

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยเรื่อง

การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลแบบสามเฟส
ภายในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพชนิดตรึงฟิล์มขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร
ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังของบริษัท ชลเจริญ จำกัด

Development of Computational Fluid Dynamics (CFDs) Model for the Three-Phase Flow inside a
6,000-m³ Fixed-Film Biogas Reactor of Chonchareon, Co., Ltd., a Cassava Starch Production Plant

คณะผู้วิจัย

นางสาววรินธร สงคศิริ

นายอรรถพล นพรัตน์

นายถาวร รัตติทิวาพาณิชย์

บทคัดย่อ

ถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยปริมาตรถังปฏิกรณ์ที่มีความจุถึง 6,000 m³ การกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์จึงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญ ที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เพราะการกวนผสมที่ดีสามารถส่งเสริมให้เชื้อจุลินทรีย์มีโอกาสดพบกับสารอาหารในน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาค (three phases) ของน้ำ ก๊าซ และอนุภาคของจุลินทรีย์ ภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของบริษัท ชลเจริญ จำกัด การศึกษาครอบคลุมทั้งรูปแบบการไหลภายในท่อกระจายน้ำและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้า 120 240 600 และ 1,200 m³/d ซึ่งเป็นอัตราการป้อนน้ำเสียระหว่างที่โรงงานดำเนินการผลิตบางส่วนและเต็มกำลังนั้น ท่อกระจายน้ำสามารถจ่ายน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ได้ใกล้เคียงกันมากกว่า 90% ตลอดความยาวของท่อ อย่างไรก็ตามทุกอัตราการป้อนน้ำเสียพบจุดที่น้ำเสียหยุดนิ่ง ณ กึ่งกลางความยาวของท่อ จุดนี้อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำในระยะยาว ผลที่ได้จากการจำลองการไหลสอดคล้องกับผลการศึกษารูปแบบการกระจายตัวของตะกอน ซึ่งพบว่าตะกอนเกิดการสะสมตัวหนาแน่นในถังปฏิกรณ์ภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 และเบาบางภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 3 นั่นเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงปัญหาด้านการกวนผสมที่กำลังเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ด้วยเหตุที่โมเมนตัมของน้ำเสียเข้า เป็นหนึ่งกลไกสำคัญที่ขับเคลื่อนการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ การออกแบบท่อกระจายน้ำจึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

คำสำคัญ : การไหลแบบสามเฟส / ถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ/ CFD

Abstract

An industrial-scale biogas reactor whose size can be as large as 6,000 m³ may encounter insufficient degree of mixing. Good mixing enhances the encounter between microbes and their substrates. This research aimed to develop the CFD model of three-phase flow within an anaerobic wastewater treatment reactor of Chonchareon Co., Ltd., a cassava starch factory. The study covered the three-phase flow within distribution pipe and within reactor tank. Wastewater feeding rate of 120, 240, 600, and 1,200 m³/d, which are the rate of wastewater flow during high- and low-season of cassava starch production were varied. Simulation results showed that the distribution pipe supplied the wastewater at an efficiency of 90% similarity in velocities along the pipe length. However, all water feeding rates produced the stagnant flow at the middle of the pipe length, where the sludge may be accumulated. Experimental result showed a good agreement with the CFDsimulation results. Solid/sludge accumulation within reactor was found under the sampling port 1. Accumulation of sludge reflected improper fluid flow pattern within the reactor. CFD simulations may be an alternative tool for a better design of wastewater distribution within the reactor to enhance the system efficiency.

Keywords : Anaerobic Wastewater Treatment Reactor / CFD Simulation / Three-phase Flow

สารบัญเรื่อง

_Toc298769247

บทคัดย่อ	i
Abstract.....	ii
สารบัญเรื่อง.....	iii
สารบัญตาราง	v
สารบัญรูป	vi
บทนำ	8
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	10
วัตถุประสงค์เชิงจุดหมาย	10
วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม	10
ขอบเขตของโครงการวิจัย	10
ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	10
ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR).....	10
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	12
กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion).....	12
ถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ	13
การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics – CFD).....	13
วิธีการดำเนินการวิจัย	20
แบบจำลองถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดโรงงานอุตสาหกรรม	20
ศึกษาการไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งภูมิภาค ณ บริเวณจุดกระจายน้ำเข้าที่ก้นถังปฏิกรณ์ เพื่อหารูปแบบ	
การไหลเข้าของน้ำเสีย ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD).....	22
ศึกษารูปแบบไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งภูมิภาคภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ ด้วย	
หลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD).....	23
ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างภูมิภาคที่มีผลต่อรูปแบบไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำ	
เสียเข้าต่างๆ ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD).....	23
ศึกษารูปแบบการไหลแบบสามภูมิภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000	
ลูกบาศก์เมตร	24
ศึกษาการกระจายตัวของของแข็งแขวนลอย (Total suspended solid) ตลอดความสูงของถังปฏิกรณ์	24
สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือเก็บข้อมูล	26
ผลการดำเนินงานวิจัย.....	27

การจำลองรูปแบบการไหลแบบสามมิติภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขนาดโรงงาน อุตสาหกรรม ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)	27
1. ศึกษาารูปแบบไหลของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ	27
2. ศึกษาารูปแบบไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ	33
การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามมิติภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร	46
3. ศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid) ภายในถังปฏิกรณ์	46
บทสรุป	49
เอกสารอ้างอิง.....	51

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 สมการหลักของการไหลแบบอนุรักษ์	14
ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบตัวแปรบ่งชี้ประสิทธิภาพการกวนผสมที่หาได้จากการทดลองระหว่างการไหลแบบหนึ่งและสองวัฏภาค	15
ตารางที่ 3 ค่าความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคภายในถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ	20
ตารางที่ 4 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค ของถังปฏิกรณ์ของบริษัท ชลเจริญ	23
ตารางที่ 5 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบสามวัฏภาค ของถังปฏิกรณ์ของบริษัท ชลเจริญ	26
ตารางที่ 6 ความเร็วการไหลของน้ำเสียเข้า ณ จุดกระจายน้ำต่างๆ	39
ตารางที่ 7 ค่าของแรงแวนลอยทั้งหมด (TSS) ในหน่วยกรัม ที่แต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์	46

สารบัญรูป

รูปที่ 1 การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของระนาบ YZ ที่ (a) หนึ่งวัฏภาคและ (b) สองวัฏภาค ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วน้ำขาขึ้น 0.2 เมตรต่อชั่วโมง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 ซม. และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 7.7 มล. ต่อนาที	16
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของระนาบ YZ ที่ $x = 0$ ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วน้ำขาขึ้น 0.2 เมตรต่อชั่วโมง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 ซม. และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 7.7 มล. ต่อนาที โดยที่ความเร็วของฟองอากาศเท่ากับ 0.4018 เมตรต่อวินาที.....	16
รูปที่ 3 ค่า boundary condition ของถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ ที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT ...	17
รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง, (1) ถัง UASB; (2) ลูกปัด; (3) ระบบป้อนน้ำ (4) ระบบจับภาพ; C-1 ถึง C-5 คือกล้อง CCD	17
รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งกล้อง CCD	18
รูปที่ 6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของเหลวภายในถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ ที่ความเร็วขาขึ้น 5 m/hr	19
รูปที่ 7 องค์ประกอบภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	21
รูปที่ 8 ภาพขยายแสดงการสร้าง mesh บริเวณภายในถังปฏิกรณ์และท่อกระจายน้ำ.....	22
รูปที่ 9 ภาพจำลองถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 m^3 ณ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง บริษัท ชลเจริญ จำกัด ผังด้านบนสุดของถังปฏิกรณ์ประกอบด้วยช่องเก็บตัวอย่าง 4 ช่อง	25
รูปที่ 10 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d .	27
รูปที่ 11 เวกเตอร์ความเร็วแสดงรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำบริเวณรูกระจายน้ำที่ 31 และ 32 รวมทั้งบริเวณที่น้ำจากปลายท่อทั้งสองด้านมาบรรจบกันทำให้เกิดบริเวณที่น้ำหยุดนิ่ง	28
รูปที่ 12 แถบสีแสดงความดันที่แต่ละระดับความยาวของท่อกระจายน้ำ	29
รูปที่ 13 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 240 m^3/d .	31
รูปที่ 14 เส้นทางการไหล (stream line) ของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำ ณ รูกระจายน้ำที่ 41 และ 39.....	31
รูปที่ 15 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600 m^3/d .	32
รูปที่ 16 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 1,200 m^3/d	32
รูปที่ 17 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 m^3 ณ มุมมองต่างๆ ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d โดยลูกศรและวงกลมสีแดงแสดงจุดที่การไหลของน้ำเสียมียลักษณะหมุนวน	34

รูปที่ 18	वेक्टरแสดงการหมุนวนของน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขนาด $6,000 \text{ m}^3$ ที่ดำเนินระบบด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ ซึ่งเกลียวการหมุนวนของน้ำเสียมีทิศทางการหมุนจากปากลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์.....	35
รูปที่ 19	वेक्टरแสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด $6,000 \text{ m}^3$ เมื่อมองจากด้านใต้ถึง ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ โดยลูกศรสีแดงแสดงจุดที่การไหลของน้ำเสียมีลักษณะหมุนวน	35
รูปที่ 20	ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลบริเวณภายในถังปฏิกรณ์ ที่ดำเนินระบบด้วยสภาวะ ก) $240 \text{ m}^3/\text{d}$ และ ข) $600 \text{ m}^3/\text{d}$	36
รูปที่ 21	वेक्टरแสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด $6,000 \text{ m}^3$ ณ มุมมองต่างๆ ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย $1,200 \text{ m}^3/\text{d}$	37
รูปที่ 22	เส้นทางการไหลของน้ำเสียจากรูกระจายน้ำที่ 36	38
รูปที่ 23	ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศเปรียบเทียบระหว่าง (ก) การไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งวัฏภาค (ข) การไหลของน้ำเสียเมื่อมีเม็ดตะกอน	40
รูปที่ 24	ภาพมุมสูงของรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งพบเกลียวการหมุนวนของน้ำเสียจำนวน 8 เกลียว.....	41
รูปที่ 25	वेक्टरแสดงเกลียวการหมุนวนของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่ระดับความสูงต่างๆ โดยแสดงรูปแบบการไหล 1 ใน 4 ของปริมาตรถึงเนื่องจากการการไหลเป็นแบบสมมาตร	42
รูปที่ 26	वेक्टरแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 และ 4 m	43
รูปที่ 27	ภาพจากด้านใต้ของถังปฏิกรณ์แสดงเวक्टरทิศทางการไหลของเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 4 และ 5.5 m	43
รูปที่ 28	ภาพจากมุมสูงของถังปฏิกรณ์แสดงเวक्टरทิศทางการไหลของเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 4 และ 5.5 m และแสดงความเร็วการหลุดออกจากถังปฏิกรณ์ของเม็ดตะกอน (ที่ระนาบความสูง 1 และ 2 m ไม่เห็นเวक्टरเนื่องจากเวक्टरมีทิศพุ่งลงใต้ระนาบ)	44
รูปที่ 29	ตำแหน่งการวางตัวของปลายท่อกระจายน้ำทั้งสองด้าน และ (วงกลมแดง) บริเวณที่เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมของน้ำเสียเข้าอย่างรุนแรง.....	45
รูปที่ 30	กราฟเปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid, TSS : g/L) ที่แต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์.....	47

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรและอาหารมากกว่า 10,000 โรงงาน ซึ่งผู้ประกอบการต้องแบกรับภาระการบำบัดน้ำเสียจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ในขณะเดียวกันภายในโรงงานมีความต้องการใช้พลังงานสูงไม่ว่าในรูปของน้ำมันเตาและไฟฟ้า อาทิ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังผลิตน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในรูปซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ถึง 15 ลูกบาศก์เมตรต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน จะสูญเสียพลังงานในรูปน้ำมันเตาเพื่อการอบแห้งถึง 40 ลิตร และกระแสไฟฟ้า 165 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันแป้ง (รวมค่าพลังงานประมาณ 1,000 บาทต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน) (ข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2551)

โรงงานอุตสาหกรรมแป้งโดยทั่วไปนิยมใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเปิด ซึ่งใช้พื้นที่ไม่ต่ำกว่า 100 ไร่ และมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวนชาวบ้านบริเวณใกล้เคียง อีกทั้ง ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียต่ำ ส่งผลให้โรงงานเสียค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีในระบบบำบัดประมาณสองแสนบาทต่อเดือน ดังนั้น การส่งเสริมการนำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว ยังช่วยแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อม และลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในสถานะที่การใช้พลังงานของประเทศไทยและราคาน้ำมันในตลาดโลกเพิ่มขึ้น

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนและผลิตก๊าซชีวภาพได้ถูกนำไปใช้งานจริงในระดับโรงงานอุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมผลิตแป้งข้าว จังหวัดนครปฐม และอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนประสิทธิภาพสูงถูกนำไปใช้จริงในโรงงานแป้งมันสำปะหลังอีก 4 โรงงานคือ บริษัท ชลเจริญ จำกัด บริษัท ชัยภูมิพืชผล จำกัด บริษัท แป้งมันตะวันออก จำกัด และบริษัท สี่มาอินเตอร์โปรดักส์ จำกัด ซึ่งทั้ง 4 โรงงานผลิตก๊าซชีวภาพได้รวมกันไม่ต่ำกว่า 15.36 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี หรือ 230.4 ล้านลูกบาศก์เมตร ตลอดอายุใช้งานของระบบ 15 ปี สามารถนำมาทดแทนน้ำมันเตาในกระบวนการผลิตของโรงงาน ทำให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานเทียบเท่าน้ำมันเตา 7.2 ล้านลิตร/ปี หรือ 108 ล้านลิตรตลอดอายุใช้งานของระบบ 15 ปี คิดเป็นมูลค่าถึง 1,512 ล้านบาท (ราคาน้ำมันเตา 14 บาท/ลิตร) (ข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2551) จากการทดลองเดินระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพที่โรงงานชลเจริญในปัจจุบันพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพทดแทนการใช้น้ำมันเตาได้ 100% ของกระบวนการผลิต ช่วยให้โรงงานประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ประมาณ 24 ล้านบาทต่อปี (คิดจากราคาน้ำมันเตา 14 บาท/ลิตร)

ในการเพิ่มหรือขยายขนาดของถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปจากขนาดระดับห้องปฏิบัติการเป็นระดับโรงงานต้นแบบ และเป็นระดับอุตสาหกรรมตามลำดับนั้น เป็นการออกแบบถึง

ปฏิกรณ์โดยคำนึงถึงความสามารถในการรับภาระสารอินทรีย์ หรือความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อปริมาณเป็นหลัก โดยมีได้คำนึงถึงรูปแบบการไหลของของไหลและอนุภาคภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งรูปแบบการไหลเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ เนื่องจากรูปแบบการไหลสามารถบ่งชี้โอกาสการสัมผัสระหว่างเชื้อจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ในน้ำ ปัจจุบันมีการนำรูปแบบการไหลและคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของไหลมาเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการของการออกแบบระบบบำบัดเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

ดังนั้น เพื่อเป็นการศึกษาวิจัยและเพิ่มศักยภาพเทคโนโลยีการผลิตการผลิตก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวิภาค (three phases) ของน้ำ ก๊าซ และอนุภาคของจุลินทรีย์ ภายในถังปฏิกรณ์ขนาดระดับอุตสาหกรรมปริมาตร 6,000 ลูกบาศก์เมตร ณ บริษัท ชลเจริญ จำกัด เพื่อทำนายการไหลที่จะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ขนาดอุตสาหกรรม และเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการใช้งานจริงภายในประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์เชิงจุดมุ่งหมาย

- เพื่อวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดของเสียเพื่อผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพ
- เพื่อเพิ่มศักยภาพการออกแบบระบบบำบัดของเสียในระดับอุตสาหกรรม
- เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดของเสียให้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม

- เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) Model
- เพื่อศึกษาระบบการไหลของของไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร

ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองการไหล (computational fluid dynamics, CFDs) ที่สามารถใช้งานในรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นภายในคอมพิวเตอร์จะถูกปรับแก้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การทำงานที่ใกล้เคียงกับการไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร

ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR)

ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์มีวัสดุ เช่น ตาข่ายในลอน เชือก เพื่อใช้ตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์อยู่ภายในระบบบำบัดในปริมาณที่มากที่สุดและระยะเวลานาน ทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง ถังปฏิกรณ์แบบที่ใช้ตัวกรองเพื่อกักชีวมวลในระบบนี้ เริ่มแรกถูกนำมาใช้ในการบำบัดของเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ โดย Coulter และคณะ (Coulter และคณะ, 1957) ต่อมา Young และ McCarty (1962) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเรื่อยมา จากงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เจือจางและเข้มข้นได้ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ทำให้มีการพัฒนาถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้บางครั้งเรียก Anaerobic Fixed Film Reactor (AFFR) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์แบบตัวกรอง (Anaerobic filter) การบรรจุเป็นแบบสุ่ม จุลินทรีย์อยู่ใน

ลักษณะที่เหมือนกับตุ๊กกรอง โดยมีทั้งจุลินทรีย์ที่จับบนผิววัสดุ และที่ถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ วัสดุตัวกลางถูกวางอย่างเป็นระเบียบ เช่น เป็นท่อ หรือเป็นแผ่น ขนานกันไป จุลินทรีย์จับอยู่เฉพาะบนผิววัสดุเท่านั้น ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้จุลินทรีย์อยู่ในสภาพเป็นฟิล์มจึงสามารถลดระยะเวลาที่เก็บชีวมวลในถังได้ โดยไม่ต้องกังวลกับปัญหาการหลุดออกนอกระบบ (Washout) ของชีวมวลออกจากระบบ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงขึ้น และใช้ระยะเวลาสั้น ระบบมีความเสถียรสามารถฟื้นตัวได้เร็วเมื่อระบบ Shockload อีกทั้งยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าเชื้อที่แขวนลอย นอกจากนี้ฟิล์มชีวในระบบมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงถึง 1 กก.ชีโอดี/กก.VSS/วัน และมีประสิทธิภาพในการเจริญเป็น 0.1 กก.VSS/กก.ชีโอดี (Sastry และ Vickineswaty, 1995) ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์ม ชีวะและปริมาณของจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง สำหรับการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและ ขนาดของช่องว่าง (void) ของวัสดุตัวกลางมีความสำคัญมากกว่าปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ทั้งที่มีความเข้มข้นสูงและเจือจาง ตั้งแต่ 4,000-130,000 มก.ชีโอดี/ลิตร ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ขึ้นกับหลาย ปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุตัวกลาง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตร อุณหภูมิ และการกวนผสมของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นกับ จำนวนจุลินทรีย์ที่คงอยู่ในถังปฏิกรณ์และชนิดของน้ำเสีย (Van den Berg และคณะ, 1985; Lo และคณะ, 1984) ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีประสิทธิภาพสูงและสามารถรับภาระการเติมสารอินทรีย์ที่สูง โดยใช้ HRT ที่สั้นกว่า จึงใช้ขนาดถังปฏิกรณ์ที่เล็กลงได้

Bhavik K. Acharya และคณะ (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดตรึงฟิล์มเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้วัสดุตัวกลางเป็นถ่าน กาบมะพร้าว และเส้นใยไผ่ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุราที่มีค่า COD และ BOD อยู่ในช่วง 110,000-150,000 และ 50,000-60,000 mg/L ตามลำดับ พบว่าการใช้กากมะพร้าวเป็นตัวกลางให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด โดยสามารถลดค่า COD ได้ 23.25 kg COD/m³d หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด COD 65% อีกทั้งให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ที่ 7.2 m³/m³d

H. Chua และ J.P.C. Fung (1996) ศึกษาผลของการวนน้ำกลับภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียผลิต ก๊าซชีวภาพชนิดตรึงฟิล์มที่มีต่อรูปแบบการกวนผสม จากการศึกษารูปแบบการกวนผสมด้วยเทคนิค RTD (Residence Time Distribution) ประกอบกับการใช้ dispersion model พบว่าการวนน้ำขาออกกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราเร็วที่มากกว่าอัตราการป้อนน้ำขาเข้า 3 เท่าให้ประสิทธิภาพการกวนผสมดีที่สุด โดยเห็นได้จากค่า dispersion ที่พบว่าสูงที่สุด ขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการวนน้ำกลับให้ค่า dispersion ต่ำกว่า สรุปได้ว่าการวนน้ำกลับส่งผลต่อการเจือจางและการกระจายตัวของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งมีผลต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ผลิตจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอาศัยกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ซึ่งปฏิกิริยาของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ได้แก่



ปฏิกิริยานี้สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนใหญ่ได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการย่อยสลายโพลิเมอร์ (Polymer breakdown) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน โดยใช้เอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์ (Extracellular enzymes) ของจุลินทรีย์พวก Hydrolytic bacteria และ Fermentative bacteria การย่อยสลายขั้นตอนนี้เป็นไปได้ช้าและมีข้อจำกัดในการย่อยสลายของเสียบางประเภท เช่น ของเสียจำพวกเซลลูโลส (Cellulolytic wastes) ที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ไขมัน และโปรตีน ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็น 0.04 - 0.13, 0.54, 0.08 - 1.7 และ 0.02 - 0.03 ต่อวัน ตามลำดับ และมีอัตราการเจริญของเซลล์เป็น 0.1 กิโลกรัมของ VSS ต่อกิโลกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด (Sastry และ Vickneswaty, 1995) ผลผลิตก๊าซที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น ซึ่งกระบวนการนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ยังไม่มีการลดค่าชีโอดีในขั้นตอนนี้ (เพ็ชรพร, 2538)

2. กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำ ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดที่ระเหยง่าย (Volatile acids) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก จุลินทรีย์พวกนี้เรียกว่า แบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acid formers หรือ Non-methanogenic bacteria) ซึ่งชนิดของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น

3. กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดที่ระเหยง่ายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการอะซิโดเจเนซิสจะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์ Homoacetogenic bacteria ให้เป็นอะซิเตท ฟอร์เมท ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดที่ระเหยง่ายและไฮโดรเจนในปริมาณที่สูง เนื่องจากสามารถยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวกับการย่อยสลายกรดอินทรีย์เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันสายยาวได้ หรือจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายวงแหวนได้ การย่อยสลายสารประกอบเหล่านี้ขึ้นกับปริมาณไฮโดรเจน โดยที่ปริมาณไฮโดรเจนสูงจะยับยั้งการย่อยสลาย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ อะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

4. กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ได้แก่ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากขั้นตอนการเกิดกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้มีเฉพาะเจาะจงสูง คือ แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม Acetoclastic methanogens และ Hydrogenophilic methanogens (Henz และ Harremoes, 1983) จุลินทรีย์เหล่านี้มีความสามารถพิเศษในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ พร้อมๆกับเกิดปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอน ไดออกไซด์ ในขบวนการนี้ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับไฮโดรเจนตัวสุดท้ายซึ่งคล้ายคลึงกับออกซิเจนในกระบวนการหายใจ ประมาณร้อยละ 70 ของมีเทนที่เกิดขึ้นมาจากกรดอะซิติก และอีกร้อยละ 30 มาจากการรีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นมีเทน (Sastry และ Vickineswaty, 1995)

ถึงปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

การพัฒนาถึงปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพประสิทธิภาพสูง (High Rate Anaerobic Reactor - HRAR) อาศัยหลักการพื้นฐานของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ โดยมีการรักษาเซลล์จุลินทรีย์ให้คงอยู่ในถึงปฏิกรณ์มากที่สุด เพื่อให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างรวดเร็วและผลิตก๊าซได้มาก ในการกักชีวมวลหรือเซลล์จุลินทรีย์ให้อยู่ภายในถัง ทำได้โดยใช้หลักการตรึงเซลล์บนหรือรอบๆ วัสดุรองรับหรือบนพื้นผิววัสดุยึดเกาะหรือวัสดุตัวกลาง (Inert materials) หรือทำให้จุลินทรีย์เกาะกันเป็นก้อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการตกตะกอน ส่งผลให้จุลินทรีย์อยู่ในถึงปฏิกรณ์ได้นาน (Albagnac, 1990) ข้อดีของการใช้ถึงปฏิกรณ์เหล่านี้คือ สามารถกักจุลินทรีย์ในถึงปฏิกรณ์ไว้ได้เป็นจำนวนมากและเป็นระยะเวลานาน ทำให้ระบบทำงานได้ที่ระยะเวลาการกักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time – HRT) ต่ำ สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูง ทนต่อสภาวะ Organic shockloads ได้ดี อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายและป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียจุลินทรีย์ในขณะที่ระบบเกิดการ Overloading ทำให้ช่วยลดขนาดของถึงปฏิกรณ์และราคาลงทุน ตลอดจนได้ระบบที่มีเสถียรภาพสูง

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics – CFD)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) เป็นการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การไหลของความร้อนและการถ่ายเทความร้อน รวมถึงการ

เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการคำนวณสภาวะลักษณะการไหลทำได้โดยการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เป็นหลัก ตารางที่ 1 แสดงสมการหลักของการไหล

ตารางที่ 1 สมการหลักของการไหลแบบอนุรักษ

มวล	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0$
โมเมนตัมทิศทาง x	$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx}$
โมเมนตัมทิศทาง y	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My}$
โมเมนตัมทิศทาง z	$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz}$
พลังงานภายใน	$\frac{\partial (\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \bar{u}) = -p(\nabla \cdot \bar{u}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_i$

โดยที่ $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$, $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$, $w(x, y, z, t)$ เป็นคุณสมบัติความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ และเวกเตอร์ความเร็ว ตามลำดับ และ i เป็นพลังงานภายใน

พรประดัง (2003) ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการศึกษาผลของอัตราเร็วของน้ำขาเข้า (liquid upflow velocity) และการเกิดก๊าซ (gas production) ต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่มีรูปทรงเหลี่ยมขนาดกว้าง 0.5 เมตร ยาว 0.5 เมตร และสูง 1.08 เมตร โดยมีท่อน้ำเข้าที่กั้นถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.8 ซม. และท่อน้ำออกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 ซม. ที่ด้านข้างบนของ

จากการศึกษาผลของการเกิดก๊าซต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ พบว่า ถังปฏิกรณ์ที่มีสองเฟส ได้แก่ น้ำและก๊าซ มีการกวนผสมที่ดีกว่าถังที่มีเพียงเฟสเดียว ซึ่งพบการเกิด dead zone หรือการเกิด vortex ขึ้นสองส่วนภายในถังเนื่องจากอัตราเร็วของน้ำขาเข้าไม่พอในกรณีหนึ่งเฟส สำหรับกรณีสองเฟส ก๊าซภายในถังช่วยในการพาน้ำขึ้นไปสู่ด้านบนของถังและช่วยในการกวนผสม ซึ่งเห็นได้จากอัตราเร็วของน้ำภายในถังที่มีสองเฟสมีค่าสูงกว่าอัตราเร็วของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่มีเฟสเดียว

ผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการคำนวณพลศาสตร์ของไหล สามารถแสดงรูปแบบการไหลของน้ำและก๊าซภายในถังปฏิกรณ์ได้ ดังนั้น ในการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์จากระดับห้องปฏิบัติการเป็นระดับโรงงานต้นแบบ และเป็นระดับอุตสาหกรรม สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการทำนายรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ได้ขึ้นหนึ่ง ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาหาปัจจัยหลักที่ควบคุมการขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ ซึ่งปัจจัยหลักดังกล่าวส่งผลมาจากการไหลของของไหลและการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์

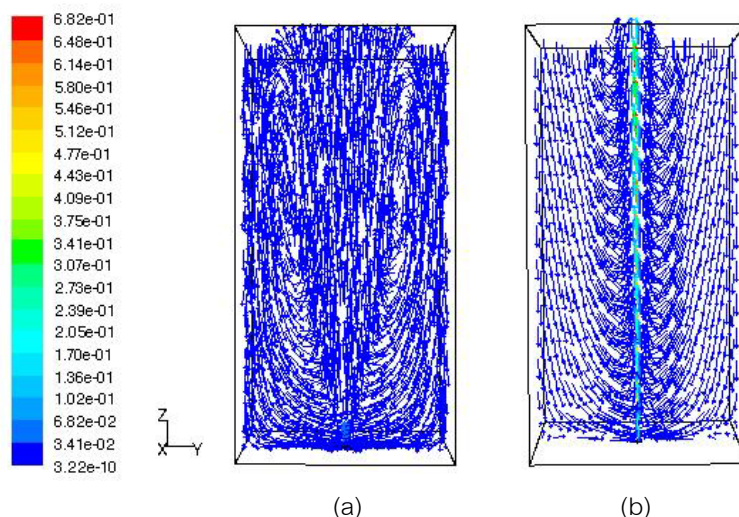
ถาวร รัตติวิพาณิช (2006) นำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาจำลองรูปแบบการไหลของน้ำและก๊าซภายในถังปฏิกรณ์ ก๊าซที่ถูกผลิตจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อ ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกวนผสม ซึ่งตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรบ่งชี้ประสิทธิภาพการกวนผสมที่หาได้จากการทดลองระหว่างกรไหลแบบหนึ่งและสองวัฏภาค โดยในการทดลองก๊าซมีค่า superficial gas velocity เท่ากับ 0.45 m/s

ผลการทดลองดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ฟองก๊าซส่งผลต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากโมเมนตัมที่เกิดจากการลอยตัวของฟองก๊าซกระตุ้นการถ่ายเทมวลแบบการพาในแนวแกนของถัง การกวนผสมจึงเข้าใกล้แบบ well-mixed ดังเห็นได้จาก RTD/HRT และ $(RTD - t_{Lag\ Phase})/HRT$ ที่เข้าใกล้ 1 และ $t_{Lag\ Phase}/HRT$ เข้าใกล้ 0 อย่างไรก็ตามการถ่ายเทมวลแบบการพาในแนวแกนของถังที่มากเกินไปอาจทำให้น้ำขาเข้าไหลลัดวงจร ซึ่งเห็นได้จากค่า Specific V_{dead} มีค่าสูงเมื่อมีฟองก๊าซ ผลของฟองก๊าซ

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบตัวแปรบ่งชี้ประสิทธิภาพการกวนผสมที่หาได้จากการทดลองระหว่างกรไหลแบบหนึ่งและสองวัฏภาค

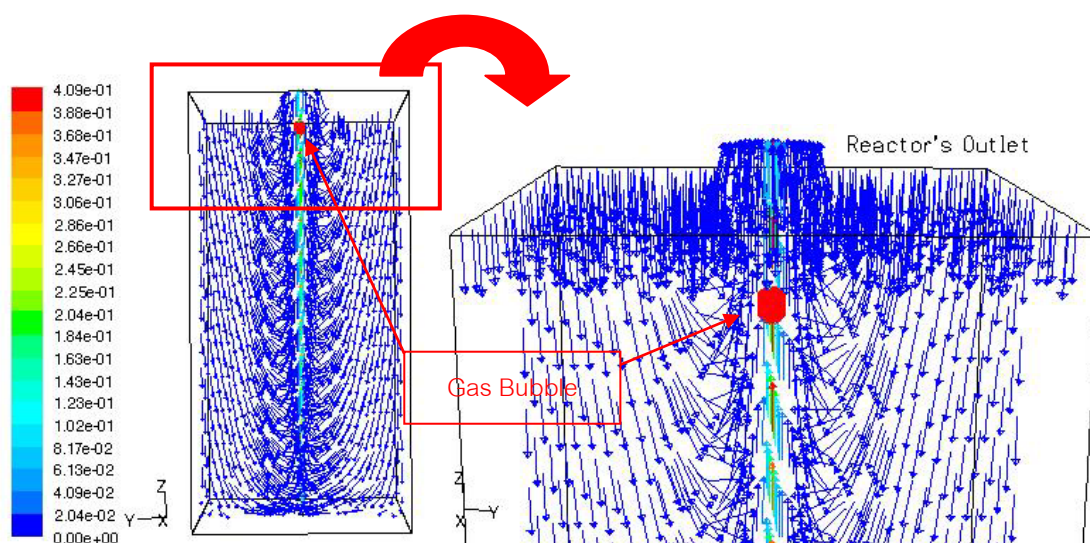
Fluid Flow Pattern Defining Parameters	One-Phase (Liquid Flow)	Two-Phase (Liquid-Gas Flow)
RTD/HRT	1.97	0.99
$t_{Lag\ Phase}/HRT$	1.04	0.11
$(RTD - t_{Lag\ Phase})/HRT$	0.47	0.89
t_{CSTR}	2.68	2.42
Specific V_{dead}	6.75×10^{-2}	1.20×10^{-1}

สามารถเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อศึกษาด้วยการจำลองตามหลัก CFD ดังรูปที่ 1 เปรียบเทียบการกวนผสมภายในถังที่มีและไม่มีฟองก๊าซ จะเห็นว่าเมื่อไม่มีฟองก๊าซ (รูปที่ 1a) น้ำขาเข้ามีการกระจายตัวออกในแนวรัศมีของถัง ซึ่งสนับสนุนให้เกิดการไหลแบบ plug ขณะฟองก๊าซ (รูปที่ 1b) กระตุ้นการกวนผสมในแนวแกนของถัง ส่งผลให้การกวนผสมเกิดได้ดี



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของระนาบ YZ ที่ (a) หนึ่งวิถีภาคและ (b) สองวิถีภาค ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วน้ำขาขึ้น 0.2 เมตรต่อชั่วโมง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 ซม. และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 7.7 มล. ต่อนาที

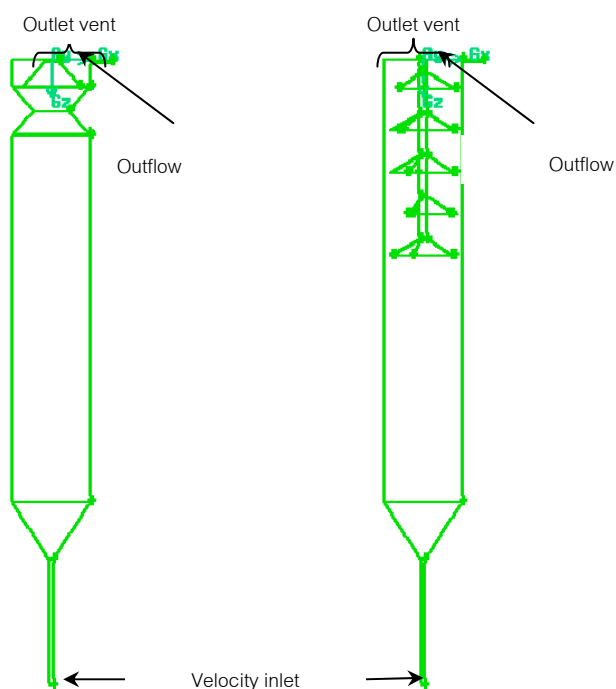
ผลจากการจำลองการไหลสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ดังรูปที่ 2 แสดงความเร็วการไหลของก๊าซที่ได้จากการจำลองมีค่าเท่ากับ 0.4018 m/s เมื่อเทียบกับการทดลองที่วัดได้เท่ากับ 0.45 m/s แล้ว มีความเหมือนถึง 89.29 %



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของระนาบ YZ ที่ $x = 0$ ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ที่ความเร็วน้ำขาขึ้น 0.2 เมตรต่อชั่วโมง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 ซม. และอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 7.7 มล. ต่อนาที โดยที่ความเร็วของฟองอากาศเท่ากับ 0.4018 เมตรต่อวินาที

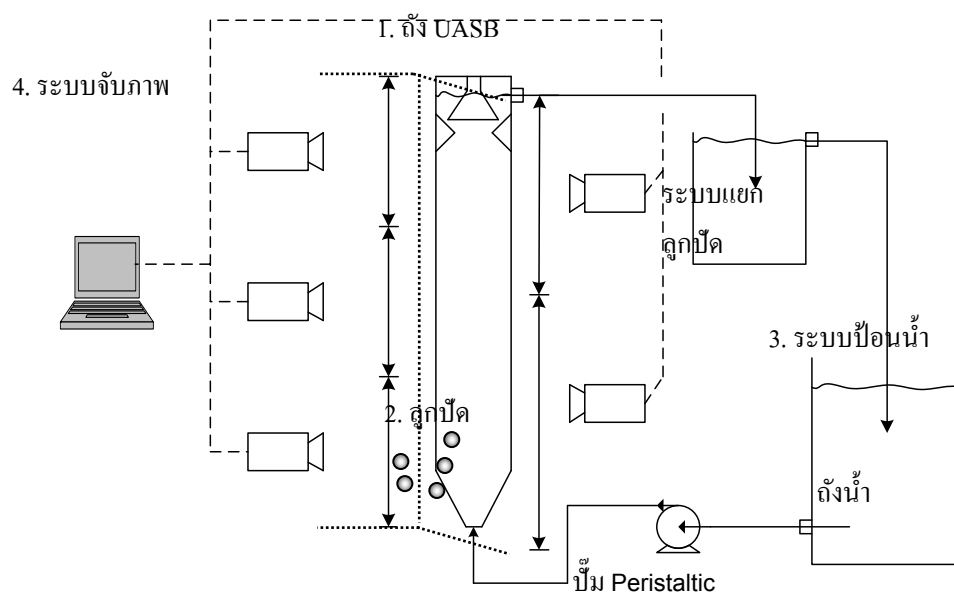
ศศิธร บุญญะ (2006) นำวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาจำลองรูปแบบการไหลของน้ำและอนุภาคของแข็งภายในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระบบแยกสามวิถีภาคสองรูปแบบ คือ แบบดั้งเดิม และแบบพิเศษ (รูปที่ 3) ที่มีต่อพฤติกรรมของการไหลของอนุภาคของแข็ง โดยทำการทดลอง

เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคในถังปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายของอนุภาคขณะที่มีการเคลื่อนที่ (รูปที่ 4)



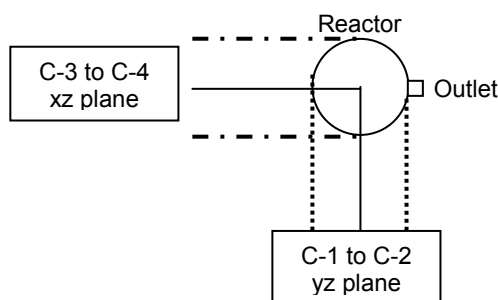
รูปที่ 3 ค่า boundary condition ของถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ ที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT

รูปที่ 4 แสดงการจัดวางระบบการทดลอง รวมถึงรายละเอียดของอุปกรณ์และสมบัติของอนุภาค



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง, (1) ถัง UASB; (2) รูปิด; (3) ระบบปั๊มน้ำ (4) ระบบจับภาพ; C-1 ถึง C-5 คือกล้อง CCD

กล้อง CCD 5 ตัว (Fujiko FK-974S) ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่แตกต่างกัน เพื่อเก็บตำแหน่งของลูกปัดทั้งสามแกน ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับกล้องตัวสุดท้ายจะถูกติดตั้งในตำแหน่งของการฉีดลูกปัดเข้าถัง เพื่อบันทึกเวลาเริ่มต้นที่มีลูกปัดเข้าสู่ระบบ

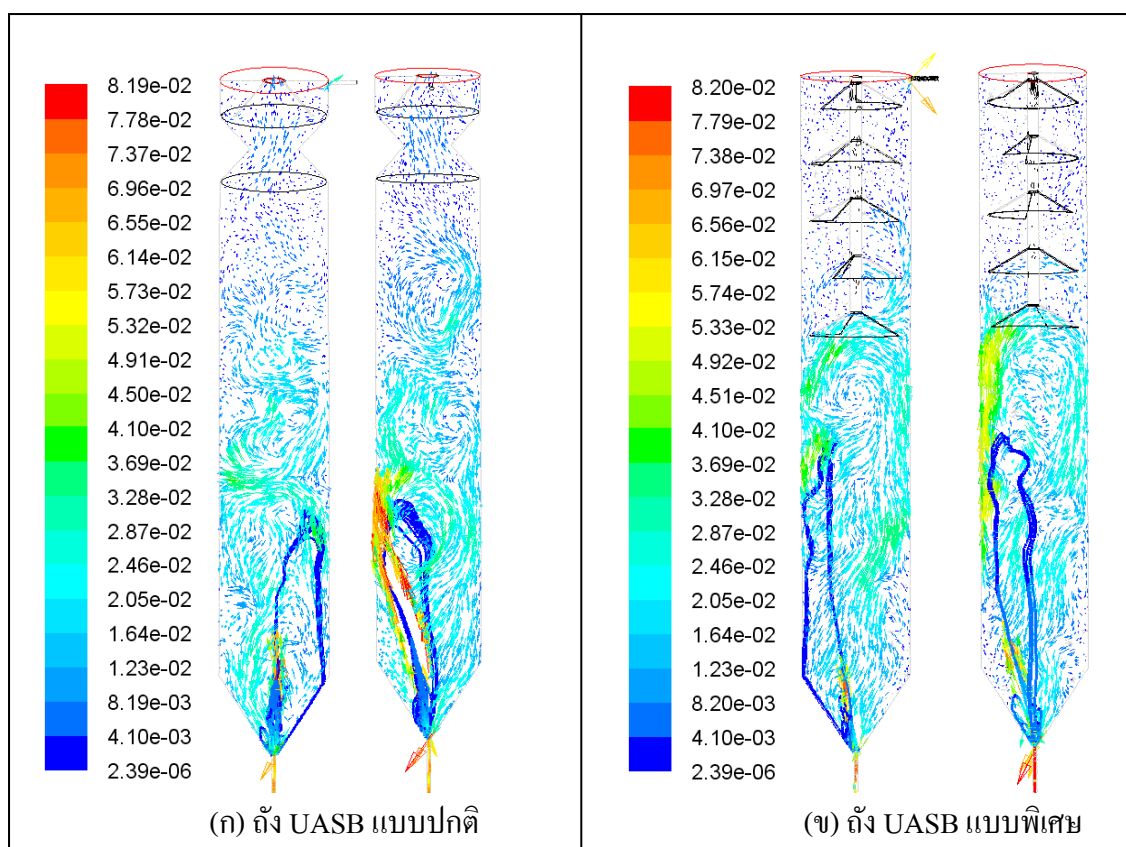


รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งกล้อง CCD

ในทุกการทดลอง น้ำถูกส่งเข้าถังที่อัตราการป้อนคงที่จนกว่าระบบเข้าสู่สภาวะเสถียรที่ 5 HRTs หลังจากนั้นจึงทำการปล่อยลูกปัดเข้าไปในระบบ กล้องทุกตัวจะเริ่มบันทึกพร้อมกันเป็นเวลา 10 นาที การเคลื่อนที่ของลูกปัดภายในถังถูกบันทึกไว้ด้วยกล้อง CCD 5 ตัว (C-1 to C-4) โดยตั้งกล้องในระนาบ xz ที่ความสูง 14 เซนติเมตร และในระนาบ yz ที่ความสูงเท่ากัน ทำการบันทึกภาพทุก 3 วินาที เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของลูกปัดในรูปโดยใช้โปรแกรม Photoshop ซึ่งตำแหน่งที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian-coordinate) โดยมีจุดกำเนิดอยู่ที่ด้านล่างสุดของถัง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการไหลแบบหนึ่งภูมิภาคและสองภูมิภาค พบว่าอนุภาคของแข็งมีทิศทางการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับการไหลของน้ำ นอกจากนั้น แบบจำลองการไหลแบบสองภูมิภาคถูกนำมาศึกษาผลกระทบของความเร็วขาขึ้นของน้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ โดยเปลี่ยนค่าความเร็วขาขึ้นในช่วง 1 ถึง 5 เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้อนุภาคของแข็งชนิดเดียวกัน ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วขาขึ้นของน้ำที่แตกต่างกันส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของของแข็งต่างกัน ด้วย โดยที่ความเร็วขาขึ้น 5 เมตรต่อชั่วโมง มีการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ที่ดีกว่าที่ความเร็วขาขึ้น 3 และ 1 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของระบบแยกสามภูมิภาคทั้งในการทดลองและแบบจำลองพบว่า ระบบแยกแบบพิเศษส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอนุภาคช้ากว่าแบบปกติถึงร้อยละ 6.19 ในการทดลองและร้อยละ 6.16 ในแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์แบบพิเศษสามารถเก็บกักอนุภาคของแข็งได้นานกว่าชนิดปกติ

นอกจากนี้ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของเหลวภายในถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ ซึ่งจะพบว่าน้ำที่ผ่านระบบแยกก๊าซภายในถัง UASB แบบพิเศษ มีค่าความเร็วน้อยกว่าถัง UASB แบบปกติ เนื่องจากไม่มี slip condition บนผนังของระบบแยกก๊าซ และโมเมนตัมของน้ำจะสูญเสียไปเมื่อมีการชนผนังระบบแยกก๊าซ นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในถัง UASB แบบพิเศษจะมีความมากกว่าถัง UASB แบบปกติ เนื่องจากด้านล่างของถังมีการกวนเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทโมเมนตัมหลังจากที่น้ำชนกับผนังระบบแยกก๊าซ รวมถึงการหมุนวนของน้ำใต้ระบบแยกก๊าซก็ช่วยเพิ่มระยะเก็บกักน้ำภายในถังด้วย



รูปที่ 6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของเหลวภายในถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ ที่ความเร็วขาขึ้น 5 m/hr

ตารางที่ 3 ค่าความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคภายในถัง UASB แบบปกติและแบบพิเศษ

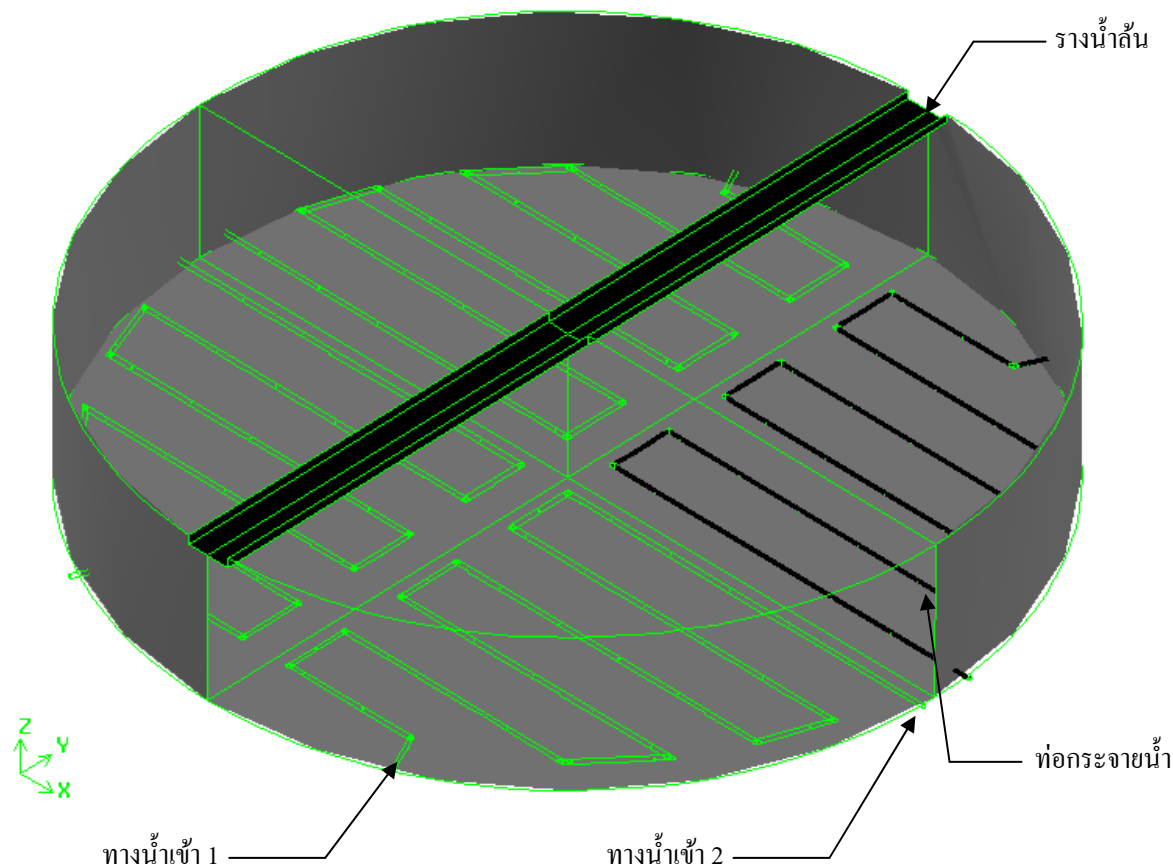
ถัง UASB	ค่าความเร็วเฉลี่ยของอนุภาค (m/s)	
	การทดลอง	แบบจำลอง
แบบปกติ	0.039	0.031
แบบพิเศษ	0.037	0.029

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคภายในถัง UASB แบบปกติมีค่าสูงกว่าถัง UASB แบบพิเศษ ทั้งจากการทดลองและแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคภายในถัง UASB แบบพิเศษสามารถคงอยู่ภายในถังได้นานกว่าแบบปกติ และเมื่อพิจารณารูปแบบการไหลของของเหลวภายในถัง UASB แบบพิเศษ พบว่าการไหลกลับของน้ำลงสู่ด้านล่างของถัง จะไหลด้วยความเร็วที่มากกว่าในถังแบบปกติ ทำให้ค่าแรงหน่วงที่กระทำบนตัววัตถุมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นอนุภาคจึงเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า ส่งผลให้ถังแบบพิเศษสามารถเก็บกักอนุภาคไว้ได้นานกว่าถังแบบปกติ

วิธีการดำเนินการวิจัย

แบบจำลองถึงปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดโรงงานอุตสาหกรรม

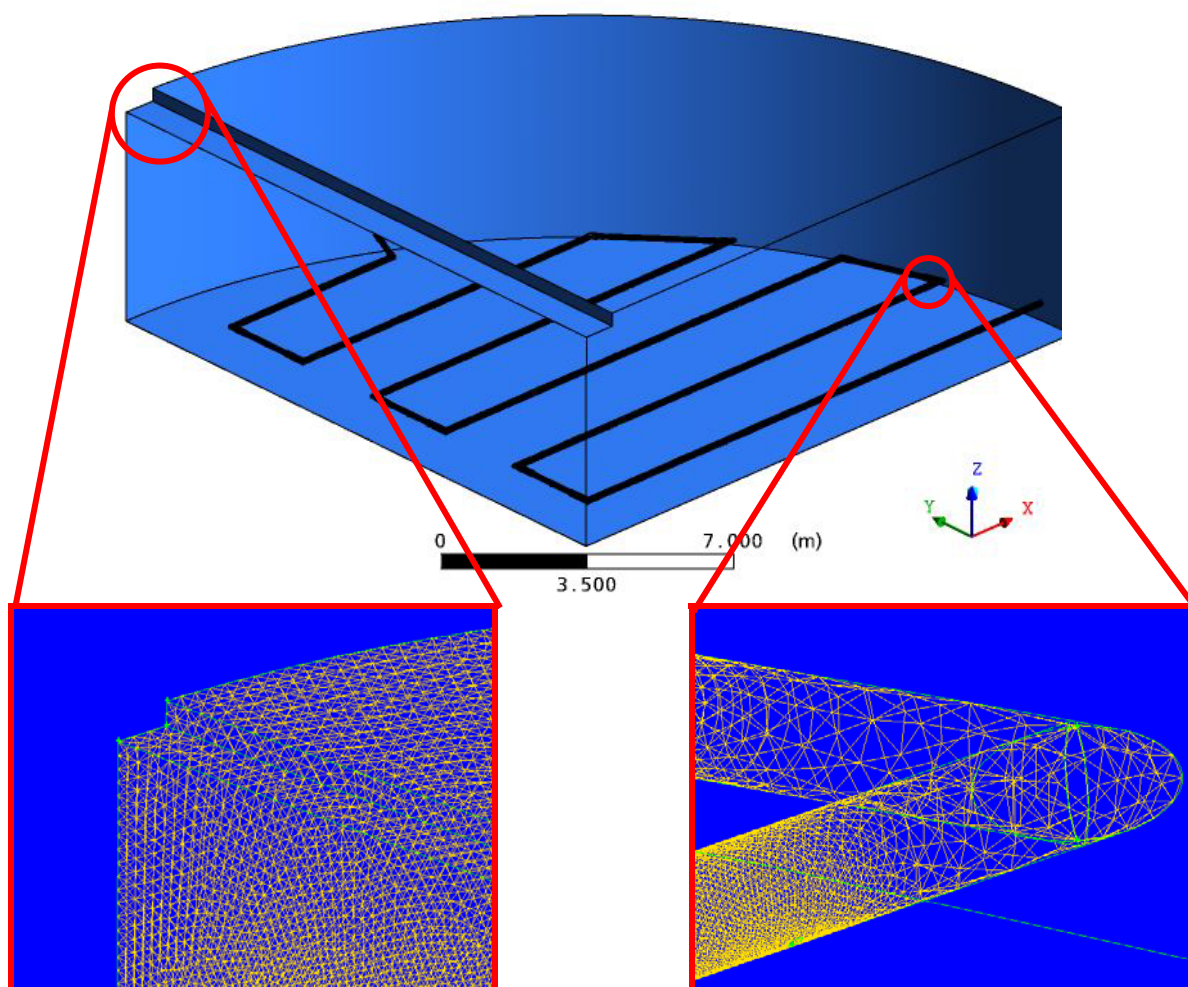
แบบจำลองถึงปฏิกรณ์ขนาดโรงงานอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยโปรแกรม GAMBIT[®] ตามสัดส่วนจริงของถังปฏิกรณ์แบบครึ่งฟิล์มขนาดระดับอุตสาหกรรม ณ บริษัท ชลเจริญ จำกัด (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 องค์ประกอบภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

รูปที่ 7 ถังปฏิกรณ์มีความจุ 6,000 ลูกบาศก์เมตร ที่ก้นถังปฏิกรณ์ถูกติดตั้งด้วยท่อกะจ่ายน้ำจำนวน 4 เส้น ท่อแต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 cm และยาวประมาณ 83 เมตร น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าจากด้านปลายทั้งสอง (ทางน้ำเข้า 1 และ 2) จากนั้นน้ำเสียที่ไหลไปตามท่อจะกระจายตัวเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านทางรูกระจายน้ำขนาด 2 cm ที่ถูกเจาะไว้ตลอดความยาวของเส้นท่อ

แบบจำลองท่อกะจ่ายน้ำและถังปฏิกรณ์ ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรเล็กๆ (meshing) ก่อนทำการจำลองการไหลจำนวนทั้งสิ้น 3,148,558 และ 2,265,975 mesh ตามลำดับ รูปทรงของ mesh ที่เลือกใช้มีรูปร่างเป็นทรงปิรามิดหรือทรงสี่หน้า เนื่องจากรูปทรง mesh ชนิดนี้สามารถแบ่งปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์และท่อกะจ่ายน้ำได้เหมาะสมที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณจุดที่ท่อมีการหักหรืองอตัว ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ภาพขยายแสดงการสร้าง mesh บริเวณภายในถังปฏิกรณ์และท่อกระจายน้ำ

ศึกษาการไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งวัฏภาค ณ บริเวณจุดกระจายน้ำขาเข้าที่กั้นถังปฏิกรณ์ เพื่อหารูปแบบการไหลเข้าของน้ำเสีย ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

เพื่อจำลองสภาวะการป้อนน้ำเสียให้ใกล้เคียงสภาวะการใช้งานจริง อัตราการป้อนน้ำเสียจึงถูกศึกษาที่ระดับ 120 240 600 และ 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อศึกษารูปแบบการไหลครอบคลุมทั้งช่วงเวลาที่มีการดำเนินการผลิตเต็มกำลัง (high season) และไม่เต็มกำลัง (low season)

การจำลองการไหลกระทำโดยอาศัยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (ANSYS 12.0) โดยสมการจำลองการไหลแบบ laminar ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการไหลภายในท่อที่มีอัตราการป้อนน้ำเสียขาเข้า 120 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เนื่องจากการไหลที่เกิดภายในท่อเป็นแบบ laminar โดยมีค่า Reynold Number เท่ากับ 1,683 ส่วนรูปแบบการไหลภายในท่อที่อัตราการป้อนน้ำเสียขาเข้า 240 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถูกจำลองโดยอาศัยสมการ Menter-Langtry γ - θ laminar-turbulent transition model (เนื่องจากการไหลที่เกิดภายในท่อเป็นแบบ transition โดยมีค่า Reynolds's Number เท่ากับ 3,359 และที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600

และ 1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถูกจำลองการไหลด้วยสมการ Turbulence k- ϵ model เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อเป็นแบบ turbulent โดยมีค่า Reynolds's Number เท่ากับ 8,415 และ 16,831 ตามลำดับ

ศึกษารูปแบบไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

หลังจากศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อกระจายน้ำที่อัตราป้อนน้ำเสียต่างๆ ข้อมูลความเร็วการไหลของน้ำเสียที่แต่ละจุดกระจายน้ำ จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อศึกษารูปแบบการกวนผสมแบบหนึ่งวัฏภาคของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการป้อนน้ำเสียต่างๆ การกำหนดค่าขอบเขตการแบบจำลองดังตารางที่ 4

การจำลองการไหลถูกกระทำภายใต้สมมติฐาน ดังนี้;

- การไหลภายในถังปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยเปรียบเทียบอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 240 600 และ 1,200 m³/d
- ไม่มีการติดตั้งตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 4 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค ของถังปฏิกรณ์ของบริษัท ชลเจริญ

ตัวแปรในการออกแบบ	รายละเอียด	หมายเหตุ
Liquid phase	Water	Continuous phase
Inlet	Inlet	Velocity Inlet
Outlet	Outlet	Relative pressure
Wall	Wall	No slip condition
Top	Outlet	Opening
Turbulent model	Water	k- ϵ
Analysis type	Steady state	
Solver control	Advection scheme	High resolution
	Convergence criteria	RMS = 1×10^{-4}

ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคที่มีผลต่อรูปแบบไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

สภาวะการป้อนน้ำเสีย 1,200 m³/d ซึ่งเป็นสภาวะการใช้งานจริงของโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับผลิตปุ๋ย ชลเจริญ เมื่อดำเนินการผลิตแบบเต็มกำลัง ถูกนำมาใช้ศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาค โดยสัดส่วน

ของแข็ง (ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์) ต่อปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์อยู่ที่ระดับ 0.18 ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของของแข็งภายในถังปฏิกรณ์ของบริษัทชลเจริญ การกำหนดค่าขอบเขตการแบบจำลองดังตารางที่ 5 การจำลองการไหลถูกกระทำภายใต้สมมติฐาน ดังนี้;

- การไหลภายในถังปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดย
 - อัตราป้อนน้ำเสียคงที่ที่ 0.1817 m/s เท่ากันทุกจุดกระจายน้ำ (จุดกระจายน้ำทั้งหมด 244 จุด ต่อหนึ่งถังปฏิกรณ์ เท่ากับอัตราป้อนน้ำเสีย 1,200 m³/d)
 - ก๊าซชีวภาพถูกผลิตจากชั้นตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยอัตรา 13,440 L/d (คำนวณจากความเข้มข้นเฉลี่ย COD ขาเข้า 20,000 mg/L และร้อยละก๊าซชีวภาพ 0.5 ลิตรก๊าซชีวภาพต่อ กิโลกรัม COD)
 - ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความหนาแน่นเท่ากับ 1131.16 kg/m³
 - ฟองก๊าซชีวภาพมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm โดยก๊าซมีคุณสมบัติพื้นฐานเป็นอากาศ
 - ที่สภาวะเริ่มต้น ภายในถังปฏิกรณ์มีค่า volume fraction ของตะกอนเชื้อเท่ากับ 0.18
 - ไม่มีการติดตั้งตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์

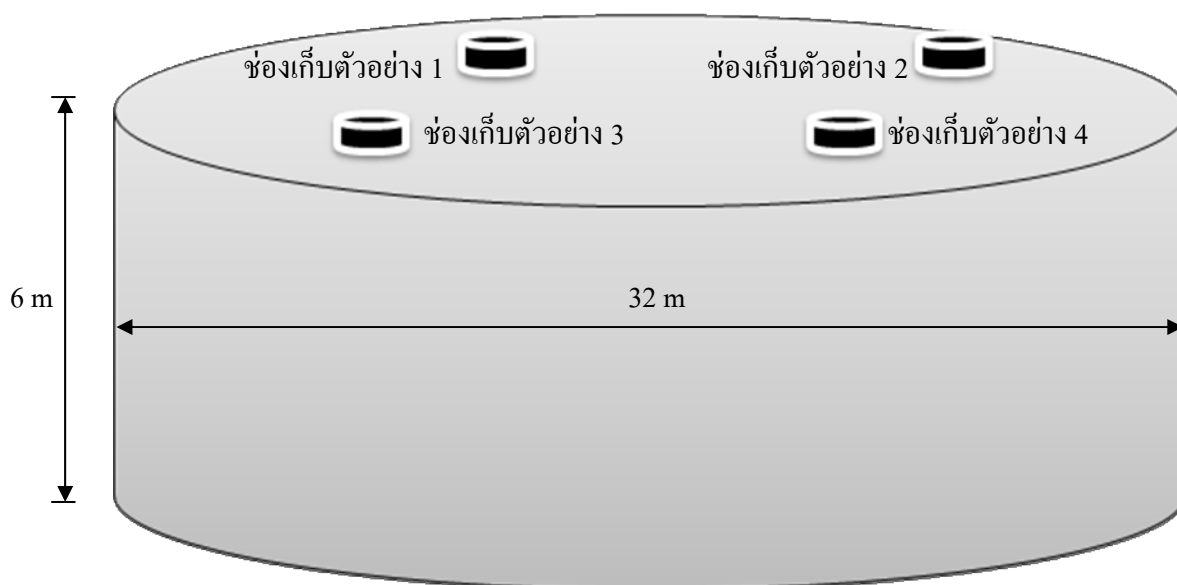
ศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร

การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร เพื่อติดตามรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในถังปฏิกรณ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งการติดตามรูปแบบการไหลในงานวิจัยนี้ ให้ความสำคัญที่รูปแบบการกระจายตัวของเม็ดตะกอนภายในถังเป็นสำคัญ เนื่องจากพฤติกรรมการกระจายตัวของเม็ดตะกอนนั้น ได้รับอิทธิพลจากรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถัง ซึ่งถ้าหารูปแบบการไหลของน้ำเสียเกิดได้อย่างเหมาะสม การกระจายตัวของเม็ดตะกอนควรจะเป็นไปอย่างทั่วถึงหรือมีค่าความหนาแน่นของเม็ดตะกอนใกล้เคียงกันในแต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ ซึ่งขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

1. ศึกษาการกระจายตัวของของแข็งแขวนลอย (Total suspended solid) ตลอดความสูงของถังปฏิกรณ์

ตัวอย่างตะกอนจำนวน 28 ตัวอย่างถูกเก็บจากช่องเก็บตัวอย่างด้านบนของถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 9) โดยการเก็บตัวอย่างจะกระทำตลอดความสูงของถังปฏิกรณ์ (0 ถึง 6 เมตร) จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บได้จำนวน 5 มิลลิลิตร มาผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Schleicher&Schuell GF52, 1-1.2µm) นำตะกอนพร้อมทั้งกระดาษกรองไปอบด้วยตู้อบระบบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาษ

กรองพร้อมทั้งตะกอนที่ผ่านการอบไส้ใน decicator รอจนกว่าอุณหภูมิจะลดลงถึงอุณหภูมิห้องจึงทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง (SARTORIUS Model BT 224S)



รูปที่ 9 ภาพจำลองถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 m³ ณ โรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับบริษัท ชลเจริญ จำกัด ผนังด้านบนสุดของถังปฏิกรณ์ประกอบด้วยช่องเก็บตัวอย่าง 4 ช่อง

ตารางที่ 5 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบสามวัฏภาค ของถังปฏิกรณ์ของบริษัท ชลเจริญ

ตัวแปรในการออกแบบ	รายละเอียด	หมายเหตุ
Liquid phase	Water	Continuous phase
Solid phase	Granule	Dispersed solid
		2 mm of diameter
		1,136.16 kg/m ³ of density
Gas phase	Air	Disperse fluid
		1 mm of diameter
Inlet	Inlet	Velocity Inlet
Outlet	Outlet	Relative pressure
Wall	Wall	No slip condition (for water)
		Free slip condition (for granule & air)
Top	Outlet	Degassing
Turbulent model	Water	k-ε
	Solid	Dispersed zero equation
	Air	Dispersed zero equation
Fluid Pair model	Air / Water	
	Interphase Transfer	Particle model
	Momentum Transfer	Ishii Zuber
Fluid Pair model	Solid / Water	
	Interphase Transfer	Particle model
	Momentum Transfer	Drag Coefficient = 0.44
Analysis type	Steady state	
Solver control	Advection scheme	High resolution
	Convergence criteria	RMS = 1×10^{-4}

สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือเก็บข้อมูล

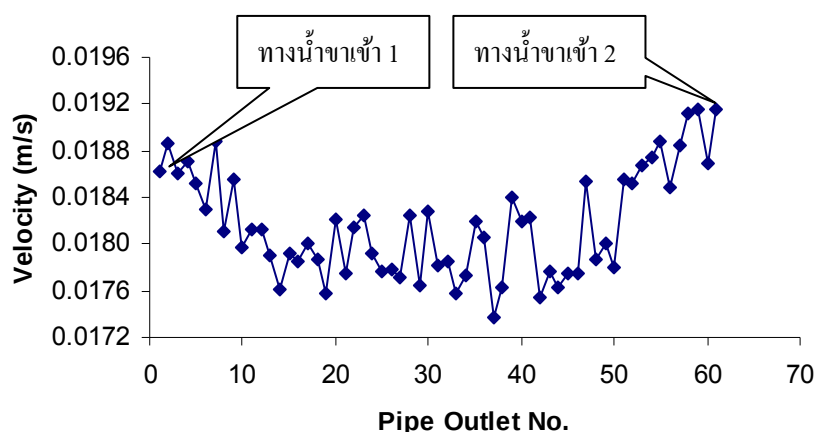
สถานที่ทำการวิจัย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผลการดำเนินงานวิจัย

การจำลองรูปแบบการไหลแบบสามมิติภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขนาดโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD)

1. ศึกษาแบบจำลองการไหลของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ

ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ การไหลภายในเส้นท่อกระจายน้ำถูกจัดว่าเป็นแบบ laminar เนื่องจากที่อัตราการไหลนี้ให้ค่า Reynolds's Number เท่ากับ 1,683 การจำลองการไหลที่ระดับ $120 \text{ m}^3/\text{d}$ เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำในช่วงที่มีการดำเนินการผลิตต่ำ (low season) ซึ่งจากการจำลองการไหล ค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเสียบริเวณรูกระจายน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0182 m/s โดยความเร็วต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 0.0174 และ 0.0192 m/s ตามลำดับ ด้วยรูปแบบการไหลแบบ laminar จะเห็นได้ว่า ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ แต่ละรูกระจายน้ำ (รูปที่ 10) จะมีค่าสูงสำหรับรูกระจายน้ำที่อยู่ใกล้กับปลายท่อทั้งสองด้านซึ่งเป็นบริเวณทางที่น้ำเสียเข้า จากนั้นความเร็วจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของเส้นท่อ จนกระทั่งตกลงต่ำที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางความยาวของท่อกระจายน้ำ

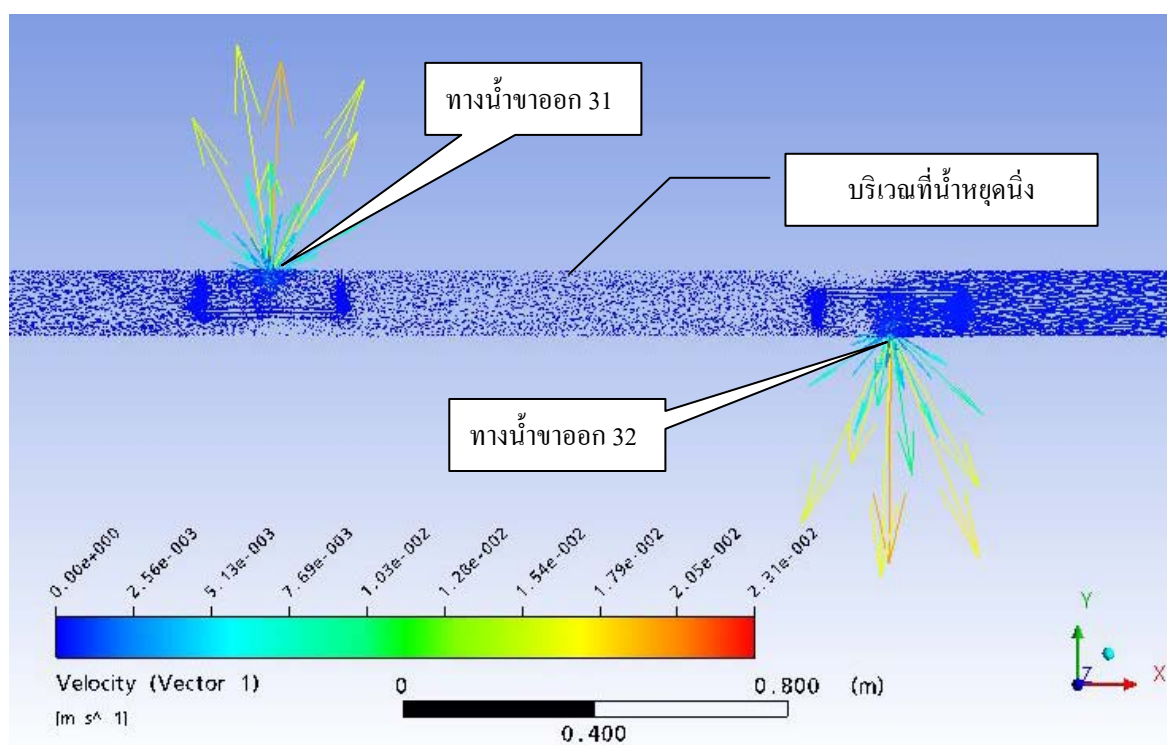


รูปที่ 10 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$

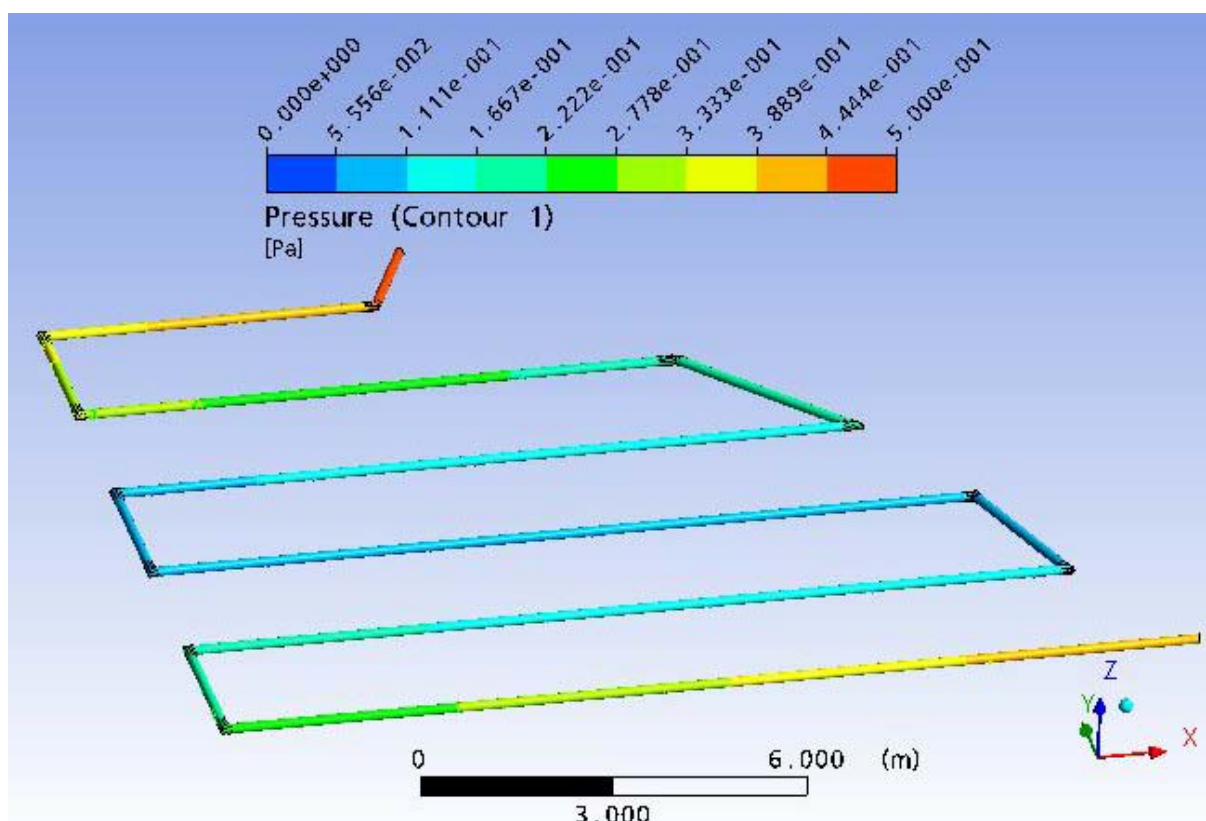
การลดลงของความเร็วของน้ำเสียในแต่ละรูกระจายน้ำ นอกจากเห็นได้ด้วยกราฟแล้ว ยังสามารถเห็นได้จากภาพจำลองการไหล (รูปที่ 11) ซึ่งแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณรูกระจายน้ำ หมายเลข 31 และ 32 เมื่อพิจารณาภาพจะเห็นว่า น้ำเสียภายในท่อบริเวณที่อยู่ระหว่างรูกระจายน้ำทั้งสองเกิดการหยุดนิ่ง ซึ่งเกิดจากการที่น้ำเสียที่ไหลมาจากปลายท่อทั้งสองมาบรรจบกัน และเกิดการต้านทานการไหลขึ้น ณ บริเวณดังกล่าว

การลดลงของความเร็วการไหลเกิดจาก การสูญเสียความดันภายในท่ออันมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานที่น้ำเสียกระทำกับผนังท่อ รวมทั้งโมเมนตัมของน้ำเข้าที่ลดลงตามระยะทางการไหลของน้ำ ซึ่ง

งานวิจัยนี้การป้อนน้ำเสียเข้าสู่ท่อผ่านทางปลายท่อทั้งสองด้าน ก็เป็นหนึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการลดทอนโมเมนตัมของน้ำขาเข้า ซึ่งพบว่าโมเมนตัมของน้ำขาเข้าทั้งสองมาบรรจบและเกิดการหักล้างกัน ณ กึ่งกลางความยาวของท่อ (รูปที่ 12) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความเร็วการไหลสูงสุดและต่ำสุดเทียบกับค่าความเร็วการไหลเฉลี่ยจะเห็นว่า ที่ค่าความเร็วการไหลสูงสุด 0.0192 m/s คลาดเคลื่อนไปจากค่าเฉลี่ย 0.0182 m/s อยู่ 5.49% และที่ความเร็วการไหลต่ำสุด 0.0174 m/s คลาดเคลื่อนไปจากค่าเฉลี่ย 4.39% โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบความเร็วการไหลต่ำสุดกับความเร็วการไหลสูงสุดของน้ำเสียที่ออกจากท่อกระจายน้ำ พบว่าค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันถึง 90.63% นั้นหมายความว่าความแตกต่างของอัตราการไหลของน้ำเสียที่กระจายตัวออกจากท่อกระจายน้ำมีค่าไม่ถึง 10% ตลอดความยาวของท่อ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ภายใต้สภาวะการดำเนินการผลิตต่ำ (น้ำเสียไม่น้อยกว่า 120 m³/d) ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำ หมายความว่าทุกบริเวณภายในถังปฏิกรณ์ยังคงได้รับการระบายน้ำเสียในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 11 เวกเตอร์ความเร็วแสดงรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำบริเวณรูกระจายน้ำที่ 31 และ 32 รวมทั้งบริเวณที่น้ำจากปลายท่อทั้งสองด้านมาบรรจบกันทำให้เกิดบริเวณที่น้ำหยุดนิ่ง



รูปที่ 12 แอปพลิเคชันแสดงความดันที่แต่ละระดับความยาวของท่อกระจายน้ำ

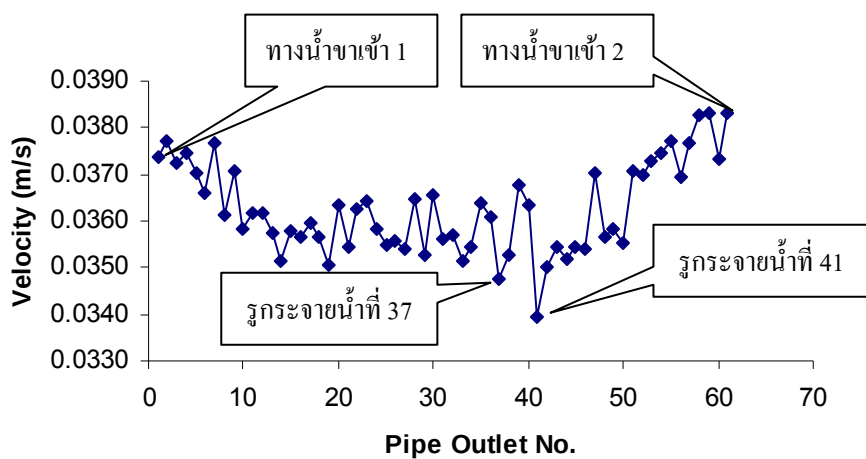
สำหรับที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $240 \text{ m}^3/\text{d}$ รูปแบบการไหลภายในท่อกระจายน้ำจัดเป็นแบบ transition หรือรูปแบบการไหลแบบผสมผสานระหว่างการไหลแบบ laminar และ turbulent เนื่องจากที่อัตราการป้อนน้ำเสียนี้ ค่า Reynolds's Number ของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำมีค่าเท่ากับ 3,359 ซึ่งตามทฤษฎีการไหลของของไหลถ้าค่า Reynolds's Number อยู่ในช่วงระหว่าง 2,000 ถึง 4,000 รูปแบบการไหลนั้นจะถูกจัดเป็นแบบ transition ความเร็วเฉลี่ยของน้ำเสียที่ออกจากท่อกระจายน้ำมีค่าเท่ากับ 0.0363 m/s โดยมีความเร็วต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 0.0340 และ 0.0383 m/s ตามลำดับ ที่อัตราการป้อนน้ำเสียนี้ยังคงสร้างความเร็วการไหลสูงในบริเวณที่อยู่ใกล้กับปลายท่อซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ท่อ (รูปที่ 13) เช่นเดียวกับที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ และเมื่อพิจารณาเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางการไหลของน้ำเสียภายในท่อพบว่า ที่บริเวณกึ่งกลางความยาวของท่อคือ ระหว่างรูกระจายน้ำที่ 31 และ 32 ก็พบจุดที่น้ำเสียเกิดการหักล้างโมเมนตัมและหยุดนิ่งในบริเวณนั้นเช่นเดียวกับที่พบในสถานะการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ ซึ่งสาเหตุการลดลงของความเร็วการไหลภายในท่อกระจายน้ำนั้นได้อธิบายไว้ในตอนต้น

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วการไหลเฉลี่ยกับค่าความเร็วการไหลสูงสุดและต่ำสุดของน้ำเสียที่ไหลออกจากท่อกระจายน้ำจะเห็นว่า ความเร็วของน้ำเสียที่ไหลออกจากท่อกระจายน้ำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดนั้นคลาดเคลื่อนไปจากค่าเฉลี่ย 5.51 และ 6.34% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความเร็วการไหลสูงสุดกับค่าความเร็วการไหลต่ำสุดพบว่า ค่าความเร็วทั้งสองมีความใกล้เคียงกันที่ระดับ 88.77% แม้ว่าค่าความใกล้เคียงทั้งสองจะเหมือนกันน้อยกว่า 90% แต่ถ้าพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วการไหลที่ต่ำ

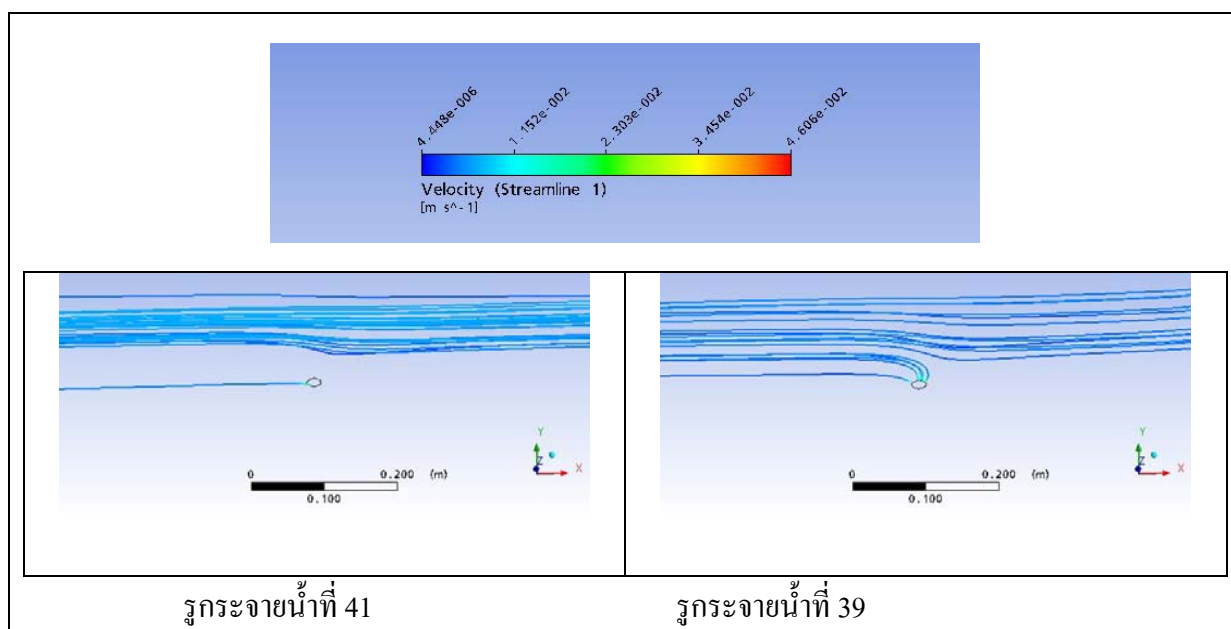
ที่สุดนั้นเกิดขึ้น ณ รุกกระจ่ายน้ำที่ 41 เพียงทีเดียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากท่อกระจ่ายน้ำถูกออกแบบมาให้มีรูกระจ่ายน้ำสลับซ้าย-ขวาตลอดความยาวของท่อ ความดันภายในท่อที่ระบายออกทางรูกระจ่ายน้ำที่วางตัวในลักษณะซิกแซกนั้น เหนียวนำไปให้การไหลภายในท่อเกิดการแกว่งตัว จนอาจเป็นสาเหตุให้กระแสน้ำไหลผ่านรูกระจ่ายน้ำที่ 41 ได้ไม่เต็มที (รูปที่ 14) น้ำที่ออกจากรูกระจ่ายน้ำนี้จึงมีค่าต่ำที่สุด

อย่างไรก็ตามแนวโน้มความเร็วการไหลที่รูกระจ่ายน้ำอื่นๆ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งนอกจากรูกระจ่ายน้ำที่ 41 แล้ว รุกกระจ่ายน้ำที่ 37 เป็นรูกระจ่ายน้ำที่มีความเร็วการไหลของน้ำเสียต่ำเป็นอันดับ 2 โดยมีค่าอยู่ที่ 0.0348 m/s ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าความเร็วการไหลสูงสุดแล้ว ค่าๆ นี้มีความใกล้เคียงถึง 90.86% ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่า ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 240 m³/d ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจ่ายน้ำ หมายความว่าทุกบริเวณภายในถังปฏิกรณ์ยังคงได้รับการระบายน้ำเสียในปริมาณที่ใกล้เคียงกันได้เช่นเดียวกัน

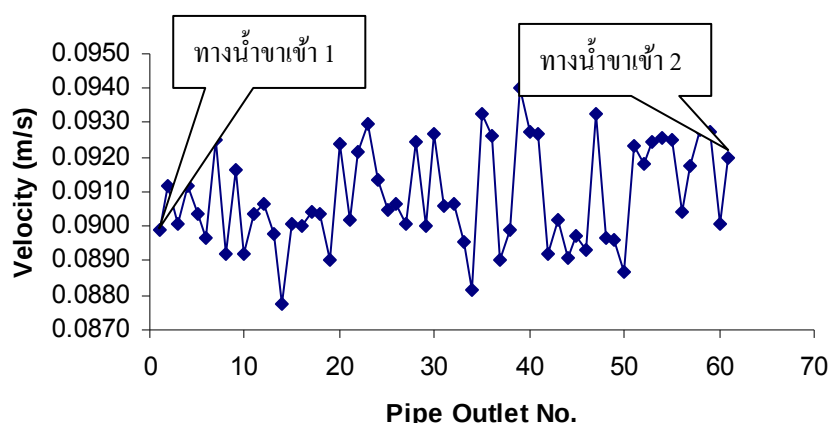
กรณีของสภาวะการป้อนน้ำเสียที่ 600 และ 1,200 m³/d นั้น รูปแบบการไหลภายในท่อกระจ่ายน้ำมีลักษณะเป็น turbulent หรือการไหลแบบปั่นป่วน เพราะที่สภาวะการป้อนน้ำเสียนี้ให้ค่า Reynolds's Number เท่ากับ 8,415 และ 16,831 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเร็วการไหลของน้ำเสียที่ไหลผ่านรูกระจ่ายน้ำ (รูปที่ 15 และ รูปที่ 16) จะเห็นว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลที่รูกระจ่ายน้ำตลอดความยาวของท่อ มีช่วงการเปลี่ยนแปลงหรือการแกว่งตัวค่อนข้างคงที่ โดยความเร็วการไหลต่ำสุดและสูงสุดที่ออกจากท่อกระจ่ายน้ำที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600 m³/d นั้นมีค่า 0.0878 และ 0.0940 m/s ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยความเร็วอยู่ที่ 0.0909 m/s ขณะที่ความเร็วการไหลต่ำสุดและสูงสุดที่ออกจากท่อกระจ่ายน้ำที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 1,200 m³/d นั้นมีค่า 0.1758 และ 0.1875 m/s ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยความเร็วอยู่ที่ 0.1817 m/s เมื่อพิจารณากราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลที่แต่ละรูกระจ่ายน้ำของสภาวะการป้อนน้ำเสียทั้งสองแล้วเป็นที่น่าสังเกตว่า รูปแบบการเพิ่ม-ลดของความเร็วการไหลที่แต่ละรูกระจ่ายน้ำมีลักษณะที่คล้ายกันอย่างเห็นได้ชัด นั่นอาจเป็นเพราะว่า ที่อัตราการป้อนน้ำเสียทั้งสองระดับ น้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ท่อกระจ่ายน้ำด้วยแรงดันที่สูงมาก จนรูปแบบการไหลภายในท่อเป็นอิสระจากแรงดันและโมเมนตัมของน้ำขาเข้า นั่นทำให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันลดและรูปแบบการลดลงของโมเมนตัมของน้ำขาเข้าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ที่ทุกระดับของอัตราการป้อนน้ำเสียที่อยู่ระหว่าง 600 ถึง 1,200 m³/d จะให้รูปแบบการไหลภายในท่อกระจ่ายน้ำรวมทั้งรูปแบบการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่เหมือนกัน จะแตกต่างกันแค่ในเรื่องของความเร็วการไหลเท่านั้น



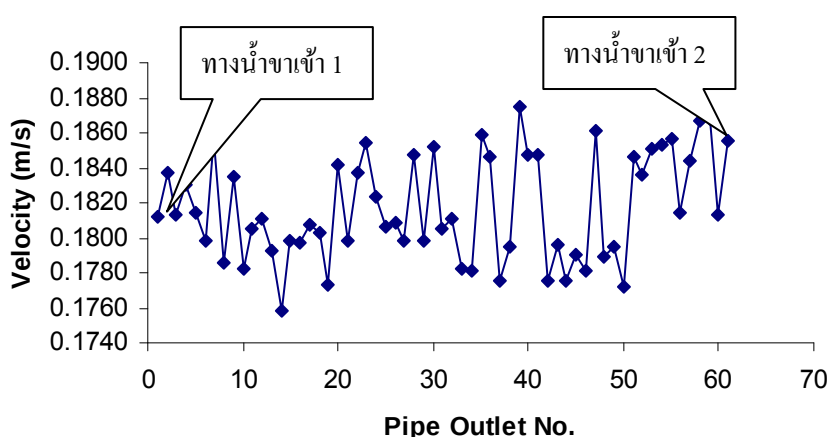
รูปที่ 13 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณรูกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $240 \text{ m}^3/\text{d}$



รูปที่ 14 เส้นทางการไหล (stream line) ของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำ ณ รูกระจายน้ำที่ 41 และ 39



รูปที่ 15 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600 m³/d



รูปที่ 16 ความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ บริเวณกระจายน้ำจำนวน 61 รู ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 1,200 m³/d

รูปแบบความเร็วการไหลในแต่ละรูกระจายน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ค่อนข้างคงที่นี้เป็นสิ่งบ่งชี้ว่า การกระจายตัวของน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์เป็นไปอย่างทั่วถึงครอบคลุมทุกพื้นที่ภายในถังปฏิกรณ์ โดยยืนยันได้จากการเปรียบเทียบค่าความเร็วการไหลต่ำสุดกับค่าความเร็วการไหลสูงสุดพบว่า ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600 m³/d ค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกันถึง 93.40% และที่ 1,200 m³/d มีค่าใกล้เคียงกันถึง 93.76%

การศึกษาการจำลองการไหลของน้ำเสียภายในท่อกระจายน้ำของโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับผลิตปุ๋ย ผลการจำลองพบว่า ที่สภาวะการดำเนินการผลิตต่ำซึ่งอาจมีน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ต่ำสุดเพียง 120 m³/d นั้น ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำที่ถูกออกแบบมาให้กระจายน้ำเสียให้เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ได้อย่างทั่วถึงทุกพื้นที่ อีกทั้งการป้อนน้ำเสียด้วยอัตราตั้งแต่ 600 m³/d ขึ้นไปนั้น ทำให้ได้รูปแบบการไหลที่

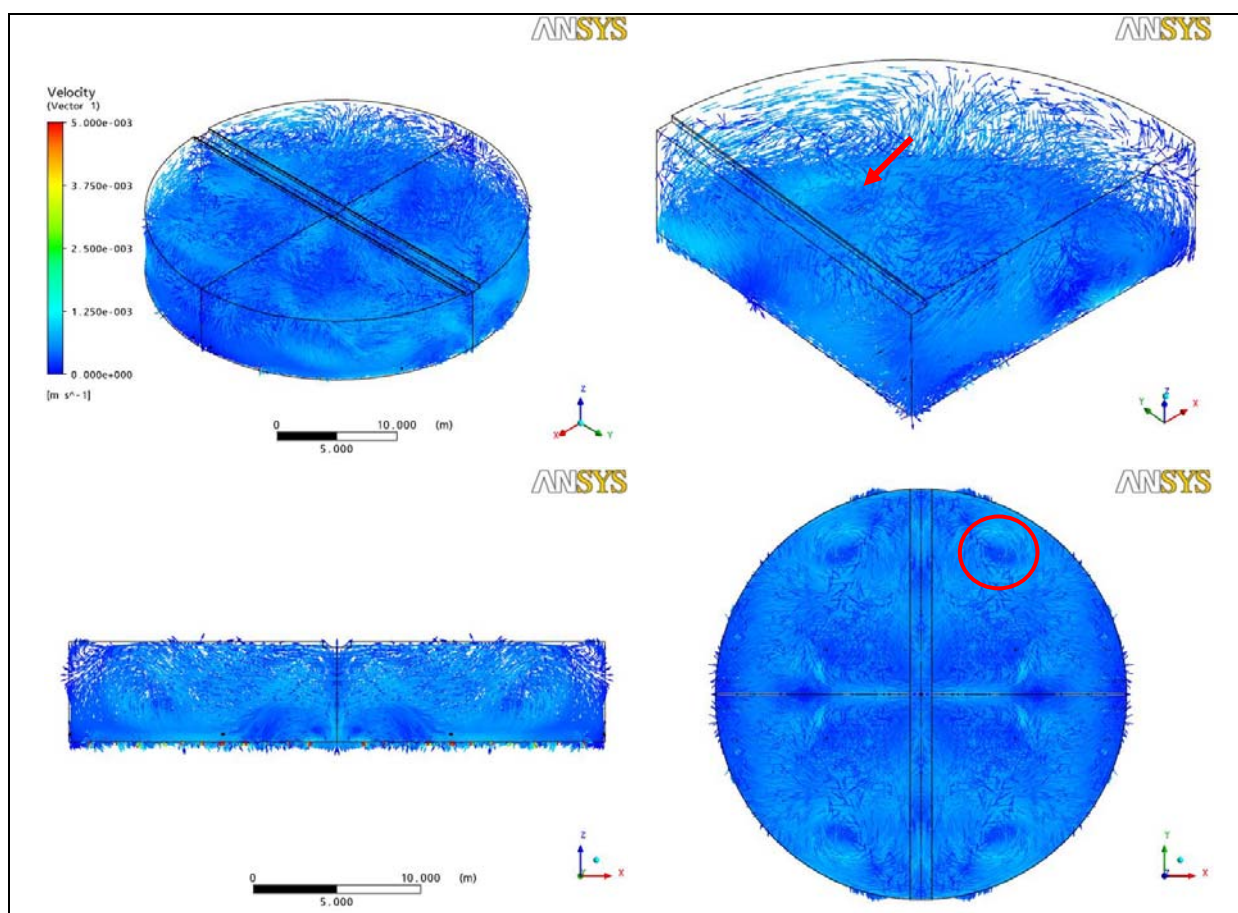
เหมือนกัน เนื่องจากที่อัตราการป้อนน้ำเสียนี้รูปแบบการไหลภายในท่อกระจายน้ำเป็นอิสระจากแรงดันน้ำและโมเมนต์ของน้ำเสียเข้า แต่อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาเวกเตอร์แสดงทิศทางและความเร็วการไหลภายในท่อพบว่า ที่ทุกอัตราการป้อนน้ำเสีย น้ำเสียจากปลายท่อทั้งสองด้านจะมาบรรจบกันบริเวณกึ่งกลางความยาวของท่อกระจายน้ำ ซึ่งทำให้เกิดบริเวณที่น้ำเสียหยุดนิ่งภายในท่อกระจายน้ำในส่วนที่อยู่ระหว่างรูกระจายน้ำที่ 31 และ 32 ซึ่งเหตุการณ์นี้อาจทำให้เกิดการสะสมของตะกอนภายในท่อ และเป็นสาเหตุให้ท่อกระจายน้ำเกิดการตันได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตามปัญหานี้อาจแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนวิธีการป้อนน้ำเสียในบางช่วงเวลา โดยการป้อนน้ำเสียเข้าจากทางด้านใดด้านหนึ่งของปลายท่อขณะที่ปิดปลายอีกด้านหนึ่ง เพื่อไล่ตะกอนที่สะสมภายในท่อ

2. ศึกษารูปแบบไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าต่างๆ

3.1. การกวนผสมแบบหนึ่งวัฏภาค

- ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$

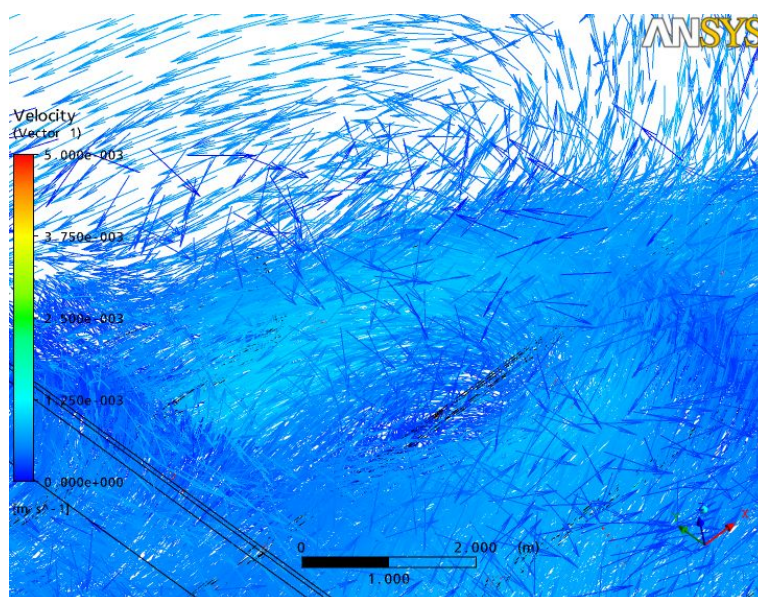
การจำลองการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนน้ำเสียต่างๆ พบว่า ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์มีค่าต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงทิศทางการไหลของน้ำเสีย พบว่าที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $120 \text{ m}^3/\text{d}$ ก่อให้เกิดลักษณะการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่มีลักษณะหมุนวนในบางบริเวณ (รูปที่ 17) ซึ่งการหมุนวนของน้ำที่เกิดขึ้นนี้มีความแตกต่างจากการเกิด dead zone เนื่องจากน้ำเสียมิได้ถูกกักเก็บอย่างสิ้นเชิงอยู่ภายในเกลียวการหมุนวนของน้ำ โดยน้ำเสียจะเริ่มเข้าสู่เกลียวการหมุนวนจากบริเวณส่วนบนของถังปฏิกรณ์ และถูกดูดลงสู่ด้านล่างจากนั้นน้ำเสียจะถูกปล่อยออกจากเกลียวการหมุนวน ถัดถึงถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 18) เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เสมือนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกวนผสมภายในถังให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งแบบจำลองการไหลแสดงให้เห็นรูปแบบการไหลแบบเกลียวหมุนวนนี้เกิดขึ้นถึง 8 จุดภายในถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 19)



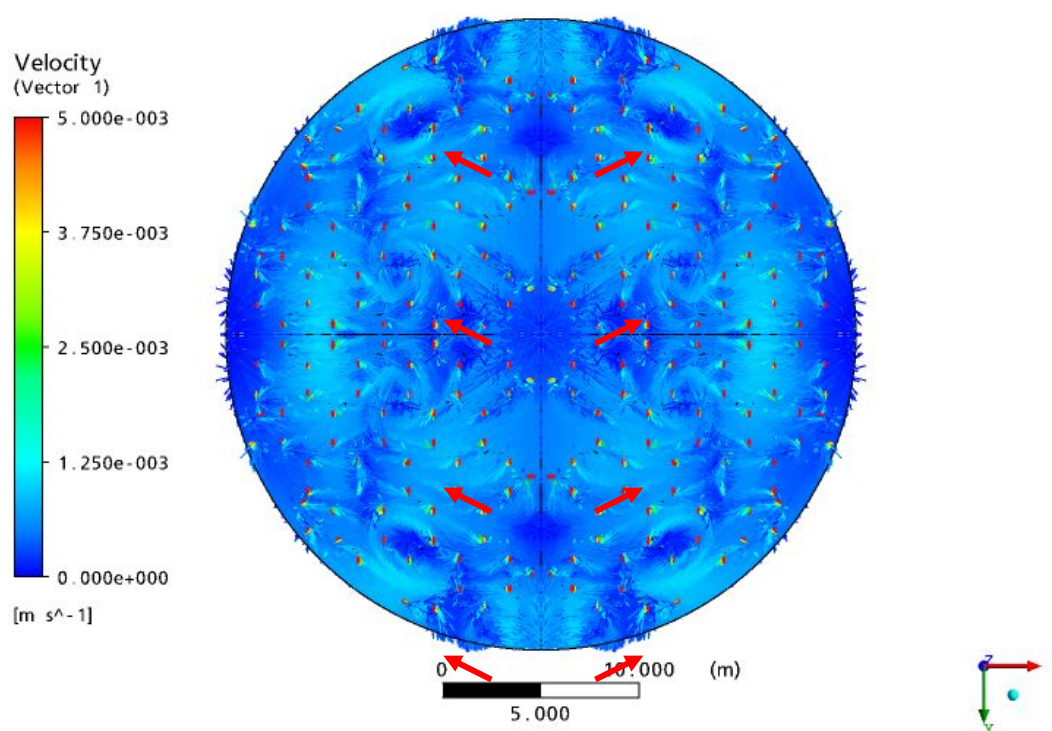
รูปที่ 17 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 m^3 ณ มุมมองต่างๆ ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d โดยลูกศรและวงกลมสีแดงแสดงจุดที่การไหลของน้ำเสียมีลักษณะหมุนวน

- ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 240 และ 600 m^3/d

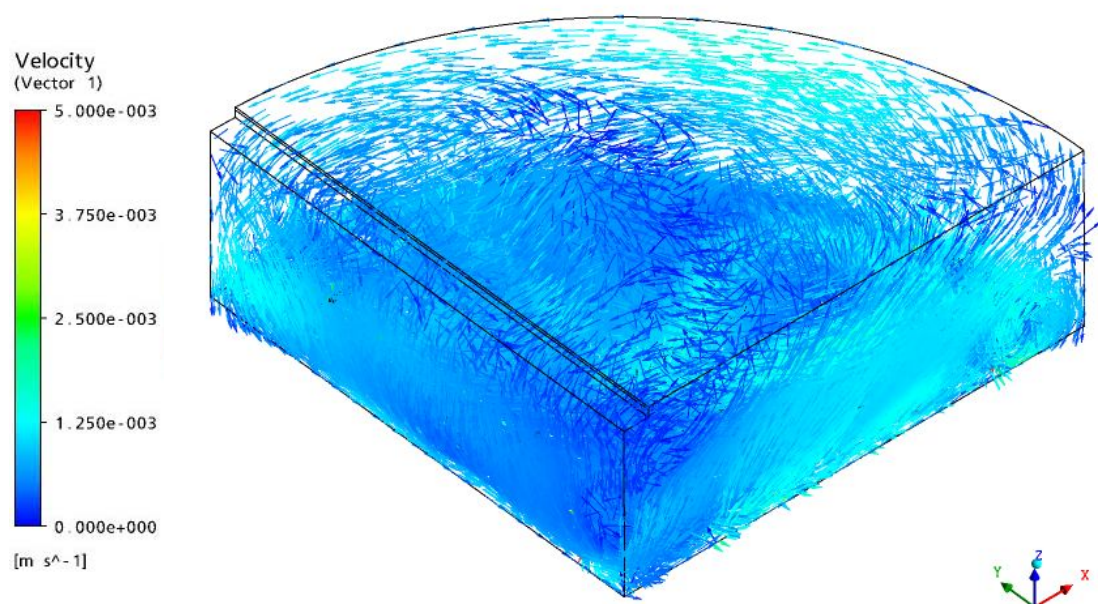
ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 240 และ 600 m^3/d ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการดำเนินระบบด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d เมื่อพิจารณาเวกเตอร์แสดงรูปแบบการไหลพบว่ารูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังที่ถูกดำเนินด้วยอัตราการป้อนน้ำเสียทั้งสองค่าดังกล่าวมีรูปแบบคล้ายคลึงกันอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 20ก และ รูปที่ 20ข) แต่ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 600 m^3/d ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์มีค่าสูงกว่า แบบจำลองการไหลของอัตราการป้อนน้ำเสียทั้งสองนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่า ความเร็วการไหลของน้ำเสียบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d นั้นเป็นเพราะที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 240 และ 600 m^3/d โมเมนต์ของน้ำเสียเข้ามีค่าสูงมากพอจนสามารถถ่ายเทได้ทั่วถึงตลอดทั้งถัง ซึ่งต่างกับสภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d ที่มีค่าความเร็วการไหลน้อยกว่า โมเมนต์ของน้ำเสียเข้าที่มีค่าต่ำจึงถ่ายเทตลอดทั่วทั้งถังได้ไม่เต็มที่ ความเร็วการไหลของน้ำเสียบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์จึงมีค่าต่ำอย่างเห็นได้ชัด



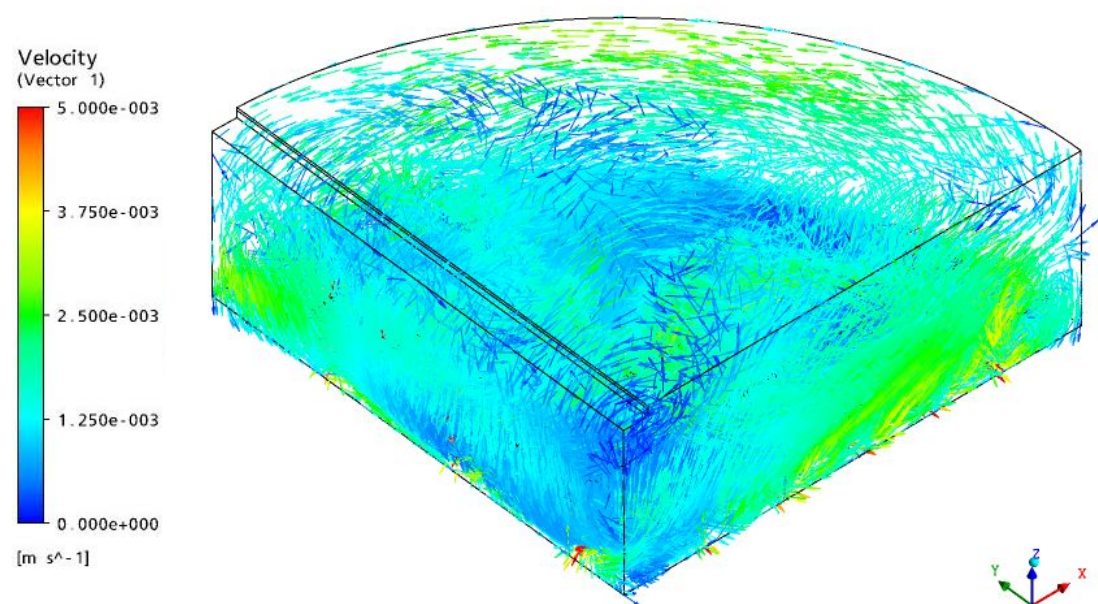
รูปที่ 18 เวกเตอร์แสดงการหมุนวนของน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ขนาด 6,000 m^3 ที่ดำเนินระบบด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d ซึ่งเกี่ยวข้องการหมุนวนของน้ำเสียมีทิศทางการหมุนวนจากปากลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์



รูปที่ 19 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 m^3 เมื่อมองจากด้านใต้ถัง ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 m^3/d โดยลูกศรสีแดงแสดงจุดที่การไหลของน้ำเสียมีลักษณะหมุนวน



ก)

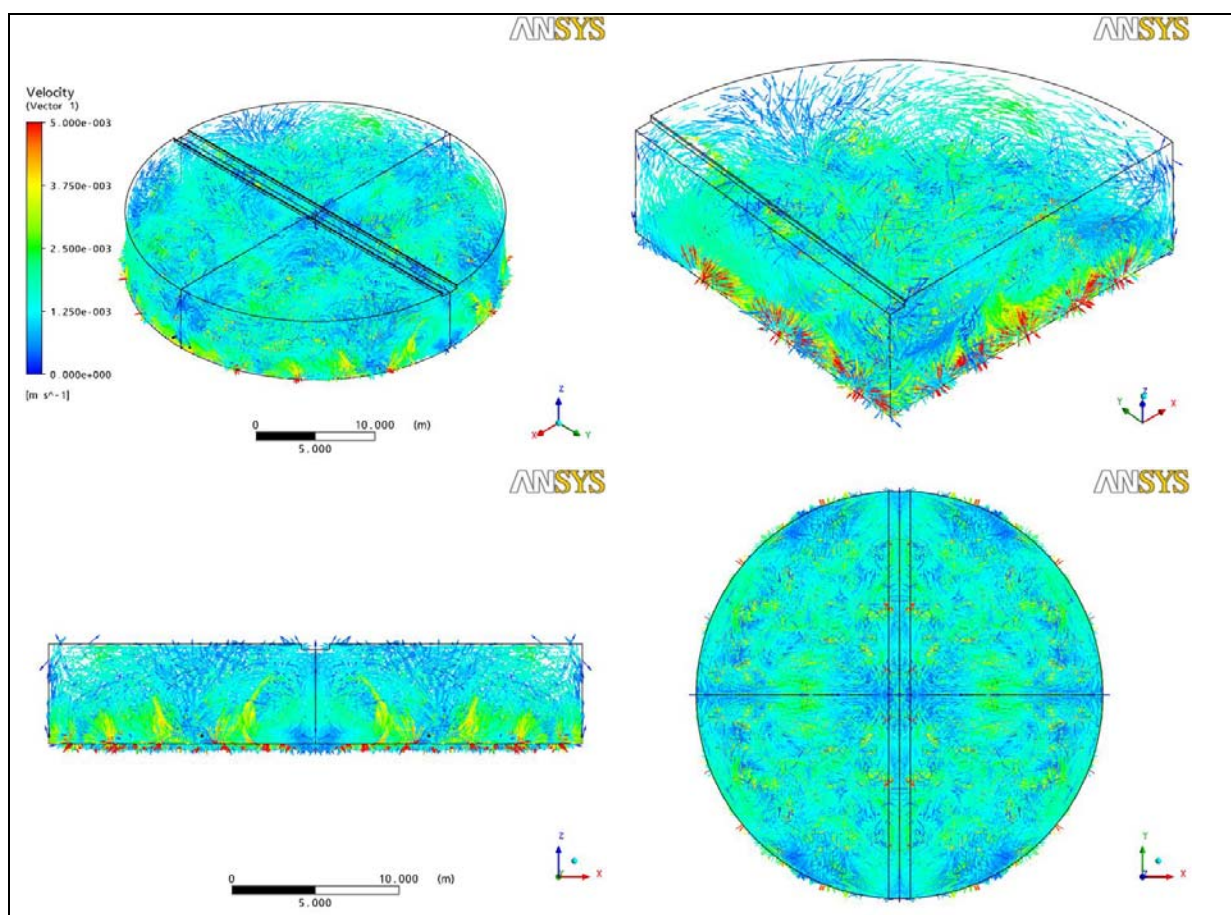


ข)

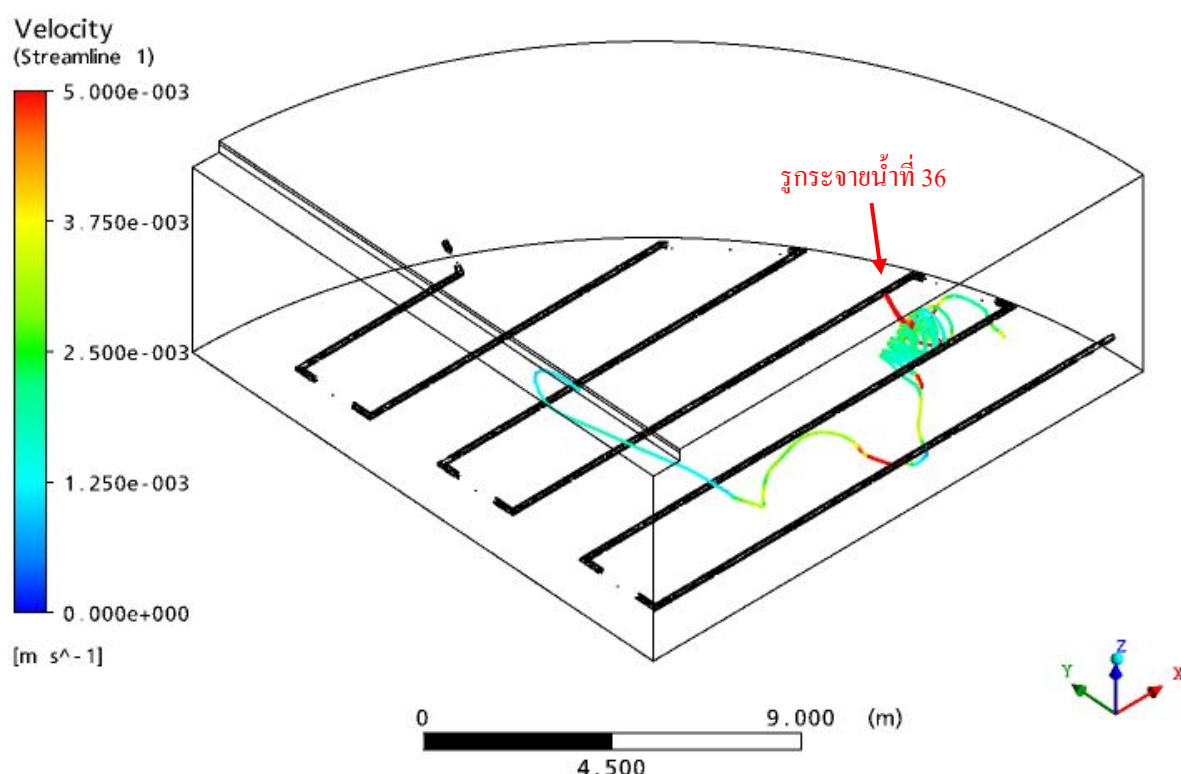
รูปที่ 20 ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลบริเวณภายในถังปฏิกรณ์ ที่ดำเนินระบบด้วยสภาวะ ก) 240 m³/d และ ข) 600 m³/d

- ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $1,200 \text{ m}^3/\text{d}$

ที่สภาวะการดำเนินระบบ $1,200 \text{ m}^3/\text{d}$ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่โรงงานดำเนินการผลิตเต็มกำลังนั้น รูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์มีรูปแบบไม่แน่นอนและไม่มีความปั่นป่วนสูง น้ำเสียเกิดการกระจายตัวอย่างทั่วถึงทั้งถังปฏิกรณ์ อีกทั้งความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังถูกพบว่ามีค่าสูงที่สุดทั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 21) นั่นเป็นเพราะที่อัตราการป้อนน้ำเสีย $1,200 \text{ m}^3/\text{d}$ โมเมนตัมของน้ำเสียขาเข้ามีค่าสูงที่สุด จนถ่ายเทได้ครอบคลุมทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ ประสิทธิภาพการกวนผสมจึงอาจเกิดขึ้นได้ดีตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการที่น้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ถูกกวนผสมอย่างรุนแรง อาจก่อให้เกิดการไหลแบบลัดวงจรได้เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 22 จะเห็นว่าน้ำเสียที่ออกจากกรวยกระจายน้ำที่ 36 มีเส้นทางมุ่งตรงสู่รางน้ำด้านล่างหรือทางน้ำาออก ซึ่งเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงการเกิดการไหลลัดวงจร



รูปที่ 21 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด $6,000 \text{ m}^3$ ณ มุมมองต่างๆ ที่สภาวะอัตราการป้อนน้ำเสีย $1,200 \text{ m}^3/\text{d}$



รูปที่ 22 เส้นทางการไหลของน้ำเสียจากรูกระจายน้ำที่ 36

แบบจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการดำเนินระบบด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย 120 240 600 และ 1,200 m^3/d น้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ยังคงสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงทั้งถัง นั้นหมายถึงตลอดช่วงเวลาการเดินกระบวนการผลิตทั้งช่วง low และ high season เชื้อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดสามารถได้รับสารอาหารหรือมีโอกาสสัมผัสกับน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียรวมทั้งการผลิตก๊าซชีวภาพอาจเกิดได้ดีด้วยเช่นกัน แต่การเกิดการกวนผสมที่มากเกินไปดังที่พบในสภาวะการดำเนินระบบด้วยอัตราการป้อนน้ำเสีย 1,200 m^3/d นั้น อาจก่อให้เกิดการไหลล้นตัวจริง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ลดต่ำลงได้เช่นกัน

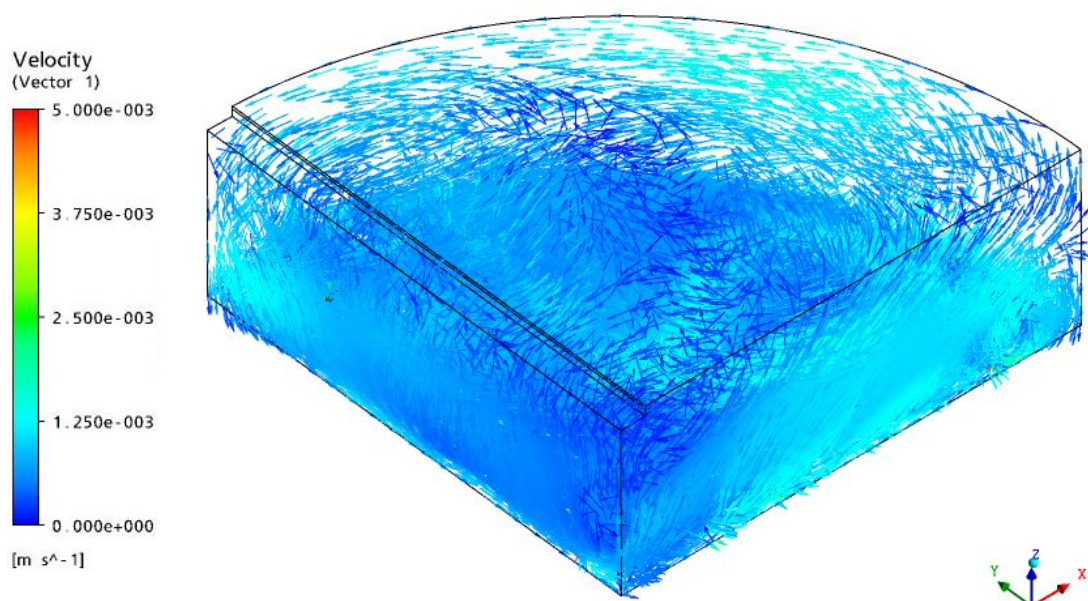
3.2. การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของน้ำเสีย

เมื่อพิจารณาการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ที่ทุกอัตราการป้อนน้ำเสียพบว่า ทุกจุดกระจายน้ำตลอดความยาวของเส้นท่อมีค่าใกล้เคียงกัน (ความเหมือนมากกว่า 90%) ดังนั้นในขั้นการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาค จึงกระทำภายใต้สมมติฐานให้ทุกจุดกระจายน้ำมีความเร็วการไหลของน้ำเสียเท่ากันหมดทุกจุดคือ 0.1817 m/s ซึ่งเป็นความเร็วเฉลี่ยของทุกจุดกระจายน้ำ เมื่อป้อนน้ำเสียด้วยอัตรา 1,200 m^3/d ดังแสดงในตารางที่ 6 ความเร็วการไหลของน้ำเสียเข้า ณ จุดกระจายน้ำต่างๆ

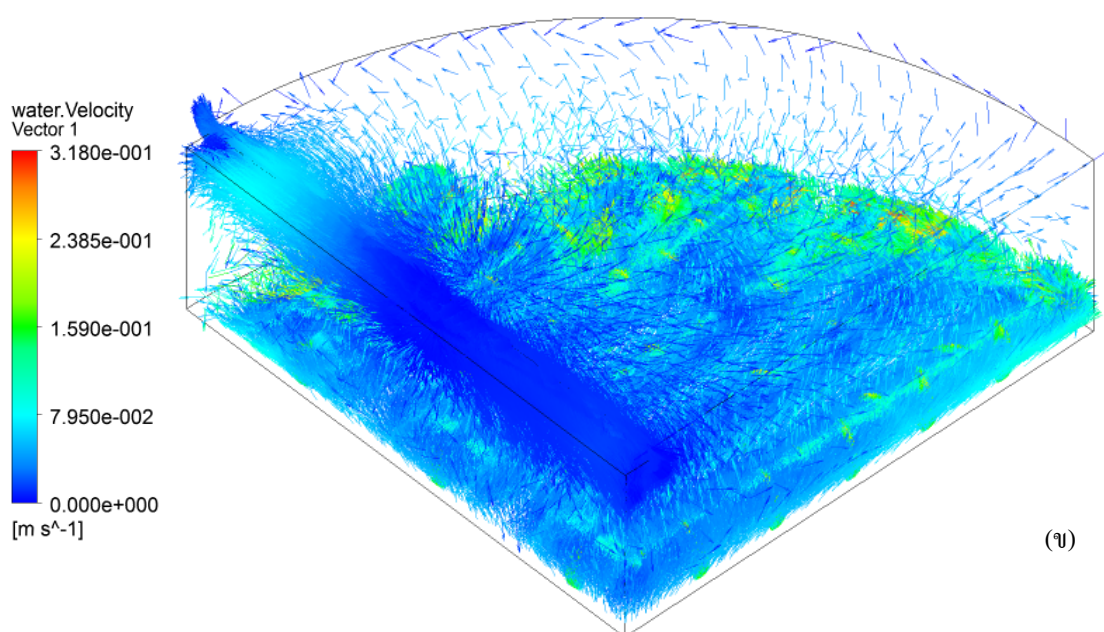
ตารางที่ 6 ความเร็วการไหลของน้ำเสียขาเข้า ณ จุดกระจายน้ำต่างๆ

Distributor No.	Velocity (m/s)	Distributor No.	Velocity (m/s)	Distributor No.	Velocity (m/s)	Distributor No.	Velocity (m/s)
1	0.1812	16	0.1797	31	0.1805	46	0.1781
2	0.1837	17	0.1807	32	0.1810	47	0.1861
3	0.1813	18	0.1803	33	0.1782	48	0.1789
4	0.1831	19	0.1774	34	0.1781	49	0.1795
5	0.1814	20	0.1842	35	0.1859	50	0.1772
6	0.1799	21	0.1798	36	0.1846	51	0.1846
7	0.1857	22	0.1837	37	0.1776	52	0.1836
8	0.1786	23	0.1855	38	0.1794	53	0.1850
9	0.1835	24	0.1823	39	0.1875	54	0.1853
10	0.1782	25	0.1806	40	0.1848	55	0.1857
11	0.1806	26	0.1809	41	0.1847	56	0.1815
12	0.1811	27	0.1798	42	0.1775	57	0.1844
13	0.1792	28	0.1847	43	0.1796	58	0.1867
14	0.1758	29	0.1799	44	0.1776	59	0.1867
15	0.1799	30	0.1852	45	0.1790	60	0.1814
						61	0.1856
ความเร็วเฉลี่ยของแต่ละจุดกระจายน้ำ (m/s) =							0.1817

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำเสียในแบบจำลองพบว่า ความเร็วการไหลของน้ำเสียทั่วทั้งถังปฏิกรณ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการไหลสองวัฏภาคอื่นเข้ามามีผล นั่นคือ วัฏภาคของก๊าซซึ่งก็คือก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ และวัฏภาคของของแข็งคือตะกอนของเชื้อจุลินทรีย์ที่กระจายตัวอยู่หนาแน่นบริเวณก้นถังปฏิกรณ์ นั่นเป็นเพราะตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ที่กระจายตัวอย่างหนาแน่นบริเวณทางน้ำเข้าของถังปฏิกรณ์ ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงานจลน์บางส่วนที่เข้ามาพร้อมกับน้ำเสียและเปลี่ยนพลังงานจลน์นั้นมาเป็นพลังงานจลน์เพื่อการขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ให้แก่เม็ดตะกอน และจากการที่น้ำเสียขาเข้ามีพลังงานจลน์ลดลงนั่นเอง โมเมนตัมของน้ำเสียขาเข้าที่จะถ่ายทอดให้แก่ น้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์จึงมีปริมาณลดลงตามไปด้วย เป็นเหตุให้ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ขณะที่ไม่มีเม็ดตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ (รูปที่ 23)



(ก)

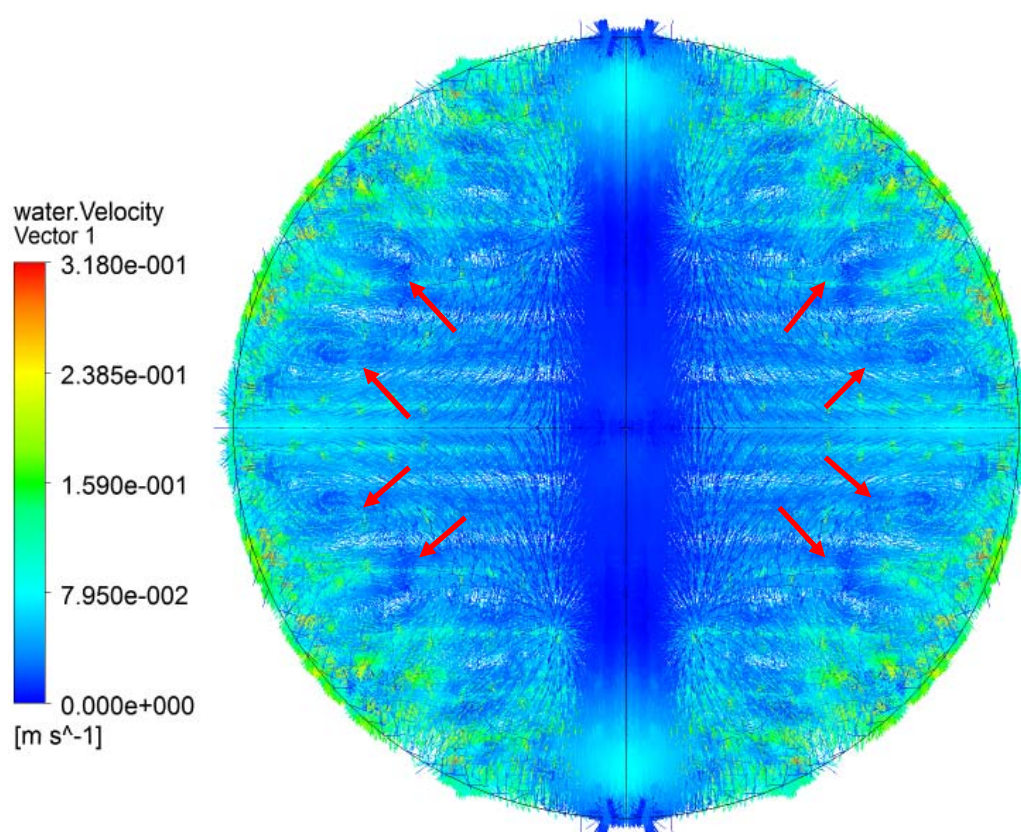


(ข)

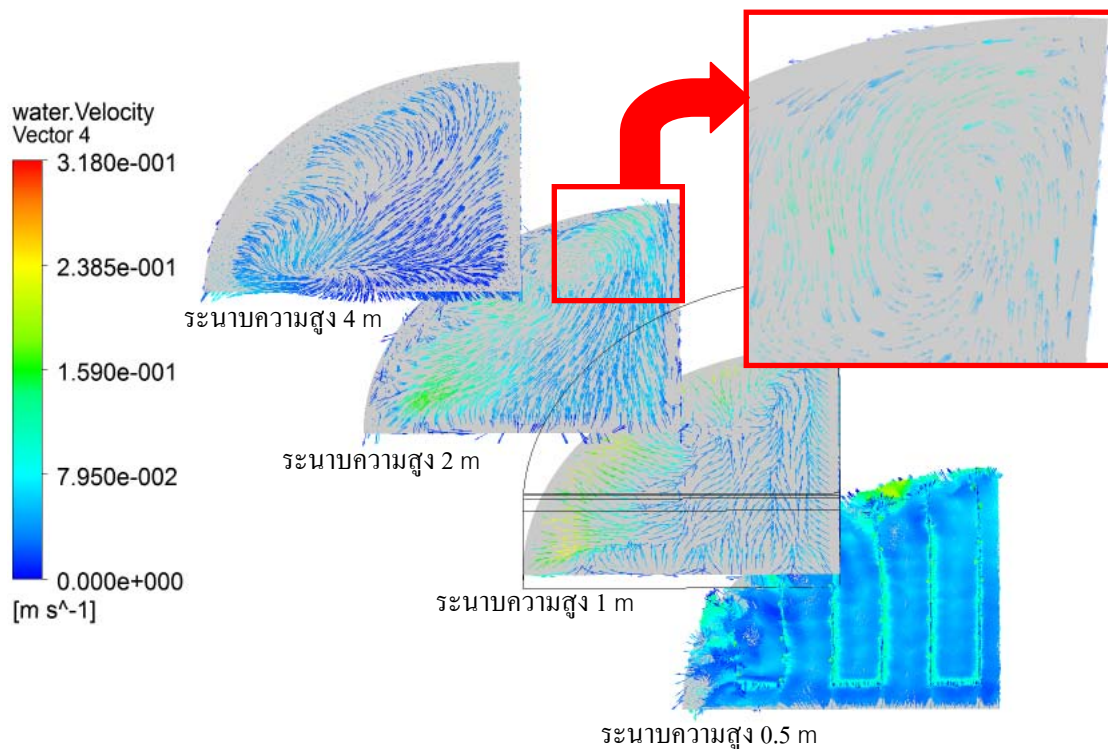
รูปที่ 23 ความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศเปรียบเทียบระหว่าง
(ก) การไหลของน้ำเสียแบบหนึ่งวัฏภาค (ข) การไหลของน้ำเสียเมื่อมีเม็ดตะกอน

ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่า ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศชนิดไหลขึ้น ไม่เพียงแต่มีหน้าที่เพื่อการกำจัดค่าความสกปรกในน้ำเสียหรือค่า COD เพียงอย่างเดียว แต่ในแง่การพิจารณารูปแบบการกวนผสมหรือการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ เม็ดตะกอนยังช่วยลดความเร็วการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ อันเป็นการช่วยลดโอกาสการเกิดรูปแบบการไหลลัดวงขึ้นภายในถัง

นอกจากนั้นแบบจำลองยังแสดงให้เห็นว่า กรณีการกวนผสมของวัฏภาคของน้ำเสียนั้น มีแนวโน้มเป็นไปได้ในทางที่ดี เนื่องจากเมื่อพิจารณารูปแบบการไหลที่แสดงโดยเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำเสียพบว่า ภายในถังปฏิกรณ์เกิดรูปแบบการไหลแบบเกลียวหมุนจำนวน 8 เกลียว (รูปที่ 24) โดยแต่ละเกลียวมีลักษณะหมุนวนจากบริเวณก้นถังวนสูงขึ้นไปจนถึงระดับกึ่งกลางความสูงของถังปฏิกรณ์ และเมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าลักษณะการหมุนวนของเกลียวไม่ได้มีลักษณะเป็นเกลียวปิด (รูปที่ 25) แต่น้ำเสียและเม็ดตะกอนสามารถเข้าภายในเกลียวหมุนที่บริเวณก้นถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะถูกปล่อยออกจากเกลียวที่บริเวณกึ่งกลางความสูงของถัง ปรากฏการณ์นี้สามารถช่วยเพิ่มศักยภาพการกวนผสมภายในถังได้ด้วยเช่นกัน

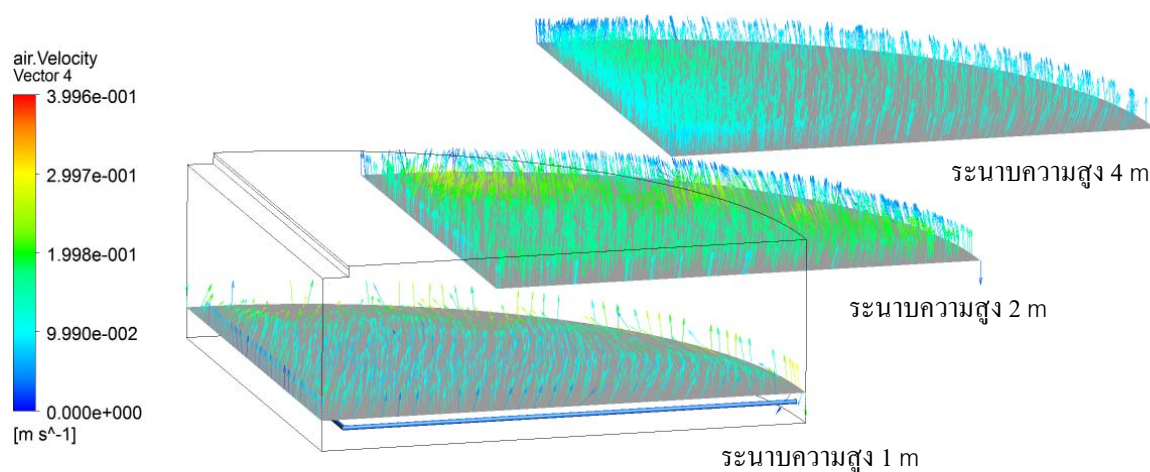


รูปที่ 24 ภาพมุมมองของรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งพบเกลียวการหมุนวนของน้ำเสียจำนวน 8 เกลียว

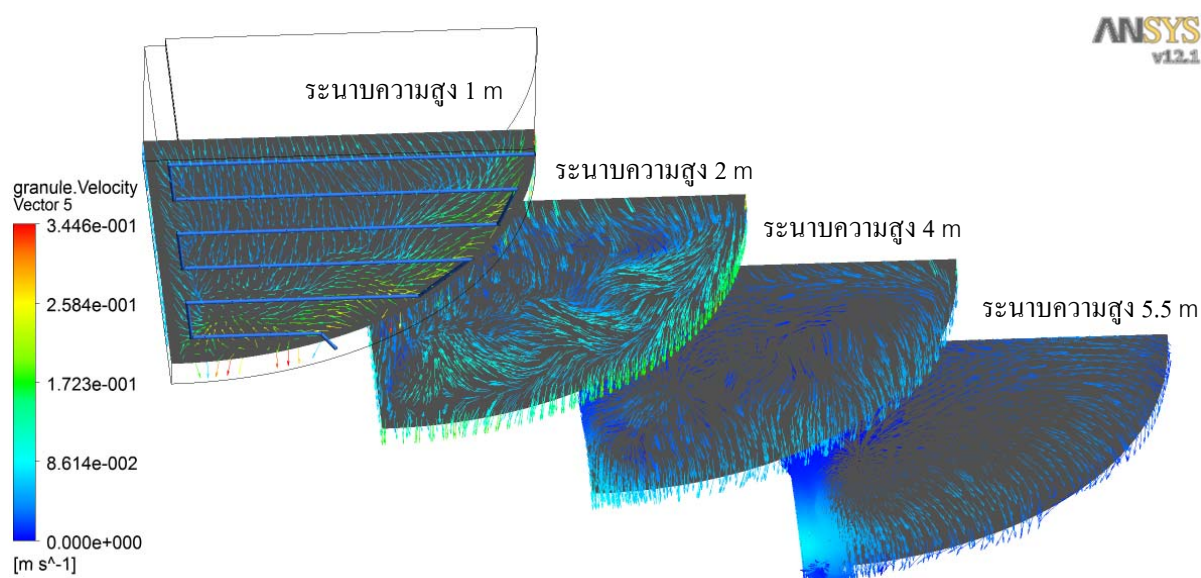


รูปที่ 25 เวกเตอร์แสดงเกลียวการหมุนของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ที่ระดับความสูงต่างๆ โดยแสดงรูปแบบการไหล 1 ใน 4 ของปริมาตรถังเนื่องจากการการไหลเป็นแบบสมมาตร

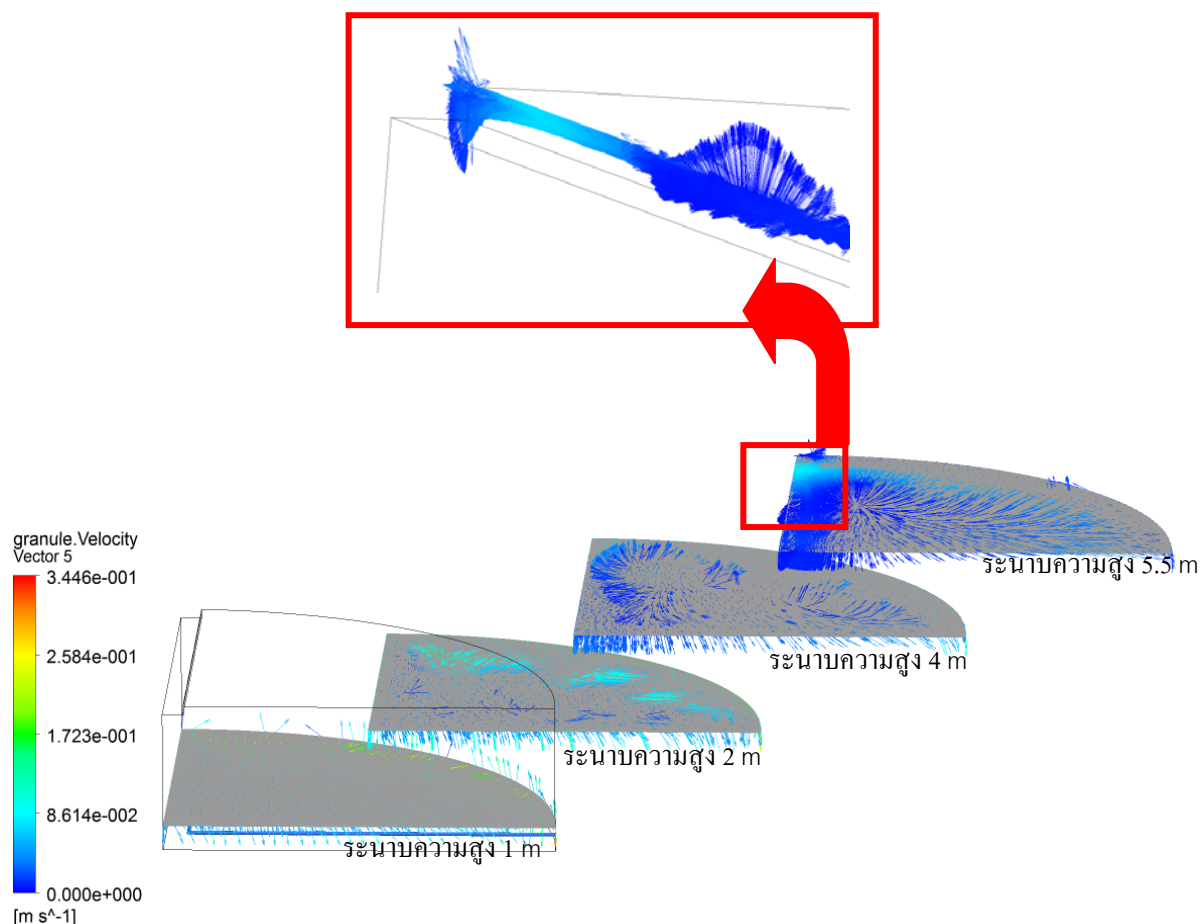
การเคลื่อนที่ของเม็ดตะกอนนอกจากจะได้รับแรงขับเคลื่อนจากโมเมนตัมของน้ำเสียเข้า โมเมนตัมที่เกิดจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ของก๊าซชีวภาพ เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดตะกอนหรือแม้กระทั่งรูปแบบการไหลน้ำเสีย เนื่องจากการลอยตัวของฟองก๊าซชีวภาพมีทิศทางไหลจากก้นถังขึ้นสู่ปากถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 26) ก๊าซชีวภาพจึงมีส่วนสำคัญในการช่วยให้เกิดการกระจายตัวของชั้นตะกอนที่หนาแน่นบริเวณก้นถัง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มศักยภาพในการถ่ายเทมวลในแนวแกนของถังปฏิกรณ์ อันเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพการกวนผสมของสารอาหารภายในถัง [8] อย่างไรก็ตามการที่มีปริมาณฟองก๊าซมากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลแบบลัดวงจรของน้ำเสียเข้าซึ่งเป็นผลเสียต่อประสิทธิภาพการกวนผสมภายในถัง ดังเช่นรูปแบบการไหลที่พบในแบบจำลอง เมื่อพิจารณาพฤติกรรมไหลของเม็ดตะกอนพบว่า ทิศทางการเคลื่อนที่ของตะกอนโดยส่วนใหญ่เป็นไปในทิศเคลื่อนลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ (รูปที่ 27) นั่นเป็นเพราะความหนาแน่นของเม็ดตะกอนที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของน้ำเสีย แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของเม็ดตะกอนที่ลอยตัวขึ้นมายังระดับความสูง 5.5 m อันเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ทางน้ำขาออกของถังปฏิกรณ์กลับพบว่า ตะกอนที่ลอยขึ้นมาถึงระดับความสูงนี้มีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากถังปฏิกรณ์ ดังจะเห็นได้จากเวกเตอร์แสดงความเร็วการเคลื่อนที่ของเม็ดตะกอนมีค่าสูงและมีทิศทางมุ่งไปยังทางน้ำขาออก



รูปที่ 1 เวกเตอร์แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 และ 4 m

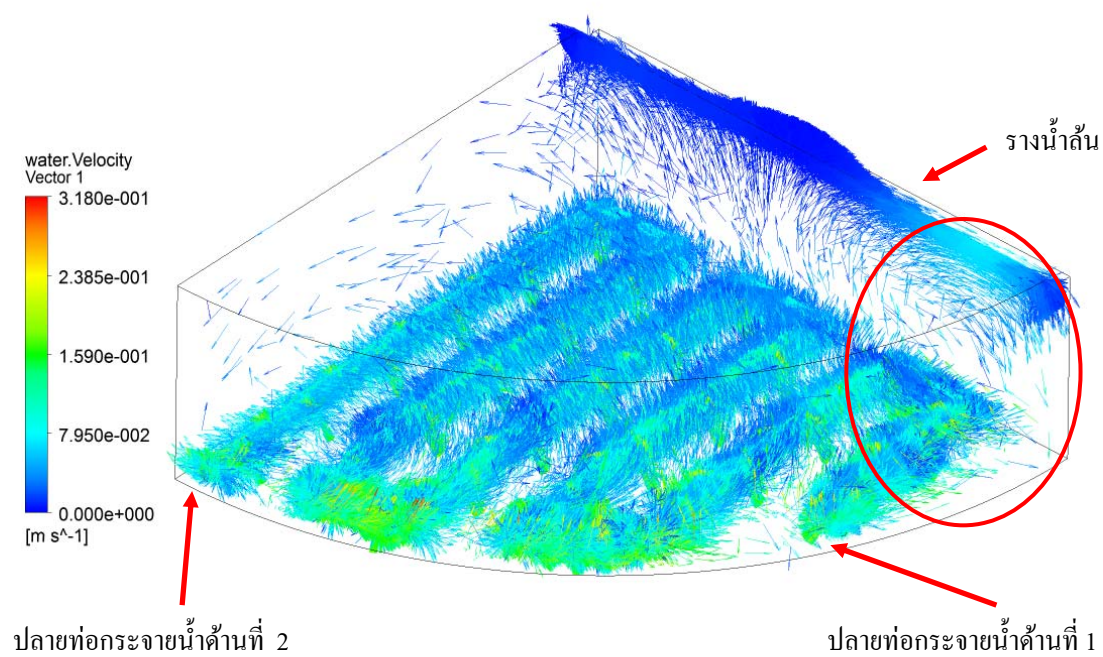


รูปที่ 2 ภาพจากด้านใต้ของถังปฏิกรณ์แสดงเวกเตอร์ทิศทางการไหลของเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 4 และ 5.5 m



รูปที่ 1 ภาพจากมุมมองสูงของถังปฏิกรณ์แสดงเวกเตอร์ทิศทางการไหลของเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ระดับความสูง 1 2 4 และ 5.5 m และแสดงความเร็วการหลุดออกจากถังปฏิกรณ์ของเม็ดตะกอน (ที่ระดับความสูง 1 และ 2 m ไม่เห็นเวกเตอร์เนื่องจากเวกเตอร์มีทิศพุ่งลงใต้ระนาบ)

การที่ตะกอนมีแนวโน้มหลุดออกจากระบบ (washout) ที่พบในแบบจำลองการไหลครั้งนี้ นอกจากสาเหตุของอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่สูงเกินไปยังอาจเกิดได้จากปัจจัยทางด้านการออกแบบถังปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน เพราะเมื่อพิจารณาผลการจำลองรูปแบบการกระจายตัวของน้ำเสียที่ออกจากท่อกระจายน้ำบริเวณก้นถังปฏิกรณ์แล้วจะเห็นว่า จากการที่น้ำเสียมีความเร็วการไหลสูง ณ บริเวณจุดกระจายน้ำที่อยู่ใกล้ปลายของท่อกระจายน้ำทั้งสองปลาย ผลการจำลองการไหลบ่งชี้ว่าปลายท่อกระจายน้ำด้านที่ 1 ซึ่งอยู่ใกล้รางน้ำล้น (ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง) เป็นจุดที่เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอย่างรุนแรง อันเป็นเหตุให้ความเร็วการไหลของน้ำเสียบริเวณนั้นมีค่าสูงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการส่งถ่ายโมเมนตัมสามารถเกิดได้จากจุดที่น้ำเสียกระจายเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จนถึงปากถัง ทำให้น้ำเสียที่เข้าสู่ถัง ณ บริเวณนี้มีความเสี่ยงสูงที่จะหลุดออกจากระบบก่อนเวลาอันควรหรือที่เรียกว่าการไหลแบบลัดวงจร (short circuit)



รูปที่ 1 ตำแหน่งการวางตัวของปลายท่อกระจายน้ำทั้งสองด้าน และ (วงกลมแดง) บริเวณที่เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมของน้ำเสียเข้าอย่างรุนแรง

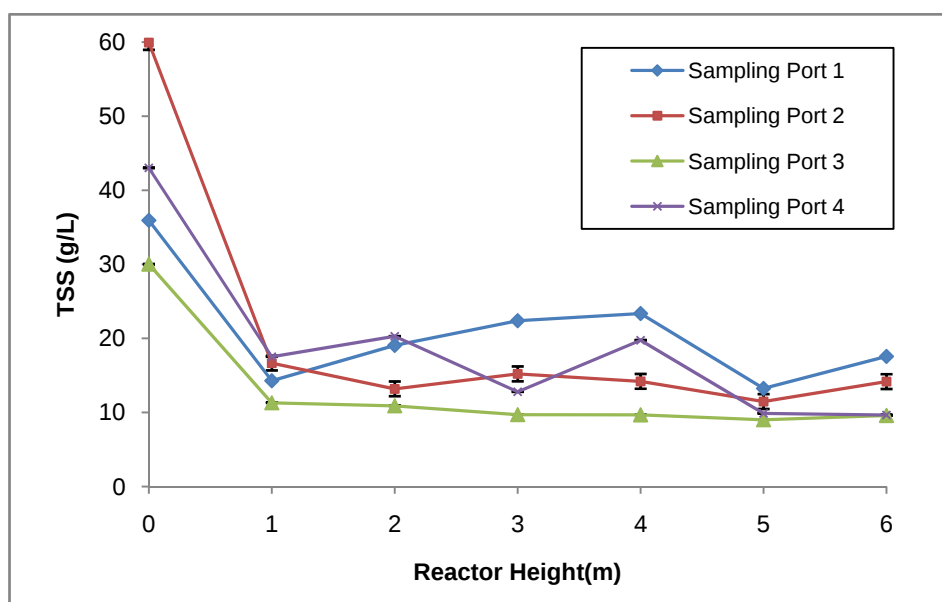
การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาด 6,000 ลูกบาศก์เมตร

1. ศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid) ภายในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ 1 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในหน่วยกรัม ที่แต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์ ซึ่งวัดจากจำนวนตัวอย่าง 5 มิลลิตร

ระดับความสูงของ ถังปฏิกรณ์ (เมตร)	หมายเลขช่องเก็บตัวอย่าง (sampling port number)			
	1	2	3	4
0.0	0.1797±4.24e-4 ^a	0.2998±9.83e-3 ^a	0.1502±3.46e-3 ^a	0.2151±3.55e-2 ^a
1.0	0.0714±2.83e-4 ^b	0.0834±2.90e-3 ^b	0.0566±2.90e-3 ^b	0.0877±4.03e-3 ^{b,c}
2.0	0.0953±1.41e-4 ^c	0.0660±1.06e-3 ^{c,d}	0.0545±1.41e-3 ^b	0.1015±1.58e-2 ^b
3.0	0.1120±5.66e-4 ^d	0.0761±3.46e-3 ^{b,c}	0.0486±1.63e-3 ^c	0.0640±3.11e-3 ^{c,d}
4.0	0.1169±1.48e-3 ^e	0.0710±3.82e-3 ^c	0.0484±1.41e-3 ^c	0.0988±8.49e-4 ^{b,c}
5.0	0.0663±4.24e-4 ^f	0.0574±2.05e-3 ^d	0.0451±4.24e-4 ^c	0.0494±8.49e-4 ^d
5.5	0.0879±8.49e-4 ^g	0.0709±2.47e-3 ^c	0.0480±7.78e-4 ^c	0.0484±7.78e-4 ^d

หมายเหตุ: a,b,c,d,e,f,g ในแนวหลักของตาราง แสดงความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.95 เมื่อวิเคราะห์ด้วย
หลักสถิติตามวิธีของ Duncan



รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid, TSS : g/L) ที่แต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าตัวอย่างตะกอนจากช่องเก็บตัวอย่างทั้ง 4 บ่งบอกสถานะภายในถังปฏิกรณ์ครอบคลุมทั้ง 4 ส่วน ผลการวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าของแข็งเกิดการสะสมตัวหนาแน่นที่บริเวณก้นถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ส่วน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าการสะสมตัวของตะกอนที่ก้นถังปฏิกรณ์ (ความสูง 0 เมตร) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระดับความสูงอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ที่ระดับความนี้พบว่า ก้นถังปฏิกรณ์ช่องเก็บตัวอย่างที่ 2 เกิดการสะสมตัวของตะกอนสูงที่สุด รองลงมาคือพื้นที่ของช่องเก็บตัวอย่างหมายเลข 4 1 และ 3 ซึ่งมีความหนาแน่นของของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 59.95 43.02 35.94 และ 30.03 g/L ตามลำดับ ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ระดับ 1 ถึง 5 เมตร อันเป็นบริเวณที่มีการติดตั้งตัวกลางให้เชื้อจุลินทรีย์ยึดเกาะ รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid, TSS : g/L) ที่แต่ละระดับความสูงของถังปฏิกรณ์แสดงให้เห็นว่า ตะกอนบริเวณภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 มีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างอื่น และความเข้มข้นตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามระดับความสูงของถัง โดยมีค่าสูงสุดที่ระดับความสูง 4 เมตร และมีค่าลดลงต่ำสุดที่ระดับความสูง 5 เมตร อันเป็นบริเวณขอบบนสุดของตัวกลาง ผลที่พบมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความเข้มข้นตะกอนภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 อันจะเห็นได้จากรูปที่ 2 ตะกอนภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 มีค่าต่ำสุดตลอดความสูงถังปฏิกรณ์รูปแบบการกระจายตัวของตะกอนที่พบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกระจายตัวของตะกอนภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า รูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังอาจเกิดขึ้นอย่างไม่มีประสิทธิภาพมากพอ จึงเป็นสาเหตุให้การกระจายตัวของตะกอนเป็นไปอย่างไม่ทั่วถึง การที่ตะกอนเกิดการสะสมตัวหนาแน่นที่ตลอดความสูงของถังภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 เป็นสาเหตุให้ไมเมนตัมของน้ำเสียเกิดการถ่ายเทอย่าง

รุนแรง ในบริเวณอื่นๆ ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า พื้นที่ภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 3 มีการถ่ายเทโมเมนตัมสูงสุด อันเห็นได้จากการที่ตะกอนมีการสะสมตัวเบาบางที่สุด ซึ่งนั่นเป็นเครื่องบ่งชี้ว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น ณ ขณะที่ทำการเก็บตัวอย่างนั้น เป็นรูปแบบการไหลแบบลัดวงจร (short-circuit) ซึ่งเป็นหนึ่งในรูปแบบการไหลที่ลดทอนประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ เพราะการที่น้ำเสียไม่สามารถไหลผ่านพื้นที่ภายใต้ช่องเก็บตัวอย่างที่ 1 หรือไหลผ่านได้น้อย นั้นทำให้พื้นที่ดังกล่าวเป็นจุดอับภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะลดความสามารถในการรับน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ ความสามารถในการบำบัดและความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพก็ลดลงด้วยเช่นกัน

ผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลจำลองการไหลของน้ำเสียด้วยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหลข้างต้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบลัดวงจรจะเห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำเสียเข้ามีผลต่อรูปแบบการไหลโดยรวมภายในถังปฏิกรณ์ นั่นเป็นเพราะถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบมาโดยปราศจากอุปกรณ์กวนผสม เพื่อประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการดำเนินระบบ และนี่เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำมีส่วนสำคัญต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ ดังเห็นได้จากการศึกษาของ Moreira M.R. และคณะ (2007) ที่พบว่า การติดตั้งทางน้ำเข้าในแนวรัศมีของถัง ทำให้การไหลเข้าสู่ fully develop เร็วกว่าการติดตั้งทางน้ำเข้าในแนวแกนของถัง เพราะทางน้ำเข้าในแนวแกนของถังก่อให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนเป็นหลัก ซึ่งทำให้ความเร็วการไหลในแนวแกนของถังมีค่าสูงมากกว่าการไหลบริเวณใกล้ผนัง หรือที่เรียกว่ารูปแบบการไหลแบบ jet flow อันเป็นสาเหตุให้เกิดการไหลแบบลัดวงจร ซึ่งผลการจำลองการกระจายน้ำข้างต้นพบว่า เกิดจุดหยุดนิ่งขึ้นภายในท่อกระจายน้ำและอาจเป็นสาเหตุให้ตะกอนสะสมจนลดทอนประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำ เป็นที่น่าสนใจว่าประสิทธิภาพการกระจายน้ำของถังปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้ ยังคงทำงานได้ตามที่ออกแบบมาหรือไม่ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ดังกล่าวได้ถูกใช้มาแล้วเป็นเวลามากกว่า 10 ปี และเพื่อเป็นการหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพรวมทั้งป้องกันปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องมีงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อศึกษาในเชิงลึกต่อไป

บทสรุป

การศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดโรงงานอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นข้อควรระวังจากการดำเนินระบบบำบัดด้วยการป้อนน้ำเสียเข้าจากปลายทั้งสองด้านของท่อกระจายน้ำ ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงที่ตะกอนจะสะสมตัวอยู่ภายในกึ่งกลางความยาวของเส้นท่อหนึ่งในแนวทางที่สามารถช่วยป้องกันปัญหาที่กล่าวมาไม่ให้เกิดขึ้นได้นั้น ผู้ดำเนินระบบอาจจำเป็นต้องสลับการดำเนินระบบ โดยสลับการป้อนน้ำเสียเข้าจากปลายทั้งสองด้านของท่อกระจายน้ำร่วมกับการป้อนน้ำเสียเข้าจากปลายด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว ทั้งนี้เพื่อเป็นการไล่ตะกอนตกค้างที่สะสมตัวภายในเส้นท่อ แต่อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกระจายน้ำเสียของท่อกระจายน้ำ พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำเสียที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกระจายน้ำ อย่างไรก็ตามท่อกระจายน้ำที่ถูกออกแบบมานี้ สามารถกระจายน้ำเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ได้ใกล้เคียงกันมากกว่า 90% เมื่อพิจารณาจากความเร็วการไหลของน้ำเสีย ณ แต่ละรูกระจายน้ำ (orifice)

แบบจำลองการไหลแบบสามมิติแสดงให้เห็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคของน้ำ ตะกอน และฟองก๊าซ ตะกอนจุลินทรีย์ภายในระบบนอกจากทำหน้าที่ในการบำบัดความสกปรกแล้ว เม็ดตะกอนยังช่วยในการลดทอนโมเมนตัมของน้ำเสียขาเข้า อันจะสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดรูปแบบการไหลแบบลัดวงจร แต่ในแง่ของข้อควรระวังแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า จุดกระจายน้ำด้านที่อยู่ใกล้ทางน้ำขาออกของถังปฏิกรณ์ เป็นจุดที่ต้องให้ความสนใจในระหว่างการออกแบบตำแหน่งรูกระจายน้ำ เนื่องจากน้ำเสียที่ออกจากรูกระจายน้ำในบริเวณดังกล่าว มีความเร็วการไหลสูงสุดเมื่อเทียบกับรูกระจายน้ำอื่นๆ ตลอดความยาวของเส้นท่อ โมเมนตัมของน้ำเสียขาเข้าบริเวณนี้อาจมีค่าสูงจนก่อให้เกิดการไหลแบบลัดวงจรขึ้นได้

เนื่องจากการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ ถูกขับเคลื่อนด้วยโมเมนตัมน้ำเสียขาเข้าเป็นหลัก การทำงานของท่อกระจายน้ำจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญทั้งด้านการออกแบบ และการติดตามประสิทธิภาพระหว่างการดำเนินระบบ ปัญหาการสะสมตัวของตะกอนภายในถังปฏิกรณ์ที่พบจากการทำการทดลอง อาจสะท้อนถึงประสิทธิภาพการทำงานของท่อกระจายน้ำในปัจจุบัน เพราะถังปฏิกรณ์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ดำเนินระบบมาเป็นเวลานานกว่า 10 ปี ดังนั้นการศึกษาเชิงลึกถึงประสิทธิภาพการกระจายน้ำของท่อในปัจจุบัน รวมทั้งการศึกษหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของท่อกระจายน้ำภายในถังปฏิกรณ์ชนิดเดียวกันนี้ อาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียหรือประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

อย่างไรก็ตามการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ขนาดโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากงานวิจัยนี้ ยังเป็นรูปแบบการไหลที่ยังไม่มีการติดตั้งตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ ปัญหาด้านการออกแบบดังที่พบในผลของการจำลองการไหลครั้งนี้ สามารถแก้ไขหรือบรรเทาลงได้ด้วยการออกแบบการติดตั้งตัวกลางภายในถังอย่างเหมาะสม อันเป็นการบังคับและควบคุมพฤติกรรมการไหลของวัฏภาคทั้งสามภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดหรือการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนั้นการ

ออกแบบการติดตั้งตัวกลางที่เหมาะสมยังสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบเดิมที่มีอยู่เดิมให้ดียิ่งขึ้นได้ด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- Albagnac, G., 1990. "Biomass retention in advanced anaerobic reactors." *Water Science Technology*, 22(1/2), 17-24.
- Baten, J.M., Ellenberger, J. and Krishna, R., 2003, "Scale up studies on partitioned bubble column reactors with the aid of CFD simulations", *Catalysis Today*; 79-80: 219-227.
- Bhavik K. Acharya, Sarayu Mohana, Datta Madamwar, 2008, "Anaerobic treatment of distillery spent wash – A study on upflow anaerobic fixed film bioreactor", *Bioresource Technology*; 99: 4621–4626.
- Boonya, S. 2006, Tracking the Movement of Granules inside Two Types of UASB Reactors, A M.Eng. Degree Thesis of Department of Chemical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.
- Borja, R., Alba, J. and Banks, C.J., 1996. "Anaerobic digestion of wash waters derived from the purification of virgin olive oil using a hybrid reactor combining a filter and a sludge blanket," *Process Biochemistry*, 31(3), 219-224.
- Borja, R., Banks, C.J. and Wang, Z., 1995. "Performance of a hybrid anaerobic reactor, combining a sludge blanket and a filter, treating slaughterhouse wastewater," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 43, 351-357.
- Chian, E.S.K. and DeWalle, F.B., 1977. "Treatment of high strength acidic wastewater with a completely mixed anaerobic filter," *Water Research*, 11, 295-304.
- Chua, H. and Fung, J.P.C., 1996. "Hydrodynamics in the packed bed of the anaerobic fixed film reactor," *Water Science and Technology*, 33(8), 1-6.
- Chung, Y.C. and Choi, Y.S., 1993. "Microbial activity and performance of an anaerobic reactor combining a filter and a sludge bed," *Water Science Technology*, 27(1), 187-194.
- Chung, Y.C. and Neethling, J.B., 1989. "Microbial activity measurements for anaerobic sludge digestion," *WPCF*, 61(3), 343-349.
- Coulter, J. B., Soneda, S. and Ettinger, M. B., 1957. "Anaerobic contact process for sewage dispersal," *Sewage and Industrial Wastes*. 29(4), 468.
- Dolfing, J., 1986. "Granule in UASB reactors," *Water Science and Technology*. 18(12), 15-25.
- Dolfing, J., Griffioen, A., Van Neerven, R. W. and Zevenhuizen, L. P. T. M., 1985. "Chemical and bacteriological composition of granule methanogenic sludge." *Can. J. Microbial*. 31, 744-750.

- Freund, H., Zeiser, T., Huber, F., Klemm, E., Brenner, G., Durst, F., Emig, G., 2003. „Numerical simulations of single phase reacting flows in randomly packed fixed-bed reactors and experimental validation.“ *Chem. Eng. Sci.* 58, 903-910.
- Goodwin, J. A. S., Wase, D. A. J. and Forster, C. F., 1992. “Pre-granulation seeds for UASB reactors: How necessary are they?,” *Bioresource Technology*. 41(1), 71-79.
- Guiot, S.R. and van den Berg, L., 1984. “Performance and biomass retention of an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and filter,” *Biotechnology Letters*, 6(3), 161-164.
- Guiot, S.R. and van den Berg, L., 1985. “Performance of an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter treating sugar waste,” *Biotechnology and Bioengineering*, 27(6), 800-806.
- Henze, M. and Harremoes, P., 1983. “Anaerobic treatment of wastewater in fixed-film reactor-a literature review,” *Water Sciences and Technology*, 15(8), 1-100.
- Joubert, W.A. and Britz, T.J., 1987. “The Performance and characteristics an anaerobic hybrid reactor treating a synthetic fatty acid containing substrate,” *Water SA*, 13(2), 63-68.
- Lettinga G., Van Velsen, A. F. M., Hobma, S. de Zeeuw, W., Klapwijk, A., 1980. “Use of the upflow sludge blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment, Especially for anaerobic treatment,” *Biotechnology and bioengineering*. 22, 699-734.
- Lettinga, G., and Pol, L. W. H., 1986. “Advanced reactor design, operation and economy,” *Water Science and Technology*. 18(12), 99-108.
- Lo, K. V., Liao, P. H., Bulley, N. R. and Chieng, S. T., 1984. “A comparison of biogas production from dairy manure filtration using conventional and fixed film reactors,” *Canadian Agricultural Engineering*. 26(1), 73-78.
- Lo, K.V., Liao, P.H. and Gao, Y.C., 1994. “Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors,” *Bioresource Technology*, 47, 153-157.
- Moreira R. M. , P.A.M.F., Mesnierb R. , Leclerc J-P Influence of Inlet Positions on The Flow Behavior inside a Photoreactor using Radiotracers and Colored Tracer Investigations. *Applied Radiation and Isotopes*, 2007. 65 p. 419–427.
- Oleszkewicz, J.A., Hall, E.R. and Oziemblo, J.Z., 1986. “Performance of laboratory anaerobic hybrid reactors with varying depths of media,” *Environmental Technology Letters*. 7, 445 -452.
- Oleszkiewicz, J.A. and Thadani, V.J., 1988. “Effect of biofilter media on the performance of anaerobic hybrid reactor,” *Environmental Technology Letters*, 9, 89-100.

- Pornpratan, A. 2003. "Study of flow behavior in biogas reactor using computational fluid dynamics method," a M.S. thesis, Chemical Engineering Department, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Rachabordin Wongnoi, Chantaraporn Phalakornkule, Efficiency enhancement of upflow anaerobic sludge bed (UASB) by a modified three-phase separation, Department of Chemical Engineering, King Mongkut's Institute of technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2005.
- Reinhold, G., Merrath, S., Lennemann, F., Markl, H., 1996. "Modelling the hydrodynamics and the liquid-mixing behavior of a biogas tower reactor." *Chem. Eng. Sci.* 51, 17, 4065-4073.
- Ruttithiwapanich, T. 2006, Study of One- and Two-Phase Flow Patterns Inside Biogas Reactors Using Computational Fluid Dynamics (CFDs). A M.S. Degree Thesis of School of Natural Resources and Biotechnology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.
- Sam-Soon, P., Loewenthal, R.E., Wentzel, M.C., Moosbrugger, R.E. and Marais, G.R., 1991. "Effect of recycle in upflow anaerobic sludge bed (UASB) systems," *Water SA*, 17(1), 37-46.
- Sastry, C.A. and Vickineswaty, S., 1995. "Anaerobic waste treatment plants," In Waste Treatment Plants, Ed. by Sastry, C.A., Hashim, M.A. and Agamothu, P., New Delhi, Narosa Publishing House, 179-204.
- Sheehan, G. J., 1981. Kinetics of heterogenous acidogenic fermentations, Ph.D. Dissertation, University of Queensland, 256 p.
- Smith, L.C., Elliot, D.J. and James, A., 1996. "Mixing in upflow anaerobic filters and its influence on performance and scale-up," *Water Research*, 30(12), 3061-3073.
- Suvajittanont, W., Chaiprasert, P., 2003. "Potential of biogas recirculation to enhance biomass accumulation on supporting media," *Bioresource Technology*, 88, 157-162.
- Thirumurthi, D., 1988. "Effects of Mixing velocity on anaerobic fixed film reactors," *Water Research*, 22(4), 517-523.
- Van den Berg, L., Kennedy, K. J. and Samson, R., 1985. "Anaerobic downflow fixed film reactor : Performance under steady state and non-steady state condition," *Water Sciences and Technology*. 17(1), 89-102.
- Van der Merwe, M. and Britz, T.J., 1993. "Anaerobic digestion of baker's yeast factory effluent using an anaerobic filter and a hybrid digester," *Bioresource Technology*, 43(2), 169-174.
- Young, J.C. and McCarthy, P.L. 1962. "The anaerobic filter for waste treatment." In Proceedings of the 2nd Industrial Waste Conference. Purdue University. West Lafayette Indiana. Lewis Publishers. 550.

Young, J.C. and McCarty, P.L., 1969. "The anaerobic filter for waste treatment," *J. of Water Pollution Control Federation*. 41(5), 160-173.

เพชรพร เชาวกิจเจริญ 2538 ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 273-302

ภาวิณี ชัยประเสริฐ วรรณพ นพรัตน์ จงกล พูนทวี ชินพงศ์ วังใน 2545 รายงานฉบับสมบูรณ์ "การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม upflow sludge bed ร่วมกับ fixed bed ในการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง" เสนอต่อศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ