

CST-65

แบบจำลองการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลของถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ Computational Fluid Dynamics Modeling of Anaerobic Continuously Stirred Tank Reactor

พงษ์สรุณ สัจจรัตนันท์^{1*} และ ยศธนา คุณาทร^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: E-mail: pongsarun@msn.com, โทรศัพท์ 053-944-416

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการใช้เทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อจำลองพฤติกรรมของของไหลในถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ (CSTR) โดยใช้เทคนิคโครงผลึกโบลต์ซมันน์ Lattice Boltzmann Methods (LBM) ร่วมกับ Navier-Stokes Equation เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสสารภายในถัง แบบจำลองที่ศึกษาเป็นถังทรงกระบอกในห้วงปฏิบัติการที่มีขนาดความจุ 21.2 ลิตร ใช้ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร แบบ Pitched Blade ทำมุมปะทะ 45 องศา จำนวน 4 ใบพัด ทำการกวนด้วยความเร็ว 80, 100 และ 120 รอบต่อนาที ผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของของแข็งในของเหลวและวิเคราะห์ความสามารถในการคลุกเคล้ากันของสสารได้ ผลการศึกษาพบว่าลักษณะการไหลภายในถังเป็นแบบแนวแกน มีทิศทางจากใบพัดลงสู่ก้นถัง เกิดกระแสการไหลหมุนวนภายในถังบริเวณด้านข้างและด้านล่างของใบพัด และเกิดจุดอับของการกวนบริเวณขอบด้านล่างของถัง เมื่อสังเกตบริเวณผิวน้ำด้านบนพบว่ามีกระแสการไหลหมุนวนบริเวณผิวน้ำด้านบนของถัง ซึ่งจะทำให้ความเร็วอนุภาคของแข็งใกล้เคียงกับของเหลวอาจทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันของสสารไม่ดี ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของก้นถังให้มีลักษณะโค้งมน (Dish shape) และ ติดตั้งครีบก้น (Baffle) ภายในถังทั้ง 4 ด้าน เพื่อแก้ปัญหาจุดอับของการกวน

คำหลัก: พลศาสตร์ของไหล, ถังกวนสมบูรณ์, วิธีโครงผลึกโบลต์ซมันน์

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD), which based on Lattice Boltzmann Methods (LBM) and Navier-Stokes equation, is used to simulate particle movement behavior of solids in liquids and analyze compound mixing ability in Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). The CSTR model is 21.2 liters cylinder tank with a 0.2 meter diameter of 4-45° Pitched Blade Turbine. The experiments operated at stirred speed of 80, 100 and 120 RPM. As a result, the internal flow behavior is the axial flow with the flow direction from impeller to the bottom of tank. The vortex was found at beside and below the impeller including dead zone at the edge of bottom tank. In addition, the results show vortex at the surface of liquid is made the particle velocity close to the fluid velocity which probably decreased compound mixing ability. However, the defects can be fixed by changing the shape of tank's bottom from cylinder shape to dish shape and install the baffle at the 4 sides of tank.

CST-65

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Continuous Stirred Tank Reactor, Lattice Boltzmann Methods.

1. บทนำ

ถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะมีอุปกรณ์การกวนภายในถัง ทำการกวนและหยุดเป็นช่วงๆ ปัญหาคือตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบถัง CSTR ที่จะส่งผลให้เกิดการกวนผสมอย่างทั่วถึงของสสารที่อยู่ภายในถัง ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบให้ถัง CSTR นี้มีการกวนที่ดี เพื่อให้เกิดการผสมอย่างทั่วถึงของสสารสูงที่สุด [1] การออกแบบจะต้องคำนึงถึงตัวแปรชนิดต่างๆ เช่น อัตราส่วนขนาดของถัง รูปแบบของใบพัด จำนวนของใบพัด ลักษณะการติดตั้ง และ ความเร็วของใบพัด โดยทั่วไปคุณภาพในการผสมจะพิจารณาได้จากการเกิดจุดอับของการกวน (Dead zone) และเวลาในการผสม (Mixing time) [2]

การวิเคราะห์การไหลในสภาวะการไหลคงตัว (Steady state) ของระบบการหมุนแบบต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองประเภท Sliding Mesh (SM) หรือ Multiple Reference Frame (MRF) ซึ่งมีการสร้างโดเมนการคำนวณค่อนข้างยุ่งยาก งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลโดยใช้เทคนิค Lattice Boltzmann Methods (LBM) ที่เป็นการวิเคราะห์การไหลในสภาวะการไหลไม่คงที่ (Transient) โดยใช้การเคลื่อนที่ และการชนกัน ของอนุภาค จึงไม่ต้องทำการสร้างกริดการคำนวณ และนำผลที่ได้จากแบบจำลองมาศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสสารภายในถัง และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของการผสม เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และพัฒนาไปใช้สำหรับการออกแบบถัง CSTR ต่อไป

2. หลักการ และ ทฤษฎี

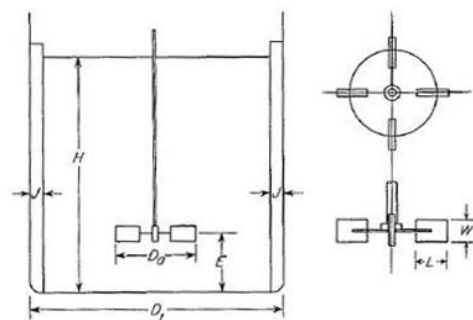
2.1. ถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ

เป็นการเรียกตามลักษณะของสสารที่อยู่ภายในถัง มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทุกจุด มีจุดเด่นคือการกวนผสมภายในถังตลอดเวลาหรือเป็นช่วงเวลา

โดยมีอุปกรณ์ในการกวนเพื่อให้แบคทีเรียได้สัมผัสกับสารอินทรีย์อย่างทั่วถึง ระบบนี้เมื่อแบคทีเรียย่อยสลายสารแขวนลอยในน้ำเสีย จะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ลอยสู่ด้านบน และ เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง

2.2. การออกแบบตัวถัง CSTR

การออกแบบตัวถัง CSTR ไม่ได้มีรูปแบบหรือหลักการที่ตายตัว โดยทั่วไปการออกแบบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และการใช้งานของระบบ ซึ่งจะมีตัวแปรในการออกแบบที่ไม่เหมือนกัน เช่น ขนาดและความสูงของใบพัด อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของถัง เป็นต้น เพื่อที่จะลดความซับซ้อนของการออกแบบ และลดค่าใช้จ่าย การออกแบบ จะใช้พื้นฐานในกำหนดขนาดมิติของถัง [3] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อัตราส่วนการออกแบบถัง CSTR
อัตราส่วนที่ใช้โดยทั่วไปมีขนาดดังนี้

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (1)$$

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (3)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (5)$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (6)$$

เมื่อ D_a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด

D_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง

H คือ ความสูงของถัง

E คือ ความสูงของใบพัดจากก้นถัง

CST-65

- J คือ ความหนาของแผ่นกัน (Baffle)
 W คือ ความกว้างของใบพัด
 L คือ ความยาวของใบพัด
 t คือ ความหนาของใบพัด

2.3. การออกแบบใบพัด

ใบพัดสำหรับการกวนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการไหลคือ การไหลแบบแนวแกน (axial-flow impeller) การไหลแบบแนวรัศมี (radial-flow impeller) และการไหลแบบแนวสัมผัส (Tangential flow) สำหรับรูปแบบของใบพัดจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ propellers, paddles และ turbines ใบพัดแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะการกวนที่จะทำให้ของไหลภายในถังมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันออกไป โดยใบพัดที่มีลักษณะการไหลแบบแนวแกนคือใบพัดแบบ Propellers เช่น Pitched blade turbine, Hydrofoil turbine เป็นต้น ใบพัดที่มีลักษณะการไหลแบบแนวรัศมีคือใบพัดแบบ Paddles เช่น Rushton turbine, Concave blade turbine เป็นต้น และ ใบพัดที่มีลักษณะการไหลแบบแนวสัมผัส เช่น Anchor paddle [4]

การเลือกใช้ใบพัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบ จึงต้องมีการเลือกใบพัดให้เหมาะสมต่อหน้าที่การทำงาน และ ชนิดของของไหล งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ใบพัดแบบ Pitched blade turbine ที่ทำให้ลักษณะการไหลเป็นแบบแนวแกน เพราะว่าการให้ของแข็งบริเวณด้านล่างถึงฟุ้งกระจายขึ้นมา แต่ถ้าของไหลในถังมีความสูงมาก ของไหลที่อยู่ด้านบนอาจหยุดนิ่ง ไม่เกิดการผสม อาจต้องมีการเพิ่มจำนวนใบพัดขึ้นอีกหนึ่งชุดด้านบน เพื่อทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น

2.4. Lattice Boltzmann Methods

คือเทคนิคการจำลองลักษณะการไหลของของไหล โดยใช้การเคลื่อนที่ (Streaming) และการชนกัน (Collision) ของอนุภาค (Particle) ตามกฎอนุกรมมวลและโมเมนตัม [5] และกำหนดให้อนุภาคมีรูปทรงเป็นแบบหกเหลี่ยมที่มีลักษณะสมมาตร (Hexagonal Lattice) เรียงต่อกันเป็นโครงตาข่าย แล้วกำหนดค่า

ของตัวแปรแบบ Boolean ไว้แต่ละโนด เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มาชนกันจะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของความเร็ว ซึ่งเป็นไปตามกฎการชนตามแบบจำลองการชน ดังสมการ

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\vec{x}, t) + A_{ij} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] \quad (7)$$

เมื่อ f_i คือ Distribution Function

$\vec{e}_i$ คือ Discrete Particle Velocities

A_{ij} คือ Scattering Matrix

f_i^{eq} คือ Equilibrium Distribution Function

การระบุพิกัดและการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ใช้กับวิธี LBM โดยใช้การอ้างอิงด้วย $DnQm$ เมื่อ n คือจำนวนมิติในการจำลองการไหล และ m คือจำนวนทิศทางของความเร็ว แบบจำลองความเร็วของอนุภาคในการจำลองการไหลใน 2 มิติ คือ $D2Q9$ ส่วนแบบจำลองความเร็วในการจำลองการไหลใน 3 มิติ จะเป็นแบบจำลองความเร็ว $D3Q15$, $D3Q19$ หรือ $D3Q27$ ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้มีรูปทรงของโครงตาข่ายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งหมด และสามารถหาค่า

Equilibrium Distribution Function ได้จาก

$$f_{eq} = \rho w_i \left[1 + \frac{3}{c^2} \vec{e}_i \cdot \vec{u} + \frac{9}{2c^4} (\vec{e}_i \cdot \vec{u})^2 - \frac{3}{2c^2} \vec{u} \cdot \vec{u} \right] \quad (8)$$

เมื่อ $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

$\vec{u}$ คือ ความเร็วลัพธ์ของแต่ละโนด

ρ คือ ความหนาแน่น

w_i คือ Weighting Factor

การกำหนดค่าความหนาแน่นเริ่มต้นเพื่อคำนวณใน LBM จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนหน่วยไปมาระหว่าง Lattice Unit กับ Physical Unit ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแบบจำลองความเร็วของอนุภาคที่ใช้ สำหรับความหนาแน่นและโมเมนตัมที่อยู่ในรูปของ Lattice Unit นั้นสามารถหาได้จากกฎอนุกรมมวลและกฎอนุกรมโมเมนตัม ดังนี้

$$\rho = \sum_{i=0}^{m-1} f_i \quad (9)$$

CST-65

$$\rho \vec{u} = \sum_{i=0}^{m-1} \vec{e}_i f_i \quad (10)$$

จาก Equation of State ของก๊าซในอุดมคติ สามารถหาความดันซึ่งอยู่ในรูปของ Lattice Unit ได้ดังนี้

$$P = \rho \left(\frac{c}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (11)$$

และสามารถหาค่าความหนืดซึ่งอยู่ในรูปของ Lattice Unit ได้ดังนี้

$$\nu = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{c}{\sqrt{3}} \right)^2 \Delta t \quad (12)$$

2.5. Navier-Stokes Equation

2.5.1. สมการอนุรักษ์มวล

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมจะเท่ากับผลต่างของการไหลของมวลที่ไหลเข้าและออกปริมาตรควบคุม สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (13)$$

2.5.2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของเหลวจะต้องเท่ากับผลรวมของแรงที่อนุภาคของเหลวสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (15)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + S_{Mz} \quad (16)$$

2.5.3. สมการอนุรักษ์พลังงาน

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลจะเท่ากับอัตราของความร้อนสุทธิที่เพิ่มในอนุภาคของเหลวบวกกับอัตราของงานสุทธิที่ทำบนอนุภาคของเหลว โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(up)}{\partial x} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(wp)}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (17) \end{aligned}$$

2.6. อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

กำลังที่ใช้ในการกวนจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติ

ของเหลวที่จะกวน ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) ความหนืดสัมบูรณ์ (μ) ขนาดและชนิดของใบพัด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (D_a) ความสูงของใบพัด (W) ความเร็วของใบพัด (N) โดยค่าตัวแปรเหล่านี้มักอยู่ในรูปอัตราส่วนเทอมไร้นิยาม เช่น ตัวเลขกำลัง (Power number, N_p), เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, N_{Re}) [3] ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางกายภาพมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_p = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (18)$$

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_a^2}{\mu} \quad (19)$$

กำลังที่ใช้ในการกวนจะพิจารณาจากลักษณะการไหลโดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์เป็นการแบ่งการไหลแบบปั่นป่วน ($N_{Re} > 10,000$) การไหลแบบราบเรียบ ($N_{Re} < 10$ ถึง 20) และระหว่าง 20 ถึง $10,000$ เป็นช่วงที่มีการไหลเปลี่ยนแปลงทั้งสองแบบผสมกัน (transition zone)

กำลังที่ใช้ในการกวนแบบปั่นป่วน

$$P = K_T N^3 D_a^5 \rho \quad (20)$$

กำลังที่ใช้ในการกวนแบบราบเรียบ

$$P = K_L N^2 D_a^3 \mu \quad (21)$$

เมื่อ K_T คือ ค่าคงที่สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

K_L คือ ค่าคงที่สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ K_T และ K_L สำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน [3]

Type of Impeller	K_L	K_T
Propeller, 3 blades, pitch 1.0	41.0	0.32

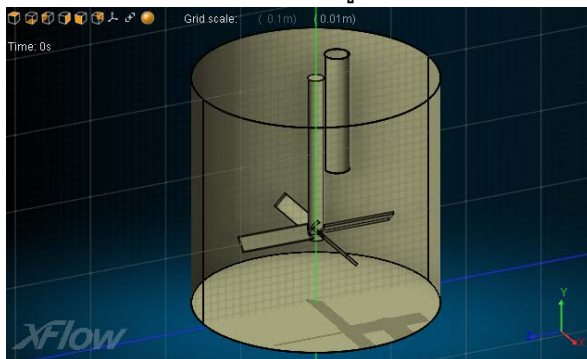
CST-65

Turbine, 4 flat blades, vaned disc	60.0	5.31
Flat paddles, 4 blades, $D_a/W = 6$	49.0	2.75
Turbine, 6 pitched blades at 45°	-	1.63
Turbine, 4 pitched blades at 45°	44.5	1.27

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติของถัง CSTR

แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติของถัง CSTR นี้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.3 เมตร สูง (H) 0.5 เมตร และใบพัดเป็นแบบ 4-blade 45° pitched-blade turbine หนา (t) 0.003 เมตร กว้าง (W) 0.02 เมตร ยาว (L) 0.04 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใบ (D_a) 0.1 เมตร และมีท่อลำเลียงสาร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.03 เมตร จุ่มลงมาด้านข้าง ถึงลึก 0.2 เมตรจากด้านบน ดังรูปที่ 3

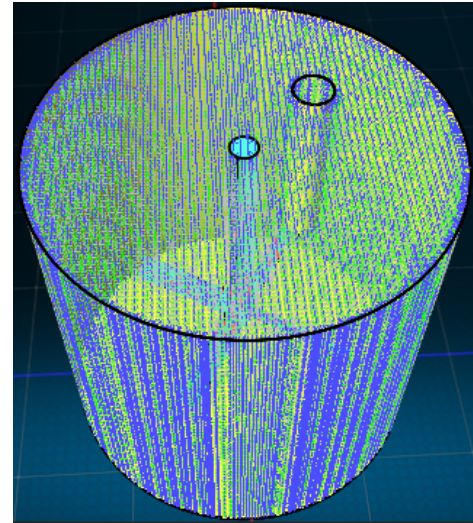


รูปที่ 3 แบบจำลองถัง CSTR ที่ใช้ในการจำลองลักษณะการไหล

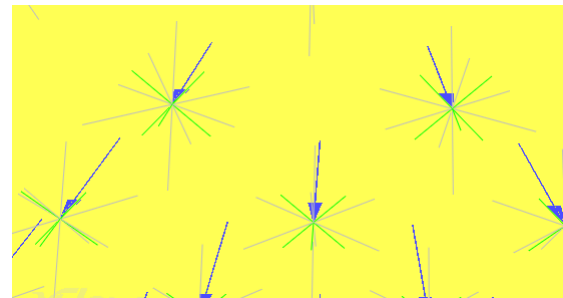
ในการสร้างแบบจำลองจะต้องมีการสร้างโดเมนการคำนวณ ซึ่งการคำนวณด้วยวิธี LBM จะทำการสร้างโครงตาข่ายสามมิติให้อยู่ในรูปแบบการเรียงตัวกันของอนุภาค (Particles) แทนการสร้าง กริด (Grid) โดยในงานวิจัยนี้จะได้ใช้โครงตาข่ายแบบ D3Q19 ซึ่งขนาดของอนุภาคที่สร้างจะใช้ตามความเหมาะสม บริเวณใดที่ต้องการศึกษาจะมีการแบ่งขนาดของอนุภาคที่ละเอียดกว่าบริเวณที่ไม่ค่อยมีผลต่อการศึกษา แสดงดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 4 ตารางที่ 2 ขนาดของอนุภาคที่ใช้ในแบบจำลอง

บริเวณ	ขนาดอนุภาค (เมตร)
รอบๆใบพัด	0.0025
ถัง CSTR, ท่อลำเลียง	0.005

บริเวณอื่นๆ	0.005
-------------	-------



(1)



(2)

รูปที่ 4 โดเมนการคำนวณที่เป็นลักษณะของการเรียงตัวของอนุภาค

สภาวะขอบที่ศึกษาเป็นถึงทรงกระบอกด้านบนเปิดสู่บรรยากาศภายนอกความดันอ้างอิง 1 atm สารที่ใช้ทำงานเป็นน้ำ มีอุณหภูมิ 298.15 K มีปริมาตร 14 ลิตร สูงจากกันถึง 0.2 เมตร มีใบพัดจุ่มลงกลางถึงกำหนดให้ใบพัดหมุนที่ความเร็วรอบ 80, 100 และ 120 รอบต่อนาทีตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการกวนเท่ากับ 20 วินาที

3.2 แบบจำลองการใส่อนุภาคลงในของเหลว

การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสสารภายในถัง CSTR ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลอง Discrete Phase Model (DPM) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม โดยคำนวณจากสมการผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่ออนุภาคดังนี้

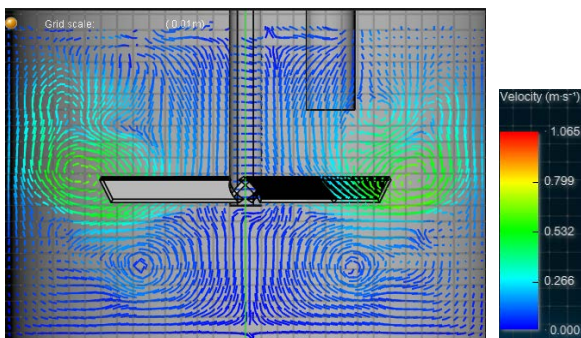
$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{a}_{D(f-p)} + \vec{a}_{Ext_{f,p}} + \vec{a}_{Ext_p} \quad (23)$$

CST-65

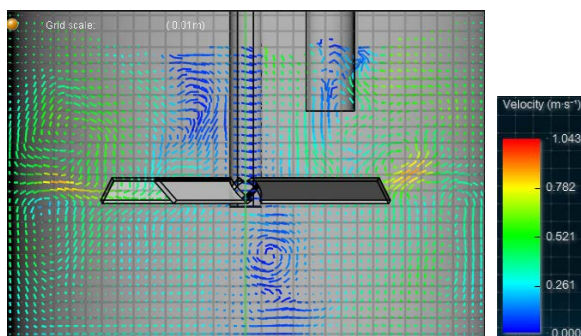
เมื่อ $\bar{u}_p$ คือ ความเร็วของอนุภาค
 $\bar{a}_{D(f-p)}$ คือ ความเร่งของอนุภาคเนื่องจาก
แรงต้านของของไหลที่กระทำกับอนุภาค
 $\bar{a}_{Ext,p}$ คือ ความเร่งภายนอกที่มีผลกระทบ
ต่ออนุภาคเช่น แรงโน้มถ่วง (g)
 $\bar{a}_{Ext,p}$ คือ ความเร่งภายนอกที่มีผลกระทบ
จากการลอยตัว

4. ผลจากการศึกษา

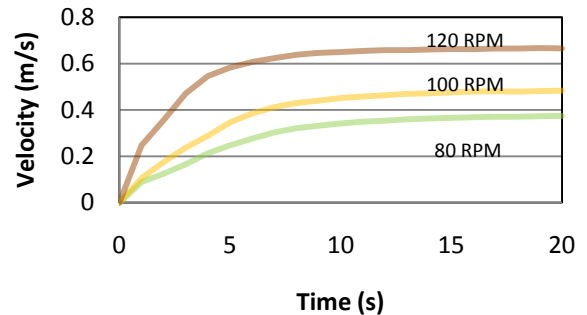
การศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในถัง CSTR นี้ มีการกำหนดให้ใบพัดหมุนที่ความเร็วรอบ 80, 100 และ 120 รอบต่อนาที โดยวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในถัง CSTR เมื่อใบพัดหมุน ของเหลวบริเวณด้านหน้าใบพัดจะเคลื่อนที่ไปแนวเดียวกับทิศทางการหมุนดังลู่กันถึงแล้ววนกลับขึ้นมาด้านบน และเกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนที่บริเวณปลายใบพัดด้านบน และด้านล่างของใบพัด ความเร็วสูงสุดของสารจะอยู่ที่บริเวณปลายใบพัด และเกิดจุดอับการกวนบริเวณขอบด้านล่างของถัง ดังรูปที่ 5 และ 6



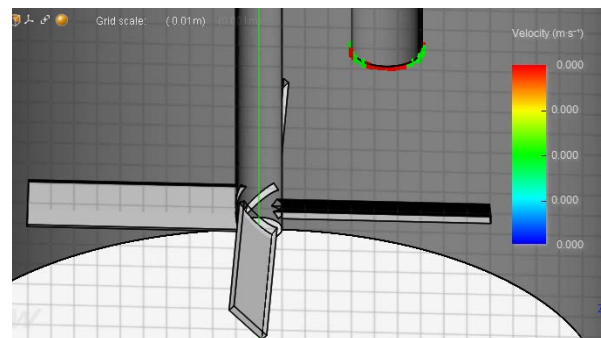
รูปที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วที่ $t = 1$ s (100 rpm)



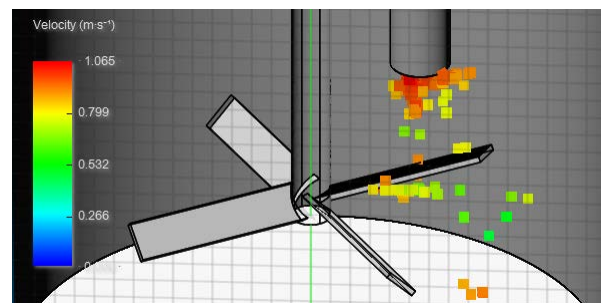
รูปที่ 6 เวกเตอร์ความเร็วที่ $t = 5$ s (100 rpm)
เมื่อพิจารณาความเร็วเฉลี่ยของน้ำในถังต่อเวลา
ของทุกความเร็ว พบว่าความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
จนเริ่มคงที่ ซึ่งใช้เวลาแตกต่างกัน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 7 ความเร็วเฉลี่ยต่อเวลา
เมื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของของแข็งใน
ของเหลว โดยการใส่อนุภาคที่มีขนาด 0.005 เมตร มี
ความหนาแน่น 998.3 kg/m³ จำนวน 500 อนุภาค ลง
ไปในถัง CSTR เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของ
อนุภาคในของเหลว พบว่า ของไหลจะเคลื่อนที่ลงมา
ตามแรงดึงดูดของใบพัด แล้วก็ไหลไปตามกระแสของ
ความเร็ว วนไปรอบๆถัง จนไปกองที่บริเวณขอบกัน
ถัง และบริเวณด้านบน ดังรูปที่ 8 ถึง 12

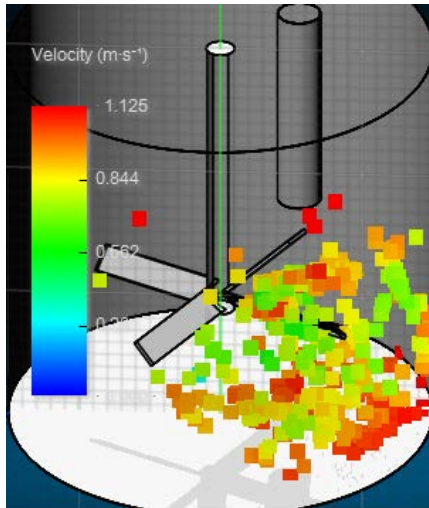


รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของอนุภาค ($t = 0$ s)

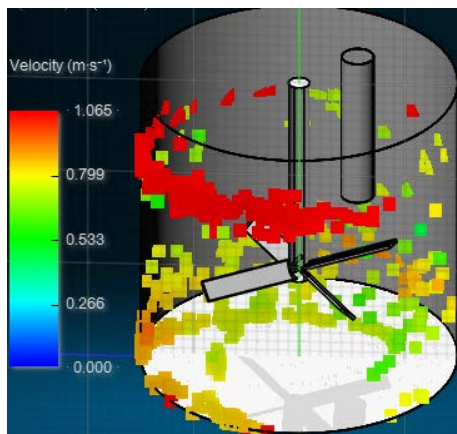


รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของอนุภาค ($t = 1$ s)

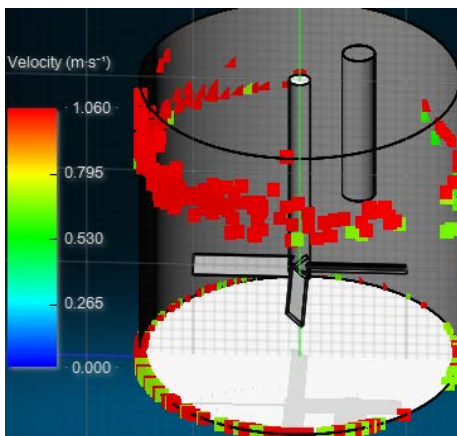
CST-65



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของอนุภาค ($t = 2$ s)



รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของอนุภาค ($t = 4$ s)



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ของอนุภาค ($t = 9$ s)

จากรูปที่ 12 เมื่อทำการกวนผ่านไปเป็นเวลา 9 วินาที พบว่าอนุภาคของแข็งมีการไหลไปกองบริเวณด้านล่างของถัง แล้วไม่ไหลกลับขึ้นมาอีก และมีอีก

ส่วนหนึ่งอยู่บริเวณผิวหน้าด้านบนขอบถัง ซึ่งเกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัด

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการจำลองลักษณะการไหลของน้ำในถัง CSTR เมื่อวิเคราะห์ผลจากรูปร่างการไหลของน้ำที่เกิดจากการกวนพบว่า ลักษณะการไหลเป็นแบบแนวแกน มีกระแสน้ำไหลหมุนวนภายในถังบริเวณด้านข้างใบพัด และเกิดจุดอับของการกวนบริเวณขอบด้านล่างของถัง เมื่อเพิ่มความเร็วยกขึ้นในการกวนจะทำให้เกิดกระแสน้ำไหลหมุนวนบริเวณผิวหน้าด้านบนของถัง ซึ่งจะทำให้ความเร็วของของแข็งใกล้เคียงกับของเหลว อาจทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันของสารไม่ดี ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของกันถังให้มีลักษณะโค้งมน และ ควรติดตั้งครีบกั้น (Baffle) ภายในถังทั้ง 4 ด้าน เพื่อแก้ปัญหาจุดอับของการกวน เมื่อจะวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพในการผสมกันของสารภายในถัง CSTR ยังต้องอาศัยอีกหลายปัจจัย เช่น ชนิดของสารแขวนลอยที่ใช้ในการผสม อุณหภูมิ เวลาในการผสม ซึ่งในงานวิจัยครั้งต่อไปจะศึกษาถึงคุณภาพในการผสม และการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองของถัง CSTR

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Stanley M. Walas. 2012. *Chemical Process Equipment Selection and Design 3rd Ed.*. Butterworth-Heinemann, USA.
- [2] Andre Bakker. 2006. *Blend Times in Stirred Tanks*. Chemineer, Ohio.
- [3] Warren L. McCabe. 2004. *Unit Operations of Chemical Engineering 7th Ed.*, McGraw-Hill, New York.
- [4] Tatterson, G.B. 2003. *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks 2nd Ed.*, McGraw-Hill, New York.
- [5] Rojanaratanangkule, W., Dechaumphai, P., Juntasaro, V., and Juntasaro E. (2008). *Direct*

CST-65

numerical simulation of turbulent flow in a square duct using lattice Boltzmann method. The 12th Annual Symposium on Computational Science and Engineering. 27-29 March 2008, Ubon Rajathanee, Thailand.