

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
โครงการวิจัย

การศึกษาผลของความหนาแน่นและการจัดเรียงตัวของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเสีย  
ภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดตรึงฟิล์มในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง  
โดยอาศัยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

**Media density and positioning effects on the wastewater flow pattern inside anaerobic fixed film reactor of  
cassava starch production plant using computational fluid dynamics (CFDs)**

คณะผู้วิจัย

นางสาว วรินธร สงคศิริ

นาย ถาวร รัตติทิวาพาณิชย์

รายงานนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณ ประจำปี 2554

## บทคัดย่อ

ตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมเป็นบริเวณที่เกิดการเกาะและสร้างฟิล์มชีวะของเชื้อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังทำหน้าที่ในการลดโอกาสที่ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์หลุดออกนอกระบบ ลดโอกาสในการเกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสียเข้า (short circuit) ทำให้ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มมีเสถียรภาพในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบเดิม งานวิจัยนี้ศึกษากลไกและอิทธิพลของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอาศัยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล การศึกษาผลของความหนาของตัวกลางพบว่า ความเร็ว ณ แกนกลางถังมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของตัวกลาง การเพิ่มขึ้นของความหนาของฟิล์มชีวะบนตัวกลางที่ระดับ 0.5 mm ไปเป็น 5 mm พบว่าความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกนภายในชั้นของตัวกลางมีค่าเพิ่มขึ้น 32.20% การติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/6 1/4 และ 1/2 ของความสูงของถัง ลดความเร็วการไหลเฉลี่ยของน้ำในแนวแกน ณ ระดับขอบล่างของตัวกลางลง 82.58% 141.89% และ 175.54% ตามลำดับ การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามสถานะภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรม พบการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนที่มากเกินไป อันมีสาเหตุจากการออกแบบท่อกระจายน้ำ ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดการ washout ของตะกอน อีกทั้งพบว่าตัวกลางช่วยลดความเร็วการไหลของน้ำจากบริเวณก้นถังขึ้นมาสู่ปากถัง ความรู้ที่ได้สามารถนำไปสู่การหารูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งตัวกลางรวมทั้งการใช้ปริมาณความหนาแน่นของตัวกลางที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มศักยภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

## **Abstract**

The media inside industrial-scale anaerobic fixed film wastewater treatment reactor is the location for the bio-film formation. The media also facilitates the reduction of the granular sludge washout as well as the reduction of the inlet wastewater short circuit. An anaerobic fixed film wastewater treatment reactor has more stability than a conventional one. This research studied the mechanism and the impact of media on the fluid flow pattern inside the reactor using computational fluid dynamics (CFDs). Simulation results indicated that the axial water flow velocity increased following the bio-film thickness development. The development of bio-film thickness of 0.5 mm to 5.0 mm increased the axial water flow velocity 32.20%, within the media installation region. The media installation with the height of 1/6, 1/4 and 1/2 of the reactor height reduced the axial water flow velocity 82.58%, 141.89% and 175.54%, respectively. The improper design of water distribution pipe was found from the study of three-phase flow pattern inside the industrial-scale reactor. The water distribution pipe motivated the excess axial momentum transfer. It is the motivation of the granular sludge washout. The media within the industrial-scale reactor showed the capability reducing the axial water flow velocity. The knowledge from this research could facilitate the design of the media density and the media positioning. The efficiency of the existing anaerobic fixed film reactor may be increased.

## สารบัญเรื่อง

### เนื้อหา

บทคัดย่อ.....	2
Abstract.....	3
สารบัญเรื่อง.....	4
สารบัญตาราง .....	6
สารบัญรูป .....	7
บทนำ .....	8
วัตถุประสงค์โครงการวิจัย .....	10
วัตถุประสงค์เชิงจุดมุ่งหมาย.....	10
วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม .....	10
ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	10
ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	10
ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR) .....	10
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	12
ถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ.....	12
● ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR).....	12
● ถังปฏิกรณ์แบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB).....	13
● ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม (Anaerobic Hybrid Reactor) .....	14
การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics – CFD) .....	14
การคำนวณพลศาสตร์ของไหลกับการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ .....	16
วิธีการดำเนินการวิจัย .....	16
การศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ .....	16
การศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ.....	18
ศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม .....	19
สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือเก็บข้อมูล .....	23
ผลการดำเนินงานวิจัย.....	24

การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลกับผลการทดลอง (Model Validation).....	24
การศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ .....	24
การศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ.....	28
ศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาค ภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม .....	30
บทสรุป.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	36

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 สมการหลักของการไหลแบบอนุรักษ์.....	16
ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processing จำลองการไหลแบบหนึ่งวัฏภาค ของน้ำภายใน ถังปฏิกรณ์ชนิด Upflow ขนาดห้องปฏิบัติการ .....	18
ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ ขนาดโรงงานอุตสาหกรรม .....	22

## สารบัญรูป

รูปที่ 1 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ชนิด upflow ขนาด 8 ลิตร ใช้ในการศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่ระดับต่างๆ .....	17
รูปที่ 2 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ชนิด upflow ขนาด 8 ลิตร ใช้ในการศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่ระดับต่างๆ .....	19
รูปที่ 3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์ม .....	20
รูปที่ 4 แบบจำลองท่อกระจายน้ำภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์ม .....	20
รูปที่ 5 มุมการกระจายตัวของ jet flow ภายในถังปฏิกรณ์จำลองชนิดไหลขึ้น เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง ...	24
รูปที่ 6 เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองที่ระนาบ $xz$ เมื่อ $y=0$	265
รูปที่ 7 รูปแบบการไหลของน้ำที่ถูพบภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการที่ระนาบ $xz$ เมื่อ $y=0$ เมื่อตัวกลางมีความหนา 0.5, 2 และ 5 mm .....	26
รูปที่ 8 กราฟแสดงความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกน $z$ ปากถังปฏิกรณ์ .....	27
รูปที่ 9 เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองที่ระนาบ $yz$ เมื่อ $x=0$ ..	28
รูปที่ 10 เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำและจุดที่เกิด wake .....	29
รูปที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วการไหลในแนวแกนของน้ำ ในระนาบตัดขวางถังปฏิกรณ์ ( $xy$ -plane) ที่ระดับความสูงเท่ากับขอบด้านล่างของตัวกลาง .....	30
รูปที่ 12 Iso-volume แสดงปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลอง ที่มีความเร็วการไหลของน้ำสูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอน (Terminal velocity of granular sludge) .....	32
รูปที่ 13 Iso-volume แสดงปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลอง ที่มีความเร็วการไหลของเมื่อดตะกอนสูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอน (Terminal velocity of granular sludge) .....	32

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้นำของโลกด้านการผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการผลิตจำนวนมากมหาศาลนั้นก่อให้เกิดถึงภาวะที่ผู้ประกอบการต้องแบกรับ ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต หรือความต้องการใช้พลังงานที่สูง ทั้งในรูปของน้ำมันเตาและไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้ว โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังผลิตน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ในรูปซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) ประมาณ 15 ลูกบาศก์เมตรต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน และสูญเสียพลังงานในรูปน้ำมันเตาเพื่อการอบแห้งถึง 40 ลิตร และกระแสไฟฟ้า 165 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันแป้ง (รวมค่าพลังงานประมาณ 1,000 บาทต่อการผลิตแป้ง 1 ตัน) (ข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 2551) ซึ่งภาวะเหล่านี้เป็นอุปสรรคที่บั่นทอนศักยภาพทางการแข่งขันระดับสากล

การส่งเสริมให้โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย นอกจากการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนแล้ว ยังช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพนี้ลดค่าซีโอดีได้ถึง 90% จึงส่งผลให้อุตสาหกรรมนี้สามารถลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มศักยภาพด้านการแข่งขันกับประเทศผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายอื่น จากข้อมูลของศูนย์ประสานงานโครงการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ในปี 2551 มีโรงงานจำนวนอย่างน้อย 44 โรงงาน (โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังอย่างน้อย 19 โรงงาน โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มอย่างน้อย 15 โรงงาน โรงงานผลิตเอทานอลอย่างน้อย 7 โรงงาน และโรงงานแปรรูปอาหารอย่างน้อย 3 โรงงาน) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้รวมกันคิดเป็นอย่างน้อย 297 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ซึ่งช่วยประหยัดเงินให้ประเทศไม่น้อยกว่า 1,249.2 ล้านบาทต่อปี (โดยคำนวณจากการทดแทนน้ำมันเตา)

การออกแบบถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มแต่เดิมนั้น มักให้ความสำคัญไปที่ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ และความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ความจริงแล้วตัวกลางอันเป็นที่เกาะของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยตัวกลางเป็นบริเวณที่เกิดการเกาะและสร้างฟิล์มชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่สำคัญในการลดโอกาสที่ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์จะหลุดออกนอกระบบ อันเป็นการช่วยเพิ่มอายุการกักเก็บตะกอนภายในถึงปฏิกรณ์ รวมทั้งช่วยลดโอกาสในการเกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสียขาเข้า (short circuit) นั่นทำให้ถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นสามารถบำบัดน้ำเสียในอัตราที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบเดิม การศึกษาหารูปแบบการจัดเรียงตำแหน่งตัวกลางรวมทั้งการใช้ปริมาณความหนาแน่นของตัวกลางที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มศักยภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบถึงปฏิกรณ์ในอนาคตให้มีขีดความสามารถรับอัตราการป้อนน้ำเสียได้เพิ่มมากขึ้น มีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้นและลดเกิดปริมาตรศูนย์เปล่า (dead zone) ให้เหลือน้อยที่สุด อันจะเป็นหนทางไปสู่การออกแบบถึงปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างและเพิ่มศักยภาพการแข่งขันในระดับนานาชาติให้แก่อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังรวมทั้งอุตสาหกรรมอื่นๆ ของประเทศไทยต่อไป

ดังนั้นเพื่อศึกษาหาความหนาแน่นและรูปแบบการจัดเรียงตัวกลางที่เหมาะสมภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพโดยอาศัยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อใช้ศึกษาหาความหนาแน่นและการจัดเรียงตัวของตัวกลางที่เหมาะสม ที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มขนาดอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

### วัตถุประสงค์เชิงอุดมการณ์

- เพื่อวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดของเสียเพื่อผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพ
- เพื่อเพิ่มศักยภาพการออกแบบระบบบำบัดของเสียในระดับอุตสาหกรรม
- เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดของเสียให้สูงขึ้น

### วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม

- เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) Model
- เพื่อศึกษาระบบการไหลของของไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขนาดอุตสาหกรรม ที่สภาวะความหนาแน่นของตัวกลางและการจัดเรียงตัวต่างๆ กัน

## ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองการไหล (computational fluid dynamics, CFDs) ที่สามารถใช้ทำนายรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นภายในคอมพิวเตอร์จะถูกปรับแก้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การทำนายที่ใกล้เคียงกับการไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียขนาดอุตสาหกรรม เพื่อนำแบบจำลองนั้นไปใช้ศึกษาผลของความหนาแน่นและรูปแบบการจัดเรียงตัวของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์

## ทฤษฎี สมมุติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

### ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR)

ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์มีวัสดุ เช่น ค่ายายในลอน เชือก เพื่อใช้ตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์อยู่ภายในระบบบำบัดในปริมาณที่มากที่สุดและระยะเวลาาน ทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง ถังปฏิกรณ์แบบที่ใช้ตัวกรองเพื่อกักชีวมวลในระบบนี้ เริ่มแรกถูกนำมาใช้ในการบำบัดของเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ โดย Coulter และคณะ (Coulter และคณะ, 1957) ต่อมา Young และ McCarty (1962) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเรื่อยมา จากงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เจือจางและเข้มข้นได้ จึงเป็นสิ่งจูงใจที่ทำให้มีการพัฒนาถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้บางครั้งเรียก Anaerobic Fixed Film Reactor (AFFR) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์แบบตัวกรอง (Anaerobic filter) การบรรจุเป็นแบบลุ่ม จุลินทรีย์อยู่ในลักษณะที่เหมือนกับถูกกรอง โดยมีทั้งจุลินทรีย์ที่จับบนผิววัสดุ และที่อุกักอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์ม

จุลินทรีย์ วัสดุตัวกลางถูกวางอย่างเป็นระเบียบ เช่น เป็นท่อ หรือเป็นแผ่นขนานกันไป จุลินทรีย์จับอยู่เฉพาะบนผิววัสดุเท่านั้น ถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้จุลินทรีย์อยู่ในสภาพเป็นฟิล์มจึงสามารถครະระยะเวลาที่เก็บชีวมวลในถังได้ โดยไม่ต้องกังวลกับปัญหาการหลุดออกนอกระบบ (Washout) ของชีวมวลออกจากระบบ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงขึ้น และใช้ระยเวลาสั้น ระบบมีความเสถียรสามารถฟื้นตัวได้เร็วเมื่อระบบ Shockload อีกทั้งยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าเชื้อที่แขวนลอย นอกจากนี้ฟิล์มชีวในระบบมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงถึง 1 กก.ซีโอดี/กก.VSS/วัน และมีประสิทธิภาพในการเจริญเป็น 0.1 กก.VSS/กก.ซีโอดี (Sastry และ Vickineswaty, 1995) ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์มชีวและปริมาณของจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง สำหรับการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของช่องว่าง (void) ของวัสดุตัวกลางมีความสำคัญมากกว่าปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ทั้งที่มีความเข้มข้นสูงและเจือจาง ตั้งแต่ 4,000-130,000 มก.ซีโอดี/ลิตร ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุตัวกลาง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรอุณหภูมิ และการกวนผสมของของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นกับจำนวนจุลินทรีย์ที่คงอยู่ในถังปฏิกรณ์และชนิดของน้ำเสีย (Van den Berg และคณะ, 1985; Lo และคณะ, 1984) ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีประสิทธิภาพสูงและสามารถรับภาระการเติมสารอินทรีย์ที่สูง โดยใช้ HRT ที่สั้นกว่า จึงใช้ขนาดถังปฏิกรณ์ที่เล็กลงได้

ถาวร รัตติวิพาณิช และ วิชิต สงคศิริ (2008) ศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ ชนิด upflow reactor ขนาด 6,000 m<sup>3</sup> พบว่า ที่อัตราการป้อนน้ำเสียเข้า 1,200 m<sup>3</sup>/d อันเป็นสภาวะที่โรงงานเดินการผลิตเต็มกำลัง น้ำเสียเข้าเกิดการไหลลัดวงจรออกจากถังปฏิกรณ์

ภาวิณี ชัยประเสริฐ และคณะ (2003) ศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวกลางเชือกไนลอน ภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ ที่ระดับ 11 22 และ 33 kg/m<sup>3</sup> พบว่าที่ความหนาแน่นของตัวกลางสูงสุดให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุด แต่ที่ระดับความหนาแน่นของตัวกลาง 22 kg/m<sup>3</sup> ให้เสถียรภาพการบำบัดในระยะยาวได้ดีที่สุด เนื่องจากเกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของฟิล์มชีวะน้อย และสารอาหารสามารถแพร่เข้าไปสู่เชื้อชั้นในของฟิล์มได้ดีที่สุด

Smith L. C. et. al. (1996) ศึกษาความหนาแน่นของตัวกลางที่มีผลต่อรูปแบบการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการและขนาดนำร่องพบว่า การใช้ความหนาแน่นของตัวกลางต่ำๆ ให้รูปแบบการกวนผสมที่ดีกว่า แต่การใช้ตัวกลางความหนาแน่นต่ำๆ นั้น จำเป็นต้องใช้ความเร็วขาขึ้นของน้ำเสียดำด้วยเช่นกัน เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ไหลออกนอกระบบ

Chung และ Choi (1993) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกิจกรรมของจุลินทรีย์และประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมระหว่างแบบที่มีตัวกรองกับแบบตะกอนลอย ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นสุรา ซึ่งมีสัดส่วนความสูงของวัสดุตัวกลางต่อความสูงของถังปฏิกรณ์เป็น 1 : 2 และ 1 : 7 กับถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรอง โดยมีวัสดุตัวกลางเป็นพลาสติก การตรวจสอบกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ทำโดยการวัดค่า ATP (Adenosine triphosphate) และ DHA (Dehydrogenase activity) พบว่า ถังปฏิกรณ์ที่มีสัดส่วนความสูงวัสดุตัวกลางต่อความสูงของถังปฏิกรณ์เป็น 1 : 7 มีความสามารถในการกักชีวมวลได้ไม่แพ้ที่อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ที่สูง ส่วนในถังปฏิกรณ์แบบ

ลูกผสมที่มีสัดส่วนของวัสดุตัวกลางเป็น 1 : 2 ของความสูงถังปฏิกรณ์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรอง และเมื่อเปรียบเทียบกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์พบว่า ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมมีกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์เท่ากับจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรองหรือบางครั้งอาจสูงกว่า และถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมนี้ยังหลีกเลี่ยงปัญหาการอุดตันและการไหลล้นดวงจรที่เกิดกับถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรองได้ แต่ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมนี้ต้องการความระมัดระวังในการควบคุมมากกว่าถังปฏิกรณ์แบบที่มีตัวกรอง เนื่องจากระบบที่มีวัสดุตัวกลางภายในถังที่คอยกักเก็บจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบน้อยกว่า จึงเกิดสภาวะ Shock loading หรือ Overloading ได้ง่าย

### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ผลิตจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอาศัยกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ซึ่งปฏิกิริยาของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนได้แก่



### ถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

การพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพประสิทธิภาพสูง (High Rate Anaerobic Reactor - HRAR) อาศัยหลักการพื้นฐานของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีการรักษาเซลล์จุลินทรีย์ให้คงอยู่ในถังปฏิกรณ์มากที่สุด เพื่อให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างรวดเร็วและผลิตก๊าซได้มาก โดยใช้หลักการตรึงเซลล์บนหรือรอบๆ วัสดุรองรับ หรือบนพื้นผิววัสดุยึดเกาะหรือวัสดุตัวกลาง (Inert materials) หรือทำให้จุลินทรีย์เกาะกันเป็นก้อน เพื่อเพิ่มความสามารถในการตกตะกอน ส่งผลให้จุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกรณ์ได้นาน (Albagnac, 1990) ข้อดีของการใช้ถังปฏิกรณ์เหล่านี้คือ สามารถกักจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ไว้ได้เป็นจำนวนมากและเป็นระยะเวลานาน ทำให้ระบบทำงานได้ที่ระยะเวลาการกักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time – HRT) ต่ำ สามารถรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ได้สูง ทนต่อสภาวะ Organic shockloads ได้ดี อีกทั้งเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายและป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียจุลินทรีย์ในขณะที่ระบบเกิดการ Overloading ทำให้ช่วยลดขนาดของถังปฏิกรณ์และราคาลงทุน ตลอดจนได้ระบบที่มีเสถียรภาพดี รูปแบบหลักของถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย มีดังนี้

- **ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor - AFFR)**

ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์มีวัสดุ เช่น คาข่ายไนลอน เชือก เพื่อใช้ตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์อยู่ภายในระบบบำบัดในปริมาณที่มากที่สุดและระยะเวลานาน ทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง ถังปฏิกรณ์แบบที่ใช้ตัวกรองเพื่อกักชีวมวลในระบบนี้ เริ่มแรกถูกนำมาใช้ในการบำบัดของเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ โดย Coulter และคณะ (Coulter และคณะ, 1957) ต่อมา Young และ McCarty (1962) ได้

ทำการศึกษาและพัฒนาเรื่อยมา จากงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เจือจางและเข้มข้นได้ จึงเป็นสิ่งจูงใจที่ทำให้มีการพัฒนาถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้บางครั้งเรียก Anaerobic Fixed Film Reactor (AFFR) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการบรรจุวัสดุตัวกลางในถึงปฏิกรณ์แบบตัวกรอง (Anaerobic filter) การบรรจุเป็นแบบสุ่ม จุลินทรีย์อยู่ในลักษณะที่เหมือนกับตัวกรอง โดยมีทั้งจุลินทรีย์ที่จับบนผิววัสดุ และที่ถูกล็อกอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง ส่วนในถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์ม จุลินทรีย์ วัสดุตัวกลางถูกวางอย่างเป็นระเบียบ เช่น เป็นท่อ หรือเป็นแผ่นขนานกันไป จุลินทรีย์จับอยู่เฉพาะบนผิววัสดุเท่านั้น ถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้จุลินทรีย์อยู่ในสภาพเป็นฟิล์มจึงสามารถลดระยะเวลาที่เก็บชีวมวลในถึงได้ โดยไม่ต้องกังวลกับปัญหาการหลุดออกนอกระบบ (Washout) ของชีวมวลออกจากระบบ ทำให้ระบบมีขนาดเล็กลง เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูงขึ้น และใช้เวลาน้อย ระบบมีความเสถียรสามารถฟื้นตัวได้เร็วเมื่อระบบ Shockload อีกทั้งยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าเชื้อที่แขวนลอย นอกจากนี้ฟิล์มชีวในระบบมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์สูงถึง 1 กก.ซีโอดี/กก.VSS/วัน และมีประสิทธิภาพในการเจริญเป็น 0.1 กก.VSS/กก.ซีโอดี (Sastry และ Vickineswaty, 1995) ประสิทธิภาพของถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟิล์มชีว และปริมาณของจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลาง สำหรับการทำงานของถึงปฏิกรณ์แบบนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของช่องว่าง (void) ของวัสดุตัวกลางมีความสำคัญมากกว่าปริมาณพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้หลายประเภท ทั้งที่มีความเข้มข้นสูงและเจือจาง ตั้งแต่ 4,000-130,000 มก.ซีโอดี/ลิตร ประสิทธิภาพของถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุตัวกลาง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตร อุณหภูมิ และการกวนผสมของของเหลวภายในถึงปฏิกรณ์ อัตราการป้อนสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ขึ้นกับจำนวนจุลินทรีย์ที่คงอยู่ในถึงปฏิกรณ์และชนิดของน้ำเสีย (Van den Berg และคณะ, 1985; Lo และคณะ, 1984) ถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มมีประสิทธิภาพสูงและสามารถรับภาระการเติมสารอินทรีย์ที่สูง โดยใช้ HRT ที่สั้นกว่า จึงใช้ขนาดถึงปฏิกรณ์ที่เล็กลงได้

- **ถึงปฏิกรณ์แบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)**

จากการที่ถึงปฏิกรณ์แบบมีตัวกรองต้องมีวัสดุตัวกลางอยู่ในถึง ทำให้ถึงปฏิกรณ์ต้องสูญเสียปริมาตรใช้งานและเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุตัวกลางเป็นจำนวนมาก Lettinga และคณะ (1980) จึงได้คิดค้นถึงปฏิกรณ์แบบ UASB ขึ้นในปี 1970 และได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ หลักการของถึงปฏิกรณ์ชนิดนี้คือให้จุลินทรีย์มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Floc) หรือ กรานูล (Granule) เพื่อเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนของจุลินทรีย์ ป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์หลุดออกจากระบบได้ง่าย และเมื่อน้ำเสียไหลเข้าถึงปฏิกรณ์ก็จะทำให้เม็ดตะกอนลอยตัวอยู่เป็นชั้นตะกอน (Sludge) ที่ไม่จม ระบบนี้ไม่ต้องใส่วัสดุตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะยึด ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุตัวกลางลง ตะกอนของจุลินทรีย์ในถึงชนิดนี้ประกอบไปด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์หลายชนิดรวมกันคล้ายฟิล์มชีวในถึงปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์ม (Dolfing และคณะ, 1985) ก้อน Floc หรือกรานูลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-4 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติในการตกตะกอนที่ดีมาก จึงมีส่วนช่วยให้จุลินทรีย์ถูกล็อกกันอยู่ในถึงปฏิกรณ์ได้เป็นเวลานาน

การออกแบบถึงปฏิกรณ์แบบ UASB หรือแบบตะกอนลอยนั้น ประกอบด้วยบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาและบริเวณที่ตกตะกอน ในบริเวณที่ตกตะกอน สารประกอบอินทรีย์ในน้ำทิ้งขาเข้าจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและ

คาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่ไหลผ่านชั้นของตะกอน ก๊าซที่เกิดขึ้นจะเกาะกับตะกอนและพาตะกอนลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ และทางด้านบนนี้ได้ติดตั้งหน่วยตกตะกอน (Settling unit) ไว้เพื่อทำหน้าที่ดักจับกรานูลที่อาจหลุดออกไปได้ เพื่อป้องกันการหลุดออกนอกระบบของชีวมวล และเป็นตัวแยกและปล่อยก๊าซออกจากถังปฏิกรณ์ ทำให้ตะกอนสามารถตกลงกลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์ (Lettinga และ Pol, 1986) ระบบนี้เป็นการแยกระหว่างระยะเวลาในการกักเก็บของแข็ง (Solid Retention Time - SRT) และระยะเวลาในการกักเก็บของเหลว (HRT) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Dolfing, 1986) ข้อจำกัดของการใช้กระบวนการ UASB คือการสร้างชั้นตะกอน และน้ำเสียที่จะถูกบำบัดโดยกระบวนการนี้ไม่ควรมีอนุภาคแขวนลอยสูง เพราะถ้าเกิดการตกตะกอนของอนุภาคเหล่านี้ในชั้น Sludge bed ทำให้ Sludge สูญเสียกิจกรรมได้ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของ UASB คือ แม้ว่าจะมีการใส่เชื้อตั้งต้น (Seed) ระยะเวลาที่ต้องการในช่วงเริ่มต้นระบบนานถึง 4 ถึง 8 สัปดาห์ การเกิดการชะล้างของตะกอนชีวมวล ตั้งแต่ในช่วงแรกของการบำบัด มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทำให้ปริมาตรของตะกอนชีวมวลลดลง ส่งผลให้เกิดก๊าซหุดชะงัก ดังนั้นในช่วงของการเริ่มต้นระบบจึงจำเป็นต้องเติมเชื้อตั้งต้นลงไปและใช้ระยะเวลาที่กักเก็บนาน รวมทั้งค่อยๆเพิ่มภาระการเติมสารอินทรีย์ อีกทั้งเชื้อตั้งต้นที่ใส่เข้าไปต้องมีการทำให้เป็นกรานูลก่อน

- **ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม (Anaerobic Hybrid Reactor)**

ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม (Anaerobic Hybrid Reactor - AHR) เป็นถังปฏิกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากถังปฏิกรณ์แบบ UASB ซึ่งในช่วงแรกได้มีการพัฒนาถังปฏิกรณ์แบบ UASB โดยการใส่วัสดุตัวกลางเข้าไปในถังปฏิกรณ์ทางด้านบนก่อนที่จะถึงส่วน Gas-solid-liquid separation เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บชีวมวลให้ดีขึ้น (Sheehan, 1981) ต่อมาจึงเอาอุปกรณ์ส่วน Gas-solid-liquid separation ออกเหลือแต่วัสดุตัวกลางที่อยู่ทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ จึงพัฒนามาเป็นถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมระหว่างระบบ UASB กับระบบ Anaerobic filter ซึ่งจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ชนิดนี้มีทั้งส่วนที่แขวนลอยซึ่งอยู่ทางด้านล่างและส่วนที่เกาะอยู่บนวัสดุตัวกลางซึ่งอยู่ทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ แต่ตะกอนชีวมวลส่วนที่แขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์ บางครั้งไม่ได้มีการรวมตัวกันเป็นกรานูล (Granule) เพียงแต่อยู่ในสภาพเป็นกลุ่มก้อนแขวนลอยอยู่ภายในถังปฏิกรณ์เท่านั้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมนี้เป็นการรวมกันระหว่างถังปฏิกรณ์แบบ Sludge bed กับแบบมีตัวกรอง ถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยนำข้อดีของถังปฏิกรณ์ที่มีวัสดุตัวกลางและไม่มีวัสดุตัวกลางมารวมกัน เพื่อลดข้อจำกัดต่างๆของถังปฏิกรณ์เหล่านี้ ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้น

### **การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics – CFD)**

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) เป็นการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การไหลของความร้อนและการถ่ายเทความร้อน รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการคำนวณสภาวะลักษณะการไหลทำได้โดยการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เป็นหลัก ขั้นตอนการทำงานของ การคำนวณพลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบันการคำนวณพลศาสตร์ของไหลใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขและจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้



ก) ขั้นก่อนการประมวลผล (Pre-processor)

ในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดลักษณะรูปร่างของปัญหา สร้างกริด (Grid) หรือปริมาตรควบคุม คุณสมบัติของของไหลและการไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับจุดต่อที่อยู่ติดกับขอบเขตของปัญหา ในการป้อนข้อมูลเพื่อการคำนวณต้องคำนึงถึง การสร้างจำนวนจุดต่อที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องของคำตอบของปัญหาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และใช้เวลาในการคำนวณที่ไม่ยาวนานเกินไป

ข) ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)

ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหล มีวิธีดังนี้

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Methods) เป็นวิธีการหาค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่างๆ บนเส้นกริดทอมของสมการการไหลที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์บางส่วน (Partial Differential Equation – PDE) ถูกกระจายโดยใช้อนุกรมเทเลอร์ (Taylor's Series) ให้อยู่ในรูปของผลต่างโดยประมาณบนจุดต่อ ซึ่งส่งผลให้สมการของระบบอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยบางส่วนกลายเป็นสมการผลต่าง (Difference Equation) ของตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อต่างๆ

วิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการแบ่งปัญหาออกเป็น ส่วน (element) ที่มีขนาดต่างกัน โดยสร้างสมการสำหรับแต่ละส่วนที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่ เมื่อทำการประยุกต์ปัญหาเข้ากับเงื่อนไข จะได้คำตอบโดยประมาณของค่าที่ต้องการที่ตำแหน่งจุดต่อ ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถประยุกต์เข้ากับปัญหาซับซ้อนได้

วิธีสเปกตรัล (Spectral Method) เป็นวิธีการหาค่าเฉลยโดยประมาณ โดยใช้พื้นฐานของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Transform) ซึ่งต่างจากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ให้ค่าเฉลยที่จุดต่อ วิธีสเปกตรัลให้ค่าเฉลยตลอดทั้งโดเมนของปัญหา

วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม มีกระบวนการในการหาคำตอบ โดยการอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมซึ่งเป็นขั้นพื้นฐานของการพิจารณากฎการอนุรักษ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมนั้น หลังจากนั้น เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการผลต่าง และหาค่าเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ โดยวิธีการทำซ้ำ

ค) ขั้นตอนการแสดงผล (Post-Processor)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับ CFD ซึ่งการแสดงผลนั้นสามารถออกมาในรูปแบบกราฟเวกเตอร์ (vector) คอนทัวร์ (contour) กราฟพื้นผิวใน 2 หรือ 3 มิติ หรือการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนไหว การหมุน

### การคำนวณพลศาสตร์ของไหลกับการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลมีสมการหลักของการไหลในแบบอนุพันธ์ ที่อยู่บนสมมติฐานของไหลนิวโทเนียน ซึ่งเป็นการไหลที่ขึ้นกับเวลาและมีการถ่ายเทพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ตารางที่ 2 แสดงสมการหลักของการไหล

ตารางที่ 1 สมการหลักของการไหลแบบอนุพันธ์

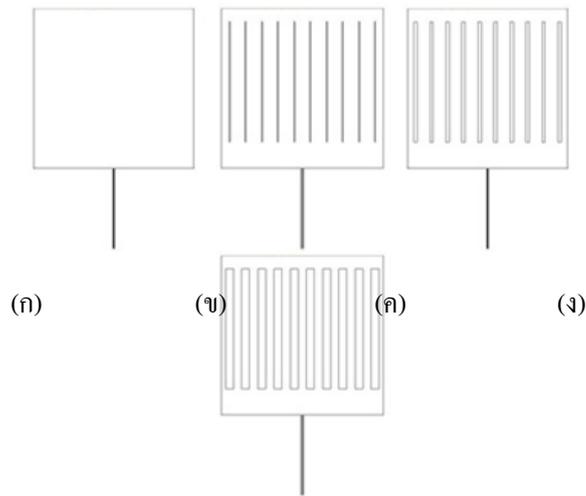
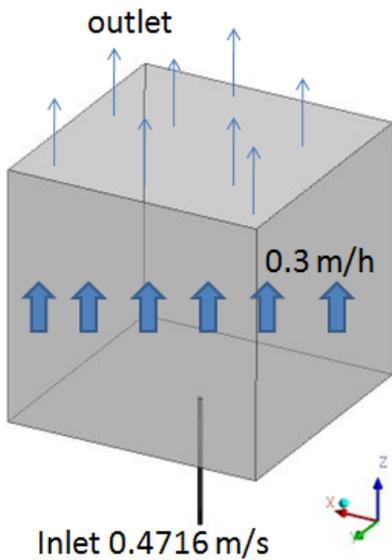
มวล	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0$
โมเมนตัมทิศทาง x	$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx}$
โมเมนตัมทิศทาง y	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My}$
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

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### การศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ

เพื่อศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมถูกติดตั้งด้วยแผ่นตัวกลางจำนวนมาก ทำให้แบบจำลองการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ขนาดโรงงานอุตสาหกรรมต้องอาศัยระยะเวลาการคำนวณนานมาก เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองการศึกษาจึงเลือกใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการที่มีความจุ 8 ลิตร (ดังรูปที่ 1) ซึ่งช่วยร่นระยะเวลาการคำนวณ อีกทั้งช่วยให้การศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำทำได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



**รูปที่ 1** แบบจำลองถังปฏิกรณ์ชนิด upflow ขนาด 8 ลิตร ใช้ในการศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่ระดับต่างๆ ดังนี้ ก) ไม่มีตัวกลาง ข) เมื่อตัวกลางหนา 0.5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง 1/6 ของความสูงถังปฏิกรณ์ ค) เมื่อตัวกลางหนา 2 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง 1/6 ง) เมื่อตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง 1/6

แบบจำลองถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการที่ใช้ศึกษามีขนาด 20 cm x 20 cm x 20 cm ทางน้ำขาเข้าบริเวณก้นถังปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ยาว 10 cm น้ำจะถูกป้อนเข้าในแนวแกนของถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราเร็ว 0.4716 m/s เพื่อสร้างความเร็วการไหลขึ้นภายในถังเท่ากับ 0.3 m/h อันเป็นความเร็วการไหลขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในอุตสาหกรรม จากนั้นจึงล้นออกที่ด้านบนของถัง ตัวกลางภายในถังถูกติดตั้งด้วยระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 2 cm คุณสมบัติของของไหลคือน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ขอบเขตทางน้ำเข้ากำหนดเป็น Velocity Inlet ที่มีความเร็วเท่ากับ 0.4716 m/s ทางน้ำขาออกด้านบนของถังปฏิกรณ์กำหนดเป็น Outlet ส่วนในแบบจำลองกำหนดเป็น No Slip Condition เพื่อรวมผลของ Fluid Film ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำบริเวณใกล้ผนัง ใช้สมการจำลองการไหลชนิด Laminar เนื่องจากความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์มีความเร็วในช่วง Laminar Flow และทำการจำลองการไหลของน้ำที่สถานะ Steady State การคำนวณจะถูกดำเนินไปจนกว่าคำตอบไม่มีความแตกต่างกับคำตอบที่ได้จากการคำนวณรอบก่อนหน้าที่ที่สนิยตำแหน่งที่ 4 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองและสมการที่ใช้คำนวณดังแสดงในตารางที่ 2

เนื่องจากแบบจำลองมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นแบบจำลองจึงถูกแบ่ง mesh โดยใช้ hexahedral mesh shape ที่ความละเอียด 1,412,044 mesh สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีติดตั้งตัวกลาง และ 1,726,651 1,529,316 และ 1,110,762 สำหรับแบบจำลองที่มีการติดตั้งตัวกลางหนา 0.5 2 และ 5 mm ตามลำดับ

ผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ถูกศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง และกรณีที่ติดตั้งตัวกลางหนา 0.5 2 และ 5 mm

**ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processing จำลองการไหลแบบหนึ่งภูมิภาค ของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ชนิด Upflow ขนาดห้องปฏิบัติการ**

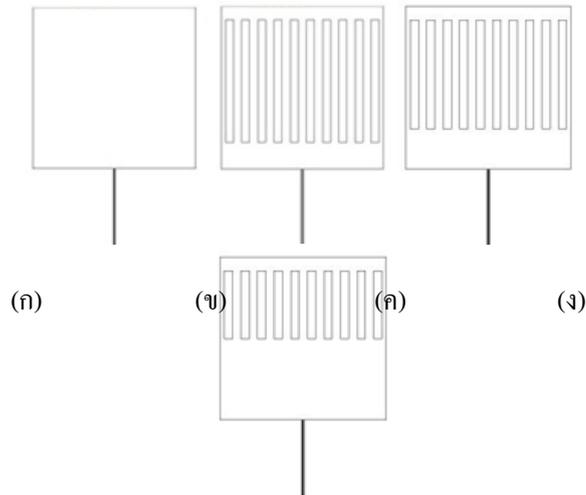
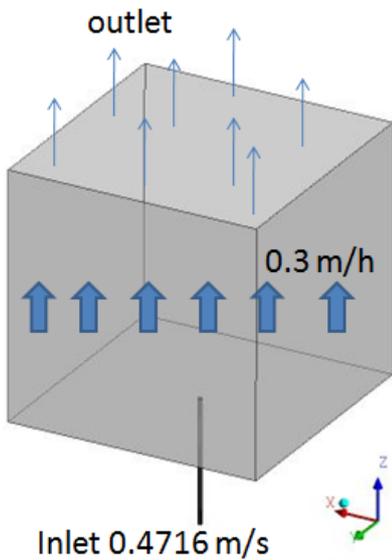
ตัวแปรในการออกแบบ	รายละเอียด	หมายเหตุ
Liquid phase	Water	Continuous phase
Inlet	Inlet	Velocity Inlet (0.4176 m/s)
Outlet	Outlet	Outlet
Wall	Wall	No slip condition
Turbulent model	Water	Laminar
Analysis type	Steady state	
Solver control	Advection scheme	High resolution
	Convergence criteria	RMS = $1 \times 10^{-4}$

**การศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ**

เนื่องจากการติดตั้งตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรม ขอบด้านล่างของตัวกลางอยู่สูงจากก้นถังประมาณ 1 เมตร ซึ่งถือเป็นอัตราส่วน 1/6 ของความสูงของปริมาตรใช้งานของถัง ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางรูปแบบดังกล่าว การศึกษาจะถูกระทำภายในแบบจำลองถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการด้วยเหตุผลดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ตัวกลางที่ใช้ในแบบจำลองถูกกำหนดให้มีความหนา 5 mm ซึ่งเป็นความหนาของฟิล์มสูงสุดที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ K.-Y. SHOW และ J.-H. TAY (1998) ผลการจำลองรูปแบบการไหลของน้ำที่ได้ จะถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง และสภาวะที่ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถัง 1/6 1/4 และ 1/2 ของความสูงปริมาตรใช้งาน (ดังรูปที่ 2)

ค่าและชนิดของขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาผลของความสูงของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ ถูกกำหนดเหมือนกับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาผลของความหนาของตัวกลาง (ดังแสดงในตารางที่ 2)

เนื่องจากแบบจำลองมีรูปร่างเป็นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นแบบจำลองถูกแบ่ง mesh โดยใช้ hexahedral mesh shape ที่ความละเอียด 1,412,044 1,110,762 1,377,542 และ 1,523,538 สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง และแบบจำลองที่มีการติดตั้งตัวกลางสูง 1/6 1/4 และ 1/2 ตามลำดับ

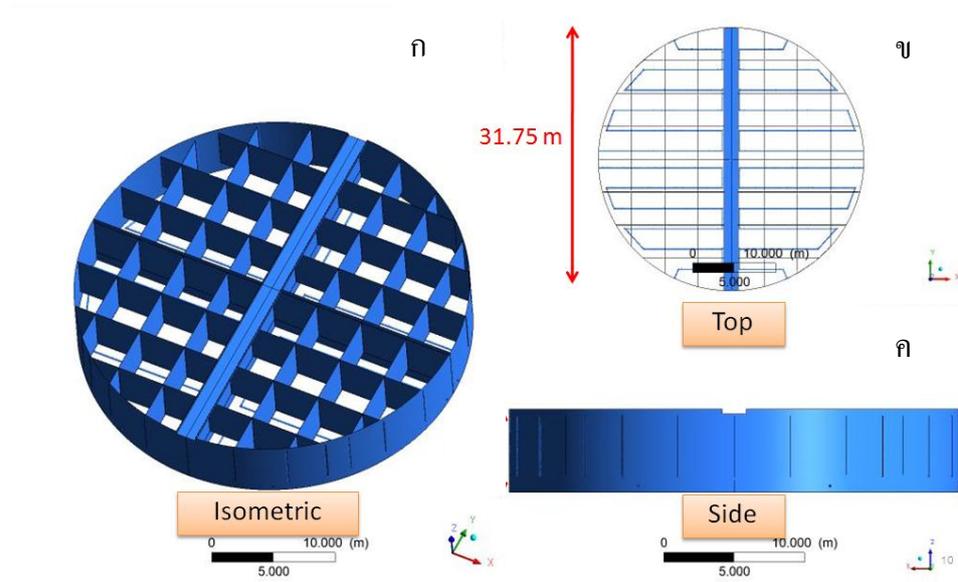


**รูปที่ 2** แบบจำลองถังปฏิกรณ์ชนิด upflow ขนาด 8 ลิตร ใช้ในการศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่ระดับต่างๆ ดังนี้ ก) ไม่มีตัวกลาง ข) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/6 ของความสูงถังปฏิกรณ์ ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร ค) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/4 ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร และ ง) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/2 ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร

**ศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม**

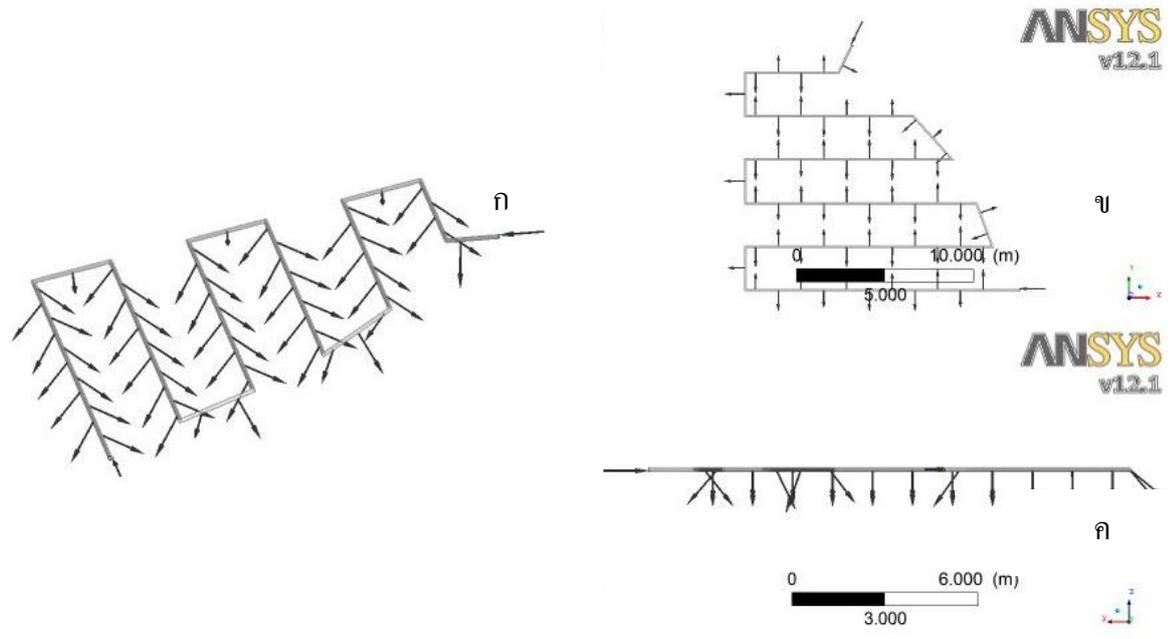
หลังจากการศึกษาค้นคว้าการติดตั้งตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวกลางและวัฏภาคของน้ำ ปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจะถูกนำมาศึกษาในระบบการไหลแบบสามวัฏภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รูปแบบการไหลที่จำลองขึ้นภายในถังปฏิกรณ์จะสามารถนำมาวิเคราะห์ถึงข้อเด่นและข้อด้อยของการออกแบบ อันจะนำไปสู่การหาแนวทางการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในแง่การกระจายตัวของเม็ดตะกอน

ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ศึกษาเป็นถังปฏิกรณ์ชนิดครึ่งฟิล์ม ความจุสูงสุดของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 6,000 m<sup>3</sup> ตัวกลางหรือตาข่ายไนลอนถูกติดตั้งตามแนวการวางตัวของคาน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์ม ก) มุมมอง isometric ข) มุมมองจากด้านบน และ ค) มุมมองจากด้านข้างถังปฏิกรณ์

ทางน้ำขาเข้าของถังปฏิกรณ์ ถัง กั้นถึงมีลักษณะเป็นท่อกระจาย แต่ละถังมีท่อกระจายน้ำเสียขาเข้าจำนวน 4 ท่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าจากปลายทั้งสองด้าน ตลอดความยาวของเส้นท่อถูกเจาะเพื่อกระจายน้ำเสียขาเข้า ทิศทางการกระจายน้ำทำมุม  $45^\circ$  กับแนวดิ่งดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองท่อกระจายน้ำภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์ม ก) มุมมอง isometric ข) มุมมองจากด้านบน และ ค) มุมมองจากด้านข้างถังปฏิกรณ์

การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามมิติภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรม กระทำเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลางและหลังจากที่มีการติดตั้งตัวกลาง

ค่าและชนิดของขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ศึกษารูปแบบการไหลแบบสามมิติภายในถังปฏิกรณ์ขนาดโรงงานอุตสาหกรรม ถูกแสดงในตารางที่ 2 แบบจำลองของถังปฏิกรณ์ถูกแบ่ง mesh โดยใช้ tetrahedral mesh shape ที่ความละเอียด 4,463,320 และ 5,918,123 mesh สำหรับแบบจำลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง และแบบจำลองที่มีการติดตั้งตัวกลางตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการ Pre-processor จำลองการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ ขนาดโรงงานอุตสาหกรรม

ตัวแปรในการออกแบบ	รายละเอียด	หมายเหตุ
Liquid phase	Water	Continuous phase
Solid phase	Granule	Dispersed solid
		2 mm of diameter
		1,136.16 kg/m <sup>3</sup> 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 x 10 <sup>-4</sup>

## สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือเก็บข้อมูล

สถานที่ทำการวิจัย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงาน  
ต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## ผลการดำเนินงานวิจัย

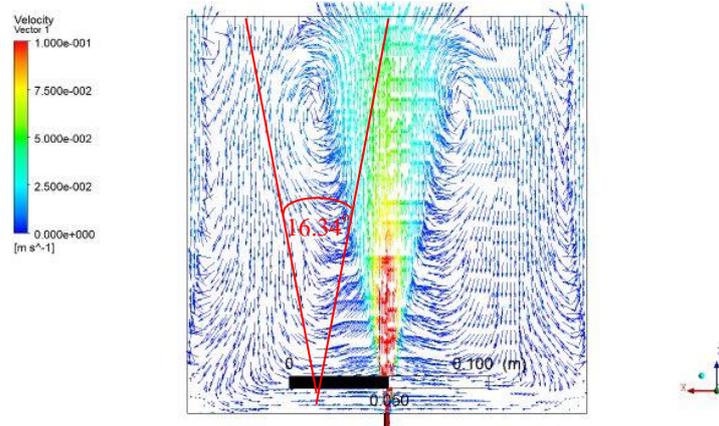
### การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลกับผลการทดลอง (Model Validation)

ผลการจำลองการไหลภายในถังปฏิกรณ์ชนิดไหลขึ้นขนาดห้องปฏิบัติการ เนื่องจากรูปแบบการไหลที่พบมีลักษณะเป็น jet flow (รูปที่ 5) ดังนั้นผลการจำลองที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Donald and Singer (1959) ที่ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลแบบ jet flow ระหว่างของเหลว 2 ชนิด โดยทำการฉีดของเหลวชนิดหนึ่งผ่านเข้าสู่ถังที่ซึ่งมีของเหลวชนิดที่สองอยู่ภายใน จากนั้นทำการวัดองศาการบานออกของลำ jet ทำให้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างองศาการบานออกของลำ jet กับคุณสมบัติของของไหลได้ดังนี้

$$\tan\left(\frac{\theta_j}{2}\right) = 0.238\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{0.133}$$

โดยที่  $\theta_j$  คือ มุมการลำ jet และ  $\mu$  คือ ความหนืดของของไหล และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของของไหล

เมื่อทำการเปรียบเทียบมุมของลำ jet ที่ได้จากการจำลองการไหลกับสมการของ Donald and Singer พบว่า มุมของลำ jet มีค่า  $16.34^\circ$  และ  $16.09^\circ$  ตามลำดับ หรือคิดได้เป็น 98.47%-similarity



รูปที่ 5 มุมการกระจายตัวของ jet flow ภายในถังปฏิกรณ์จำลองชนิดไหลขึ้น เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง

### การศึกษาผลของความหนาแน่นของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 6 แสดงทิศทางและความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลอง ขนาดห้องปฏิบัติการ ขณะที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง (รูปที่ 6 (ก)) รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็น jet flow กล่าวคือ น้ำที่มีความเร็วการไหลสูงจะกระจุกตัวหนาแน่นบริเวณทางน้ำเข้า จากนั้นลำการไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงนั้นจะกระจายตัวออกด้านข้างพร้อมๆ กับความเร็วการไหลที่ลดลงตามระยะห่างจากจุดกระจายน้ำ ปรากฏการณ์ที่ลำการไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงกระจายตัวออกในแนวรัศมีเกิดจากผลของแรงเสียดทานที่น้ำภายในลำ jet กระทำกับน้ำโดยรอบ และเมื่อลำการไหลแบบ jet ขึ้นถึงบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ น้ำบางส่วนจะไหลส้นออกจากถังขณะที่น้ำส่วนใหญ่จะม้วนตัวตกกลับลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ บริเวณที่น้ำเกิดการม้วนตัวเรียกว่า wake น้ำที่ม้วนตัวกลับลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์จะเผชิญกับอิทธิพลของความดันที่ต่างกันระหว่างความดันภายในลำ jet ที่น้อยกว่าความดันโดยรอบ ผลต่างความดันที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานกลภายในของไหลที่อธิบายได้ด้วยสมการของ Bernoulli (McCabe W. L., 1993)

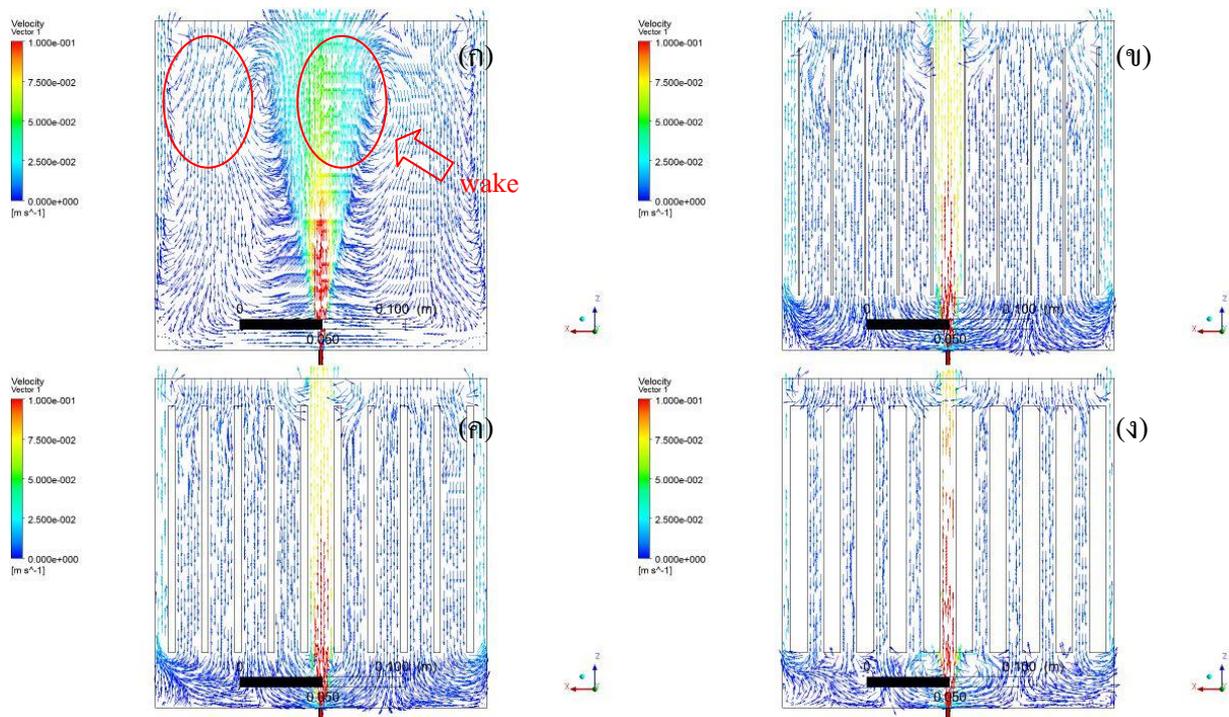
$$e = \frac{u^2}{2} + g_z z + \frac{P}{\rho_f}$$

โดยที่เทอมของ  $e$  ด้านซ้ายมือคือพลังงานกล (Mechanical energy) และอีกสามเทอมด้านขวามือคือ พลังงานจลน์ (kinetic energy) พลังงานศักย์ (potential energy) และความดัน (pressure) ตามลำดับ

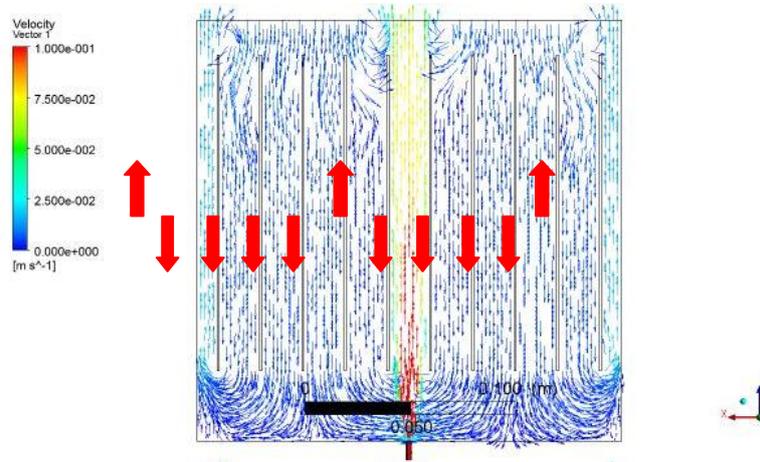
การที่น้ำ ณ บริเวณทางน้ำเข้ามีความเร็วสูง ทำให้พลังงานจลน์บริเวณดังกล่าวมีค่าสูงตาม นั้นเป็นสาเหตุให้ความดันภายในลำ jet มีค่าต่ำ ซึ่งต่างจากพลังงานกลของน้ำที่อยู่รอบลำ jet ที่มีความเร็วการไหลต่ำ ความดันของน้ำบริเวณโดยรอบลำ jet จึงสูงกว่า และด้วยผลต่างความดันนี้เอง น้ำโดยรอบลำ jet จึงถูกดันน้ำสู่ลำ jet อย่างรุนแรงที่บริเวณก้นถังปฏิกรณ์ หรือบริเวณที่ลำของ jet มีความเร็วการไหลสูงสุด จากนั้นการแทรกตัวของน้ำรอบลำ jet จะลดความรุนแรงลงตามระยะห่างจากทางน้ำเข้า เพราะผลต่างความดันมีค่าลดลง ปรากฏการณ์การเกิด wake และการแทรกตัวของน้ำโดยรอบเข้าสู่ลำ jet นี้ เรียกว่าการกวนผสมแบบ jet mixing อันเป็นปรากฏการณ์ที่ช่วยให้เกิดการกวนผสมระหว่างน้ำขาเข้ากับน้ำที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์

อย่างไรก็ตามการที่เกิดรูปแบบการไหลแบบ jet flow นั้น นอกจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกวนผสม ยังอาจส่งผลเสียต่อถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดไหลขึ้น (Upflow anaerobic wastewater treatment reactor) เพราะถังปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ทางน้ำออกอยู่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ น้ำขาเข้าที่ถูกผลักดันขึ้นในแนวแกนของถังสามารถไหลลัดวงจร (short circuit) ได้โดยง่าย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ลดลง

รูปที่ 6 (ข) ถึง รูปที่ 6 (ง) แสดงผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการ เมื่อตัวกลางภายในถังหนา 0.5 mm (รูปที่ 6 (ข)) พบว่า กระแสการไหลแบบ jet เกิดขึ้นภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางที่อยู่เหนือทางน้ำเข้า รูปแบบการไหลนี้พบได้เช่นเดียว

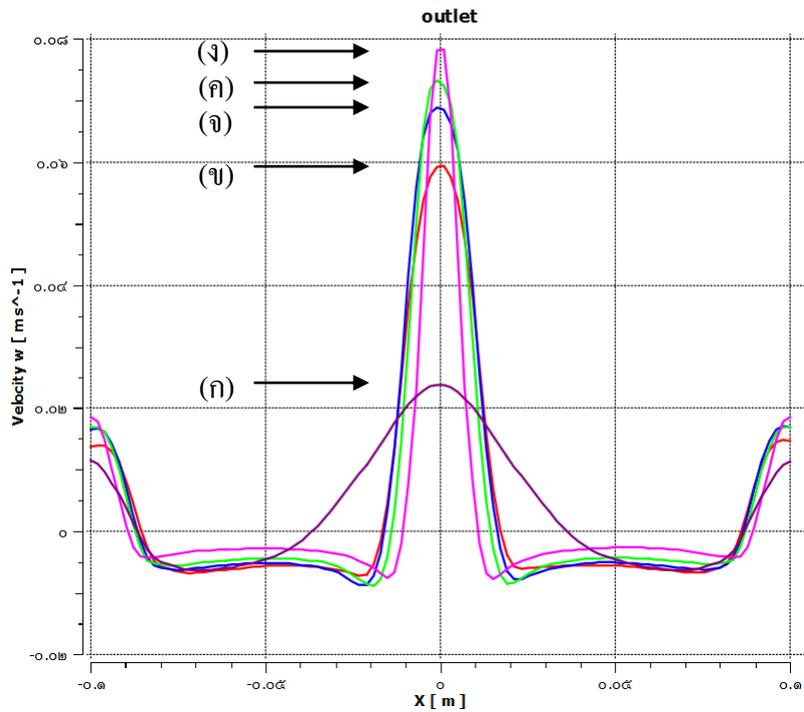


รูปที่ 6 เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองที่ระนาบ  $xz$  เมื่อ  $y=0$  เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ ก) ไม่มีตัวกลาง ข) เมื่อตัวกลางหนา 0.5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง  $1/6$  ของความสูงถังปฏิกรณ์ ค) เมื่อตัวกลางหนา 2 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง  $1/6$  ง) เมื่อตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถัง  $1/6$



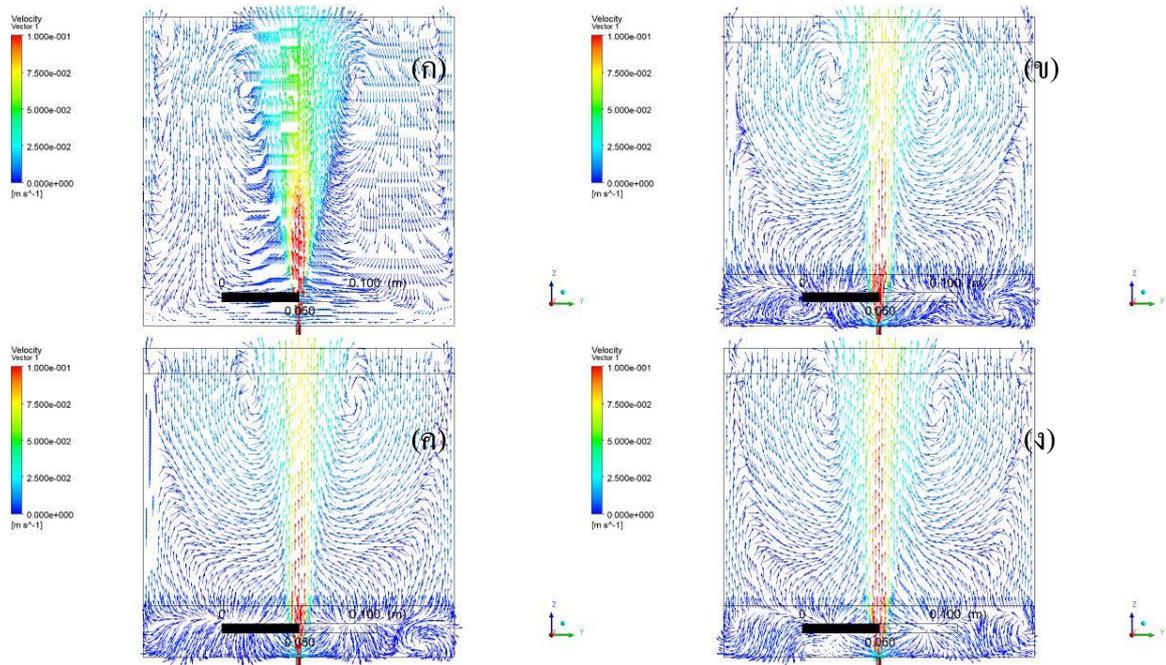
รูปที่ 7 รูปแบบการไหลของน้ำที่ถูกพบภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการที่ระนาบ  $xz$  เมื่อ  $y=0$  เมื่อตัวกลางมีความหนา 0.5, 2 และ 5 mm

ก้นในกรณีที่ตัวกลางมีความหนาเท่ากับ 2 และ 5 mm น้ำขาเข้าจะไหลเข้าสู่ช่องว่างระหว่างตัวกลางดังกล่าว และเมื่อถึงขอบด้านบนของตัวกลาง น้ำจะไหลม้วนกลับลงสู่ด้านล่างถึงผ่านทางช่องว่างถัดไป เมื่อพิจารณาความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกนตั้งภายในแต่ละช่องว่างระหว่างตัวกลาง (รูปที่ 8) จะเห็นว่า ความเร็วที่มีค่าเป็นบวกถูกพบภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางที่อยู่เหนือทางน้ำขาเข้า ที่ซึ่งความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกนตั้งมีค่าสูงสุด จากนั้นความเร็วการไหลจะมีค่าเป็นลบภายในช่องว่างที่อยู่ถัดไป นั่นแสดงให้เห็นว่าทิศทางการไหลของน้ำมีทิศทางไหลลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ และจะพบว่าความเร็วการไหลของน้ำมีค่าเป็นบวกอีกครั้งภายในช่องว่างที่อยู่ติดผนังถัง และเมื่อพิจารณาความเร็วการไหลของน้ำสูงสุดในช่องว่างระหว่างตัวกลางที่อยู่เหนือทางน้ำขาเข้า เปรียบเทียบเมื่อตัวกลางมีความหนาต่างกันพบว่า ความเร็ว  $u$  แกนกลางถึงมีค่าประมาณ 0.022 m/s เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง และมีค่า 0.059 0.066 และ 0.078 เมื่อตัวกลางมีความหนา 0.5 2 และ 5 mm ตามลำดับ เมื่อเทียบความแตกต่างความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกนตั้ง ระหว่างตัวกลางที่มีความหนา 0.5 mm และ 5 mm พบว่าความเร็วการไหลของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น 32.20%



รูปที่ 8 กราฟแสดงความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกน ณ ปากถังปฏิกรณ์ (ที่พิกัด (-0.1,0,0.2) ถึง (0.1,0,0.2)) โดยที่ ก) เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง ข) เมื่อตัวกลางหนา 0.5 mm ค) เมื่อตัวกลางหนา 2 mm ง) เมื่อตัวกลางหนา 5 mm จ) เมื่อตัวกลางหนา 1 mm

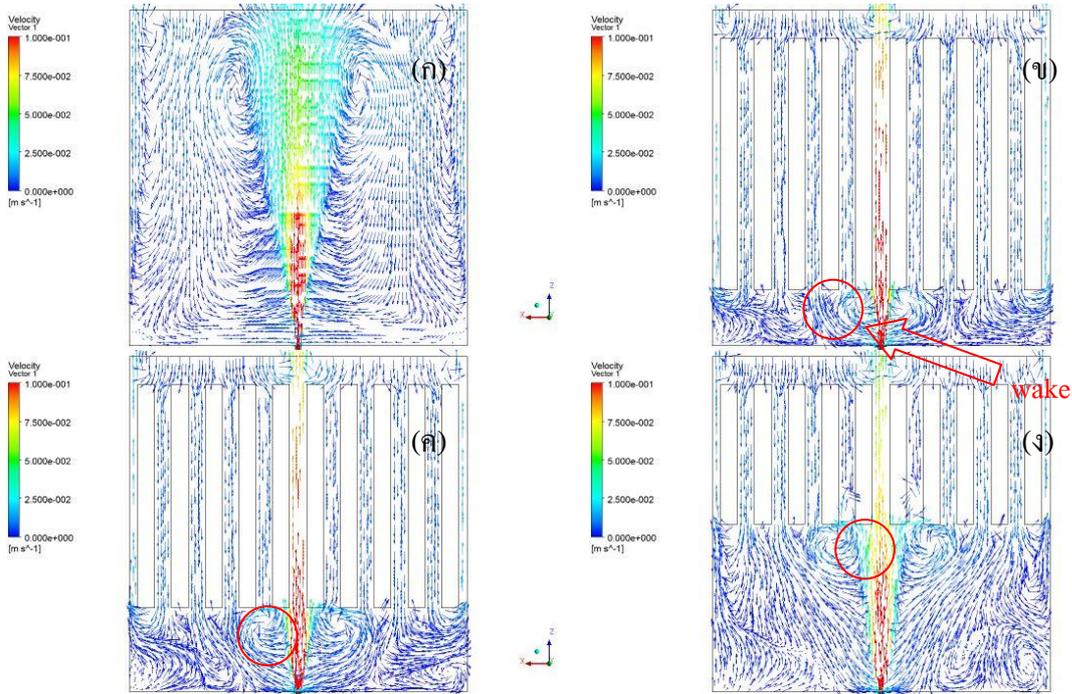
รูปที่ 9 แสดงทิศทางและความเร็วการไหลของน้ำภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางที่อยู่เหนือทางน้ำเข้า เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลางรูปแบบการไหลแบบ jet มีความสมมาตรเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลในระนาบ xz (รูปที่ 7) ขณะที่รูปแบบการไหลภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางที่มีความหนา 0.5 2 และ 5 mm มีความคล้ายคลึงกัน นั่นคือสามารถพบการเกิด wake ขนาดใหญ่ที่ปลายสุดของกระแสการไหลแบบ jet นอกจากนั้นยังพบการไหลแบบยุ่งเหยิง (chaotic flow) ภายใต้อบด้านล่างของตัวกลาง



**รูปที่ 9** เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองที่ระนาบ yz เมื่อ  $x=0$  เปรียบเทียบระหว่างสถานะที่ ก) ไม่มีตัวกลาง ข) เมื่อตัวกลางหนา 0.5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถังถึง 1/6 ของความสูงถังปฏิกรณ์ ค) เมื่อตัวกลางหนา 2 มิลลิเมตร สูงจากก้นถังถึง 1/6 ง) เมื่อตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร สูงจากก้นถังถึง 1/6

**การศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการ**

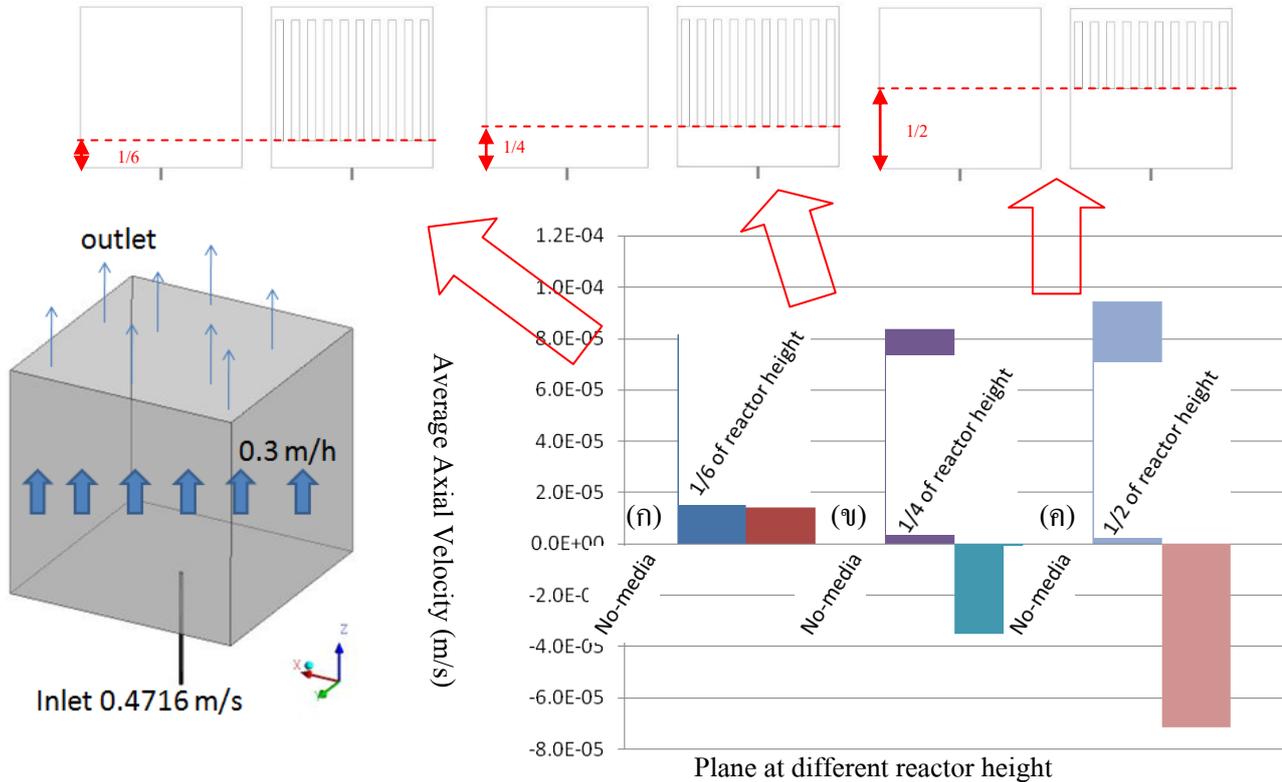
รูปที่ 10 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำเมื่อติดตั้งตัวกลางที่ระดับความสูงต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบการติดตั้งตัวกลางที่ความสูง 1/6 1/4 และ 1/2 ของความสูงถัง (รูปที่ 10 (ข) - (ง)) ขนาดของ wake ที่เกิดมีความสัมพันธ์กับระดับความสูงของตัวกลาง ซึ่งจะเห็นว่า wake ที่พบเมื่อติดตั้งตัวกลางสูง 1/6 ของความสูงถังมีขนาดเล็กที่สุด และจะพบการเกิด wake ได้อย่างชัดเจนเมื่อติดตั้งตัวกลางที่ระดับความสูง 1/2 ของถัง การเกิด wake ภายใต้อบด้านล่างของตัวกลางเป็นเครื่องบ่งชี้ว่า น้ำเสียขาเข้าเกิดการไหลวนกลับลงสู่ด้านล่างเพื่อควานผสมกับน้ำเสียที่เข้ามาใหม่ ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ชั้นของตัวกลางที่ซึ่งน้ำจะไหลขึ้นสู่ปากถังอันเป็นทางน้ำขาออก ผลที่พบนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Smith *et al.* (1996) ที่พบว่ารูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ชนิดตรงฟิล์มมีลักษณะเป็นแบบกวนผสมที่บริเวณภายใต้ระดับการติดตั้งตัวกลาง และรูปแบบการไหลของน้ำจะเป็นแบบ plug flow ภายใต้อบด้านล่างของตัวกลาง



**รูปที่ 10** เวกเตอร์แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของน้ำและจุดที่เกิด wake (วงกลมสีแดง) ภายในถังปฏิกรณ์จำลองที่ระนาบ xz เมื่อ y=0 เปรียบเทียบระหว่างสถานะที่ ก) ไม่มีตัวกลาง ข) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/6 ของความสูงถังปฏิกรณ์ ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร ค) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/4 ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร และ ง) ติดตั้งตัวกลางสูงจากก้นถังถึง 1/2 ตัวกลางหนา 5 มิลลิเมตร

รูปที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วการไหลในแนวแกนของน้ำ ที่ระดับความสูงเท่ากับขอบด้านล่างของตัวกลาง เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งตัวกลางที่ระดับความสูงต่างๆ กับเมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง พิจารณาถึงปฏิกรณ์เมื่อไม่ติดตั้งตัวกลางพบว่า ความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวแกนมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นตามระดับความสูงของถังเนื่องจากรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์เป็นแบบ jet flow กระแสการไหลของ jet flow มีลักษณะเป็นกรวยที่ขยายวงกว้างออกในแนวรัศมีตามระดับความสูงของถัง ทำให้ทิศทางการไหลในแนวแกนของน้ำมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามระนาบความสูงของถังปฏิกรณ์ ผลของการติดตั้งตัวกลางปรากฏอย่างชัดเจนดังเห็นได้จากเมื่อติดตั้งตัวกลางสูง 1/6 ของความสูงของถัง (รูปที่ 11(ก)) ความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวแกนลดลงจาก  $8.16 \times 10^{-5}$  m/s เป็น  $1.42 \times 10^{-5}$  m/s เท่ากับสามารถลดความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวแกน 82.58% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งตัวกลาง ผลของการติดตั้งตัวกลางปรากฏชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความสูงของการติดตั้ง โดยที่ระดับความสูงขอบด้านล่างของตัวกลางเท่ากับ 1/4 ของความสูงของถัง (รูปที่ 11(ข)) ความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวแกนลดลงจาก  $8.38 \times 10^{-5}$  m/s เป็น  $-3.51 \times 10^{-5}$  m/s และที่ระดับความสูงขอบด้านล่างของตัวกลางเท่ากับ 1/2 ของความสูงของถัง (รูปที่ 11(ค)) ความเร็วการไหลเฉลี่ยในแนวแกนลดลงจาก  $9.45 \times 10^{-5}$  m/s เป็น  $-7.14 \times 10^{-5}$  m/s คิดเป็นความเร็วที่ลดลงถึง 141.89 และ 175.54% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งตัวกลาง ผลที่พบนี้สอดคล้องกับ รูปแบบการไหลที่พบดังรูปที่ 10 เมื่อเพิ่มระดับความสูงของการติดตั้งตัวกลาง ทำให้กระแสการไหลแบบ jet flow มีพื้นที่ในการชนกับขอบด้านล่างของตัวกลางเพิ่มขึ้น ขอบด้านล่างของตัวกลางจึงทำหน้าที่เสมือนตัวกระจายโมเมนตัมในแนวแกนของน้ำเข้าให้ถ่ายเทออกในแนวรัศมีของถัง

น้ำที่ผ่านการชนผนังจะสร้าง wake ขนาดใหญ่อันเป็นเครื่องบ่งชี้ว่า น้ำขาเข้าจะถูกรบกวนผสมภายใต้ชั้นของตัวกลาง อันเป็นบริเวณที่สะสมตัวของตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสิ่งนี้ที่ค้นพบนี้อาจสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์



รูปที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วการไหลในแนวแกนของน้ำ ในระนาบตัดขวางถังปฏิกรณ์ (xy-plane) ที่ระดับความสูงเท่ากับขอบด้านล่างของตัวกลาง โดยเปรียบเทียบระหว่าง ก) ถังปฏิกรณ์ไม่ติดตั้งตัวกลางกับถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวกลางสูง 1/6 ของความสูงของถัง ข) ถังปฏิกรณ์ไม่ติดตั้งตัวกลางกับถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวกลางสูง 1/4 ของความสูงของถัง ค) ถังปฏิกรณ์ไม่ติดตั้งตัวกลางกับถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งตัวกลางสูง 1/2 ของความสูงของถัง

**ศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาค ภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม**

การศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อกระจายน้ำ ที่อัตราการป้อนน้ำเสีย 1,200 m<sup>3</sup>/d (ไม่แสดงข้อมูล) พบว่า ท่อกระจายน้ำสามารถจ่ายน้ำเสียด้วยความเร็วใกล้เคียงกันตลอดความยาวของเส้นท่อ โดยความแตกต่างระหว่างความเร็วการไหลสูงสุดและต่ำสุดของน้ำที่ออกจากรูกระจายมีค่าใกล้เคียงกัน 93.76% ความเร็วเฉลี่ยของน้ำถูกกระจายออกตลอดความยาวของท่อคือ 0.1817 m/s ความเร็วเฉลี่ยนี้จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการศึกษาผลของการติดตั้งตัวกลาง ที่มีต่อรูปแบบการไหลแบบสามวัฏภาคภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดอุตสาหกรรม

รูปที่ 12 แสดงปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลอง ที่มีความเร็วการไหลของน้ำสูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอน (Terminal velocity of granular sludge;  $U_t$ ) เปรียบเทียบระหว่างเมื่อไม่ติดตั้งตัวกลางและเมื่อติดตั้งตัวกลาง ความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอนสามารถคำนวณได้ด้วยสมการของ Khankruer (2002)

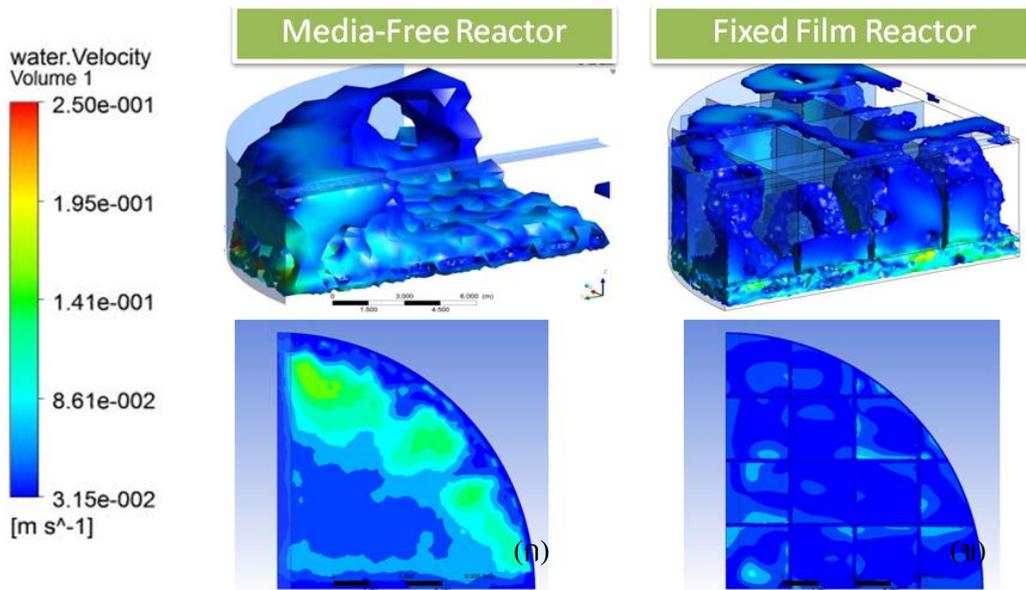
$$U_t = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_f) g^2}{\rho_f \mu_f} \right]^{1/3} D_p \quad ; \quad 0.4 < Re_p < 500$$

โดยที่  $\rho_p$  และ  $\rho_f$  คือความหนาแน่นของเม็ดตะกอนและความหนาแน่นของน้ำตามลำดับ  $g$  คือความเร่งของการตกอย่างอิสระตามแรงดึงดูดของโลก  $\mu_f$  คือความหนืดของน้ำ และ  $D_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน

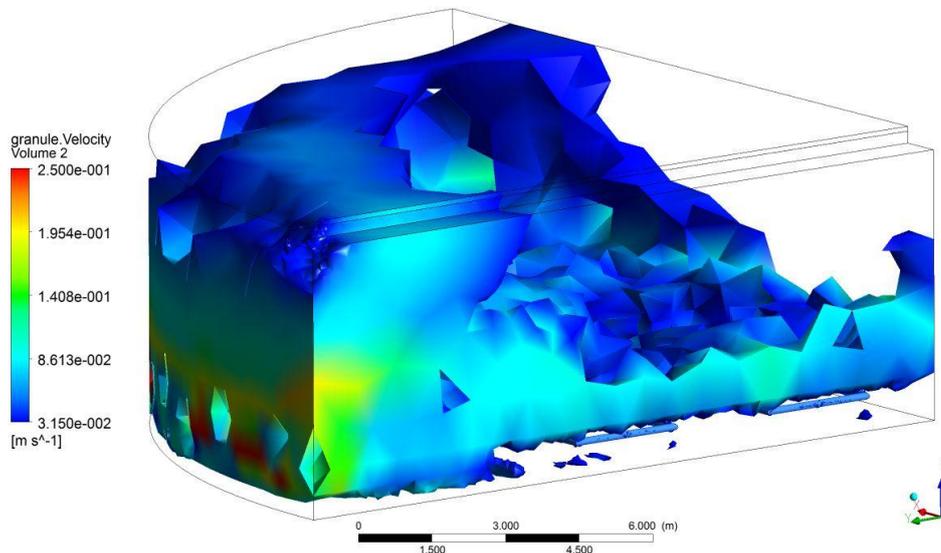
ความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอนในงานนี้มีค่าเท่ากับ 0.0315 m/s หมายความว่า ถ้าความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอน น้ำจะสามารถพัดพาให้ตะกอนไหลหรือลอยตัวไปพร้อมๆ กับการไหลของน้ำ

พิจารณา รูปที่ 12 (ก) เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง ความเร็วการไหลของน้ำที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอน ถูกพบอย่างหนาแน่นบริเวณใกล้ผนัง เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุของการเกิดความเร็วการไหลของน้ำมีค่าสูงในบริเวณดังกล่าวพบว่า การออกแบบที่กระจายน้ำภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบให้ตอบสนองความต้องการด้านสารอาหารของเชื้อเป็นสำคัญ กระจายน้ำที่ถูกออกแบบให้ทำมุม  $45^\circ$  กับแนวตั้ง เป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนของถังปฏิกรณ์ ผนวกกับรูกระจายน้ำเสียบริเวณใกล้ผนังป้อนน้ำเสียในทิศทางหันเข้าหาผนังของถังปฏิกรณ์ ผนังจึงทำหน้าที่เป็นฉากสะท้อนให้การถ่ายเทโมเมนตัมในแนวรัศมีกลายมาเป็นการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนของถังปฏิกรณ์ จึงเป็นสาเหตุให้การถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนถึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรงบริเวณใกล้ผนัง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาถึงความเร็วการไหลของน้ำเสียในบริเวณดังกล่าวพบว่า มีค่าสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอน พื้นที่ที่น้ำมีความเร็วการไหลสูงครอบคลุมตั้งแต่ระดับความสูงของการติดตั้งท่อกระจายน้ำ จนถึงปากถังปฏิกรณ์อันเป็นบริเวณที่ติดตั้งรางน้ำล้นหรือทางน้ำขาออก

เมื่อพิจารณา รูปที่ 13 จะเห็นว่า ภายในบริเวณที่น้ำมีความเร็วการไหลสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอน พบการเคลื่อนที่ของเม็ดตะกอนในพื้นที่ดังกล่าวเช่นเดียวกัน การฟุ้งกระจายของเม็ดตะกอนครอบคลุมตลอดความสูงของถัง นั้นเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าการทำงานของท่อกระจายน้ำ สร้างความเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ washout ของเม็ดตะกอน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการบั่นทอนประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพในระยะยาว



รูปที่ 12 Iso-volume แสดงปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลอง ที่มีความเร็วการไหลของน้ำสูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอน (Terminal velocity of granular sludge) เปรียบเทียบระหว่าง ก) เมื่อไม่ติดตั้งตัวกลาง และ ข) เมื่อติดตั้งตัวกลาง โดยภาพล่างแสดงความเร็วการไหลของน้ำในระดับที่มีการติดตั้งตัวกลางที่ระนาบ xy และสูงจากกันถึง 2 m ( $z = 2$ )



รูปที่ 13 Iso-volume แสดงปริมาตรภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลอง ที่มีความเร็วการไหลของเม็ดตะกอนสูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอน (Terminal velocity of granular sludge)

ผลของการติดตั้งตัวกลางเห็นได้จากรูปที่ 12 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการ การติดตั้งตัวกลางช่วยลดความรุนแรงของการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกน จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ความเร็วการไหลของน้ำมีค่าสูงนั้นลดลง เมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลเมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง อย่างไรก็ตาม ความเร็วการไหลที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเร็วสุดท้ายของการตกอย่างอิสระของตะกอนยังคงพบได้ที่ปากถังปฏิกรณ์ ซึ่งในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้งานจริง จะมีการติดตั้งตัวกลางอย่างหนาแน่นเต็มบริเวณ

ส่วนบนของถัง ซึ่งช่วยลดความรุนแรงของการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกน การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างน้ำเสียขาเข้ากับน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ รวมทั้งอิทธิพลของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการถ่ายเทโมเมนตัมของน้ำภายในถัง ความเข้าใจนี้ได้นำไปสู่การศึกษาในเชิงลึก เพื่อควบคุมการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างสถานะทั้งสามคือ น้ำเสีย เม็ดตะกอน และฟองก๊าซภายในถัง การควบคุมให้สารทั้งสามสถานะมีการถ่ายเทโมเมนตัมอย่างเหมาะสม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ

## บทสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากลไกและอิทธิพลของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพหน้าห้องของตัวกลางนอกจากเป็นพื้นที่สำหรับการยึดติดของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีกิจกรรมการบำบัดสูง ตัวกลางยังมีบทบาทสำคัญที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อควบคุมการถ่ายเทโมเมนตัมของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ ดังเห็นได้จากผลการศึกษาดังนี้

การศึกษาผลของความหนาของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรม มีการติดตั้งตัวกลางอย่างหนาแน่นบริเวณส่วนบนของถัง ตัวกลางเหล่านี้จะเป็นพื้นที่สำหรับให้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีกิจกรรมการบำบัดสูงมาเกาะและเพิ่มจำนวนเป็นฟิล์มชีวะ เมื่อเวลาผ่านไปเชื้อจุลินทรีย์จะสามารถก่อให้เกิดฟิล์มชีวะที่มีความหนาได้ถึง 5 mm เมื่อพิจารณาถึงจำนวนตัวกลางจำนวนหลายพันแผ่นที่ถูกติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์ ความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งผลการศึกษางบชี้ว่า เมื่อตัวกลางมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วการไหลสูงสุดในแนวแกนถังมีค่าเพิ่มขึ้น

การศึกษาผลของความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการพบว่า การขบดด้านล่างทำหน้าที่เป็นเครื่องลดทอนการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนของถัง เมื่อน้ำไหลเข้าชนกับขบดด้านล่างของตัวกลาง จะเกิดการม้วนตัวของน้ำหรือที่เรียกว่า wake ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ขนาดของ wake เพิ่มขึ้นตามระดับความสูงของการติดตั้งตัวกลาง การเกิด wake แสดงให้เห็นถึงการกวนผสมที่เพิ่มขึ้นระหว่างน้ำเสียขาเข้ากับน้ำเสียที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามการยกระดับความสูงของการติดตั้งตัวกลางที่มากเกินไป เท่ากับเป็นการลดพื้นที่สำหรับให้เชื้อจุลินทรีย์ที่มีกิจกรรมการบำบัดสูงยึดเกาะ ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถังปฏิกรณ์

การศึกษารูปแบบการไหลแบบสามสถานะภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดโรงงานอุตสาหกรรม เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ไม่ติดตั้งตัวกลางกับสภาวะที่มีการติดตั้งตัวกลางตามแนวแกนของถังปฏิกรณ์ เมื่อไม่มีการติดตั้งตัวกลาง รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์จึงขึ้นกับการทำงานของท่อกระจายน้ำรวมทั้งโครงสร้างของถังปฏิกรณ์เป็นสำคัญ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การออกแบบท่อกระจายน้ำที่สร้างการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนของถังสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนถังปฏิกรณ์ ถ้าการถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนที่มากเกินไป จะเป็นสาเหตุให้ตะกอนถูกพัดพาหลุดออกนอกระบบบำบัด อันจะลดทอนศักยภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์

เมื่อมีการติดตั้งตัวกลางเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำลองขนาดโรงงานอุตสาหกรรม ผลที่พบมีความสอดคล้องกับการศึกษาภายในถังปฏิกรณ์จำลองขนาดห้องปฏิบัติการ โดยพบว่าบริเวณที่ความเร็วการไหลของน้ำที่มีค่าสูงกว่าความเร็วการตกอย่างอิสระของเม็ดตะกอนลดลง ความเร็วการไหลของน้ำจากบริเวณก้นถังขึ้นมาสู่ปากถังมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะที่ไม่มีการติดตั้งตัวกลาง ความเร็วการไหลของน้ำในแนวแกนที่ลดลงหมายถึง การถ่ายเทโมเมนตัมในแนวแกนถังที่ลดลงด้วยเช่นกัน

ความเข้าใจที่ได้จากการวิจัยนี้ นำไปสู่การศึกษาในเชิงลึกเพื่อควบคุมการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างสถานะทั้งสามคือ น้ำเลี้ยว เม็ดตะกอน และฟองก๊าซภายในถัง การควบคุมให้สารทั้งสามสถานะมีการถ่ายเทโมเมนตัมอย่างเหมาะสม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ

## 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. Microbiol.* 31, 744-750.

Donald, M.B. and H. Singer, 1959, "Eintrainment in turbulent fluid jets", *Trans. Inst. Chern. Eng.* 37, 255-266.

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 Harremoës, 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.

Khankruer D., 2002, "Effect of Upflow Velocity on Granulation in UASB Treating Carbohydrate Wastewater", A M.S. Degree Thesis of Engineer, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

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.

McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P., 1993, "Unit Operations of Chemical Engineering", Singapore, McGraw-Hill.

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 2<sup>nd</sup> 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 เขาวกิจเจริญ 2538 ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 273-302

ภาวิณี ชัยประเสริฐ อรรถพ นพรัตน์ จงกล พูนทวี ชินพงศ์ วั่งใน 2545 รายงานฉบับสมบูรณ์ "การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม upflow sludge bed ร่วมกับ fixed bed ในการบำบัดและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแปรงมันสำปะหลัง" เสนอต่อศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

## ประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

#### CURRICULUM VITAE

ดร. วรินทร์ สงคศิริ

#### WARINTHORN SONGKSIRI

#### ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน

นักวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการจัดการและใช้ประโยชน์จากของเสียเกษตร (ECoWaste)

ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (สช.)

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

#### สัญชาติ

ไทย

#### สถานที่ทำงาน

ศูนย์ความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการจัดการและใช้ประโยชน์จากของเสียเกษตร (ECoWaste)

ตึกสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ (สรบ.)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

83 หมู่ 8 ถ. บางขุนเทียน-ชายทะเล แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150

โทรศัพท์ (02) 470-7524 (ที่ทำงาน); (086) 909-4210 (มือถือ)

โทรสาร (02) 452-3455

#### ที่อยู่

194/51 หมู่บ้านอลิษา 2 ซอยพุทธบูชา 36

ถนนพุทธบูชา แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

โทรศัพท์ (02) 490-1708

#### ประวัติการศึกษา

**Northwestern University**, Evanston, Illinois, USA

Ph.D. in Civil and Environmental Engineering, June 2003

Dissertation on “Biological Processes in the Nuclear Waste Treatment: Bio-Sorption and Bio-Reduction of Actinides”

**Stanford University**, Stanford, California, USA

MS in Civil and Environmental Engineering, June 1998

**Carnegie Mellon University**, Pittsburgh, Pennsylvania, USA

BS Major in Chemical Engineering, May 1997

Minor in Environmental Engineering

Graduated with University Honor and Departmental Honor

#### งานวิจัยและสาขาที่เชี่ยวชาญ

1. วิศวกรรมและการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแป้ง
2. การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ
3. เทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4. ระบบบำบัดน้ำสำหรับฟาร์มปลาเทราท์

ผลงานอ้างอิง

ผลงานในประเทศ

ที่	ชื่อ โครงการวิจัย	สถานภาพ	ระยะเวลาโครงการ	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน
1	โครงการการใช้แนวคิดการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมเกือบเป็นศูนย์สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง	หัวหน้าโครงการ	1.5 ปี, ก.ย. 54 – มี.ค. 56	1,576,000	สวทช.
2	โครงการ Capacity Building on Energy and Resource Efficiency for Thai Native Cassava Starch Industry การพัฒนาบุคลากรด้านพลังงานและอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (ความร่วมมือระหว่าง สวทช. และ GTZ)	หัวหน้าโครงการ	2 ปี, พ.ค. 52 – เม.ย. 54	10,700,000	สวทช. (5,700,000) และ GTZ (5,000,000)
6	โครงการการศึกษาผลของความหนาแน่นและการจัดเรียงตัวของตัวกลางที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพชนิดครึ่งฟิล์มในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยอาศัยหลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 53 - 30 ก.ย. 54	224,000	มจร.
3	โครงการการพัฒนาบุคลากรด้านพลังงานและอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังสำหรับบัณฑิตวิศวกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อม	หัวหน้าโครงการร่วม	10 เดือน, ต.ค. 53 – พ.ค. 54	1,500,000	สวทช.
4	โครงการพัฒนาฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากหัวมันสำปะหลัง	หัวหน้าโครงการ	12 เดือน, ก.ค. 53 – ม.ย. 54	997,200	MTEC
5	โครงการศึกษานโยบายการสนับสนุนทุนการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการสร้างความสามารถการแข่งขัน	ผู้ร่วมโครงการ	8 เดือน, ก.ค. 53 - ก.พ. 54	1,279,950	สวทช.
5	โครงการปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการเกิดแป้งมันสำปะหลังหายระหว่างการอบแห้งแบบพาหะลม	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 52 - 30 ก.ย. 53	229,700	มจร.
6					
7	โครงการการศึกษากลไกการเคลื่อนผ่านในหน่วยแยกสกัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 52 - 30 ก.ย. 53	268,900	มจร.
8	Thailand: Saphip Biogas Wastewater Project: Sector Issues Review	ผู้ร่วมโครงการ	6 เดือน, ต.ค. 51 – มี.ค. 52	150,000	World Bank
9	โครงการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหน่วยผลิตและลดการใช้ทรัพยากร น้ำ และพลังงาน: โรงงานแป้งมันสำปะหลังนาร่อง	หัวหน้าโครงการ	2 ปี, มี.ค. 49 – 51	5,520,000	สช.
10	โครงการ Local Consultant on Elaboration of Eco-Efficiency Baseline Study of the Native Starch Industry and Data Administration Support during of Eco-Efficiency Benchmarking in	ผู้ร่วมโครงการ	1 ปี, ต.ค. 50 - ก.ค. 51	830,000	พพ. ผ่าน GTZ

	the Native Starch Industry				
11	โครงการ Technical Support, Gap-Analysis and Implementation of Eco Efficiency Measures in the Thai Native Starch Industry	ผู้ร่วมโครงการ	4 เดือน ก.พ. - พ.ค. 51	124,000	พพ. ผ่าน GTZ
12	การศึกษาผลของมุมและความเร็วของน้ำต่อประสิทธิภาพการสกัดแป้งมันสำปะหลัง	ผู้ร่วมโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 50 - 30 ก.ย. 51	324,000	มจร.
13	การศึกษากาแลคทีนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อการขยายขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของเสีย	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 50 - 30 ก.ย. 51	259,160	มจร.
14	การขยายขนาดของถังปฏิกรณ์สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ทฤษฎีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, พ.ย. 48 - 49	723,000	ศช.
15	โครงการศึกษาศักยภาพของชีวมวลเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย	ผู้ร่วมโครงการ	6 เดือน, ต.ค. 48 - มี.ค. 49	1,800,000	สนพ. ผ่าน สกว.
16	โครงการประเมินศักยภาพเทคโนโลยีสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลในประเทศไทย	ผู้ร่วมโครงการ	6 เดือน, ต.ค. 48 - มี.ค. 49	1,000,000	สนพ. ผ่าน สกว.
17	งานวิจัยและพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพประสิทธิภาพสูงของถังปฏิกรณ์แบบลูกผสมในการบำบัดและผลิตพลังงานจากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ส่วนการขยายขนาด และการออกแบบถังปฏิกรณ์	ผู้ร่วมโครงการ	2 ปี, มี.ค. 47 - ก.พ. 49	2,504,170	สนพ.
18	โครงการศึกษาและพัฒนาระบบบำบัดน้ำและการนำน้ำกลับมาใช้ของฟาร์มปลาเรนโบว์เทราท์	ผู้ร่วมโครงการ )หัวหน้าโครงการย่อย(	ปี, 1 2 ต.ค. 46.- ปัจจุบัน	1,000,000	มูลนิธิโครงการหลวง ผ่าน มจร.
19	แนวทางการลดการสูญเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยโพสทไซโคลน	หัวหน้าโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 49 - 30 ก.ย. 50	221,050	มจร.
20	การลดและการควบคุมความชื้นของแป้งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอบแป้งมันสำปะหลังโดยใช้แบบจำลองทำนายล่วงหน้า	ผู้ร่วมโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 49 - 30 ก.ย. 50	184,210	มจร.
21	การพัฒนาไซโครไซโคลนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกแป้งสำหรับหน่วยแยกแป้งมันสำปะหลัง	ผู้ร่วมโครงการ	1 ปี, 1 ต.ค. 49 - 30 ก.ย. 50	221,050	มจร.
22	โครงการการศึกษาเพื่อสังเคราะห์และจัดทำร่างข้อเสนอแนะเกี่ยวกับกรณีการรื้อถอนแท่นผลิตปิโตรเลียมในทะเลไทยที่หมดอายุการใช้งาน	หัวหน้าโครงการ	30 ก.ย. 2547 - 30 ธ.ค. 2547	100,000	สภาที่ปรึกษาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติ

## ผลงานระดับต่างประเทศ

Project Coordinator and project partner. "Innovative education modules and tools on integrated waste management for interdisciplinary programmes of higher education institutions to enhance competence in environmental area and increase the utilisation of renewable energy - INVENT." Funded by European Union (EU) under the Asia-Link III Programme, April 2007 – September 2009.

Project Coordinator and project partner. "Development of practice oriented guidelines for the handling and treatment of oil contaminated water in industries and trades to promote environmentally friendly production and increase market opportunities, with applied examples for ten Small and Medium Enterprises (SMEs) in Thailand - PROTEKT." Funded by European Union (EU) under the Asia-Invest Programme, November 1, 2006 – April 30, 2008.

Project Coordinator and project partner. "ASEAN-EU University Network Program – BiWaRE Biomass and Waste for Renewable Energy." Funded by European Union, December 2004 – December 2005.

## ผลงานตีพิมพ์

Aichayawanich, S. ; Nopharatana, M. ; Nopharatana, A. ; **Songkasiri, W.** « Agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying. » *Carbohydrate Polymers*. 2011, 84(1), 292-298.

Tarkulvichean, S.; Patanachan, P.; Suwannathep, S.; Tanchareon, S.; **Songkasiri, W.** « Wastewater from a trout farm for rice cultivation: case study in Chiang Mai Province, Thailand. » *As. J. Energy Env.* 2010, 11(2), 69-76.

Deo, R.P. ; **Songkasiri, W.** ; Rittmann, B.E. ; Reed, D.T. « Surface complexation of Neptunium(V) onto whole cells and cell components of *Shewanella alga* : modeling and experimental study. « *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, 4930-4935.

Janphirom, T. ; Chairasert, P. ; Thongthieng, T. ; Suwannathep, S. ; **Songkasiri, W.** « Increasing fish feed stability using guar gum : case study with *Channa striata*. » *As. J. Food Ag-Ind.* 2010, 3(3), 363-370.

Viet, L.H. ; Ngan, N.V.C. ; Hoang, N.X. ; Quynh, D.N. ; **Songkasiri, W.** ; Stefan, C. ; Commins, T. "Legal and institutional framework for solid waste management in Vietnam" *As. J. Energy Env.* 2009, 10(01), 1-10.

Romsaiyud, A.; **Songkasiri, W.**; Nopharatana, A.; Chairasert, P. "Combination effect of pH and acetate on enzymatic cellulose hydrolysis." *J. Env. Sci.* 2009, 21(7), 965-970.

Khouangvichit, S.; **Songkasiri, W.**; Stefan, C. ; Commins, T.; Touch, V. "Survey on participation of nongtha tai villagers (lao pdf) in household waste management." *As. J. Energy Env.* 2009, 10(02), 53-61.

Touch, V.; Keo, S.; **Songkasiri, W.**; Stefan, C.; Commins, T.; Khouangvichit, S.; Green, J. "Use of solid waste for small scale biogas production for rural household energy consumption case study in takaev province, cambodia." *As. J. Energy Env.* 2009, 10(01), 1-10.

Paepatung, N.; Nopharatana, A.; **Songkasiri, W.** "Bio-Methane Potential of Biological Solid Materials and Agricultural Wastes." *As. J. Energy Env.* 2009, 10(01), 19-27.

ประทีน กุลละวณิชย์, นันทิยา เปปะตัง, อรอมล เหล่าปิตินันท์, อรรณพ นพรัตน์, ภาวิณี ชัยประเสริฐ และวรินทร์ สงคศิริ. “ภาพรวมเชิงสถานภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทย” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ต.ค.-ธ.ค.50 ปีที่ 30 ฉบับที่ 4

Saengchan, K.; Nopharatana, A.; **Songkasiri, W.** “Enhancement of Tapioca Starch Separation with a Hydrocyclone: Effects of Apex Diameter, Feed Concentration, and Pressure Drop on Tapioca Starch Separation with a Hydrocyclone.” *Chemical Engineering and Processing.* 48, 195-202, 2009.

Somboonchai W., **Songkasiri, W.**, Nopharatana, M. Kinetics of Cyanide Oxidation by Ozone in Cassava Starch Production Process. *Journal of Food Engineering.* 84 (4), 2008, 563-568 (I.F. 2005=1.249).

Phalakornkule, C.; Wongnoi, R.; **Songkasiri, W.** “Influence of a Three-Phase Separator Configuration on the Performance of a UASB Reactor Treating Wastewater from a Fruit Canning Factory.” *Wat. Env. Res.* 79 (2), 2007, 199-207 (I.F. 2005=1.013).

รศ.ดร. สุวิทย์ เตีย และ ดร. วรินทร์ สงคศิริ บทที่ 6 ชีวมวลเพื่อพลังงาน ใน การพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับประเทศไทย โดย ศ.ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (บรรณาธิการ) ตีพิมพ์โดยมูลนิธิบัณฑิตสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เมษายน 2550

Tia, S. and Songkasiri, W. “Biomass Potential in Thailand.” *Thailand Research Communication Journal.* 11 (63), 2005.

**Songkasiri, W.**; Reed, D.T.; Rittmann, B.E. “Bio-Sorption of Np(V) by *Pseudomonas fluorescens*.” In *Radiochimica Acta.* 2002, 90, 785-789.

#### ผลงานนำเสนอ

Lerdlattaporn, R.; Nopharatana, M.; **Songkasiri, W.** “Effects of Cassava Crush Size and Variety on Starch Extraction Efficiency.” Oral Presentation at the 6th International Conference on Starch Technology), Bangkok, Thailand, February 2012.

Suwannakan, S.; Nopharatana, M.; **Songkasiri, W.**, Viriyarattanasak, C. “Effects of Treatment of Sulfur Dioxide Solution on Functional and Thermal Properties of Cassava Starch.” Poster Presentation at the 6th International Conference on Starch Technology), Bangkok, Thailand, February 2012.

Saengchan, K.; Nopharatana, M.; **Songkasiri, W.** “Comparison of Centrifugation and Filtration Techniques for Starch Granule – Pulp Extraction during Tapioca Starch Production Process.” Oral Presentation at the International Conference on Chemical, Biological and Environment Sciences (ICCEBS'2011), Bangkok, Thailand, 23-24 December 2011. ได้รับรางวัลบทความวิจัยดีเด่น

Saengchan, K.; Nopharatana, M.; **Songkasiri, W.** “Influence of Feed Flow Rate on Tapioca Starch Perforation through Filter Medium in a Conial-Screen Centrifuge.” Oral Presentation at the International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences (ICCEES2011), Pattaya, Thailand, 17-18 December 2011. ได้รับรางวัลบทความวิจัยดีเด่น

- Aichayawanich, S.; Nopharatana, M.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. "Glass Transition of Cassava Starch during Pneumatic Conveying Drying." Oral Presentation at the International Conference on Agricultural Engineering (TSAE2011), Chonburi, Thailand, 31 March – 1 April 2011.
- Ruttithiwapanich, T.; Ruenglerpanyakul, W.; **Songkasiri**, W. "Two-Phase Flow Simulation Study on Mixing inside an 6,000 m<sup>3</sup> Industrial-Scale Anaerobic Wastewater Treatment Reactor by Computational Fluid Dynamics." Oral Presentation at the 5th SEATUC Symposium (South East Asian Technical University Corporation), Hanoi, Vietnam, 24-25 February 2011.
- Saengchan, K.; Nopharatana, M.; **Songkasiri**, W. "Effects of rotational speed and radial distance on starch perforation and starch extraction in conical-screen extractor." Oral Presentation at the 5th SEATUC Symposium (South East Asian Technical University Corporation), Hanoi, Vietnam, 24-25 February 2011.
- Aichayawanich, S.; Nopharatana, M.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. "Influence of damaged starch content on agglomeration of cassava starch during pneumatic conveying drying." Oral Presentation at the 5th International Conference on Innovations in Food and Bioprocessing Technology, Bangkok, Thailand, 7-9 December 2010.
- Keomany, D.; Pimsama, J.; **Songkasiri**, W. "Life cycle assessment of cassava starch production in Lao PDR." Oral Presentation at the Fifth GMSARN International Conference 2010 "Sustainable Development and Climate Change : Challenges and Opportunity in GMS." Luang Prabang, Lao PDR, 17-19 November 2010.
- Airtan, J.; Pimsaman, J.; **Songkasiri**, W. "Effect of 3 different HRT on distribution of solids inside UASB reactor from 3-phase flow model using computational fluid dynamics (CFD)." Oral Presentation at the 2nd National Conference on Thai Simulation and Modeling: TSIMMOD2010." Chonburi, Thailand, 20-21 May 2010.
- Junjaroen, W.; Pimsamarn, J.; **Songkasiri**, W. "Study of effect of geometric and process variables on flow pattern inside anaerobic wastewater treatment reactor using residence time distribution analysis." Oral Presentation at the PSU Engineering Conference." Songkhla, Thailand, 22-23 April 2010.
- Airtan, J.; Pimsaman, J.; **Songkasiri**, W. "Effects of HRT on distribution of solids inside Unconventional UASB reactor using Computational Fluid Dynamics (CFD)." Oral Presentation at the PSU Engineering Conference." Songkhla, Thailand, 22-23 April 2010. ได้รับรางวัลบทความวิจัยดีเด่นประเภทพื้นฐาน สาขาวิศวกรรมเคมี
- Nuntakumjorn, B.; Ruenglerpanyakul, W.; **Songkasiri**, W.; Phalakornkule, C. "Effects of chitosan on granulation process and UASB efficiency in wastewater treatment under thermophilic condition." Oral Presentation at the Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010). Khonkaen, Thailand, 4-6 March 2010.
- Tarkulvichean, S.; Patanachan, P.; Suwannathep, S.; Tanchareon, S.; **Songkasiri**, W. "Use of Wastewater from a Rainbow Trout Farm for Rice Cultivation: Case Study of Ban Mae Klang Luang, Jom Thong District,

- Chiang Mai, Thailand.” Oral Presentation at the International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education. Chiangmai, Thailand, 23-28 August 2009.
- Janphirom, T.; Chaiprasert, P.; Thongthieng, T.; Suwannathep, S.; **Songkasiri**, W. “Increasing Fish Feed Stability in Water using Guar Gum: Case Study with *Channa striata*.” Oral Presentation at the International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education. Chiangmai, Thailand, 23-28 August 2009.
- Songkasiri**, W.; Nopharatana, A.; Nopharatana, M.; Ruenglerpanyakul, W. “Starch Engineering and Process Optimization (SEPO) Program: A Public-Academia-Private Partnership for M.E. Degree Study in Thailand.” Oral Presentation at the International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education. Chiangmai, Thailand, 23-28 August 2009.
- Songkasiri**, W.; Koonsrisuk, S.; Tanchareon, S.; Pawakul, W.; Patumtanaruk, S. “Practicing Hands-On in Schools: Case Study of Integrated Resource Development Curriculum for a Rural School in Thailand.” Oral Presentation at the International Conference on the Role of Universities in Hands-On Education. Chiangmai, Thailand, 23-28 August 2009.
- Khongkittikhon, W.; Saengchan, K.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “Reducing Sulfur Residue in Tapioca Starch Product.” Oral Presentation at the International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind. Nakornratchsima, Thailand, April 1-3, 2009.
- Patamarajvichian, P.; Saengchan, K.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “Enhancement of Tapioca Starch Collection by Post Cyclone.” Oral Presentation at the International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind. Nakornratchsima, Thailand, April 1-3, 2009.
- Rutthitiwapanich, T.; Chaiprasert, P.; **Songkasiri**, W. “Feeding Effect on the Flow Behavior within Distribution Pipe of Industrial Scale Biogas Reactor.” Poster Presentation at the International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind. Nakornratchsima, Thailand, April 1-3, 2009.
- Eksomthramate, T.; **Songkasiri**, W.; Chaiprasert, P. “Hydrolysis of Cassava Peels and Pulps from Cassava Starch Processing for Ethanol Production.” Oral Presentation at the Environment Naresuan Conference, Payao, Thailand, May 26-27, 2008.
- Phutarak, P.; **Songkasiri**, W.; Chaiprasert, P. “Secondary Wastewater Treatment of Cassava Starch Factory Using Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland.” Oral Presentation at the Environment Naresuan Conference, Payao, Thailand, May 26-27, 2008.
- Petchrungruang, U.; **Songkasiri**, W.; Chaiprasert, P. “Water Quality Classification Use in Rasper, Extractor and Separator are Index for Management of Water Consumption for Tapioca Starch Factory.” Oral Presentation at the Environment Naresuan Conference, Payao, Thailand, May 26-27, 2008.

- Plylaharn, N.; Reunglerpanyakul, W.; Wanichpongpan, P.; Chanin, C.; **Songkasiri, W.** “Development of a Low-Temperature Bio-filter and Photocatalyst Reactor for a Rainbow Trout Farm.” Oral Presentation at the Regional Conference on Tropical Aquaculture: Applications, Environmental and Social Impacts, Rayong, Thailand, March 27-29, 2008.
- Wajanakunanan, R.; Pejaranonda, B.; Jaruwan, C.; Sirithanasak, W.; **Songkasiri, W.** “Effect of Toxicity of Agro-Chemical Usage on the Trout Farm at Inthanond Royal Project Research Station.” Oral Presentation at the Regional Conference on Tropical Aquaculture: Applications, Environmental and Social Impacts, Rayong, Thailand, March 27-29, 2008.
- Laopitinan, O.; Horthong, M.; Ruenglerpanyakul, W.; Nopharatana, A.; Wanichpongpan, P.; Unsrison, G.; **Songkasiri, W.** “Development of Nutrient Budgets of A Rainbow Trout Farm.” Oral Presentation at the Regional Conference on Tropical Aquaculture: Applications, Environmental and Social Impacts, Rayong, Thailand, March 27-29, 2008.
- Tipwong, S.; Saengchan, K.; Nopharatana, A.; **Songkasiri, W.** “Study of Hydrocyclone with Solid Core for a Tapioca Starch Separation Unit.” Oral Presentation at the 2<sup>nd</sup> International South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Bandung, Indonesia, February 26-27, 2008.
- Boonya, S.; Ruenglerpanyakul, W.; **Songkasiri, W.** “Effects of Liquid Upflow Velocity and Reactor Configuration on Solid Flow Pattern inside UASB Reactors Using Computational Fluid Dynamics (CFD).” Oral Presentation at the International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, Bangkok, Thailand, November 21-23, 2007.
- Kullawanich, P.; Paepatung, N.; Laopitinun, O.; Nopharatana, A.; **Songkasiri, W.**; Chaiprasert, P. “An Overview of Status and Potential of Biomethanation Technology in Thailand.” Oral Presentation at the Energy, Environment, and Material Conference –EEM Conference, Bangkok, Thailand, August 31, 2007.
- Songkasiri, W.**; Sasador, W.; Wisitrungruang, W.; Tipwong, S.; Nopharatana, A. “Increase of Dewatering Efficiency and Starch Recovery using Extractors in Pulp Management for a Native Cassava Starch Production Factory.” Oral Presentation at International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture, Broomfield, CO, USA, September 15-19,2007.
- Ruttithiwapanich, T.; Chaiprasert, P.; **Songkasiri, W.** “Geometrical and Hydrodynamic Effects on Fluid Flow inside Lab-Scale Biogas Reactors.” Poster Presentation at NAC2007: NSTDA Annual Conference, Bangkok, Thailand, March 28-30, 2007.
- Ruttithiwapanich, T.; Chaiprasert, P.; **Songkasiri, W.** “Effects of Reactor Geometry on Fluid Flow Pattern inside Biogas Reactors.” Poster Presentation at the 18<sup>th</sup> Annual Meeting on the Thai Society for Biotechnology (TSB2006), Bangkok, Thailand, November 2-3, 2006.
- Songkasiri, W.**; Phalapornkule, C.; Ruenglerpanyakul, W. “Comparison of Fluid Flow Through UASB Three-Phase Separators with Different Designs.” Oral Presentation at Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, August 27-30, 2006.

- Dunn, R.; Amornmongkol, M.; Unsrison, G.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “The Design of the Water Recirculation System for the Rainbow Trout Farm.” Poster Presentation at the Royal Project Foundation 2005 Conference, Chaing Mai, Thailand, December 1, 2005.
- Rungrueng, N.; Sangchan, K.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “Water Minimization in the Tapioca Starch Production Industry: A Decision Support System.” The Oral Presentation at the International Conference on Starch Update 2005, November 4-5, 2005. Bangkok, Thailand.
- Romsaiyud, A.; **Songkasiri**, W.; Nopharatana, A.; Chairprasert, P. “Modeling of Simultaneous Hydrolysis and Fermentation of Cellulose by *Bacillus coagulans* under Anaerobic Condition.” Poster Presentation at IWA2005: Anaerobic Digestion. October 2-5, 2005/ Punta del Este, Uruguay.
- Romsaiyud, A.; **Songkasiri**, W.; Nopharatana, A.; Chairprasert, P. “Kinetic Study of Hydrolysis Cellulose by *Bacillus coagulans* under Anaerobic Condition.” Oral Presentation at Conference on Environmetrics: The International Conference on Quantitative Methods for the Environmental Sciences and General Meeting of The International Environmetrics Society, August 21-26, 2005, Beijing, China.
- Dunn, R.; Horthong, M.; Boonsiri, W.; Unsrison, G.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “The Design of Water Recirculating System for the Rainbow Trout Farm at Doi Inthanond.” Poster Presentation at the Royal Project Foundation Research Conference, Chiang Mai, Thailand, 2005.
- Dunn, R.; Horthong, M.; Boonsiri, W.; Unsrison, G.; Nopharatana, A.; **Songkasiri**, W. “Sustainable Wastewater Treatment System Development in the Rainbow Trout Farm at Doi Inthanond.” Poster Presentation at the Royal Project Foundation Research Conference, Chiang Mai, Thailand, November 18<sup>th</sup>, 2004.
- Songkasiri**, W.; Nopharatana, A.; Rakruam, W.; Tangmunumsin, P. : Chairprasert, P.; Bhumiratana, S.; Tanticharoen, M. “A case study: Biogas Recovery from Wastewater Treatment of a Rice Starch Factory in Thailand” *Anaerobic Digestion 2004* conference, September 2004, Montreal, Canada.
- Songkasiri**, W.; Rittmann, B.E.; Reed, D.T. “Surface Complexation of Neptunium(V) onto Bacterial Cell Components” Submitted to *Environmental Science & Technology* .
- Songkasiri**, W.; Willett, A.; Rittmann, B.E.; Reed, D.T.; Koenigsberg, S. “Bioremediation of Neptunium(V) using Lactate, Hydrogen (H<sub>2</sub>), and Hydrogen Release Compound (HRC®).” Presented at In Situ and On-Site Bioremediation, the 7<sup>th</sup> International Symposium (Battelle), Orlando, Florida, June 2003.
- Songkasiri**, W.; Willett, A.; Rittmann, B.E.; Reed, D.T.; Koenigsberg, S. “Bioremediation of Actinides using Lactate and Hydrogen Release Compound (HRC®).” Presented at the Southwest FOCUS conference: Water Supply and Emerging Contaminants, National Ground Water Association, Phoenix, AZ, February 2003.
- Songkasiri**, W.; Rittmann, B.E., Reed, D.T. “Bioremediation of Nuclear Wastes, especially Neptunium, by Soil Bacteria.” Presented at the 1<sup>st</sup> Argonne Young Scientist Day, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, October 2002 (Awarded the 3<sup>rd</sup> place for the oral presentation).

**Songkasiri, W.;** Rittmann, B.E.; Reed, D.T. “Bio-Reduction of Np(V) by *Shewanella alga* using Lactate or HRC® as an Electron-Donor Substrate.” Presented at Spectrum 2002, the 9<sup>th</sup> Biennial International conference in Reno, Nevada in August 2002.

**Songkasiri, W.;** Reed, D.T.; Rittmann, B.E. “Bio-Sorption of Np(V) by *Pseudomonas fluorescens*.” Presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration '01) conference in Bregenz, Austria, September 2001.

Reed, D.T.; Kropf, A.J.; Aase, S.B.; Degueldre, C.; Curtis, L.A.; Zygmunt, S.A.; **Songkasiri, W.;** Rittmann, B.E. “XANES/EXAFS Studies of Actinides in Environmental Samples.” Presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration '01) conference in Bregenz, Austria, September 2001.

## หัวหน้าโครงการวิจัยร่วม

นายถาวร รัตติทิวาพานิชย์

**Mr. Taworn Ruttithiwapanich**

ตำแหน่งปัจจุบัน

นักวิจัย

ที่อยู่

สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
83 หมู่ 8 ท่าข้าม บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150  
โทรศัพท์ 02-452-7520

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ปริญญาโท  
คณะทรัพยากรและเทคโนโลยีชีวภาพ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความชำนาญพิเศษ

1. ระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพชนิดรีกฟิล์มจูลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film)
2. สํารวจข้อมูลการใช้้ํานํ้าและพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลงานวิชาการ

Tarworn Ruttithiwapanich, Pawinee Chaiprasert, Warinthorn Songkasiri, “*Feeding Effect on Flow Behavior within Distribution Pipe of Industrial Scale Biogas Reactor.*” Poster Presentation at International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind, 1-3 April 2009, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

Tarworn Ruttithiwapanich, Pawinee Chaiprasert, Warinthorn Songkasiri, “*Governing Equations for Upflow Anaerobic Wastewater Treatment Reactor Scale-Up.*” Oral Presentation at Sustainable Development to Save the Earth: Technologies and Strategies Vision 2050, 11-13 December 2008, Bangkok, Thailand.

Ruttithiwapanich, T.; Chaiprasert, P.; Songkasiri, W. “*Geometrical and Hydrodynamic Effects on Fluid Flow inside Lab-Scale Biogas Reactors.*” Poster Presentation at NAC2007: NSTDA Annual Conference, Bangkok, Thailand, March 28-30, 2007.

Ruttithiwapanich, T.; Chairasert, P.; Songkasiri, W. "Effects of Reactor Geometry on Fluid Flow Pattern inside Biogas Reactors." Poster Presentation at the 18<sup>th</sup> Annual Meeting on the Thai Society for Biotechnology (TSB2006), Bangkok, Thailand, November 2-3, 2006.