

## ผลกระทบของรูปร่างใบปั่นกววน Rushton ที่มีต่อประสิทธิภาพการผสมด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

### Effect of Rushton turbine shapes on mixing performance by computational fluid dynamics

บารมี เต็มศิริพันธ์<sup>1</sup>, อภินันท์ นัมคณิสสรณ์<sup>1,\*</sup>, ชاکกร เอกะวิภาต<sup>1</sup>, เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ<sup>1</sup> และ สันติ วัฒนานูสรณ์<sup>1</sup>

Barami Tamsiriphan<sup>1</sup>, Apinan Namkanisorn<sup>1,\*</sup>, Charkorn Akavipat<sup>1</sup>, Eakarach Bumrunghaichaichan<sup>1</sup> and Santi Wattananusorn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*ติดต่อ E-mail: apinan.na@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 0818205990

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการผสมของถังปั่นกววนที่ประกอบด้วยใบปั่นกววนที่แตกต่างกัน 3 รูปร่างด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สนามการไหลและความปั่นป่วนภายในถังผสมที่ประกอบด้วยใบปั่นกววน Rushton แบบมาตรฐาน ใบปั่นกววน Rushton แบบรัศมีจานเล็ก และใบปั่นกววน Rushton แบบเจาะรู (perforated blade) ถูกจำลองด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วน Renormalization group k-epsilon (RNGKE) นอกจากนี้สมการการถ่ายโอนองค์ประกอบ (species transport equations) ถูกนำมาใช้เพื่อหาเวลาผสมภายในถังผสมทั้งสามผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของถังผสมที่ประกอบด้วยใบปั่นกววน Rushton มาตรฐานสอดคล้องกับการทดลอง และใบปั่นกววน Rushton แบบเจาะรูให้เวลาผสมน้อยที่สุด

**คำสำคัญ:** พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การผสม, ถังปั่นกววน, ความปั่นป่วน

#### Abstract

The present research studied the mixing performance of stirred tanks with 3 different turbine shapes by using computational fluid dynamics technique. The flow and turbulence fields inside the stirred tanks with standard Rushton turbine, small disc radius Rushton turbine, and perforated blade Rushton turbine were simulated by using Reynolds averaged Navier-Stokes equations with renormalization group k-epsilon turbulence model (RNGKE). Moreover, the

species transport equations were employed to investigate the mixing time inside the vessel. The simulated results revealed that the computational fluid dynamics model of standard Rushton turbine was in good agreement with experiment and the Rushton turbine with perforated blades provided the shortest mixing time.

**Keywords:** Computational fluid dynamics, Mixing, Stirred tank, Turbulence

## บทนำ

หนึ่งในกระบวนการที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมเคมีก็คือกระบวนการการปั่นกวนหรือการผสมของของไหล การปั่นกวนหมายถึงการใช้แรงเชิงกลทำให้ของไหลไหลในรูปแบบหมุนวนหรือในรูปแบบอื่นภายในถัง ส่วนการผสมเป็นการทำให้สาร 2 ชนิดหรือมากกว่าผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การผสมน้ำและแอลกอฮอล์ การละลายเกลือในน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้การผสมสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลและขดลวดความร้อน ใบปั่นกวนที่ใช้ในถังปั่นกวนมีหลายประเภท แตกต่างกันไปตามประเภทการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็น Three-blade propeller agitator Paddle agitators Turbine agitators และ Helical-ribbon agitators เป็นต้น ซึ่งใบปั่นกวนที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการทางเคมีมากที่สุดคือใบปั่นกวน Rushton ซึ่งเป็น Turbine agitators ที่มีใบพัด 6 ใบอยู่บนจานใบปั่นกวน [1] ซึ่งการทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการผสมในถังปั่นกวนนั้นมีข้อเสียคือต้องใช้เวลา ค่าใช้จ่ายสูงและมีความยากลำบากในการวัดตัวแปรบางตัว ในทางกลับกันเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและลำดับวิธีในการแก้สมการควบคุมการไหลภายในถังปั่นกวน ซึ่งจะประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้มากกว่า [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาสนามการไหลและความปั่นป่วนภายในถังปั่นกวนด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Renormalization group k-epsilon (RNGKE) นอกจากนี้ยังใช้สมการถ่ายโอนองค์ประกอบ (Species transport equations) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผสมของใบพัดที่แตกต่างกันสามรูปแบบ คือ ใบปั่นกวน Rushton มาตรฐาน ใบปั่นกวน Rushton ที่มีจานของใบปั่นกวนขนาดเล็ก และใบปั่นกวน Rushton ที่ทำการเจาะรูที่ใบพัด 1 รู

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองสนามการไหลโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ และแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE ซึ่งสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์รูปทั่วไปสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{U}\phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right] + S_\phi \quad (1)$$

โดยรายละเอียดของตัวแปรของสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และแบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดและตัวแปรต่าง ๆ ของแต่ละสมการ

สมการ	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
สมการความต่อเนื่อง	1	0	0
สมการโมเมนตัม	$\bar{u}$	$\mu$	$-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu_i \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_i} \right] + S_{M,i}$
สมการการถ่ายโอน $k$	$k$	$\alpha_k \mu_{eff}$	$G_k + G_b + \rho\varepsilon - Y_M + S_k$
สมการการถ่ายโอน $\varepsilon$	$\varepsilon$	$\alpha_\varepsilon \mu_{eff}$	$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$

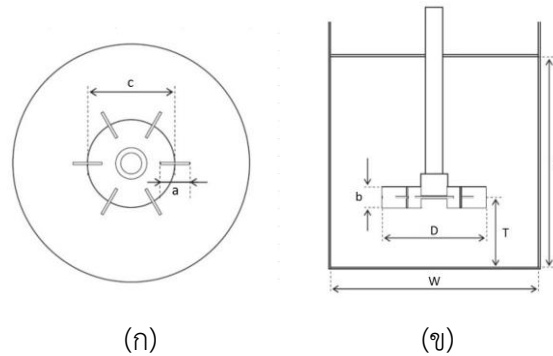
สำหรับการจำลองเพื่อหาเวลาผสม งานวิจัยนี้สังเกตการผสมจากการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตาม (tracer concentration distribution) โดยใช้สมการการถ่ายโอนองค์ประกอบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีในการคำนวณ สมการการถ่ายโอนองค์ประกอบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีแสดงได้ดังสมการที่ (2) [3] และใช้เวลาที่ทำความเข้าใจความเข้มข้นในถังผสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 95 ของความเข้มข้นผสมสมบูรณ์เป็นเกณฑ์กำหนดเวลาผสมของถังปั่นกวน

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + S_i \quad (2)$$

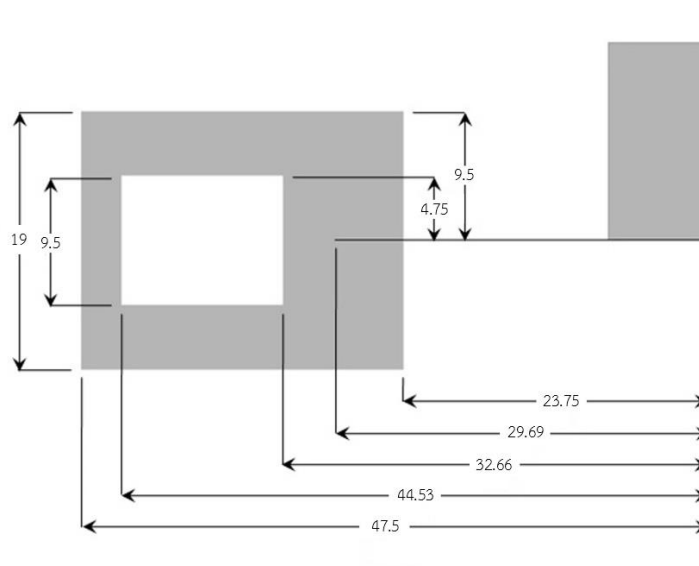
### วิธีการจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองและกริดจะใช้โปรแกรม GAMBIT โดยขนาดของถังผสมอ้างอิงงานของ Alcamo และคณะ [4] ถังปั่นกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (W) 190 มิลลิเมตร ความสูงของถัง (H) 190 มิลลิเมตร และใช้ใบปั่นกวน Rushton ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 95 มิลลิเมตร โดยขนาดของใบปั่นกวนตามมาตรฐานคือ  $a = 23.75$  มิลลิเมตร  $b = 19$  มิลลิเมตร และ  $c = 71.25$  มิลลิเมตร ใบปั่นกวนจะถูกติดตั้งให้สูงจากก้นถัง (T)

63.33 มิลลิเมตร เพลาของใบปั่นกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.3 มิลลิเมตร และมีฝาปิดปากถังเพื่อป้องกันการเกิดการหมุนวนภายในถังดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับใบปั่นกวน Rushton มาตรฐาน (RT1) จะมีขนาดรัศมีของจานใบปั่นกวน 35.625 มิลลิเมตร ส่วนใบปั่นกวน Rushton ที่มีจานของใบปั่นกวนขนาดเล็ก (RT2) จะมีขนาดรัศมี 29.6875 มิลลิเมตร และใบปั่นกวน Rushton ที่ทำการเจาะรูที่ใบพัด 1 รู (RT3) ซึ่งมีขนาดและรายละเอียดดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขนาดพิกัดของถังปั่นกวน (ก) มุมบน (ข) มุมข้าง



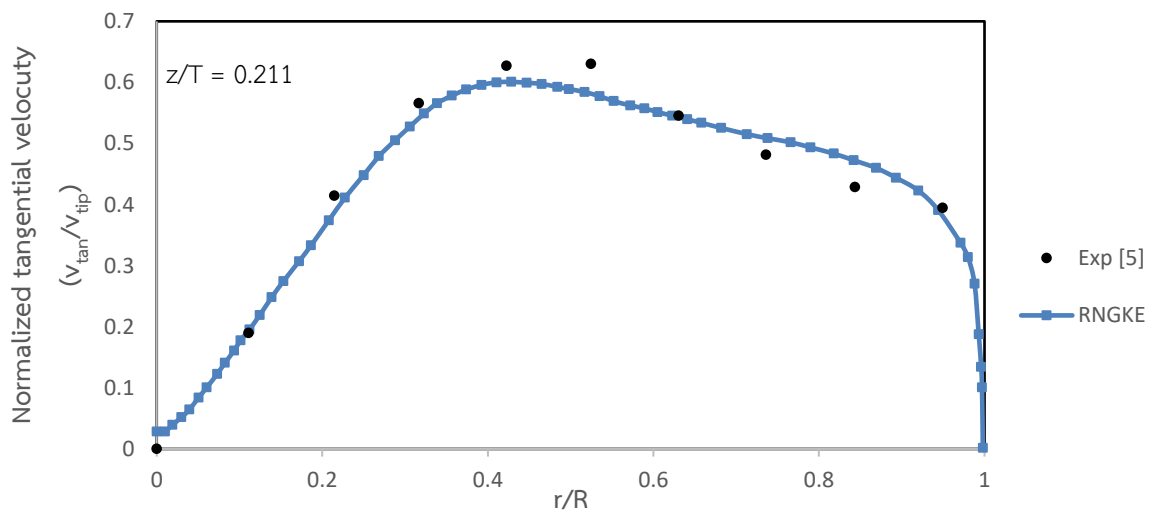
รูปที่ 2 ขนาดพิกัดของใบพัด

ภายในถังจะถูกบรรจุด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วของใบปั่นกวนในการหมุน คือ 200 รอบต่อนาที ซึ่งอ้างอิงมาจากการทดลองของ Vella และคณะ [5] โดยใช้สภาวะขอบเขตแบบไม่เลื่อน (no slip condition) และสมมติเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ อุณหภูมิคงที่ และเป็นของไหลที่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน ซึ่งมีความหนาแน่น 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืด 0.001 นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร

## ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### ผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างใบปั่นกววนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสม ของใบปั่นกววน 3 แบบ คือ RT1 RT2 และ RT3 โดยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT® ซึ่งจำนวนกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นกริดที่เป็นอิสระต่อคำตอบแล้ว (จำนวนกริดที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ) นอกจากนี้รูปแบบความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity profiles) ที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Vella และคณะ [5] เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3

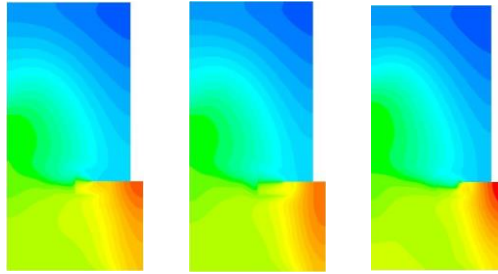


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบแบบจำลอง RNGKE กับผลการทดลองของ Vella และคณะ [5] ที่  $z/T$  เท่ากับ 0.211

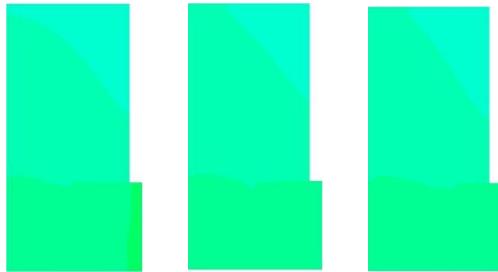
จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าที่  $r/R$  น้อยกว่า 0.5 ค่าความเร็วในแนวสัมผัสไร้หน่วย (normalized tangential velocity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $r/R$  เพิ่มขึ้น และที่  $r/R$  มากกว่า 0.5 ค่าความเร็วในแนวสัมผัสไร้หน่วยจะมีค่าลดลง ซึ่งค่าที่ทำนายสามารถแสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลอง นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างการจำลองและการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองถึงผสมนี้สามารถนำมาใช้เพื่อใช้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของใบปั่นกววนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมได้

เมื่อนำแบบจำลองข้างต้นมาศึกษาประสิทธิภาพการผสมของใบปั่นกววนทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าเวลาผสมเฉลี่ยของใบปั่นกววน RT1 RT2 และ RT3 มีค่าเป็น 11 10.76 และ 10.64 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างของเวลาผสมสามารถอธิบายได้จากรูปแบบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามดังแสดงในรูปที่ 4

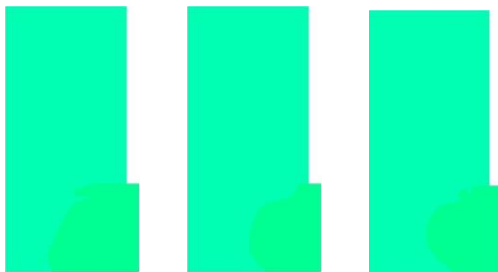
ที่เวลา 3 วินาที



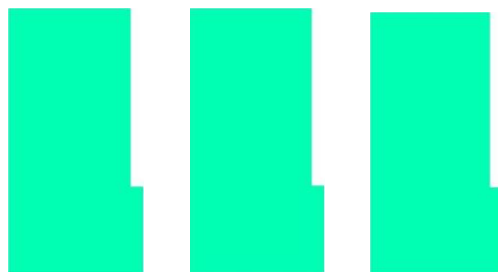
ที่เวลา 6 วินาที



ที่เวลา 12 วินาที



ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4 การกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามในถังปั่นกวานของใบปั่นกวาน RT1 RT2 และ RT3 ที่เวลา 3 6 12 และ 20 วินาที

จากรูปที่ 4 พบว่าถังปั่นกวนที่มีใบปั่นกวน RT2 มีประสิทธิภาพดีกว่า RT1 เนื่องจากรัศมีของจานใบปั่นกวนที่มีขนาดเล็กลงทำให้ของไหลมีพื้นที่ในการสัมผัสกันมากขึ้น จึงนำไปสู่การแลกเปลี่ยนมวลสารที่เพิ่มขึ้น ส่วนถังปั่นกวนที่มีใบปั่นกวน RT3 มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากรูที่เจาะบนใบปั่นกวน กล่าวคือ เมื่อของไหลที่ไหลผ่านรูจะเกิดการไหลเสมือนเจ็ต (jet-like flow) ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านรู (หรือเรียกว่า “เจ็ต”) เหนี่ยวนำของไหลรอบนอกเข้ามาภายในลำของเจ็ต จึงทำให้การผสมมีประสิทธิภาพดีกว่าใบพัดรูปแบบอื่น (RT1 และ RT2)

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างใบปั่นกวนที่มีต่อประสิทธิภาพการผสมด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยสนามการไหล ความปั่นป่วน และเวลาผสม ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ แบบจำลองความปั่นป่วน RNGKE และสมการการถ่ายโอนองค์ประกอบ ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง พบว่าแบบจำลองที่ใช้แสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองและความแตกต่างระหว่างการจำลองและการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าใบปั่นกวนที่มีการเจาะรูให้ประสิทธิภาพการผสมดีที่สุดเมื่อเทียบกับใบปั่นกวนชนิดอื่นที่นำมาศึกษา เนื่องจากใบปั่นกวนที่เจาะรูมีคุณสมบัติเสมือนเจ็ต ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำของไหลรอบนอกมาผสมกับของไหลที่ไหลผ่านรูได้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Unit Operations 4<sup>th</sup> edition*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [2] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics The finite Volume method*. Malaysia: Prentice Hall.
- [3] ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide: Release 15.0*. Pennsylvania, USA: ANSYS Inc.
- [4] Alcamo, R., Micale, G., Grisafi, F., Brucato, A., Ciofalo, M. (2005). Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine. *Journal of Chemical Engineering Science*, 60 (2005), 2303-2316.
- [5] Vella, C., Grisafi, F., Micale, G., Rizzuti, L., Brucato, A. 2003. Near impeller flow field in an unbaffled stirred tank. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> European Conference on Mixing, preprints-VDI-GVD-Bamburg, 14-17 October 2003*, 623-636.