รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์ Excel

รองศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย ศรีวิริยรัตน์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 181621
สัญญาเลขที่ 144/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์ Excel

รองศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย ศรีวิริยรัตน์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2562

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 144/2559

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของโรงบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ หรือประเมินทางเลือกของการปรับเปลี่ยนโรงบำบัดน้ำเสีย หรือเพื่อใช้เป็นสื่อการสอนในมหาวิทยาลัยที่มีการเรียนการสอนรายวิชาวิศวกรรมน้ำเสีย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียนี้มีราคาสูงมาก การเข้าถึงโปรแกรมเหล่านี้ในประเทศไทยเป็นไปได้ยากด้วยข้อจำกัดทางด้านงบประมาณและด้านภาษา โครงการวิจัยนี้จึงพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ด้วยชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม Microsoft Excel และอยู่ในชุดโปรแกรม Microsoft Office ซึ่งมักถูกติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งที่เป็นระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS โดยใช้ภาษาไทยเป็นภาษาหลักในการพัฒนา ก็จะทำให้การใช้งานโปรแกรมมีความสะดวกมากขึ้น เข้าถึงโปรแกรมได้ตลอดเวลา ติดตั้งง่าย และมีราคาถูก ทำให้วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ หรือนักวิจัยสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้งานในการออกแบบ ปรับปรุง วิจัย หรือวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ได้ การพัฒนาโปรแกรมนี้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Activated Sludge Model (ASM) รุ่นที่ 1 มาเป็นองค์ประกอบหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ โดยเรียกโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนานี้ว่า VBA-ASM-1 ทั้งนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ได้รับการปรับเทียบกับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจริง และถูกเปรียบเทียบผลการทำนายกับโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์โดยเฉพาะที่เรียกว่า IAWPRC/UCTOLD ผลการปรับเทียบกับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจริง และการเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่น พบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VBA-ASM-1 นั้นสามารถทำนายผลการจำลองได้เทียบเท่ากับโปแกรมสำเร็จรูปและมีผลการทำนายเทียบเท่ากับผลการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงและมีความเทียบเท่ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้ว

Abstract

A mathematical model for activated sludge biological wastewater treatment system is a necessary tool for the evaluations of methodologies and treatment alternatives to increase treatment efficiencies or for the teaching wastewater engineering in university. In general, the computer program for modeling the activated sludge system is so expensive and inaccessible for people in Thailand due to the limitations in budget and language. This study was to develop a computer program for modeling activated sludge system with Thai language and with the Visual Basic for Applications (VBA), which is a part of Microsoft Excel and is available in the Microsoft Office package. Microsoft Excel in typically installed in any personal computer running Windows or Mac OS operating systems so the computer program developed in this study called VBA-ASM-1 could be applicable, accessible, ease for installation and inexpensive for users. Engineer, scientist and researcher can employ this program for designing, retrofitting, researching or troubleshooting problems when they operate the activated sludge systems. Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) was a crucial part of this program. The predictions from this program were calibrated with experimental results from a pilot-scale activated sludge system and were compared with the results geneated from a specific activated sluge modeling software called IAWPRC/UCTOLD. The results showed that the VBA-ASM-1 provided the prediction results accurately and was equivalent to the IAWPRC/UCTOLD; therefore, this software could be applicable for practical applications and is equivalent with an existing software.

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค
บทคัดย่อ ง
Abstract จ
สารบัญเรื่อง ฉ
สารบัญตาราง ซ
สารบัญภาพ ฌ
บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 9
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9
วิธีการดำเนินการวิจัย 11
2.1 โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel 11
2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์และระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ 11
2.3 ขั้นตอนการดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 12
2.4 การใช้งาน VBA ในโปรแกรม Microsoft Excel 13
2.5 การปรับเทียบแบบจำลองกับระบบบำบัดน้ำเสียจำลองแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 14
2.6 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรมกับโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 15
ผลการวิจัยและอภิปราย 17
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจน 17
3.2 การพัฒนาแบบจำลองย่อยเพื่อจำแนกคุณลักษณะของน้ำเสียสำหรับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 23
3.3 การพัฒนาแบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ 25
3.4 การพัฒนาแบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชัน 27
3.5 การพัฒนาแบบจำลองย่อยสำหรับถังตกตะกอนขั้นที่สอง 28
3.6 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบน Microsoft Excel ด้วยชุดภาษา VBA 29
3.7 การปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) กับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง 40
3.8 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรมกับโปรแกรมสำเร็จรูป 44

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50
4.1 สรุปผลการทดลอง 50
4.2 ข้อเสนอแนะ 50
ผลผลิต 51
รายงานสรุปการเงิน 52
บรรณานุกรม 53
ประวัตินักวิจัย 56

สารบัญตาราง

หน้า
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบเมทริกซ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 18
ตารางที่ 2 เมทริกซ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 20
ตารางที่ 3 คำนิยามของส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 21
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์สำหรับแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 21
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C ที่ pH เท่ากับ 7 36
ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C ที่ pH เท่ากับ 7 36
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรม VBA-ASM-1 และ IAWPRC/UCTOLD ที่สภาวะคงตัว 49

สารบัญภาพ

หน้า

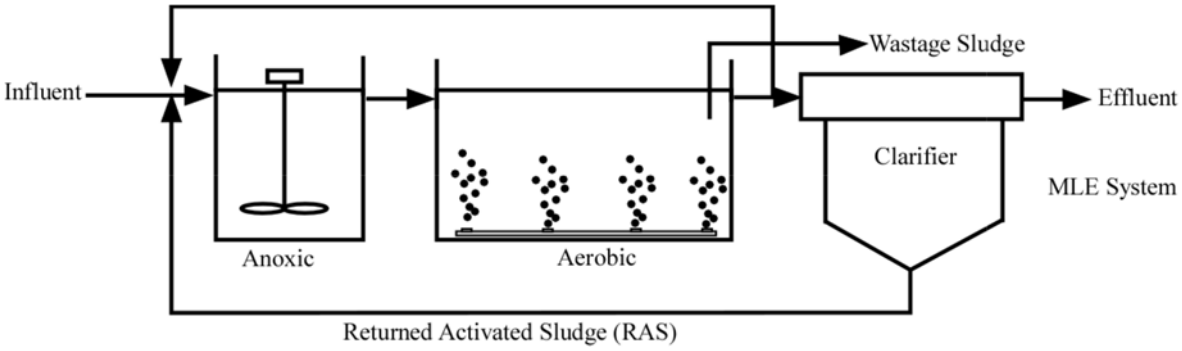
ภาพที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบ Modified Ludzack-Ettinger (MLE).....1
ภาพที่ 2 ตัวอย่างการใช้ Simulink ของ MATLAB.....5
ภาพที่ 3 รายการของคำสั่งในโปรแกรม SSSP ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ MS-DOS.....6
ภาพที่ 4 ตัวอย่างของโปรแกรม AQUASIM รุ่นที่ 2.1.....6
ภาพที่ 5 ตัวอย่างโปรแกรม BIOWIN จากบริษัท EnviroSim Associates 7
ภาพที่ 6 ภาพรวมของแบบจำลอง ASM รุ่นต่างๆ ที่เผยแพร่ 8
ภาพที่ 7 วัตถุประสงค์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาตร์ ASM จากการสำรวจจำแนกเป็นทวีปและหน่วยงาน .8
ภาพที่ 8 VBA IDE ของโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel.....13
ภาพที่ 9 ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองประเภท Modified Ludzak-Ettinger (MLE).....14
ภาพที่ 10 แผนภูมิสัดส่วนซีโอดีของน้ำเสีย 23
ภาพที่ 11 สัดส่วนของไนโตรเจนต่างๆ ในน้ำเสียตามแบบจำลอง ASM1 25
ภาพที่ 12 หน้าแรกของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 29
ภาพที่ 13 ลิขสิทธ์การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง 30
ภาพที่ 14 แบบฟอร์มการกรอกรายละเอียดของโครงการภายในแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 30
ภาพที่ 15 แบบฟอร์มเพื่อกรอกคุณลักษณะของน้ำเสียทั่วไปในแบบจำลอง 31
ภาพที่ 16 แบบฟอร์มเพื่อกรอกองค์ประกอบของน้ำเสียในแบบจำลอง.....32
ภาพที่ 17 แบบฟอร์มเพื่อระบุองค์ประกอบของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง.....32
ภาพที่ 18 แบบฟอร์มเพื่อระบุรายละเอียดเกี่ยวกับถังปฏิกิริยาของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง 33
ภาพที่ 19 แบบฟอร์มเพื่อระบุรูปแบบการหมุนเวียนสลัดจ์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง.....34
ภาพที่ 20 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง.....34
ภาพที่ 21 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง 37
ภาพที่ 22 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์สำหรับการสลับฟังก์ชันของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง 38
ภาพที่ 23 สถานะการประมวลผลเพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1.....38
ภาพที่ 24 ตัวอย่างหน้ารายงานผลที่ได้จากการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์ 41
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง 42
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 6 ชั่วโมง 42
ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไนเตรทไนโตรเจนของระบบบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง 43
ภาพที่ 28 ผลลัพธ์การทำนายของโปรแกรม VBA-ASM-1 ด้วยข้อมูลจากระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง 43
ภาพที่ 29 รายงานผลที่ได้จากการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียจำลองด้วยโปรแกรม VBA-ASM-1 44

ภาพที่ 30 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่าง VBA-ASM-1 และ IAWPRC/UCTOLD 45
ภาพที่ 31 รายละเอียดของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD 46
ภาพที่ 32 รายละเอียดการควบคุมระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD 46
ภาพที่ 33 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD 47
ภาพที่ 34 ผลการทำนายจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD ที่สภาวะคงตัว.....48

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

Arden และ Lockett เริ่มพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ (Activated Sludge) ขึ้นที่ประเทศอังกฤษในปี 1914 โดยระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ (Activated Sludge Wastewater Treatment System) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment) อย่างแพร่หลายในทุกประเทศ สามารถนำมาบำบัดน้ำเสียทั้งจากชุมชนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Stensel & Makinia, 2014) โดยอาศัยแบคทีเรียจำพวกใช้ออกซิเจน (Aerobic Bateria) สำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ในช่วงแรก สำหรับประเทศไทยนั้น พบว่า มีจำนวนของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนเป็นประเภทระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ร้อยละ 36 (รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย, 2552) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวยังมิได้นับรวมถึงโรงบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การออกแบบ การปรับปรุง หรือควบคุมระบบในช่วงต้นมักใช้วิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical Methods) ซึ่งอาศัยการสังเกต ใช้ข้อมูลจากการทดลอง หรือการลองผิดลองถูก เนื่องจากวิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์ยังไม่เข้าใจถึงกลไกทางชีวเคมีของกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ และเป้าหมายของการบำบัดน้ำเสียในช่วงต้นนั้นมีเพียงการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเท่านั้น (Stensel & Makinia, 2014) ต่อมา ได้มีการพัฒนารูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบให้มากยิ่งขึ้น เช่น การกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ (Biological Nutrient Removal, BNR) ซึ่งได้แก่ ธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ได้แก่ Modified Ludzack-Ettinger (MLE) ดังภาพที่ 1 เป็นต้น



ภาพที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบ Modified Ludzack-Ettinger (MLE)

ทำให้เกิดรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ต่างๆ มากขึ้น เช่น ระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Activated Sludge, CMAS) ระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์แบบปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Activated Sludge, CSAS) ระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์แบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch, OD) เป็นต้น ทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้น น้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบยังมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นและคุณลักษณะมีความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้การออกแบบ การปรับปรุงระบบ หรือการควบคุมระบบ ที่อาศัยข้อมูลที่ได้มาจากวิธีการเชิงประจักษ์ นั้นไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ได้ มักนำไปใช้ได้เฉพาะกรณีเท่านั้น ทำให้เกิดความต้องการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) มากขึ้น เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถอธิบายกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในระบบวิศวกรรมได้ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

โดยปกติ การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์นั้นจำเป็นต้องมีการประเมินความเหมาะสมของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทางเลือกสำหรับคุณลักษณะของน้ำเสีย คุณภาพของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น การประเมินค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการก่อสร้างและเดินระบบบำบัดน้ำเสีย การประเมินทางเลือกมีขั้นตอนที่ซับซ้อนมาก วิธีการหนึ่ง คือ การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) กล่าวคือ สร้างระบบบำบัดน้ำเสียจำลองประเภทต่างๆ ขึ้น และทดลองบำบัดน้ำเสียนั้นเพื่อดูว่าระบบประเภทใดมีความเหมาะสม ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องใช้ระยะเวลานานในการจัดทำระบบและทดลองเดินระบบที่มีพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีจำนวนมาก การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ยุค Ardern และ Lockett นั้นมักใช้วิธีการเชิงประจักษ์ ที่ได้จากการสังเกตหรือนำข้อมูลจากการทดลองนำมาพัฒนาเป็นสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่ประกอบไปด้วยตัวแปรสำคัญ เนื่องจากความรู้ความเข้าใจในกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ยังไม่มีความชัดเจน สมมติฐานที่ตั้งขึ้นในช่วงนั้นยังมีความขัดแย้งกัน ทำให้ไม่สามารถนำมาพัฒนาเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงกล (Mechanistic Mathematical Model) วิวัฒนาการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ในช่วงต่อมาเกิดจากการนำจลนศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics) มาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญของจุลินทรีย์และการกำจัดซับสเตรตอินทรีย์ (Organic Substrate) (Makinia, 2010) โดย Monod (1949) ได้นำเสนอสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญจำเพาะของแบคทีเรีย (μ) และความเข้มข้นของซับสเตรตอินทรีย์ ต่อมา เมื่อมีการพัฒนาถังปฏิกรณ์ที่เรียกว่า Chemostat ขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1950 (Novick & Szilard, 1950) พบว่า มีงานวิจัยที่พยายามนำจลนศาสตร์ของการเจริญของแบคทีเรียและการกำจัดซับสเตรตร่วมกับการทำสมดุลมวลมาอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ เช่น Garrett and Sawyer (1952) พบว่าสมการ Monod ที่ใช้อธิบายความสำพันธ์ของแบคทีเรียเดี่ยวกับซับสเตรตนั้นสามารถนำมาใช้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่มีแบคทีเรียผสม (Mixed Culture Bacteria) นอกจากนั้น Eckenfelder และ O’ connor (1954) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ กำหนดให้การกำจัดซับสเตรตอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งสมการที่ใช้ในการกำจัดซับสเตรตอินทรีย์นั้นพัฒนามาจากสมการสมดุลมวลสารที่สภาวะคงตัว (Steady State Conditions) ต่อมา ในปี ค.ศ. 1962 McKinney (1962) ได้พัฒนาสมการสำหรับซับสเตรตอินทรีย์มาจากสมการสมดุลมวลสารที่สภาวะคงตัวเช่นเดียวกัน โดยมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่งและมีซับสเตรตอินทรีย์เป็นปัจจัยจำกัด (Limiting Factor) สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และมีปริมาณจุลินทรีย์มีปริมาณมากเกินพอในระบบ สุดท้ายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นที่นิยมนำมาใช้คือแบบจำลองของ Lawrence และ McCarty (1970) ที่ได้นำเสนอหลักการออกแบบและควบคุมระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่เรียกว่า อายุสลัดจ์ (Sludge Age) หรือ (Solid Retention Time, SRT) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ ทั้งนี้ มีการเสนอแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่สภาวะคงตัวของการกำจัดซับสเตรตอินทรีย์และไนตริฟิเคชันในสภาวะเติมอากาศและการบำบัดในสภาวะแอนแอโรบิกของระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ 3 ประเภท คือ ระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ที่มีและไม่มีสลัดจ์สูบกลับ (Sludge Recycle, RAS) และระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์แบบไหลวนตามกัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่นิยมใช้มากที่สุด คือ แบบจำลองทางคณิตศาตร์ Activated Sludge Model (ASM) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยที่เรียกว่า International

Association on Water Pollution Research and Control (IAWPRC) ซึ่งประกอบไปด้วยผู้เชียวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ต่อมา กลุ่มดังกล่าวได้เปลี่ยนชื่อกลุ่มเป็น International Association on Water Quality (IAWQ) (Henze et al., 2002) โดยมีวัตถุประสงค์ในการรวบรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ทั้งหมดเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองแบบจำลองเชิงกลที่มีศักยภาพและอยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและควบคุมระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์เพื่อการกำจัดสารอินทรีย์และการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพ ต่อมา ได้มีการเผยแพร่แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์รุ่นที่ 1 (Activated Sludge Model No. 1, ASM1) ในปี ค.ศ. 1987 (Henze, Grady, Gujer, Marais & Matsuo, 1987) โดยแบบจำลองรุ่น ASM1 เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้จำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัจด์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน แบบจำลอง ASM1 รวมกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพเท่านั้น และมีการจำลองการใช้ออกซิเจนและไนเตรทไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและใช้ Chemical Oxygen Demand (COD) เป็นตัวแทนของปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ ทั้งนี้ ASM 1 ส่วนใหญ่ถูกพัฒนาจากแนวคิดของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Dold และคณะฯ (1980) โดย ASM1 แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้มีโครงของแบบจำลองเป็นเมทริกซ์ที่สามารถนำมาใช้แสดงกระบวนการของการกำจัดสารอินทรีย์ ไนตริฟิเคชั่นและดีไนตริฟิเคชั่นได้อย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้น มีการพัฒนาแบบจำลองนี้อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 2 (Activated Sludge Model No. 2, ASM2) เพื่อเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองในการทำนายกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (Henze et al., 1995) ภายหลังเมื่อมีงานวิจัยทางด้านการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพเกิดขึ้นจำนวนมาก พบว่า แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องนั้นสามารถใช้ซับสเตรตที่เก็บสะสมภายในเซลล์สำหรับกระบวนการดีไนตรฟิเคชั่นได้ จึงทำให้มีการดัดแปลงแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์และเรียกแบบจำลองรุ่นนี้ว่า แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 2d (Activated Sludge Model No. 2d – ASM2d) (Henze et al., 1999) ปัจจุบัน แบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองรุ่นที่ 3 ทีเรียกว่า แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 3 (Activated Sludge Model No. 3 – ASM3) (Gujer, Henze, Mino & van Loosdrecht, 1999) เป็นแบบจำลองที่แก้ไขข้อบกพร่องของแบบจำลอง ASM1 ในส่วนของการใช้สารอินทรีย์เพื่อการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ มีการนำเสนอแบบจำลองการสะสมซับสเตรตภายในเซลล์และรูปแบบการจำลองในส่วนของการเสื่อมสลายใหม่ แบบจำลองเพื่อการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสไม่รวมอยู่ในแบบจำลองรุ่นนี้

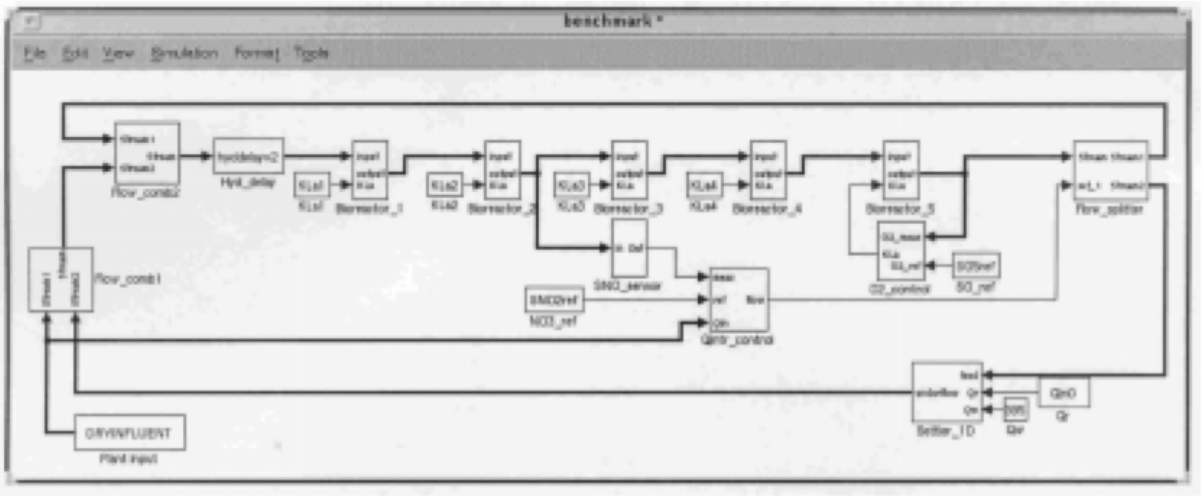
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือหนึ่งในการประเมินวิธีการที่ทำให้โรงบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงสุด ได้แก่ การจำลองเพื่อทดสอบการปรับเปลี่ยนวิธีการควบคุมระบบ เช่น ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลภาระบรรทุกน้ำเสีย หรืออัตราการสูบกลับของสลัดจ์ เป็นต้น หรือนำแบบจำลองมาประเมินทางเลือกของการปรับเปลี่ยนโรงบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เป็นต้น (Ferrer et al., 2004; Geraey et al., 2004) โดยทั่วไป กระบวนการประยุกต์แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์สำหรับการกำหนดค่าเหมาะที่สุดสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบเชื่อมตรง (On-line) และแบบไม่เชื่อมตรง (Off-line) (Geraey et al., 2004) โดยการกำหนดค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชื่อมตรง (Off-line Optimization) นั้นเป็นการใช้แบบจำลองที่ไม่ต่อเชื่อมกับโรงบำบัดน้ำเสีย แต่มีการนำแบบจำลองที่ปรับเทียบแล้วมาจำลองระบบและนำผลที่ได้จากแบบจำลองไปทดสอบและประยุกต์กับโรงบำบัดน้ำเสียในภายหลัง แต่การกำหนดค่าเหมาะที่สุดแบบเชื่อมตรงนั้น แบบจำลองต่อเชื่อมกับระบบควบคุมโรงบำบัดน้ำเสียแบบในสาย ดังนั้น ผลที่ได้จากการจำลอง

ถูกนำไปใช้ในการควบคุมระบบโดยทันที เช่น ระบบ Hybrid Supervisory System (HSS) (Rodriguez-Roda et al., 2002) หรือระบบ Model Predictive Control (MPC) (Franciscoa et al., 2015; O'Briena et al., 2011; Shen et al., 2009) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พบว่า วิธีการกำหนดค่าเหมาะแบบไม่เชื่อมตรงมักนำมาใช้บ่อยที่สุดเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น กรณีมีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งใหม่ที่เข้มงวดขึ้น ก็จำเป็นต้องประเมินวิธีการควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงระบบใหม่เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามที่กำหนด เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาระเบียบวิธีการใช้แบบจำลองและเกณฑ์การประเมินประสิทธิผลแต่ละวิธีการเพื่อการกำหนดค่าเหมาะที่สุดโดยใช้พื้นฐานของแบบจำลอง ASM1 เน้นการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนในโรงบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละวิธีการได้ (Copp, 2002)

หากโรงบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบเพื่อเพิ่มศักยภาพให้สูงขึ้นเนื่องจากโรงบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องรับภาระบรรทุกเพิ่มสูงขึ้นหรือเนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดมีความเข้มงวดมากขึ้น เช่น ยกระดับโรงบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดาให้มีศักยภาพในการกำจัดธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นต้น ทั้งนี้ ทางเลือกสำหรับการปรับปรุงนั้นปกติมักมีหลายทางเลือก จึงจำเป็นต้องมีการประเมินเพื่อเลือกทางเลือกเหล่านั้น การประเมินทางเลือกมีหลายวิธี เช่น การสร้างแบบจำลองของระบบภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต้องไม่มีข้อจำกัดทางด้านงบประมาณและเวลา แบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นั้นช่วยทำให้การประเมินทางเลือกนั้น ตัวอย่างเช่น Coen et al. (1997) ได้ใช้แบบจำลอง ASM1 ประเมินโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เมือง Hoogstraten ของประเทศเบลเยี่ยมที่ประกอบด้วยถังตกตะกอนขั้นต้น ถังเติมอากาศแบบไหลวนตามกัน และถังตกตะกอนขั้นสุดท้ายจำนวน 2 ถัง โดยระบบถูกออกแบบเพื่อรองรับจำนวนประชากร 45,000 สมมูลประชากร แต่ใช้งานจริงเพียง 21,000 สมมูลประชากรเทียบเท่า อย่างไรก็ตาม พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งมีความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมดเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดในบางครั้งเนื่องจากขาดสภาวะแอนนอกซิกสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องประเมินทางเลือกเพื่อปรับปรุงโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนนี้ให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้น จึงนำผลการจำลองไปปรับปรุงโดยมีการเสนอแผนให้มีจัดสรรพื้นที่ส่วนหนึ่งของถังปฏิกรณ์ให้มีสภาวะแอนนอกซิก มีการป้อนน้ำเสียแบบขั้นบันได และมีสุดท้ายมีการหมุนเวียนสลัดจ์ภายในระบบ ส่วน Hvala et al. (2002) ประเมินทางเลือกของการใช้เทคโนโลยีระบบบำบัดน้ำเสียจำนวน 2 ระบบ คือ ระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge) และ Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) ด้วยการใช้แบบจำลอง GPS-X ในการประเมินสำหรับการปรับปรุงโรงบำบัดน้ำเสียเดิมให้มีศักยภาพในการกำจัดไนโตรเจนได้ ผลการจำลอง พบว่า ระบบ MBBR สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีกว่าระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์แบบธรรมดา จึงนำมาใช้ในการปรับปรุงโรงบำบัดน้ำเสียเดิม

เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นจำนวนมากเพื่อประยุกต์แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ โดยทั่วไป สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ โปรแกรมจำลองทั่วไป (General Simulator) และโปรแกรมจำลองจำเพาะ (Specific Simulator) โดยโปรแกรมจำลองทั่วไปมีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนแบบจำลองแต่ต้องอาศัยทักษะ ความรู้ และเวลาจากผู้ใช้งานอย่างสูงเนื่องจากไม่ได้ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเจาะจงสำหรับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ ดังนั้น ผู้ใช้งานจำเป็นต้องป้อนข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ด้วยตนเอง ดังนั้น อาจเกิดความผิดพลาดจากการป้อนรหัสคำสั่งขึ้นได้ ทำให้ผลการทำนายจากแบบจำลองไม่ถูกต้องได้ ทำให้ผู้ใช้งานต้องเสียเวลาเพื่อค้นหาข้อผิดพลาดเหล่านั้น (Gernaey et al., 2004) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโปรแกรมจำลองทั่วไปมีความยืดหยุ่น ต้องป้อนรหัสคำสั่งด้วยตนเอง ดังนั้น จึงสามารถปรับเปลี่ยนแบบจำลองตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานแบบจำลองได้ เช่น นำมาใช้ในการวิจัยและพัฒนารูปแบบของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ใหม่ เป็นต้น

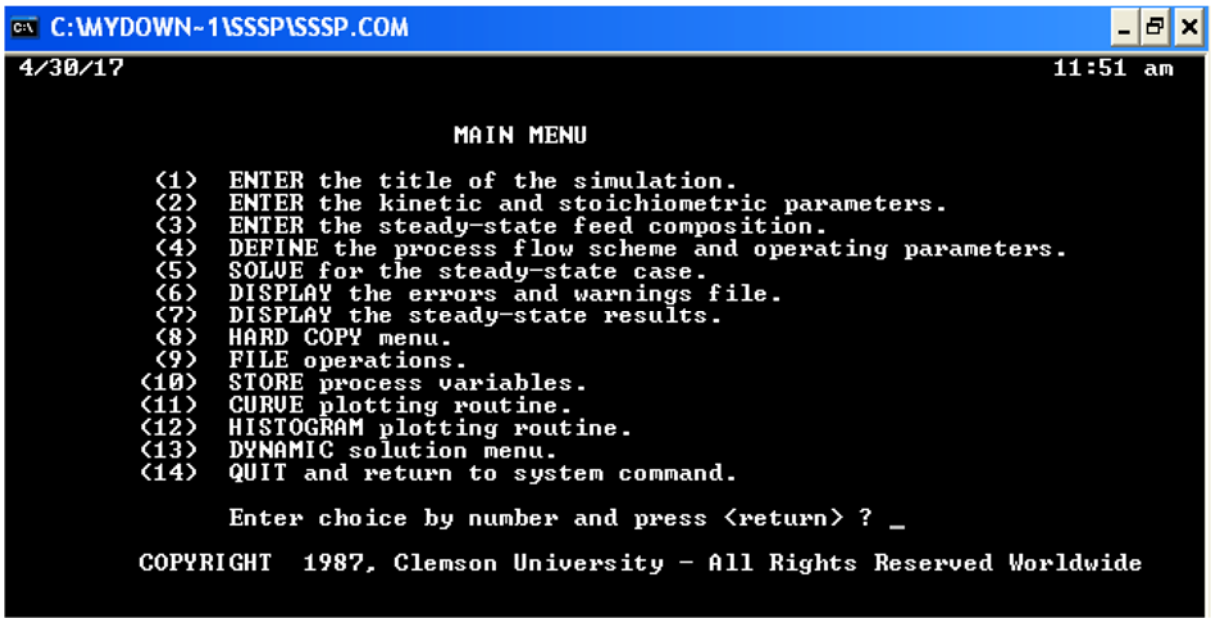
ตัวอย่างโปรแกรมจำลองทั่วไปที่มักนิยมนำมาใช้งานการจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ ได้แก่ MATLAB/SIMULINK ดังภาพที่ 2 หรือ Microsoft Excel เป็นต้น



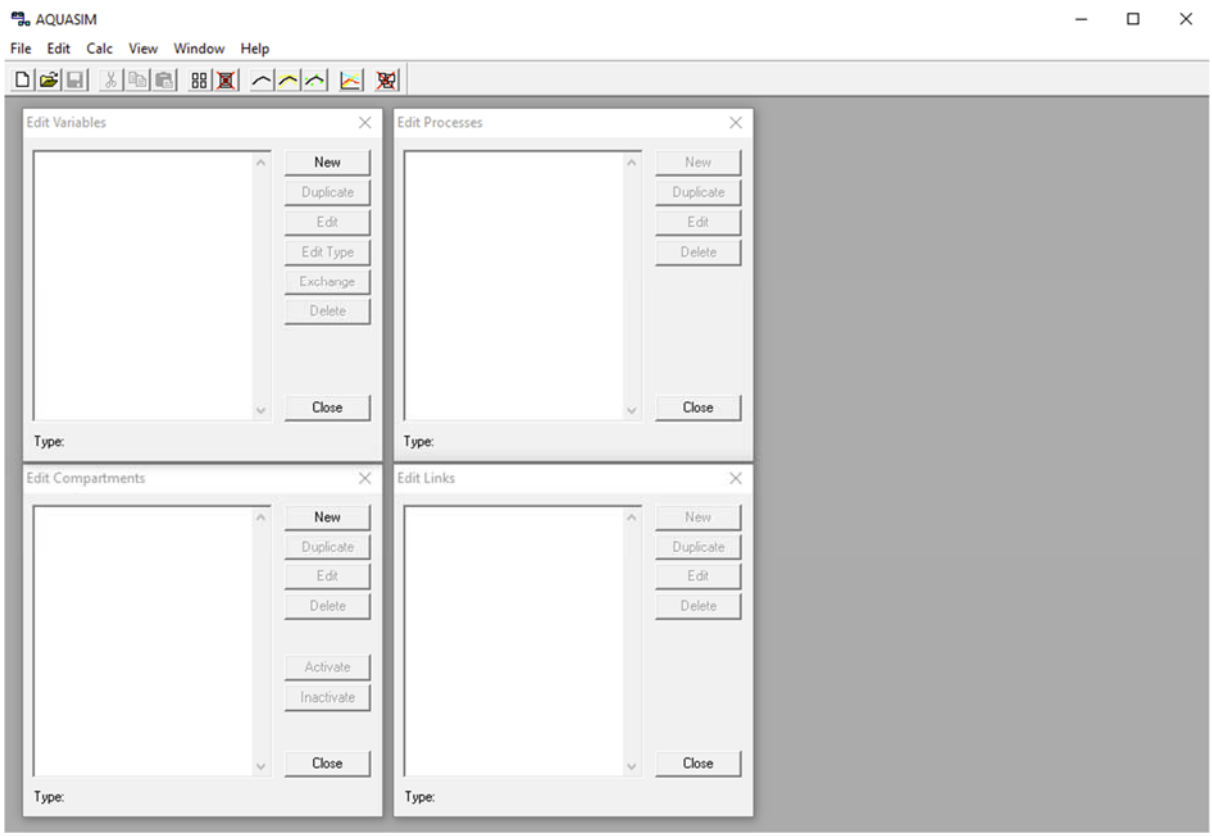
ที่มา: Copp (2002)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการใช้ Simulink ของ MATLAB

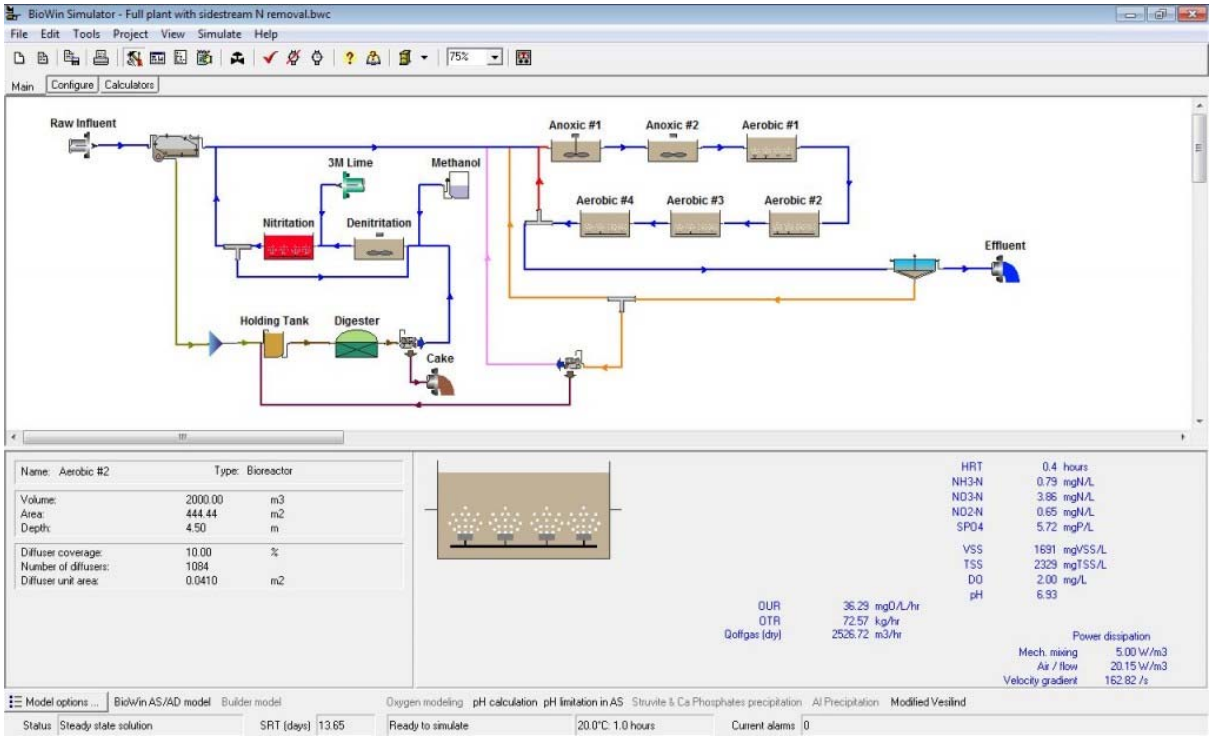
ซึ่งตรงกันข้ามกับโปรแกรมจำลองจำเพาะที่ถูกพัฒนามาโดยเฉพาะสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์ มีการติดตั้งแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ เช่น ASM1, ASM2 เป็นต้น ไว้เรียบร้อยแล้ว ทำให้ลดขั้นตอนและเวลาในการประยุกต์แบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์ สำหรับการใช้งานโปรแกรมจำลองจำเพาะบางโปรแกรมสามารถเลือกหน่วยกระบวนการ (Process Unit) เช่น หน่วยถังเติมอากาศ หน่วยถังตกตะกอน หน่วยเชื่อมต่อ หน่วยตัวแยก เป็นต้น จากคลังของหน่วยกระบวนการของโปรแกรมแล้วนำมาประกอบเข้ากันเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ทำให้ประหยัดเวลาในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมจำลองจำเพาะอย่างง่าย ไม่มีข้อผิดพลาดสำหรับรหัสคำสั่งที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม การออกแบบมาโดยเฉพาะกับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์จึงทำให้ไม่สามารถดัดแปลงปรับเปลี่ยนโครงสร้างของแบบจำลองได้มากนัก โปรแกรมจำลองเฉพาะที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อรองรับแบบจำลอง ASM1 คือ SSSP (Simulation of Single Sludge Processes) ดังภาพที่ 3, AQUASIM ดังภาพที่ 4, ASIM (Activated Sludge SIMulation Program), STOT, BIOWIN ดังภาพที่ 5, GPS-X เป็นต้น โปรแกรมจำลองเฉพาะส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทางการค้าที่มีราคาสูง โดยเฉพาะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ BIOWIN และ GPS-X ซึ่งค่าลิขสิทธิ์การใช้งานเป็นรายปี เช่น BIOWIN คิดค่าลิขสิทธิ์เท่ากับ $2500 ต่อปี หรือ $8000 หากซื้อลิขสิทธิ์ สำหรับ GPS-X นั้นคิดค่าลิขสิทธิ์ $3200 ต่อปี สำหรับรุ่นมาตรฐาน หรือ $3800 ต่อปีสำหรับรุ่น Professional เป็นต้น



ภาพที่ 3 รายการของคำสั่งในโปรแกรม SSSP ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ MS-DOS



ภาพที่ 4 ตัวอย่างของโปรแกรม AQUASIM รุ่นที่ 2.1



ภาพที่ 5 ตัวอย่างโปรแกรม BIOWIN จากบริษัท EnviroSim Associates

Copp (2002) ได้เปรียบเทียบการใช้งานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ ที่มีการใช้แบบจำลองรุ่น ASM1 ต่อมา มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นรุ่น ASM2 ที่ครอบคลุมถึงกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Phosphorus Accumulating Organisms (PAOs) หลังจากนั้น ก็มีการพัฒนาต่อมาเป็นรุ่น ASM2d ที่สามารถทำนายการใช้สารอินทรีย์ที่สะสมภายในเซลล์เพื่อการเจริญของแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่กำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะแอนนอกซิก (Anoxic Conditions) ส่วนพัฒนาการล่าสุดคือ แบบจำลองรุ่น ASM3 ที่มีปรับแก้ข้อผิดพลาดต่างๆ ที่พบในรุ่นก่อนๆ มีการเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการเก็บสะสมสารอินทรีย์ไว้ภายในเซลล์ในรูปของโพลีเมอร์อีกด้วย โดยสมมติว่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายจะถูกเก็บสะสมไว้ภายในเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่ม Heterotrophs อย่างรวดเร็วก่อนที่จะนำไปใช้ในการเจริญของจุลินทรีย์ โดย Koch และคณะฯ (2000) ได้สรุปว่า ASM1 และ ASM 3 นั้นมีศักยภาพในการจำลองพฤติกรรมของระบบบำบัดน้ำเสียเหมือนกัน แต่ ASM3 นั้นสามารถจำลองสถานการณ์ที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ภายในเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ เช่น กรณีของน้ำเสียอุตสาหกรรม หรือกรณีที่ส่วนหนึ่งของระบบเป็นสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Conditions) เช่น การจำลองระบบที่มีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ Henze และคณะฯ (2008) และ Gernaey และคณะฯ (2004) ได้รวบรวมแบบจำลองต่างๆ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่มีโครงสร้างของแบบจำลองเป็น ASM แสดงดังภาพที่ 6

Hauduc และคณะฯ (2009) สำรวจการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ASM พบว่า ร้อยละ 59 ใช้ในการประเมินค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) แต่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 42 และใช้สำหรับการทำนายผลของการเดินระบบร้อยละ 21 นอกจากนั้น งานวิจัยดังกล่าวยังสำรวจในพื้นที่กลุ่มประเทศยุโรปและประเทศสหรัฐอเมริกา ดังภาพที่ 7 โดยพบว่า กลุ่มประเทศยุโรปใช้แบบจำลองส่วนใหญ่เพื่อการวิจัย ส่วนทางสหรัฐอเมริกาใช้แบบจำลองส่วนใหญ่โดยบริษัทเอกชนเพื่อการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม การ

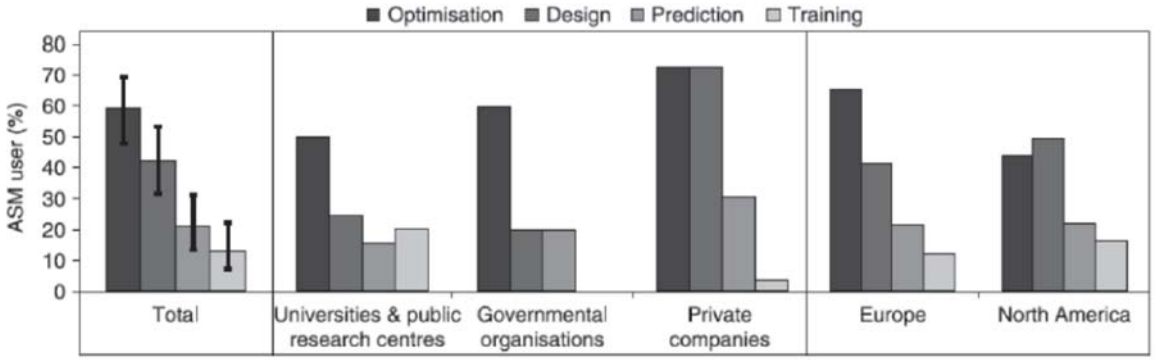
ประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ASM สำหรับการออกแบบและเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก

Model	Nitrification	Denitrification	Heterotrophic / autotrophic decay	Hydrolysis	EBPR	Denitrifying PAO	Lysis of PAO / PHA	Fermentation	Chemical P removal	Reactions	State variables	Reference
UCTOLD	●	●	DR, Cst	EA						8	13	Dold *et al.*, 1980, 1991
ASM1	●	●	DR, Cst	EA						8	13	Henze *et al.*, 1987
ASM3	●	●	ER, EA	Cst						12	13	Gujer *et al.*, 1999
UCTPHO	●	●	DR, Cst	EA	●		Cst	●		19	19	Wentzel, 1988, 1989a,b
ASM2	●	●	DR, Cst	EA	●		Cst	●	●	19	19	Henze *et al.*, 1995
ASM2d	●	●	DR, Cst	EA	●	●	Cst	●	●	21	19	Henze *et al.*, 1999
B&D	●	●	DR, Cst	EA	●	●	EA	●		36	19	Barker and Dold, 1997
TUDP	●	●	DR, Cst	EA	●	●	EA	●		21	17	Meijer, 2004
ASM3-bioP	●	●	ER, EA	Cst	●	●	EA			23	17	Rieger *et al.*, 2001

Den. PAO, Denitrifying PAO activity included in the model; DR, death regeneration concept; EA, electron acceptor depending; ER, endogenous respiration concept; Cst= not electron acceptor depending

ที่มา: Henze et al., 2008

ภาพที่ 6 ภาพรวมของแบบจำลอง ASM รุ่นต่างๆ ที่เผยแพร่



ที่มา: Hauduc et al., 2009

ภาพที่ 7 วัตถุประสงค์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาตร์ ASM จากการสำรวจจำแนกเป็นทวีปและหน่วยงาน

สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะนั้นมีการรวมข้อมูลที่เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียลงในโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเสียเวลาในการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียอีก ทำให้ผู้ใช้งานประหยัดเวลาในการป้อนข้อมูล เหลือเพียงแต่ป้อนข้อมูลที่จำเป็นเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียเท่านั้น อย่างไรก็ตาม โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประเภทนี้มักขาดความยืดหยุ่นในการพัฒนาแบบจำลองต่อไปให้มีศักยภาพสูงขึ้น นอกจากนั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เหล่านี้มักจัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้าและมีราคาสูง ทำให้การ

เข้าถึงโปรแกรมเหล่านี้เพื่อการใช้งานในประเทศไทยเป็นไปได้ยาก ตัวอย่างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะ ได้แก่ BioWin, GPS-X, SIMBA, Plan-It STOAT และ WEST เป็นต้น

สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel นั้นเป็นหนึ่งในชุดโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Office ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์เพื่อใช้งานในสำนักงาน Microsoft Excel เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เน้นการคำนวณ จึงนิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ โดยปกติ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมักมีชุดโปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้ติดตั้งอยู่แล้วและสามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS นอกจากนี้ โปรแกรม Microsoft Excel ยังรองรับการเขียนโปรแกรมเสริมการทำงานของโปรแกรมด้วยชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่าง VBA และแผ่นงาน (Spreadsheet) ด้วย Excel Object Model ดังนั้น หากสามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียโดยเฉพาะที่ทำงานได้บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel ที่ปกติติดตั้งอยู่แล้วบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและสามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS และโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ใช้ภาษาไทย ส่งผลให้การใช้งานโปรแกรมมีความสะดวกมากขึ้น สามารถเข้าถึงโปรแกรมได้ตลอดเวลา ติดตั้งง่าย และมีราคาถูก ทำให้วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ หรือนักวิจัยสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้งานในการออกแบบ ปรับปรุง วิจัย หรือวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ที่ทำงานได้บนโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ที่มีความสะดวก ใช้งานง่าย มีราคาถูก เข้าถึงได้ตลอดเวลา และติดตั้งง่ายบนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS ได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยใช้ชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ทำงานบนโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปของ Microsoft Office ที่สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS ได้ โดยขอบเขตของโครงการ มีดังนี้

1.3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นมีโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับระบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์ (Activated Sludge Model, ASM)

1.3.2 การจำลองมีสมมติฐานว่าถังตกตะกอนขั้นที่สองทำงานโดยสมบูรณ์

1.3.3 การจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์และการใช้สารอาหารที่สภาวะคงตัวเท่านั้น (Steady State Conditions)

1.3.4 สภาวะของถังปฏิกิริยาชีวภาพเป็นทั้งแบบเติมอากาศและไร้อากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หลังสิ้นสุดการวิจัยและพัฒนาจะได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาไทยที่ทำงานบน Microsoft Excel สำหรับการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ASM ทำให้โปรแกรมสำหรับการจำลองระบบมีความสะดวกในการใช้งาน เข้าถึงโปรแกรมได้ตลอดเวลา ติดตั้งง่าย และมีราคาถูก ส่งผลให้วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ หรือนักวิจัยสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้งานได้ในการ

ออกแบบ ปรับปรุง วิจัย หรือวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียได้ นอกจากนั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นสื่อการสอนสำหรับการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ในหลักสูตรระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาที่มีการเรียนการสอนเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

วิธีการดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัจด์นั้นโดยใช้ชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่สามารถทำงานเชื่อมต่อกันระหว่าง VBA และแผ่นงาน (Spreadsheet) ของโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ซึ่งสามารถทำได้ด้วยโมดูลที่เรียกว่า Excel Object Model การป้อนข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ดำเนินการโดยใช้แผ่นงานของ Microsoft Excel เช่นเดียวกันกับการแสดงผลของการประมวลผลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกเปรียบเทียบและทดสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์หลายๆ ชุด และทำการเปรียบเทียบผลการทำนายกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางการค้าเพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์

2.1 โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel

โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel นั้นเป็นหนึ่งในชุดโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Office ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์เพื่อใช้งานในสำนักงาน Microsoft Excel เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เน้นการคำนวณ จึงนิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ โดยปกติ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมักมีชุดโปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้ติดตั้งอยู่แล้วและสามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS นอกจากนี้ โปรแกรม Microsoft Excel ยังรองรับการเขียนโปรแกรมเสริมการทำงานของโปรแกรมด้วยชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่าง VBA และแผ่นงาน (Spreadsheet) ด้วย Excel Object Model โดยโปรแกรม Microsoft Excel ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์ของโครงการวิจัยนี้เป็น Microsoft Excel เวอร์ชั่น 2016 ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows 10 Professional รุ่น 1903

2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์และระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะสำหรับงานประมวลผลระดับสูงที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel Core i7-8700 ไม่น้อยกว่า 6 แกนหลัก (6 core) โดยมีความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานไม่น้อยกว่า 3.2 GHz และมีเทคโนโลยีเพิ่มสัญญาณนาฬิกาได้ในกรณีที่ต้องใช้ความสามารถในการประมวลผลสูง จำนวน 1 หน่วย
2. หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) มีหน่วยความจำแบบ Cache Memory รวมในระดับ (Level) เดียวกันเท่ากับ 12 MB
3. มีหน่วยประมวลผลเพื่อแสดงภาพเป็นแผงวงจรเพื่อแสดงภาพแยกจากวงจรหลักที่มีหน่วยความจำขนาดเท่ากับ 4 GB
4. มีหน่วยความจำหลัก (RAM) ชนิด DDR4 –มีขนาดเท่ากับ 32 GB
5. มีหน่วยจัดเก็บข้อมูลขนิด Solid State Drive (SSD) ขนาดเท่ากับ 256 GB จำนวน 1 หน่วย และหน่วยจัดเก็บข้อมูลขนิด SATA ขนาดความจุเท่ากับ 2 TB เพื่อการสำรองข้อมูล
6. มี DVD-RW จำนวน 1 หน่วย

7. มีช่องเชื่อมต่อระบบเครือข่าย (Network Interface) แบบ 10/100/1000 จำนวน 1 ช่อง
8. มีช่องเชื่อมต่อ (Interface) แบบ USB 3.1

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจน

ก. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบและกระบวนการทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ ASM1, ASM2, ASM2d และ ASM3

ข. พิจารณาคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

ค. พิจารณาคัดเลือกสารประกอบและกระบวนการทางชีวภาพที่มีผลกระทบสำคัญต่อการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองย่อย (Submodels) เพื่อนำไปใช้ประกอบเป็นแบบจำลองของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ทสลัดจ์

ก. พัฒนาแบบจำลองย่อยเพื่อระบุคุณลักษณะของน้ำเสีย (Influent Wastewater Characterization) ทำให้ทราบความเข้มข้นของตัวแปรสถานะ (State Variables) ขององค์ประกอบน้ำเสียที่มีการจำแนกตามสถานะทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)

ข. พัฒนาแบบจำลองจลนศาสตร์ชีวภาพ (Biokinetic Model)

ค. พัฒนาแบบจำลองของถังตกตะกอนขั้นที่สอง (Clarifier Model) เป็นแบบจำลองย่อยเพื่อจำลองถังตกตะกอนขั้นที่สอง

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบน Microsoft Excel ด้วยชุดภาษา VBA

ก. เขียนโปรแกรมด้วยชุดภาษา VBA เพื่อพัฒนาเป็น Add-in ที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณแบบจำลองย่อยต่างๆ

ข. เขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อแบบจำลองย่อยต่างๆ ให้สามารถทำงานด้วยกันได้ กลายเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ทั้งระบบ

ขั้นตอนที่ 4 การปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) กับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

ก. ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองกับชุดข้อมูลที่เป็นผลการทดลองของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์

ข. คัดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องสำหรับแบบจำลองด้วยการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐาน ประสบการณ์ และการปรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ให้ผลของการทำนายจากแบบจำลองให้ตรงกับผลการทดลอง

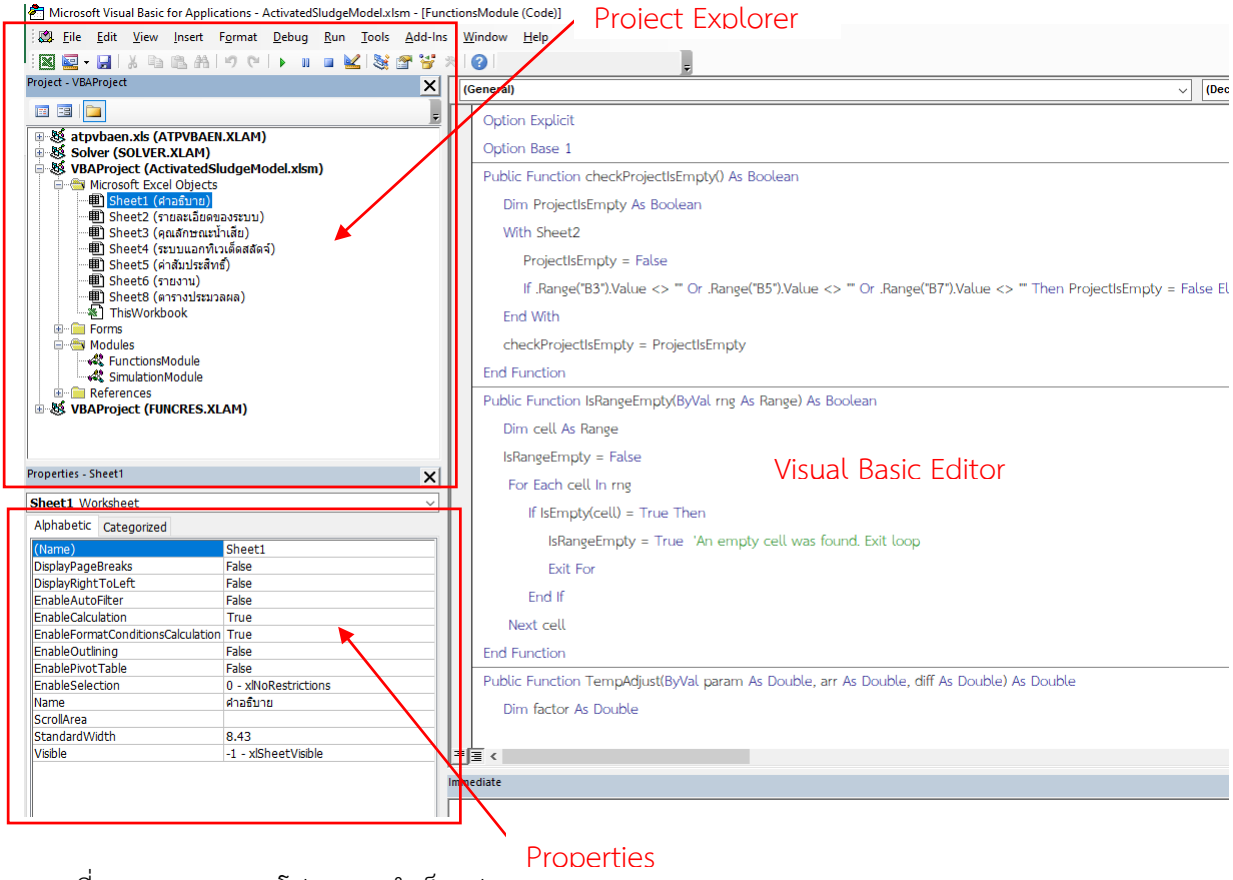
ขั้นตอนที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรมกับโปรแกรมสำเร็จรูป

ก. นำพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดและข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องมาทดสอบทั้งในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นและโปรแกรมที่

มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อการค้า โดยผลของการทำนายจากทั้งสองโปรแกรมต้องใกล้เคียงกัน

2.4 การใช้งาน VBA ในโปรแกรม Microsoft Excel

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในโครงการวิจัยนี้ดำเนินการในโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel โดยใช้ชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่มี IDE (Integrated Development Environment) ดังภาพที่ 9 เป็นเครื่องมือในการเขียนโค๊ดเพื่อพัฒนาโปรแกรม การเรียกใช้งาน IDE สำหรับ VBA ของโปรแกรม Microsoft Excel ทำได้โดยกดปุ่ม Alt+11 พร้อมกัน ทั้งนี้ IDE สำหรับ VBA ประกอบด้วยตัวช่วยจัดการโปรเจ็คที่เรียกว่า Project Explorer ดังแสดงในด้านซ้ายของภาพที่ 8 และ Editor แสดงทางด้านขวาของ IDE ที่เรียกว่า Visual Basic Editor (VBE) เพื่อใช้ในการเขียนคำสั่งต่างๆ ด้วยภาษาเบสิก (Basic) ส่วนด้านล่างของ Project Explorer ยังมีตัวช่วยเพื่อใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของวัตถุ (Object) แต่ละส่วนที่ใช้ใน VBA อีกด้วย โดยหน้าต่าง Project Explorer ทำหน้าที่ในการควบคุมโปรเจ็คงานทั้งหมด แต่ละโปรเจ็คประกอบด้วยส่วนประกอบที่เรียกว่า อออเจ็กต์ (Object) ต่างๆ โดย VBA มอง Workbook และ Worksheet ของโปรแกรม Microsoft Excel เป็นออบเจ็กต์ตัวหนึ่ง



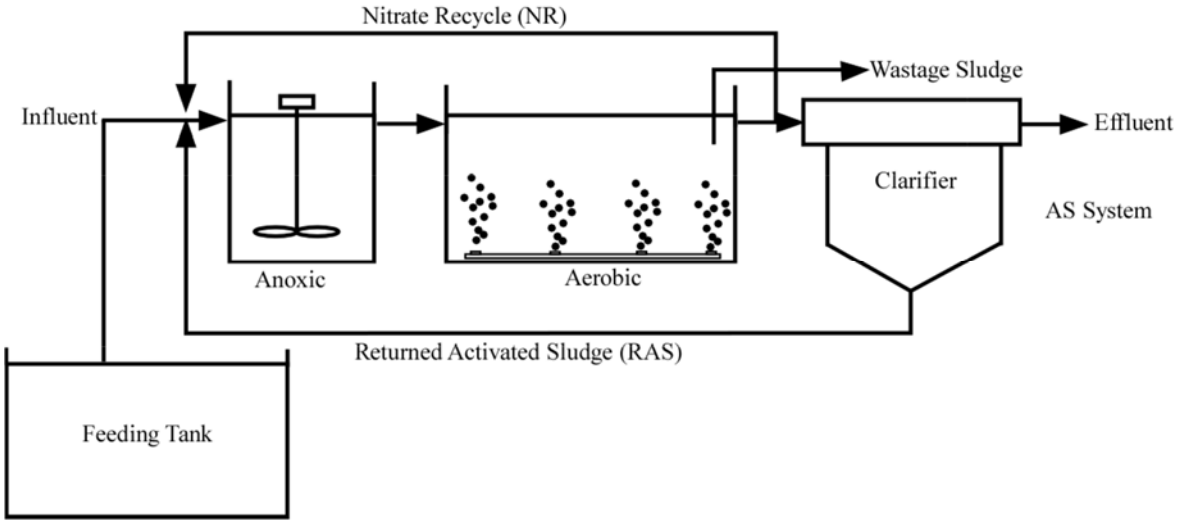
ภาพที่ 8 VBA IDE ของโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel

หากเปิด IDE ของ VBA แล้วไม่พบหน้าต่าง Project ให้กดปุ่ม Ctrl+R หรือเลือกเมนู View->Project Explorer แต่หากไม่พบ Properties ให้กดปุ่ม F4 หรือเลือกเมนู View->Properties Window และหากไม่พบ VBE ให้กดปุ่ม F7 หรือเลือกเมนู View->Code

รายละเอียดการใช้งาน IDE เพื่อเขียน VBA และการเขียนคำสั่งภาษาเบสิกนั้น สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องได้

2.5 การปรับเทียบแบบจำลองกับระบบบำบัดน้ำเสียจำลองแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

โครงการวิจัยมีการจัดทำระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์จำลองชนิด Modified Ludzak Ettinger (MLE) จำนวน 1 ระบบ ดังภาพที่ 9 ซึ่งประกอบด้วยถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกนั้นทำด้วยวัสดุที่เป็นอะคริลิกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ 7.9 ลิตร โดยมีการติดตั้งใบกวนแบบ Turbine ประเภท 4 ใบพัด เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 13 เซนติเมตร จัดทำขึ้นจากวัสดุสแสตนเลสเพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำเสีย ใบกวนติดตั้งอยู่ในแนวดิ่งต่อเชื่อมกับมอเตอร์ด้วยแกนหมุนสแตนเลส มีความเร็วรอบเท่ากับ 50 รอบต่อนาที ถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกนี้มีการป้อนน้ำเสีย มีตะกอนจุลินทรีย์ที่สูบกลับจากถังตกตะกอน และตะกอนจุลินทรีย์ที่สูบหมุนเวียนมาจากถังปฏิกิริยาเติมอากาศด้วยอัตราการไหล 100% ของอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ส่วนถังปฏิกิริยาเติมอากาศนั้นทำด้วยวัสดุที่เป็นอะคริลิกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาตรเท่ากับ 21.6 ลิตร มีการติดตั้งหัวทรายเพื่อเติมอากาศที่ต่อเชื่อมกับปั๊มเติมอากาศเพื่อเติมอากาศให้อยู่ที่ประมาณ 4-5 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพื่อทำให้จุลินทรีย์สามารถแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกิริยาได้ สำหรับถังตกตะกอนของแต่ละระบบจัดทำขึ้นด้วยวัสดุสแตนเลสที่มีมีปริมาตรสุทธิเท่ากับ 3.5 ลิตร ถังตกตะกอนมีใบกวาดตะกอนทำด้วยวัสดุสแตนเลสต่อเชื่อมอยู่กับมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 5 รอบต่อนาที เพื่อกวาดตะกอนลงสู่ก้นถังตกตะกอนเพื่อการสูบกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกต่อไป เมื่อรวมปริมาตรเฉพาะถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกและถังปฏิกิริยาเติมอากาศ ทำให้มีปริมาตรรวมทั้งหมดของแต่ละระบบเท่ากับ 29.5 ลิตร



ภาพที่ 9 ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองประเภท Modified Ludzak-Ettinger (MLE)

ระบบบำบัดน้ำเสียนี้ถูกควบคุมการทำงานของระบบที่อุณหภูมิห้องประมาณ 28 องศาเซลเซียส ด้วยค่าอายุสลัดจ์ (Solid Retention Time, SRT) เท่ากับ 8.0 วัน และระยะเวลาเก็บกักชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง โดยน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีลักษณะคล้ายน้ำเสียชุมชน ถูกเตรียมจากการใช้สารเคมีต่างๆ คือ Sodium acetate (CH_3COONa), Sodium Bicarbonate ($NaHCO_3$), Ammonium Chloride (NH_4Cl), Dipotassium Hydrogen Phosphate (K_2HPO_4), Magnesium Sulfate ($MgSO_4$), Calcium Chloride ($CaCl_2$), Manganese Sulfate ($MnSO_4$), Yeast extract และ Dried Milk ที่ละลายลงในน้ำประปาเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 87.5 ลิตรต่อวัน นอกจากนั้น ยังมีการเติมแร่ธาตุรองอื่นๆ เพิ่มเติมในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นสารอาหารเพิ่มเติมแก่จุลินทรีย์ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ ทองแดง โมลิบเดท แมงกานีส และสังกะสี ทั้งนี้ สารเคมีส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่ใช้ทางการค้าเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า มีค่าซีโอดีทั้งหมด (Total Chemical Oxygen Demand, TCOD) เท่ากับ 418±21 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร มีค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) เท่ากับ 60.3±3.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium Nitrogen) เท่ากับ 34.3±1.2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

หลังจากเริ่มต้นการเดินระบบบำบัดน้ำเสียจำลองด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีหัวเชื้อแบคทีเรียผสมแล้ว การทดลองมีการเก็บตัวอย่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ตัวอย่างจากถังปฏิกิริยาแอนนอกซิก ถังปฏิกิริยาเติมอากาศ และน้ำใสที่อยู่ในถังตกตะกอน เพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ คือ Total Chemical Oxygen Demand (TCOD) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), Sludge Volume Index (SVI) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995), pH ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995) โดยใช้เครื่อง CyberScan pH 510), Dissolved Oxygen (DO) ตรวจวัดตามวิธีการของ Standard Methods (APHA, 1995) โดยใช้เครื่อง YSI รุ่น Pro20i, Nitrate Nitrogen (NO_3^--N) ตรวจวัดตามวิธีการ Brucine Method (APHA, 1995), Nitrite Nitrogen (NO_2^--N) ตรวจวัดตามวิธีการ Colorimetric Method (APHA, 1995) และ Ammonium Nitrogen (NH_4^+-N) ตรวจวัดตามวิธีการ Phenate Method (APHA, 1995) การตรวจวัดพารามิเตอร์ในรูปละลายน้ำ (Soluble) เช่น SCOD, NH_4^+-N, NO_2^--N, และ NO_3^--N ทำโดยการกรองตัวอย่างน้ำเสียด้วยกระดาษกรองที่มีความพรุน 0.45 ไมโครเมตร พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้ในน้ำใส (Filtrate) ที่ได้จากการกรองอยู่ในรูปละลายน้ำ

2.6 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรมกับโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

หลังจากเสร็จสิ้นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเด็ดสลัดจ์ โครงการวิจัยมีการเปรียบเทียบผลลัพทธ์การทำนายของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้กับโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบในโครงการนี้ คือ โปรแกรม IWAPRC หรือ UCTOLD (Dold et al., 1991, van Loosdrecht et al., 2015) เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยกลุ่มนักวิจัยที่เรียกว่า Water Research Group จากมหาวิทยาลัย Cape Town

ประเทศอาฟริกาใต้ และเป็นแบบจำลองที่เป็นต้นแบบของ ASM1 ของ IWA โดยเป็นโปรแกรมที่พัฒนาด้วยภาษาปาสคาล และทำงานบนระบบปฏิบัติการ DOS

ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรนิยมใช้มากที่สุด คือ แบบจำลองทางคณิตศาตร์ Activated Sludge Model (ASM) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยที่ International Association on Water Quality (IAWQ) (Henze et al., 2002) ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 4 รุ่น ดังนี้

1. แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์รุ่นที่ 1 (Activated Sludge Model No. 1, ASM1) เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้จำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัจด์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพเท่านั้น
2. หลังจากนั้น มีการพัฒนาแบบจำลองนี้อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 2 (Activated Sludge Model No. 2, ASM2) เพื่อเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองในการทำนายกระบวนการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพเนื่องจากมีงานวิจัยทางด้านการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพเกิดขึ้นจำนวนมาก
3. ต่อมา มีการศึกษาวิจัยและพบว่าแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทางชีวภาพนั้นสามารถใช้ซับสเตรตที่เก็บสะสมภายในเซลล์สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นได้ จึงทำให้มีการดัดแปลงแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เพื่อรวมการเกิดดีไนตริฟิเคชันของแบคทีเรียกลุ่มนี้ไว้ โดยเรียกแบบจำลองรุ่นย่อยนี้ว่า แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 2d (Activated Sludge Model No. 2d – ASM2d)
4. ปัจจุบัน แบบจำลองนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเมื่อความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองรุ่นที่ 3 ทีเรียกว่า แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 3 (Activated Sludge Model No. 3 – ASM3) เป็นแบบจำลองที่แก้ไขข้อบกพร่องของแบบจำลอง ASM1 ในส่วนของการใช้สารอินทรีย์เพื่อการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ มีการนำเสนอแบบจำลองการสะสมซับสเตรตภายในเซลล์และรูปแบบการจำลองในส่วนของการเสื่อมสลายใหม่ แบบจำลองเพื่อการกำจัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสไม่รวมอยู่ในแบบจำลองรุ่นนี้

จากการประเมินแบบจำลองทั้ง 4 รุ่น เพื่อนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานได้บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Microsoft Excel ที่สามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS ได้และใช้ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพไม่สูงมากนักได้ โครงการนี้จึงได้คัดเลือกแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์รุ่นที่ 1 (ASM1) เพื่อใช้ในโครงการนี้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนในน้ำเสียได้ โดยธาตุอาหารไนโตรเจนสามารถถูกกำจัดได้โดยกระบวนการทางชีวภาพที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่ง ASM1 นั้นได้รวมกระบวนการเหล่านี้เรียบร้อยแล้ว

สำหรับโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 นั้นใช้รูปแบบเมทริกซ์ (Matrix) ดังตารางที่ 1 เพื่อนำเสนอข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบและกระบวนการชีวเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ โดยตารางที่ 1 นำเสนอตัวอย่างกระบวนการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟที่ใช้ซับสเตรตที่ละลายน้ำเป็นแหล่งคาร์บอกและแหล่งพลังงานในสภาวะแอโรบิก

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบเมทริกซ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

ความต่อเนื่อง (Continuity) →					
สมดุลมวล (Mass Balance) ↓	ส่วนประกอบ (Component) *i* → *j* กระบวนการ (Process) ↓	1 X_B	2 S_S	3 S_O	อัตราการแปลงผันของกระบวนการ ρ_j [M L^{-3} T^{-1}]
	1 การเจริญ (Growth)	1	$-\frac{1}{Y}$	$-\frac{1-Y}{Y}$	$\frac{\mu_{max} S}{K_S + S} X_B$
	2 การเสื่อมสลาย (Decay)	-1		-1	bX_B
	อัตราการแปลงผัน (Conversion Rate) [M L^{-3} T^{-1}]	$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j \nu_{ij} \rho_j$			พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ (Kinetic Parameters): - อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) - ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัว (K_S) - อัตราการเสื่อมสลายจำเพาะ (b)
	พารามิเตอร์ทางปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiotric Parameters) : - สัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริง (True Yield (Y)	ชีวมวล (Biomass) [M (COD) L^{-3}]	ซับสเตรต (Substrate)	ออกซิเจน (Oxygen) [M (-COD) L^{-3}]	

ที่มา: ดัดแปลงจาก Henze et al. (1987)

ดังนั้น จึงมีส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง คือ X_B, S_S และ S_O นอกจากนั้น ยังมีกระบวนการที่เกี่ยวเนื่องมาจากการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรีย ได้แก่ กระบวนการใช้ซับสเตรตและการใช้ออกซิเจน สำหรับการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้แทนส่วนประกอบต่างๆ นั้น มีการกำหนดรูปแบบของส่วนประกอบเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ละลายน้ำ (Soluble Components) ใช้สัญลักษณ์ S และกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Components) ใช้สัญลักษณ์ X นอกจากนั้น ยังมีการหนดชื่อตัวแปรแต่ละตัวใช้กำกับในลักษณะที่เป็นดรรชนีล่าง (Subscript) อีกด้วย ตัวอย่างจากตารางที่ 1 พบว่า X_B ใช้กำหนดเป็นตัวแปรแทนแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำ ส่วน S_S และ S_O กำหนดให้เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดเป็นซับสเตรตและออกซิเจนที่มีลักษณะที่ละลายน้ำ ตามลำดับ ทั้งนี้ แต่ละตัวแปรจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนหน่วยให้เป็นหน่วยเดียวกันเสียก่อน โดยหน่วยที่ใช้ในแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นี้มีหน่วยเป็น M (COD) $L^{-3}T^{-1}$

สำหรับดรรชนี i นั้นใช้กำหนดหมายเลขลำดับตัวแปร เช่น 1, 2, 3 แสดงดรรชนีของแบคทีเรีย ซับสเตรต และออกซิเจน ตามลำดับ ส่วนดรรชนี j นั้นใช้กำหนดลำดับของกระบวนการในคอลัมน์แรกของตาราง เช่น 1 และ 2 เป็นลำดับของกระบวนการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรีย ตามลำดับ ส่วนคอลัมน์สุดท้ายนั้นแสดงอัตราของแต่ละกระบวนการโดยใช้สัญลักษณ์ ρj เช่น สมการ Monod ที่แสดงอัตราการเจริญของแบคทีเรียในกระบวนการที่ 1 (ρ_1) และปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สำหรับอัตราการเสื่อมสลายในกระบวนการที่ 2 (ρ_2) ส่วนกลางของเมทริกซ์นั้นแสดงสัมประสิทธิ์ทางปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Coefficients- νij) ที่ใช้ในแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของแต่ละส่วนประกอบในแต่ละกระบวนการ ตัวอย่างจากตารางที่ 1 ได้แก่ กระบวนการเจริญของแบคทีเรียทำให้ X_B มีการเพิ่มมวลในสัดส่วน (+1) ใช้ซับสเตรต S_S ในสัดสวน (-1/Y) และออกซิเจน S_O เท่ากับ ( ) จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่า หากทุกส่วนประกอบของแบบจำลองมีหน่วย

เดียวกันและมีความต่อเนื่องกันแล้ว ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ทางปริมาณสัมพันธ์ของแต่ละกระบวนการต้องเท่ากับศูนย์

สำหรับแบบจำลอง ASM1 เมทริกซ์ประกอบด้วย 8 กระบวนการ และ13 ส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2 นิยามของแต่ละส่วนประกอบพร้อมหน่วยแสดงดังตารางที่ 3 นอกจากนั้น แบบจำลองยังมีพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์และปริมาณสัมพันธ์จำนวน 14 และ 5 พารามิเตอร์ ตามลำดับ รวม 19 พารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4 (Henze et al., 1987)

แบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นั้นใช้สมการสมดุลมวลของแต่ละส่วนประกอบเป็นหลักสำคัญ โดยมวลของแต่ละส่วนประกอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับกระบวนการชีวเคมีต่างๆ ดังนั้น อัตราการแปลงผันของแต่ละส่วนประกอบจึงต้องรวมอัตราการแปลงผันของทุกกระบวนการเข้าด้วยกัน หากกำหนดให้ r_i คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนประกอบ i คำนวณได้จากผลรวมของแต่ละผลคูณของสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ (ν_{ij}) และอัตราเร็วของกระบวนการ (ρ_j) ดังสมการที่ 1

$$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j \nu_{ij}\rho_j \qquad (1)$$

ตัวอย่างเช่น หากต้องการสร้างสมการสมดุลมวลของแบคทีเรียในระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ จากตารางที่ 2 พบว่า มวล $X_{B,H}$ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการเจริญและการเสื่อมสลาย ดังนั้น เมื่อคำนวณอัตราแปลงผันรวมของมวลแบคทีเรีย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} r_{X_{B,H}} = {} & +\mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O}\right)X_{B,H} \\ & +\mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}\right)\eta_g X_{B,H} \\ & -b_H X_{B,H} \end{aligned} \qquad (2)$$

สำหรับอัตราแปลงผันรวมของซับสเตรตย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ (S_S) ตามแบบจำลอง ASM1 ดังตารางที่ 2 แสดงดังสมการที่ 3 หลังจากได้สมการอัตราแปลงผันรวมของแต่ละส่วนประกอบตามแบบจำลอง ASM1 แล้วจึงนำไปสร้างสมการสมดุลของมวลของแต่ละส่วนประกอบซึ่งต้องทราบมวลที่เข้าและออกจากระบบของแต่ละส่วนประกอบด้วย หากแบบจำลองกำหนดให้เป็นสภาวะคงตัวแล้ว อัตราที่มวลของแต่ละส่วนประกอบสะสมในระบบจะเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 2 เมทริกซ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1

สมดุลมวล (Mass Balance) ↓ / ความต่อเนื่อง (Continuity) →														
ส่วนประกอบ i → / j กระบวนการ ↓	1 S_I	2 S_S	3 X_I	4 X_S	5 $X_{B,H}$	6 $X_{B,A}$	7 X_P	8 S_O	9 S_{NO}	10 S_{NH}	11 S_{ND}	12 X_{ND}	13 S_{AKJ}	อัตราการแปลงผันของกระบวนการ ρ_j [M L^{-3} T^{-1}]
1. การเจริญของเฮเทอโรทรอฟในสภาวะแอโรบิก		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O}\right)X_{B,H}$
2. การเจริญของเฮเทอโรทรอฟในสภาวะแอนนอกซิก		$-\frac{1}{Y_H}$			1				$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$	$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14\cdot 2.86Y_H}-i_{XB}/14$	$\mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S+S_S}\right)\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}\right)\eta_g X_{B,H}$
3. การเจริญของออโททรอฟในสภาวะแอโรบิก						1		$-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB}-\frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14}-\frac{1}{7Y_A}$	$\mu_{max,A}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O}\right)X_{B,A}$
4. การเสื่อมสลายของเฮเทอโรทรอฟ				$1-f_P$	-1		f_P					$i_{XB}-f_P i_{XP}$		$b_H X_{B,H}$
5. การเสื่อมสลายของออโททรอฟ				$1-f_P$		-1	f_P					$i_{XB}-f_P i_{XP}$		$b_A X_{B,A}$
6. แอมโมนิฟิเคชั่นของไนโตรเจนอินทรีย์										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{ND} X_{B,H}$
7. ไฮโดรไลซิสของสารอินทรีย์		1		-1										$k_h\left(\frac{X_S/X_{B,H}}{K_X+(X_S/X_{B,H})}\right)\left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O}\right)+\eta_h\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}\right)\right]X_{B,H}$
8. การไฮโดรไลซิสของไนโตรเจนอินทรีย์											1	-1		$\rho_7(X_{ND}/X_S)$
อัตราการแปลงผัน [M L^{-3} T^{-1}]	$r_i=\sum_j \nu_{ij}\rho_j$													

ที่มา: ดัดแปลงจาก Henze et al. (1987)

ตารางที่ 3 คำนิยามของส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์

หมายเลข	สัญลักษณ์	คำนิยาม
1	S_I	ซับสเตรตเฉื่อยที่ละลายน้ำ [M (COD) L^{-3}]
2	S_S	ซับสเตรตย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ [M (COD) L^{-3}]
3	X_I	ซับสเตรตเฉื่อยที่เป็นอนุภาคแขวนลอย [M (COD) L^{-3}]
4	X_S	ซับสเตรตย่อยสลายยากทางชีวภาพ [M (COD) L^{-3}]
5	$X_{B,H}$	แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ [M (COD) L^{-3}]
6	$X_{B,A}$	แบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟ [M (COD) L^{-3}]
7	X_P	ผลิตภัณฑ์จากการเสื่อมสลายในรูปอนุภาค [M (COD) L^{-3}]
8	S_O	ออกซิเจน [M (-COD) L^{-3}]
9	S_{NO}	ไนเตรทและไนตรท์ไนโตรเจน [M (N) L^{-3}]
10	S_{NH}	แอมโมเนียมและแอมโมเนียไนโตรเจน [M (N) L^{-3}]
11	S_{ND}	ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ [M (N) L^{-3}]
12	X_{ND}	ไนโตรเจนอินทรีย์ที่เป็นอนุภาค [M (N) L^{-3}]
13	S_{ALK}	ความเป็นด่าง [หน่วยโมลาร์]

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์สำหรับแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์	สัญลักษณ์
การเจริญและการเสื่อมสลายของเฮเทอโรทรอฟ	$\mu_{max,H}$, K_S, $K_{O,H}$, K_{NO}, b_H
การเจริญและการเสื่อมสลายของออโททรอฟ	$\mu_{max,A}$, K_{NH}, $K_{O,A}$, b_A
ตัวปรับแก้สำหรับการเจริญของเฮเทอโรทรอฟในสภาวะแอนนอกซิก	η_g
สัมประสิทธิ์ของการแอมโมนิฟิเคชั่น	k_a
สัมประสิทธิ์ของการไฮโดรไลซิส	k_h, K_X
ตัวปรับแก้สำหรับการไฮโดรไลซิสในสภาวะแอนนอกซิก	η_h
พารามิเตอร์ทางปริมาณสัมพันธ์	**สัญลักษณ์**
สัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริงของเฮอเทอโรทรอฟ	Y_H
สัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริงของออโททรอฟ	Y_A
สัดส่วนของชีวมวลที่เป็นอนุภาค	f_P
อัตราส่วนมวลไนโตรเจนต่อมวลซีโอดีของชีวมวล	i_{XB}
อัตราส่วนมวลไนโตรเจนต่อมวลซีโอดีของผลผลิตจากชีวมวล	i_{XP}

$$r_{S_S} = -\frac{\mu_{max,H}}{Y_H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O}\right)X_{B,H}$$

$$-\frac{\mu_{max,H}}{Y_H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}\right)\eta_g X_{B,H}$$

$$+k_h\left(\frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})}\right)\left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O}\right) + \eta_h\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}\right)\right]X_{B,H} \quad (3)$$

ทั้งนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ รุ่นที่ 1 นั้นมีสมมติฐานและข้อจำกัดเพื่อทำให้ลดความซับซ้อนของแบบจำลอง การนำแบบจำลอง ASM1 นี้ไปใช้งานควรทราบข้อจำกัดและสมมติฐานดังต่อไปนี้เพื่อทำให้ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

1) เนื่องจากพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ที่ใช้ดังตารางที่ 4 นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในอัตราการแปรผันของกระบวนการ (ρ_i) นั้นจำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ใช้ออกแบบและควบคุมระบบเสียก่อน

2) แบบจำลอง ASM1 นั้นมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการควบคุมความเป็นกรดด่าง (pH) โดยแบบจำลองมีสมมติฐานว่าความเป็นกรดด่างของแบบจำลองมีค่าคงที่และเป็นกลาง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองมีส่วนประกอบที่เป็นความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งอาจใช้ในการระบุปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความเป็นกรดด่างได้

3) สัดส่วนของซับสเตรตต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของซับสเตรตในน้ำเสียอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาก็ตาม

4) ไม่มีการพิจารณาผลกระทบของธาตุอาหารหลักและรองที่มีต่อการเจริญของแบคทีเรียในแบบจำลองนี้ ดังนั้น ผู้ใช้งานแบบจำลอง ASM1 จำเป็นต้องมีสมมติฐานว่าธาตุอาหารหลักและรองที่จำเป็นต่อการเจริญของแบคทีเรียนั้นเพียงพอ

5) ตัวปรับแก้สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น (ηg และ ηh) นั้นมีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าตัวปรับแก้สองตัวนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ก็ตาม

6) พารามิเตอร์สำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชั่นมีค่าคงที่ ดังนั้น รวมผลกระทบใดๆ ที่มีผลกระทบทำให้เกิดการยับยั้งไนตริฟิเคชั่น จะต้องถูกปรับให้เสร็จสิ้นก่อนนำไปใช้ในแบบจำลอง ASM1

7) โครงสร้างของจุลินทรีย์ของชีวมวลภายในระบบของแบบจำลอง ASM1 มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของซับสเตรต หรือประเภทของระบบ หรือปัจจัยใดๆ

8) ซับสเตรตที่อยู่ในรูปของอนุภาคนั้นถูกสมมติว่าถูกจับติดภายในสลัดจ์โดยทันที

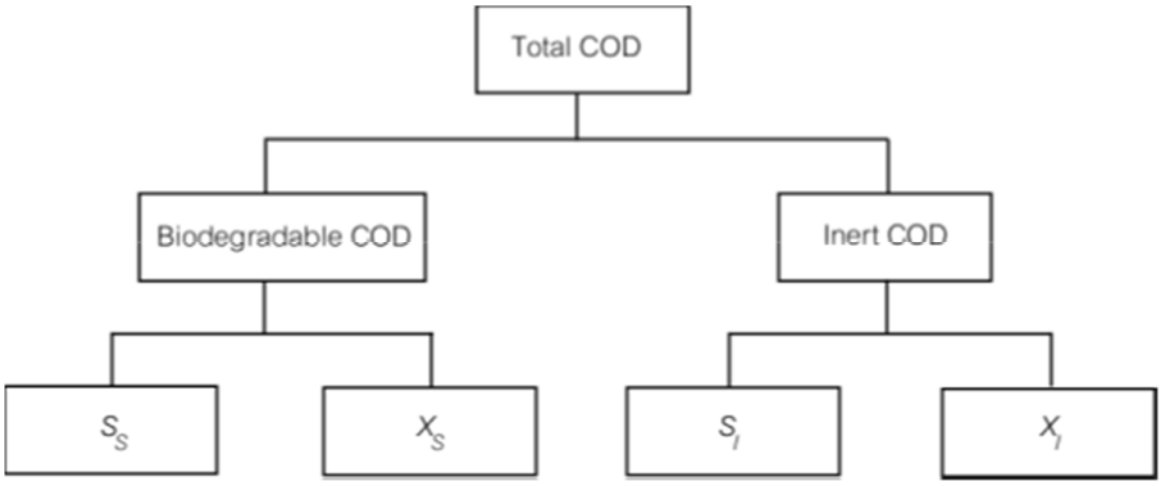
9) กระบวนการไฮโดรไลซิสของซับสเตรตและไนโตรเจนอินทรีย์สมมติว่าเกิดขึ้นพร้อมกันในระบบและเกิดขึ้นด้วยอัตราการแปลงผันเท่ากัน

10) ประเภทของตัวรับอิเล็กตรอนไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อการเสื่อมสลายของแบคทีเรีย

3.2 การพัฒนาแบบจำลองย่อยเพื่อจำแนกคุณลักษณะของน้ำเสียสำหรับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เพื่อการออกแบบและควบคุมระบบนั้นจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย คุณลักษณะของน้ำเสียมักถูกตรวจวัดในรูปของพารามิเตอร์ไม่จำเพาะ เช่น บีโอดี ซีโอดี ของแขวนลอยทั้งหมด หรือแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไม่ละเอียดเพียงพอต่อการนำมาใช้ในแบบจำลอง ASM1 ได้เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองที่เป็นแบบเชิงกลและเชิงกำหนด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณลักษณะโดยละเอียด โดยแบบจำลอง ASM1 จำแนกคุณลักษณะของน้ำเสียทางกายภาพออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ซับสเตรตที่ละลายน้ำและซับสเตรตที่เป็นอนุภาค เพื่อใช้ในแบบจำลอง ASM1 การระบุว่าซับสเตรตนั้นละลายน้ำนั้นมักนำไปกรองด้วยกระดาษกรองที่มีความพรุนขนาดต่างๆ กัน โดยทั่วไปซับสเตรตที่สามารถผ่านกระดาษกรองที่มีความพรุน 0.45 ไมครอน ถือว่าเป็นซับสเตรตที่ละลายน้ำได้ อย่างไรก็ตาม พบว่า การจำแนกคุณลักษณะน้ำเสียตามลักษณะทางกายภาพของซับสเตรตสำหรับแบบจำลอง ASM1 ไม่เพียงพอ จึงได้มีการจำแนกซับสเตรตโดยใช้คุณลักษณะเกี่ยวกับการย่อยสลายทางชีวภาพร่วมด้วย (Dold et al., 1980; Henze et al.,1987) ดังนั้น ซับสเตรตในน้ำเสียซึ่งบ่งชี้ในรูปของซีโอดีสำหรับการใช้งานในแบบจำลอง ASM1 นั้นจึงถูกจำแนกตามคุณลักษณะทางกายภาพและตามอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยจำแนกเป็นกลุ่มที่ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ (Readily Biodegradable Substrate -S_S) กลุ่มที่ย่อยสลายยากทางชีวภาพ (Slowly Biodegradable Substrate - X_S) และและกลุ่มเฉื่อยซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ สำหรับซับสเตรตเฉื่อยนั้นยังจำแนกย่อยตามลักษณะทางกายภาพของซับสเตรต คือ ซับสเตรตเฉื่อยละลายน้ำ (Insert Soluble Substrate – S_I) และที่เป็นอนุภาคแขวนลอย (Inert Suspended Substrate – X_I) (Henze et al., 1987) ทั้งนี้ ผลรวมซับสเตรตกลุ่มต่างๆ ที่บ่งชี้ในรูปซีโอดีต้องเท่ากับซีโอดีทั้งหมด (Total COD – S_T) ดังสมการที่ 4 และภาพที่ 10 ซึ่งแสดงแผนภูมิสัดส่วนซีโอดีต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะทางกายภาพและอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

$$S_T = S_S + X_S + S_I + X_I \qquad (4)$$



ภาพที่ 10 แผนภูมิสัดส่วนซีโอดีของน้ำเสีย

โดยรายละเอียดของซับสเตรตแต่ละประเภท มีดังนี้

1) ซับสเตรตเฉื่อยที่ละลายน้ำ (S_I) มักพบอยู่ในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นเป็นสารซับสเตรตที่มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำมากจนถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ซับสเตรตเหล่านี้ตกค้างอยู่ในน้ำทิ้งที่ไหลออกจากระบบ คอลัมน์ที่ 1 ของตารางที่ 2 ของแบบจำลอง ASM1 พบว่า ไม่มีปฏิกิริยาชีวเคมีใดๆ เกิดขึ้นกับซับสเตรตเฉื่อยที่ละลายน้ำนี้ ดังนั้น ซับสเตรตส่วนนี้จึงออกไปกับน้ำทิ้ง

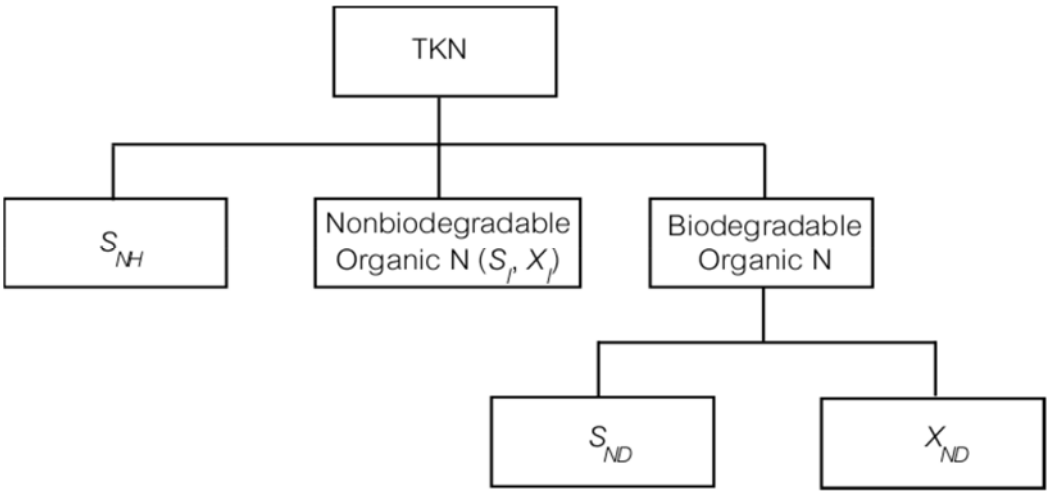
2) ซับสเตรตเฉื่อยที่เป็นอนุภาคแขวนลอย (X_I) มีคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับซับสเตรตเฉื่อยที่ละลายน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของซับสเตรตนี้ในน้ำเสียไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าสู่ระบบและออกจากระบบ ตามหลักการสมดุลมวล

3) ซับสเตรตย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ (S_S) เป็นซับสเตรตที่ละลายน้ำและเป็นโมเลกุลขนาดเล็กของคาร์โบไฮเดรต ไขมัน หรือ โปรตีน เช่น กรดอะซิติก กลูโคส หรือกรดอะมิโน เป็นต้น

4) ซับสเตรตย่อยสลายยากทางชีวภาพ (X_S) มีลักษณะตามสมมติฐานของแบบจำลอง ASM1 เป็นอนุภาคแขวนลอยและมีมวลโมเลกุลสูงจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อเปลี่ยนซับสเตรตให้เป็นซับสเตรตที่ย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพก่อนที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ภายในเซลล์ได้

สำหรับคุณลักษณะของน้ำเสียที่เป็นไนโตรเจนนั้น แบบจำลอง ASM1 ได้จำแนกไนโตรเจนในน้ำเสียออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ไนเตรทและไนไตรท์ไนโตรเจน (S_{NO}) แอมโมเนียมและแอมโมเนียมไนโตรเจน (S_{NH}) ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (S_{ND}) และไนโตรเจนอินทรีย์ที่เป็นอนุภาคแขวนลอย (X_{ND}) สำหรับการประเมินไนโตรเจนทั้งหมดนั้นใช้วิธีการวิเคราะห์ไนโตรเจนแบบเจลดาห์ล (Total Kjeldahl Nitrogen - TKN) ซึ่งสามารถตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์ (Organic Nitrogen) และแอมโมเนียและแอมโมเนียมทั้งหมดในน้ำเสียได้ หากตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียและแอมโมเนียในน้ำเสียแล้วก็สามารถคำนวณไนโตรเจนอินทรีย์ได้โดยนำมาหักลบจาก TKN สำหรับไนไตรท์และไนเตรทไนโตรเจนมักไม่พบในน้ำเสียชุมชนมากนัก

การจำแนกไนโตรเจนก็ทำได้เช่นเดียวกันกับซับสเตรตโดยอาศัยคุณลักษณะทางกายภาพ คือ ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำอยู่ในรูปของอนุภาค และอาศัยความสามารถในการถูกย่อยสลายได้และไม่ได้ทางชีวภาพทำให้จำแนกไนโตรเจนตามแบบจำลอง ASM1 คือ ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ในรูปที่ละลายน้ำ (Soluble Biodegradable Organic Nitrogen-S_{ND}) และไนโตรเจนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ในรูปอนุภาค (Particulate Biodegradable Organic Nitrogen-X_{ND}) ส่วนกลุ่มแอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจนและกลุ่มไนไตรท์และไนเตรทจัดเป็นไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้สามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ได้ทันที สัดส่วนของไนโตรเจนต่างๆ แสดงดังภาพที่ 11 สำหรับไนโตรเจนอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ในรูปอนุภาค (X_{ND}) จำเป็นต้องผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส ดังแสดงในกระบวนการที่ 8 ของแบบจำลอง ASM1 ในตารางที่ 2 โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟเพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนจากรูปอนุภาคให้เป็นรูปที่ละลายน้ำ (S_{ND}) ได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการที่สำคัญเพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้เป็นแอมโมเนียมหรือแอมโมเนียไนโตรเจนเพื่อเซลล์สามารถนำไปใช้ได้ทันที คือ แอมโมนิฟิเคชั่น (Ammonification) ดังแสดงในกระบวนการที่ 6 ของแบบจำลอง ASM1 ในตารางที่ 2 สำหรับไนโตรเจนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น แบบจำลอง ASM1 ได้รวมเข้าไว้ในส่วนประกอบที่เป็น S_I และ X_I โดยไนโตรเจนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นส่วนหนึ่งของซับสเตรตดังกล่าว



ภาพที่ 11 สัดส่วนของไนโตรเจนต่างๆ ในน้ำเสียตามแบบจำลอง ASM1

3.3 การพัฒนาแบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

แบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ (Biokinetic Model for COD Removal) ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 ดังตารางที่ 2 ประกอบไปด้วยกระบวนการชีวเคมีต่างๆ สำหรับการกำจัดซับสเตรตที่เป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ แบบจำลองมีกระบวนการเจริญเติบโตและการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟภายใต้สภาวะแอโรบิกและแอนนอกซิก รวมถึงกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อใช้จำลองการกำจัดสารอินทรีย์ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ มีดังนี้

กลุ่มแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟนี้ใช้ซับสเตรตที่เป็นสารอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งของคาร์บอนและเป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยมีตัวรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนภายใต้สภาวะแอโรบิก และมีไนเตรทไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะแอนนอกซิก อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง ASM1 แบคทีเรียกลุ่มนี้หยุดการเจริญภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกเนื่องจากไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่เป็นออกซิเจน ไนไตรท์หรือไนเตรทไนโตรเจน ซับสเตรทที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อสร้างพลังงานและสังเคราะห์เซลล์ คือ ซับสเตรตที่ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ (S_S) ที่จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เพื่อนำไปใช้ในการสร้างพลังงานและสังเคราะห์เซลล์ ดังสมการที่ 5

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O}\right)X_{B,H} \qquad (5)$$

อัตราการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ S_S และความเข้มข้นของออกซิเจน (S_O) ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยที่ออกซิเจนทำหน้าที่เป็นฟังก์ชั่นอิ่มตัวเพื่อปรับเปลี่ยนระหว่างสภาวะแอโรบิกและแอนนอกซิกซึ่งทำได้โดยใช้ฟังก์ชั่นอิ่มตัวของออกซิเจนที่มีค่าเข้าใกล้ 0 เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดต่ำลงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ $K_{O,H}$ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการสลับสภาวะ ส่งผลให้อัตราการเจริญของเฮเทอโรทรอฟปรับเปลี่ยนจากกระบวนการที่ 1 ไปเป็นกระบวนการที่ 2 ดังสมการที่ 7 ซึ่งแบคทีเรียใช้ไนเตรทไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะแอนนอกซิก หากในระบบไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่เป็นออกซิเจนและไนเตรท

ไนโตรเจนที่สภาวะแอนแอนโรบิกแล้ว ฟังก์ชั่นอิ่มตัวของทั้งสมการที่ 5 และ 6 เท่ากับ 0 ส่งผลให้ไม่มีการเจริญของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟในระบบ

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \eta_g \mu_{max,H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{B,H} \qquad (6)$$

นอกจากนั้น สมการที่สองยังมีตัวปรับแก้สำหรับการเจริญของเฮเทอโรทรอฟในสภาวะแอนนอกซิก η_g ซึ่งโดยปกติ มีค่าน้อยกว่า 1 เพื่ออธิบายความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตเซลล์ที่พบว่าสภาวะแอนนอกซิกมีค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตที่ต่ำกว่าสภาวะแอโรบิก ส่งผลให้สามารถใช้พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์สำหรับสภาวะแอนนอกซิกเดียวกันสภาวะแอโรบิกได้ สำหรับอัตราการใช้ซับสเตรต S_S ในสภาวะแอโรบิกและแอนนอกซิกแสดงดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

$$\frac{dS_S}{dt} = -\frac{\mu_{max,H}}{Y_H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \qquad (7)$$

$$\frac{dS_S}{dt} = -\eta_g \frac{\mu_{max,H}}{Y_H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{B,H} \qquad (8)$$

ส่วนอัตราการใช้ออกซิเจนและไนเตรทเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนนั้น สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

$$\frac{dS_O}{dt} = -\mu_{max,H} \left(\frac{1 - Y_H}{Y_H} \right) \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \qquad (9)$$

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = -\eta_g \mu_{max,H} \left(\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H} \right) \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{B,H} \qquad (10)$$

โดยที่ 2.86 คือ ค่าเทียบเท่าระหว่างไนเตรทและออกซิเจน (Oxygen Equivalent) เท่ากับ 2.86 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อมิลลิกรัมไนโตรเจน (mg O_2/mg NO_3^--N)

สำหรับกระบวนการสูญเสียมวลของแบคทีเรียในแบบจำลอง ASM1 แสดงดังกระบวนการที่ 4 ของตารางที่ 2 นั้นเป็นรูปแบบที่เรียกว่า Death-Regeneration นอกจากนั้น อัตราการเสื่อมสลายของมวลเฮเทอโรทรอฟนั้นคงที่ทั้งในสภาวะแอโรบิกหรือแอนนอกซิกที่มีตัวรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจนหรือไนเตรทไนโตรเจน ตามลำดับ อัตราการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการที่ 11

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = -b_H X_{B,H} \qquad (11)$$

จากตารางที่ 2 พบว่า แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟเมื่อเสื่อมสลายแล้วจะได้ซับสเตรตที่ย่อยสลายยากทางชีวภาพที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (X_S) ในสัดส่วนเท่ากับ 1- f_P ดังแสดงในสมการที่ 12 และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเสื่อมสลายที่เป็นซับสเตรตเฉื่อยยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพในรูปอนุภาค (X_P) ในสัดส่วนเท่ากับ f_P ดังสมการที่ 13

$$\frac{dX_S}{dt} = (1 - f_P) b_H X_{B,H} \qquad (12)$$

$$\frac{dX_P}{dt} = f_P b_H X_{B,H} \qquad (13)$$

3.4 การพัฒนาแบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชัน

สำหรับแบบจำลองย่อยทางจลนศาสตร์สำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Biokinetic Model for Nitrification) ของแบบจำลอง ASM1 กระบวนการไนตริฟิเคชั่นแสดงดังกระบวนการที่ 1 และมีการจำลองเพียงขั้นตอนเดียวเท่านั้นโดยรวมขั้นตอนไนตริเตชั่นและไนตราเตชั่นเข้าด้วยกันโดยมีสมมติฐานว่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของกลุ่ม *Nitrosomonas sp*. และกลุ่ม *Nitrobacter sp*. นั้นคล้ายกันทำให้ไม่เกิดการสะสมของไนไตรท์ภายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ โดยตารางที่ 2 มีตัวแปร S_{NO}, S_{NH}, S_{ND} และ X_{ND} เกี่ยวข้องกับกระบวนการไนตริฟิเคชั่น โดยกระบวนการที่ 3 ในตารางที่ 2 แสดงกระบวนการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟซึ่งสามารถนำไปเขียนสมการแสดงอัตราการเจริญและการเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟได้ดังสมการที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

$$\frac{dX_{B,A}}{dt} = \mu_{max,A}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O}\right)X_{B,A} \qquad (14)$$

จากสมการที่ 14 เห็นได้ว่าอัตราเจริญของแบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนโตรเจนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานและออกซิเจนเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนโดยมีรูปแบบเป็นสมการ Monod ที่มีฟังก์ชั่นอิ่มตัวของแอมโมเนียมและออกซิเจน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ต้องใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเท่านั้น สมการเขียนในรูปของฟังก์ชั่นอิ่มตัวซึ่งมีค่าระหว่าง 0 และ 1 ทำให้สามารถปรับอัตราการเจริญตามความเข้มข้นของซับสเตรตและออกซิเจนที่มีอยู่ได้ ส่วนอัตราการเสื่อมสลายดังสมการที่ 15 นั้นใช้รูปแบบ Death-Regeneration เช่นเดียวกันกับแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ โดยมีอัตราการเสื่อมสลายเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\frac{dX_{B,A}}{dt} = -b_A X_{B,A} \qquad (15)$$

สำหรับแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกไนตริไฟด์นั้นสามารถคำนวณอัตราไนตริฟิเคชั่นได้ดังสมการที่ 16 ส่วนไนเตรทไนโตรเจนเกิดขึ้นด้วยอัตราการผลิตไนเตรท ดังสมการที่ 17

$$\frac{dS_{NH}}{dt} = -\frac{\mu_{max,A}}{Y_A}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O}\right)X_{B,A} \qquad (16)$$

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = \frac{\mu_{max,A}}{Y_A}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O}\right)X_{B,A} \qquad (17)$$

จากสมการที่ 16 และ 17 พบว่า อัตราการใช้แอมโมเนียมไนโตรเจนเท่ากับอัตราการผลิตไนเตรทไนโตรเจน นอกจากนั้น สมการที่ 16 พบว่า ออกซิเจนถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 18

$$\frac{dS_O}{dt} = -\mu_{max,A}\frac{4.57-Y_A}{Y_A}\left(\frac{S_{NH}}{K_{NH}+S_{NH}}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,A}+S_O}\right)X_{B,A} \qquad (18)$$

โดยที่ 4.57 เป็นปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ 2 โมลในการเปลี่ยนแอมโมเนียม 1 โมลเป็นไนเตรทไนโตรเจน 1 โมล

3.5 การพัฒนาแบบจำลองย่อยสำหรับถังตกตะกอนขั้นที่สอง

ถังตกตะกอนชั้นที่สองของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นั้นติดตั้งเป็นหน่วยบำบัดสุดท้าย ทำหน้าที่แยกของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นชีวมวลของตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำทิ้ง สำหรับแบบจำลองย่อยสำหรับถังตกตะกอนขั้นที่สอง (Clarifier Model) ของแบบจำลองย่อยของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นี้ได้กำหนดให้เป็นแบบจำลองถังตกตะกอนในอุดมคติ (Ideal Clarifier) ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ 100% ของมวลของแข็งแขวนลอย ทำให้ตะกอนของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่จมตัวในถังตกตะกอนถูกสูบกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยาเติมอากาศได้ที่สภาวะคงตัว โดยเมื่อพิจารณาจากสมการสมดุลมวลรอบถังตกตะกอนที่สภาวะคงตัว ดังสมการที่ 19

$$\text{Accumulation} = \text{Mass In} - \text{Mass Out} \qquad (19)$$

ที่สภาวะคงตัว ทำให้ Accumulation เท่ากับศูนย์ ทำให้ได้ Mass In = Mass Out และเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ สามารถแสดงดังสมการที่ 20

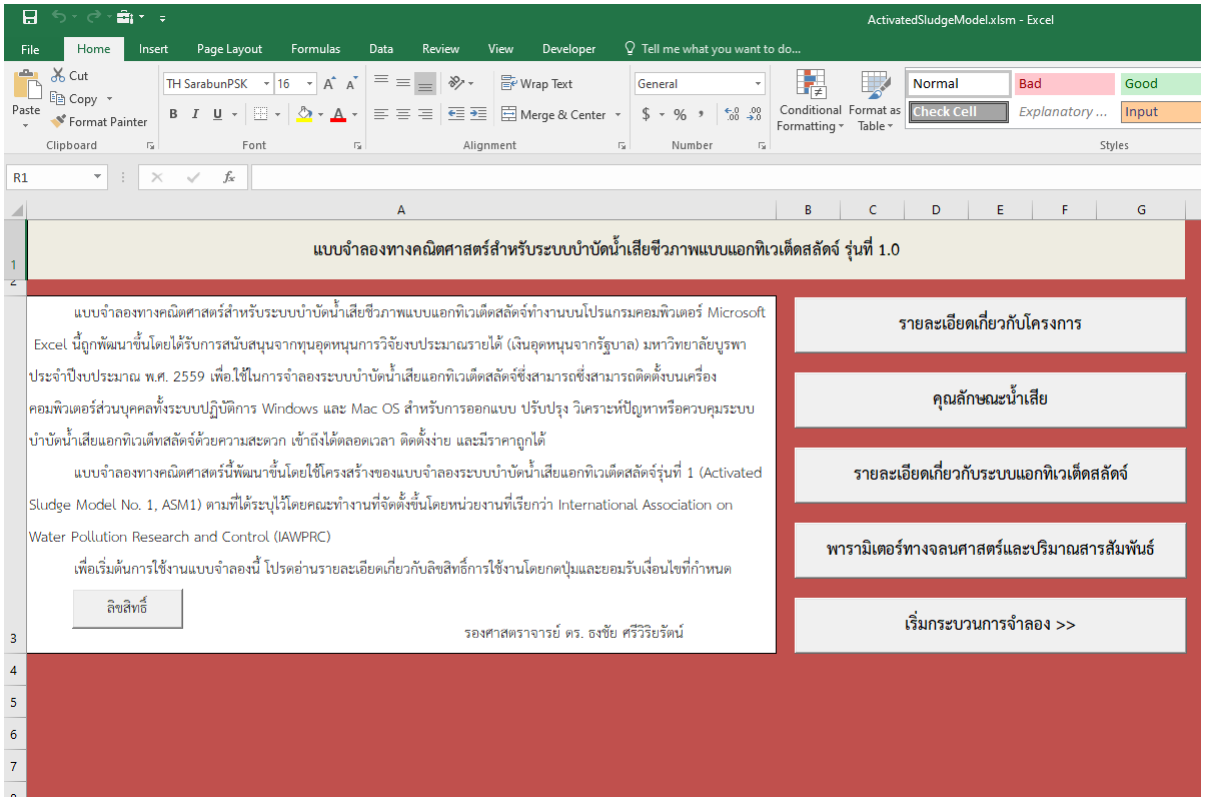
$$Q_i X_i = Q_u X_u + Q_e X_e \qquad (20)$$

โดยที่ Q_i, Q_u และ Q_e คือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังตกตะกอนขั้นที่สอง อัตราการไหลของสลัดจ์ที่สูบออกจากถังตกตะกอน และอัตราการไหลของน้ำทิ้งที่ไหลออกจากถังตกตะกอน ตามลำดับ และ X_i X_u และ X_e คือ ความเข้มข้นของสลัดจ์ที่เข้าสู่ถังตกตะกอน ความเข้มข้นของสลัดจ์ที่สูบจากก้นถังตกตะกอน และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ไหลออกจากถังตกตะกอนขั้นที่สอง ตามลำดับ

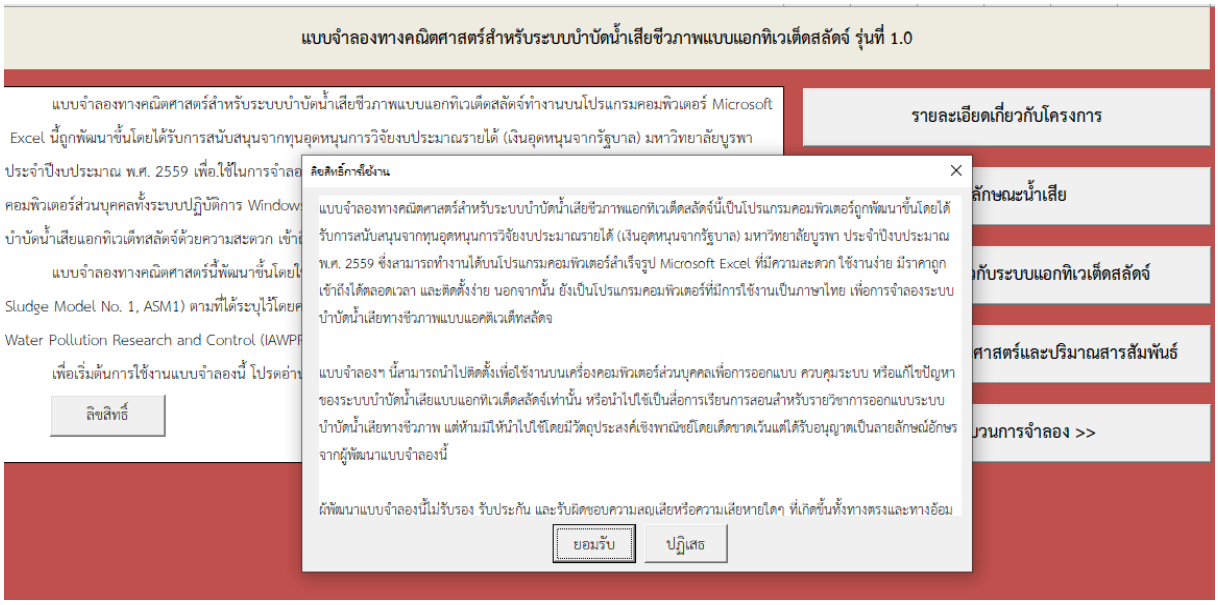
3.6 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบน Microsoft Excel ด้วยชุดภาษา VBA

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์เริ่มต้นพัฒนาด้วยการใช้ Worksheet เพื่อเขียนรายละเอียดหน้าแรกของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนโปรแกรม Microsoft Excel ดังแสดงในภาพที่ 12 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ เรียกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ รุ่นที่ 1 หรือเรียกในชื่อย่อว่า “VBA-ASM-1” โดยหน้าแรกประกอบรายละเอียดเกี่ยวกับโปรแกรมนี้และปุ่มเมนูต่างๆ โดยปุ่มเมนูเหล่านี้ถูกปิดการใช้งานตอนเริ่มต้นจนกว่าจะมีการยอมรับในลิขสิทธิ์การใช้งาน การเปิดการใช้งานโปรแกรมทำได้โดยการกดปุ่ม “ลิขสิทธิ์”ด้านท้ายของรายละเอียดของโปรแกรม หลังจากกดปุ่มดังกล่าวแล้วจะมีแบบฟอร์มแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของโปรแกรมนี้ ดังภาพที่ 13 โดยผู้ใช้งานต้องมีการยอมรับในเงื่อนไขการใช้งาน หากปฏิเสธในเงื่อนไขการใช้งานแล้ว ปุ่มต่างๆ เหล่านี้จะยังคงปิดการใช้งานต่อไป ไม่สามารถใช้งานได้

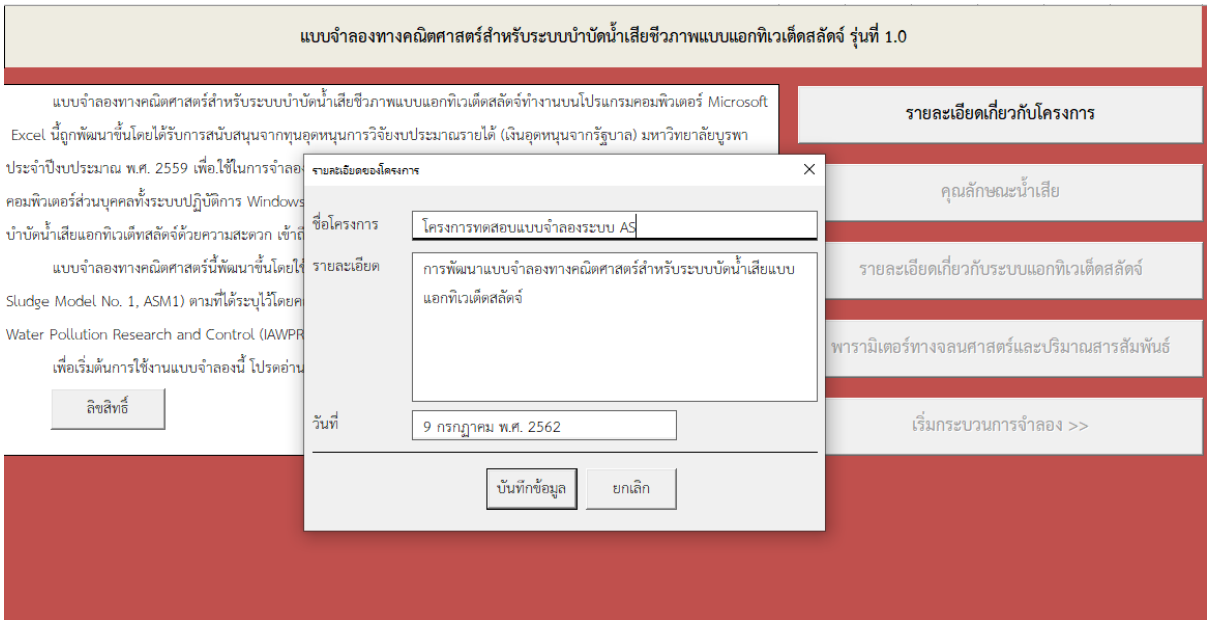
หลังจากยอมรับในเงื่อนไขการใช้งานโปรแกรมโดยกดปุ่ม “ยอมรับ”ปุ่มเมนูแรกที่เรียกว่า “รายละเอียดโครงการ” ถูกเปิดใช้งานโดยอัตโนมัติ ผู้ใช้งานสามารถกรอกชื่อโครงการ ตลอดจนรายละเอียดต่างๆ และวันที่ที่ใช้งานแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 14 หลังจากกรอกข้อมูลครบถ้วนให้กดปุ่ม “บันทึกข้อมูล”



ภาพที่ 12 หน้าแรกของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์



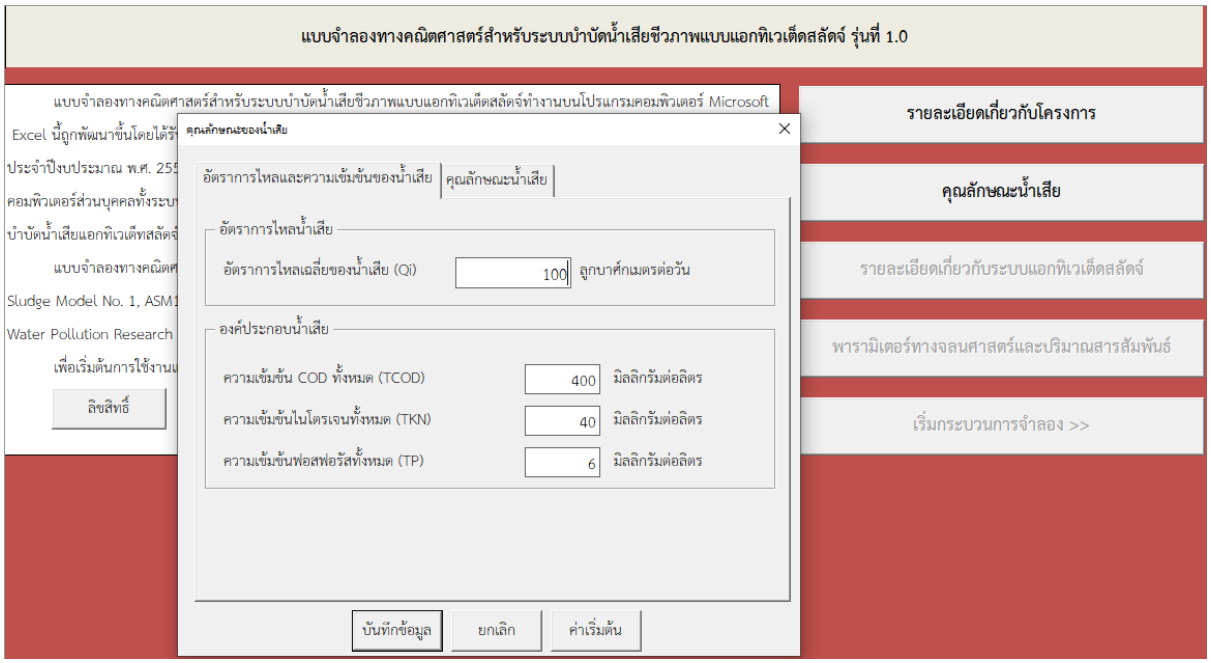
ภาพที่ 13 ลิขสิทธิ์การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของแบบจำลอง



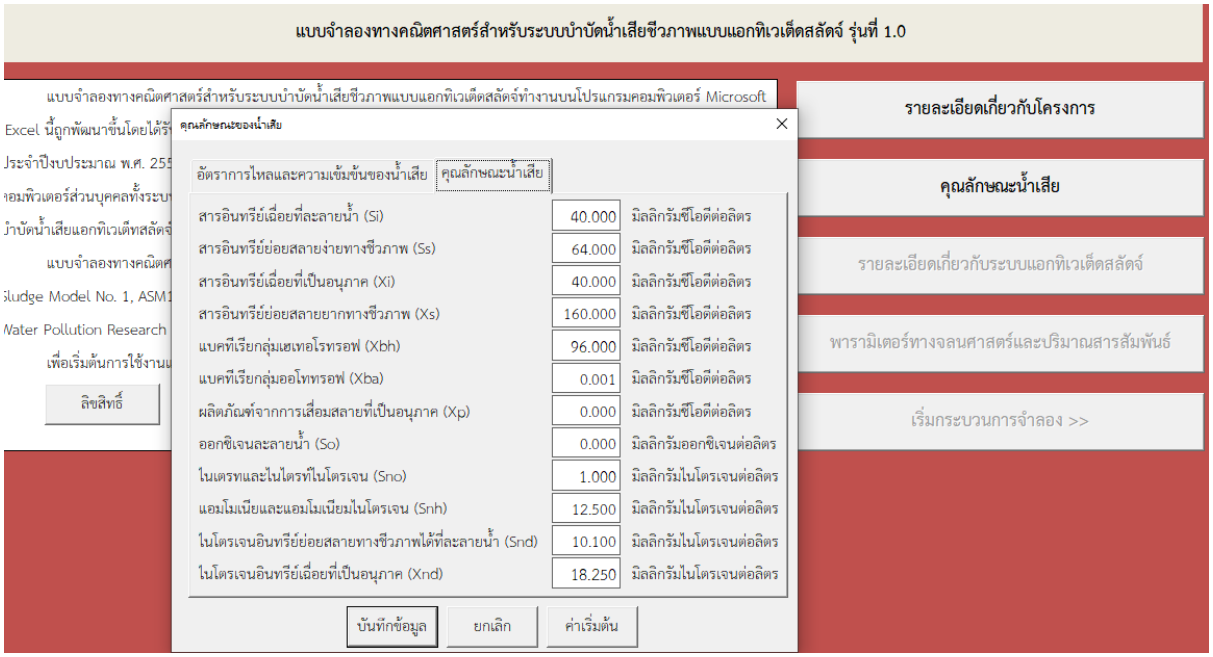
ภาพที่ 14 แบบฟอร์มการกรอกรายละเอียดของโครงการภายในแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์

หลังจากนั้น ปุ่มที่เรียกว่า “คุณลักษณะน้ำเสีย” จะถูกเปิดใช้งานอัตโนมัติ เมื่อกดปุ่ม “คุณลักษณะน้ำเสีย” แล้วแบบฟอร์มดังภาพที่ 15 ปรากฏขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถกรอกรายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะน้ำเสีย โดยแบบฟอร์มดังกล่าวประกอบด้วย 2 แถบ แถบที่ 1 เป็นแบบฟอร์มเพื่อกรอกข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับน้ำเสีย ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเสียเฉลี่ย มีหน่วยเป็นลูกบาศ์กเมตรต่อวัน และองค์ประกอบของน้ำเสีย ได้แก่ ความเข้มข้นของ COD ทั้งหมด (TCOD), ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยหน่วยที่ใช้คือ มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนแถบที่ 2 เป็นแบบฟอร์มเพื่อกรอกรายละเอียดของน้ำเสีย ดังภาพที่ 16 ซึ่งต้องกรอกองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

1. สารอินทรีย์เฉื่อยที่ละลายน้ำ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
2. สารอินทรีย์ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
3. สารอินทรีย์เฉื่อยที่เป็นอนุภาค มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
4. สารอินทรีย์ย่อยสลายยากทางชีวภาพ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
5. แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
6. แบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
7. ผลิตภัณฑ์จากการเสื่อมสลายในรูปอนุภาค มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
8. ออกซิเจน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
9. ไนเตรทและไนตรท์ไนโตรเจน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
10. แอมโมเนียมและแอมโมเนียไนโตรเจน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
11. ไนโตรเจนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
12. ไนโตรเจนอินทรีย์ที่เป็นอนุภาค มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



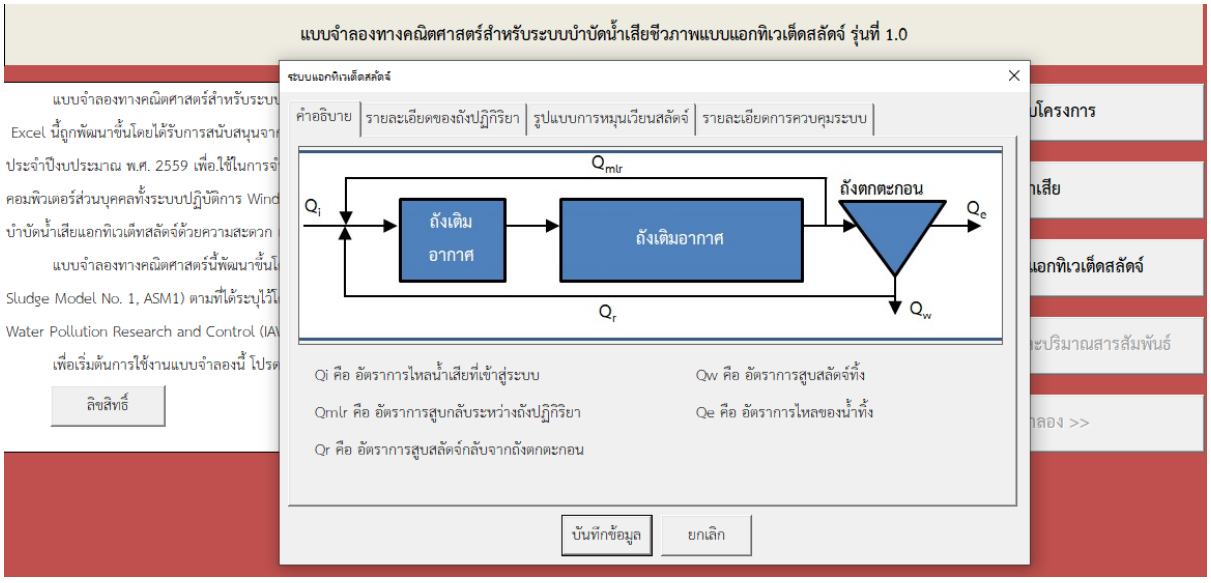
ภาพที่ 15 แบบฟอร์มเพื่อกรอกคุณลักษณะของน้ำเสียทั่วไปในแบบจำลอง



ภาพที่ 16 แบบฟอร์มเพื่อกรอกองค์ประกอบของน้ำเสียในแบบจำลอง

หากต้องการให้กรอกข้อมูลโดยใช้ค่าเริ่มต้นในแบบฟอร์มดังกล่าว สามารถดำเนินการได้โดยการกดปุ่ม “ค่าเริ่มต้น ส่งผลให้ข้อมูลในช่องว่างถูกเปลี่ยนเป็นค่าเริ่มต้นอัตโนมัติ

หลังจากกดปุ่ม “บันทึกข้อมูล” เรียบร้อยแล้ว ปุ่มถัดไป คือ “รายละเอียดเกี่ยวกับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์” นั้นจะถูกเปิดใช้งานโดยอัตโนมัติ บนฟอร์มดังกล่าวมีแถบจำนวน 4 แถบ ได้แก่ คำอธิบาย รายละเอียดของถังปฏิกิริยา รูปแบบการหมุนเวียนสลัดจ์ และรายละเอียดการควบคุมระบบ แสดงดังภาพที่ 17



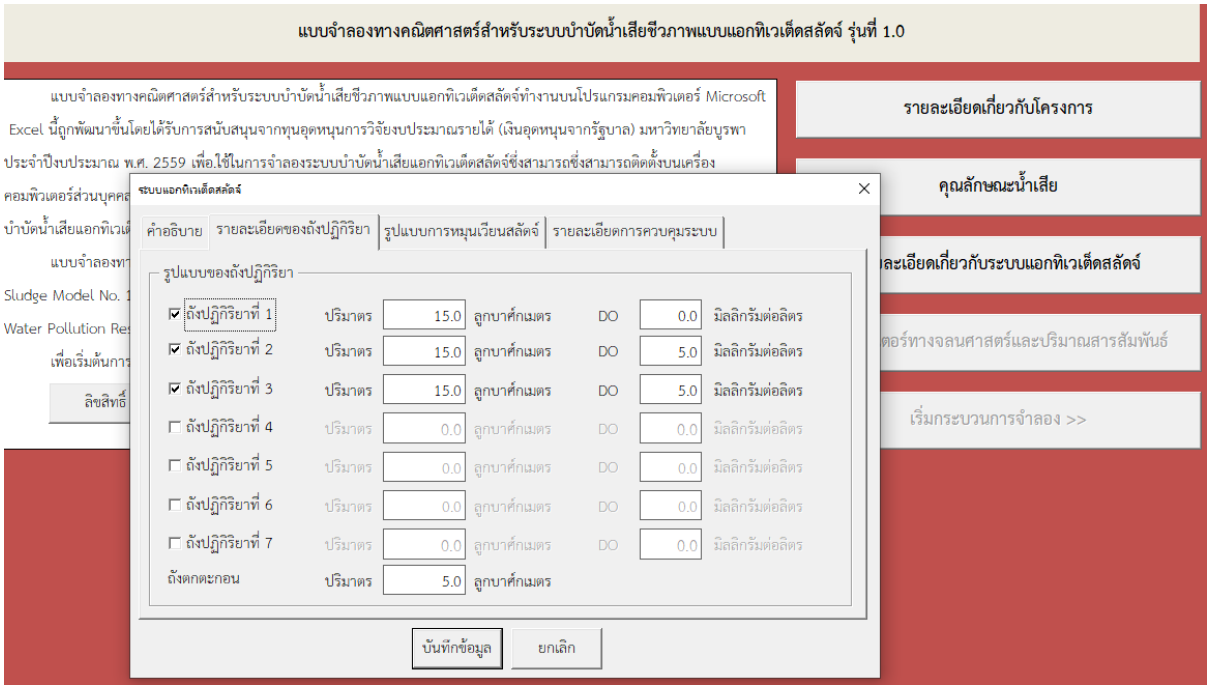
ภาพที่ 17 แบบฟอร์มเพื่อระบุองค์ประกอบของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง

ทั้งนี้ ภายในแถบ “คำอธิบาย” มีการแสดงสัญลักษณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ ซึ่งประกอบด้วยถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และการหมุนเวียนสลัดจ์ โดยน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล (Q_i), อัตราสูบสลัดจ์กลับจากถังตกตะกอน (Q_r), อัตราการหมุนเวียนสลัดจ์ระหว่างถังปฏิกิริยา (Q_{mlr}) อัตราการไหลของน้ำทิ้ง (Q_e) และอัตราการสูบสลัดจ์ทิ้งแต่ละวัน (Q_w)

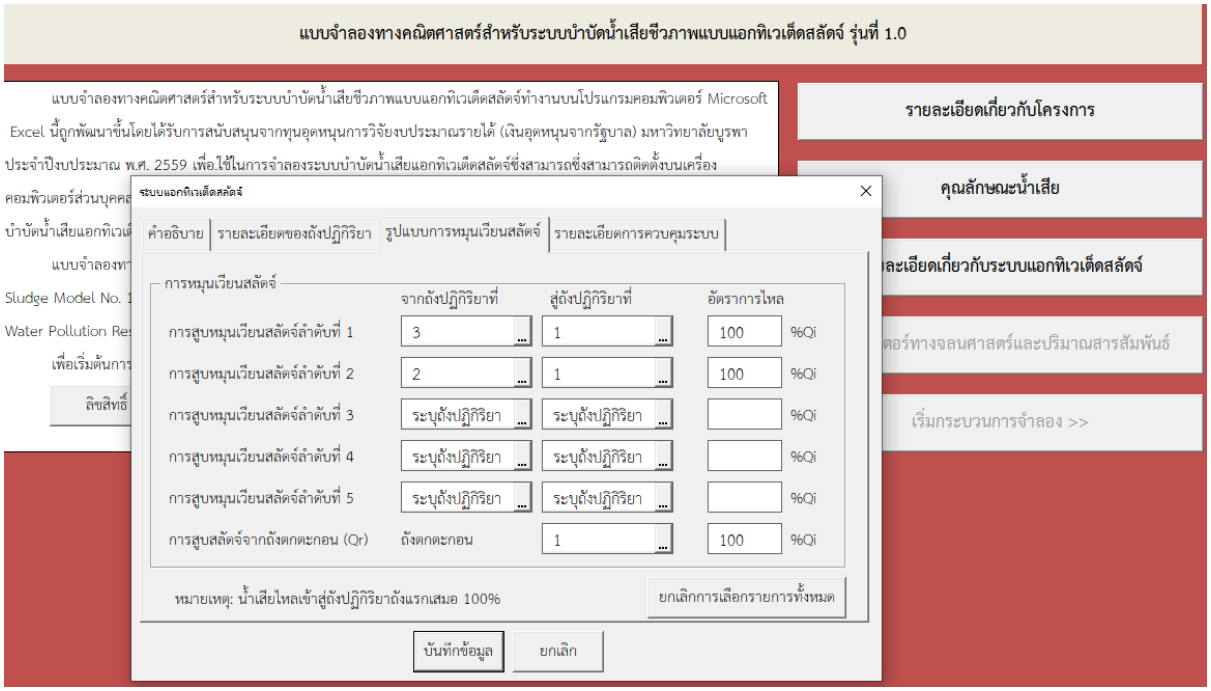
ส่วนแถบที่ 2 นั้นเป็นการระบุรายละเอียดเกี่ยวกับถังปฏิกิริยา ดังภาพที่ 18 โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดจำนวนถังปฏิกิริยาของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ ซึ่งทางโปรแกรมกำหนดจำนวนถังปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 7 ถังปฏิกิริยา โดยถังปฏิกิริยาเหล่านี้มีสมมติฐานว่าต่อเชื่อมกันแบบอนุกรม กล่าวคือ ถังปฏิกิริยาที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ต่อเชื่อมตามลำดับ หากไม่ต้องการใช้งานถังปฏิกิริยาใดๆ ผู้ใช้งานต้องเอาเครื่องหมายถูกด้านหน้าแต่ละถังปฏิกิริยาออก สำหรับถังปฏิกิริยาที่เลือกใช้งาน ผู้ใช้งานต้องระบุปริมาตรของถังปฏิกิริยาในหน่วยของลูกบาศ์กเมตร และความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ในหน่วยของมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ด้านล่างสุด ผู้ใช้งานต้องระบุปริมาตรของถังตกตะกอนในหน่วยของลูกบาศ์กเมตร

สำหรับแถบที่ 3 ผู้ใช้งานต้องระบุรูปแบบการหมุนเวียนสลัดจ์ระหว่างถังปฏิกิริยา ดังภาพที่ 19 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดรูปแบบการหมุนเวียนสลัดจ์ภายในระบบได้สูงสุดถึง 5 รูปแบบ แต่ละรูปแบบ ผู้ใช้งานต้องกำหนดว่าสลัดจ์ถูกสูบจากถังปฏิกิริยาใดแล้วสูบไปยังถังปฏิกิริยาใด โดยต้องมีการกำหนดอัตราการสูบในหน่วยของร้อยละของอัตราการไหลน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (Qi) ในแถบนี้ผู้ใช้งานยังต้องกำหนดว่า อัตราการสูบสลัดจ์กลับจากถังตะกตะกอน (Qr) จะสูบไปยังถังปฏิกิริยาใดและด้วยอัตราการไหลเท่าใด สำหรับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (Qi) นั้นถูกกำหนดให้ไหลเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแรกเสมอ

สำหรับแถบสุดท้ายในแบบฟอร์มนี้ ผู้ใช้งานต้องระบุค่าพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมระบบ ดังภาพที่ 20 ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของน้ำในหน่วยองศาเซลเซียส และค่าอายุสลัดจ์ (Solid Retention Time, SRT) ในหน่วยของวัน อุณหภูมิของน้ำนี้ถูกนำไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

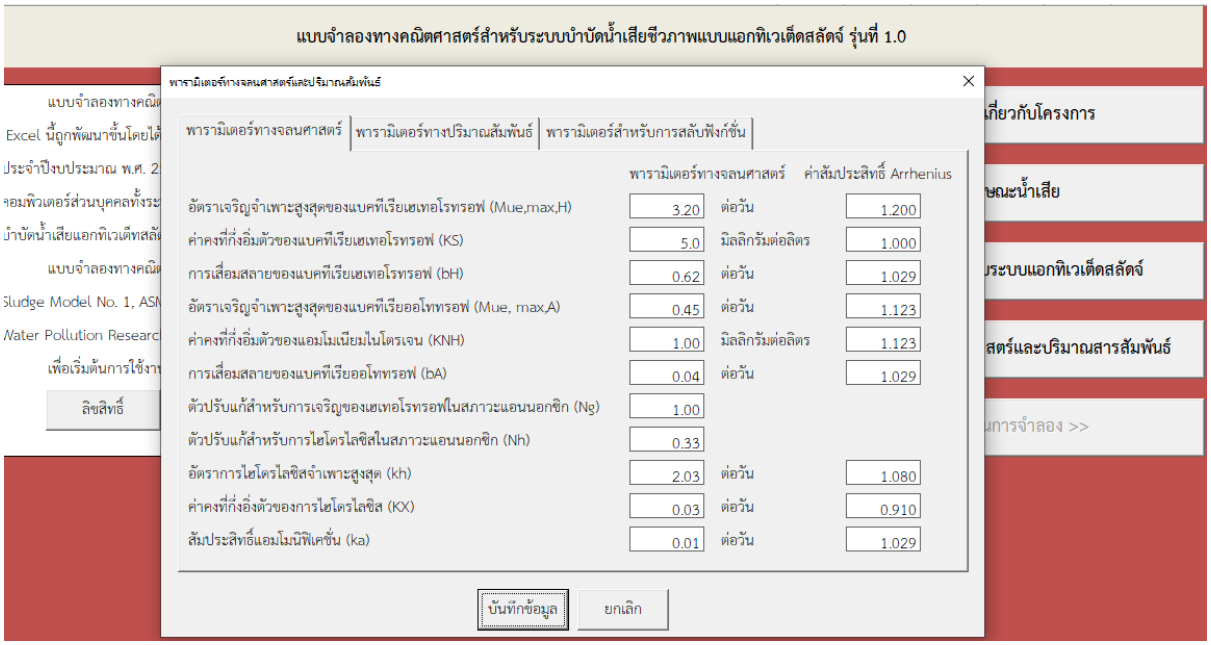


ภาพที่ 18 แบบฟอร์มเพื่อระบุรายละเอียดเกี่ยวกับถังปฏิกิริยาของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง



ภาพที่ 19 แบบฟอร์มเพื่อระบุรูปแบบการหมุนเวียนสลัดจ์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง

หลังจากกดปุ่ม “บันทึกข้อมูล” แล้ว ปุ่ม “พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์และปริมาณสารสัมพันธ์” จะถูกเปิดใช้งาน ดังภาพที่ 20 แบบฟอร์มตามภาพที่ 20 ประกอบด้วย 3 แถบ สำหรับการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ พารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ และพารามิเตอร์สำหรับการสลับฟังก์ชัน (Switching Function)



ภาพที่ 20 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง

สำหรับพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ ตามที่แสดงในตารางที่ 4 มีดังนี้

1. อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ ($\mu_{max,H}$)
2. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ (K_S)
3. การเสื่อมสลายของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ (b_H)
4. อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของแบคทีเรียออโททรอฟ ($\mu_{max, A}$)
5. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวของแอมโมเนียมไนโตรเจน (K_{NH})
6. การเสื่อมสลายของแบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟ (b_A)
7. ตัวปรับแก้สำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟในสภาวะแอนนอกซิก (η_g)
8. ตัวปรับแก้สำหรับการไฮโดรไลซิสในสภาะแอนนอกซิก (η_h)
9. อัตราการไฮโดรไลซิสจำเพาะสูงสุด (k_h)
10. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวของการไฮโดรไลซิส (K_X)
11. สัมประสิทธิ์แอมโมนิฟิเคชัน (k_a)

โดย Henze et al. (1987) ได้กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์เหล่านี้ที่อุณหภูมิ 20 และ 10 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับน้ำเสียชุมชน หากอุณหภูมิของน้ำเสียไม่เท่ากับ 10 และ 20 องศาเซลเซียสนั้น โดยทั่วไป อุณหภูมินั้นมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี สำหรับปฏิกิริยาทางชีวภาพอุณหภูมิก็มีผลกระทบเช่นเดียวกัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปได้ สมการที่นิยมนำมาใช้ในการปรับค่าของสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์นั้น คือ สมการอาร์รีเนียส (Arrhenius Equation) ดังสมการที่ 21

$$k_T = k_{20}\theta^{(T-20)} \qquad (21)$$

โดยที่ k_T คือ สัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิ T, k_{20} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิ 20 °C, θ คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพเท่ากับ 1.01-1.08 และมักใช้ 1.030 เป็นค่าปกติ ส่วน T คือ อุณหภูมิในหน่วย °C โดยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมินั้นสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยใช้แบบฟอร์มดังแสดงในภาพที่ 19

สำหรับแถบถัดไปนั้น เป็นการระบุค่าพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ดังภาพที่ 21 โดยมีพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 6 มีดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริงของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ (Y_H)
2. ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริงของแบคทเรียออโททรอฟ (Y_A)
3. สัดส่วนของชีวมวลที่อยู่ในรูปอนุภาคและเฉื่อยต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (f_P)
4. อัตราส่วนมวลไนไตรเจนต่อมวลซีโอดีของชีวมวล (i_{XB})
5. อัตราส่วนมวลไนโตรเจนต่อมวลซีโอดีของซากชีวมวล (i_{XP})

Henze et al. (1987) ระบุค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ของแบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C และที่ pH เท่ากับ 7 ดังแสดงในตารางที่ 6 ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น จึงไม่ต้องใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C ที่ pH เท่ากับ 7

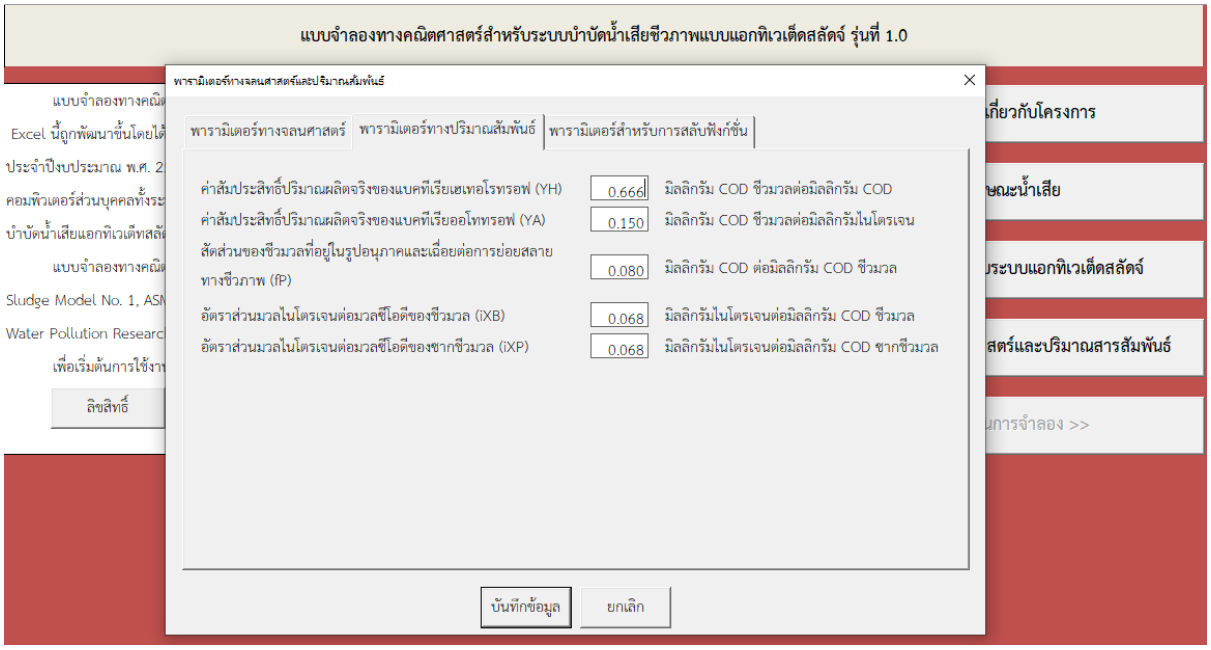
สัญลักษณ์	ค่าปกติ		หน่วย
	20 °C	10 °C	
$\mu_{max,H}$	6.0	3.0	1/day
K_S	20	20	mg COD/L
$K_{O,H}$	0.20	0.20	mg O_2/L
b_H	0.62	0.20	1/day
K_{NO}	0.50	0.50	mg N/L
$\mu_{max,A}$	0.80	0.30	1/day
K_{NH}	1.0	1.0	mg N/L
$K_{O,A}$	0.4	0.4	mg O_2/L
b_A	0.15	0.05	1/day
η_g	0.80	0.8	-
k_a	0.08	0.04	L/(mg biomass COD-day)
k_h	3.0	1.0	mg COD/(mg biomass COD-day)
K_X	0.03	0.01	mg COD/mg biomass COD
η_h	0.4	0.40	-

ที่มา: Henze et al. (1987)

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ของแบบจำลองระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 10 °C และ 20 °C ที่ pH เท่ากับ 7

สัญลักษณ์	ค่าปกติ		หน่วย
	20 °C	10 °C	
Y_H	0.67	0.67	mg biomass COD formed / mg COD removed
Y_A	0.24	0.24	mg biomass COD formed / mg N oxidized
f_P	0.08	0.08	mg debris COD / mg biomass COD
i_{XB}	0.086	0.086	mg N per mg COD in active biomass
i_{XP}	0.06	0.06	mg N per mg COD in biomass debris

ที่มา: Henze et al. (1987)



ภาพที่ 21 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง

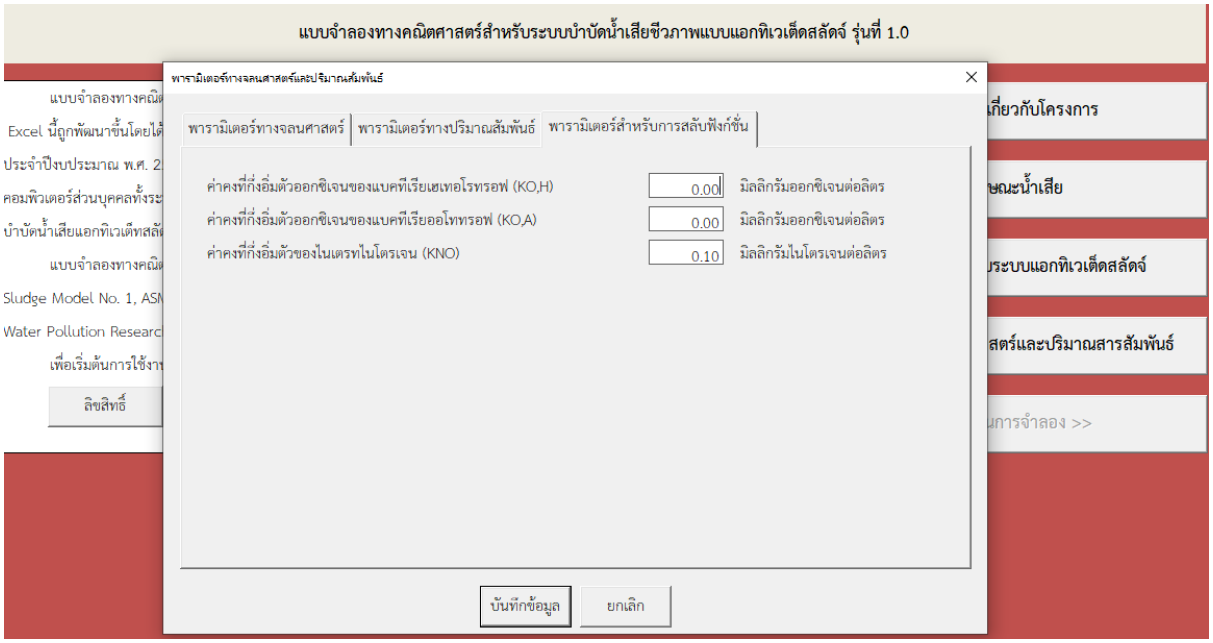
นอกจากพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์และปริมาณสารสัมพันธ์แล้ว ผู้ใช้งานต้องระบุพารามิเตอร์การสลับฟังก์ชันเพื่อปรับเปลี่ยนระหว่างสภาวะแอโรบิกและแอนนอกซิกในแถบที่ 3 ของแบบฟอร์ม ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งทำได้โดยใช้ฟังก์ชั่นอิ่มตัวของออกซิเจนที่มีค่าเข้าใกล้ 0 เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนลดต่ำลงโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ $K_{O,H}$ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการสลับสภาวะ ส่งผลให้อัตราการเจริญของเฮเทอโรทรอฟปรับเปลี่ยนจากกระบวนการที่ 1 ดังสมการที่ 21 ไปเป็นกระบวนการที่ 2 ดังสมการที่ 22 ซึ่งแบคทีเรียใช้ไนเตรทไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในสภาวะแอนนอกซิก หากในระบบไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่เป็นออกซิเจนและไนเตรทไนโตรเจนที่สภาวะแอนแอนโรบิกแล้ว ฟังก์ชั่นอิ่มตัวของเท่ากับ 0 ส่งผลให้ไม่มีการเจริญของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟในระบบ

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O}\right)X_{B,H} \qquad (22)$$

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \eta_g\mu_{max,H}\left(\frac{S_S}{K_S + S_S}\right)\left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O}\right)\left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}\right)X_{B,H} \qquad (23)$$

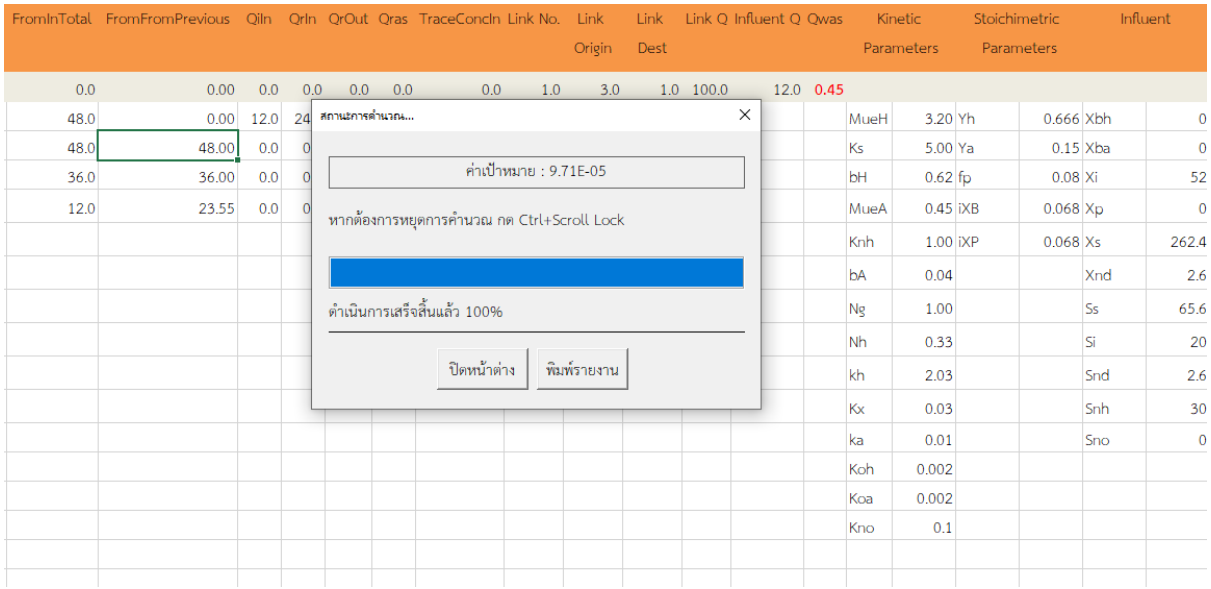
โดยพารามิเตอร์สำหรับการสลับฟังก์ชันนั้นมีจำนวน 3 พารามิเตอร์ คือ

1. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวออกซิเจนของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ ($K_{O,H}$)
2. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวออกซิเจนของแบคทีเรียออโททรอฟ ($K_{O,A}$)
3. ค่าคงที่กึ่งอิ่มตัวของไนเตรทไนโตรเจน (K_{NO})



ภาพที่ 22 แบบฟอร์มเพื่อระบุพารามิเตอร์สำหรับการสลับฟังก์ชันของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ในแบบจำลอง

หลังจากเสร็จสิ้นการกรอกข้อมูลทั้งหมดแล้วจึงกดปุ่ม “บันทึกข้อมูล” ปุ่ม “เริ่มต้นการจำลอง” จึงเปิดใช้งาน หลังจากกดปุ่มนี้แล้ว ชีทของ Excel ใหม่จึงเปิดขึ้นเพื่อเริ่มต้นการประมวลผล ดังภาพที่ 23 โดยมีการแสดงแสดงค่าเป้าหมายที่กำหนด โดยการประมวลผลจะเสร็จสิ้นหากค่าเป้าหมายในต่ำกว่า $1x10^{-4}$ ซึ่งเป็นผลรวมของค่าฟังก์ชันทั้งหมด หากการประมวลผลเสร็จสิ้นแล้ว ปุ่มพิมพ์รายงานจึงถูกเปิดใช้งาน



ภาพที่ 23 สถานะการประมวลผลเพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่นที่ 1

ทั้งนี้ แบบจำลองแอคติเวเต็ดสลัดจ์นี้ เริ่มต้นการประมวลผลด้วยการทำสมดุลของอัตราการไหลของแต่ละถังปฏิกิริยาและทั้งระบบเพื่อคำนวณอัตราการไหลของน้ำเสียทั้งหมดที่เข้าแต่ละถังปฏิกิริยาและออกจากแต่ละถังปฏิกิริยาที่สภาวะคงตัว (Steady State Conditions) ดังสมการที่ 24

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \tag{24}$$

หลังจากทราบอัตราการไหลทั้งหมดที่เข้าและออกจากแต่ละถังปฏิกิริยาแล้ว จึงคำนวณอัตราการสูบสลัดจ์ทิ้งตามค่าอายุสลัดจ์ที่กำหนด ด้วยสมการที่ 25

$$SRT = \frac{XV}{Q_e X_e + Q_w X_w} \tag{25}$$

การคำนวณเพื่อหาค่าของ Qw ทำโดยกำหนดความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Tracer) ที่มีความเข้มข้นหนึ่ง หลังจากนั้น จึงทำสมดุลของมวลสารที่สภาวะคงตัวของแต่ละถังปฏิกิริยา จนได้ค่า Qw ที่เหมาะสมแล้ว การประมวลมีการทำซ้ำ (Iteration) จนความแตกต่างของอัตราการสูบสลัดจ์ทิ้งครั้งปัจจุบันและครั้งก่อนหน้ามีความแตกต่างกันซึ่งคำนวณตามสมการที่ 26 แล้วมีค่าน้อยกว่า 0.00001

$$\frac{Q_{w,i} - Q_{w,i-1}}{Q_{w,i}} < 0.00001 \tag{26}$$

โดยที่ $Q_{w,i}$ คือ อัตราการสูบสลัดจ์ทิ้งปัจจุบัน และ $Q_{w,i-1}$ คือ อัตราการสูบสลัดจ์ทิ้งครั้งก่อน

หลังจากนั้น จึงคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องใช้ในการประมวลผลตามลำดับ ดังนี้

1. ปรับค่าพารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของน้ำเสียโดยใช้สมการอาร์รีเนียส (Arrhenius Equation) การดังสมการที่ 21
2. สร้างเมทริกซ์ของแต่ละตัวแปร (State Variables) และแต่ละกระบวนการ ดังตารางที่ 2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางปริมาณสารสัมพันธ์ต่างๆ
3. คำนวณความเข้มข้นของมวลแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟและกลุ่มออโททรอฟเพื่อใช้ในการอินทิเกรตฟังกชันของตัวแปรต่างๆ โดยใช้สมการที่ 26

$$X_B \cdot V = \frac{SRT \cdot Y \cdot Q_i (S^0 - S^e)}{1 + b_H \cdot SRT} \tag{26}$$

4. จัดตั้งสมการสมดุลมวลของตัวแปรต่างๆ ในแต่ละถังปฏิกิริยา โดยใช้สมการสมดุลมวลที่สภาวะคงตัว ดังสมการที่ 27

$$0 = \sum Q_{in} X_{in} - \sum Q_{out} X_{out} + \sum_{j} \nu_{ij} \rho_j V \qquad (27)$$

5. ทำการอินทิเกรตสมการทั้งหมดพร้อมๆ กันด้วย Solver ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ของ Microsoft Excel เพื่อหาค่าต่ำสุดที่เหมาะสมตามค่าเป้าหมายที่กำหนด โดย Solver จะปรับค่าในเซลล์ตัวแปรต่าง ในเซลล์ภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด คือ ไม่น้อยกว่าศูนย์ โดย Solver ที่เลือกใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ เรียกว่า GRG Nonlinear ซึ่งเป็นตัวแก้ปัญหาประเภทที่ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) ที่มีความต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตาม พบว่า ตัว Solver แบบ GRG Nonlinear สามารถแก้ปัญหาได้ดีระดับหนึ่ง บางครั้งไม่สามารถหาคำตอบที่มีค่าต่ำสุดได้ การแก้ปัญหาในแบบจำลองนี้ จึงเลือกใช้ฟังกชันเพิ่มเติมที่เรียกว่า Multistart เพื่อช่วยทำให้คำตอบที่แท้จริงได้

หลังจากได้คำตอบของตัวแปรต่างๆ ตามค่าเป้าหมายที่กำหนดแล้ว ปุ่ม “พิมพ์รายงาน” จึงเปิดการใช้งาน หลังจากนั้น หากกดปุ่ม “พิมพ์รายงาน” ก็จะได้หน้ารายงาน ดังภาพที่ 24 โดยรายงานประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐาน ทั้งคุณลักษณะของน้ำเสีย รายละเอียดเกี่ยวกับระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ และผลลัพธ์จากการประมวลผลของแบบจำลองทั้งในรูปของข้อมูลตัวเลขและการนำเสนอในรูปของกราฟ

3.7 การปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) กับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

หลังจากควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เพื่อการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนทางชีวภาพที่ทำงานคู่ขนานกันจนทั้ง 3 ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใต้ตัวแปรควบคุมเดียวกันในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิห้อง 28±2 องศาเซลเซียสแล้ว ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ตัวอย่างจากถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกและถังปฏิกิริยาเติมอากาศ และตัวอย่างจากน้ำใสจากถังตกตะกอนถูกนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ TCOD, SCOD, TKN, NH_4^+-N, NO_3^--N, NO_2^--N, MLVSS, MLSS เพื่อประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และธาตุอาหารไนโตรเจนของระบบ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 25 และ 26 ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับร้อยละ 90.4±0.6 ทำให้เหลือสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีในน้ำทิ้งเท่ากับ 40±0 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ดังภาพที่ 25 เพราะว่าระบบทำงานที่อายุสลัดจ์ เท่ากับ 8 วัน ซึ่งเป็นอายุสลัดจ์ที่สูงกว่าอายุสลัดจ์ขั้นต่ำ (Minimum SRT) มากสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟิกที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน นอกจากนั้นระบบบำบัดทำงานที่อุณหภูมิ 28±2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ดี

ผลการวิเคราะห์ TKN ในน้ำเสียและปริมาณแอมโมเนียมในน้ำทิ้ง พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมหรือไนตริฟิเคชั่นเท่ากับร้อยละ 99.2±0.5 ที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.5±0.3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 26 ส่งผลให้มีไนเตรตไนโตรเจนเกิดขึ้น ดังภาพที่ 27 โดยปริมาณแบคทีเรียผสมบ่งชี้ด้วย MLVSS ในถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกและถังปฏิกิริยาเติมอากาศ เท่ากับ 1765±136 และ 1760±188 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีของแข็งแขวนลอยทั้งหมดบ่งชี้ด้วยค่า MLSS เท่ากับ 1860±226 และ 1888±294 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ รุ่นที่ 1.0

โครงการทดสอบแบบจำลองระบบ AS

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

9 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

คุณลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

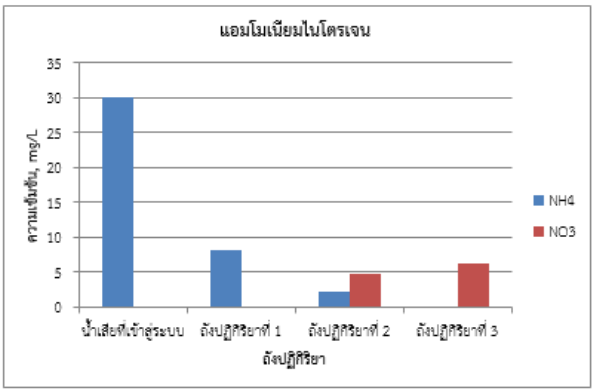
ความเข้มข้น COD ทั้งหมด	400.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งหมด	40.000	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสทั้งหมด	6.000	มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
สารอินทรีย์เฉื่อยที่ละลายน้ำ	20.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
สารอินทรีย์ย่อยสลายง่ายทางชีวภาพ	65.600	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
สารอินทรีย์เฉื่อยที่เป็นอนุภาค	52.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
สารอินทรีย์ย่อยสลายยากทางชีวภาพ	262.400	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟ	0.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
แบคทีเรียกลุ่มออโททรอฟ	0.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ผลิตภัณฑ์จากการเสื่อมสลายที่เป็นอนุภาค	0.000	มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ออกซิเจนละลายน้ำ	0.000	มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร
ไนเตรทและไนไตรท์ไนโตรเจน	0.000	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
แอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจน	30.000	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
ไนโตรเจนอินทรีย์ย่อยสลายทางชีวภาพได้ที่ละลาย	2.600	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร
ไนโตรเจนอินทรีย์เฉื่อยที่เป็นอนุภาค	2.600	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

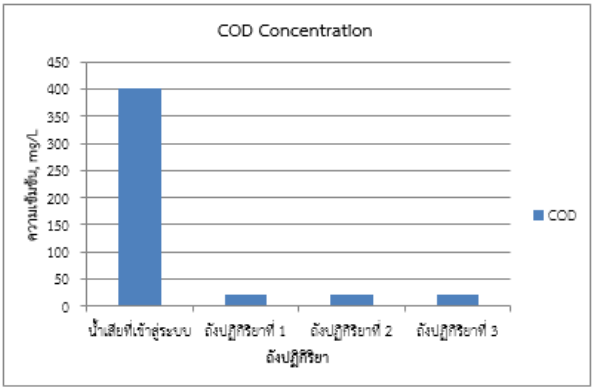
รายละเอียดเกี่ยวกับระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

ค่าอายุสลัดจ์	10.0	วัน			
อุณหภูมิน้ำเสีย	20.0	องศาเซลเซียส			
ปริมาตรรวมของถังปฏิกิริยา	45.0	ลูกบาศก์เมตร			
ถังปฏิกิริยาที่ 1	15.0	ลูกบาศก์เมตร			
ถังปฏิกิริยาที่ 2	15.0	ลูกบาศก์เมตร			
ถังปฏิกิริยาที่ 3	15.0	ลูกบาศก์เมตร			
น้ำเสียไหลเข้าสู่ถังปฏิกิริยาถังแรกเท่ากับ	120	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน			
น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริ	240	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	น้ำเสียออกจากถังปฏิกิริยาที่ 1	0	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริ	0	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	น้ำเสียออกจากถังปฏิกิริยาที่ 2	120	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
น้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริ	0	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	น้ำเสียออกจากถังปฏิกิริยาที่ 3	120	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
อัตราการสูบสลัดจ์	4.5	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน			

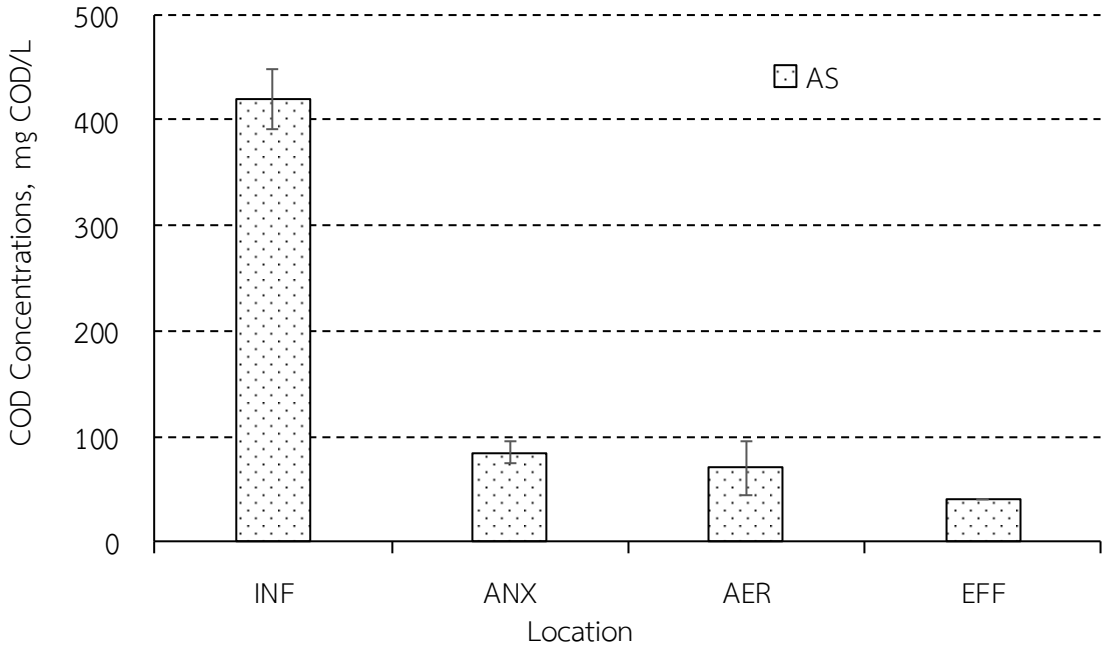
ผลลัพธ์จากการประมวลผลแบบจำลอง

	Xbh	Xba	Xi	Xp	Xs	Xnd	Ss	Si	Snd	Snh	Sno	MLVSS	MLSS	COD
	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg N/L	mg N/L	mg VSS/L	mg SS/L	mg COD/L
น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	0	0	52	0	262.4	2.6	65.6	20	2.6	30	0	317	373	400
ถังปฏิกิริยาที่ 1	1642	70	1388.9	710.8	151.4	5.2	1.3	20	3	8.1	0.2	2681	3155	21.3
ถังปฏิกิริยาที่ 2	1658	71	1388.9	713	106.9	4.2	2.1	20	3.9	2.2	4.8	2664	3134	22.1
ถังปฏิกิริยาที่ 3	1670	71	1388.9	716.1	63.9	3	1.7	20	4.6	0.2	6.2	2644	3110	21.7

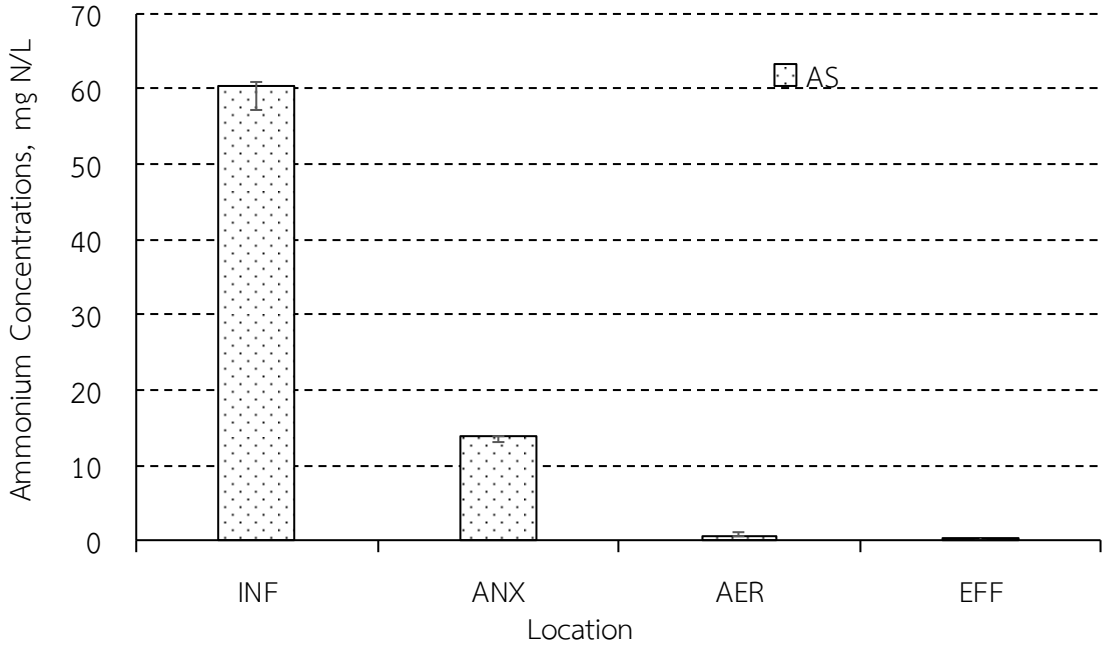




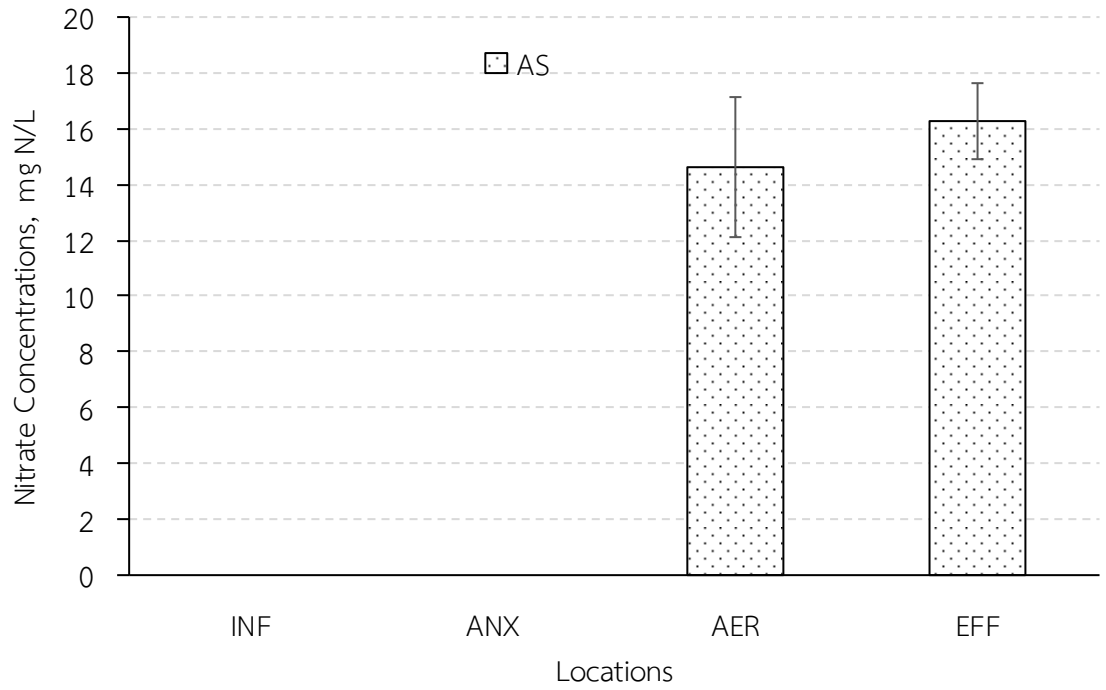
ภาพที่ 24 ตัวอย่างหน้ารายงานผลที่ได้จากการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง

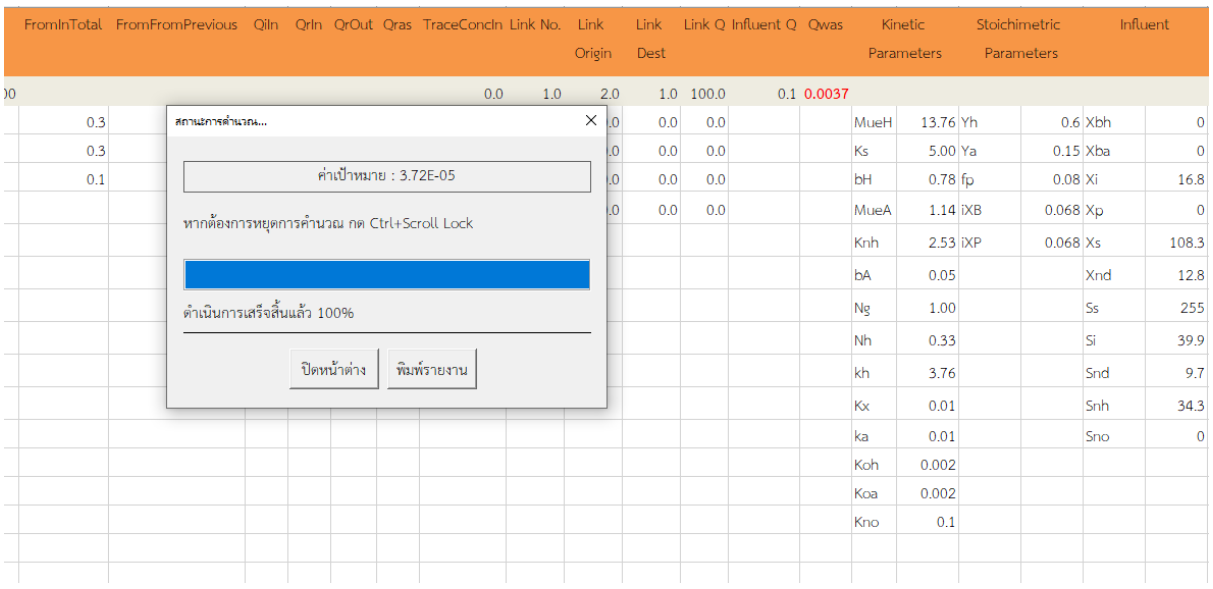


ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไนเตรทไนโตรเจนของระบบบำบัดน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง

หลังจากนั้น จึงนำข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบบำบัดน้ำเสียจำลองและคุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ป้อนเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VBA-ASM-1 โดยใช้พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์และพารามิเตอร์ที่ได้เผยแพร่โดย Dold et al. (1991) แล้วปรับลดค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณผลิตจริงของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟ (Y_H) เหลือ 0.60 แล้วจึงทำการประมวลผล พบว่า สามารถทำนายผลได้ ดังภาพที่ 28

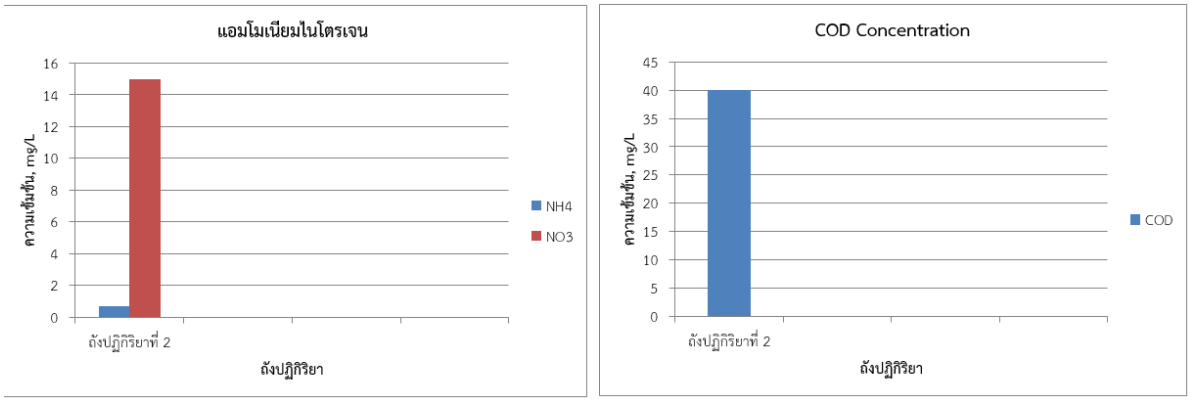


ภาพที่ 28 ผลลัพธ์การทำนายของโปรแกรม VBA-ASM-1 ด้วยข้อมูลจากระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

และเมื่อพิมพ์รายงานเพื่อแสดงผลการทำนายดังภาพที่ 29 พบว่า โปรแกรมสามารถทำนายปริมาณแบคทีเรียผสมบ่งชี้ด้วย MLVSS ในถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกและถังปฏิกิริยาเติมอากาศได้เท่ากับ 1724 และ 1706 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจริง คือ 1765±136 และ 1760±188 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนั้น ผลการทำนายของแข็งแขวนลอยทั้งหมดบ่งชี้ด้วยค่า MLSS จากโปรแกรม คือ 1850 และ 1831 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจากระบบซึ่งเท่ากับ 1860±226 และ 1888±294 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ลลัพธ์จากการประมวลผลแบบจำลอง

	Xbh	Xba	Xi	Xp	Xs	Xnd	Ss	Si	Snd	Snh	Sno	MLVSS	MLSS	COD
	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg COD/L	mg N/L	mg N/L	mg VSS/L	mg SS/L	mg COD/L
ำเสียที่เข้าสู่ระบบ	0	0	16.8	0	108.3	12.8	255	39.9	9.7	34.3	0	138	148	420
งปฏิกิริยาที่ 1	1327	127	394.6	637.4	60.5	5.7	2.3	39.9	6.8	11.5	0.1	1724	1850	42
งปฏิกิริยาที่ 2	1355	127	394.6	637.8	10.4	0.8	0.3	39.9	9.2	0.7	15	1706	1831	40



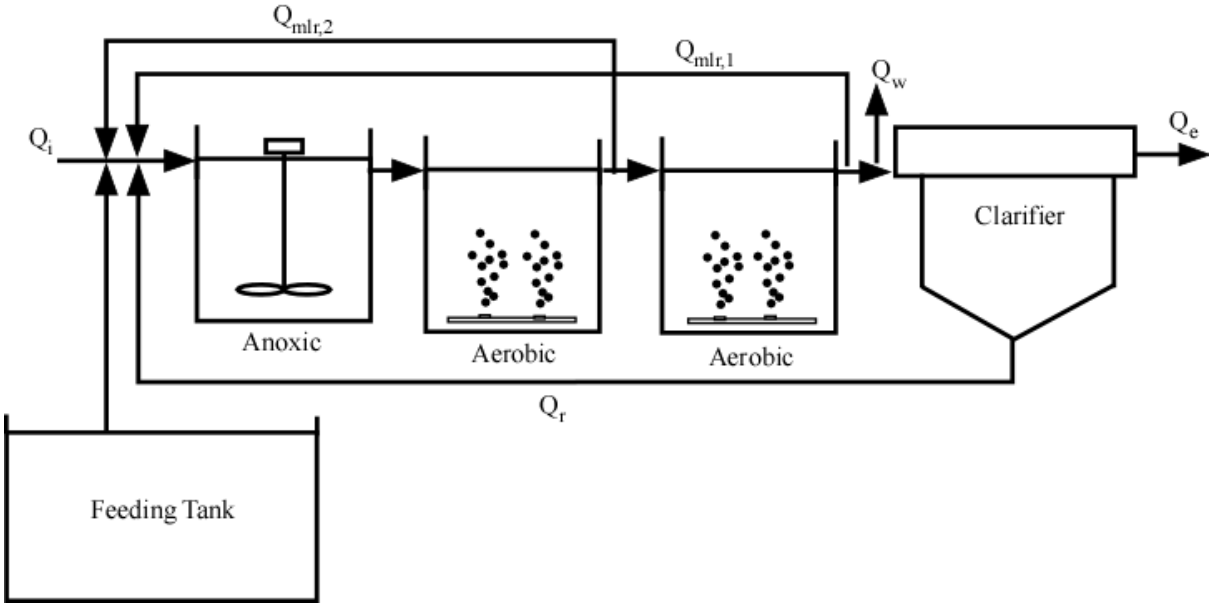
ภาพที่ 29 รายงานผลที่ได้จากการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียจำลองด้วยโปรแกรม VBA-ASM-1

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์บ่งชี้ด้วยค่าซีโอดีนั้น โปรแกรม VBA-ASM-1 นั้นสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 90.5 ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับผลการทดลองที่พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับร้อยละ 90.4±0.6 นอกจากนั้น ผลการทำนายเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนหรือไนตริฟิเคชัน พบว่า โปรแกรม VBA-ASM-1 สามารถกำจัดได้ร้อยละ 98.8 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองจากระบบ คือร้อยละ 99.2±0.5

ผลการทำนายที่มีค่าเทียบเท่ากันกับผลการทดลองที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจริงแสดงให้เห็นว่า โปรแกรม VBA-ASM-1 นั้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.8 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรมกับโปรแกรมสำเร็จรูป

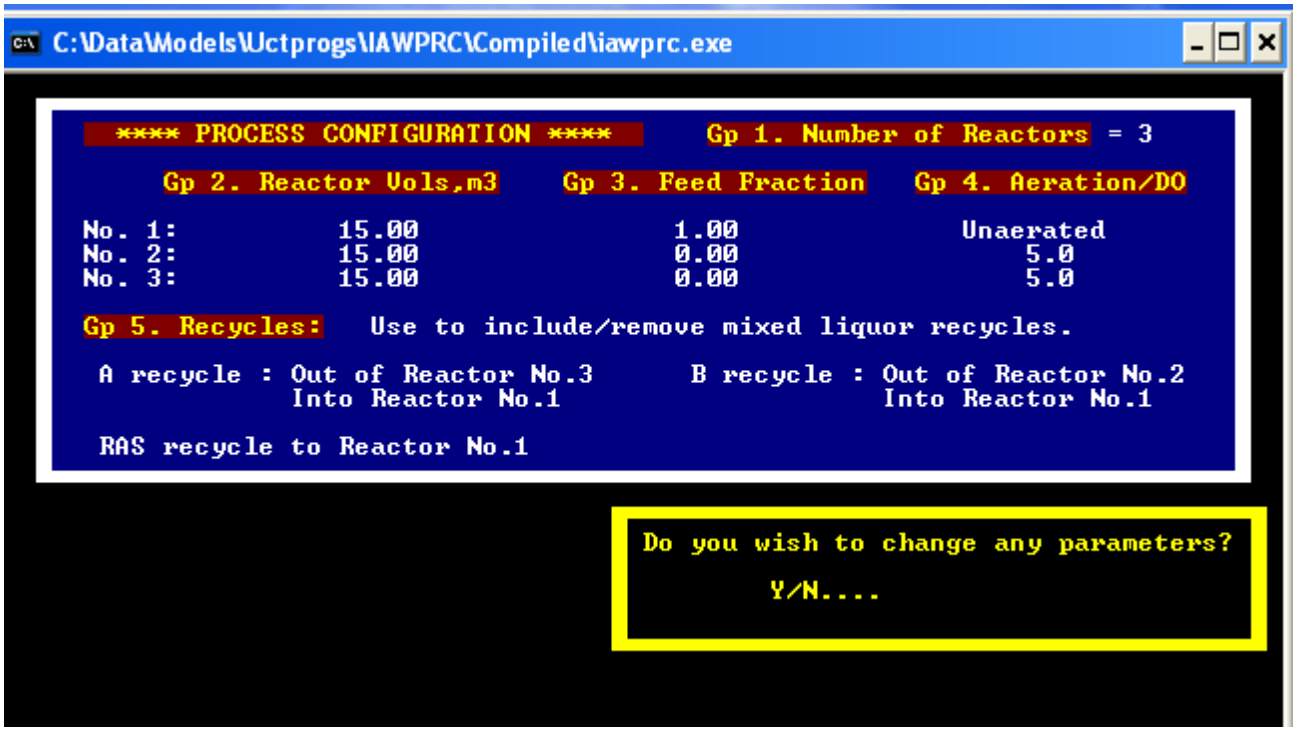
การพิสูจน์ความถูกต้องและความแม่นยำของโปรแกรม VBA-ASM-1 ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ดำเนินการโดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลไปเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปที่นำมาใช้ในการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ IAWPRC/UCTOLD ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัย Cape Town โดยการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่สมมติขึ้นมาดังภาพที่ 30



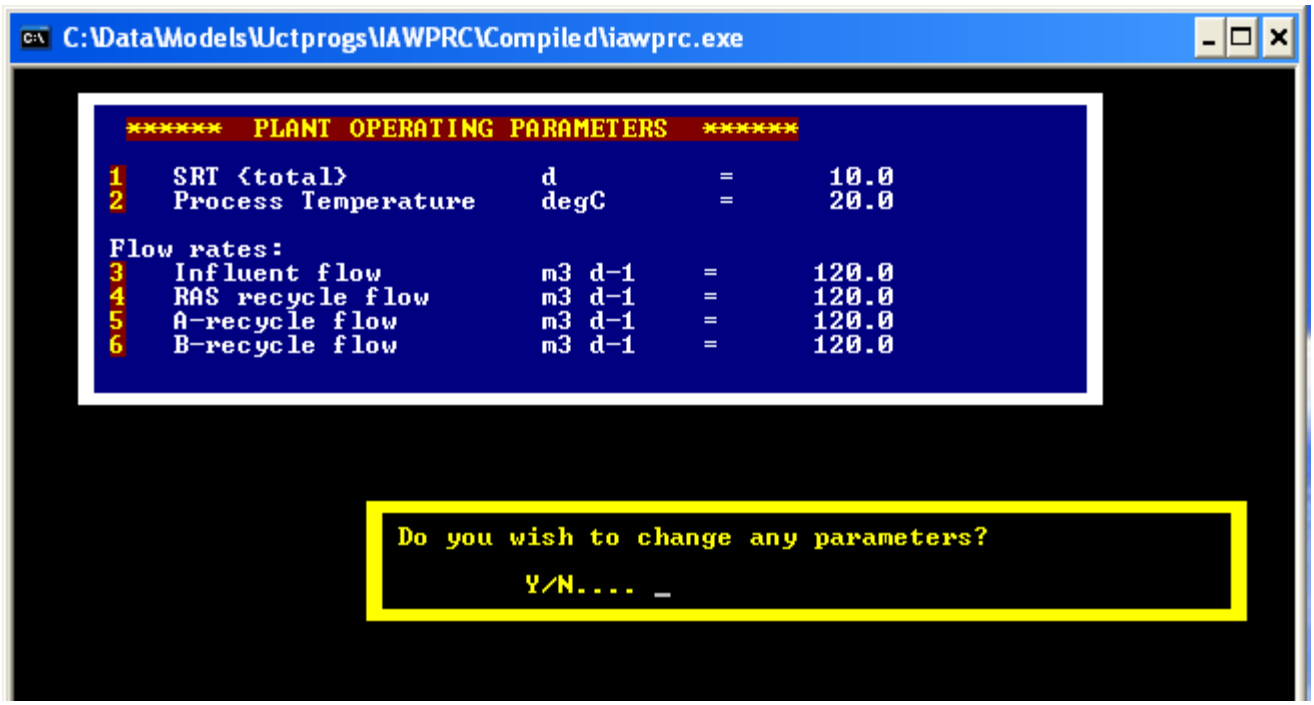
ภาพที่ 30 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบระหว่าง VBA-ASM-1 และ IAWPRC/UCTOLD

ระบบบำบัดน้ำเสียนี้ประกอบด้วยถังปฏิกิริยาจำนวน 3 ถัง โดยเป็นถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกจำนวน 1 ถัง และถังปฏิกิริยาเติมอากาศจำนวน 2 ถัง ถังเติมอากาศมีการเติมออกซิเจนให้มีความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 5.0 mg O_2/L ระบบนี้มีการสูบสลัดจ์กลับจากถังตะกอนเข้าสู่ถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 100%Q_i โดยมีการหมุนเวียนสลัดจ์กลับจากถังเติมอากาศที่ 3 เข้าสู่ถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกที่ 1 ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 100%Q_i และมีการหมุนเวียนสลัดจ์กลับจากถังเติมอากาศที่ 2 เข้าสู่ถังปฏิกิริยาแอนนอกซิกที่ 1 ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 100%Q_i ทั้งนี้ อัตราการไหลเข้าสู่ระบบเท่ากับ 120 ลูกบาศ์กเมตรต่อวัน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 31 และ 32

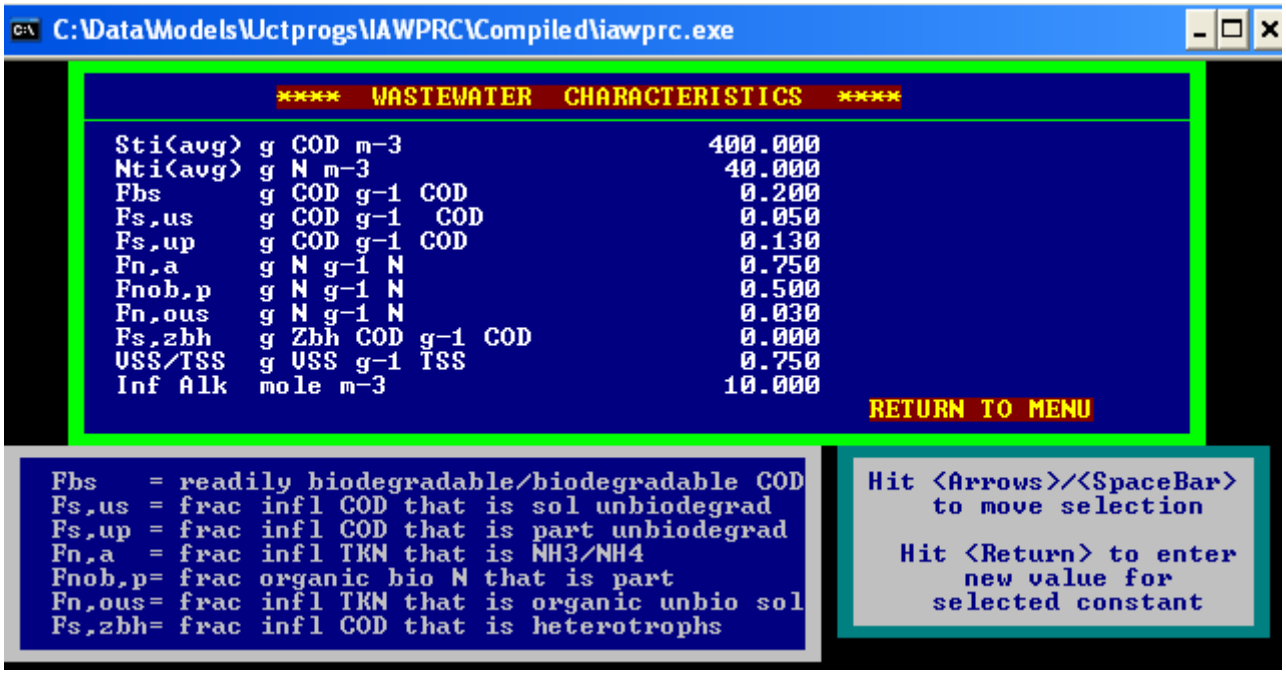
ระบบถูกควบคุมด้วยอายุสลัดจ์เท่ากับ 10 วัน ที่ทำงานที่อุณหภูมิของน้ำเสียเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส โดยน้ำเสียมีคุณลักษณะ ดังตารางที่ 7 ทั้งนี้ ความเข้มข้นซีโอดีทั้งหมดเท่ากับ 400 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 40 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร แสดงดังภาพที่ 33 ซึ่งมีคุณลักษณะเดียวกันกับคุณลักษณะน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม VBA-ASM-1



ภาพที่ 31 รายละเอียดของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD



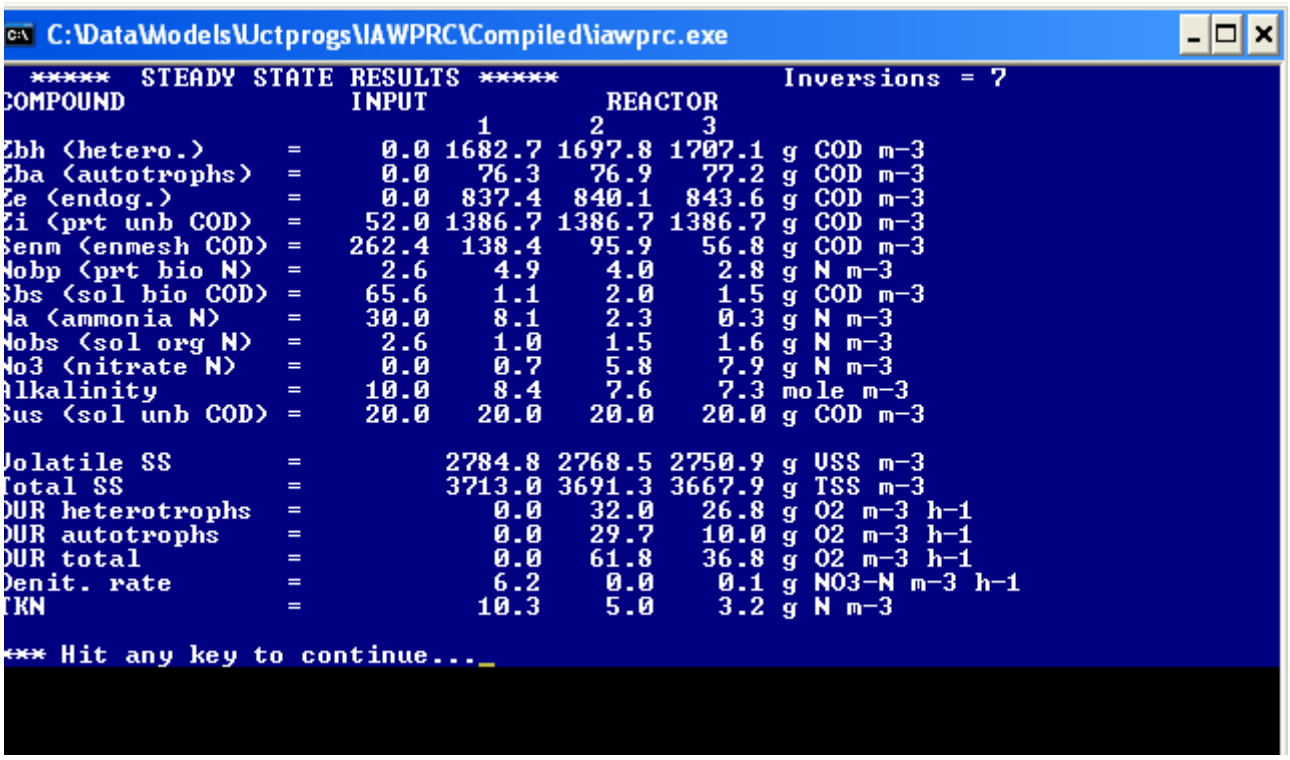
ภาพที่ 32 รายละเอียดการควบคุมระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD



ภาพที่ 33 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD

ผลการประมวลผลของโปรแกรม IAWPRC/UCTOLD แสดงดังภาพที่ 34 ที่สภาวะคงตัว พบว่า โปรแกรม IAWPRC/UCTOLD สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ภายในการคำนวณ 7 ครั้ง โดยผลการทำนายด้วยโปรแกรม IAWPRC/UCTOLD และ VBA-ASM-1 ระบุว่าระบบบำบัดน้ำเสียดังภาพที่ 23 สามารถกำจัดสารอินทรีย์บ่งชี้ได้ด้วยค่าซีโอดีที่มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 94.6 และ 94.6 ตามลำดับ ซึ่งผลการทำนายของทั้งสองโปรแกรมนั้นเท่ากัน สำหรับผลการทำนายของกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้น โปรแกรม IAWPRC/UCTOLD และ VBA-ASM-1 สามารถประมวลผลและทำนายประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้เท่ากัน คือ ร้อยละ 99.5 และ 99.3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแตกต่างผลการทำนายของทั้งสองโปรแกรมสำหรับแต่ละตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผล ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า โดยภาพรวม ผลการทำนายของทั้งสองโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกัน และผลการทำนายของ VBA-ASM-1 นั้นน้อยกว่าผลการทำนายของโปรแกรม IAWPRC/UCTOLD โดยเฉพาะภายใต้สภาะแอนนอกซิกที่แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟนั้นใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและตัวให้อิเลคตรอน แต่ใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเลคตรอน

ผลการประเมินพบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VBA-ASM-1 ที่ทำงานบนโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel บนระบบปฏิบัติการ Windows หรือ Mac OS นั้นสามารถนำมาจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้ทดแทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปแอคติเวเต็ดสลัดจ์ได้



ภาพที่ 34 ผลการทำนายจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ IAWPRC/UCTOLD ที่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทำนายของโปรแกรม VBA-ASM-1 และ IAWPRC/UCTOLD ที่สภาวะคงตัว

ตัวแปร	น้ำเสียเข้าระบบ	VBA-ASM-1			IAWPRC			ความแตกต่าง (%)		
		ถัง # 1	ถัง # 2	ถัง # 3	ถัง # 1	ถัง # 2	ถัง # 3	ถัง # 1	ถัง # 2	ถัง # 3
Xbh, mg COD/L	0	1641.9	1658.2	1670.1	1682.7	1697.8	1707.1	-2.5	-2.4	-2.2
Xba, mg COD/L	0	70.2	70.8	70.9	76.3	76.9	77.2	-8.7	-8.6	-8.9
Xi, mg COD/L	52.0	1388.9	1388.9	1388.9	1386.7	1386.7	1386.7	0.2	0.2	0.2
Xp, mg COD/L	0	710.8	713.0	716.1	837.4	840.1	843.6	-17.8	-17.8	-17.8
Xs, mg COD/L	262.4	151.4	106.9	63.9	138.4	95.9	56.8	8.6	10.3	11.1
Xnd, mg COD/L	2.6	5.2	4.2	3.0	4.9	4.0	2.8	5.8	4.8	6.7
Ss, mg COD/L	65.6	1.3	2.1	1.7	1.1	2.0	1.5	15.4	4.8	11.8
Si, mg COD/L	20.0	20	20	20	20	20	20	0.0	0.0	0.0
Snd, mg N/L	2.6	3.0	3.9	4.6	1.0	1.5	1.6	66.7	61.5	65.2
Snh, mg N/L	30.0	8.1	2.2	0.2	8.1	2.3	0.3	0.0	-4.5	-50.0
Sno, mg N/L	0	0.2	4.8	6.2	0.7	5.8	7.9	-250.0	-20.8	-27.4
MLVSS, mg VSS/L	317	2681	2664	2644	2784.8	2768.5	2750.9	-3.9	-3.9	-4.0
MLSS, mg SS/L	373	3155	3134	3110	3713.0	3691.3	3667.9	-17.7	-17.8	-17.9
ค่าเฉลี่ย								-15.7	0.4	-2.6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินวิธีการที่ทำให้โรงบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงสุด หรือเพื่อประเมินทางเลือกของการปรับเปลี่ยนโรงบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือเพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์นั้นมีราคาสูงมาก เช่น BioWin, GPS-X เป็นต้น การเข้าถึงโปรแกรมเหล่านี้เพื่อการใช้งานในประเทศไทยเป็นไปได้ยากด้วยข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ

โดยปกติ โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ในชุดโปรแกรม Microsoft Office ของบริษัท Microsoft มักถูกติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งที่เป็นระบบปฏิบัติการ Windows และ Mac OS ดังนั้น หากสามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่ทำงานได้บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel และเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษาไทย ก็จะส่งผลให้การใช้งานโปรแกรมมีความสะดวกมากขึ้น สามารถเข้าถึงโปรแกรมได้ตลอดเวลา ติดตั้งง่าย และมีราคาถูก ทำให้วิศวกร นักวิทยาศาสตร์ หรือนักวิจัยสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้งานในการออกแบบ ปรับปรุง วิจัย หรือวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ทสลัดจ์ได้

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดำเนินการโดยใช้ชุดภาษา Visual Basic for Applications (VBA) ที่เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม Microsoft Excel และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Activated Sludge Model (ASM) รุ่นที่ 1 เรียกโปรแกรมนี้ว่า VBA-ASM-1 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนานี้ถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบกับผลการทดลองจากระบบบำบัดน้ำเสียจริง และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายของโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ IAWPRC/UCTOLD ผลการปรับเทียบและเปรียบเทียบ พบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VBA-ASM-1 นั้นสามารถทำนายผลการจำลองได้เทียบเท่ากับโปแกรมสำเร็จรูปดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงเทียบเท่ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้ว

4.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ควรได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการประมวลผลที่รวดเร็วขึ้น และสามารถครอบคลุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแอคติเวเต็ดสลัดจ์รุ่น 2 และ 3 ได้

ผลผลิต

โครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ที่สามารถใช้งานบนโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel จึงทำให้มีผลิตผลเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวน 1 ชุด นอกจากนั้น ผลงานวิจัยนี้จะถูกนำส่งเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่ม 1 หรือ 2 หรือที่ประชุมวิชาการระดับชาติ

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRMS 13 หลัก) 2559A10802040 สัญญาเลขที่ 144/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอคติเวเต็ทสลัดจ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์ Excel
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน รองศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย ศรีวิริยรัตน์
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2562
ระยะเวลาดำเนินการ 4 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558

<u>รายรับ</u>

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)	173,250.00	เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2558
งวดที่ 2 (40%)	138,600.00	เมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2560
งวดที่ 3 (10%)	34,650.00	เมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2562
รวม	346,500 บาท	

<u>รายจ่าย</u>

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	60,000.00	60,000.00	-
2. ค่าจ้าง	-	-	-
3. ค่าวัสดุ	81,850.00	82,058.59	-208.59
4. ค่าใช้สอย	90,000.00	90,346.14	-346.14
5. ค่าครุภัณฑ์	80,000.00	81,314.93	-1,314.93
6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ 6.1 ค่าธรรมเนียมที่จ่ายแก่มหาวิทยาลัยบูรพา (10%)	34,650.00	34,650.00	-
รวม	346,500.00	348,369.66	-1,869.66

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ศรีวิริยรัตน์)
หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บรรณานุกรม

1. ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนในประเทศไทย. (2556). กรุงเทพฯ: แผนวิสาหกิจองค์การจัดการน้ำเสีย ในระยะ 4 ปี (พ.ศ.2557-2560). องค์การจัดการน้ำเสีย กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
2. APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed. Washington D.C., 1995.
3. Coen, F., Vanderhaeghen, B., Boonen, I., Vanrolleghem, P.A., Eyck, L.V., Meenen, P.V. (1996). Nitrogen removal upgrade of a WWTP within existing reactor volumes: a simulation supported scenario analysis. *Water Science and Technology*, *34*(3-4), 339-346.
4. Copp, J.B. (2002). *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual*. Office for Official Publications of the European Community, Luxembourg.
5. Dold, P.L., Ekama, G.A. & Marais, G.v.R. (1980). A general model for the activated sludge process. *Progress in Water Technology*, *12*(6), 47-77.
6. Dold, P.L., Wentzel, M.C., Billing, A.E., Ekama, G.A. & Marais, G.v.R. (1991). Activated sludge simulation programs: Nitrification and nitrification/denitrification systems (version 1.0). Report TT 52/91. Water Research Commision, Pretoria, South Africa.
7. Eckenfelder, W.W. Jr., & O'connor, D.J. (1954). The aerobic treatment of organic wastes. *Proceedings of the 9th Industrial Waste Conference*, 39, 512-530.
8. Ferrer, J., Seco, A., Garcia-Usach, F., Bouzas, A. & Barat, R. (2004) Simulation of full-scale plants: benefits and drawbacks. In M.C.M. van Loosdrecht & J. Clement (Eds.), *2nd IWA Leading-Edge on Water and Wastewater Treatment Technologies* (pp. 155-163). London, IWA Publishing.
9. Franciscoa, M., Skogestadb, S., Vega, P. (2015). Model predictive control for the self-optimized operation in wastewater treatment plants. In K.V. Gernaey, J. K. Huusom & R. Gani (Eds.), 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Copenhagen, Denmark.
10. Garrett, M.T. & Sawyer, C.N. (1952). Kinetics of removal of soluble BOD by activated sludge. *Proceedings of the 7th Industrial Waste Conference*, *79*, 51-77.
11. Gernaey, K.V., van Loosdrecht M.C.M., Mogens, H.M. & Jorgensen, S.B. (2004). Activated sludge wastewater treatment plant modeling and simulation: state of the art. *Environmental Modeling and Software*, *19*, 763-783.
12. Gujer, W., Henze, M., Mino, T., & van Loosdrecht M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No.3. *Water Science and Technology*, *39*(1), 183-193.
13. Hauduc, H., Gillot. S., Rieger, L., Ohtsuki, T., Shaw, A., Takács, I., & Winkler, S., (2009). Activated sludge modelling in practice: an international survey. *Water Science and Technology*, *60*(8), 1943-1951.

14. Hvala, N., Vrecko, D., Burica, O., Strazar, M. & Levstek, M. (2002). Simulation study supporting wastewater treatment plant upgrading. *Water Science and Technology*, *46*(4/5), 325-332.
15. Henze, M., Grady, C.P.L. Jr., Gujer, W., Marais, G.v.R. & Matsuo, T. (1987). *Activated Sludge Model No. 1*. London, England: IAWQ Scientific and Technical Report No. 1.
16. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C.M. & Marais, G.v.R. (1995). *Activated Sludge Model No. 2*. London, England: IWA Scientific and Technical Report No. 3.
17. Henze, M., Gujer, W., Mino, T. & van Loosdrecht, M.C.M. (2002). Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3. IWA Publishing, London, UK.
18. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., Marais, G.v.R. & van Loosdrecht M.C.M. (1999). Activated Sludge Model No.2d. ASM2D. *Water Science and Technology*, *39*(1), 165-182.
19. Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, Modelling and Design*, IWA Publishing, London.
20. Koch, G., Kuhni, M. & Siegrist, H. (2001) Calibration and validation of an ASM3-based steady-state model for activated sludge systems. Part II: Prediction of phosphorus removal. *Water Research*, 35(9), 2246-2255.
21. Lawrence, A.W. & McCarty, P.L. (1970). Unified basis for biological treatment design and operation*, Journal of the Sanitary Engineering Division*, *96*(3) 757-778.
22. Makinia, J. (2010). Mathematical modelling and computer simulation of activated sludge systems. London, Englland: IWA Publishing.
23. McKinney, R.H. (1962). Mathematics of complete mixing activated sludge, *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, *88*(SA3), 87-113.
24. Monod, J. (1949). The Growth of bacterial cultures, Annual Review of Microbiology, 3, 371-394.
25. Novick, A. & Szilard, L. (1950). Experiments with the Chemostat on spontaneous mutations of bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. *36*(12):708-719.
26. O'Briena, M., Mack, J., Lennox, B., Lovett, D., & Wall, A. (2011). Model predictive control of an activated sludge process: A case study. *Control Engineering Practice*, *19*(1), 54-61.
27. Shen, W., Chen, X., Pons, M.N. & Corriou, J.P. (2009). Model predictive control for wastewater treatment process with feedforward compensation. *Chemical Engineering Journal*, *155*(1-2), 161-174.
28. Stensel, H.D., & Makinia, J. (2014). Activated sludge process development. In D. Jenkins, & J. Wanner (Eds), Activated sludge – 100 years and counting (pp. 33-47). London: IWA Publishing.

29. van Loosdrecht, M.C.M., Lopez-Vazquez, C.M., Meijer, S.C.F, Hooijmans, C.M. & Brdjanovic, D. (2015). Twenty-five years of ASM1: past, present and future of wastewater treatment modelling. *Journal of Hydroinfomatics*, *17*(5), 697-718.