระบวนบำบัดน้ำเสียที่พัฒนาขึ้นได้นำเอาเทคนิคการเพิ่มพูนจุลินทรีย์ (Bio-Augmentation) เข้ามาช่วยทำให้กระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพแบบธรรมดามีศักยภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงขึ้นโดยได้เลือกเอาแหล่งอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบทั้งกลุ่มเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและออโตทรอฟิกแบคทีเรียจากน้ำทิ้งของระบบย่อยสลัดจ์ส่วนเกินแบบแอนแอโรบิก ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนภายในที่สำคัญและมักจะถูกมองข้ามเพราะโดยทั่วไปจะถือว่าเป็นภาระมากกว่าประโยชน์ต่อระบบบำบัดน้ำเสีย

ข้อดีที่สำคัญอีกประการคือ สามารถเดินระบบที่อายุสลัดจ์ต่ำได้โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนยังคงเดิม (โดยทั่วไปแล้วการกำจัดคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอายุสลัดจ์ของระบบลงแต่ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนจะลดลง) รูปแบบระบบที่พัฒนาขึ้น

สามารถรองรับกับสภาวะผันแปรของภาระบรรทุกของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในรอบวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปแบบของถังปฏิกิริยาสำหรับเพิ่มพูนจุลินทรีย์ได้ถูกออกแบบใหม่ให้มีความสามารถเพิ่มสูงขึ้นและมีปริมาตรต่ำเพียงร้อยละ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรถังปฏิกิริยาในกระบวนการสายหลักของระบบ

การเพิ่มศักยภาพในการกำจัดไนโตรเจนด้วยการเพิ่มพูนจุลินทรีย์เป็นกระบวนการที่ยังคงอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มเดิมกับกระบวนการสายหลัก ดังนั้นจึงสามารถมั่นใจได้ว่าระบบมีเสถียรภาพสูงและง่ายต่อการบำรุงดูแลรักษาในระยะยาว และมีความเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้สำหรับการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียใหม่หรือนำไปใช้สำหรับปรับปรุงกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดาที่เดินระบบอยู่ก่อนแล้วที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบบำบัดเดิมที่มีระบบสำหรับบำบัดสลัดจ์ส่วนเกินแบบแอนแอโรบิกอยู่ก่อนแล้ว จะยิ่งทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างถูกลงมากยิ่งขึ้น ซึ่งในรายละเอียดจะนำเสนอต่อไป

1.4.2 ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าข้อมูลการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในประเทศในปัจจุบันนำมาจากข้อกำหนดหรือพารามิเตอร์ที่อ้างอิงจากคู่มือหรือรายงานการวิจัยของต่างประเทศ ดังนั้นเป็นปัญหาส่วนหนึ่งที่การใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากต่างประเทศไม่ประสบความสำเร็จตามที่ต้องการ เนื่องจากข้อมูลการออกแบบก่อสร้างระบบบำบัดน้ำสียโดยเฉพาะข้อมูลพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบไม่ใช่ค่าเดียวกันกับค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบก่อสร้าง เพราะพารามิเตอร์ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะสิ่งแวดล้อมตลอดจนเงื่อนไขของการเดินระบบ ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์สำคัญที่แปลผลจากข้อมูลอัตราการหายใจมีค่าอยู่ในช่วงที่อ้างอิงซึ่งแสดงให้ทราบว่าข้อมูลการทดลองมีความน่าเชื่อถือได้

เทคนิควิธีการวัดอัตราการหายใจได้ปรับปรุงรูปแบบการติดตั้งขั้ววัดออกซิเจนใหม่จากที่เคยติดตั้งที่ถังเติมอากาศและภาชนะวัดวัดอัตราการหายใจ ซึ่งเป็นรูปแบบเดิมที่เรียกว่า “Hybrid respirometer” เพื่อแก้ปัญหาการรบกวนจากคลื่นของกระแสน้ำและความดันที่กระทำต่อขั้ววัดออกซิเจน ตลอดจนลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในระบบอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจโดยการติดตั้งอุปกรณ์ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ เครื่องวัดอัตราการหายใจที่ได้พัฒนาขึ้นเองเรียก “เครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด (Ultimate hybrid respirometer)”เครื่องวัดอัตราการหายใจชนิดนี้ถูกออกแบบให้มีความสามารถในการวัดที่รวดเร็ว ทำการวัดแบบต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการทำงานในส่วนนี้จึงช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้มาก ตลอดจนลดปริมาณงานในส่วนการวิเคราะห์ในห้องห้องปฏิบัติการ