



การวิเคราะห์ความสามารถในการผสมของถังกวนผสม โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Analysis of Mixing Capability in Stirred Tank Reactor Using Computational Fluid Dynamics

พานูวัฒน์ เหมกร^{1, 2, *} ยศธนา คุณาทร¹ และ ลลิตา อัตนโธ³

Panuwat Phermkorn^{1, 2, *}, Yottana Khunatorn¹ and Lalita Attanatho³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

²บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

³สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

35 เทคโนธานี ถ.เลียบคลองห้า ต.คลองห้า อ.คลองหลวงจ.ปทุมธานี 12120

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
239, Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai Thailand, 50200

²Graduate School, Chiang Mai University, 239, Muang District, Chiang Mai Thailand, 50200

³Thailand Institute of Scientific and Technological Research,
35 Technopolis, Tambon Khlong Ha, Amphoe Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

*E-mail: panuwat.phermkorn@gmail.com, Tel.: 064-794-7935

บทคัดย่อ

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม การเข้าใจถึงลักษณะการไหลภายในถังเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกวนผสม วัตถุประสงค์ของบทความคือการศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายความเร็วของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่ใช้ใบพัดแบบ Rushton จำนวน 8 ใบพัด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางถังในการผลักดัน คำนวณผลการไหลด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบการไหลวนขนาดใหญ่ และใช้เทคนิคคริตเลื่อน ในการจำลองการเคลื่อนที่ของใบพัด ศึกษาลักษณะการไหลที่ความเร็วรอบใบพัด 100, 200 และ 300 rpm ผลการทดสอบพบว่าความเร็วในแนวสัมผัสสร้างกระแสหมุนวนรอบแกนเพลภายในถังกวนผสม เมื่อทำการกวนผสมอย่างต่อเนื่องจะพบว่าลักษณะการไหลจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ลักษณะการไหลนี้จะส่งผลถึงความสามารถในการกวนผสมที่ต้องการความปั่นป่วนในการส่งผ่านมวลระหว่างของไหล แต่การสร้างการปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในการคงสภาพ

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; แบบจำลองความปั่นป่วน; การผสม

ABSTRACT

The Stirred Tank Reactor (STR) is widely used in the industry. Understanding the flow characteristics within the tank is important in determining the performance of the mixing process. The objective of this paper presents the study of the flow characteristics and velocity distribution of fluid within the Stirred Tank Reactor (STR) using 8 blades Rushton turbines in the middle of the tank to drive. Calculate the flow results using Computational Fluid Dynamics (CFD). The Large Eddy Simulation (LES) using to capture the turbulence and the Sliding Mesh technique (SM) to simulate the impeller motion. The study of mixing characteristics at impeller speeds of 100, 200, and 300 rpm. The study results showed that the tangent velocity generated vortex flow around the shaft within the stirring tank. When continuous mixing, the flow characteristics will be steady-state. This flow characteristic affects the mixing capability of the process that requires turbulence for the mass transfer between the fluids. However, maintaining turbulence in the mixing process required high energy.

Keywords: Stirred tank reactor; CFD; Turbulence model; Mixing

1. บทนำ

เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stirred Tank Reactor, STR) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม [1] การเข้าใจถึงลักษณะการไหลภายในถังเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการกวนผสม ความปั่นป่วนและทิศทางการไหลที่เกิดขึ้นในขณะทำงานมีความซับซ้อนมาก การวัดผลจากการทดลองกระบวนการยังคงไม่สามารถบอกรายละเอียดของกระแสการไหลภายในได้ทั้งหมด การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จะสามารถให้ข้อมูลทั้งหมดของการไหลและความปั่นป่วนได้

ในการคำนวณเชิงตัวเลขสามารถใช้แบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับการแก้ปัญหาลักษณะการไหลเพื่อให้ทราบถึงปริมาณความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายใน แบบจำลองการไหลวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation, LES) สามารถแสดงกระบวนการทำงานที่จับความซับซ้อนของการไหลแบบปั่นป่วนได้เป็นอย่างดี [2-4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะการกระจายความเร็วภายในถังกวน อย่างไรก็ตามการคำนวณทั้งหมดยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องโดยผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือจากแบบจำลองที่น่าเชื่อถือ

ในการทดสอบการถ่วงน้ำหนักของถังกวนผสม ใบกวนที่ใช้ในการทดลองหรือการคำนวณเพื่อศึกษาลักษณะการไหลในกระบวนการกวนผสมนิยมใช้ใบพัดแบบ Rushton ที่สามารถสร้างแบบจำลองได้ไม่ยาก อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ซึ่งกระแสการไหลที่ปล่อยจากใบพัดที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบผลการคำนวณได้เป็นจำนวนมาก [5-7]

ความเข้าใจในกระบวนการกวนผสมตั้งแต่เริ่มต้นไปจนกระทั่งระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ของการไหลจะช่วยให้การออกแบบกระบวนการกวนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการได้ การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดลองในห้องปฏิบัติการได้อย่างมาก และยังทำให้ทราบลักษณะการไหลทั้งหมดได้

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการศึกษาการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปแบบไม่มีค่าลิขสิทธิ์ และสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเพื่อใช้อธิบายลักษณะการไหลของสสารปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการผลักดันของใบพัดและสสารการไหลในกระบวนการกวนผสม พร้อมทั้งการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลถึงความสามารถในการกวนผสม เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบหรือการทดลองในห้องปฏิบัติการต่อไปได้

2. พลศาสตร์ของไหล

2.1 สมการควบคุม

ในการพิจารณาพลศาสตร์ของไหล ลักษณะและรูปร่าง การเคลื่อนที่ของของไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ควบคุม [8-10] ได้แก่

กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) อธิบาย ไว้ว่า ผลรวมของมวลที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของของไหลในปริมาตร ควบคุมนั้น สำหรับของไหลที่บีบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ความหนาแน่นของของไหลไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สมการอนุรักษ์มวลจะเขียนได้ในรูป ดังนี้

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) อธิบายไว้ว่า ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำ บนปริมาตรควบคุมจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลง โมเมนตัมของของไหลในปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณา สำหรับของไหลที่บีบอัดตัวไม่ได้สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + 2\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (2)$$

โดยที่ u_i คือ เวกเตอร์ความเร็วของของไหล [m/s], p คือ ความดันที่กระทำกับปริมาตรควบคุม [N/m^2], ρ คือ ความ หนาแน่นของของไหล [kg/m^3], ν คือ ค่าความ หนืดจลน์ของของไหล (Kinematic Viscosity) [m^2/s] และ f_i คือ เวกเตอร์แรงอื่นๆ ที่กระทำภายในหรือบนพื้นผิวของ ปริมาตรควบคุม เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2]

2.2 ตัวเลขเรย์โนลด์

เมื่อพิจารณาพลศาสตร์ของไหลตัวแปรไร้มิติที่อธิบาย ลักษณะการไหลของของไหล คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) เป็นตัวเลขที่บอกถึงลักษณะการไหลของ ของไหลที่เปลี่ยนจากลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ไปเป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน

(Turbulent flow) สำหรับนิยาม Re ของการไหลภายใน ถึงกวนผสม [11] จะอธิบายได้ดังนี้

$$Re = Nd^2/\nu \quad (3)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบการหมุนของใบพัด [rps] และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด [m]

2.3 ตัวเลขกำลัง

ตัวแปรไร้มิติที่แสดงการทำงานของถึงกวนผสมที่ สำคัญอีกตัว คือ ตัวเลขกำลัง (Power number, P_N) ที่ใช้ สมมุติฐานบนหลักความสมดุลของพลังงาน โดยคำนวณจาก ผลรวมเชิงปริมาตรของอัตราการสลายตัวของพลังงาน ความปั่นป่วน (Turbulent energy dissipation rate) บริเวณรอบ ๆ ใบพัด สำหรับผลจากการคำนวณเชิงตัวเลข (CFD) P_N ของใบพัดจะคำนวณจากผลรวมของของโมเมน ที่กระทำบนพื้นผิวของใบพัดในบริเวณส่วนหมุนตัวได้ (Rotor) ดังนั้น P_N สามารถจัดรูปได้ดังนี้ [11]

$$P_N = \frac{\int_A (2\pi \cdot N \cdot |M|) dA}{\rho N^3 d^5} \quad (4)$$

โดยที่ $|M|$ คือ ขนาดของโมเมนที่กระทำบนพื้นผิวของใบพัด (Moment magnitude) [$N \cdot m$]

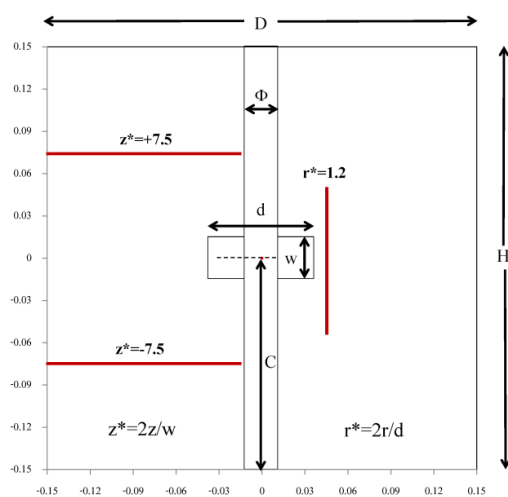
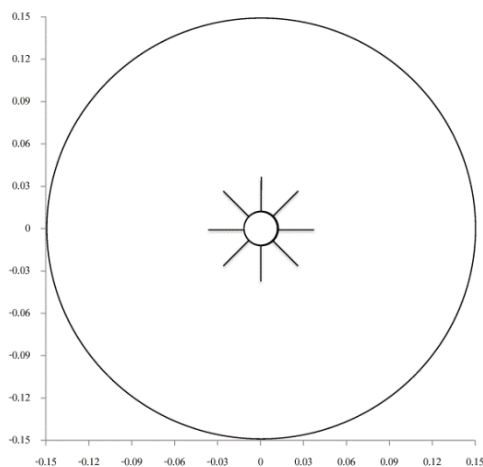
3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถึงกวนผสม

ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนผสมจะใช้สัดส่วน ตามงานวิจัยของ Verzicco et al. (2004) [12] เป็นถึง ทรงกระบอกด้านบนและด้านล่างตัดตรง ขอบถึงไม่มี แผ่นกั้น (No baffles) ใช้ใบพัดแบบ Rushton จำนวน 8 ใบพัด อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของถึง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใน งานวิจัยนี้จะใช้ถึงกวนผสมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ขนาด 300 mm. ดังนั้นขนาดของแบบจำลองเชิงตัวเลขของถึงกวน ผสมจะเป็นตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสัญลักษณ์และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนผสม

Symbolic	Ratio	Dimension (m)
d	1.00	0.075
H	4.00	0.300
D	4.00	0.300
C	2.00	0.150
w	0.40	0.030
Φ	0.32	0.024

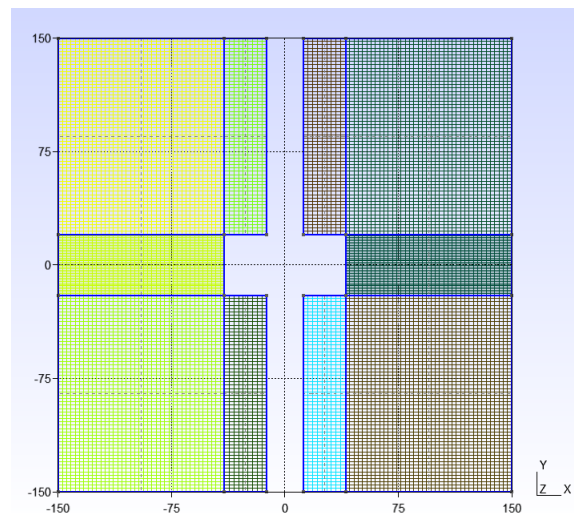


รูปที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัย

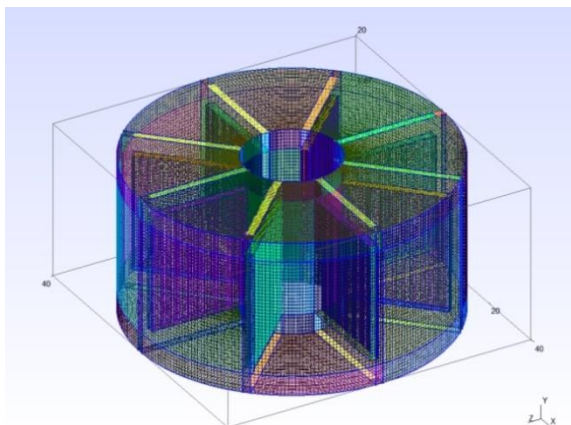
3.2 กริดการคำนวณ

ขั้นตอนต่อไปสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขคือการสร้างกริดการคำนวณการไหล โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Gmsh เป็นเครื่องมือในการสร้างกริดการคำนวณ (โปรแกรมที่ไม่มีค่าลิขสิทธิ์ในการใช้งาน) ในการเตรียมกริดการคำนวณด้วยเทคนิค SM จะทำการแบ่งส่วนการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ กริดการคำนวณส่วนอยู่กับที่ (Stator) ที่แสดงในรูปที่ 2 และกริดการคำนวณส่วนเคลื่อนที่หรือหมุนตัว (Rotor) ที่แสดงในรูปที่ 3 ทำการออกแบบกริดให้มีลักษณะกริดโครงสร้างสี่เหลี่ยม (Block structured grid) ความหนาแน่นของกริดการคำนวณจะเพิ่มขึ้นในบริเวณที่มีความปั่นป่วนสูง โดยจะเน้นที่บริเวณใบพัดและบริเวณกึ่งกลางของถังกวนผสมที่มีกระแสความปั่นป่วนจากการผลัดกันของใบพัด

การศึกษาความเป็นอิสระของกริดการคำนวณ (Grid independent study) จะออกแบบกริดการคำนวณที่มีจำนวนกริดแตกต่างกัน 3 รูปแบบ รายละเอียดของกริดการคำนวณที่ใช้ในการทดสอบเป็นตามตารางที่ 2 ในการทดสอบจะทำการกำหนดความเร็วรอบใบพัดที่ 100 rpm และทำการเทียบผลการคำนวณบนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$



รูปที่ 2 ภาพตัดของกริดการคำนวณส่วนไม่เคลื่อนที่ (Stationary)



รูปที่ 3 กริดการคำนวณส่วนหมุนตัว (Rotor)

ตารางที่ 2 รูปแบบกริดการคำนวณในการศึกษาความเป็นอิสระของกริด

Name	Nodes	Elements	Min.Size (m)
Mesh1M	1,129,720	1,071,840	$4.1(10^{-4})$
Mesh2M	2,107,792	2,014,080	$2.3(10^{-4})$
Mesh4M	4,183,908	4,037,120	$2.0(10^{-4})$

3.3 ขั้นตอนวิธีและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เครื่องมือเพื่อการคำนวณเชิงตัวเลขที่น่าสนใจในการใช้งาน ที่สามารถเพิ่มเติมหรือปรับปรุงการทำงานได้อย่างอิสระนั้น OpenFOAM (Open-source Field Operation And Manipulation) [13] เป็นอีกทางเลือกในการใช้งาน ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยของการไหล คอมพิวเตอร์ไม่สามารถแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของสมการควบคุมได้โดยตรง จึงต้องมีขั้นตอนการแยกส่วนสมการควบคุม (Discretization) เพื่อเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตที่คอมพิวเตอร์สามารถจัดการและแก้ปัญหาได้ ในตารางที่ 3 ได้แสดงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแยกส่วนสมการควบคุม ทั้งหมดนี้จะมีระเบียบวิธีในการแบ่งส่วนอนุพันธ์ที่แตกต่างกัน สำหรับการแบ่งส่วนสมการอนุกรมโมเมนตัม (2) เพื่อเตรียมนำไปใช้แก้ปัญหาระบบการไหลทั้งหมดต่อไป

ตารางที่ 3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการแยกส่วนสมการอนุพันธ์ [13]

Terms	Methods	Order
Transient	backward	Second order
Convective	Gauss linear	Second order
Diffusive	Gauss linear	Second order

ในการหาผลเฉลยของการไหลจะใช้วิธีทำการคำนวณแบบวนซ้ำ (Iterative method) สำหรับการแก้ปัญหาสมการควบคุมของการไหลแบบต่อเนื่องกับเวลา เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดัน โดยในงานนี้เลือกใช้ด้วยวิธี GAMG (Generalised geometric-algebraic multi-grid) [13] ในการคำนวณผลเฉลย

แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้คือ Large eddy simulation, LES ที่มีความสามารถในการคำนวณลักษณะการไหลที่เกิดความปั่นป่วนสูงได้เป็นอย่างดี โดยในการศึกษากระแสการไหลจากใบพัดที่เคลื่อนที่ส่งผ่านความปั่นป่วนจากการพลัดดันจากใบพัดตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่สามารถจับการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ได้

3.4 กริดการคำนวณแบบเคลื่อนที่

การคำนวณเชิงตัวเลข (CFD) ของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนผสมที่มีการเคลื่อนที่ของใบพัดเป็นอุปกรณ์หลักต้นการไหล เทคนิคที่ใช้เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของใบพัดคือ วิธี Sliding mesh (SM) ทฤษฎี SM หรือเทคนิคการเลื่อนกริด [17] เป็นเทคนิคที่ใช้สร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์การไหลในสถานะการไหลไม่คงตัว (Unsteady state) ของระบบการหมุนแบบต่าง ๆ โดยที่จะแบ่งส่วนการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) โดยความสัมพันธ์ของความเร็วระหว่างสองส่วนจะใช้สมการอนุกรมโมเมนตัมมาอธิบาย โดยเมื่อทำการจำลองการหมุน พจน์ของแรงโคริโอลิส และ พจน์ของแรงหนีศูนย์กลางจะรวมอยู่ในสมการโมเมนตัม (2) เพื่อทำการแก้ปัญหาการไหล แบบจำลอง SM จะเป็นการคำนวณพฤติกรรมของการไหลที่มีความแม่นยำและสามารถคำนวณการไหลแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาจึงเป็นที่นิยมใช้

ในการออกแบบและการศึกษากระบวนการหมุนของใบพัดต่าง ๆ [14-16]

3.5 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ของไหลทำงาน คือ น้ำ (Water) ที่ความหนาแน่น ρ เท่ากับ $1,000 \text{ kg/m}^3$ ค่าความหนืดจลน์ ν เท่ากับ $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ เงื่อนไขขอบเขตจะกำหนดให้ผนังทุกด้านของถังกวนผสมและเพลลาในส่วนไม่เคลื่อนที่จะใช้เงื่อนไขแบบไม่มีการลื่นไถล (No slip condition) รวมไปถึงผนังของใบพัดในส่วนหมุนตัวก็ใช้เงื่อนไขเช่นกัน สำหรับเงื่อนไขของพื้นที่สัมผัสกันระหว่างส่วนไม่เคลื่อนที่และส่วนหมุนตัวจะใช้เงื่อนไข Cyclic Arbitrary Mesh Interface (AMI) [13] คือ เงื่อนไขในการส่งผ่านปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนการคำนวณทั้ง 2 ส่วน ไปมาระหว่างกันผ่านขอบเขตที่กำหนดเงื่อนไขขึ้น ในส่วนของเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณจะกำหนดให้ความเร็วของของไหลเริ่มต้นจากหยุดนิ่งและใช้เวลาทางกายภาพ 50 วินาที ในการคำนวณ

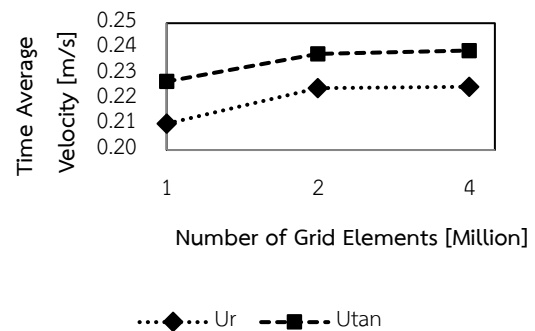
ในการศึกษาจะทำการจำลองการทำงานของถังกวนผสมเพื่อสังเกตลักษณะการไหลภายในถังกวนผสมด้วยความเร็วใบพัดที่แตกต่างกัน 3 ความเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 4 ที่แสดงความเร็วใบพัดที่ใช้ในการศึกษา พร้อมทั้งระบุตัวเลข Re ของความเร็วใบพัด และความเร็วปลายใบพัด (Impeller tip velocity, U_{Tip}) ที่กำหนดให้เป็น

$$U_{Tip} = N \cdot (d/2) \quad (5)$$

โดยที่ N คือความเร็วใบพัด [rev / s] และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด [m] ความเร็วปลายใบนี้จะเป็นความเร็วสูงสุดที่ใบพัดผลักดันของไหลออกจากใบพัดจึงจะใช้ความเร็วนี้ในการกำหนดขนาดของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variable) โดยจะแสดงความเร็วในรูปของความเร็วในแนวรัศมี (Radial Velocity, U_r) ความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential Velocity, U_{tan}) และความเร็วในแนวแกน (Axial Velocity, U_{ax}) ในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinates) สำหรับการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

ตารางที่ 4 ความเร็วรอบใบพัดที่ใช้ในการศึกษาการไหลของของไหลภายในถังกวนผสม

Rotational Speed $N \text{ (rpm)}$	Reynolds number Re	Impeller Tip velocity $U_{Tip} \text{ (m/s)}$
100	9,375	0.3927
200	18,750	0.7854
300	28,125	1.1781



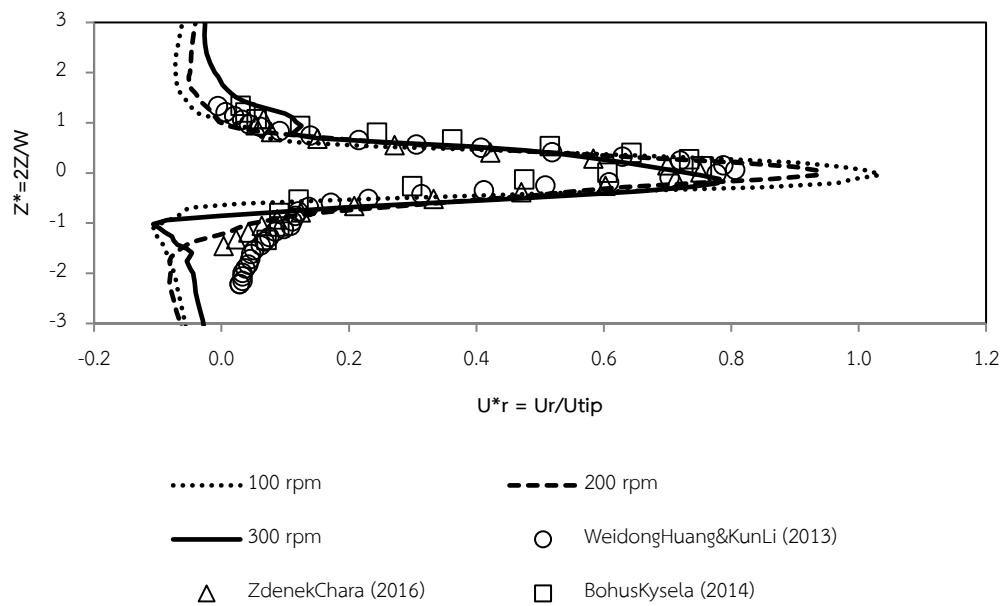
รูปที่ 4 ค่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดบนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

4.1 ความเป็นอิสระของกริดการคำนวณ

ผลการคำนวณเพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นอิสระของกริดการคำนวณ รูปที่ 4 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยตามเวลาสูงสุดขององค์ประกอบความเร็วบนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ เทียบกับความละเอียดกริดทั้ง 3 รูปแบบ จะพบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดทั้งแนวรัศมีและแนวสัมผัสของกริดความละเอียด 2 และ 4 ล้านมีค่าที่ไม่ต่างกันมากคือ ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดในแนวรัศมีของความละเอียดกริด 2 และ 4 ล้าน มีค่าต่างกันที่ 0.22% และความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าต่างกัน 0.53% ในส่วนของความเร็วเฉลี่ยสูงสุดในแนวรัศมีของความละเอียดกริด 1 และ 2 ล้าน มีค่าต่างกันที่ 6.26% และความเร็วเฉลี่ยตามเวลาสูงสุดในแนวสัมผัสมีค่าต่างกัน 4.60%

เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณการทดสอบความเป็นอิสระของกริดการคำนวณจะพบว่าความละเอียดกริดการคำนวณที่ 2 และ 4 ล้าน มีผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกันมากในส่วนของความละเอียดกริด 1 ล้าน มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการคำนวณของกริดอื่น ๆ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกกริดที่มีความละเอียด 2 ล้าน ในการคำนวณผลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลภายในถังกวนผสม



รูปที่ 5 การตรวจสอบผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยองค์ประกอบความเร็วในแนวรัศมี (U_r) บนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$

4.2 การตรวจสอบผลการคำนวณเชิงตัวเลข

ผลการคำนวณที่จะนำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยของผลการคำนวณจากเส้นอ้างอิง 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งของเส้นอ้างอิงที่ใช้แบ่งออกเป็น เส้นอ้างอิงในแนวรัศมี r^* และเส้นอ้างอิงตามระยะความสูง z^* ในการนำเสนอผลการคำนวณจะแสดงผลบนเส้นอ้างอิงเหล่านี้

การนำเสนอผลการคำนวณบนเส้นอ้างอิงจะทำการปรับมิติของตัวแปรที่ทำการศึกษาให้เป็นตัวแปรแบบไร้มิติ โดยจะใช้ความเร็วปลายใบพัด (U_{Tip}) ในการปรับมิติของตัวแปรได้แก่ ความเร็วของของไหลจะแสดงด้วยตัวแปรไร้มิติได้เป็น $U^* = U/U_{Tip}$ ขั้นตอนต่อไปคือการตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยลักษณะการไหล การตรวจสอบผลความถูกต้องจะใช้ผลการทดลองของงานวิจัยที่น่าเชื่อถือได้แก่ Weidong Huang & KunLi (2013), Bohus Kysela (2014) และ Zdenek Chara (2016) ในการตรวจสอบเปรียบเทียบ [18-20]

รูปที่ 5 แสดงลักษณะรูปร่างความเร็วในแนวรัศมีบนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ ที่ความเร็วใบพัดที่ 100, 200 และ 300 rpm เทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่น ด้วยการพิจารณาลักษณะรูปร่างความเร็วของกระแสการไหลที่เกิดจากการการผลัดกันจากใบพัด จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปร่าง

ความเร็วในแนวรัศมีทุกกรณีที่ทำการศึกษา และรูปร่างความเร็วจากผลการทดลองของงานวิจัยอื่นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือมีลักษณะเป็นกระแสปุ้งออกจากการผลัดกันของใบพัด ดังนั้นผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ได้จากการคำนวณสามารถใช้เพื่อทำการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลในถึงกวนผสมได้เมื่อเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่นแล้ว

4.3 ลักษณะการกระจายความเร็วบนระนาบ

การศึกษาลักษณะการไหลในขั้นต้นสามารถทำได้ด้วยการใช้ภาพการกระจายความเร็วบนระนาบ ซึ่งง่ายในการสังเกตลักษณะการไหลของกระบวนกรกวนผสมภายในจากรูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายความเร็ว U^* บนระนาบที่ทำการวิเคราะห์ คือ ภาพตัดกึ่งกลางของถังกวนผสมบนระนาบด้านหน้าและระนาบด้านบน สำหรับความเร็วใบพัด 200 rpm รูปที่ 6(a) และ 6(d) ที่ 3 วินาทีที่ระนาบด้านบนจะพบว่ากระแสการไหลจากการผลัดกันจากใบพัดมีความเข้มข้นที่สูงบริเวณปลายใบพัดอย่างชัดเจน โดยที่บริเวณผนังของถังกวนผสมยังคงไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากกระแสมากนัก ที่ระนาบด้านหน้าจะพบกระแสการไหลจากการผลัดกันจากใบพัดที่เข้มข้นบริเวณปลายใบพัด โดยที่บริเวณอื่นๆ กระแสการไหลยังคง

แพร่กระจายไปได้บางส่วนโดยบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของถังกวนผสมยังไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากกระแสการไหล

รูปที่ 6(b) และ 6(e) ที่ 15 วินาที ที่ระนาบด้านบนจะเห็นว่าที่บริเวณใบพัดยังคงส่งกระแสความปั่นป่วนจากผลึกต้นของใบพัดอย่างต่อเนื่องแต่มีความเข้มข้นที่ลดลงมากที่ระนาบด้านหน้าจะพบว่ากระแสการไหลจากการผลึกต้นของใบพัดยังคงถูกส่งออกมาอย่างต่อเนื่องแต่ก็มีความเข้มข้นลดลงเช่นกัน ในบริเวณโดยรอบกระแสความเร็วมีการแพร่กระจายไปได้มากขึ้นโดยเฉพาะบริเวณโดยรอบเพลลา

รูปที่ 6(c) และ 6(f) ที่ 45 วินาที ที่ระนาบด้านบนจะสังเกตว่าบริเวณใบพัดยังคงมีกระแสการไหลที่ถูกผลึกต้นจากใบพัดอย่างต่อเนื่องแต่มีปริมาณความเข้มข้นของกระแสการไหลที่ลดลง โดยลักษณะการกระจายความเร็วมีความใกล้เคียงกับเวลาก่อนหน้านี้นี้มาก ที่ระนาบด้านหน้าจะพบว่ากระแสการไหลที่ถูกส่งออกมายังคงมีความปั่นป่วนสูงบริเวณปลายใบพัด บริเวณโดยรอบกระแสความเร็วมีการแพร่กระจายไปได้โดยรอบของพื้นที่ บริเวณโดยรอบเพลลาจะสังเกตเห็นความเข้มของกระแสความเร็วที่มากขึ้นอย่างชัดเจน

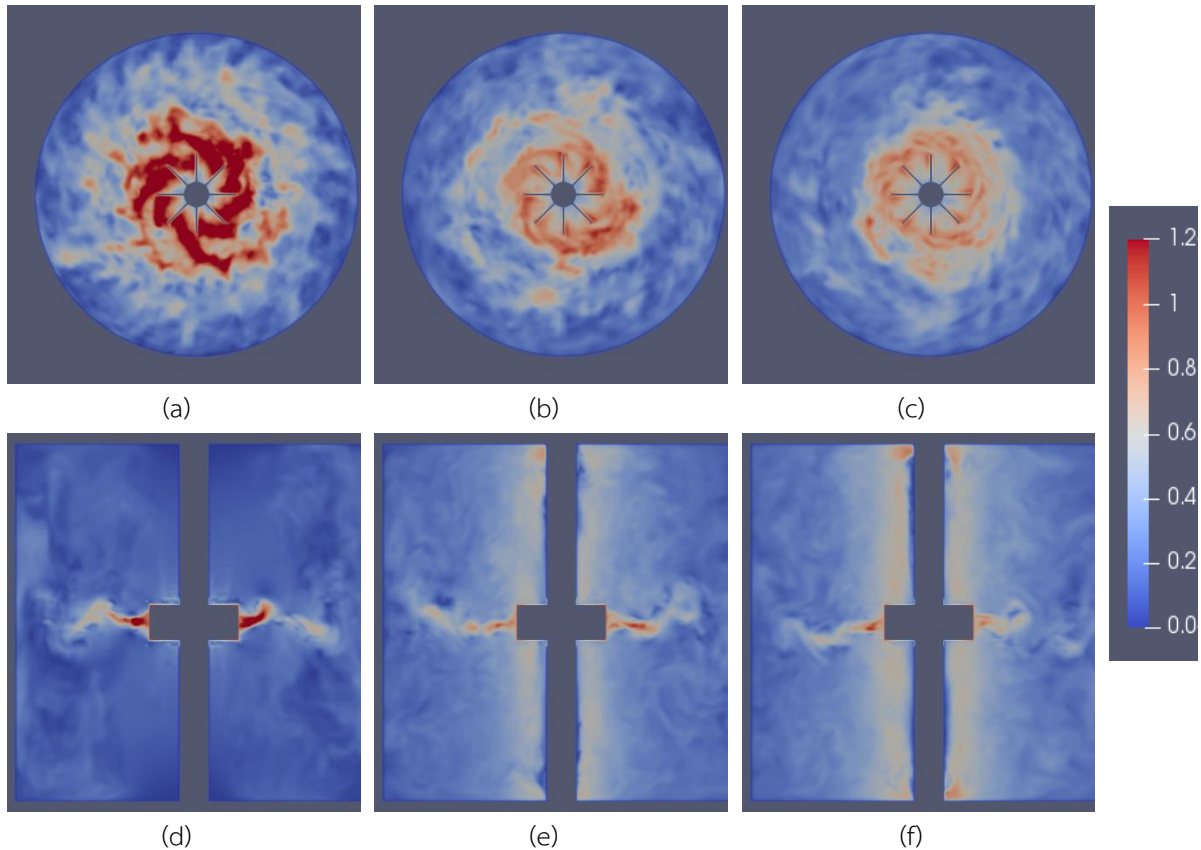
4.4 กระแสการไหลจากใบพัด

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งาน การทราบลักษณะการไหลภายในกระบวนการทำงานเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นในการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลภายใน จะเริ่มด้วยการศึกษาลักษณะการไหลของกระแสการไหลจากการผลึกต้นของใบพัดซึ่งเป็นต้นทางของกระแสการไหลทั้งหมดภายในถังกวนผสม

การศึกษาลักษณะการไหลจะแสดงผลของลักษณะองค์ประกอบความเร็วบนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ สำหรับความเร็วรอบใบพัด 100, 200 และ 300 rpm โดยจะแสดงเทียบผลที่เวลาการกวนผสม 3, 15 และ 45 วินาที เพื่อแสดงลักษณะการไหลและพฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้นภายในขณะทำการกวนผสมของไหล

รูปที่ 7 แสดงลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวรัศมี (U_r) บนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ ที่มีระยะที่ใกล้กับบริเวณปลายใบพัดที่ผลึกต้นกระแสการไหลอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นรูปร่างความเร็วที่แสดงจึงมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือมีลักษณะการพุ่งของกระแสการไหลจากปลายใบพัดที่สูงตลอดเวลา โดยในช่วงต้นของการคำนวณจะสังเกตเห็นลักษณะของกระแสการไหลนี้อย่างชัดเจนเนื่องจากบริเวณโดยรอบยังคงแสดงค่าความเร็วเริ่มต้นจากหยุดนิ่ง เมื่อเวลาผ่านไปกระแสการไหลนี้จะมีรูปร่างความเร็วที่ลดลงแต่ยังคงมีการส่งความปั่นป่วนของกระแสน้ำสิ้นสุดการคำนวณ

รูปที่ 8 แสดงลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{tan}) บนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ มีลักษณะเช่นเดียวกันกับความเร็วในแนวรัศมีก่อนหน้านี้ โดยที่เวลาเริ่มต้นจะเห็นรูปร่างความเร็วของกระแสการไหลที่สูงโดยที่ฐานของรูปร่างความเร็วยังคงต่ำอยู่ เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นการเรียงตัวกันของรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสได้อย่างชัดเจน จนถึงช่วงสุดท้ายของการคำนวณรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของความเร็วใบพัดทั้งหมดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน นี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายความเร็วในแนวสัมผัสของการไหลภายในจากความเร็วหยุดนิ่งจนความเร็วภายในถังกวนผสมมีรูปร่างความเร็วที่ใกล้เคียงกันทุกความเร็วรอบการหมุนของใบพัด



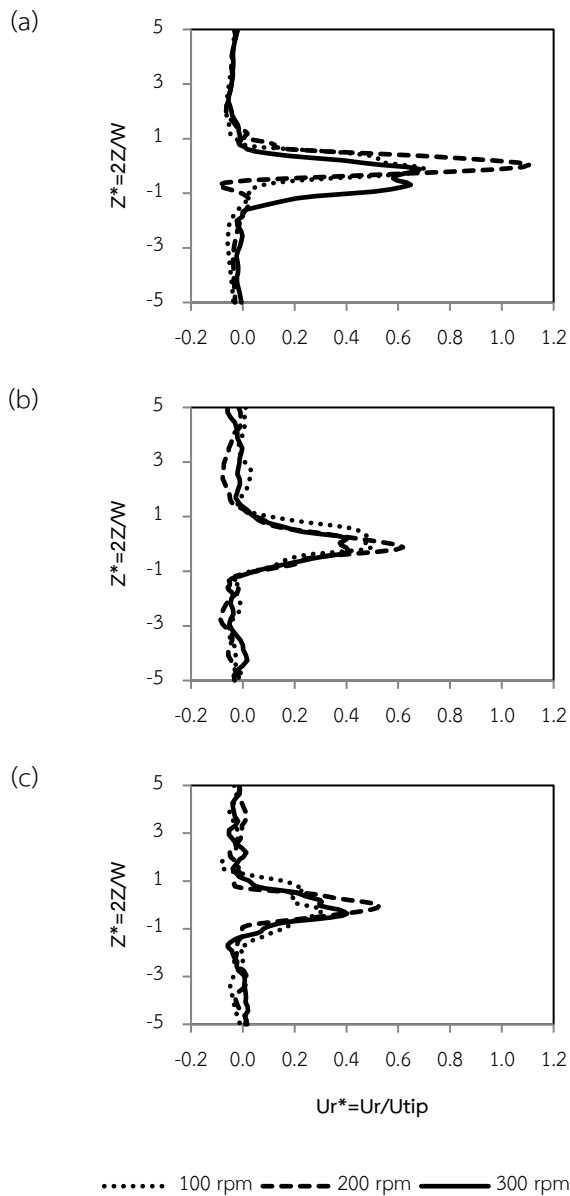
รูปที่ 6 ลักษณะการกระจายขนาดความเร็ว U^* สำหรับความเร็วใบพัด 200 rpm บนระนาบด้านบนที่เวลา (a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที และบนระนาบด้านหน้าที่เวลา (d) 3 วินาที (e) 15 วินาที (f) 45 วินาที

4.5 การกระจายความเร็ว

การศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วของของไหล หลังจากการผลักดันจากใบพัด แสดงผลของรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{tan}) และในแนวแกน (U_{ax}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$ และ $z^* = -7.5$ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของใบพัด สำหรับความเร็วรอบใบพัด 100, 200 และ 300 rpm โดยจะแสดงเทียบผลที่เวลาการกวนผสม 3, 15 และ 45 วินาที เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลและพฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้นภายในขณะทำการกวนผสมของไหล

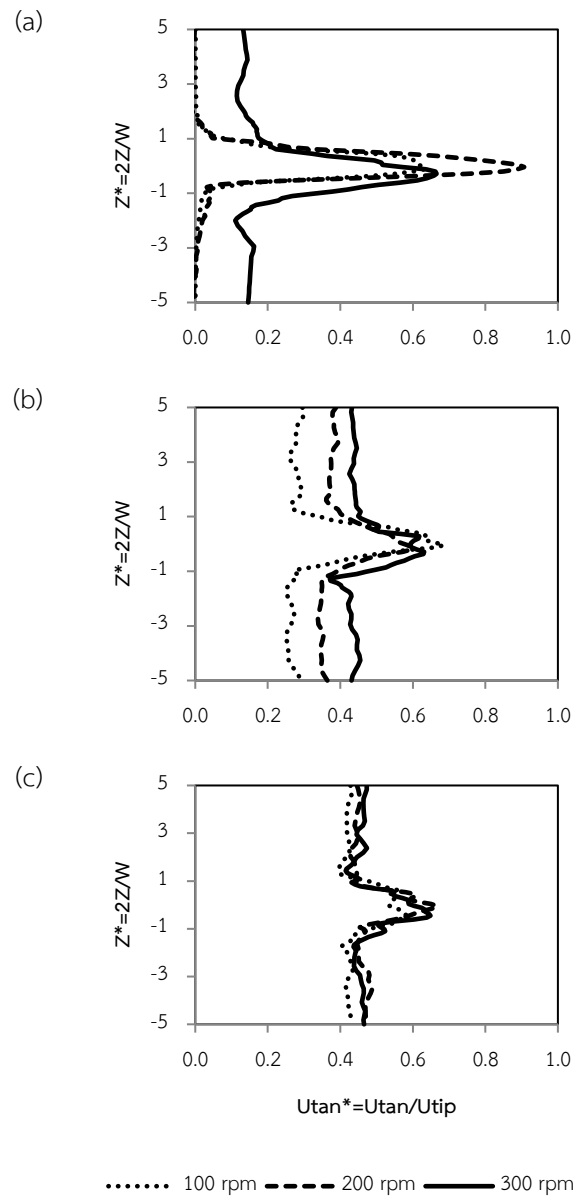
รูปที่ 9 แสดงลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{tan}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$ ที่ตำแหน่งนี้คือบริเวณเหนือใบพัดขึ้นไปที่ยังไม่ถึงกึ่งกลางระหว่างระดับกึ่งกลางใบพัดถึงส่วนบนของถังกวนผสม จะพบว่าในช่วงแรกในบริเวณนี้ยังคงได้รับผลจากการผลักดันของ

ใบพัดที่น้อยมาก และเริ่มสังเกตเห็นรูปร่างความเร็วที่มีการเรียงตัวกันเล็กน้อยจากการได้รับผลจากการกระจายความเร็วที่ต่างกันของความเร็วรอบใบพัด เมื่อเวลาผ่านไป จะเห็นการเรียงตัวของรูปร่างความเร็วที่ได้รับผลการเปลี่ยนแปลงจากการกระจายความเร็วที่ส่งผลถึงบริเวณนี้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยที่ความเร็วใบพัด 300 rpm มีรูปร่างความเร็วที่สูงที่สุดรองลงมาคือที่ความเร็วใบพัด 200 และ 100 rpm ตามลำดับ จนถึงช่วงสุดท้ายของการคำนวณจะสังเกตว่ารูปร่างความเร็วของทุกความเร็วรอบใบพัดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อพิจารณาจะพบว่ารูปร่างความเร็วที่คงรูปจะทำให้ความปั่นป่วนของของไหลลดลงตามไปด้วย



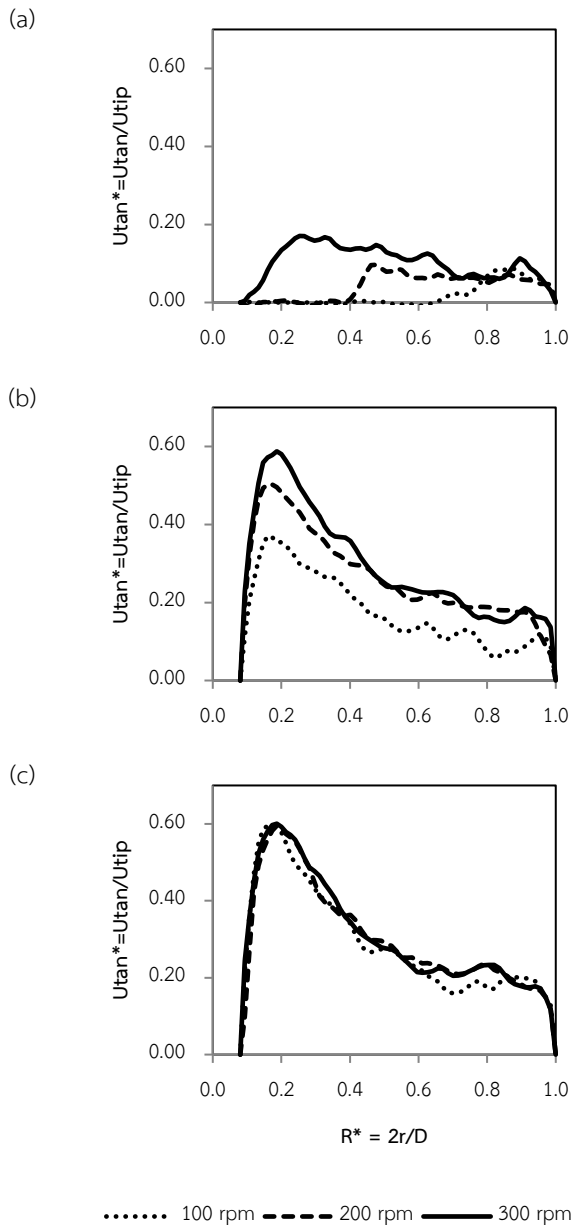
รูปที่ 7 ลักษณะองค์ประกอบความเร็วในแนวรัศมี (U_r) บนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ ที่เวลา (a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที

รูปที่ 10 แสดงลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวแกน (U_{ax}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$ ที่เวลาเริ่มต้นจะสังเกตเห็นว่ากระแสการไหลจากใบพัดที่ถูกส่งมาเมื่อถึงบริเวณผนังได้มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล โดยที่บริเวณเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$ จะมีลักษณะของกระแสความเร็วในทิศพุ่งขึ้นตามแนวผนังของถังกวนผสม ส่วนบริเวณอื่น ๆ ได้รับผลจากการเคลื่อนที่เข้ามากระแสที่พุ่งขึ้นมา โดยจะดัน



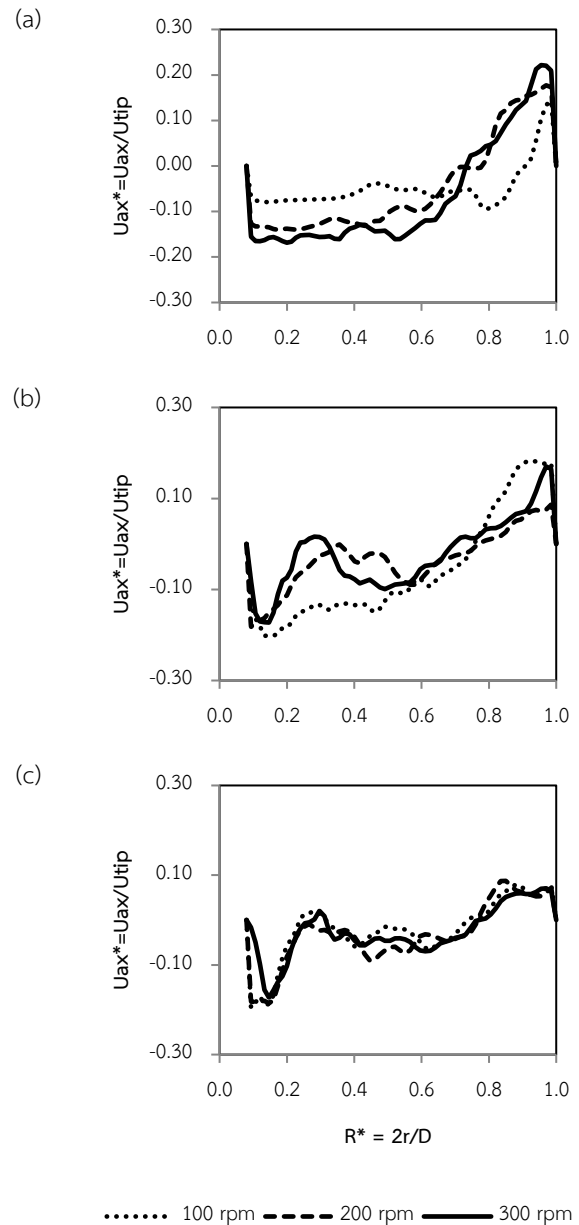
รูปที่ 8 ลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{tan}) บนเส้นอ้างอิง $r^* = 1.2$ (a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที

ของไหลที่อยู่ในส่วนบนให้กลับลงไปในส่วนล่างของเส้นอ้างอิง เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่พุ่งขึ้นตามแนวผนังยังคงมีอย่างต่อเนื่อง มีการกระจายความเร็วจากกระแสการไหลที่บริเวณกลางถึงที่มีการแกว่งตัวของรูปร่างความเร็วจากความปั่นป่วนมากขึ้น



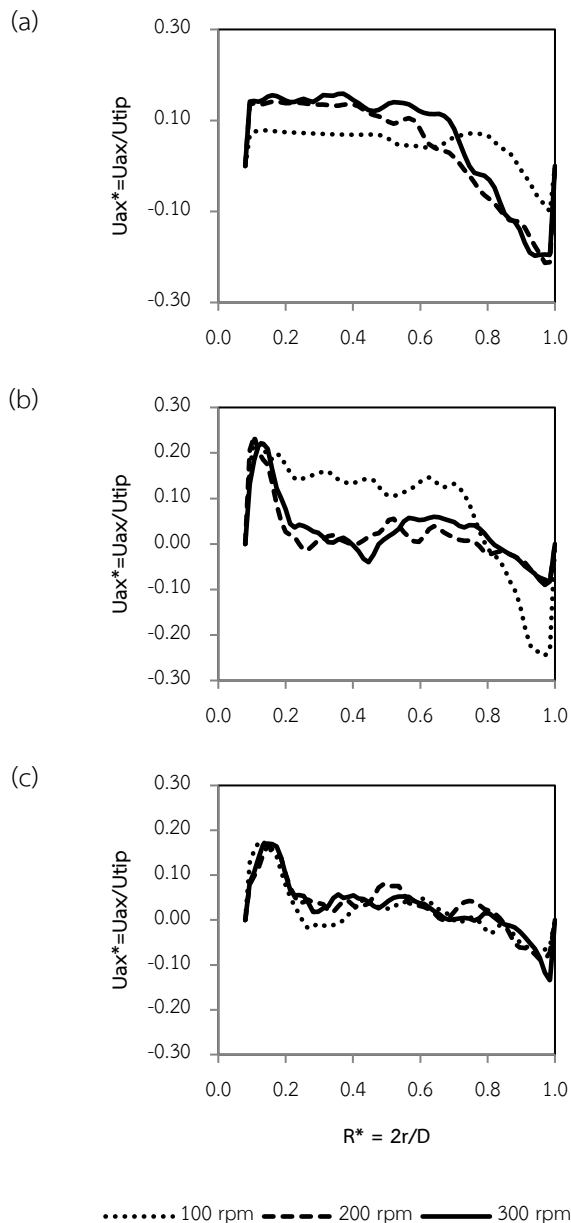
รูปที่ 9 ลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{tan}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$
(a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที

ในบริเวณผนังเพลามีกระแสการไหลในทิศทางพุ่งลงสู่ใบพัด ซึ่งนั่นก็คือกระแสการดูดจากใบพัดที่ดูดของไหลเข้าสู่ใบพัดเพื่อผลักดันออกไป ในช่วงสุดท้ายของการคำนวณจะเห็นว่ารูปร่างความเร็วของทุกความเร็วรอบมีลักษณะที่คล้ายกันโดยมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกันกับในช่วงเวลาก่อนหน้า โดยรูปร่างความเร็วยังคงมีรูปแบบของกระแสการไหลจากใบพัดที่เปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นมา และมีกระแสดูดกลับจากใบพัด



รูปที่ 10 ลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวสัมผัส (U_{ax}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = +7.5$
(a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที

อย่างต่อเนื่อง แต่ในส่วนอื่นจะสังเกตว่ามีลักษณะการแกว่งตัวของความเร็วและลักษณะความเป็นปวนที่ลดลงในทุกความเร็วรอบใบพัด ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลในส่วนบนเหนือใบพัดมีลักษณะของการหมุนวนในทิศวนเข็มนาฬิกาตามกระแสการไหลที่พุ่งขึ้นตามแนวผนังและกระแสการดูดกลับจากใบพัดตามแนวผนังเพลานี้



รูปที่ 11 ลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวแกน

(U_{ax}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = -7.5$

(a) 3 วินาที (b) 15 วินาที (c) 45 วินาที

รูปที่ 11 แสดงลักษณะรูปร่างองค์ประกอบความเร็วในแนวแกน (U_{ax}) บนเส้นอ้างอิง $z^* = -7.5$ ที่เวลาเริ่มต้นจะสังเกตว่ากระแสการไหลที่เปลี่ยนทิศจากการผลักดันของใบพัดที่ขัดผนังของถังกวนผสมในทิศพุ่งลงอย่างชัดเจนและมีการดันของไหลกลับขึ้นไปส่วนบนด้วย เมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นกระแสการดูดของไหลกลับไปยังใบพัดชัดเจนมาก

ขึ้นโดยที่ความเร็วใบพัด 200 และ 300 rpm มีรูปร่างความเร็วของกระแสดูดกลับอย่างชัดเจน ในส่วนของกระแสการไหลจากการเปลี่ยนทิศนั้นยังคงพุ่งลงตามแนวนิ่งยังคงมีอย่างต่อเนื่อง ในช่วงสุดท้ายของการคำนวณจะเห็นว่ารูปร่างความเร็วของทุกความเร็วรอบมีลักษณะที่คล้ายกันโดยมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกันกับในช่วงเวลาก่อนหน้านี้โดยยังคงได้รับกระแสการไหลจากใบพัดที่เปลี่ยนทิศพุ่งลงมา และมีกระแสดูดกลับขึ้นไปสู่ใบพัดอย่างต่อเนื่อง แต่ในส่วนอื่นจะสังเกตว่ามีลักษณะการแกว่งตัวของความเร็วและลักษณะความปั่นป่วนที่ลดลงในทุกความเร็วรอบใบพัด โดยรวมแล้วลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลในส่วนล่างใบพัดมีลักษณะของการหมุนวนในทิศตามเข็มนาฬิกาจากกระแสการไหลที่พุ่งลงตามแนวนิ่งและกระแสการดูดกลับจากใบพัดตามแนวนิ่งเพลาในการสร้างกระแสหมุนวนนี้

4.6 การกระจายพลังงานของการกวนผสม

การอธิบายการกระจายความเร็วภายในถังกวนผสมด้วยผลรวมของพลังงานจลน์ภายในถังขณะทำการกวนผสมจะช่วยอธิบายการกระจายความเร็วภายในถังได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยการรวมค่าพลังงานจลน์ในปริมาตรทั้งหมด ณ เวลาที่ทำการศึกษาแล้วจึงทำการปรับมิติของพลังงานจลน์ให้เป็นตัวแปรแบบไร้มิติในลำดับต่อไป

รูปที่ 12 เมื่อมองไปยังแกนด้านซ้ายมือจะแสดงผลรวมพลังงานจลน์ของการไหลในกระบวนการกวนผสมสำหรับความเร็วใบพัด 100, 200 และ 300 rpm จะพบว่าทุกความเร็วใบพัดมีลักษณะที่คล้ายกันคือ ในช่วงเริ่มต้นจะเป็นช่วงสะสมพลังงานจากการไหลและเมื่อเวลาผ่านไปพลังงานจะคงที่ในที่สุด ความเร็วในการเข้าสู่จุดคงที่จะขึ้นอยู่กับความเร็วใบพัด ในการกวนผสมของถังกวนผสมสิ่งที่เราต้องการคือลักษณะความปั่นป่วนของกระแสการไหลที่เกิดจากการผลักดันจากใบพัดอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งถังเพื่อช่วยในการผสมผสานกันระหว่างกัน การเคลื่อนที่ของของไหลที่มีลักษณะสม่ำเสมอจะทำให้การกวนผสมเสียรูปแบบความปั่นป่วนของกระแสการไหลภายใน จึงทำให้ความสามารถในการกวนผสมลดลงตามไปด้วย เพื่อให้การกวนผสมยังคงรักษารูปแบบความปั่นป่วนไว้ การขับเคลื่อนของใบพัดมีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการสร้างกระแส

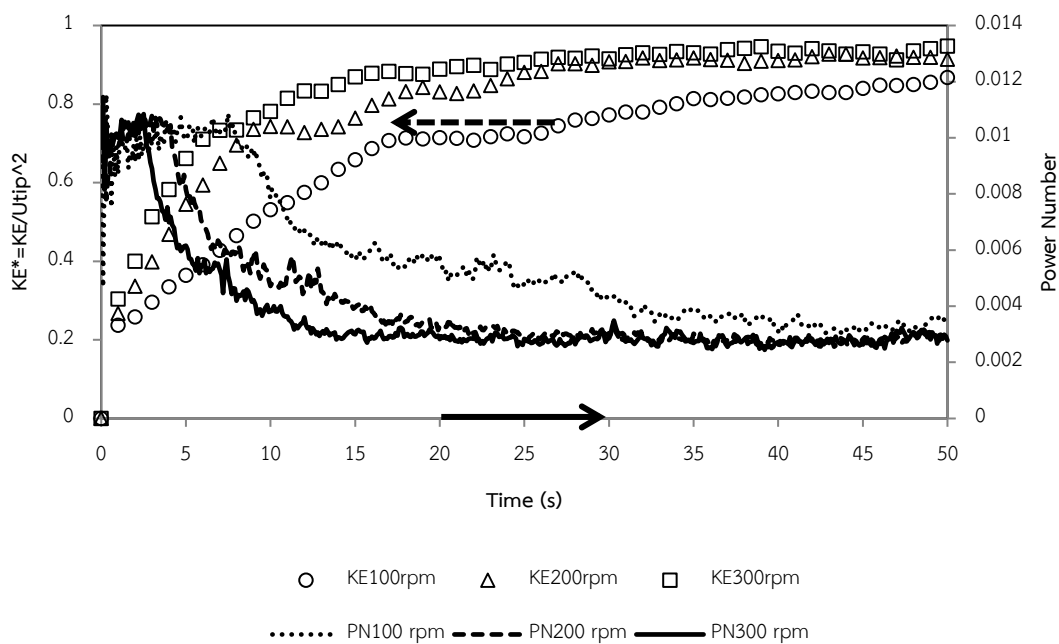
ความปั่นป่วนภายในถัง แต่หากส่งผ่านกระแสการไหลอย่างต่อเนื่องจะทำให้ของไหลภายในมีความเร็วสัมพันธ์กับความเร็วยวี่บพัดที่ลดลงและจะมีความเร็วเข้าใกล้กันเรื่อย ๆ ดังนั้นระยะเวลาในการขับดันของบพัดจึงจะเป็นตัวกำหนดการสร้างรูปแบบการไหลที่สม่ำเสมอ

4.7 การใช้พลังงานในการกวนผสม

ลักษณะการไหลที่เหมาะสมในกระบวนการกวนผสมคือกระแสความปั่นป่วนภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการกวนผสมของถังกวนผสม อีกปัจจัยที่ต้องพิจารณาตามมาคือการใช้พลังงานในการกระบวนการกวนผสม การอธิบายการใช้พลังงานจะแสดงในรูปของ ตัวเลขกำลัง (P_N) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่ช่วยอธิบายแรงต้านทานการหมุนกับแรงเฉื่อยที่ต้านการเคลื่อนที่ของบพัด

รูปที่ 12 เมื่อมองไปยังแกนด้านขวามือจะแสดงลักษณะการใช้พลังงานในขณะทำการกวนผสม สำหรับความเร็วยวี่บพัด 100, 200 และ 300 rpm จะพบว่าในช่วง

ต้นของการคำนวณทุกความเร็วยวี่บพัดจะใช้พลังงานในการทำงานที่สูงโดยที่ความเร็วยวี่บพัด 100 rpm จะมีการใช้พลังงานที่สูงในช่วงแรกนานที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปทุกความเร็วยวี่บพัดจะมีการใช้พลังงานลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยที่ความเร็วยวี่บพัด 100 rpm จะเข้าสู่สภาวะสมดุลช้าที่สุด ถึงแม้ว่าลักษณะของกระแสการไหลที่เหมาะสมคือการเพิ่มความปั่นป่วนให้กับของไหลภายในถังกวนผสม แต่สิ่งที่ต้องแลกมาคือความต้องการใช้พลังงานในการขับดันของไหลจากบพัดที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาความต้องการการใช้พลังงานประกอบในการออกแบบขั้นตอนกระบวนการกวนผสมจึงต้องทำควบคู่ไปพร้อมกับการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลภายใน เพื่อให้การออกแบบถังกวนผสมให้เหมาะกับชนิดของของไหลที่ใช้และวัตถุประสงค์ของการกวนผสมให้มากที่สุด



รูปที่ 12 ผลรวมพลังงานจลน์และการใช้พลังงานในกระบวนการกวนผสม

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (STR) โดยใช้ซอฟต์แวร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) จำลอง

ความปั่นป่วนด้วยแบบจำลองการไหลขนาดใหญ่ (LES) และจำลองการเคลื่อนที่ของบพัดด้วยเทคนิคการเคลื่อนกริด (SM) เริ่มต้นด้วยการศึกษาความเป็นอิสระของกริด

ที่มีผลต่อผลการคำนวณพบว่ากริดความละเอียด 2 ล้านกริด มีความเหมาะสมที่สุดในการศึกษากระแสการไหล โดยพบว่า กระแสการไหลจากการผลัดดันของใบพัด บริเวณปลายใบพัด แสดงลักษณะการไหลที่รุนแรงอย่างต่อเนื่องในกระบวนการ กวนผสม ความเร็วในแนวรัศมี U_r แสดงถึงการส่ง ความกระแสนอกจากใบพัด และความเร็วในแนวสัมผัส U_{tan} แสดงถึงการสร้างกระแสหมุนวนรอบแกนเพลภายใน ถังกวนผสม เมื่อเวลาผ่านไป U_{tan} จะเป็นตัวกำหนดลักษณะ การไหลทั้งหมดภายในถังกวนผสม

การกระจายความเร็วของกระแสการไหลในส่วนบน และส่วนล่างของถัง จะแสดงให้เห็น U_{tan} ที่สร้างกระแส หมุนวนรอบแกนเพลภายในถังกวนผสมอย่างชัดเจน ในส่วนของความเร็วในแนวแกน U_{ax} อธิบายการกระจาย ความเร็วจากใบพัดไปยังส่วนบนและส่วนล่างของถังกวน ผสมที่ทำให้เกิดการหมุนวนของกระแสการไหลจากกระแส จากการผลัดดันจากใบพัดและกระแสดูดกลับสู่ใบพัด

เมื่อทำการกวนผสมอย่างต่อเนื่องจะพบว่าทุก ความเร็วใบพัดที่ทำการศึกษาค่าจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยที่รูปร่างความเร็วจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อีกต่อไป และทำให้สภาวะความปั่นป่วนจากใบพัดใน กระบวนการกวนผสมลดลง และความเร็วในแนวสัมผัส U_{tan} ที่สร้างรูปแบบการหมุนวนรอบแกนเพลตามทิศ ทางการหมุนของใบพัดจะยิ่งลดการเคลื่อนที่ของของไหล ระหว่างกัน สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้การกวนผสมที่ต้องการ ความปั่นป่วนของการไหลลดความสามารถในการกวนผสม

ลงได้ และเมื่อทำการกวนผสมต่อไปจนความเร็วของ ของไหลใกล้เคียงกับความเร็วของใบพัดแล้วจะทำให้ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและใบพัดลดลงตามไป ด้วยจึงส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนมวลและ ความร้อนระหว่างกันจะลดลงไปในกระบวนการกวนผสม

การคงกระแสความปั่นป่วนภายในถังกวนผสม จำเป็นต้องควบคุมกระแสการหมุนวนรอบแกนระหว่างกวน ผสมให้ได้ จึงควรกำหนดเวลาในการกวนผสมเป็นช่วง ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการก่อตัวของกระแสหมุนวนดังกล่าวที่มากเกินไปแต่การกระทำในลักษณะนี้จะต้องใช้พลังงานในการ ขับดับใบพัดที่มากเนื่องจากในช่วงต้นของการกวนผสม เป็นช่วงที่ใช้พลังงานสูงที่สุดจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ของใบพัดในขณะเริ่มต้นที่ของไหลหยุดนิ่ง ความต้องการ พลังงานจะลดลงเมื่อกระแสการไหลมีความเร็วสัมพัทธ์ ใกล้เคียงกับความเร็วใบพัด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ คำแนะนำที่ดี ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้อนุเคราะห์ สถานที่และสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจนประสบผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sbrizzai, F., Lavezzo, V., Verzicco, R., Campolo, M. and Soldati, A. Direct Numerical Simulation of Turbulent Particle Dispersion in an Unbaffled Stirred-Tank Reactor. *Chemical Engineering Science*, 2006; 61(9): 2843-2851.
- [2] Gimbut, J., Rielly, C.D., Nagy, Z.K. and Derksen, J. J. Detached Eddy Simulation on the Turbulent Flow in A Stirred Tank. *AIChE Journal*, 2012; 58(10): 3224-3241.
- [3] Derksen, J. Long-Time Solids Suspension Simulations by means of a Large-Eddy Approach. *Chemical Engineering Research and Design*, 2006; 84(1): 38-46.

- [4] Li, Z., Hu, M., Bao, Y. and Gao, Z. Particle Image Velocimetry Experiments and Large Eddy Simulations of Merging Flow Characteristics in Dual Rushton Turbine Stirred Tanks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2012; 51(5): 2438–2450.
- [5] Gillissen, J. J. and Van den Akker, H. E. Direct Numerical Simulation of the Turbulent Flow in a Baffled Tank Driven by a Rushton Turbine. *AIChE Journal*, 2012; 58(12): 3878–3890.
- [6] Talaga, J. and Fort, I. The Velocity Field in the Discharge Stream from a Rushton Turbine Impeller. The 14th European Conference on Mixing. September 10, Warszawa, Poland, 2012.
- [7] Venneker, B. C., Derksen, J. J. and Van den Akker, H. E. A. Turbulent Flow of Shear-Thinning Liquids in Stirred Tanks-the Effects of Reynolds Number and Flow Index. *Chemical Engineering Research and Design*, 2010; 88(7): 827–843.
- [8] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [9] Kundu, P. Cohen, I. and Dowling, D. Fluid Mechanics. 5th Edition, Elsevier, UK, 2012.
- [10] Rojanaratanangkule, W. Advanced Theories in Fluid Mechanics. Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, 2016.
- [11] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A. and Kresta, S. M. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. John Wiley & Sons, 2004.
- [12] Verzicco, R., Iaccarino, G., Fatica, M. and Orland, P. Flow in an Impeller Stirred Tank Using an Immersed-Boundary Method. *AIChE journal*, 2004; 50(6): 1109-1118.
- [13] Christopher J. OpenFoam User Guide, V5.0. OpenFOAM Foundation Ltd., 2017.
- [14] Murthy, J. Y., Mathur, S. R., and Choudhary, D. CFD Simulation of Flows in Stirred Tank Reactors Using a Sliding Mesh Technique. 8th Europe Conference on Mixing, September 21-23, Cambridge, UK, 1994; 155-162.
- [15] Joshi, J.B., Nere, N.K., Rane, C.V., Murthy, B.N., Mathpati, C.S., Patwardhan, A.W. and Ranade, V.V. CFD Simulation of Stirred Tanks: Comparison of Turbulence Models. Part I: Radial Flow Impellers. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2011; 89(1): 23-82.
- [16] Joshi, J.B., Nere, N.K., Rane, C.V., Murthy, B.N., Mathpati, C. S., Patwardhan, A.W. and Ranade, V.V. CFD Simulation of Stirred Tanks: Comparison of Turbulence Models (Part II: Axial Flow Impellers, Multiple Impellers and Multiphase Dispersions). *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2011; 89(4): 754-816.
- [17] ANSYS FLUENT theory guide: Release 16.2. ANSYS, Canonsburg, Pennsylvania (2013).
- [18] Huang, W., and Li, K. CFD Simulation of Flows in Stirred Tank Reactors Through Prediction of Momentum Source. *Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Other Applications*, 2013: 135-153.
- [19] Kysela, B., Konfrst, J., Fort, I. and Chara, Z. CFD Simulation of the Discharge Flow from Standard Rushton Impeller. *International Journal of Chemical Engineering*, 2014; 706149: 1-7.
- [20] Chara, Z., Kysela, B., Konfrst, J. and Fort, I. Study of Fluid Flow in Baffled Vessels Stirred by a Rushton Standard Impeller. *Applied Mathematics and Computation*, 2016; 272(3): 614-628.