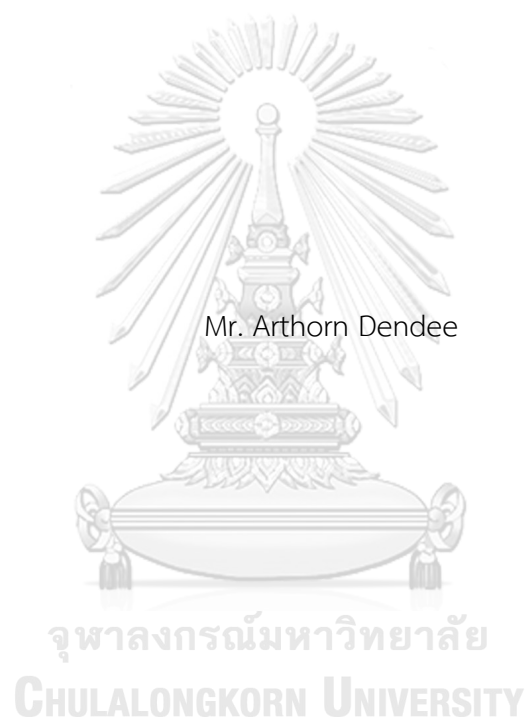


แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับพลังงานที่ใช้ในถังปั่นกวนที่ขนาดไม่เป็นไปตาม  
มาตรฐาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC SIMULATION FOR POWER CONSUMPTION IN NON-  
STANDARD MIXING TANK



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับพลังงานที่ใช้ในถัง ปั่นกววที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน
โดย	นายอาทร เด่นดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)	
.....	กรรมการ
(ดร.พงษ์ธร เจริญศุภนิมิตร)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล)	

อาหาร เต๋นตี้ : แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับพลังงานที่ใช้ในถังปั่นกวนที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน. (

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC SIMULATION FOR POWER CONSUMPTION IN NON-STANDARD MIXING TANK) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช

การศึกษาการไหลภายในถังกวนผสมรวมถึงการคำนวณค่า Power Number (Np) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบถังกวนผสม สามารถทำได้โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k-omega ร่วมกับแบบจำลองการหมุน Sliding Mesh โดยค่า Np ในการไหลแบบราบเรียบจะแปรผกผันกับ Reynolds Number (Re) โดย  $Np = K_L/Re$  แต่ในย่านการไหลแบบปั่นกวนค่า Np จะเป็นค่าคงที่ โดย  $Np = K_T$  โดยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 เป็นการสอบเทียบความเร็วที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine กับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงและสอบเทียบค่า Np ของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine, 45° Pitched blade Turbine และ Retreat Curve ที่ติดตั้งกับถังกวนผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน โดยผลการสอบเทียบความเร็วนั้นให้แนวโน้มและค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ค่า Np ที่คำนวณของย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนนั้นมีร้อยละความแตกต่างกับผลการทดลองไม่เกินร้อยละ 10 รวมไปถึงลักษณะการไหลที่เกิดจากการคำนวณนั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดจากใบปั่นกวนที่นำมาสอบเทียบ สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นการคำนวณหาค่า Np ในระบบถังกวนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน 2 ชนิด ชนิดที่ 1 เป็นระบบถังปั่นกวนที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวนประกอบด้วย ใบปั่นกวนชนิด 45° Pitched blade Disk Turbine 2 ใบที่ส่วนบนและส่วนกลางของถังปั่นกวน และใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ที่ด้านล่างของถังปั่นกวน โดยผลการคำนวณค่า  $K_L$  และ  $K_T$  ของระบบใบปั่นกวนมีค่าเท่ากับ 251 และ 7.21 นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะการไหลในแนวตั้งที่เกิดจากการเสริมกันของใบปั่นกวนทั้ง 3 ใบ ชนิดที่ 2 เป็นระบบถังปั่นกวนที่อ้างอิงจากถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ รวมถึงเครื่องมีอวด เช่น เครื่องมีอวดการละลายของออกซิเจนในถังหมัก เป็นต้น โดยถูกนำมาวิเคราะห์การไหลและค่า Np โดย  $K_L$  และ  $K_T$  ของระบบใบปั่นกวนมีค่าเท่ากับ 192 และ 10.52 ค่า ซึ่งค่า Np ในย่านการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีค่าเป็น 2 เท่าของการติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine เพียง 1 ใบ ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับถังปั่นกวนที่ทำให้เกิดการไหลแบบขนานซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทำงานที่ขนานกันของใบปั่นกวนทั้ง 2 ใบ โดยการปรับลดระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนนั้นทำให้เกิดการไหลแบบแยกออก ซึ่งทำให้ค่า Np นั้นลดลงและมีค่าเท่ากับ 8.61 และการเพิ่มระยะห่างดังกล่าวทำให้เกิดการไหลแบบรวมและมีค่า Np ที่ต่ำที่สุดและมีค่าเท่ากับ 7.88 แต่ค่า Np นั้นไม่ได้บ่งบอกถึงการกระจายตัวของความเร็วในถังปั่นกวน โดยการไหลแบบแยกออกนั้นให้การกระจายตัวของความเร็วที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณากราฟระหว่างความเร็วกับร้อยละอัตราส่วนโดยปริมาตรของของไหล

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970360621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: CFD, Non-standard mixing, Power Number, Scale up

Arthorn

Dendee

:

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC SIMULATION FOR POWER CONSUMPTION IN NON-STANDARD MIXING TANK. Advisor: Asst. Prof. Apinan Soottitantawat, Ph.D.

The study of flow pattern in a mixing tank and Power Number ( $N_p$ ) which is an important parameter for scale-up can be achieved by applying computational fluid dynamics technique. In this study, SST k- $\omega$  was used as a turbulent model. A sliding mesh technique was used as an impeller approach for simulating flow which was generated by the rotation of the impeller. The  $N_p$  in laminar flow regime inversely varied with Reynolds Number ( $Re$ ), which  $N_p$  equal to  $K_L/Re$ . However, in the turbulent flow regime, the  $N_p$  is constant which  $N_p$  equal to  $K_T$ . This work was divided into two parts. Part 1 is a validation of velocity in axial, radial and tangential which generated by Rushton turbine then compared to experimental data from the literature. The  $N_p$  of standard mixing tank equipped with Rushton Turbine, 45° pitched blade turbine and retreat curve impeller were also validated with literature results. The  $N_p$  in laminar and turbulent flow regime compare to experimental data from literature less than 10%. The computational results also reported the characteristic flow of the selected impeller. Part 2 is  $N_p$  calculation for non-standard mixing tank equipped two types of the impeller. The first one is the impeller system including three impellers which are 45° Pitched blade disk Turbine at top and middle of the tank also retreat curve impeller at the bottom tank. The computational results of  $K_L$  and  $K_T$  were 251 and 7.21, respectively. The flow pattern shown the axial flow generated from the flow enhancement by the three impellers. The second is the fermenter which is the mixing tank equipped dual Rushton turbine and internal oxygen and pH detector probe. The computational results of  $K_L$  and  $K_T$  were 192 and 10.52, respectively. The  $N_p$  in the turbulent flow regime is twice as much comparing with using only a single Rushton turbine. This was due to the adjustment of the impeller spacing and the impeller clearance which caused the parallel flow. The parallel flow pattern showed that the dual impeller worked parallelly. Reducing impeller clearance from based case cause diverging flow and the  $N_p$  was 8.61 and increasing impeller clearance cause merging which yields the lowest  $N_p$  and equal to 7.88. However, the value of  $N_p$  did not affect the distribution of the velocity in the mixing tank. The diverging flow showed the best velocity distribution compared to the others by considering the graph between velocity and liquid volume fraction.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จได้ถ้าขาดการสนับสนุนจาก ผศ.ดร. อภินันท์ สุทธิธรรธวัช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงเป็นอาจารย์ที่สร้างแรงบันดาลใจให้ผู้วิจัยเริ่มสนใจการจำลอง (Simulation) ไม่ว่าจะเป็นการจำลองระบบกระบวนการผลิต รวมถึงการจำลองที่ลงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนี้อาจารย์ได้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยไปเรียนรู้นอกสถานที่เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ รวมถึงอบรมให้มีจรรยาบรรณของวิศวกรที่ดี

ขอขอบ ศ. ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง รศ. ดร. สุนันท์ ลิ้มตระกูล, ผศ. ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และ ดร. พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร ให้เกียรติมาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำรวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาในการศึกษาต่อปริญญาโทของผู้ทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท โกลบอล อาร์แอนด์ดี จำกัด ที่สนับสนุนสถานที่และทรัพยากรในการทำวิจัยรวมถึงทุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบิดาและมารดาที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจผู้ทำวิจัย รวมถึงไม่หมดศรัทธาในตัวผู้ทำวิจัย และเชื่อว่าการเรียนปริญญาโทของผู้ทำวิจัยนั้นเป็นการสร้างอนาคตที่ดี

อาทร เต็นดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหา.....	1
1.2 พื้นหลังของการศึกษา .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตของการศึกษา .....	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบททบทวนวรรณกรรม.....	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	11
2.1.1 องค์ประกอบของถังผสม.....	11
2.1.1.1 ชนิดของ Bottom Tank.....	11
2.1.1.2 ชนิดของใบพัด.....	11
2.1.1.2.1 การไหลแบบ Axial Flow.....	11
2.1.1.2.2 การไหลแบบ Radial Flow .....	12
2.1.1.2.3 การไหลแบบ Tangential Flow.....	12
2.1.1.3 สัดส่วนตามมาตรฐานของถังกวนผสม (Standard Tank).....	13
2.1.2 ค่า Reynolds Number สำหรับถังกวนผสม.....	13
2.1.3 พลังงานที่ใช้ในการผสมสาร.....	14

2.1.3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้หน่วยสำหรับการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการผสมสาร.....	15
2.1.4 สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหล.....	17
2.1.4.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	17
2.1.4.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	17
2.1.4.3 สมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบราบเรียบ .....	18
2.1.4.4 การไหลแบบปั่นป่วน .....	18
2.1.5 แบบจำลองความปั่นป่วน.....	20
2.1.5.1 แบบจำลอง k- $\epsilon$ .....	20
2.1.5.2 เงื่อนไขขอบของแบบจำลอง Standard k- $\epsilon$ .....	21
2.1.5.3 แบบจำลอง k - $\omega$ .....	23
2.1.5.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง k - $\omega$ .....	23
2.1.5.5 แบบจำลอง SST k - $\omega$ .....	24
2.1.6 แบบจำลองการหมุนของใบปั่นกววน .....	27
2.1.6.1 การไหลในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ (Flow in Moving Reference Frame) ...	27
2.1.6.2 การคำนวณ time Step เพื่อใช้ในจำลองการหมุนของใบปั่นกววนแบบ Sliding Mesh .....	28
2.2 บททบทวนวรรณกรรม.....	29
2.2.1 ผลของแบบจำลองการหมุนของใบปั่นกววน .....	29
2.2.2 ผลของการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน .....	30
2.2.3 ผลของแบบจำลองความปั่นป่วนต่อ Turbulent Kinetic Energy: k และ Turbulent Dissipation rate: $\epsilon$ .....	31
2.2.4 การทำนาย Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบ .....	32
2.2.5 การทำนาย Power Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วน .....	34



2.2.5.1	ผลของความหนาของใบปั่นกววนต่อค่า Power Number .....	34
2.2.5.2	การทำนายค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ...	34
2.2.5.3	การทำนายค่า Power number ของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine .....	35
2.2.5.4	การทำนายค่า Power number ของใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve Impeller.....	36
2.2.5.5	การทำนายค่า Power number ของถังกวนผสมที่ไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน.....	36
บทที่ 3	การทำวิจัย .....	43
3.1	แผนการทดลอง .....	43
3.1.1	แผนการสอบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง .....	43
3.2	ขั้นตอนการทำวิจัย.....	44
3.2.1	กระบวนการก่อนการคำนวณ .....	44
3.2.1.1	การวาดรูป 3 มิติ.....	44
3.2.1.2	การพิจารณาปริมาตรของระบบ .....	44
3.2.1.3	การสร้างปริมาตรควบคุม (Meshing).....	44
3.2.1.3.1	กระบวนการ Sweep (Sweep Method).....	45
3.2.2	การคำนวณ .....	45
3.2.2.1	ค่าเริ่มต้น (Initial Guess).....	45
3.2.2.2	คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการจำลองการไหล .....	45
3.2.2.3	เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	46
3.2.2.4	การกำหนดจำนวนรอบการหมุนวนต่อ time step.....	48
3.2.2.5	การหยุดการคำนวณ.....	49
3.2.3	กระบวนการหลังการคำนวณ.....	49
3.2.3.1	การแสดงผลความเร็ว.....	49

บทที่ 4 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานและการสอบเทียบผลการทดลอง ..... 50

4.1 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine ..... 50

4.1.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวน ..... 50

4.1.2 ผลการสร้างปริมาตรควบคุม (Meshing)..... 50

4.1.3 การสอบเทียบผลการทดลองของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine ..... 56

4.1.3.1 ความเร็วที่วัดได้จากผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989)..... 56

4.1.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณความเร็วในแต่ละแกนกับความเร็วรอบหมุน..... 57

4.1.3.2.1 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวตั้ง..... 57

4.1.3.2.2 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวรัศมี..... 60

4.1.3.2.3 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวสัมผัส..... 63

4.1.3.3 การสอบเทียบค่า Power Number ..... 67

4.1.4 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine..... 67

4.2 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด 45° Pitched Blade Turbine ..... 71

4.2.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวน ..... 71

4.2.2 การสอบเทียบผลการทดลองของใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine ..... 72

4.2.3 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Pitch Blade Turbine ..... 72

4.3 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve..... 76

4.3.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวน ..... 76

4.3.2 การสอบเทียบผลการทดลองของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ..... 77

4.3.3 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ..... 81

4.4 การเปรียบเทียบการไหลและการกระจายตัวของความเร็วในกังวณผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ใบปั่นกวนต่างชนิด ..... 84

4.4.1 การพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็ว .....	84
4.4.2 การพิจารณากราฟระหว่างความสูงไร้หน่วยและความเร็วไร้หน่วย .....	86
4.4.3 การพิจารณากราฟการกระจายตัวของความเร็วกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลภายในถังกวนผสม .....	87
บทที่ 5 ผลการจำลองการไหลของถังปั่นกวนที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน .....	89
5.1 ผลการจำลองการไหลของถังกวนผสมที่ใช้ระบบใบปั่นกวน .....	89
5.1.1 รูปร่างและขนาดของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน .....	89
5.1.2 ลักษณะการไหลภายในถังกวนผสมที่ใช้ระบบใบปั่นกวน .....	91
5.1.3 ผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน .....	95
5.1.4 การเปรียบเทียบการทำให้มุมระหว่าง 45° Pitched Blade Disk Turbine .....	98
5.2 ผลการจำลองการไหลภายในถังหมัก .....	102
5.2.1 รูปร่างและขนาดของถังหมัก .....	102
5.2.2 ลักษณะการไหลภายในถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ .....	103
5.2.3 ผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน .....	109
5.2.4 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลและ Power Number ในถังหมักที่มีเครื่องมือวัดและไม่มีเครื่องมือวัด .....	111
5.2.4.1 ลักษณะการไหลของถังหมักที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด .....	111
5.2.4.2 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระนาบตัดขวางที่ 2 (Velocity Gradient) .....	118
5.2.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวตั้ง .....	118
5.2.4.2.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวรัศมี .....	118
5.2.4.2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวสัมผัส .....	119
5.2.4.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระนาบตัดขวางที่ 4 (Velocity Gradient) .....	120

5.2.4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวตั้ง.....	120
5.2.4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวรัศมี.....	120
5.2.4.3.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวสัมผัส.....	121
5.2.5 การเปรียบเทียบผลของระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนต่อลักษณะการไหลและค่า Power number.....	122
5.2.5.1 อัตราส่วน $C1/T = 0.313$ , $C2/T = 0.437$ และ $C3/T = 0.25$ .....	123
5.2.5.2 อัตราส่วน $C1/T = 0.165$ , $C2/T = 0.585$ .....	125
5.2.5.3 อัตราส่วน $C1/T = 0.387$ , $C2/T = 0.362$ .....	127
5.2.6 การขยายขนาดถึงปั่นกววน.....	133
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ.....	141
6.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	141
6.1.1 การสอบเทียบผลการทดลอง.....	141
6.1.2 การใช้พลศาสตร์การไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการคำนวณ Power Number ของกังววนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน.....	142
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	145
ภาคผนวก ก ผลการสร้างปริมาตรควบคุม.....	146
ก.1 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine.....	146
ก.2 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve.....	148
ก.3 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของระบบใบปั่นกววน.....	150
ก.3 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังหมัก.....	152
ภาคผนวก ข ผลการจำลองการไหลที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	154
ข.1 ผลการจำลองการไหลที่เกิดจากการหมุนของระบบใบปั่นกววนที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	154
ข.2 ผลการจำลองการไหลภายในถังหมักที่ความเร็วรอบต่างกัน.....	162
ภาคผนวก ค คำอธิบายสัญลักษณ์.....	169

บรรณานุกรม.....	171
บรรณานุกรม.....	174
ประวัติผู้เขียน.....	175



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาของปัญหา

ถึงกวนผสมเป็นหน่วยปฏิบัติการที่ทำหน้าที่ได้หลากหลายในหลากหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากความยืดหยุ่นในการดำเนินการ ตัวอย่างของการใช้ถึงผสมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เป็นถึงกวนผสมในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยทำหน้าที่เป็นถึงเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler-Natta สำหรับปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์เซชันของเอทิลีน (Senso et al., 2011) หรือเป็นเครื่องปฏิกรณ์ในปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์เซชัน หรือในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น ในการผสมของเหลว 2 ภูมิภาคให้เป็นเนื้อเดียวกันในการผลิตครีมทาผิว รวมถึงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมยาน นอกจากนี้ถูกใช้ในการสกัดแร่ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาในการออกแบบถึงกวนคือการขยายขนาดโดยเฉพาะการหาความเร็วในการปั่นกวนที่เหมาะสมในกรณีที่ถึงกวนผสมมีขนาดต่างกันโดยการใช้กฎการขยายขนาดซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นตัวควบคุม (Limiting Process) โดยการออกแบบถึงกวนผสมนั้นโดยทั่วไปจะใช้สมการจากการทดลอง (Empirical Equation) ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบพลังงานที่ใช้ในการผสมสารรวมถึงเป็นหนึ่งในกฎของการขยายขนาดโดยให้พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนต่อปริมาตรเป็นค่าคงที่ (Sulc & Dittl, 2017) แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมสารต่อปริมาตรนั้นเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการหาตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบตัวอื่น เช่น การหาอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนในการหมัก (Garcia-Ochoa & Gomez, 2009) เป็นต้น ซึ่งการหาพลังงานที่ใช้ในการผสมสารนั้นสามารถทำได้โดยการหาค่า Power Number ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสมกับพลังงานที่กระจายตัวในถึงกวนผสม ( $N_p = P/N^3 D_a^5 \rho$ ) ของใบพัดที่ใช้ดำเนินการในกรณีของการออกแบบถึงกวนผสมที่เป็นไปตามมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ถึงกวนผสมไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน ในกรณีดังกล่าวนี้ส่งผลให้การหาค่า Power number มีความซับซ้อนกว่าในกรณีที่ถึงกวนผสมเป็นไปตามมาตรฐานอย่างมาก ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสร้างถึงกวนผสมในลักษณะที่ไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐานและทำการทดลองเพื่อหาค่า Power Number แต่การทำดังกล่าวจะถูกจำกัดด้วยรูปแบบใบปั่นกวนที่สั่งทำขึ้นมา หรืออีกวิธีหนึ่งในการหา Power Number คือการใช้หลักการคำนวณพลศาสตร์ของไหลหรือ Computational Fluid Dynamics : CFD ซึ่งเป็นการแก้สมการการไหลเพื่อศึกษาการไหลในถึงกวนผสม

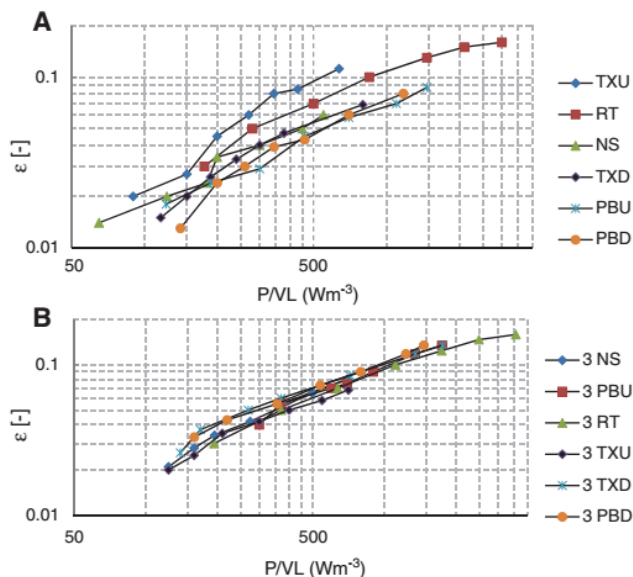
การคำนวณ CFD นั้นเป็นการแก้สมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ (Transport Phenomena) การโดยการแบ่งระบบที่ทำการศึกษาเป็นปริมาตรควบคุม (Control Volume) หรือเป็นการ Meshing เมื่อพิจารณาเฉพาะการไหล ภายในแต่ละปริมาตรควบคุมสมการการไหลจะแบ่ง (Discretized) กล่าวคือสมการการไหลที่ต่อเนื่องนั้นจะถูก

แบ่งตามปริมาตรควบคุมและถูกแก้โดยใช้ขั้นตอนวิธี เช่น วิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) แต่เนื่องด้วยการไหลภายในถังกวนผสมส่วนใหญ่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การใช้สมการ Navier-Stokes เพื่อทำนายการไหลแบบสามารถทำได้โดยการใช้วิธี Direct numerical Simulation หรือ DNS แต่ขนาดของปริมาตรควบคุมนั้นต้องความละเอียดสูงรวมถึงการซับซ้อนของการคำนวณส่งผลให้เวลาที่ใช้ ทำให้วิธีดังกล่าวไม่เหมาะสมในอุตสาหกรรม โดยวิธีที่มีความแม่นยำที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้นั้นคือการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน การไหลแบบปั่นป่วนสามารถพิจารณาให้อยู่ในสองรูปแบบคือการไหลเฉลี่ย (Mean Flow) และการไหลแบบผันผวน (Fluctuation) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนเป็นเครื่องมือที่ใช้ทำนายการไหลแบบผันผวน แบบจำลองความผันผวนในกลุ่มของ Reynolds Average Navier-Stokes หรือ RANS เป็นแบบจำลองที่คิดความผันผวนในรูปของความเครียด ซึ่งโดยแก่นของแบบจำลองในกลุ่มนี้คือการทำนายความเครียดดังกล่าว เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ใช้สมมติฐานให้ความผันผวนเหมือนกันในทุกทิศทางหรือ Isotropic แบบจำลองย่อยในกลุ่ม RANS ที่ใช้สมมติฐานดังกล่าวคือแบบจำลองในกลุ่ม k-epsilon และ กลุ่ม k-omega ซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณที่ต่างกันและมีข้อดีข้อเสียที่ต่างกันโดยในแบบจำลองในกลุ่ม k-epsilon การคำนวณการไหลที่บริเวณกำแพงจะใช้ฟังก์ชันเฉพาะที่ใช้ได้ในทุกกรณี (Universal Wall Function) ซึ่งส่งผลให้ความแม่นยำของการคำนวณน้อยกว่าการใช้แบบจำลองที่แก้สมการแบบจำลองโดยตรงของการคำนวณโดยใช้แบบจำลองในกลุ่ม k-omega (Versteeg & Malalasekera, 1995) แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของแบบจำลองในกลุ่ม k-omega คือการใช้ขอบเขตของการไหลที่เป็นการไหลแบบอิสระ (free-Stream) การพิจารณาใช้แบบจำลองผสมระหว่างแบบจำลอง k-epsilon และ k-omega หรือแบบจำลอง Shear Stress Transport : SST จะสามารถทำนายการไหลในถังกวนผสมรวมถึงใช้หาพลังงานที่ใช้ในการผสมสารเพื่อเป็นข้อมูลในการขยายขนาดและสามารถตอบโจทย์ของอุตสาหกรรมในการออกแบบถังกวนผสม (M. Li et al., 2004)

## 1.2 พื้นหลังของการศึกษา

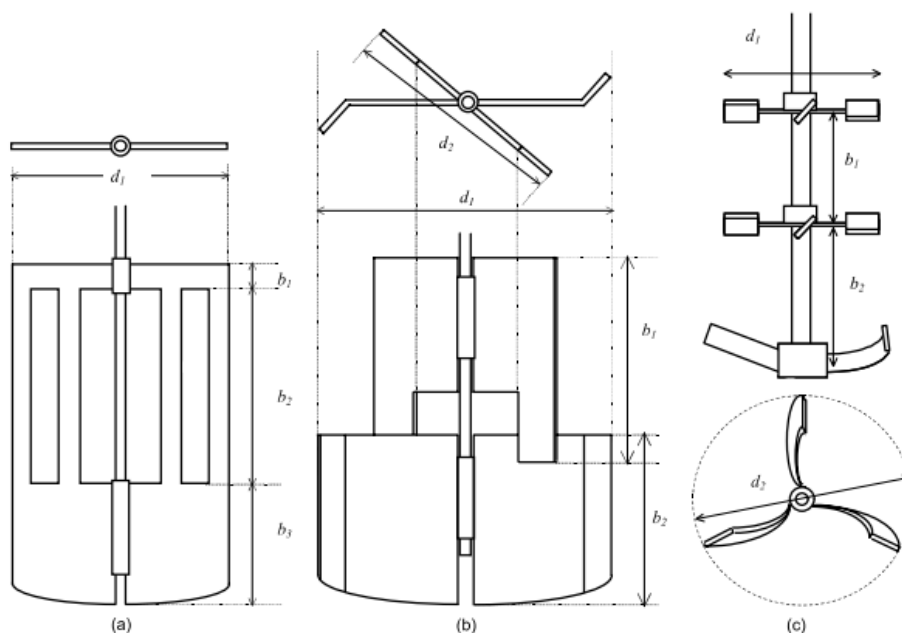
การออกแบบถังกวนผสมเพื่อให้บรรลุเป้าหมายในบางครั้งการใช้ใบปั่นกวนเพียงใบเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการปั่นกวนผสมสาร เช่นในกรณีของการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนสารระหว่างแก๊สและของเหลวในถังกวนผสม การใช้ใบปั่นกวนมากกว่า 1 ใบส่งผลให้การหน่วงเหนี่ยวแก๊ส (Gas Hold-up) เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ใบพัดกวนเพียง 1 ใบ (You et al., 2014) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 1.1





รูปที่ 1.1 พฤติกรรมของการหน่วงเหนี่ยวของแก๊สในกรณีของใบพัดเดี่ยว (A) และระบบ 3 ใบพัด (B) กับค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววน TXU Hydrofoil impeller up flow, TXU Hydrofoil impeller Down flow, RT Rushton turbine, PBU Pitched Blade Turbine Up flow, PBD Pitched Blade Turbine Down flow (You et al., 2014) โดยที่  $\epsilon$  คือ การหน่วงเหนี่ยวแก๊ส (Gas Hold-up), P คือพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนผสม และ VL คือปริมาตรของของเหลว

การปั่นกววนผสมสาร 3 วัฏภาคหรือการปั่นกววนผสมแก๊ส, ของเหลว และของแข็ง ในกรณีของถังปฏิกรณ์ โพลีเมอไรเซชัน การการใช้ใบปั่นกววนเพียงใบเดียวนั้นอาจไม่สามารถสร้างการกระจายตัวของสารทั้ง 3 วัฏภาคในถังปฏิกรณ์ได้ (Dohi et al., 2004) ได้เปรียบเทียบการใช้เลือกใช้ใบปั่นกววนชนิด Maxblend, Full Zone และระบบใบปั่นกววนที่ประกอบด้วย 2 pitched Blade Turbine และ Retreat Curve Impeller โดยลักษณะของใบปั่นกววนทั้ง 3 ชนิดนั้นแสดงใน รูปที่ 1.2 จุดประสงค์ของการใช้ใบปั่นกววนทั้ง 3 ชนิดคือเพื่อใช้ในการปั่นกววนสารทั้ง 3 วัฏภาคและศึกษาการกระจายตัวของของแข็งและแก๊สรวมถึงพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววน ถึงแม้ว่าใบปั่นกววนชนิด Maxblend นั้นจะทำให้เกิดการกระจายตัวของของแข็งได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 ใบพัด แต่ข้อดีของการใช้ระบบใบปั่นกววนคือสามารถออกแบบและปรับระยะห่างระหว่างใบพัดได้



รูปที่ 1.2 ใบปั่นกวนเพื่อใช้ในการผสมสารหลายวัฏภาค (a) ใบปั่นกวนชนิด Maxblend, (b) ใบปั่นกวนชนิด Fullzone และ (c) ระบบใบปั่นกวนที่ประกอบด้วย 2 pitched Blade Turbine และ Retreat Curved Impeller (Dohi et al., 2004)

การหาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนนั้นส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองและถูกสรุปไว้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วย ซึ่งจะถูกรวบรวมด้วยรูปทรงของใบปั่นกวนหรือในกรณีของใบปั่นกวนหลายใบนั้นระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนรวมถึงความสูงของของเหลวที่ใช้ในการดำเนินการจะเป็นอีกข้อจำกัดหนึ่งในการใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวน (Chunmei et al., 2008) เพราะฉะนั้นการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนของสารนั้นซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบถังกวนผสมในกรณีที่มีหลายพัดหลายใบนั้นอาจจะทำได้โดยการใช้การทดลอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของใบพัดเพื่อให้ตัวแปรที่สำคัญตัวอื่น ตัวอย่างเช่น อัตราการแลกเปลี่ยนของสารระหว่างแก๊สกับของเหลวเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องสร้างใบพัดขึ้นมาเพิ่มเพื่อใช้ในการทดลอง แต่การใช้ CFD นั้นสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรง, รูปแบบ รวมถึงขนาดและจำนวนของใบพัดได้ทันทีเพื่อศึกษาค่าพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสม

ปัญหาในการขยายขนาดของถังกวนผสมจากขนาดที่ใช้ในห้องทดลอง (Laboratory Scales) ให้เป็นขนาดในอุตสาหกรรม (Industrial Scale) คือการหาความเร็วรอบของการปั่นกวนในขนาดอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของผลิตภัณฑ์เหมือนกับขนาดที่ใช้ในห้องทดลอง โดยสิ่งที่สำคัญของการขยายขนาดคือความเข้าใจในปรากฏการณ์ซึ่งเมื่อพิจารณาการขยายขนาดของถังหมัก (Fermenter) ปัจจัยที่จำกัดปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังหมักคือ

อัตราการถ่ายโอนของแก๊สออกซิเจนจากอากาศไปยังของเหลว โดยแสดงในสมการที่ Error! Reference source not found. ดังนี้

$$N_{O_2} = k_L a \cdot (C^* - C_L) \quad 1.1$$

$N_{O_2}$  คือ อัตราการถ่ายโอนออกซิเจน

$k_L a$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนต่อปริมาตร

$C^*$  คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่รอยต่อระหว่างแก๊สกับของเหลว

$C_L$  คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในของเหลว

กล่าวคือการออกแบบถังหมักโดยให้อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนเท่ากันจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถังหมักขนาดห้องทดลองและถังหมักขนาดอุตสาหกรรมเหมือนกันหรือมีร้อยละผล (Yield) ได้หรือร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion) เท่ากัน เพราะฉะนั้นค่า  $k_L a$  และ  $(C^* - C_L)$  ในทั้งสองขนาดมีค่าเท่ากัน โดยค่า  $(C^* - C_L)$  เป็นเป้าหมายในการออกแบบที่ต้องการให้การละลายของออกซิเจนในของเหลวมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นตัวแปรที่สำคัญที่ต้องพิจารณาและลงรายละเอียดคือ  $k_L a$  โดยตัวแปรดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ได้จากการทดลอง (Garcia-Ochoa & Gomez, 2009) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ Error! Reference source not found. ดังนี้

$$k_L a = C \cdot V_s^a \cdot \left(\frac{P}{V}\right)^b \cdot \mu_a \quad 1.2$$

$V_s$  คือ Superficial Gas Velocity

$P$  คือ พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสม

$V$  คือ ปริมาตรของของเหลวที่ใช้ดำเนินการ

$\mu_a$  คือ ความหนืดปรากฏ

$C, a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่

เมื่อออกแบบให้ Superficial Gas Velocity ของถังหมักทั้งสองขนาดมีค่าเท่ากัน เพราะฉะนั้นค่า  $k_L a$  จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสม โดยการหาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสมสามารถหา

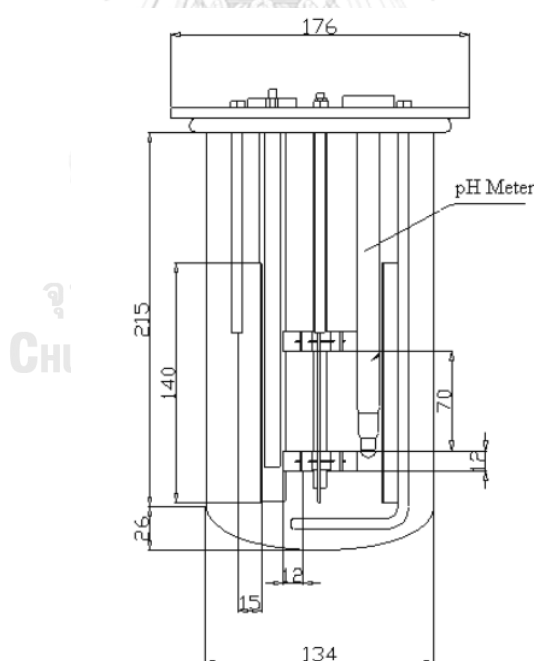
คำนวณหาได้จาก Power Number ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วที่ใช้ในการปั่นกวนที่ใช้ในขนาดห้องทดลองและขนาดอุตสาหกรรมได้ดังนี้

$$\left(\frac{P}{V}\right)_1 = \left(\frac{P}{V}\right)_2 \text{ หรือ } \left(\frac{N_P \times N^3 D_a^5 \rho}{\pi T^2 H}\right)_1 = \left(\frac{N_P \times N^3 D_a^5 \rho}{\pi T^2 H}\right)_2$$

เมื่อพิจารณาให้อัตราส่วนของรูปร่างของถังในห้องทดลองและถังที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีค่าเท่ากัน จะสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$N_{P,1} N_1^3 D_{a,1}^2 = N_{P,2} N_2^3 D_{a,2}^2 \quad 1.3$$

ในกรณีที่ถังกวนผสมที่ใช้ในห้องทดลองมีลักษณะแบบเดียวกับถังกวนผสมที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะสามารถพิจารณาให้  $N_{P,1} = N_{P,2}$  แต่อย่างไรก็ตามในถังกวนผสมที่ใช้ในห้องทดลองนั้นภายในจะประกอบด้วยเครื่องมือวัดต่าง ๆ เช่น เครื่องมือวัดความเป็นกรดเบส (pH meter) โดยแสดงตัวอย่างของถังหมักที่ใช้ในห้องทดลองในรูปที่ 1.3 ดังนี้



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างของถังหมักที่ใช้ในการทดลองของ (Bonvillani et al., 2006)

เครื่องมือวัดภายในของถังปั่นหมักที่ใช้ในการทดลองส่งผลให้ค่า Power Number มีค่ามากกว่าในกรณีของถังหมักที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ไม่มีเครื่องมือวัด ส่งผลให้  $N_{P,1} \neq N_{P,2}$  ซึ่งถ้าการขยายขนาดโดยไม่พิจารณาถึงปัจจัยที่มาจากเครื่องมือวัดอาจส่งผลให้พลังงานที่ให้ในถังกวนผสมในขนาดอุตสาหกรรมมีน้อยเกินไป และส่งผลให้

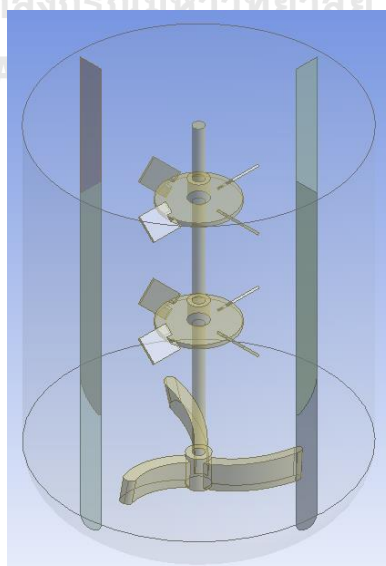
การขยายขนาดไม่ประสบความสำเร็จ ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในถังกวนผสมที่ขนาดต่างกัน ดังนี้

การหาความเร็วรอบโดยไม่คำนึงเครื่องมือวัด      การหาความโดยคำนึงถึงผลของเครื่องมือวัด

$$N_{2, No\ probe} = N_1 \left( \frac{D_{a,1}}{D_{a,2}} \right)^{\frac{2}{3}} < N_{2\ with\ probe} = N_1 \left( \frac{D_{a,1}}{D_{a,2}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{N_{P,1}}{N_{P,2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

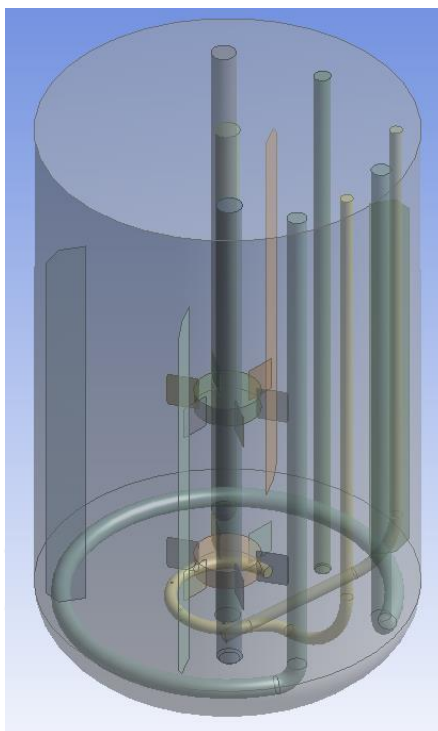
### 1.3 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

1. เพื่อสอบเทียบค่า Power Number สำหรับถังกวนขนาดมาตรฐานและใบปั่นกวนเป็นชนิด Rushton Turbine, Pitched Blade Turbine, Retreat Curve Impeller และ Dual Rushton Turbine ในย่านการไหลแบบราบเรียบและย่านการไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน SST k-omega
2. เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number กับ Reynolds Number สำหรับระบบใบปั่นกวนที่ประกอบด้วย Pitched Blade Turbine 2 ใบ และ Retreat Curve Impeller และความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้นหน่วยดังกล่าวกับถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Dual Rushton Turbine ในกรณีที่อยู่ในถังปั่นกวนประกอบด้วยระบบ Sparger โดยมีลักษณะของถังปั่นกวนแสดงในรูปที่ 1.4 ดังนี้ และรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 ระบบใบปั่นกวานที่ประกอบด้วยใบปั่นกวานชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Turbine 2 ใบ และใบปั่นกวานชนิด

Retreat Curve



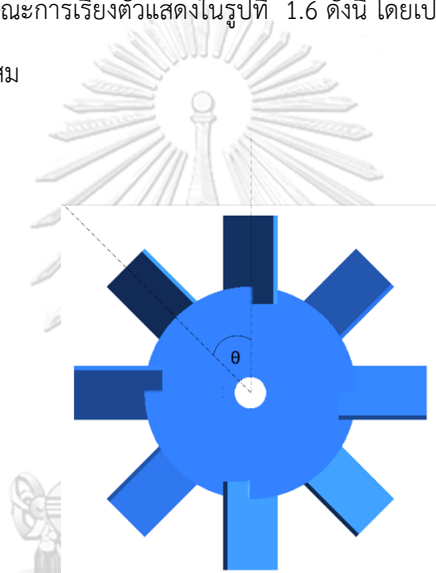
รูปที่ 1.5 ถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine 2 ใบ ร่วมกับเครื่องมือวัด

3. เพื่อวิเคราะห์หาระยะระหว่างใบปั่นกวานชนิด Dual Rushton Turbine ที่ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของความเร็วได้ดีที่สุด

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ใช้โปรแกรม CFD ที่ประกอบด้วย Code สำหรับการคำนวณที่พร้อมใช้งานในโปรแกรม Ansys Fluent 18.1 เพื่อใช้ในการแก้สมการการไหลและการคำนวณแรงบิดเพื่อนำไปคำนวณหาค่า Power Number
2. สอบเทียบความเร็วแนวตั้ง, ความเร็วแนวรัศมี และความเร็วแนวสัมผัสที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine ที่ติดตั้งในถังกวนผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน โดยสอบเทียบความเร็วจากผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิง
3. สอบเทียบค่า Power Number ของใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine,  $45^\circ$  Pitched blade turbine และ Retreat Curve ที่ติดตั้งในถังกวนผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานกับค่า Power Number จากเอกสารอ้างอิง

4. ศึกษาการไหลในถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน 3 ใบ ซึ่งประกอบด้วยใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Disk blade turbine 2 ใบ ที่ตำแหน่งบนและกลาง รวมถึงใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ที่ด้านล่างของถังปั่นกวน และคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบที่ Reynolds Number เท่ากับ 2, 3, 4 และ 6 และย่านการไหลแบบปั่นป่วนที่ Reynolds Number เท่ากับ 93,000, 140,000, 187,000, 234,000 และ 280,000 เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และค่า Reynolds Number นอกจากนี้เป็นการศึกษาผลของการจัดเรียงมุมระหว่างใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched blade disk turbine ทั้งสองใบที่ทำมุมกับ 0 องศา และ 45 องศา โดยมีลักษณะการเรียงตัวแสดงในรูปที่ 1.6 ดังนี้ โดยเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนผสม



รูปที่ 1.6 รูปแสดงการเรียงตัวของใบปั่นกวน  $45^\circ$  Pitched blade disk turbine ทั้งสองใบ โดย  $\theta$  มีค่าเท่ากับ 0 และ 45 องศา

5. ศึกษาการไหลภายในถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ ร่วมกับการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง และคำนวณหาค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบที่ค่า Reynolds Number 1.2, 2.4, 3.7 และ 5 และในย่านการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่า Reynolds Number เท่ากับ 11,000, 17,000, 22,000, 28,000, 34,000 และ 45,000 ตามลำดับ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number รวมถึงเปรียบเทียบค่า Power Number ในกรณีที่ถังหมักมีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ค่า Reynolds Number เท่ากับ 34,000

6. ศึกษาการไหลภายในถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ โดยไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดเพิ่มเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างต่างกัน 3 ระดับ รวมถึงวิเคราะห์ค่า Power Number โดยศึกษาที่ย่านการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่า Reynolds Number เท่ากับ 34,000
7. ศึกษาการขยายขนาด โดยพิจารณาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในถังหมักที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการไหลที่เกิดขึ้นในถังหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตร

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้จะมุ่งเป้าไปที่การทำนายพลังงานในการผสมสารเปรียบเทียบกับผลของทดลองที่มีผู้ทำการทดลองไว้แล้วเพื่อสอบเทียบความแม่นยำของการคำนวณ CFD สำหรับใบปั่นกวนและถังกวนผสมที่เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน แล้วจึงใช้การคำนวณ CFD เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number และ Reynolds Number ของถังกวนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยมีเป้าหมายในการสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวกับใบปั่นกวนชนิด Dual Rushton turbine ซึ่งเป็นใบปั่นกวนที่นิยมใช้สำหรับถังกวนผสมที่ต้องการการกระจายตัวของแก๊ส เช่น ในถังปฏิกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการหมักหรือเป็นเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (Bonvillani et al., 2006) และอีกกรณีศึกษาเพื่อได้รับความสัมพันธ์ของใบปั่นกวนผสมระหว่าง Retreat Curve impeller, และ Dual Pitched Blade Turbine ซึ่งเป็นระบบใบปั่นกวนที่ใช้ในกรณีของการผสมของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส เช่นในถังปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน (Dohi et al., 2004)



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบททวนวรรณกรรม

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 องค์ประกอบของถังผสม

##### 2.1.1.1 ชนิดของ Bottom Tank

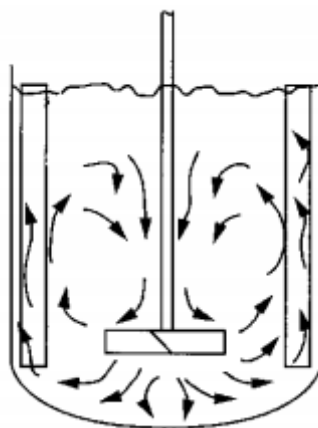
ชนิดของ Bottom Tank ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะประกอบด้วย Flat Cylindrical, Ellipsoidal และ Tori-spherical ซึ่งความเหมาะสมของแต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ แต่ในงานที่เกี่ยวข้องกับถังผสมนั้นต้องระวังเรื่องการเกิด Dead Spot หรือ Dead zone โดย Bottom tank ชนิด Flat Cylindrical ที่บริเวณมุมของถังอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้

##### 2.1.1.2 ชนิดของใบพัด

การแบ่งชนิดของใบพัดจะแบ่งตามการไหลของของไหลที่สร้างขึ้นจากใบพัด โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ การไหลแบบ Axial Flow, การไหลแบบ Radial Flow และการไหลแบบ Tangential flow โดยมีตัวอย่างของใบพัดสำหรับการไหลแต่ละแบบดังนี้

##### 2.1.1.2.1 การไหลแบบ Axial Flow

การไหลแบบ Axial Flow จะมีลักษณะเป็นการไหลที่เกิดขึ้นในแนวระดับเป็นหลัก กล่าวคือ เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลที่ออกจากใบพัด ของไหลจะไหลลงไปในแนวดิ่งและสะท้อน bottom tank และเคลื่อนที่ไหลด้านบนของถังก่อนที่ถูกดูดลงมาเนื่องจากการหมุนของใบพัด โดยมีลักษณะการไหลแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้

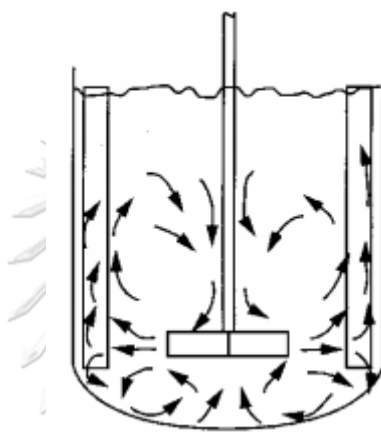


รูปที่ 2.1 แสดงการไหลแบบ Axial Flow (Couper et al., 2009)

ใบพัดที่ทำให้เกิดลักษณะการไหลดังกล่าวต้องเป็นใบพัดที่ทำมุมกับแนวราบหรือมี Pitched ได้แก่ Pitched blade turbine และ Marine Propeller เป็นต้น

#### 2.1.1.2.2 การไหลแบบ Radial Flow

การไหลแบบ Radial Flow จะมีลักษณะการไหลของของไหลที่ออกจากใบพัดในแนวราบเป็นหลัก โดยของไหลจะเสมือนถูกผลักออกจากโดยใบพัดออกทางด้านข้างและสะท้อนผนังด้านข้างของถังและกลับมาที่ใบพัดโดยมีลักษณะการไหลแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงการไหลแบบ Radial Flow (Couper et al., 2009)

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลในแนวดิ่งจะพบว่าของไหลที่ไหลออกจากใบพัดจะมีทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ของไหลจะมีทิศทางที่ไหลขึ้นจากตำแหน่งด้านบนของใบพัด และที่ด้านล่างของใบพัดของไหลจะไหลลง โดยจะมีลักษณะของการวนของของไหลสองตำแหน่ง ซึ่งต่างจากการไหลที่เกิดขึ้นจากใบพัดที่ทำให้เกิดการไหลแบบ Axial flow ที่มีการไหลที่วนเพียงรอบเดียว

#### 2.1.1.2.3 การไหลแบบ Tangential Flow

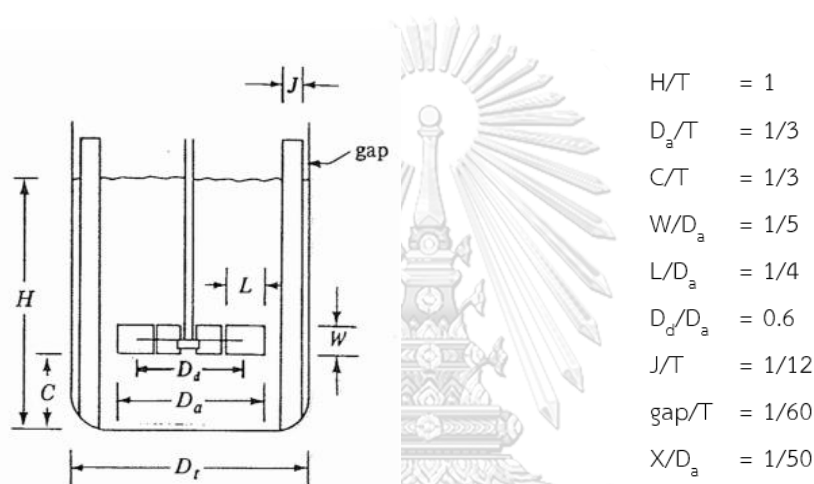
การไหลแบบ Tangential Flow จะมีลักษณะของการไหลในแนวสัมผัส โดยการไหลในลักษณะจะก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงของของไหล ซึ่งส่งผลให้ของไหลถูกผลักออกจากศูนย์กลางของถังและส่งผลให้เกิด Vortex โดยการเกิดดังกล่าวจะส่งผลต่อการผสมของสารภายในถัง เนื่องจากการไหลที่จุดศูนย์กลางของถังมีความเร็วที่ต่างจากจุดอื่น การเกิด Vortex สามารถป้องกันได้โดยการติดผนังกั้น หรือ Baffles ที่ด้านรอบนอกของถังผสม

การไหลทั้ง 3 แบบที่กล่าวมาข้างต้นจะเกิดขึ้นกับใบพัดทุกชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัดที่จะทำให้การไหลชนิดไหนมีความโดดเด่นมากกว่ากัน โดยใบพัดที่เลือกนำมาศึกษานั้นจะเป็นใบพัดที่แสดงให้เห็นถึงการเกิด

การไหลทั้ง 3 รูปแบบ คือ Pitched Blade turbine ที่ให้การไหลแบบ Axial flow เป็นหลัก, Ruston Turbine ที่ให้การไหลแบบ Radial Flow และ Retreat curve Impeller

### 2.1.1.3 สัดส่วนตามมาตรฐานของถังกวนผสม (Standard Tank)

การออกแบบที่เกี่ยวข้องกับถังผสมนั้น การคำนวณรายละเอียดต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การคำนวณหา Power number จะขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปร่างของถังโดยจะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยหรือเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดต่าง ๆ ของถังผสมกับเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง โดยมีตัวอย่างของ Standard Tank สำหรับใบพัดชนิด Ruston Turbine ได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ขนาดภายในถังกวนผสมขนาดมาตรฐาน (Couper et al., 2009)

### 2.1.2 ค่า Reynolds Number สำหรับถังกวนผสม

Reynolds Number ของถังผสม เพื่อบอกลักษณะการไหลว่าเป็นลักษณะการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วนโดย Reynolds Number นั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia Force) และ แรงหนืด (Viscous Force) ซึ่ง Reynold Number ของถังผสมสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Re = \frac{\rho D_a^2 N}{\mu} \quad 2.1$$

โดยที่

$Re$	ค่า Reynolds Number
$\rho$	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
$D_a$	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (m)
$N$	ความเร็วรอบ ( $\text{s}^{-1}$ )
$\mu$	ความหนืด (Pa-s)

### 2.1.3 พลังงานที่ใช้ในการผสมสาร

การวิเคราะห์หาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการของถังผสมเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ โดยพลังงานดังกล่าวเป็นการหาพลังงานที่ใช้ในการหมุนของใบพัดที่ความเร็วรอบที่กำหนด ซึ่งในการออกแบบทั่วไปค่าพลังงานดังกล่าวอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับถังผสม ตัวอย่างเช่น ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของใบพัดกับ Bottom Tank (Impeller Clearance), ความสูงของของเหลว (Liquid Height), เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, รวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของของเหลว และความเร็วรอบในการปั่นกวน โดยตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรไร้มิติ (Dimensional analysis)

$$P = f(N, D_a, \mu, g, \rho, \text{geometry})$$

โดยที่

$P$  คือ พลังงานที่ใช้ในการกวนผสม

สามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} = f\left(\frac{\rho D_a^2 N}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}, \text{shape factor}\right) \quad 2.2$$

นิยามตัวแปรไร้มิติของพลังงานเป็น Power Number ได้ดังนี้

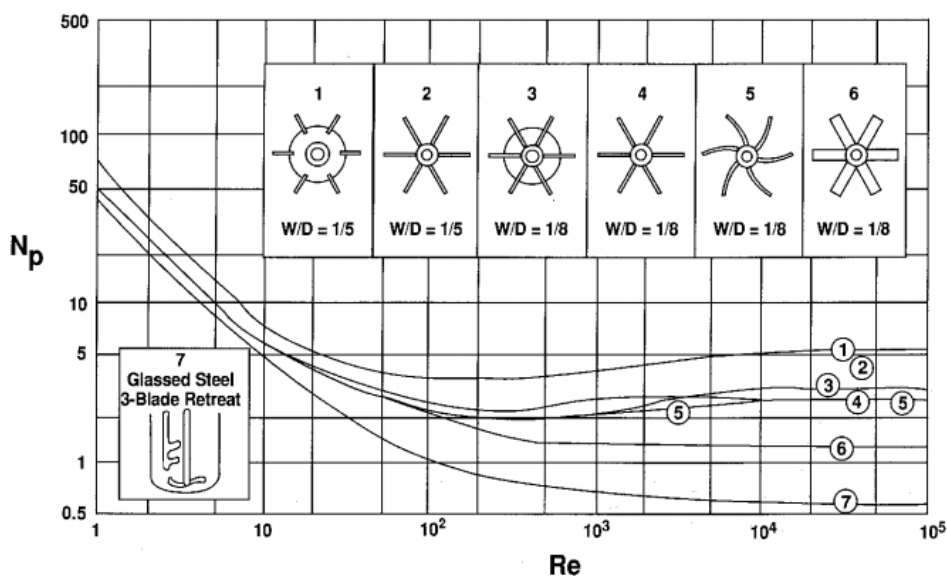
$$N_P = \frac{P}{N^3 D_a^5 \rho} \quad 2.3$$

ซึ่งโดยนิยามของค่า Power Number ( $N_p$ ) นั้นเป็นพลังงานที่ป้อนให้ถึงกวนผสมต่อพลังงานที่กระจายในถึงกวนผสม โดยสามารถพิจารณาเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_p = \frac{\text{Power Input}}{\text{Power Dissipation}}$$

### 2.1.3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติสำหรับการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการผสมสาร

การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มของตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้คำนวณหา Power Number ได้จาก Reynold Number และ Froude Number รวมถึงรูปร่างของถังผสมแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถังผสมที่เป็น Standard Tank ที่มีการติดตั้ง Baffles จึงไม่มีการเกิด Vortex เพราะฉะนั้นจึงละผลของ Froude Number ที่มีต่อ Power Number ได้ เช่นเดียวกับรูปร่างของถัง เนื่องจากเป็น Standard Tank เพราะฉะนั้นการหา Power Number สำหรับใบพัดทั่วไปจึงสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number และ Reynold Number โดยมีตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 2.4 ดังนี้



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number กับค่า Reynolds Number ของใบปั่นกวนชนิด

ต่าง ๆ (Couper et al., 2009)

กราฟในรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number โดยในช่วงที่มีค่า Reynolds Number ต่ำกว่า 10 นั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number และ Reynolds Number เป็นความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลามุมฉากหรือผลคูณระหว่าง Power Number และ Reynolds Number เป็นค่าคงที่ โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_p = \frac{K_L}{Re} \quad 2.4$$

โดยค่า  $K_L$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับชนิดของใบปั่นกวน

ลักษณะของความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความหนืดของของไหลในย่านการไหลแบบราบเรียบ โดยสามารถพิจารณาสมการในรูปของพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนได้ดังนี้

$$P = K_L N^2 D^3 \times \mu \quad 2.5$$

เมื่อวิเคราะห์ให้ความเร็วรอบและเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนผสมเป็นค่าคงที่พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนนั้นจะแปรผันตรงกับความหนืดของของไหล ซึ่งสอดคล้องกับการไหลแบบราบเรียบที่มีผลของแรงหนืดต่อการไหล ซึ่งแตกต่างจากการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผลของแรงเฉื่อย (Inert Force) มากกว่าแรงหนืดซึ่งพิจารณาได้จากกราฟระหว่าง Power Number และ Reynolds Number โดยที่ค่า Reynolds Number มากกว่า 10,000 ลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงกล่าวคือค่า Power Number เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่า Reynolds Number โดยพิจารณาเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_p = K_T \quad 2.6$$

หรือ

$$P = K_T N^3 D^5 \times \rho \quad 2.7$$

จากสมการสามารถพิจารณาว่าพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมนั้นจะไม่ขึ้นกับแรงหนืด

กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยการวัดแรงบิด โดยพลังงานสามารถคำนวณหาได้จากผลคูณระหว่างแรงบิดกับความเร็วยรอบของใบพัด

$$P = Torque \times N \quad 2.8$$

ช่วงที่มี Reynold number หรือช่วงที่มีการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number กับ Reynolds Number มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แต่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน ค่า Power Number มีแนวโน้มเป็นค่าคงที่ การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการปั่นของสารที่กล่าวไปข้างต้นนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดลองและสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number กับ Reynold Number สำหรับชนิดของใบพัดที่ถูกกำหนดและถึงกวนที่เป็นถึงมาตรฐาน

การคำนวณ CFD สามารถคำนวณคำนวณหา Power Number หรือเป็นการคำนวณหาแรงบิดที่ของไหลภายในถังผสมกระทำต่อใบปั่นกววน ซึ่งคำนวณจากความเร็วที่ได้จากการแก้สมการการไหลและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Torque = \int r \times -\tau_{xy} dA_{Impeller} \quad 2.9$$

โดยเป็นการคำนวณแรงเฉือนที่กระทำบนใบปั่นกววนหรือเป็นแรงที่ของไหลต้านการเคลื่อนที่ของใบพัดหรือถูกเรียกว่า Viscous Force โดย  $\tau_{xy}$  จะถูกคำนวณจากสมการการไหล

## 2.1.4 สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหล

### 2.1.4.1 สมการอนุรักษ์มวล

สมการ Continuity หรือสมการสมดุลมวลรอบปริมาตรควบคุม โดยเขียนได้ในสมการที่ ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}) \quad 2.10$$

### 2.1.4.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการการถ่ายโอนโมเมนตัมสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.11 ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = -[\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v}] - \nabla P - [\nabla \cdot \vec{\tau}] + \rho g \quad 2.11$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมอธิบายถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมต่อปริมาตร :  $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v})$  ที่ถ่ายโอนโดยการพา (Convective Momentum Transfer) :  $-\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v}$  และการนำหรือการถ่ายโอนในระดับโมเลกุล (Molecular Transfer) :  $-\nabla P - [\nabla \cdot \vec{\tau}]$  รวมถึงแรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล  $\rho g$

การถ่ายโอนโมเมนตัมในระดับโมเลกุลนั้นคือผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความดันและการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน (Shear Stress) ซึ่งแรงเฉือนเกิดจากความหนืดของของไหล ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการ Newton's law of viscosity โดยมีสมมติฐานคือของไหลนั้นประพฤติตัวเป็นของไหลนิวโตเนียน โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\vec{\tau} = -\mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa\right) (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{\delta} \quad 2.12$$

โดยที่

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### 2.1.4.3 สมการที่ใช้อธิบายการไหลแบบราบเรียบ

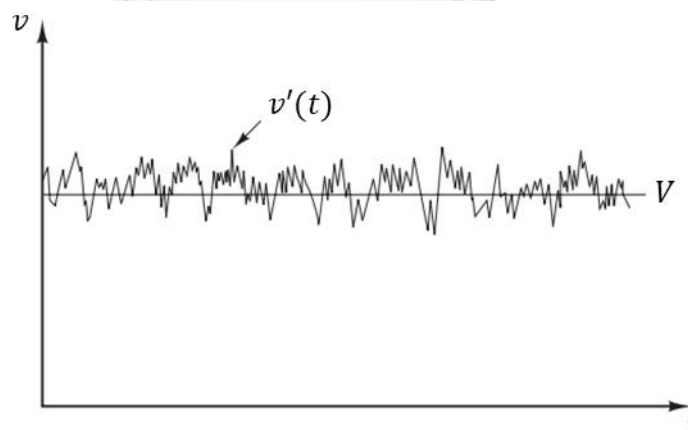
การไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหลแบบราบเรียบกล่าวคือของไหลไหลมีลักษณะเป็นชั้นเรียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาการไหลดังกล่าวที่สภาวะคงตัว (Steady state) รวมถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขขอบเขต ความเร็วที่วัดที่ตำแหน่งใด ๆ ของของไหลจะมีไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งการทำนายความเร็วของการไหลชนิดนี้สามารถใช้สมการของ Navier-Stokes โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.13 ดังนี้

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = -\nabla P + \mu [\nabla^2 \vec{v}] + \rho \vec{g} \quad 2.13$$

สมมติฐานของสมการ Navier-Stokes คือ คือ 1. ความหนาแน่นของสารมีค่าคงที่ 2. ความหนืดของสารเป็นค่าคงที่ (Isotropic Viscosity)

### 2.1.4.4 การไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนคือมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการไหลเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อนำเครื่องวัดความเร็วไปวัดในจุดที่เกิดการไหลแบบ ปั่นป่วน จะพบว่าความเร็วที่วัดได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Versteeg & Malalasekera, 1995)

ลักษณะของการแกว่งของความเร็วของการไหลแบบ ปั่นป่วน จะพบว่าแกว่งรอบค่ากลางของความเร็ว เพราะฉะนั้นความเร็วของของไหลสามารถสรุปให้เป็นผลรวมของค่าเฉลี่ย (Mean Value) ของความเร็วและความเร็วปั่นป่วน (Fluctuation) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$v(t) = V + v'(t) \quad 2.14$$

หรือ

$$\varphi(t) = \Phi + \varphi'(t) \quad 2.15$$

โดยที่

$\varphi$

คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหล

สมการดังกล่าวเรียกว่า Reynolds Decomposition ซึ่งใช้อธิบายความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการไหลแบบปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการไหลแบบ 3 มิติ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นทั้ง 3 ทิศทาง เมื่อกระจายความเร็วให้อยู่ในรูปของ Reynold Decomposition ในสมการ Naiver-stokes ทำให้พจน์ของการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทโมเมนตัมแบบการพาของความเร็วที่เกิดจากความปั่นป่วน โดยสามารถเขียนสมการในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังนี้

แกน x

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial}{\partial t} (V_x) + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right] \\ = - \frac{\partial P}{\partial x} - \mu \left[ \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \\ + \left[ \frac{\partial (-\rho \overline{v'_x{}^2})}{\partial x} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'_x v'_y})}{\partial y} + \frac{\partial (-\rho \overline{v'_x v'_z})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad 2.16$$

พจน์ที่เพิ่มเติมจากสมการ Naiver-stoke คือความเคียดหรือ Stress ซึ่งถูกเรียกว่า Reynold Stress โดยความเคียดที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาให้เหมือนกับความเคียดที่กระทำต่อของไหลซึ่ง Boussineq ได้สร้างสมมติฐานว่าความเคียดที่เกิดจากความปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ด้วยความเร็วและเฉลี่ยและอยู่ในรูปแบบเดียวกับ Newton law of Viscosity ดังนี้

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad 2.17$$

โดย  $\mu_t$  คือ ความหนืดความปั่นป่วน (Turbulent Viscosity) ซึ่งจะถูกละเอียดโดยค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการกระจายตัวของพลังงานในแบบจำลองความปั่นป่วน

การพิจารณาจากหน่วยของอัตราส่วนระหว่างความหนืดความปั่นป่วนกับความหนาแน่นของสารหรือความหนืดโคเนมาติกความปั่นป่วนซึ่งมีหน่วยในระบบ SI เป็น  $m^2/s$

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} \left[ m^2/s \right] \quad 2.18$$

และจากการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติพบว่าความหนืดไคเนมาติกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วย ขนาดความเร็วหรือ Velocity Scale และ ขนาดความยาว Length Scale โดยตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนหรือ Eddy ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นการเชื่อมโยงระหว่างความเฉื่อยต่อเวลากับความหนืดความปั่นป่วน

$$\nu_t = C \nu_l \quad 2.19$$

หรือ

$$\mu_t = C \rho \nu_l \quad 2.20$$

## 2.1.5 แบบจำลองความปั่นป่วน

### 2.1.5.1 แบบจำลอง k-ε

การคูณความเร็วในแต่ละแกนเข้าไปในสมการ Reynolds Average Navier-Stokes สามารถเขียนสมการการถ่ายเทของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{V}) = \nabla \cdot \left( -\overline{P'v'} + 2\overline{\mu v' s'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{v'_i \cdot v'_i v'_j} \right) - 2\overline{\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}} - \overline{\rho u'_i u'_j} \cdot S_{ij}$$

Rate of change of Turbulent kinetic Energy k	+	Transport Of k by Convection	=	Transport Of k by Pressure	+	Transport Of k by Stress	+	Transport Of k by Viscous Stress	+	Transport Of k by Reynolds Stress	-	Rate of Dissipation Of k	+	Rate of Production Of K
--	---	------------------------------------	---	----------------------------------	---	--------------------------------	---	---	---	--	---	--------------------------------	---	-------------------------------

โดย

$$S_{ii} = \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \quad 2.21$$

$$s'_{ii} = \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} \quad 2.22$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.23$$

$$s'_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right) \quad 2.24$$

การกระจายตัวของพลังงานของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนสามารถพิจารณาให้เป็นการกระจายตัวของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{2\mu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}}}{\rho} = 2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \quad 2.25$$

โดยตัวแปร  $k$  และ  $\varepsilon$  จะเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณหาความหนืดของความปั่นป่วน โดยแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุดในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนคือแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  ซึ่งเป็นการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปร  $k$  และ  $\varepsilon$  เพื่อใช้ในการแก้สมการ Reynolds Average Navier-Stoke โดยพื้นฐานของแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  คือการพิจารณาใช้ค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  เพื่ออธิบาย velocity scale และ length scale (Launder & Spalding, 1974) โดยมีการอธิบายทั้งสองตัวแปรดังนี้

$$v = k^{1/2} \quad 2.26$$

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad 2.27$$

จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนสมการที่ใช้อธิบายความหนืดความปั่นป่วนได้ดังนี้

$$\mu_t = C_\mu \rho v l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 2.28$$

แบบจำลอง Standard  $k$ - $\varepsilon$  ใช้ 2 สมการการถ่ายโอนค่าพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนและการกระจายของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนหรือ  $k$  และ  $\varepsilon$  ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{V}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) - 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad 2.29$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad 2.30$$

โดยที่ค่าคงที่ในสมการทั้งสองมีค่าดังนี้

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

ค่าคงที่ดังกล่าวเป็นการที่ได้จากการทดลอง (Data fitting) และไม่มีหน่วย

### 2.1.5.2 เงื่อนไขขอบของแบบจำลอง Standard $k$ - $\varepsilon$

การแก้แบบจำลองจำเป็นต้องทราบค่า  $k$  และ  $\varepsilon$  สำหรับค่าเริ่มต้นในการแก้สมการ โดยในกรณีของถังผสมเงื่อนไขขอบที่สำคัญคือที่กำแพง (Wall) หรือผนังของถังผสมรวมถึงใบพัด แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Standard  $k$ - $\varepsilon$  มีระบบจัดการกับการแก้ปัญหากำแพงโดยการสร้างความสัมพันธ์ของความเร็วที่ใกล้กับผนังกับ

ระยะทาง โดยอ้างอิงกับผลของการทดลอง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ Wall Function โดยการทดลองที่ใช้หา Wall Function นั้นทำการทดลองโดยใช้แผ่นเรียบหรือ Flat Plate รวมถึงการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

$$V = f(y, \rho, \mu, \tau_w)$$

$$v^+ = \frac{V}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho v_\tau y}{\mu}\right) = f(y_p^+) \quad 2.31$$

จากผลการทดลองจะสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$v^+ = \frac{V}{v_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(E y_p^+) \quad 2.32$$

โดยที่

$$v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad 2.33$$

ในบริเวณที่ใกล้เงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพงค่า  $k$  และ  $\epsilon$  เป็นไปตามสมการดังนี้

$$k = \frac{\mu_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad 2.34$$

$$\epsilon = \frac{\mu_\tau^3}{\kappa y} \quad 2.35$$

โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบที่กำแพงสำหรับทุกกรณี แต่มีเงื่อนไขดังนี้

$$30 < y_p^+ < 500$$

กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในแต่ละชั้นของของไหลจากกำแพงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก หรือผลของความหนืดของของไหลมีผลน้อย ซึ่งคือในกรณีที่ค่า Reynolds Number มีค่ามากในบริเวณที่ใกล้ผนัง

การใช้ Wall Function ในกรณีของแบบจำลอง  $k$ - $\epsilon$  เป็นการใช้ค่าจากการทดลองเพื่อลดการอินทิเกรตในบริเวณที่ใกล้เงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพงแต่ในกรณีของกังป่นกวนนั้นการเคลื่อนที่ของของไหลในกังป่นกวนผสมเกิดจากการหมุนของใบพัดเพราะฉะนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้อาจไม่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองอื่นที่ถูกพัฒนาเพื่อรองรับการคำนวณในบริเวณเงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพงหรือในกรณีที่แรงที่เกิดจากความหนืดให้ผลหลักต่อการเคลื่อนที่ของของไหลบริเวณแพงหรือที่ค่า Reynolds Number มีค่าต่ำคือแบบจำลอง  $k$ - $\omega$

### 2.1.5.3 แบบจำลอง k - $\omega$

แบบจำลองแบบ k -  $\omega$  จะใช้ตัวแปร  $\omega$  เพื่อแทนที่ตัวแปร  $\epsilon$  โดยมีสมการอธิบายดังนี้

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad 2.36$$

สมการการถ่ายโอนของ k และ  $\omega$  แสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{V}) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \left( 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \\ - \beta^* \rho k \omega \end{aligned} \quad 2.37$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{V}) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_1 \left( 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \\ - \beta_1 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad 2.38$$

โดยที่

$$\sigma_k = 2.0 \quad \sigma_\omega = 2.0 \quad \gamma_1 = 0.553 \quad \beta_1 = 2.0 \quad \beta^* = 0.09$$

### 2.1.5.4 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง k - $\omega$

เงื่อนไขขอบเขตที่กำแพงสำหรับแบบจำลอง k -  $\omega$  จะแตกต่างกับแบบจำลอง k- $\epsilon$  กล่าวคือในแบบจำลอง k -  $\omega$  จะแก้สมการหรืออินทิเกรตสมการเพื่อหาค่าของไหลบริเวณที่ใกล้กำแพง โดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่กำแพงของตัวแปร k และ  $\omega$  ดังนี้

$$k = 0 \quad 2.39$$

$$\omega_p = \frac{6\nu}{\beta_1 y_p^2} \quad 2.40$$

ปัญหาของแบบจำลอง k- $\omega$  คือเมื่อของไหลห่างจากกำแพงมาก ๆ ส่งผลให้ค่า  $k \rightarrow 0$  และ  $\epsilon \rightarrow 0$  ซึ่งผลให้ความหนืดความปั่นป่วนมีค่าเข้าใกล้อนันต์ โดยการใชแบบจำลอง k- $\omega$  กับเงื่อนไขขอบเขตลักษณะนี้ต้องกำหนดค่า  $\omega$  เป็นค่าที่น้อยมาก ๆ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นที่น่าพอใจ เมื่อเทียบผลที่ได้จากแบบจำลอง k- $\epsilon$

เพราะฉะนั้น (Menter, 1994) ได้ใช้ข้อดีของทั้งสองแบบจำลองเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองผสมระหว่าง k- $\epsilon$  และ k- $\omega$  หรือ Shear Stress Transport k-omega (SST k-omega)

### 2.1.5.5 แบบจำลอง SST k - $\omega$

แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาจากแบบจำลอง k -  $\epsilon$  และ k -  $\omega$  แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการถ่ายโอนของ omega จะแทนค่าตัวแปร  $\epsilon$  โดยตัวแปร  $\omega$  จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon = \omega k \quad 2.41$$

การแทนค่า  $\omega$  ด้วยสมการข้างต้นส่งผลให้สมการถ่ายโอนค่า  $\omega$  เป็นไปตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\omega\vec{V}) &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \\ &- \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad 2.42$$

โดยที่

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_{\omega,1} = 2.0 \quad \sigma_{\omega,2} = 1.17 \quad \gamma_2 = 0.44 \quad \beta_2 = 0.083 \quad \beta^* = 0.09$$

พจน์สุดท้ายของสมการการถ่ายโอนค่า omega คือ Cross-Diffusion Modification เป็นการเชื่อมระหว่างแบบจำลอง k- $\epsilon$  และแบบจำลอง k-omega นอกจากนี้ สมการการถ่ายโอนค่า k ยังคงรูปเดิมเหมือนกับแบบจำลอง k-omega

แบบจำลอง SST k-omega เป็นการใชแบบจำลอง k- $\epsilon$  ในบริเวณที่ห่างจากเงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพงและใช้แบบจำลอง k-omega กับบริเวณที่ใกล้กับเงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพง ซึ่งเป็นการใช้ข้อดีของทั้งสองแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแบบจำลองตามระยะทางที่ห่างจากกำแพงอาจจะส่งผลให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพของการคำนวณซึ่ง (Menter, 1994) ได้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้ Blending Function กับค่าคงที่ของแบบจำลอง โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$C = F_C C_1 + (1 - F_C) C_2 \quad 2.43$$

ตัวแปรในแบบจำลองจะถูกเปลี่ยนจากแบบจำลอง k-omega โดยประยุกต์ Blending Function เพื่อหาค่าของค่าคงที่ของแบบจำลองที่ระยะทางออกจากเงื่อนไขขอบที่เป็นกำแพง โดยมีสมการอธิบายดังนี้

สมการความหนืดความปั่นป่วน

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad 2.44$$

ซึ่งค่าคงที่  $\alpha^*$  หาได้จากสมการดังนี้

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left( \frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad 2.45$$

โดย  $Re_t$  คือ Turbulent Reynolds Number และ  $\left( \frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right)$  เป็นการปรับตัวแปร  $\alpha_\infty^*$  ในกรณีที่ Reynolds Number มีค่าต่ำและ Turbulent Reynolds Number มีนิยามดังนี้

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad 2.46$$

โดยค่าคงที่ แสดงในสมการดังนี้

$$R_k = 6 \quad 2.47$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad 2.48$$

$$\beta_i = 0.072 \quad 2.49$$

ค่าคงที่  $\sigma_k$  และ  $\sigma_\omega$  จะถูกปรับตาม Blending Function ซึ่งแสดงในสมการดังนี้ไปนี้

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{k,2}}} \quad 2.50$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \quad 2.51$$

ค่าคงที่  $\alpha$  ที่เป็นตัวคูณของพจน์  $\left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$  โดยมีสมการของค่าคงที่ดังกล่าว

ดังนี้

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right) \quad 2.52$$

และ

$$R_\omega = 2.95\alpha^* \quad 2.53$$

โดย  $\left( \frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right)$  เป็นตัวแปรปรับในกรณี Reynolds Number มีค่าต่ำ นอกจากนี้ ตัวแปร  $\alpha_\infty$

จะถูกปรับโดยใช้ Blending Function ซึ่งแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1 - F_1)\alpha_{\infty,2} \quad 2.54$$

และ

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad 2.55$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad 2.56$$

โดยที่  $\kappa = 0.41$  คือค่าคงที่ของ von Kármán ในกรณีของของไหลเป็นของไหลแบบไม่บีบอัด (Incompressible Fluid) ค่าคงที่  $\beta_\infty^* = 0.09$

พจน์การกระจายตัวของค่า omega ค่าคงที่  $\beta$  จะถูกปรับตาม Blending Function ดังนี้

$$\beta = \beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1 - F_1)\beta_{i,2} \quad 2.57$$

ฟังก์ชัน  $F_1$  และ  $F_2$  เป็นสมการที่ใช้สำหรับ Blending Function โดยมีสมการแสดงดังนี้

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad 2.58$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad 2.59$$

$$D_\omega^+ = \max \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad 2.60$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad 2.61$$

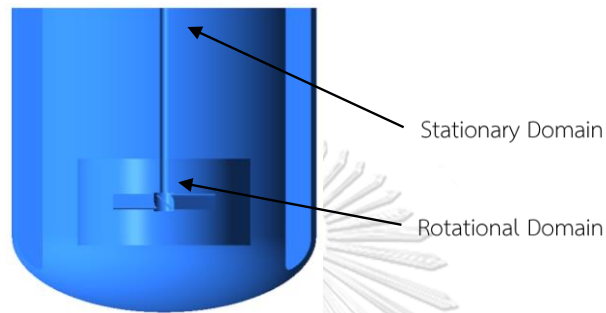
$$\Phi_2 = \max \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad 2.62$$



## 2.1.6 แบบจำลองการหมุนของใบปั่นกวน

### 2.1.6.1 การไหลในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ (Flow in Moving Reference Frame)

การไหลในถังกวนผสมนั้นเกิดขึ้นจากการหมุนของใบปั่นกวน เพราะฉะนั้นเพื่อเป็นการจำลองการหมุนภายในถังกวนผสมระบบจึงถูกแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เกิดการหมุน (Rotational Domain) และส่วนที่อยู่นิ่ง (Stationary Domain) แสดงในรูปที่ 2.6 การแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนที่เกิดการหมุนและส่วนที่อยู่นิ่งรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแบ่งแบบจำลองเป็นส่วนที่เกิดการหมุนและส่วนที่อยู่นิ่ง

โดยการคำนวณส่วนที่เกิดการหมุนจะคำนวณจากความเร็วสัมพัทธ์ เมื่อพิจารณาระบบที่หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad 2.63$$

โดยที่

$\vec{v}_r$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์หรือความเร็วที่มองจากกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่

$\vec{v}$  คือ ความเร็วสุทธิหรือความเร็วที่มองจากกรอบอ้างอิงที่อยู่นิ่ง

$\vec{u}_r$  คือ ความเร็วของกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่

สำหรับความเร็วของกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ที่เกิดจากการหมุนนั้นเป็นผลคูณของเวกเตอร์ระหว่างเวกเตอร์ของความเร็วจับมุมกับเวกเตอร์ของระยะทางจากจุดที่อ้างอิงการหมุนถึงตำแหน่งของปริมาตรควบคุม

$$\vec{u}_r = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad 2.64$$

สมการ Continuity และสมการการถ่ายโอนโมเมนตัมจะอยู่ในรูปของความเร็วสัมพัทธ์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad 2.65$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}_r) + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r \vec{v}_r + \rho (\vec{\omega} \times \vec{v}_r) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_r + \vec{F} \quad 2.66$$

การคำนวณความเร็วที่ตำแหน่งรอยต่อ (Interface) ระหว่างกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่และกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่งต้องใช้ความเร็วจากทั้งสองกรอบอ้างอิง โดยที่ตำแหน่งรอยต่อความเร็วจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเร็วสุทธิ การจำลองการไหลโดยการแบ่งขอบระบบเป็นสองส่วนและใช้การคำนวณในแต่ละกรอบอ้างอิงนั้นวิธีดังกล่าวเรียกว่า Multiple Reference Frame หรือ MRF ซึ่งวิธีการจำลองการหมุนของใบปั่นกวนนี้เป็นการประมาณการไหลให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State Approximation) และเหมาะสำหรับการไหลที่ผลของระบบที่อยู่นิ่ง (Stator Domain) ส่งผลกระทบบ้างไม่มาก ซึ่งในกรณีของถังกวนผสมนั้นผลของแผ่นกั้นหรือ Baffles ส่งผลต่อการไหลเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นวิธีการจำลองการปั่นกวนด้วยวิธี MRF จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient)

#### 2.1.6.2 การคำนวณ time Step เพื่อใช้ในจำลองการหมุนของใบปั่นกวนแบบ Sliding Mesh

จำลองการหมุนของใบปั่นกวนแบบ Sliding Mesh ระบบในถังกวนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกับวิธี MRF แต่ในกรณีของ Sliding mesh นั้นปริมาตรควบคุมหรือ mesh ในส่วนที่ครอบคลุมใบปั่นกวนจะหมุนเท่ากับความเร็วของใบปั่นกวน เพราะฉะนั้นปริมาตรควบคุมของระบบที่หมุนจะเคลื่อนที่ออกห่างปริมาตรควบคุมที่อยู่นิ่ง เพื่อสร้างเสถียรภาพในการคำนวณนั้นไม่ควรส่งต่อข้ามปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดไปกล่าวคือใน 1 time step ปริมาตรควบคุมที่เคลื่อนที่ไม่ควรเกินขนาดของปริมาตรควบคุม โดยสามารถพิจารณาในรูปแบบของสมการได้ดังนี้

$$CFL = \frac{u_t \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad 2.67$$

โดยที่

$CFL$  คือ ค่า Courant Number ซึ่งควรมีค่าน้อยกว่า 1

$u_t$  คือ ความเร็วของปริมาตรควบคุมที่เคลื่อนที่

$\Delta t$  คือ ขนาดของ Time Step

$\Delta x$  คือ ขนาดของปริมาตรควบคุม

ซึ่งเมื่อพิจารณาการหมุนของในถังกวนผสมความเร็วของปริมาตรควบคุมสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับความเร็วที่ปลายใบปั่นกวน (Impeller Tip Speed)

$$CFL = \frac{(\pi \frac{N}{60} D) \times \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad 2.68$$

โดยที่ค่า CFL นั้นอาจมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 – 0.7 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณจากการส่งผ่านข้อมูลระหว่างปริมาตรควบคุม (Delafosse et al., 2008), (Murthy & Joshi, 2008) และ (Malik et al., 2016)

## 2.2 บทบาทของวอร์เรน

การคำนวณหา Power Number นั้นเป็นการคำนวณแรงบิดที่ของไหลกระทำต่อใบพัด การคำนวณแรงบิดนั้นจะคำนวณจากการอินทิเกรตความเคียดตลอดพื้นที่ผิวของใบปั่นกววนซึ่งความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการทำนายความเร็วบริเวณใบพัดของแบบจำลอง การวัดความเร็วในถังกวนผสมสามารถใช้เครื่องวัดความเร็ว Laser Doppler Velocimetry หรือ LDV ซึ่งการสร้างแบบจำลองของถังกวนผสมจะประกอบด้วย การเลือกใช้แบบจำลองการหมุน, การเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน รวมถึงรายละเอียดต่าง ๆ เช่น การประมาณให้ความหนาของใบปั่นกววนมีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ โดยผลของสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นต่อการคำนวณความเร็วในถังปั่นกววนและการคำนวณ Power Number มีรายละเอียดในบทนี้

### 2.2.1 ผลของแบบจำลองการหมุนของใบปั่นกววน

การหมุนของใบปั่นในถังกวนผสมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Impeller Boundary Condition หรือ IBC, Multiple Reference Frame หรือ MRF และวิธี Sliding mesh โดยการเลือกใช้แบบจำลองด้วยวิธี IBC เป็นการใช้ค่าจากการทดลองเพื่อทำนายการไหล ซึ่งการใช้วิธีดังกล่าวเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของถังกวนผสมที่แตกต่างจากการทดลองจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการทำนายความเร็วในถังกวนผสม โดยวิธี MRF และ Sliding mesh ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าจากการทดลองแต่เป็นการคำนวณจากรูปร่างของใบพัดร่วมกับสมการการไหลรวมถึงแบบจำลองความปั่นป่วนในกรณีที่เป็นกรณิที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดย Brucato et al. (1998) ได้ทำการเปรียบเทียบความเร็วในถังกวนผสมที่ได้จากการใช้แบบจำลอง IBC, MRF และ Sliding mesh ของใบพัดชนิด Rushton Turbine ที่ไม่คำนึงถึงความหนาของใบพัดและ Baffles และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น k-ε โดยผลการเปรียบเทียบพบว่าความเร็วที่ได้จากการใช้แบบจำลอง Sliding mesh ให้ความแม่นยำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 แบบจำลอง แต่การใช้แบบจำลอง Sliding mesh ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าทั้ง 2 แบบจำลองข้างต้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลของ Aubin et al. (2004) ซึ่งทำการเปรียบเทียบโดยใช้แบบจำลอง MRF และ Sliding mesh ของใบปั่นกววนชนิด 45° Pitched Blade Turbine ซึ่งใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น k-ε โดยไม่คำนึงถึงความหนาของใบพัด โดยผลการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบจำลองกับความเร็วที่วัดโดย LDV พบว่า

การทำนายรูปแบบการหมุนวนของการไหลนั้นไม่แตกต่างจากผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างของผลการทดลองจะปรากฏอยู่ในผลการคำนวณ Power Number และ Flow number ซึ่งการใช้แบบจำลอง Sliding mesh ให้ความใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากกว่า 2 แบบจำลองข้างต้น สำหรับการเปรียบเทียบความเร็วของกังหันที่มีใบพัดมากกว่า 1 ใบ ซึ่งเป็นการเพิ่มความซับซ้อนต่อการไหลในกังหันผสมอย่างมาก โดย Micale et al. (1999) ศึกษาการไหลที่เกิดจาก Dual Rushton Turbine ที่ระหว่างระหว่างใบพัดต่างกันโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็น k- $\epsilon$  พบว่าการใช้แบบจำลองการหมุนเป็น Sliding mesh ให้ผลการคำนวณจาก CFD ใกล้เคียงกับความเร็วที่วัดจากวิธี LDV มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IBC และ MRF สำหรับที่ทุกระยะห่างระหว่างใบพัด แต่อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลอง MRF สามารถให้ผลการคำนวณอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

## 2.2.2 ผลของการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำนายการไหลแบบปั่นป่วน โดยทั่วไปนั้นการจำแนกลักษณะการไหลภายในกังหันผสมจะพิจารณาที่ค่า Reynolds Number มีค่ามากกว่า 10,000 โดยแบบจำลองความปั่นป่วนนั้นมีหลากหลายชนิด โดยชนิดที่ได้รับความนิยมที่ถูกเลือกใช้คือแบบจำลองในกลุ่ม RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) โดยจะพิจารณาความเร็วปั่นป่วน (Fluctuation velocity) ให้อยู่ในรูปของความเครียด หรือ Reynolds Stress แบบจำลองในกลุ่มนี้จะประกอบด้วยกลุ่มย่อยซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้ต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

การเปรียบเทียบผลการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากการวัดจาก LDV ในรูปแบบของ Velocity Vector Plot นั้น Aubin et al. (2004) ได้ทำการเปรียบเทียบการเลือกใช้แบบจำลองในกลุ่ม k- $\epsilon$  ระหว่างแบบจำลอง Standard k- $\epsilon$  และ RNG k- $\epsilon$  (Renormalize Group) สำหรับใบปั่นกังหันชนิด 45° Pitched Blade Turbine พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการคำนวณจากทั้ง 2 แบบจำลองให้รูปแบบการไหลที่เหมือนกัน กล่าวคือรูปแบบการไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกังหันชนิด Pitched Blade Turbine จากการทำนายโดยทั้ง 2 แบบจำลองและค่าที่ได้จาก LDV ไม่แตกต่างกัน หรือเมื่อพิจารณาค่าความเร็วที่วัดมาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกังหันผสม โดยพิจารณาเป็นกราฟระหว่างความเร็วและระยะตามรัศมีที่มีความสูงต่าง ๆ ค่าที่ได้จากการทำ CFD และ LDV สอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งเมื่อผลของการทำนายในแบบจำลองที่มีสมมติฐานต่างกัน Delafosse et al. (2008) ได้เปรียบเทียบการใช้แบบจำลองในกลุ่ม RANS (Reynolds Average Navier Stokes) และ LES (Large Eddy Simulation) โดยใช้ใบปั่นกังหันชนิด Rushton turbine ความเร็วที่ทำนายได้จากทั้ง 2 แบบจำลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับผลการเปรียบเทียบของ Murthy and Joshi (2008), Joshi et al.

(2011) และ Z. Li et al. (2011) แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลอง  $k-\epsilon$  นั้นจะใช้รูปแบบของสมการเพื่อหาลักษณะการไหลที่ใกล้กับขอบหรือเป็นการใช้ Wall function (Versteeg & Malalasekera, 1995) เพื่อหาการไหลบริเวณกำแพงโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพราะฉะนั้นการคำนวณหาแรงบิดที่ได้ อาจจะมีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากการใช้ Wall Function โดย M. Li et al. (2005) ได้ใช้แบบจำลอง SST  $k-\omega$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ผสมระหว่าง Standard  $k-\epsilon$  และ standard  $k-\omega$  เพื่อจำลองการไหลในถังกวนผสมที่ใช้ใบพัดชนิด Retreat Curve Impeller โดยเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองกับผลจาก LDV พบว่าผลที่ได้ให้ความสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันซึ่งสามารถยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามผลความเร็วในแนวสัมผัส (tangential Velocity) มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากระบบที่ผู้ทำการทดลองนั้นใช้ Baffle ชนิดทรงกระบอกเพียง 1 ชั้น ซึ่งส่งผลให้ผิวของของไหลที่ใช้ในการทดลองไม่ราบเรียบซึ่งขัดแย้งกับค่าขอบเขตของของไหลเป็นกำแพงและความเครียดที่ขอบเขตดังกล่าวเป็นศูนย์ ซึ่งเมื่อละความคลาดเคลื่อนดังกล่าวผลการทดลองจาก LDV กับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง SST  $k-\omega$  เป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ Singh et al. (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง  $k-\epsilon$ , SST, SSG-RSM และ SAS-SST โดย SSG-RSM และ SAS-SST เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประยุกต์ใช้หลักการของแบบจำลอง LES โดยร่วมกับการใช้ Wall Function เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งผลการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก LDV พบว่าการทำนายความเร็วของทุกแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบในการความแม่นยำและระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองความปั่นป่วน SST เป็นแบบจำลองที่ให้ความพึงพอใจมากที่สุด

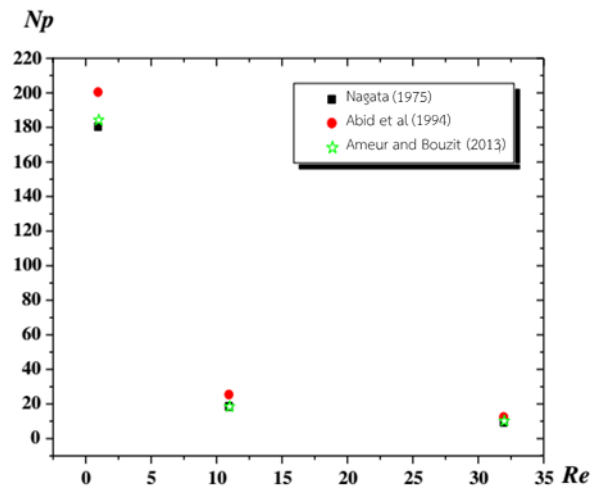
### 2.2.3 ผลของแบบจำลองความปั่นป่วนต่อ Turbulent Kinetic Energy: $k$ และ Turbulent Dissipation rate: $\epsilon$

การวิเคราะห์ตัวแปรของการไหลแบบปั่นป่วนหรือการวิเคราะห์ ค่า  $k$  หรือ Turbulent kinetic Energy และ ค่า  $\epsilon$  หรือ Turbulent dissipation rate ซึ่งในแบบจำลองในกลุ่ม  $k-\epsilon$  และกลุ่ม  $k-\omega$  แบบจำลองทั้งสองกลุ่มจะอยู่บนสมมติฐานที่ให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเหมือนกันในทุกทิศทางหรือเรียกว่า Isotropic ซึ่งจะต่างกับแบบจำลอง Reynolds Stress Model รวมถึงแบบจำลอง LES โดย (M. Li et al., 2004) ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ Retreat Curve Impeller และใช้แบบจำลอง Shear Stress Transport  $k-\omega$  หรือ SST  $k-\omega$  โดยความเร็วที่วัดจากเครื่อง LDV สอดคล้องกับค่าที่ได้จากผลการทดลองแต่ พลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนและการกระจายพลังงานในถังผสมมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เช่นเดียวกับ การทดลองของ Lane (2017) ได้ทำการทดลองโดยใช้ใบพัดชนิด Hydrofoil ซึ่งได้วิเคราะห์โดยปรับความละเอียดของ Mesh บริเวณให้มากที่สุดเพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับผลการคำนวณ โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง SST  $k-\omega$  กับแบบจำลอง LES ซึ่งโดย

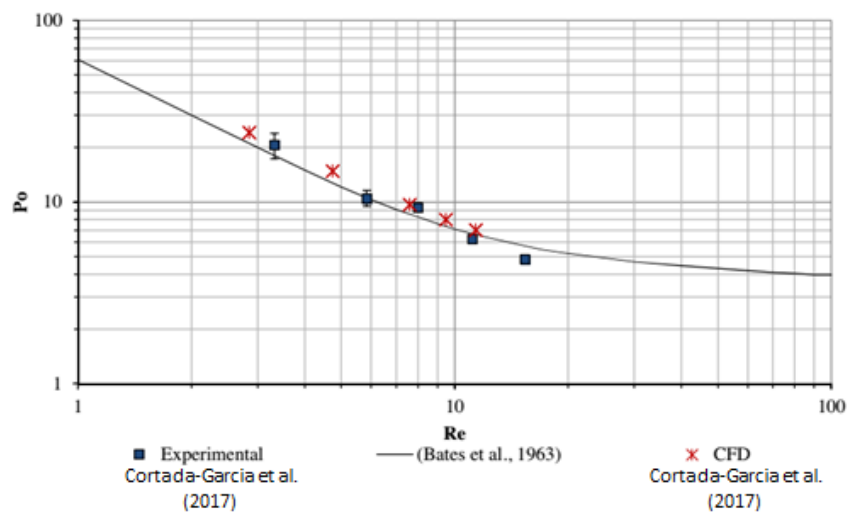
พบว่าแบบจำลอง LES ที่แก้การไหล Eddy ที่เกิดจากความปั่นป่วนโดยตรงร่วมกับการใช้สมการกรองสำหรับสมการ Navier-stokes พบว่าค่าพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนมีใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้แนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ เพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงเดียวกันกับผลการทดลอง นอกจากนี้ นักวิจัยท่านนี้ได้ศึกษาเพิ่มโดยการอินทิเกรต ค่าอัตราการกระจายพลังงานกับปริมาตรทั้งหมด ซึ่งจะได้พลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนโดยค่าดังกล่าวควรมีค่า เท่ากับการคิดพลังงานจากผลคูณระหว่างแรงบิดกับความเร็วจวน ซึ่งการใช้แบบจำลอง LES ให้ความใกล้เคียง มากกว่าการใช้แบบจำลองที่ใช้สมมติฐานแบบ Isotropic ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Li et al. (2011) และ Taghavi et al. (2011) โดยทำการทดลองโดยใช้ใบพัดชนิด Ruston turbine ข้อสรุปของการอธิบายปรากฏการณ์ ดังกล่าวคือความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในถังผสมมีลักษณะเป็น Anisotropic แต่การใช้แบบจำลอง RSM หรือ LES ใช้ เวลาในการคำนวณมากกว่าแบบจำลองที่อยู่บนสมมติฐาน Isotropic ซึ่งการใช้แบบจำลองที่มีสมมติฐานดังกล่าว สามารถทำนายความเร็วหรือการไหลภายในถังผสมที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจาก LDV

#### 2.2.4 การทำนาย Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบ

Power Number เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการออกแบบถังผสมรวมถึงการขยายขนาด จึงตัวใช้เป็น ตัวแปรสำคัญในการสอบเทียบค่าที่คำนวณได้จาก CFD กับผลการทดลอง การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติทำให้ทราบว่า Power Number เป็นฟังก์ชันกับ Reynolds Number และจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า Power Number เป็นค่าคงที่ที่การไหลแบบปั่นป่วน การทำวิจัยเพื่อสอบเทียบตัวแปร Power Number นั้นครอบคลุมในทุกย่านของ Reynolds Number ที่ค่า Reynold Number ต่ำ Ameer and Bouzit (2013) ได้ใช้ CFD เพื่อหาพลังงานที่ใช้ สำหรับการปั่นกววนผสมของของไหลประเภทซูโดพลาสติก (Pseudo-plastic) สำหรับใบพัด Two-Blade โดย เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของ Shinji (1975) โดยแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปแบบที่ 2.8 การแก้ปัญหาของของ ไหลที่มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบสามารถใช้สมการ Navier stoke รองรับปัญหาดังกล่าวร่วมกับสมการที่ใช้ อธิบายความหนืดของของไหลที่เป็นชนิด Non-Newtonian โดยผลการทดลองกับผลการคำนวณ CFD ให้ค่าที่ ยอมรับได้และเป็นไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้ Cortada-Garcia et al. (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ ใช้ในการปั่นกววนของไหลชนิดซูโดพลาสติกโดยใช้ใบพัดชนิด Ruston Turbine และเทียบกับผลการทดลอง ผลการ เปรียบเทียบเป็นที่ยอมรับได้ โดยแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปแบบที่ 2.9 งานวิจัยทั้งสองเป็นเครื่องยืนยันได้ว่า CFD สามารถทำนายพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนในกรณีที่เป็นการไหลแบบราบเรียบรวมถึงในกรณีของของไหลที่เป็นชนิด Non-Newtonian

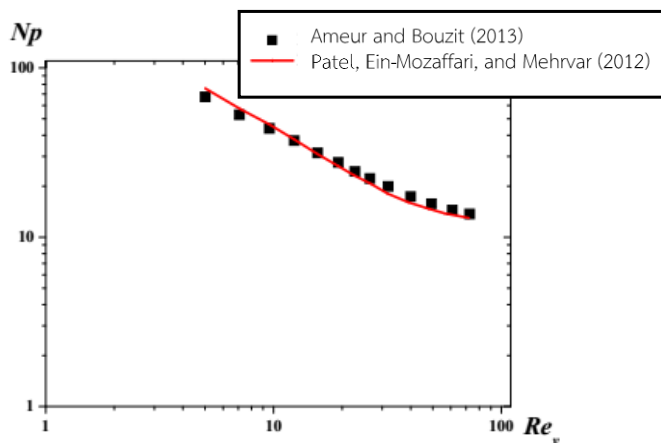


รูปที่ 2.7 Power Number ที่ได้จาก CFD เทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง Power Number กับ Reynolds Number ของ Ameer and Bouzit (2013)



รูปที่ 2.8 Power Number ที่ได้จากผลการการคำนวณ CFD ของ Cortada-Garcia et al. (2017) เทียบกับผลการทดลอง

การคำนวณจาก CFD สามารถคำนวณค่า Power Number ของใบพัดชนิดอื่นโดย Ameer (2015) ได้ ทำการศึกษาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกววนของไหลแบบ Yield Stress โดยใช้ใบพัดชนิด Maxblend และ Anchor Gate โดยสอบเทียบกับการทดลองซึ่งเป็นที่ยอมรับได้และค่าที่คำนวณจาก CFD มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง โดยแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 2.10 ดังนี้



รูปที่ 2.9 Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD ของใบพัดชนิด Maxblend และ Anchor เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Patel et al. (2012)

## 2.2.5 การทำนาย Power Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วน

### 2.2.5.1 ผลของความหนาของใบปั่นกววนต่อค่า Power Number

ค่า Power number ในกรณีของกังหันผสมที่มีการไหลแบบปั่นป่วน โดยทั่วไปของกังหันผสมการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อค่า Reynolds number มีค่ามากกว่า 10,000 โดยในช่วงดังกล่าวค่า Power Number จะเป็นค่าคงที่ (Couper et al., 2009) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการทำนายค่า Power number คือการทำนายแรงบิดหรือแรงที่ของไหลกระทำต่อใบพัดในขณะที่ใบพัดหมุนในสภาวะประหนึ่งคงตัว (Quasi Steady State) แต่อย่างไรก็ตาม การสร้างแบบจำลองจะประกอบไปด้วยการสร้างปริมาตรควบคุม, การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน และการจำลองการหมุนของใบปั่นกววน ซึ่งสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นเป็นตัวแปรต้นที่ส่งผลของความแม่นยำของการทำนายค่า Power Number จากการคำนวณ CFD โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากเปลี่ยนตัวแปรต้นที่กล่าวมานั้นสรุปในตารางที่ 2.1 ดังนี้ การเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD ต้องคำนึงถึงความหนาของใบพัด เนื่องจากที่ความหนาของใบพัดต่างกันการไหลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และค่า Power Number จะมีค่าต่างกัน ซึ่งเมื่อใบพัดมีความหนามากขึ้นค่า Power Number ที่ได้จะมีค่าต่ำ (Bujalski et al., 1987) และ (Chapple et al., 2002) เพราะฉะนั้นการประมาณความหนาของใบพัดเป็นศูนย์ (Zero-thickness) จะส่งผลให้ค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD มากกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลอง

### 2.2.5.2 การทำนายค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine

ค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ในกรณีที่มีความหนามีค่าต่ำ (ค่าอัตราส่วนระหว่างความหนากับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบปั่นกววนมีค่าน้อยกว่า 0.01) ค่า Power Number จะมีค่าเข้าใกล้ 6



ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Rushton (1950) ผลของการเลือกใช้แบบจำลองการหมุนของใบปั่นส่งผลต่อค่า Power Number อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ได้จากใช้แบบจำลองแบบ IBC (Impeller Boundary Condition) จะให้ความคลาดเคลื่อนของ Power number มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการใช้แบบจำลองแบบ IBC จะใช้ข้อมูลของความเร็วที่เกิดจากหมุนของใบพัดที่ได้จากการทดลองมาเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ CFD ซึ่งเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของระบบของถังกวนผสมส่งผลให้ค่าที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองแบบ MRF (Multiple Reference Frame) หรือ Sliding Mesh แบบจำลอง 2 รูปแบบดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้ค่าจากการทดลองแต่เป็นการแก้สมการการไหลที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกวนในถังกวนผสม โดยการใช้แบบจำลองแบบ MRF นั้นเป็นการประมาณระบบให้เป็นสถานะคง (Steady State Approximation) แต่การใช้แบบจำลองแบบ Sliding mesh เป็นการจำลองการหมุนจริงของใบพัด ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบสองแบบจำลอง การใช้แบบจำลองแบบ Sliding mesh ค่าที่ได้จากการคำนวณ CFD ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าการใช้แบบจำลอง MRF (Brucato et al., 1998) แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการคำนวณ CFD เมื่อพิจารณาผลการคำนวณจาก CFD ของการใช้แบบจำลองต่างกันในตารางที่ พบว่าค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลอง LES ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าการใช้แบบจำลองในกลุ่ม RANS (Zadghaffari et al., 2010) แต่อย่างไรก็ตามค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณจากกลุ่ม RANS ตัวอย่างเช่น Standard k- $\epsilon$  หรือ k- $\omega$  ให้ค่า Power Number ไม่แตกต่างจากกรณีของ LES มากเมื่อดำเนินการที่จำนวนของ Mesh ใกล้เคียงกัน (Malik et al., 2016) และ (Murthy & Joshi, 2008) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการใช้แบบจำลองในกลุ่ม RANS แบบจำลองในกลุ่ม k- $\omega$  ได้แก่ SST (Shear Stress Transport), SAS-SST (Scale-Adaptive Simulation), SSG-RSM (Speziale, Sarkar, Gatski Reynolds Stress model) และ SST-CC ทำนายค่า Power Number สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเมื่อเทียบกับแบบจำลอง k- $\epsilon$  (Singh et al., 2011)

### 2.2.5.3 การทำนายค่า Power number ของใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine

ค่า Power Number ของใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine แรงบิดที่ของไหลกระทำต่อใบปั่นกวนของใบพัดชนิดนี้นั้นจะขึ้นอยู่กับองศาของใบพัดรวมถึงจำนวนใบพัด แต่อย่างไรก็ตามการทำนายค่า Power Number จากการคำนวณ CFD จะขึ้นอยู่กับการใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับใบพัดชนิด Rushton Turbine สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองต่าง ๆ โดยการเลือกใช้แบบจำลองการหมุนของใบพัดเป็น Sliding mesh จะให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง (Aubin et al.,

2004) และ (Kumaresan & Joshi, 2006) นอกจากนี้การเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนในกลุ่มของ RANS ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการใช้ LES (Murthy & Joshi, 2008)

#### 2.2.5.4 การทำนายค่า Power number ของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve Impeller

ใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve Impeller หรือ RCI เป็นใบปั่นกวนที่มีลักษณะพิเศษโดยลักษณะของใบปั่นกวนนั้นจะมีการบิดเพื่อทำให้เกิดการไหลในแนวระดับพร้อมกับการไหลในแนวราบ โดยจะนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของของแข็งในถังกวนผสม เช่น ในอุตสาหกรรมยา รวมถึงการผลิตโพลีเมอร์ (Dohi et al., 2004) การใช้ CFD เพื่อทำนายการไหลรวมถึงการหาค่า Power Number ของใบพัดชนิดดังกล่าวจึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย ซึ่งผลของความแม่นยำของการคำนวณนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับใบพัดชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade turbine โดยสามารถพิจารณาในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการค่า Power number หรือแรงบิดในถังกวนผสมคือ ขนาดและชนิดของ Baffle โดย (Rielly et al., 2007) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณค่า Power number ที่ได้จาก CFD และค่าที่ได้จากการทดลองในถังกวนผสมที่มีขนาดต่างกัน โดยใช้แบบจำลองการหมุนเป็น MRF และใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k- $\epsilon$  โดยค่า Power number ที่คำนวณนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับถังกวนผสมทั้ง 2 ขนาด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการใช้แบบจำลองการหมุน Sliding Mesh จะให้ค่า Power number ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง (M. Li et al., 2005)

#### 2.2.5.5 การทำนายค่า Power number ของถังกวนผสมที่ไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน

กรณีของถังกวนผสมที่ไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน (Non-Standard tank) เช่น ในกรณีที่มีใบปั่นกวนมากกว่า 1 ใบ การมีใบปั่นกวนมากกว่า 1 ใบนั้นจะส่งผลให้การไหลในถังกวนผสมมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการทำนายของ CFD ในถังกวนผสม การใช้ใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบ หรือ Dual Rushton Turbine ระหว่างระหว่างใบพัดนั้นจะส่งผลต่อรูปแบบการไหลซึ่งส่งผลต่อการคำนวณ Power number turbine โดยสามารถพิจารณาในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองต่าง ๆ ซึ่งการเลือกใช้แบบจำลองการหมุนของใบพัดเป็น Sliding Mesh ให้ค่า Power Number ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเลือกใช้แบบจำลองการหมุนเป็น MRF หรือ IBC (Micale et al., 1999)

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปการเปรียบเทียบ Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบกังหันชนิด Rushton Turbine

Author	Tank Diameter	Thickness ratio	number of elements	Re	Impeller Approach	Turbulent Model	Discretization Scheme	CFD EXP	Power Number %Error
(Brucato et al. 1998)	0.15 m	Zero thickness	97440 nodes	32000	IBC	k- $\epsilon$	QUICK	4.14	5 17.2
			97440 nodes		MRF	k- $\epsilon$	QUICK	4.42	5 11.6
			97440 nodes		Sliding mesh	k- $\epsilon$	QUICK	5.1	5 2
(Dubey et al. 2006)	0.3 m	0.02	7667 nodes	50000	Mixing plane	k- $\epsilon$	2nd Order	3.22	- -
			17106 nodes	50000	Mixing plane	k- $\epsilon$	2nd Order	3.93	- -
			24607 nodes	50000	Mixing plane	k- $\epsilon$	2nd Order	4.19	- -
			31128 nodes	50000	Mixing plane	k- $\epsilon$	2nd Order	4.32	- -
(Değlon et al. 2006)	0.15 m	Zero thickness	33000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	Upwind Differencing	4.13	6.07 32.0
			230000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	Upwind Differencing	4.69	6.07 22.7
			800000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	Upwind Differencing	4.95	6.07 18.5
			1900000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	Upwind Differencing	5.07	6.07 16.5
			1900000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	Central Differencing	5.31	6.07 12.5
			1900000 cells	40000	MRF	k- $\epsilon$	QUICK	5.4	6.07 11.0
(Murthy et al. 2008)	0.30 m	Zero Thickness	575000 cells	45000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	4.9	5.1 3.92
			575000 cells	45000	Sliding mesh	RSM	2nd Order	5	5.1 1.96
			1275567 cells	45000	Sliding mesh	LES	2nd Order	5.2	5.1 1.96

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine

Author	T (m)	#blade	blade angle	W/D	BtK/T	Zero Thickness	elements	Re	Impeller Approach	Model	Scheme	Power Number		
												CFD	EXP	%Error
(Aubin et al. 2004)	0.19	6	45	0.28	Zero Thickness	155000 cells	45000	45000	MRF	k-ε	HUW	1.83	1.93	5.18
									Mixing plane	k-ε	HUW	1.84	1.93	4.66
									Sliding mesh	k-ε	HUW	1.99	1.93	3.11
(Kumaresan et al. 2006)	0.5	6	30	0.3	0.0118	443840 cells	284774	284774	MRF	k-ε	FUW	1.77	1.93	8.29
									MRF	k-ε	QUICK	1.62	1.93	16.1
									MRF	RNG	HUW	1.87	1.93	3.11
(Kumaresan et al. 2006)	0.5	6	30	0.3	0.0118	443840 cells	284774	284774	Sliding mesh	k-ε	-	0.70	0.71	1.41
									Sliding mesh	k-ε	-	3.32	3.30	0.606
									Sliding mesh	k-ε	-	2.00	2.02	0.990

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบแก้วชนิด Pitched Blade Turbine (ต่อ)

Author	T	#blade	blade angle	W/D	Btk/T	elements	Re	Impeller Approach	Model	Scheme	Power Number		
											CFD	EXP	%Error
(Murthy et al. 2008)	0.3	6	60	0.3	Zero Thickness	575000 cells	45000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	2.95	3.1	4.84
						575000 cells	45000	Sliding mesh	RSM	2nd Order	3.2	3.1	3.23
						1275567 cells	45000	Sliding mesh	LES	2nd Order	3	3.1	3.23
	6	45	0.3	Zero Thickness	575000 cells	45000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	2.3	2.24	2.68	
					575000 cells	45000	Sliding mesh	RSM	2nd Order	2.2	2.24	1.8	
					1275567 cells	45000	Sliding mesh	LES	2nd Order	2.1	2.24	6.25	
(Ge et al. 2014)	0.34	4	45	0.17	Zero Thickness	575000 cells	45000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	1.35	1.3	3.85
						575000 cells	45000	Sliding mesh	RSM	2nd Order	1.25	1.3	3.85
						1275567 cells	45000	Sliding mesh	LES	2nd Order	1.38	1.3	6.15
(Vlček et al. 2016)	0.3	6	45	0.2	0.02	600000 cells	50000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	1.27	-	-
						1033000 cells	50000	Sliding mesh	LES	2nd Order	1.624	1.62	0.257

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบปั่นลมชนิด Dual Rushton Turbine

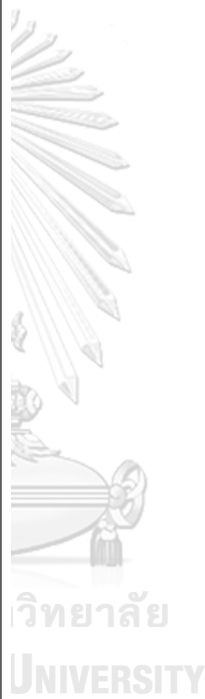
Author	T (m)	H/T	C1/T	C2/T	C3/T	Btk/T	number of elements	Re	Impeller Approach	Model	Scheme	Power Number			
												CFD	EXP %Error		
(Micale et al. 1999)	0.294	1	1/4	1/2	1/4	0.00561	140000 cells	40000	IBC	k- $\epsilon$	HUW	4.6	10.0	54.0	
												MRF	8.2	10.0	18.0
												Sliding mesh	10	10.0	0
0.294	1	1/3	1/3	1/3	0.00561	140000 cells	40000	IBC	k- $\epsilon$	HUW	4.6	8.40	45.2		
											MRF	6.9	8.40	17.9	
											Sliding mesh	8.2	8.40	2.38	
0.294	1	0.15	0.5	0.35	0.00561	140000 cells	40000	IBC	k- $\epsilon$	HUW	4.5	9.50	52.6		
											MRF	7.1	9.50	25.3	
											Sliding mesh	8.4	9.50	11.6	
(Jaworski et al. 2000)	0.720	2	1/4	1	3/4	Zero Thickness	69972 cells	216000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	8.32	10.0	16.8	
												Sliding mesh	8.11	10.0	18.9
(Bujalski et al. 2002)	0.720	2	1/4	1	3/4	Zero Thickness	115444 cells	216000	Sliding mesh	k- $\epsilon$	2nd Order	8.6	10	14.0	

ตารางที่ 2.4 ตารางสรุปการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve Impeller

Author	T (m)	D/T	W/D	Btk/D	Blade angle	Baffle Type	Baffle size	elements	Impeller Approach	Model	Scheme	Power Number		
												CFD	EXP	%Error
(Rielly et al. 2007)	0.29	0.621	0.2	0.091	30	4 Baffles	0.1	400k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.89	0.89	0
						1 Baffle		300k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.51	0.56	8.9
						BT		300k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.41	0.55	25.5
	0.29	0.621	0.2	0.091	30	4 Baffles	0.1	400k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.87	0.8	8.75
						1 Baffle		300k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.43	0.52	17.3
						BT		300k	MRF	k- $\epsilon$	2nd Order	0.33	0.51	35.3
(Li et al. 2005)	0.294	0.59	0.20	-	15	Cylindrical	0.16	406957	SM	SST	2nd Order	1.07	1.02	4.90
						Cylindrical	0.16	307247	SM	SST	2nd Order	1.16	1.02	13.7
						Cylindrical	0.16	229115	SM	SST	2nd Order	1.06	1.02	3.92

ตารางที่ 2.4 ตารางสรุปการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของใบเป็นกวนชนิด Retreat Curve Impeller (ต่อ)

Author	T (m)	D/T	W/D	Btk/D	Blade angle	Baffle Type	Baffle size	elements	Impeller Approach	Model	Scheme	Power Number		
												CFD	EXP	%Error
(C.G. Foehner 2014)	0.445	0.46	0.13	0.063	15	BT	0.1	356211	MRF	k- $\epsilon$	-	0.628	0.601	4.5
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.631	0.547	15.4
									SM	k- $\epsilon$	-	0.532	0.547	2.74
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.626	0.555	12.8
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.626	0.52	20.4
(C.G. Foehner 2014)	0.445	0.455	0.125	0.063	15	4 Baffles	0.1	472258	MRF	k- $\epsilon$	-	0.744	0.838	11.2
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.739	0.763	3.1
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.739	0.757	2.4
									MRF	k- $\epsilon$	-	0.737	0.724	1.8

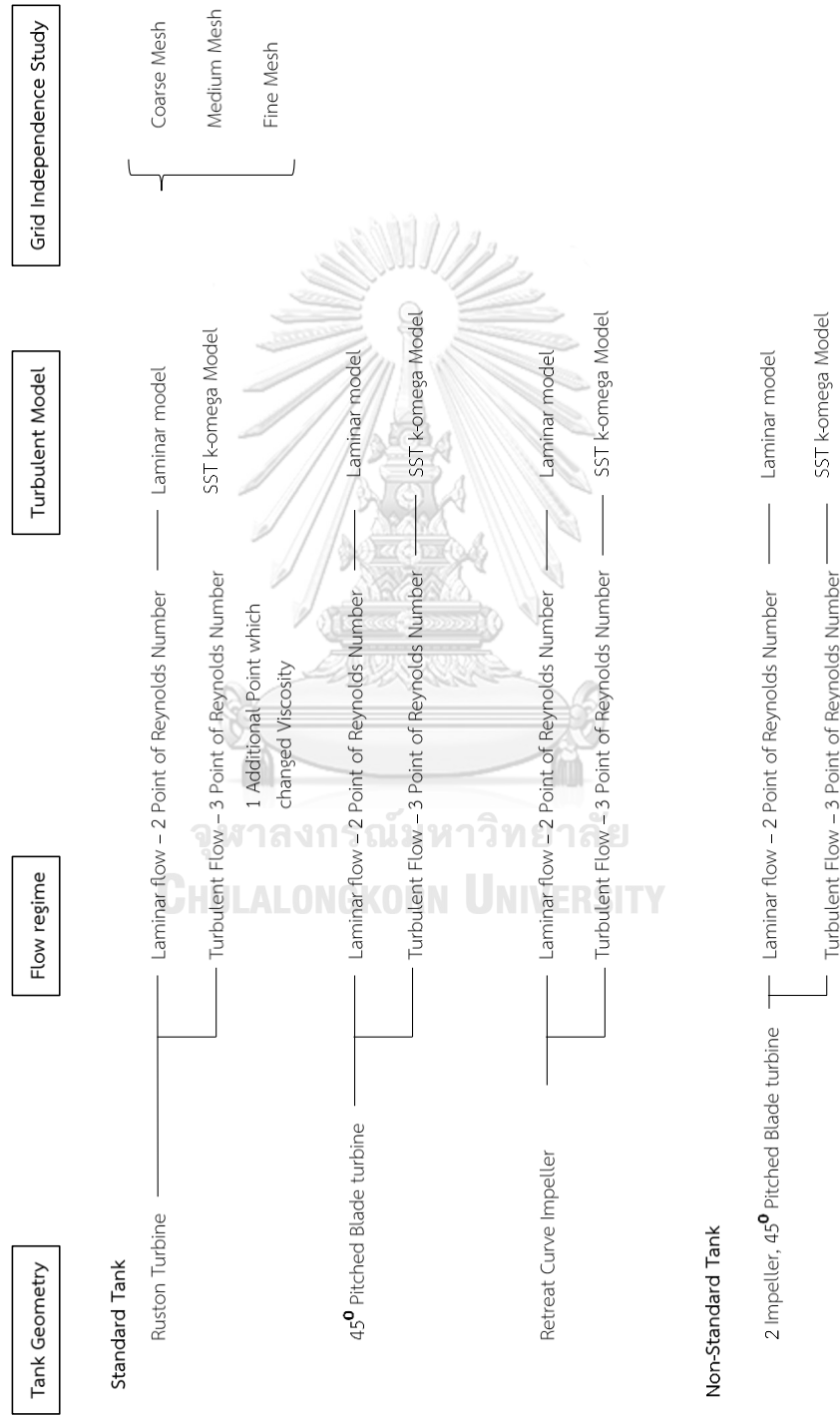




### บทที่ 3 การทำวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

##### 3.1.1 แผนการสอบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง



### 3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณหรือ CFD นั้นแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processing), การคำนวณ (Processing) และกระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processing) ซึ่งทำในโปรแกรม Ansys 18.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ

##### 3.2.1.1 การวาดรูป 3 มิติ

รูป 3 มิติเป็นตัวแทนของการคำนวณ CFD เนื่องจากลักษณะการไหลนั้นจะเปลี่ยนไปตามรูปทรงของขอบเขตกำแพง

##### 3.2.1.2 การพิจารณาปริมาตรของระบบ

การวาดรูป 3 มิติเป็นการสร้างปริมาตรทั้งหมดของระบบ โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการไหลที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกววนในถังกวนผสม เพราะฉะนั้นปริมาตรของระบบคือของไหลในถังปั่นกววน โดยใบปั่นกววน, แกนหมุน หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่อยู่ใ้ในถังกวนผสมที่เป็นของแข็งตัน (Rigid Body) นั้นจะพิจารณาเป็นขอบเขตกำแพง (Wall Boundary) ของการคำนวณ นอกจากนี้แบบจำลองการหมุนนั้นต้องแบ่งระบบออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หยุดนิ่ง (Stationary Domain) และ ส่วนที่เกิดการหมุน (Rotating Domain) โดยภายในส่วนที่หยุดนิ่งนั้นประกอบด้วย Baffle, แกนหมุน และอุปกรณ์เครื่องมือวัดในกรณีของถังหมัก ซึ่งส่วนที่เกิดการหมุนนั้นจะประกอบด้วยใบปั่นกววน เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนที่เกิดการหมุนนั้นจะอยู่กึ่งกลางระหว่างปลายของใบพัดและ Baffle ซึ่งความสูงของส่วนที่เกิดการหมุนนั้นมีค่าไม่เกิน 2 เท่าของความกว้างของใบปั่น (น้อยกว่า 2W) (Coroneo et al., 2011)

##### 3.2.1.3 การสร้างปริมาตรควบคุม (Meshing)

การสร้างปริมาตรควบคุมหรือ Meshing นั้นเป็นการแบ่งปริมาตรของระบบทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อยหรือ Mesh เพื่อคำนวณฟลักซ์ (Flux) ที่ถ่ายเทจากปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกัน โดยในกรณีของการไหลนั้นฟลักซ์จะเป็นการถ่ายเทโมเมนตัมและอินทิเกรตเพื่อหาขนาดและทิศทางของความเร็ว (Versteeg & Malalasekera, 1995) ซึ่งวิธีการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ Structured Mesh เป็นการสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นทรงสี่เหลี่ยม (Hexahedral) และ Unstructured Mesh ซึ่งเป็นการสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือทรง 4 หน้า (Hexahedral) และเป็นปริซึมในบริเวณที่ติดกับขอบเขตที่เป็นกำแพง

### 3.2.1.3.1 กระบวนการ Sweep (Sweep Method)

การ Sweep เป็นกระบวนการหนึ่งในโปรแกรม Ansys Meshing เพื่อให้สามารถสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นทรง 4 เหลี่ยม โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ รูปทรงใด ๆ ต้องสามารถจำลองการสร้างปริมาตรควบคุมในหน้าใดหน้าหนึ่งของรูปทรง ๆ นั้นและสามารถสร้างปริมาตรควบคุมที่มีรูปแบบเดียวกันในทิศทางตั้งฉากหน้านั้น ๆ ไปยังหน้าที่อยู่ตรงข้าม กล่าวคือ ถ้าสร้างปริมาตรควบคุมของถังป่นกวนที่ฐานแบน (Flat Bottom) นั้น ระบบจะสร้างปริมาตรควบคุมที่ฐานจากนั้นจะสร้างปริมาตรควบคุมที่เหมือนกันจนถึงด้านบนของถังกวนผสม ซึ่งในบางครั้งนั้นอาจต้องแบ่งระบบเป็นส่วนๆ เพื่อสร้างปริมาตรควบคุมด้วยกระบวนการนี้ แต่ในส่วนที่เกิดการหมุนนั้นสามารถแบ่งระบบเพื่อใช้กระบวนการนี้ได้ยากเนื่องจากความซับซ้อนของใบพัด เพราะฉะนั้นหลักการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นจะพิจารณารูปทรงที่สามารถใช้กระบวนการ Sweep เพื่อสร้างปริมาตรควบคุมที่เป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยในกรณีที่ใช้กระบวนการดังกล่าวไม่ได้นั้นจะสร้างปริมาตรเป็นพีระมิดหรือปริซึมตามลักษณะความซับซ้อนของรูปทรงนั้น ๆ

### 3.2.2 การคำนวณ

ขั้นตอนการคำนวณนั้นจะเป็นการตั้งค่าในโปรแกรม Ansys fluent 18.1 และการดำเนินการนั้นจะดำเนินการแบบจำลองด้วยวิธี Multiple Reference Frame เพื่อหาค่าเริ่มต้นของการดำเนินการก่อนเปลี่ยนเป็นใช้วิธี Sliding Mesh โดยมีรายละเอียดขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

#### 3.2.2.1 ค่าเริ่มต้น (Initial Guess)

การคำนวณนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การใช้แบบจำลองการหมุนแบบ MRF เพื่อหาค่าเริ่มของการคำนวณก่อนที่จะเปลี่ยนไปใช้แบบจำลองการหมุนแบบ Sliding Mesh เพื่อหาผลลัพธ์จากการคำนวณ ซึ่งค่าเริ่มต้นของขั้นตอนแรกหรือค่าเริ่มต้นของการดำเนินการแบบจำลองโดยใช้วิธี MRF นั้นความเร็วในแต่ละปริมาตรควบคุมในระบบจะมีค่าเท่ากับ 0

#### 3.2.2.2 คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการจำลองการไหล

ย่านการไหลแบบราบเรียบจะใช้ของเหลวความหนืดสูงเพื่อคำนวณหาค่า Power Number แต่ในย่านการไหลแบบปั่นจะใช้น้ำ โดยคุณสมบัติของของเหลวแสดงในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการจำลองการไหล

ชนิดของของเหลว	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ความหนืด (Pa-s)
ของเหลวความหนืดสูง	1080	50
น้ำ	998.2	0.001

### 3.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

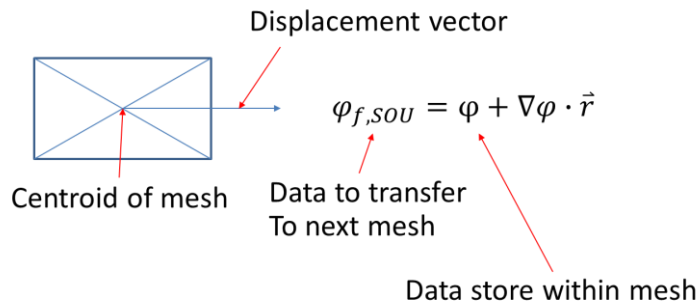
ถังปั่นกวนนั้นไม่มีการป้อนสารเข้าและไม่มีการที่ออกจากระบบเป็นการดำเนินการในระบบปิด ซึ่งการไหลนั้นจะเกิดจากการหมุนของใบปั่นกวนหรือการหมุนของขอบเขตที่เป็นกำแพง โดยขอบเขตที่เป็นกำแพงนั้นจะประกอบด้วย ผนังของถังกวนผสม, แกนหมุน, Baffle, พื้นผิวของของเหลว และใบปั่นกวน โดยมีรายละเอียดของแต่ละเงื่อนไขของเขตแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรายละเอียดของเงื่อนไขขอบเขต

ชื่อของขอบเขตกำแพงในถังกวนผสม	รายละเอียด
ผนังของถังกวนผสม	ขอบเขตกำแพงที่หยุดนิ่ง (Stationary Wall) และไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition)
แกนหมุน	ขอบเขตกำแพงที่เกิดการหมุน (Moving Wall) โดยมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วรอบของการปั่นกวน
Baffle	ขอบเขตกำแพงที่หยุดนิ่ง (Stationary Wall) และไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition)
พื้นผิวของของเหลว	ขอบเขตกำแพงที่หยุดนิ่ง (Stationary Wall) และไม่มีการถ่ายโอนฟลักซ์ของโมเมนตัม (Zero-flux)
ใบปั่นกวน	ขอบเขตกำแพงที่เกิดการหมุน (Moving Wall) โดยมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วรอบของการปั่นกวน

### Discretization Scheme และอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ

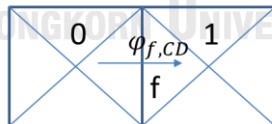
การใช้ CFD นั้นเป็นการคำนวณการไหลในแต่ละปริมาตรควบคุมซึ่ง Discretization Scheme เป็นรูปแบบของการส่งต่อข้อมูลระหว่างปริมาตรควบคุม ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการคำนวณการไหลของของเหลวใน 1 ภูมิภาค เพราะฉะนั้นข้อมูลที่ส่งต่อระหว่างปริมาตรควบคุมคือฟลักซ์ของโมเมนตัม โดยการคำนวณฟลักซ์ที่ส่งต่อนั้นอาจคำนวณจากปริมาตรควบคุมนั้น ๆ กล่าวคือใช้ความเร็วของปริมาตรควบคุมเพื่อคำนวณฟลักซ์และส่งต่อไปให้ปริมาตรควบคุมที่อยู่ถัดไป โดย Discretization Scheme ลักษณะนี้ถูกเรียกว่า  $2^{nd}$  order upwind โดยสามารถพิจารณาลักษณะของการส่งผ่านข้อมูลได้ในรูปที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.1 รูปแสดงการส่งผลการข้อมูลโดยใช้ 2<sup>nd</sup> order upwind discretization scheme โดย  $\varphi_{f,SOU}$  คือฟลักซ์ที่ส่งต่อไปยังปริมาตรควบคุมถัดไป,  $\varphi$  ฟลักซ์ของความเร็วภายในปริมาตรควบคุมนั้น ๆ,  $\nabla\varphi$  คือการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ภายในปริมาตรควบคุม และ  $\vec{r}$  คือเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของปริมาตรควบคุมถึงจุดศูนย์กลางของหน้าของปริมาตรควบคุม (Face centroid) ที่ต้องการส่งผ่านข้อมูล

การส่งผลผ่านข้อมูลด้วยรูปแบบดังกล่าวจะเหมาะสมกับระบบที่สร้างปริมาตรควบคุมเป็นทรง 4 เหลี่ยมทั้งหมด เนื่องจากการจัดของการส่งผ่านข้อมูลของปริมาตรควบคุมที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณและส่งผลให้ความแม่นยำของการคำนวณลดลง ซึ่งการสร้างปริมาตรควบคุมของถังกวนผสมนั้นเป็นการสร้างผสมปริมาตรควบคุม 2 ชนิด เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้ Scheme ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ โดยใช้ Discretization Scheme ผสมระหว่าง 2<sup>nd</sup> order upwind กับ Central differencing scheme โดย Central differencing scheme มีลักษณะของการส่งผลผ่านข้อมูลในรูปที่ 3.2 ดังนี้

$$\varphi_{f,CD} = \frac{1}{2}(\varphi_0 + \varphi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\varphi_0 \cdot \vec{r}_0 + \nabla\varphi_1 \cdot \vec{r}_1)$$



รูปที่ 3.2 รูปแสดงการส่งผลการข้อมูลโดยใช้ Central differencing scheme

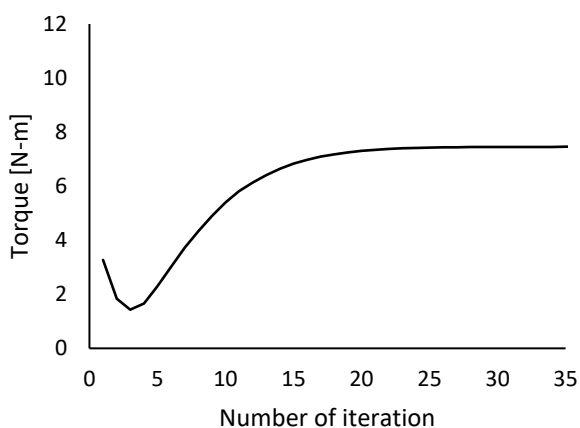
Central differencing scheme จะคำนวณฟลักซ์แตกต่างกับ 2<sup>nd</sup> order upwind โดยจะใช้ค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ที่คำนวณจากปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกัน โดยรูปแบบผสมระหว่าง 2 scheme ดังกล่าวถูกเรียกว่า 3<sup>rd</sup> order MUSCL (Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws) scheme โดยมีรูปแบบของการคำนวณแสดงในสมการ ดังนี้ (Aubin et al. (2004) และ Ansys fluent theory guide)

$$\varphi_f = \frac{1}{8}\varphi_{f,CD} + \left(\frac{7}{8}\right)\varphi_{f,SOU} \tag{3.1}$$

อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณนั้นเป็น SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) ซึ่งเหมาะสำหรับปริมาตรควบคุมที่เป็นพีระมิดหรือมีลักษณะของการบิดตัวหรือเบ้เอียง (Skewed Mesh) (Coroneo et al. (2011) และ Ansys fluent theory guide)

### 3.2.2.4 การกำหนดจำนวนรอบการหมุนต่อ time step

การคำนวณการไหลที่ขึ้นกับเวลานั้นจะคำนวณเป็น Time step โดยคำนวณการไหลที่เวลาย่อย ๆ ละมีผลของการไหลที่เวลาก่อนหน้าส่งผลไปยังเวลาถัดมา โดยการคำนวณค่า Time step ให้เหมาะสมนั้นมีรายละเอียดอยู่ในบทที่ 2.1.8 ซึ่งการกำหนดจำนวนรอบเพื่อให้เหมาะสมนั้นจะพิจารณากราฟระหว่างแรงบิดและจำนวนการหมุนวนใน Time Step แรกที่ใช้คำนวณ โดยแสดงในรูปที่ 3.3 ดังนี้

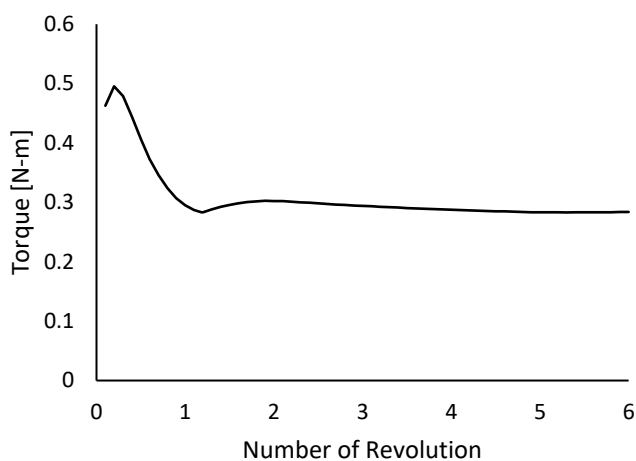


รูปที่ 3.3 รูปแสดงกราฟระหว่างแรงบิดและจำนวนรอบการหมุนวน

จำนวนรอบการหมุนวนตั้งแต่ 35 ขึ้นไปนั้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งหมายความว่าสามารถใช้จำนวนรอบการหมุนวนเท่ากับ 35 ต่อ 1 time step นั้นเพียงพอต่อการคำนวณ

### 3.2.2.5 การหยุดการคำนวณ

การหยุดการคำนวณจะพิจารณากราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งค่าแรงบิดนั้นต้องมีแนวโน้มเป็นค่าคงที่ในเวลา 1 คาบ หรือ 1 รอบการหมุน โดยสามารถพิจารณาจากรูปที่ 3.4 ได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 รูปแสดงผลการคำนวณแรงบิดต่อเวลา

รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่าที่แรงบิดนั้นเริ่มมีแนวโน้มที่เป็นค่าคงที่ตั้งแต่รอบการหมุนเท่ากับ 5 รอบ และเป็นค่าคงที่ใน 1 รอบการหมุน

### 3.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ

#### 3.2.3.1 การแสดงผลความเร็ว

การแสดงผลความเร็วจะเป็นการสร้างแสดงผลความเร็วไร้หน่วยเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเทียบกับความเร็วปลายของใบพัดได้ โดยแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\text{ความเร็วไร้หน่วย} = \frac{\text{ความเร็วจากผลการคำนวณ}}{\text{ความเร็วปลายของใบพัด}}$$

## บทที่ 4

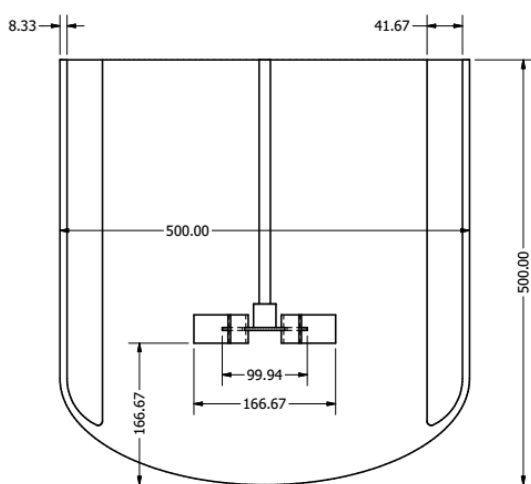
### ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานและการสอบเทียบผลการ

#### ทดลอง

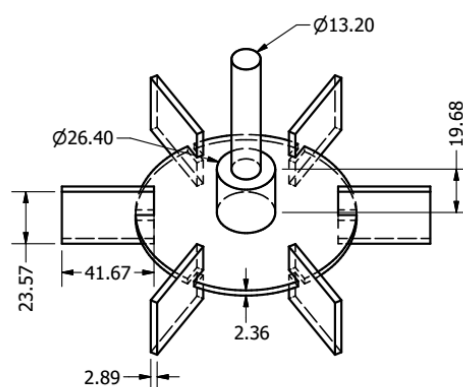
#### 4.1 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวณชนิด Rushton Turbine

##### 4.1.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวณ

ใบปั่นกวณชนิด Rushton turbine นั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นใบพัดและงานสำหรับติดตั้งใบพัด โดยลักษณะของรูปร่างดังกล่าวนี้เพิ่มการกระจายตัวของแก๊สในกรณีของการผสมระหว่างแก๊สกับของเหลว (Luan et al., 2017) ซึ่งอัตราส่วนของขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวณนั้นเป็นไปตามขนาดมาตรฐาน โดยรูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกวณแสดงในรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1ก



รูปที่ 4.1ข

รูปที่ 4.1ก และ ข แสดงรูปร่างและขนาดของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวณชนิด Rushton Turbine ที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน โดยรูปร่างและขนาดของใบปั่นกวณอ้างอิงจากงานวิจัยของ Chapple et al. (2002) (หน่วยมิลลิเมตร)

##### 4.1.2 ผลการสร้างปริมาตรควบคุม (Meshing)

การคำนวณพลศาสตร์การไหลเป็นการใช้วิธี Finite Volume เพื่อแก้สมการ Navier-Stoke รวมถึงแก้แบบจำลองความปั่นป่วนในกรณีที่ของไหลไหลในย่านการไหลแบบปั่นป่วน การสร้างปริมาตรควบคุม (Control Volume) หรือ Mesh เป็นการแบ่งปริมาตรทั้งหมดของระบบให้เป็นส่วนย่อยและอินทิเกรตสมการที่เกี่ยวข้องใน



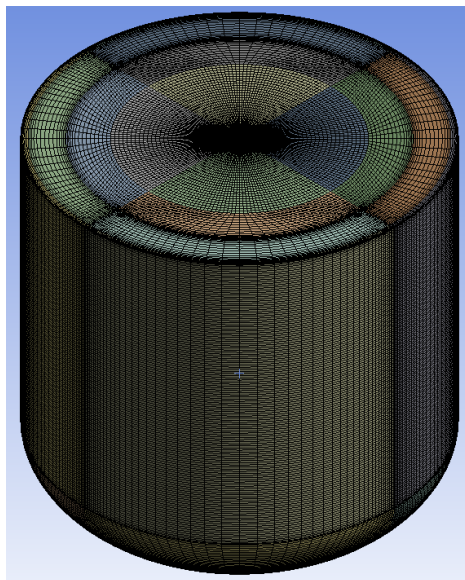
ปริมาตรควบคุมนั้น ซึ่งในกรณีของการศึกษาลักษณะการไหลผลลัพธ์ของการอินทิเกรตจะเป็นขนาดและทิศทางของความเร็ว นอกจากนี้การผลการคำนวณสามารถหาอนุพันธ์ของความเร็วเพื่อคำนวณแรงบิดที่ของไหลกระทำต่อใบปั่นกววน (Versteeg & Malalasekera, 1995)

แบบจำลองการไหลของถังกวนผสมนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามวิธีการจำลองการหมุนของใบปั่นกววนคือ ส่วนที่หยุดนิ่ง (Stationary Domain) และส่วนที่เกิดการหมุน (Rotational Domain) ซึ่งส่วนที่สำคัญที่ส่งผลต่อผลการคำนวณคือปริมาตรควบคุมที่บริเวณขอบเขตการคำนวณที่เป็นกำแพง ได้แก่ บริเวณผนังของถังกวนผสม, Baffle, แกนหมุน และใบปั่นกววน การเปรียบเทียบผลของความละเอียดของปริมาตรควบคุมจึงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาเป็นอันดับแรกของการสร้างแบบจำลอง เพื่อทดสอบว่าผลการจำลองการไหลนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดของปริมาตรควบคุมโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วในแนวตั้ง, แนวรัศมี และแนวสัมผัส รวมถึงค่า Power Number ที่ได้จากปริมาตรควบคุมที่มีความละเอียดแตกต่างกัน 3 ระดับ โดยทำการปรับของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังกวนผสม, Baffle, แกนหมุน และใบปั่นกววน รวมถึงการปรับขนาดของปริมาตรควบคุมที่ใหญ่ที่สุด โดยในส่วนที่ปริมาตรควบคุมมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นส่วนที่ห่างจากผนัง โดยมีขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้

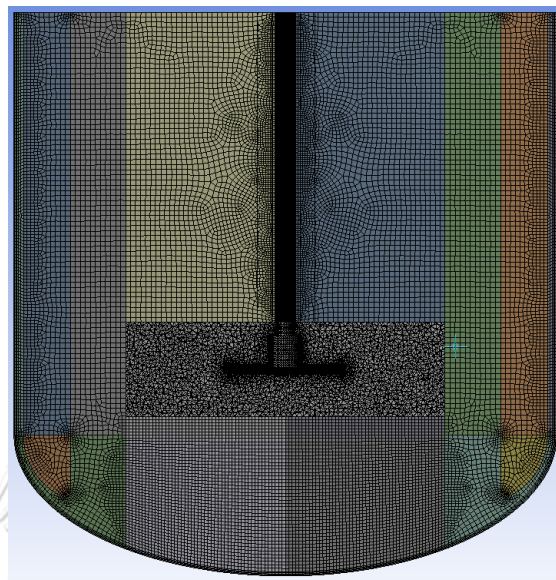
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดของปริมาตรควบคุมของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด		
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	0.2222 มิลลิเมตร	0.1667 มิลลิเมตร	0.1111 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffles	2 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	1.3 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกววน	0.8 มิลลิเมตร	0.8 มิลลิเมตร	0.8 มิลลิเมตร
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	6 มิลลิเมตร	4.5 มิลลิเมตร	4.25 มิลลิเมตร
จำนวนของปริมาตรควบคุม	2.56 ล้าน	3.05 ล้าน	3.85 ล้าน

ตัวอย่างของการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนี้



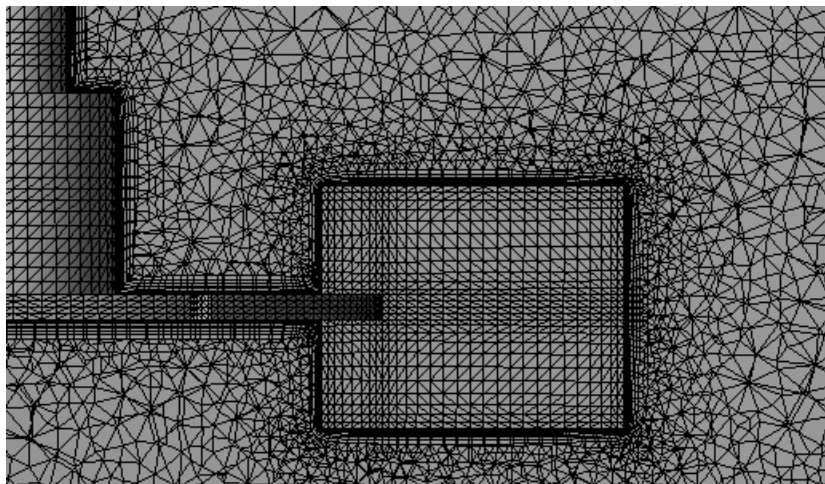
รูปที่ 4.2ก



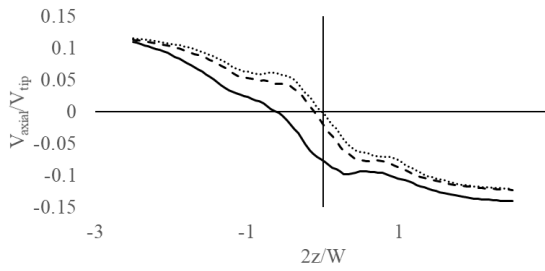
รูปที่ 4.2ข

รูปที่ 4.2ก แล ข ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังกวนผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine โดยมีจำนวนของปริมาตรควบคุมทั้งหมดเท่ากับ 3.05 ล้าน

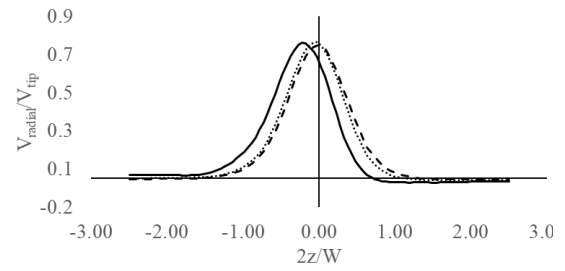
ผลการสร้างปริมาตรควบคุมที่แสดงในรูปที่ รูปที่ 4.2 นั้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความละเอียดของปริมาตรควบคุมในบริเวณผนังของถังกวนผสม, Baffle, แกนหมุน และใบปั่นกวน การสร้างปริมาตรควบคุมนั้นทำได้ 2 วิธีคือการสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นทรงสี่เหลี่ยม (Structured Mesh) และเป็นรูปทรงอื่น (Unstructured Mesh) โดยรูปทรงอื่นคือรูปทรงเรขาคณิต เช่น พีระมิดฐาน 3 เหลี่ยมหรือ 4 เหลี่ยม นอกจากนี้สามารถเป็นปริซึมในกรณีที่ต้องการสร้างปริมาตรควบคุมในระบบที่มีรูปทรงซับซ้อน โดยการสร้างปริมาตรควบคุมในถังกวนผสมนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หยุดนิ่งและส่วนที่เกิดการหมุน โดยในส่วนที่หยุดนิ่งนั้นจะประกอบไปด้วย Baffle, ผนังของถังปั่นและแกนหมุน โดยในส่วนนี้จะสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นทรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากในส่วนดังกล่าวนี้รูปทรงไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับรูปทรงของใบปั่นกวน นอกจากนี้สร้างปริมาตรควบคุมให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม นั้นให้ข้อได้เปรียบในเรื่องของความเร็วในการคำนวณและความแม่นยำในการคำนวณ (Paul et al., 2004) แต่ในทางกลับกันนั้นส่วนที่เกิดการหมุนนั้นมีรูปทรงที่ซับซ้อนจึงสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นรูปทรงพีระมิดและปริซึม ซึ่งนอกจากนี้การคำนวณแรงบิดนั้นต้องการความละเอียดที่บริเวณใบปั่นกวนจึงต้องสร้างปริมาตรควบคุมให้มีลักษณะเป็นชั้น โดยแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนี้



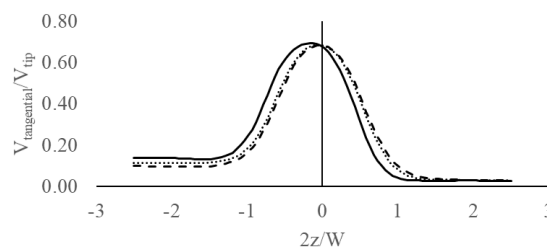
รูปที่ 4.3 รูปแสดงปริมาตรควบคุมในส่วนที่เกิดการหมุนของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine  
ขนาดและจำนวนของปริมาตรควบคุมนั้นต้องไม่ส่งผลถึงผลการคำนวณความเร็วและค่า Power Number  
เพราะฉะนั้นการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของปริมาตรควบคุมนั้นเป็นการหาขนาดและจำนวนที่เหมาะสม  
เพื่อใช้สร้างแบบจำลอง โดยผลการคำนวณความเร็วจากแบบจำลองที่มีความละเอียดของปริมาตรควบคุมต่างกัน  
แสดงในรูปที่ 4.4 ดังนี้



รูปที่ 4.4ก



รูปที่ 4.4ข



รูปที่ 4.4ค

รูปที่ 4.4ก, ข และ ค คือรูปแสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้ง, แนวรัศมี และแนวสัมผัสที่ระยะห่างระยะห่างตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของถึงปืนกวนต่อรัศมีของใบปั่นกวนเท่ากับ 0.37 (โดยที่ เส้นทึบ, เส้นประ และเส้นไข่ปลา แทนผลการคำนวณความเร็วจากจำนวนปริมาตรควบคุมเท่ากับ 2.56 ล้าน, 3.05 ล้าน และ 3.87 ล้าน ตามลำดับ)

ความเร็วที่ได้จากแบบจำลองที่มีความละเอียดแตกต่างกันนั้นแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจากผลการคำนวณพบว่า การปรับความละเอียดของปริมาตรควบคุมเพื่อให้มีจำนวนเท่ากับ 3.05 ล้าน และ 3.87 ล้าน นั้นให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงซึ่งแตกต่างจากผลการคำนวณระหว่างปริมาตรควบคุมที่จำนวนเท่ากับ 2.56 ล้าน และ 3.05 ล้าน นอกจากนี้ผลของความละเอียดของปริมาตรควบคุมส่งผลต่อการคำนวณค่า Power Number โดยแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากแบบจำลองที่มีความละเอียดของ ปริมาตรควบคุมต่างกัน

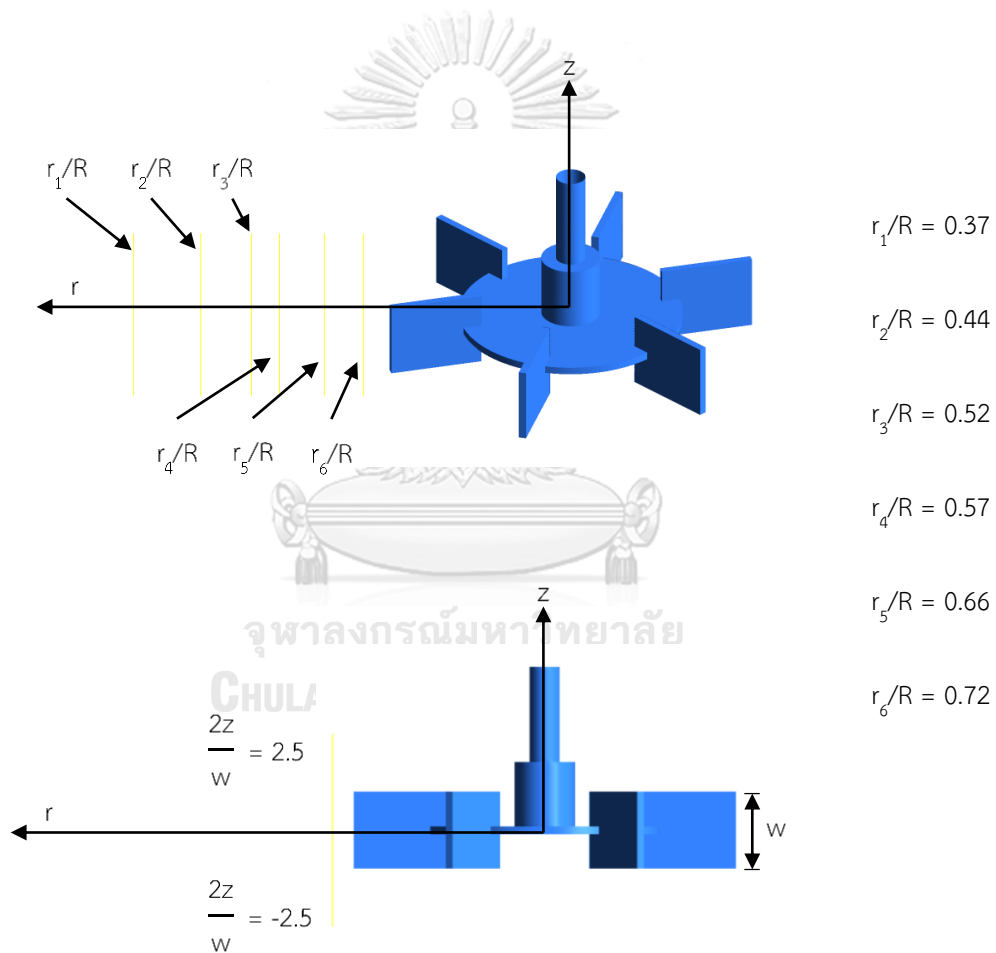
ระดับของความละเอียดของ Mesh	จำนวน Element	ค่า Power Number
1	2.56 ล้าน	5.18
2	3.05 ล้าน	5.01
3	3.87 ล้าน	5.00

การเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการคำนวณค่า Power Number นั้นจะเปรียบเทียบร้อยละผลต่างเทียบกับค่าที่ได้จากความละเอียดสูงสุด โดยร้อยละความแตกต่างของค่า Power Number ที่คำนวณจากแบบจำลองที่มีจำนวนปริมาตรควบคุมเท่ากับ 2.56 ล้านและ 3.05 ล้านเท่ากับ 3.68 และ 0.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองที่มีจำนวนปริมาตรควบคุมเท่ากับ 3.05 ล้านนั้นให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่มีจำนวนปริมาตรควบคุมเท่ากับ 3.87 ล้าน การจำลองการไหลในถังปั่นกววนเป็นการจำลองการไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient Simulation) ซึ่งต้องการเวลาในการคำนวณมากเพราะฉะนั้นการเปรียบเทียบความละเอียดของ mesh ต่อผลการจำลองความเร็วและค่า Power Number เป็นการหาจำนวนของ Mesh ที่เหมาะสมกับผลการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นแบบจำลองที่มีจำนวน Element เท่ากับ 3.05 จะถูกนำมาใช้เพื่อสอบเทียบผลการคำนวณความเร็วในแกนต่าง ๆ กับค่าที่ได้จากผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) นอกจากนี้ขนาดของ Mesh ที่ความละเอียดดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เพื่อสร้างแบบจำลองของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine และ Retreat Curve

#### 4.1.3 การสอบเทียบผลการทดลองของใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine

##### 4.1.3.1 ความเร็วที่วัดได้จากผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989)

การทดลองของ Wu and Patterson (1989) เป็นความเร็วที่วัดได้จากเครื่อง Laser Doppler Velocimetry โดยในการทดลองนั้นใส่เม็ดพลาสติกที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของไหลในถังปั่นกวานโดยลักษณะการทำงานของเครื่องมือวัดดังกล่าวเป็นการวัดความเร็วของ laser ที่เปลี่ยนแปลงไปของหลังจากกระทบกับเม็ดพลาสติกที่ไหลในถังปั่นกวาน โดยตำแหน่งที่นำมาเปรียบเทียบความเร็วระหว่างผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) กับความเร็วจากแบบจำลอง แสดงในรูปที่ 4.5 ดังนี้



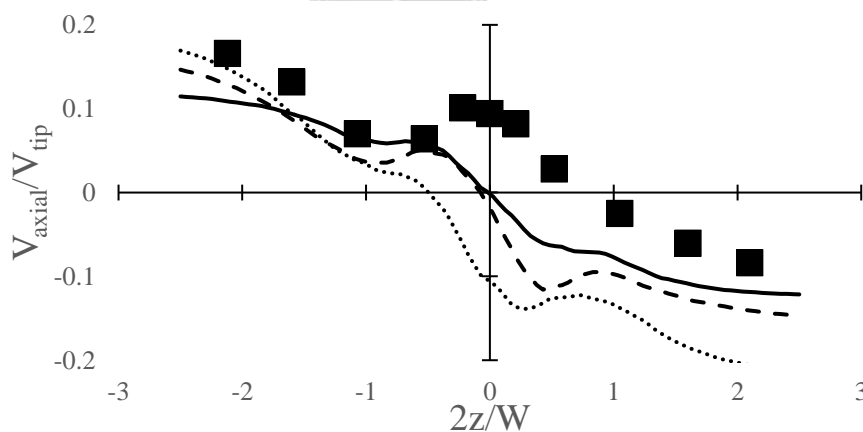
รูปที่ 4.5 รูปแสดงตำแหน่งของการวัดความเร็วเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

#### 4.1.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณความเร็วในแต่ละแกนกับความเร็วรอบหมุน

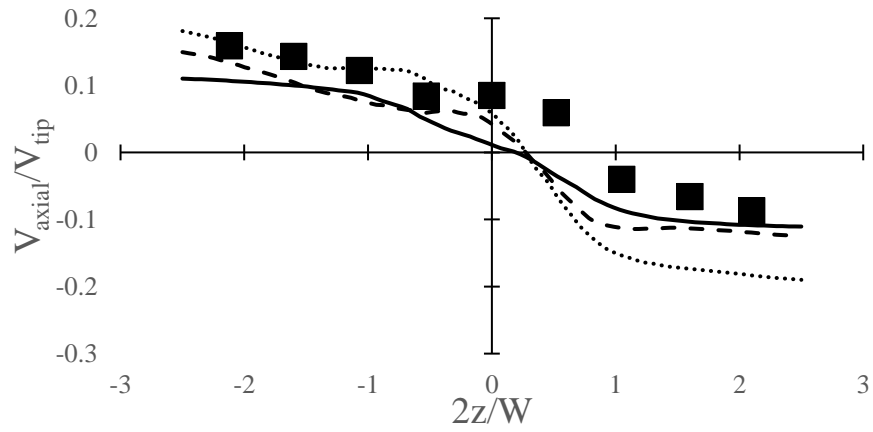
ผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลคำนวณความเร็วจากแบบจำลองที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100, 175 และ 250 รอบต่อนาที โดยความเร็วจะถูกเปรียบเทียบในแต่ละแกนดังแสดงในรูปที่ 4.6, รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ดังนี้

##### 4.1.3.2.1 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวตั้ง

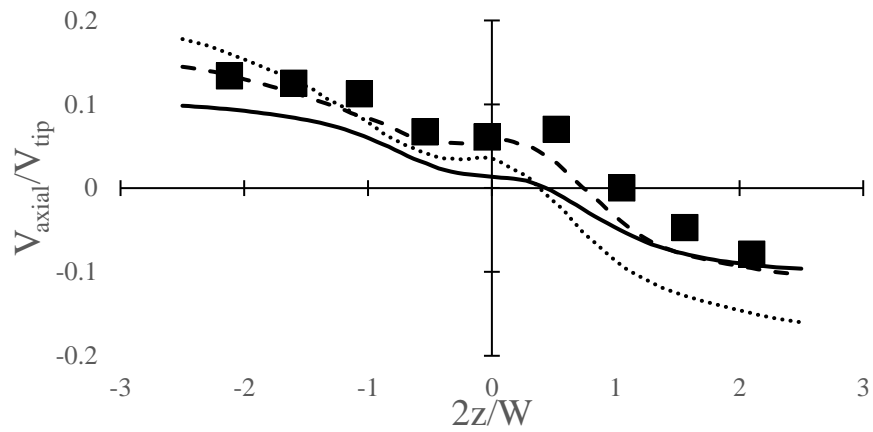
ลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine นั้นมีการไหลในแนวรัศมีเป็นหลัก เพราะฉะนั้นความเร็วในแนวตั้งในบริเวณใกล้กับใบปั่นกววนนั้นย่อมมีค่าต่ำ โดยกราฟในรูปที่ 4.6 แสดงผลการคำนวณนั้นเป็นค่าความเร็วในแนวตั้งต่อความเร็วปลายของใบปั่นกววน โดยค่าของความเร็วในแนวตั้งนั้นพบว่ามีค่าไม่เกิน 0.2 หรือร้อยละ 20 ของความเร็วปลายของใบพัด แต่อย่างไรก็ตามในรูปที่ 4.6 ก็นั้นพบว่าผลการคำนวณความเร็วมีความแตกต่างจากผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) โดยมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันแต่แตกต่างที่ขนาดของความเร็ว ซึ่งผลการคำนวณนั้นสอดคล้องกับผลการคำนวณของ Singh et al. (2011) ที่ใช้แบบจำลอง SST k- $\omega$  เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ซึ่งที่ระยะห่างออกจากใบปั่นกววนพบว่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณและความเร็วที่ได้จากผลการทดลองนั้นสอดคล้องกันโดยสามารถพิจารณาได้ในรูปที่ 4.6 ดังนี้



รูปที่ 4.6ก



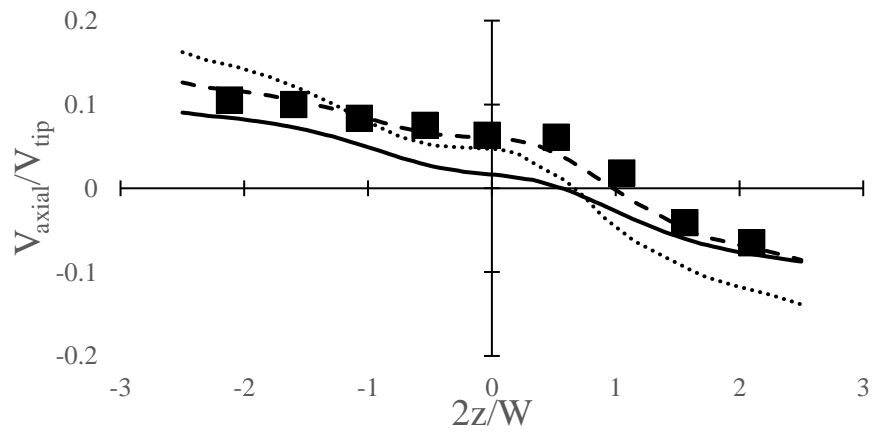
รูปที่ 4.6a



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

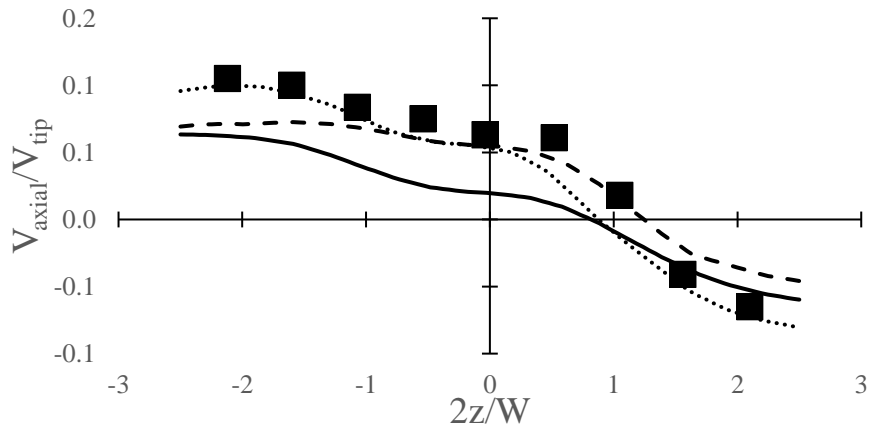
รูปที่ 4.6b

CHULALONGKORN UNIVERSITY

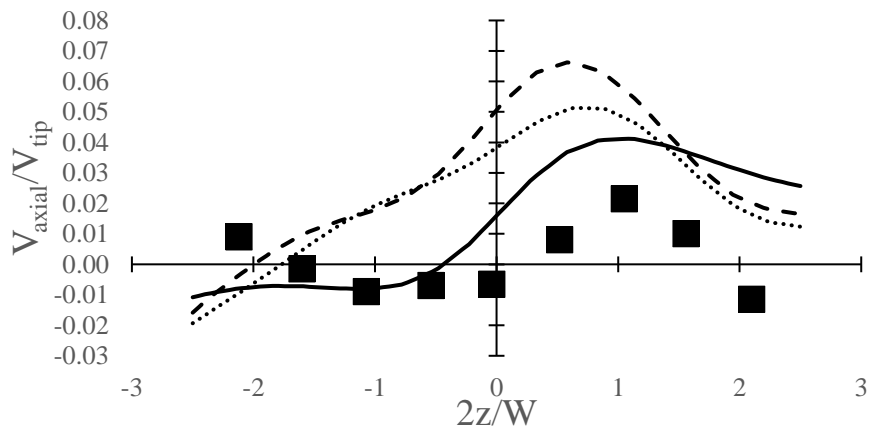


รูปที่ 4.6c





รูปที่ 4.6จ

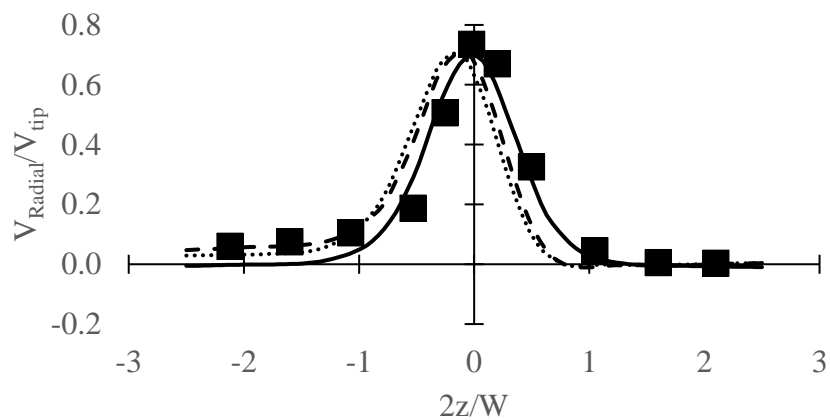


รูปที่ 4.6ข

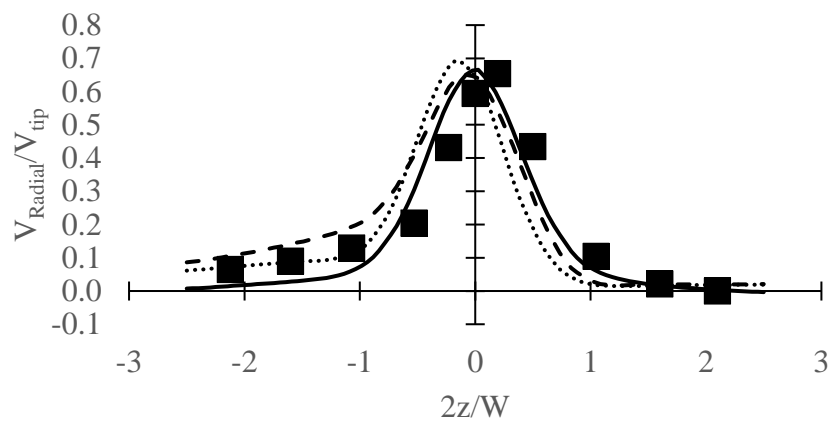
รูปที่ 4.6ก - ข กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) ที่อัตราส่วนระหว่างระยะตามแกน  $r$  กับรัศมีของถังเท่ากับ 0.37, 0.44, 0.52, 0.57, 0.66 และ 0.78 ตามลำดับ (โดยที่ เส้นทึบ, เส้นประ, เส้นไข่ปลา และ ■ แทนผลการคำนวณความเร็วที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 ( $Re = 46,000$ ) 175 ( $Re = 80,000$ ), 250 ( $Re = 115,000$ ) รอบต่อนาที และผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989)  $Re = 34,000$  ตามลำดับ)

#### 4.1.3.2.2 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวรัศมี

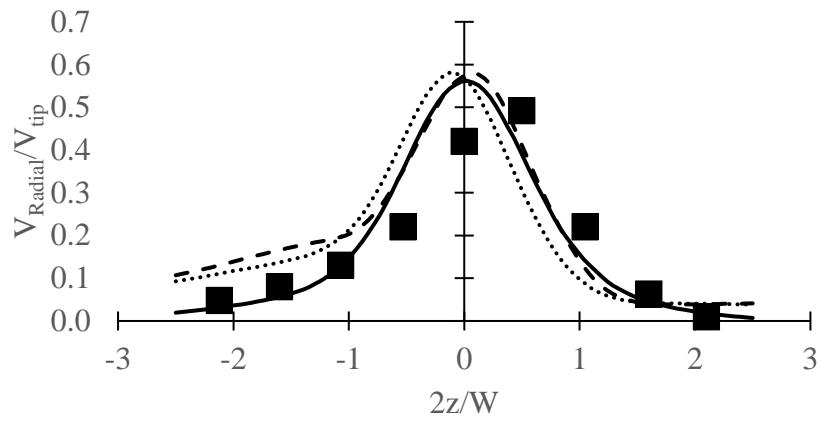
ใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine นั้นทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมีเป็นหลักโดยสามารถพิจารณาจากรูปที่ 4.4 ซึ่งความเร็วมีค่าประมาณ 0.8 เท่าหรือเท่ากับร้อยละ 80 ของความเร็วปลายของใบพัด โดยพบว่าลักษณะของความเร็วที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่พุ่งออกจากใบพัดและมีความเร็วลดลงตามระยะทางในแนวรัศมี นอกจากนี้ผลการคำนวณนั้นสอดคล้องกับผลการทดลองทั้งแนวโน้มและขนาดของความเร็วซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณของ Singh et al. (2011)



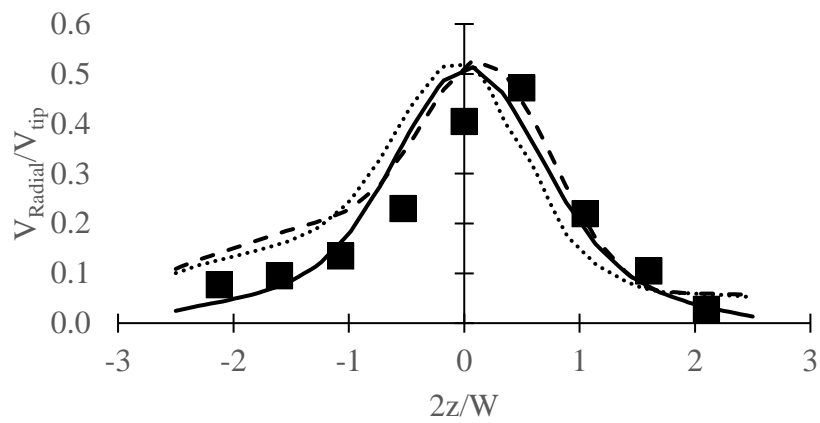
รูปที่ 4.7ก



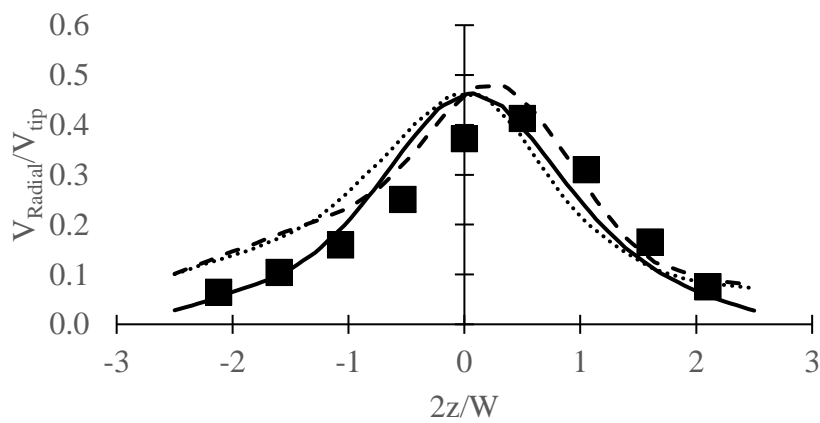
รูปที่ 4.7ข



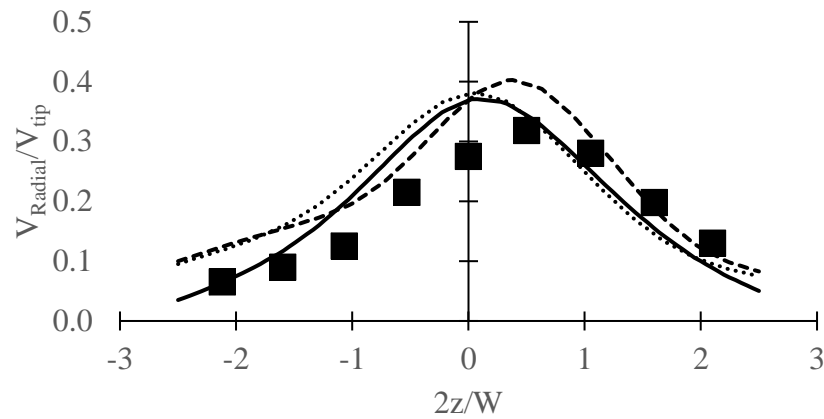
รูปที่ 4.7ค



รูปที่ 4.7ง



รูปที่ 4.7จ

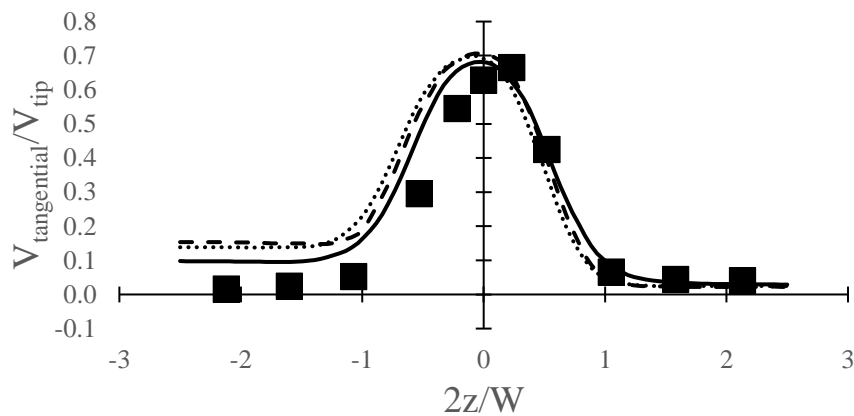


รูปที่ 4.7ฉ

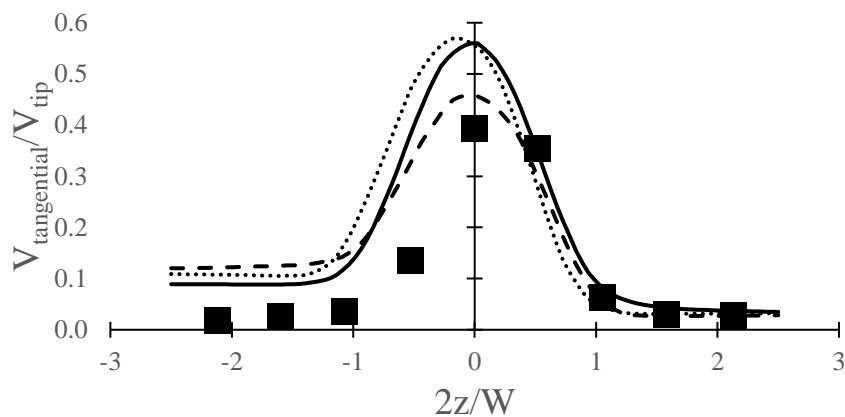
รูปที่ 4.7ก - ฉ กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวรัศมีระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) ที่อัตราส่วนระหว่างระยะตามแกน  $r$  กับรัศมีของถังเท่ากับ 0.37, 0.44, 0.52, 0.57, 0.66 และ 0.78 ตามลำดับ (โดยที่ เส้นทึบ, เส้นประ, เส้นไขว้ปลา และ ■ แทนผลการคำนวณความเร็วที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 ( $Re = 46,000$ ) 175 ( $Re = 80,000$ ), 250 ( $Re = 115,000$ ) รอบต่อนาที และผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989)  $Re = 34,000$  ตามลำดับ)

#### 4.1.3.2.3 ผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวสัมผัส

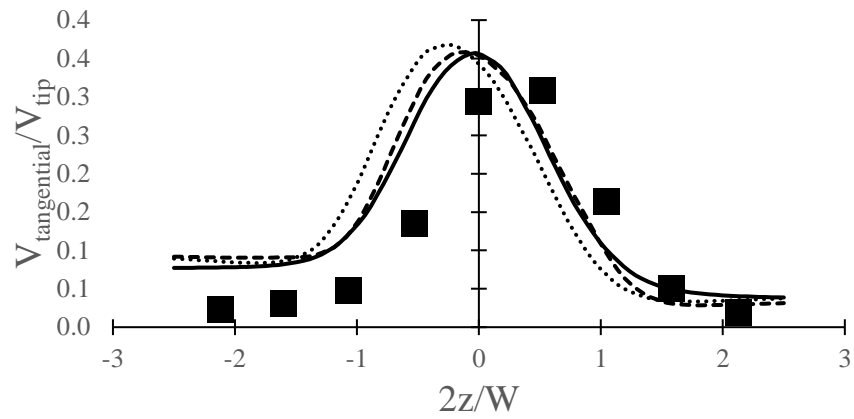
ผลการคำนวณความเร็วในแนวสัมผัสนั้นมีลักษณะที่คล้ายกับผลการคำนวณความเร็วในแนวรัศมี แต่แตกต่างกันที่ระยะห่างจากใบปั่นกวมนมากขึ้นความเร็วในแนวสัมผัสนั้นมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะถึงกวมผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานนั้นมีการติดตั้ง Baffle เพื่อลดความเร็วในแนวสัมผัสและทำให้ลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวมนที่เป็นลักษณะเดียวกับใบปั่นกวมนชนิด Rushton Turbine หรือเป็นใบปั่นกวมนที่มีลักษณะของใบพัดไม่มีการบิดตัวหรือทำมุมแกนของการหมุนมีการไหลในแนวรัศมีเป็นหลัก (Paul et al., 2004) ซึ่งการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองนั้นพบว่าค่าที่ได้นั้นสอดคล้องทั้งขนาดและแนวโน้มของความเร็ว



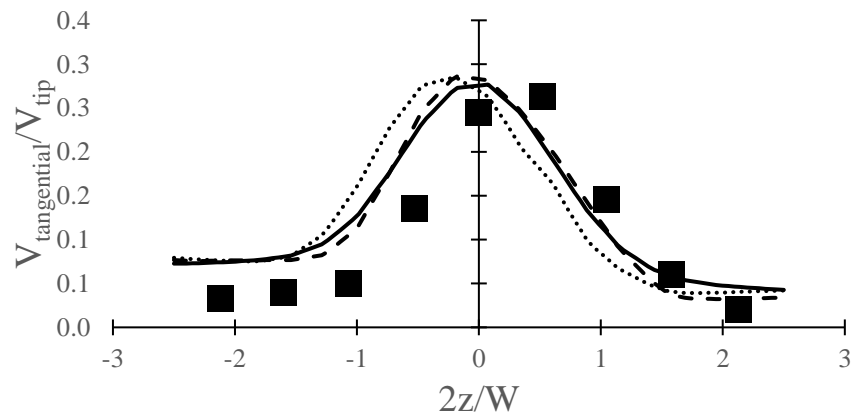
รูปที่ 4.8ก



รูปที่ 4.8ข

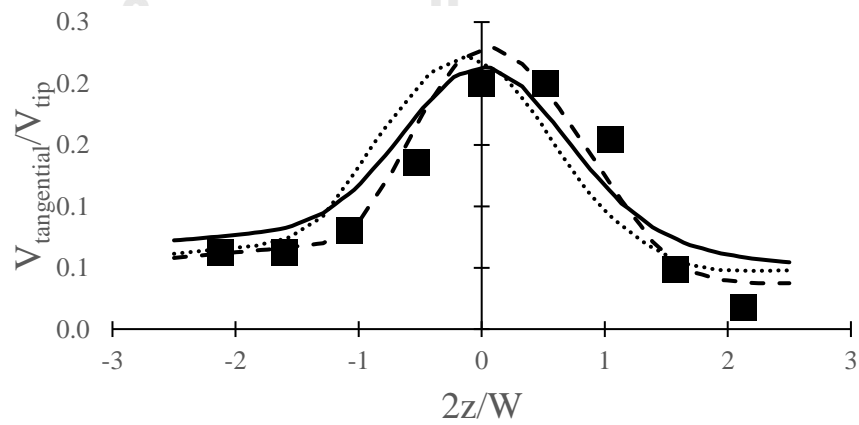


รูปที่ 4.8ค

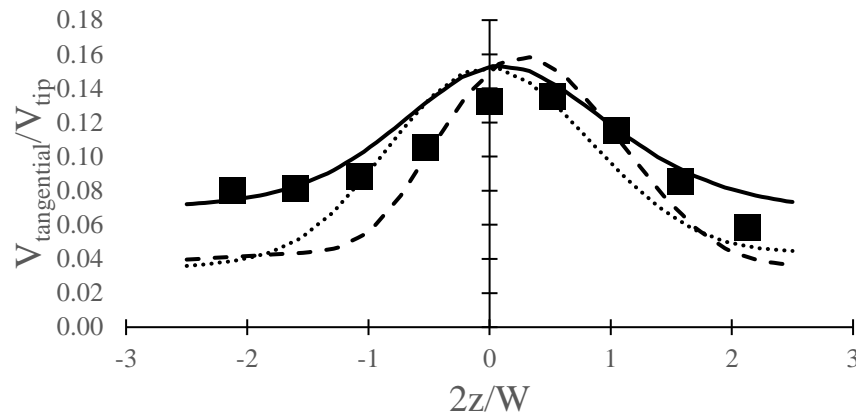


รูปที่ 4.8ด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8จ



รูปที่ 4.8ฉ

รูปที่ 4.8ก - ฉ กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวสัมผัสระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) ที่อัตราส่วนระหว่างระยะตามแกน  $r$  กับรัศมีของถังเท่ากับ 0.37, 0.44, 0.52, 0.57, 0.66 และ 0.78 ตามลำดับ (โดยที่ เส้นทึบ, เส้นประ, เส้นไข่ปลา และ ■ แทนผลการคำนวณ ความเร็วที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 ( $Re = 46,000$ ) 175 ( $Re = 80,000$ ), 250 ( $Re = 115,000$ ) รอบต่อนาที และผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989)  $Re = 34,000$  ตามลำดับ)

การเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) กับผลการคำนวณความเร็วที่ได้จากแบบจำลองเป็นการเปรียบเทียบในลักษณะของตัวแปรไร้หน่วย โดยลักษณะของความเร็วที่แสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 พบว่า ความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัสนั้นมีค่ามากกว่าความเร็วในแนวตั้ง โดยที่ระยะ  $r/R = 0.37$  ซึ่งเป็นระยะของการวัดที่ใกล้กับใบปั่นกวานที่สุดพบว่าสัดส่วนของความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัสต่อความเร็วปลายของใบปั่นกวานมีค่าเท่ากับประมาณ 0.7 แต่ในทางกลับกันสัดส่วนของความเร็วในแนวตั้งต่อความเร็วปลายของใบปั่นกวานเท่ากับประมาณ 0.2 โดยผลการคำนวณและผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลในแนวรัศมีเป็นหลักซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine

ผลการคำนวณความเร็วที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองความเร็วของ Wu and Patterson (1989) นั้นให้แนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลความเร็วในแนวตั้งที่  $r/R = 0.37$  และในบริเวณที่  $z/W$  อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 พบว่าผลคำนวณจากแบบจำลองให้แนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลองโดยลักษณะของความเร็วที่แบบจำลองทำนายนั้นจะให้ลักษณะของการไหลที่พุ่งออกจากใบปั่นกวานตามแนวรัศมีเป็นหลัก กล่าวคือเมื่อมีความเร็วในแนวมีค่าเป็นบวกลักษณะของการไหลที่นั่นจะมีลักษณะพุ่งเฉียงขึ้นตามทิศทางของแกนในแนวตั้ง

เมื่อเทียบกับแกนรัศมีของถังปั่นกวน เมื่อพิจารณาที่การเปรียบเทียบที่ระยะไกลจากใบปั่นกวนมากขึ้น ผลการทดลองและผลการคำนวณจะมีความสอดคล้องกันมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทดสอบความเหมาะสมของการเลือกใช้ Turbulent Model เพื่อคำนวณลักษณะการไหลภายในถังปั่นกวนนั้นได้ทดลองใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อน เช่น การใช้แบบจำลอง LES รวมไปถึงการใช้แบบจำลอง LES ที่มีการใช้ Wall Function เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ ถึงแม้ว่าการใช้แบบจำลอง LES จะให้ความแม่นยำที่สูงกว่าแบบจำลองในกลุ่มของ RANS (Zadghaffari et al., 2010) แต่การใช้แบบจำลอง LES นั้นต้องการความละเอียดของ Mesh สูงรวมกับความซับซ้อนในการคำนวณส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นานกว่าการใช้แบบจำลอง RANS ซึ่งการใช้แบบจำลอง SST k-omega นั้นให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ (Singh et al., 2011)





#### 4.1.3.3 การสอบเทียบค่า Power Number

แบบจำลองนั้นต้องสามารถคำนวณตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบถึงกวมผสม เช่น ค่า Power Number ได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน โดยแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่า Power Number ระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยร้อยละความคลื่อนเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและค่าที่ได้จากผลการทดลอง จาก Couper et al. (2009)

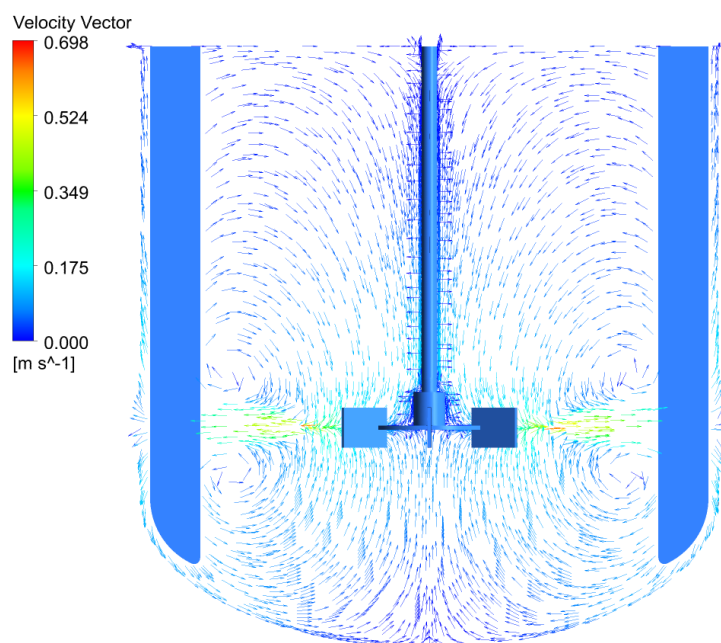
ความเร็วรอบ (RPM)	Reynolds Number	Power Number		
		CFD	EXP	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
การไหลแบบราบเรียบ				
100	1	64.0	65	1.52
250	2.5	26.6	28	5.11
การไหลแบบปั่นป่วน				
100	46,075	4.98	5	0.40
175	80,615	5.14	5	2.80
250	115,187	5.16	5	3.20

ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่บอกถึงความสอดคล้องของผลการคำนวณกับผลการทดลองนั้นอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10 โดยพิจารณาการรายงานผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองของงานวิจัยฉบับอื่นที่ใช้การคำนวณ CFD เพื่ออธิบายการไหลภายในถังปั่นกวนและการคำนวณหาค่า Power Number

#### 4.1.4 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine

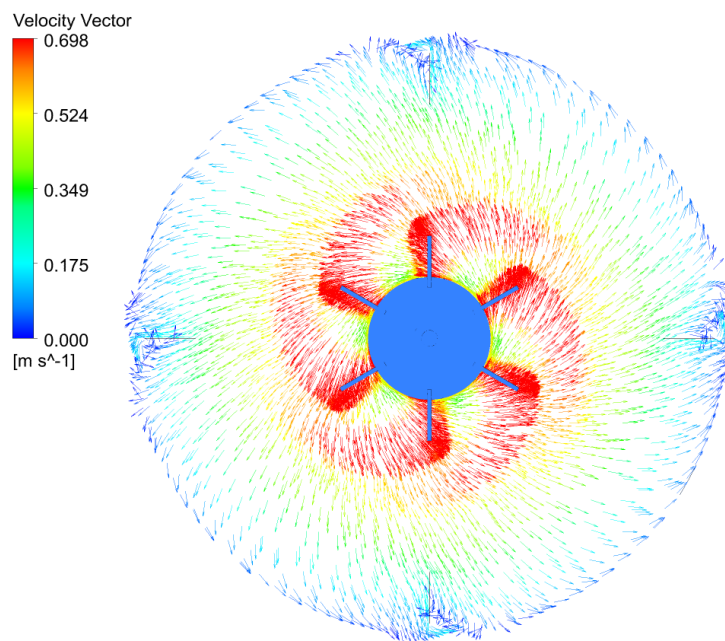
การพิจารณาผลการคำนวณค่า Power Number นั้นสามารถทำให้สรุปความแม่นยำของแบบจำลอง ถึงแม้ว่าผลการคำนวณความเร็วในแนวตั้งในบริเวณจะมีความคลาดเคลื่อนออกจากผลการทดลองแต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการไหลในแนวรัศมีเป็นหลักที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine และผลการคำนวณความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัสที่สอดคล้องกับผลการทดลองนั้นย่อมส่งผลให้การคำนวณค่า Power Number สอดคล้องกับผลการทดลองเช่นกันเนื่องจากการคำนวณค่า Power Number นั้นคำนวณจากแรงบิดที่กระทำบนใบ

ปั่นกววนซึ่งคำนวณจากความเค้นเฉือนหรือ Shear Stress ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของความเร็วที่ตำแหน่งใบปั่นกววน โดยลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine นั้นสามารถวิเคราะห์จากการแผนภาพแสดงเวกเตอร์ของความเร็วในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 รวมถึงในรูปแบบของ Streamline ในรูปที่ 4.11 ดังนี้



รูปที่ 4.9 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Rushton Turbine ในระนาบ

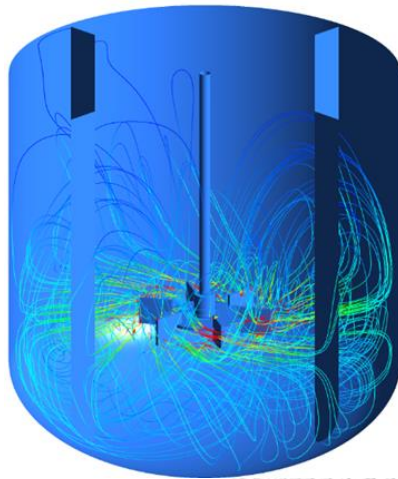
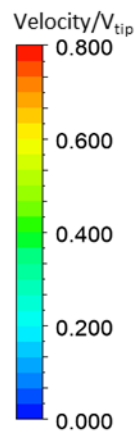
แนวดิ่ง



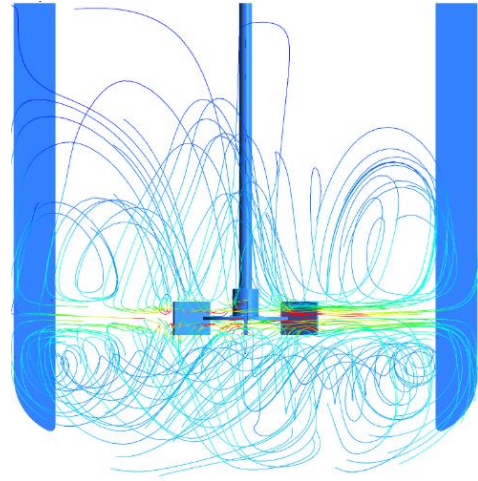
รูปที่ 4.10 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Rushton Turbine ในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นกววน

รูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อสอบเทียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณในกรณีที่ไม่มีข้อมูลความเร็ว สามารถวิเคราะห์ได้จากลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดจากใบปั่นกววนนั้น ๆ และค่า Power Number (Deglon & Meyer, 2006) และ (Delafosse et al., 2008)

ลักษณะการไหลตามแนวรัศมีของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ส่งผลให้เกิดการหมุนวนหรือ Recirculation ของของไหล 2 ตำแหน่ง ซึ่งเกิดจากการที่ของไหลไหลจากใบพัดไปสะท้อนกับผนังของถังปั่นกววน แล้วเกิดการแยกเป็นสองทิศทาง โดยของไหลส่วนหนึ่งจะขึ้นไปตามแนวตั้งแล้ววนกลับมาที่ใบปั่นกววนเช่นเดียวกับของไหลอีกส่วนที่ไหลลงไวด้านล่างแล้ววนกลับเข้าหาใบปั่นกววน โดยการหมุนวนสามารถเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณา Streamline ของของไหลที่ออกจากใบปั่นกววนในรูปที่ 4.11 ดังนี้



รูปที่ 4.11ก



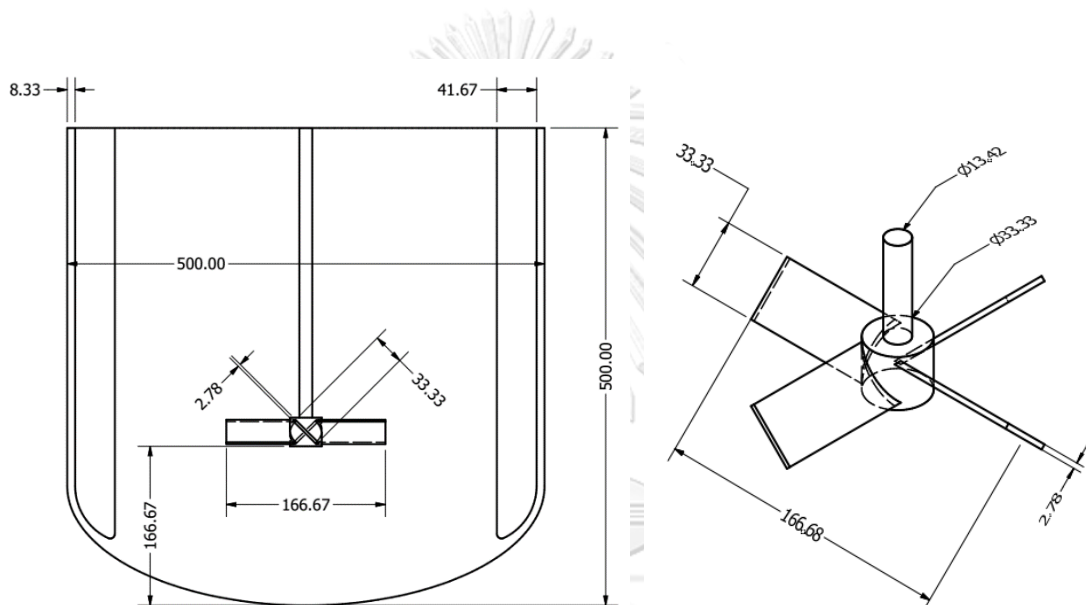
รูปที่ 4.11ข

รูปที่ 4.11ก และ ข รูปแสดง Streamline ที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine ในมุมมอง Isometric และในระนาบตัดขวางในแนวตั้งตามลำดับ

## 4.2 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด $45^\circ$ Pitched Blade Turbine

### 4.2.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกววน

ใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine นั้นมีลักษณะแตกต่างจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine โดยที่ไม่มีจานเพื่อติดใบพัด โดยใบพัดติดกับแกนหมุนโดยตรง นอกจากนี้ลักษณะของใบพัดนั้นเอียงทำมุมกับแกนหมุนซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลในแนวตั้ง (Kresta & Wood, 1993) โดยมีรูปร่างและขนาดของกังวณผสมแสดงในรูปที่ 4.12 ดังนี้ นอกจากนี้ผลการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นสามารถพิจารณาได้ในภาคผนวก 0



รูปที่ 4.12ก

รูปที่ 4.12ข

รูปที่ 4.12ก และ ข แสดงรูปร่างและขนาดของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine ที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน อัตราส่วนของขนาดของใบปั่นกววนอ้างอิงจากงานวิจัยของ Chapple et al. (2002) (หน่วยมิลลิเมตร)

#### 4.2.2 การสอบเทียบผลการทดลองของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine

ผลการสอบเทียบความเร็วและค่า Power Number ของการไหลที่เกิดขึ้นจากการหมุนของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ทำให้ทราบถึงความแม่นยำของการทำนายลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น ในทางกลับกันนั้นในกรณีที่ไม่ได้มีข้อมูลความเร็วเพื่อทำการสอบเทียบผลการทดลอง การพิจารณาค่า Power Number ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของความเร็วร่วมกับการพิจารณาลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดจากการใช้แบบจำลองนั้นเพียงพอต่อการสอบเทียบผลการทดลอง โดยสามารถพิจารณาผลการสอบเทียบค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine ในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่า Power Number ระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจาก Couper et al. (2009)

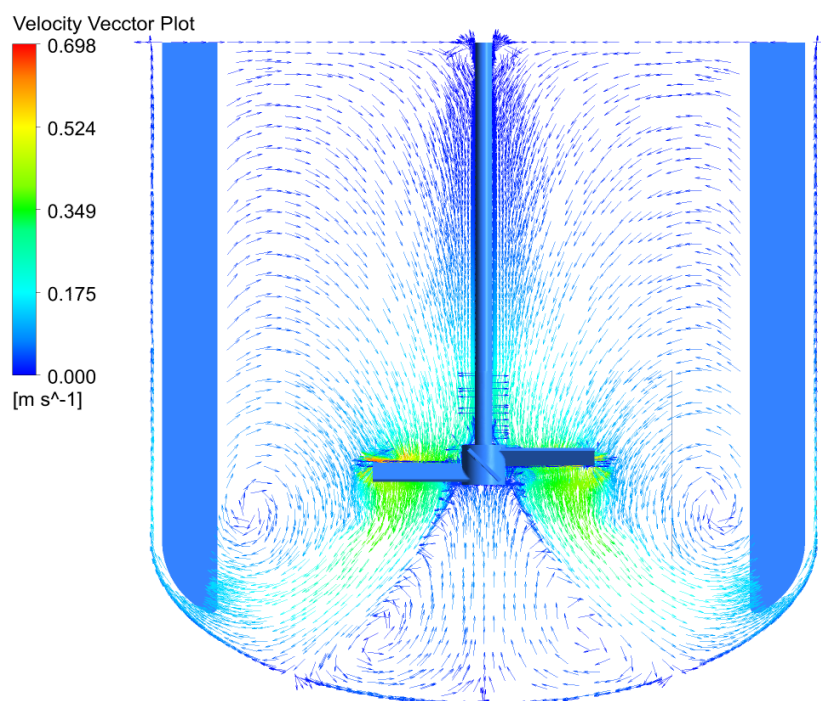
ความเร็วรอบ (RPM)	Reynolds Number	Power Number		
		CFD	EXP	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
<b>การไหลแบบราบเรียบ</b>				
100	1	46.0	51	9.80
250	2.5	19.3	21	8.10
<b>การไหลแบบปั่นป่วน</b>				
100	46,075	1.28	1.28	0.00
175	80,615	1.21	1.28	5.47
250	115,187	1.3	1.28	1.56

การเปรียบเทียบค่า Power Number ระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนนั้นไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งสามารถยอมรับได้เมื่อพิจารณาร้อยละความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยอื่น ๆ

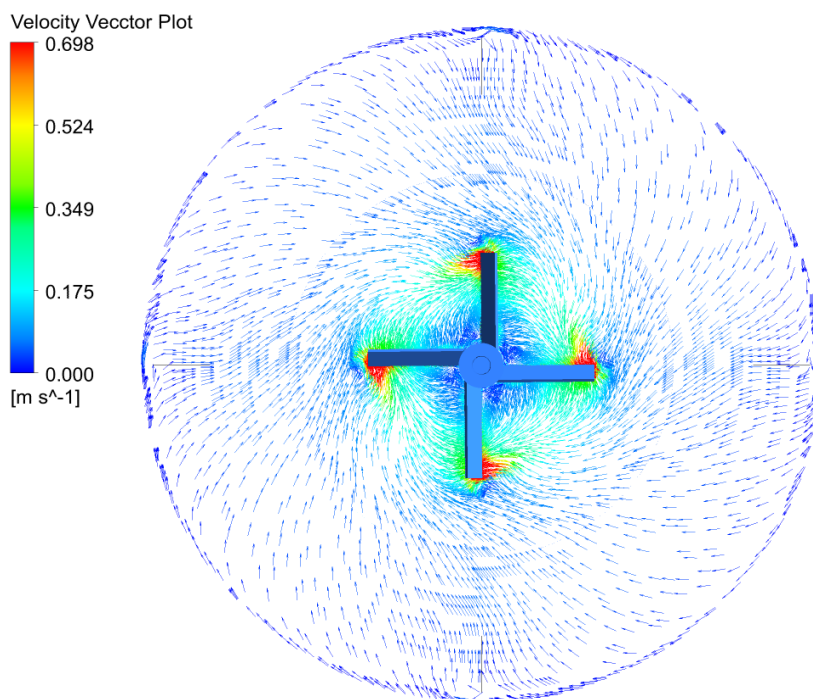
#### 4.2.3 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนชนิด Pitch Blade Turbine

ใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine แตกต่างจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine เนื่องจากไม่มีจานของใบปั่นกววนรวมถึงใบปั่นกววนนั้นเอียงทำมุมกับกับแกนในแนวอนซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลในแนวตั้งเป็นหลัก ซึ่งขนาดของมุมอาจเป็น 30, 45 หรือ 60 องศาขึ้นกับชนิดของของไหลภายในถังปั่นกววนและโดยทั่วไปใบปั่นกววน

ชนิดนี้จะมีจำนวนของใบปั่นกวาน 4 ถึง 6 ใบ แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาและสอบเทียบค่า Power Number ของใบปั่นกวานชนิด Pitched Blade Turbine ที่ทำมุม 45 องศาและประกอบด้วย 4 ใบพัด โดยมีลักษณะการไหลแสดงในรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ดังนี้



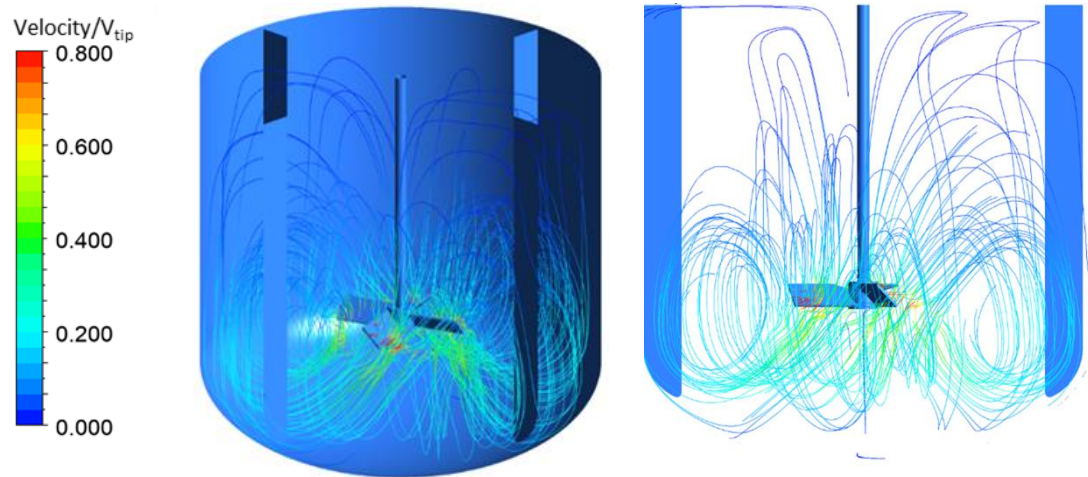
รูปที่ 4.13 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Pitched Blade Turbine ใน



รูปที่ 4.14 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Pitched Blade Turbine ใน ระบายตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นกววน

ลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine ให้ลักษณะการไหลในแนวตั้งเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยทิศทางของการไหลจะขึ้นอยู่กับการหมุนของใบปั่นกววนซึ่งการทำมุมของใบพัดที่แสดงในรูปนั้น เมื่อใบพัดหมุนตามเข็มนาฬิกาของไหลจะถูกผลักลงตามแนวตั้ง (Down pumping) ในทางกลับกันเมื่อใบปั่นกววนหมุนทวนเข็มนาฬิกาของไหลจะถูกดันขึ้น (Up pumping) ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเป็นลักษณะการไหลของใบปั่นกววนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวตั้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองและผลการคำนวณของ Aubin et al. (2004) โดยลักษณะของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิดนี้แตกต่างการไหลที่เกิดจากใบพัด Rushton Turbine โดยของไหลที่ถูกดันออกจากใบปั่นกววนไปด้านล่างของถังแล้วสะท้อนไปยังด้านบนของใบปั่นกววน ส่งผลให้เกิดเพียง 1 การหมุนวน โดยสามารถพิจารณาได้จาก Streamline ได้ดังรูปที่ 4.15 ดังนี้





รูปที่ 4.15ก

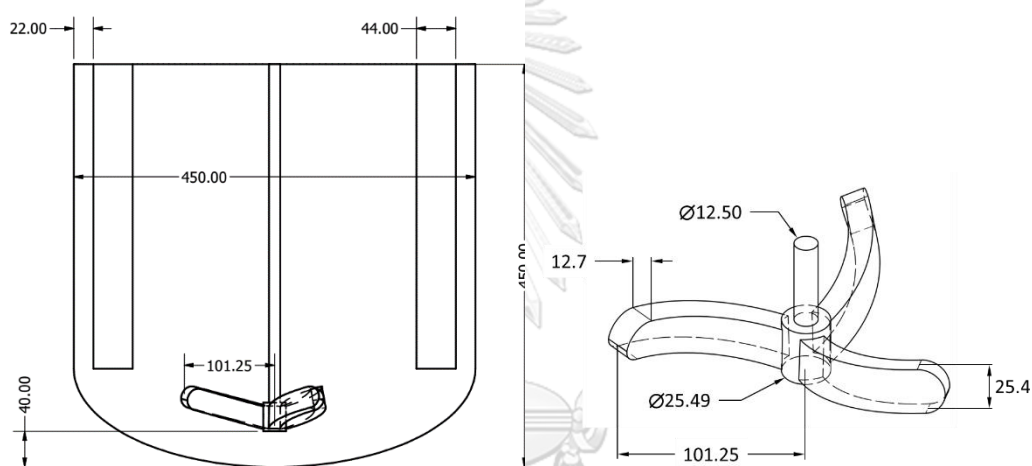
รูปที่ 4.15ข

รูปที่ 4.15ก และ ข แสดง Streamline ที่เกิดขึ้นจากใบปัดกังหันชนิด Pitched Blade Turbine ในมุมมอง Isometric และในระนาบตัดขวางในแนวตั้งตามลำดับ

### 4.3 ผลการจำลองการไหลของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve

#### 4.3.1 รูปร่างและขนาดของกังวณผสมและใบปั่นกววน

อัตราส่วนมาตรฐานของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve นั้นแตกต่างกับใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine โดยอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของใบปั่นกววนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกังวณผสมเท่ากับ 0.45 - 0.6 และระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนกับฐานของกังวณผสมเท่ากับ 0.1 - 0.2 เพื่อปั่นกววนของแข็งให้กระจายภายในกังวณผสม (M. Li et al., 2005) และ (Rielly et al., 2007) โดยรูปร่างและขนาดของกังวณผสมแสดงในรูปที่ 4.16 ดังนี้ นอกจากนี้ผลการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นสามารถพิจารณาได้ในภาคผนวก Error! Reference source not found.



รูปที่ 4.16ก

รูปที่ 4.16ข

รูปที่ 4.16 ก และ ข แสดงรูปร่างและขนาดของกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve ที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐาน โดยรูปร่างและขนาดนั้นอ้างอิงกับงานวิจัยของ Sirasitthichoke and Armenante (2017) เพื่อสอบเทียบค่า Power Number (หน่วยมิลลิเมตร)

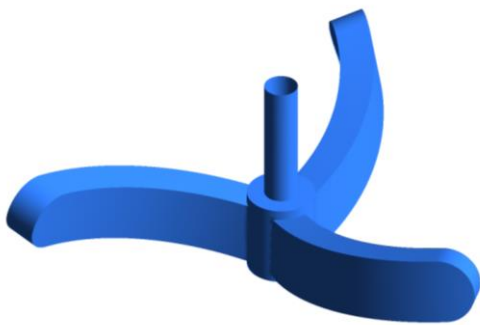
#### 4.3.2 การสอบเทียบผลการทดลองของใบป่นกวนชนิด Retreat Curve

การสอบเทียบค่า Power Number ของใบป่นกวนชนิด Retreat Curve แสดงในตารางที่ 4.5 ดังนี้

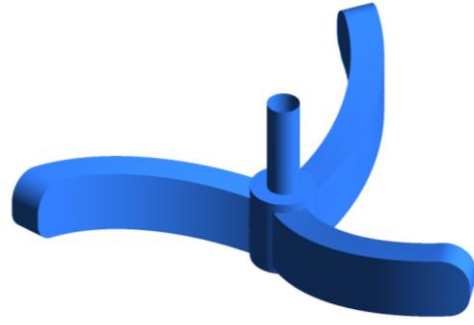
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการเปรียบเทียบค่า Power Number ระหว่างค่าที่ได้จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจาก Sirasitthichoke and Armenante (2017)

ความเร็วรอบ (RPM)	Reynolds Number	Power Number		
		CFD	EXP	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
การไหลแบบราบเรียบ				
100	1.48	23.2	27.8	16.5
250	3.69	11.9	11.5	3.54
การไหลแบบปั่นป่วน				
100	68,016	0.973	0.75	29.6
175	119,029	0.917	0.75	22.2
250	170,041	0.944	0.75	25.8

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ระหว่างค่า Power Number ที่ได้จากการคำนวณกับค่า Power Number ที่ได้จากการทดลองของ (Sirasitthichoke & Armenante, 2017) นั้นมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าสูงถึงร้อยละ 29.6 ของค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้เป็นสาเหตุจากความซับซ้อนของลักษณะรูปทรงของใบป่นกวนชนิดนี้ ลักษณะเด่นของใบป่นกวนชนิดคือการความโค้งและการบิดตัวของใบพัด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 การบิดตัวที่ต่างกันย่อมส่งผลให้เกิดลักษณะการไหลในแนวตั้งที่ต่างกันรวมถึงให้ค่า Power Number ที่ต่างกัน ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้เปลี่ยนลักษณะการบิดของใบป่นกวน รวมถึงเปลี่ยนลักษณะรูปร่างของปลายใบพัดเพื่อทดสอบความต่างของค่า Power Number แสดงในตารางที่ โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง, ความกว้าง รวมถึงความหนาของใบพัดเท่าเดิม

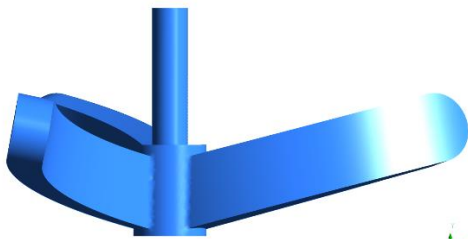


รูปที่ 4.17ก

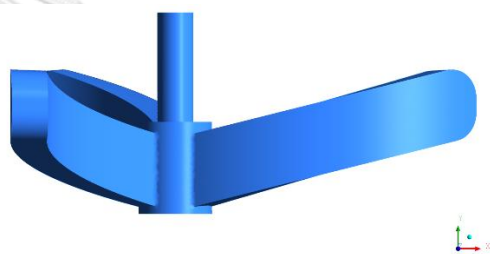


รูปที่ 4.17ข

รูปที่ 4.17ก และ ข รูปแสดงใบป็นกวนชนิด Retreat Curve ที่มีการบิดของใบพัดและไม่มีการบิดของใบพัด ตามลำดับ ในมุมมอง isometric



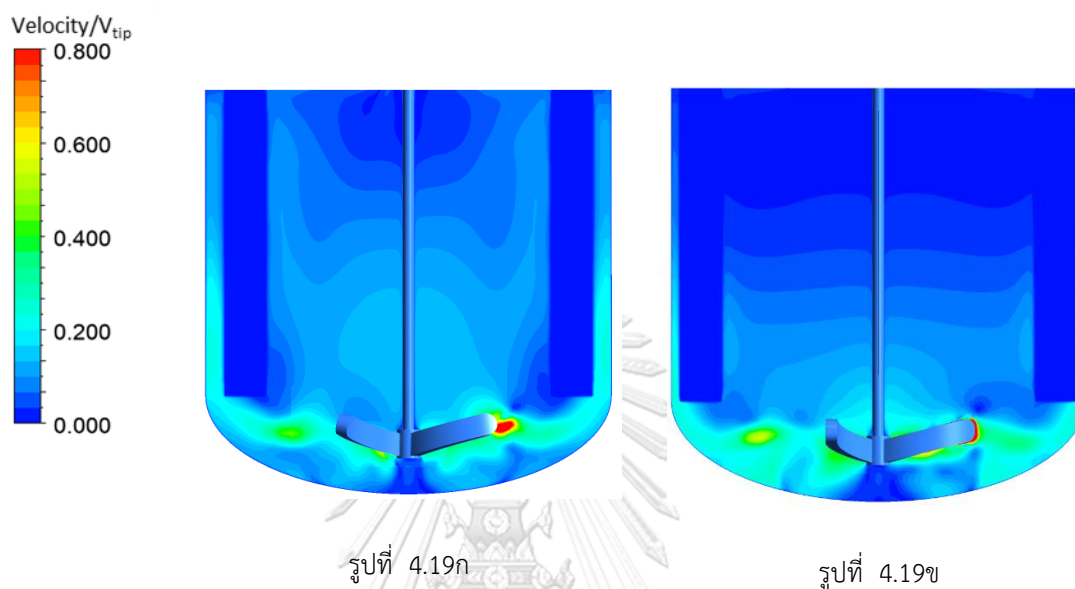
รูปที่ 4.18ก



รูปที่ 4.18ข

รูปที่ 4.18ก และ ข รูปแสดงใบป็นกวนชนิด Retreat Curve ที่มีการบิดของใบพัดและไม่มีการบิดของใบพัด ตามลำดับ ในมุมมองด้านหน้า

ลักษณะการบิดตัวที่ต่างกันนั้นย่อมส่งผลให้การไหลที่เกิดขึ้นภายในถังผสมแตกต่างกัน โดยการบิดตัวของใบพัดนั้นส่งผลให้เกิดการไหลในแนวตั้งมากขึ้น โดยสามารถพิจารณาจากแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วยุ่หน่วยได้ในรูปที่ 4.19 ดังนี้



รูปที่ 4.19ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในแนวตั้งของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ที่มีการบิดตัวของใบพัดและไม่มีการบิดตัวของใบพัดตามลำดับ

สีของแผนภาพคอนทัวร์แสดงถึงความเร็วของของเหลวที่เกิดจากการหมุนของใบพัด โดยการพิจารณาระนาบในแนวตั้งเพื่อวิเคราะห์ผลของการบิดตัวของใบพัดต่อความเร็วในแนวตั้ง โดยเมื่อพิจารณาที่บริเวณส่วนกลางของถังปั่นกวนพบว่าความเร็วในกรณีที่ใบพัดมีการบิดตัวนั้นมีความเร็วสูงกว่า นอกจากนี้การบิดตัวของใบพัดนั้นส่งผลต่อค่า Power Number โดยสามารถพิจารณาได้ในตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงความแตกต่างของค่า Power Number ที่ได้จากใบปั่นกวนชนิดเดียวกันที่มีรายละเอียดของรูปร่างต่างกัน

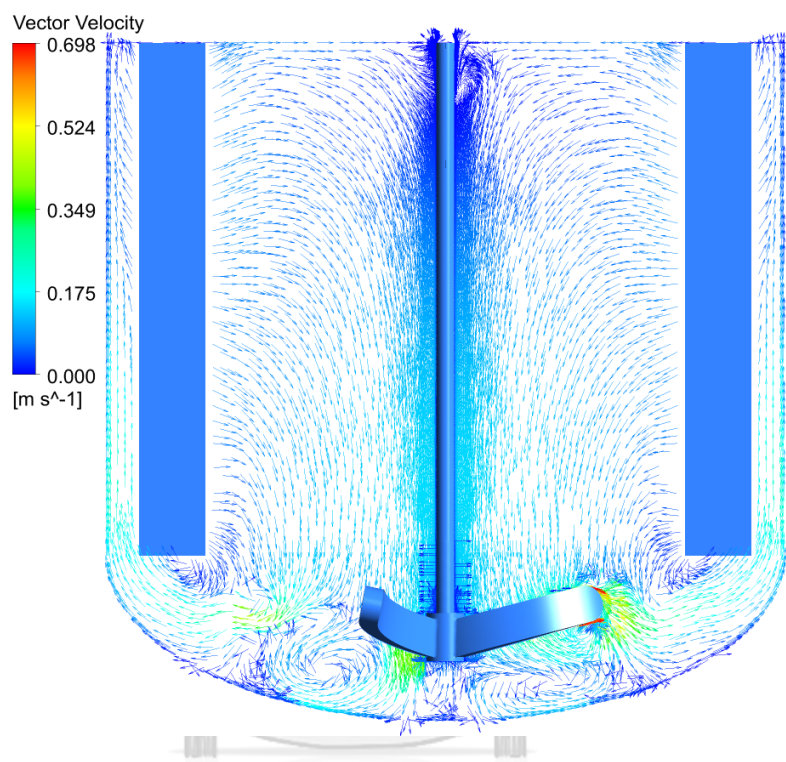
ลักษณะของใบปั่นกวน	ค่า Power Number
ใบปั่นชนิด RCI ที่มีการบิดตัวของใบพัด	0.971
ใบปั่นชนิด RCI ที่ไม่มีการบิดตัวของใบพัด	1.07

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อยของใบปั่นกววนชนิดนี้นั้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า Power Number โดยมีร้อยละความแตกต่างเมื่อเทียบกับใบปั่นกววนที่มีการบิดตัวของใบพัดเท่ากับร้อยละ 10.63 เพราะฉะนั้นความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Sirasitthichoke and Armenante (2017) อาจจะส่งผลจากการป้อนข้อมูลของรูปร่างของใบปั่นกววน ซึ่งค่า Power Number นั้นย่อมลดลงเมื่อมีการบิดตัวของใบปั่นกววนมากขึ้นกล่าวคือการปะทะของของไหลที่กระทำต่อใบปั่นกววนลดลงและเปลี่ยนไปเป็นการไหลในแนวตั้งมากขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดในกรณีของค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine

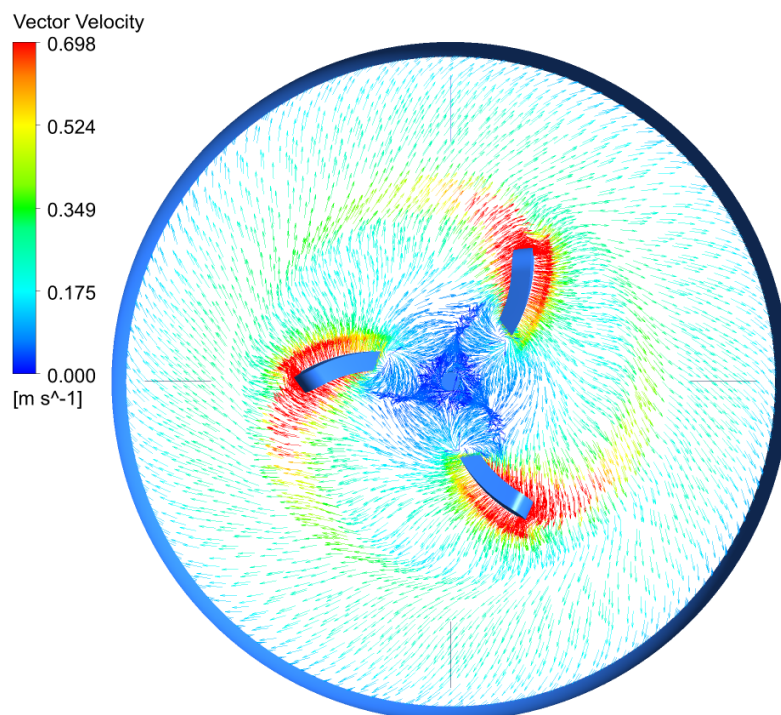
ค่า Power Number ที่ได้จากการทดลองของใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1 ซึ่งแตกต่างจากค่า Power Number ของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine ที่ถูกรายงานในบทความวรรณกรรมโดยมีค่าเท่ากับ 5 และ 1.28 ตามลำดับนอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกันโดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เนื่องจากลักษณะของใบพัดนั้นแผ่นเรียบและไม่มีความโค้งหรือการบิดตัวใด ๆ เพราะฉะนั้นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับมุมที่ใบพัดทำกับแกนของการหมุน แต่ในกรณีของใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve นั้นค่าที่คำนวณได้แตกต่างกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง ซึ่งเป็นผลจากความซับซ้อนจากรูปร่างของใบพัดที่มีความโค้งและการบิด โดยการบิดตัวที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยนั้นย่อมส่งผลต่อลักษณะการไหล โดยยังมีการบิดตัวมากลักษณะการไหลในแนวตั้งจะเพิ่มและส่งผลให้ค่า Power Number นั้นลดลง

### 4.3.3 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve

ใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve เป็นใบปั่นกววนที่ใช้สำหรับกวาดของแข็งที่กองอยู่ด้านล่างของถังกวนผสม เนื่องจากลักษณะการทำมุมของใบพัดชนิดนี้กับแกนในแนวระนาบรวมถึงการบิดตัวของใบพัดทำให้เกิดเกิดการไหลผสมระหว่างการไหลในแนวรัศมีและการไหลในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 ดังนี้



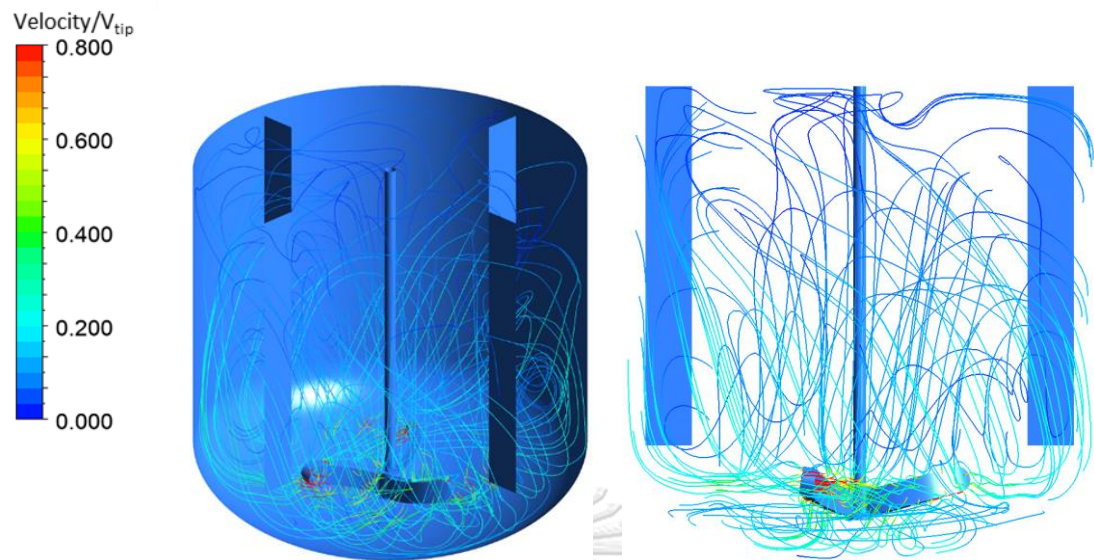
รูปที่ 4.20 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Retreat Curve ในระนาบ



รูปที่ 4.21 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของการไหลที่เกิดจากใบพัดชนิด Retreat Curve ในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นกววน

ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นคล้ายกับการไหลในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine เมื่อพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์ในรูปที่ 4.21 แต่การกระจายขนาดของความเร็วของใบปั่นกววนชนิดนี้มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากการไหลส่วนนี้จะไหลลงทางด้านล่างของถังปั่นกววน โดยลักษณะการไหลดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จาก Streamline ที่แสดงในรูปที่ 4.22 ดังนี้





รูปที่ 4.14ก

รูปที่ 4.14ข

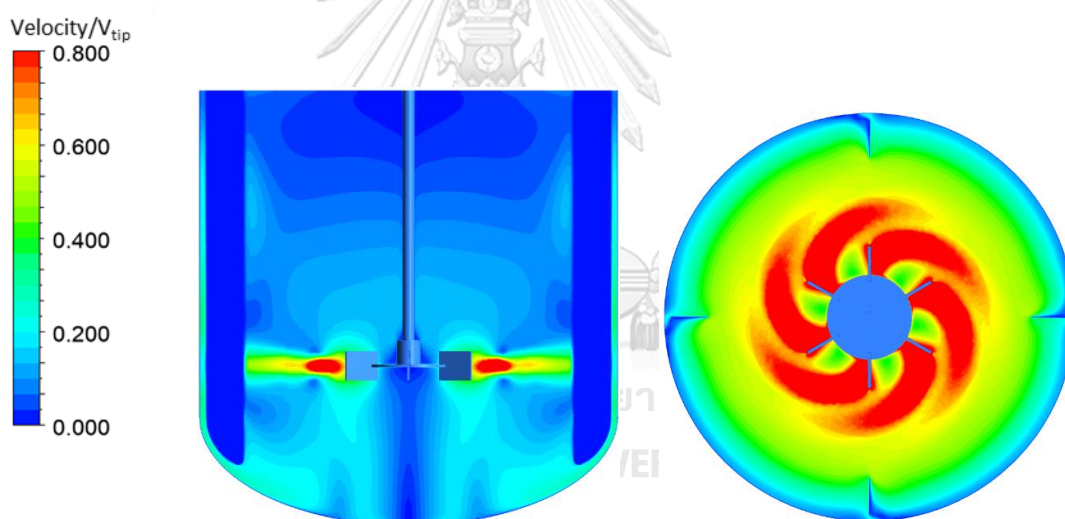
รูปที่ 4.22ก และ ข รูปแสดง Streamline ที่เกิดขึ้นจากใบป่นกวนชนิด Retreat Curve ในมุมมอง Isometric และในระนาบในแนวตั้งตามลำดับ

#### 4.4 การเปรียบเทียบการไหลและการกระจายตัวของความเร็วในถังกวนผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานที่ใช้ ใบปั่นกวนต่างชนิด

ใบปั่นกวนต่างชนิดกันย่อมส่งผลให้เกิดการไหลที่แตกต่างกันในถังกวนผสม โดยลักษณะการไหลหลักที่เกิดขึ้นภายในถังปั่นกวนในกรณีถังปั่นกวนติดตั้ง Baffle คือ การไหลในแนวตั้งและการไหลในแนวรัศมี การวิเคราะห์ลักษณะการไหลที่ได้จากคำนวณพลศาสตร์การไหลสามารถวิเคราะห์ได้จากแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็ว รวมถึงการวิเคราะห์หาความเร็วเฉลี่ยและการพิจารณาสัดส่วนของปริมาตรของของไหลภายในถังกวนที่ความเร็วแตกต่างกัน

##### 4.4.1 การพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็ว

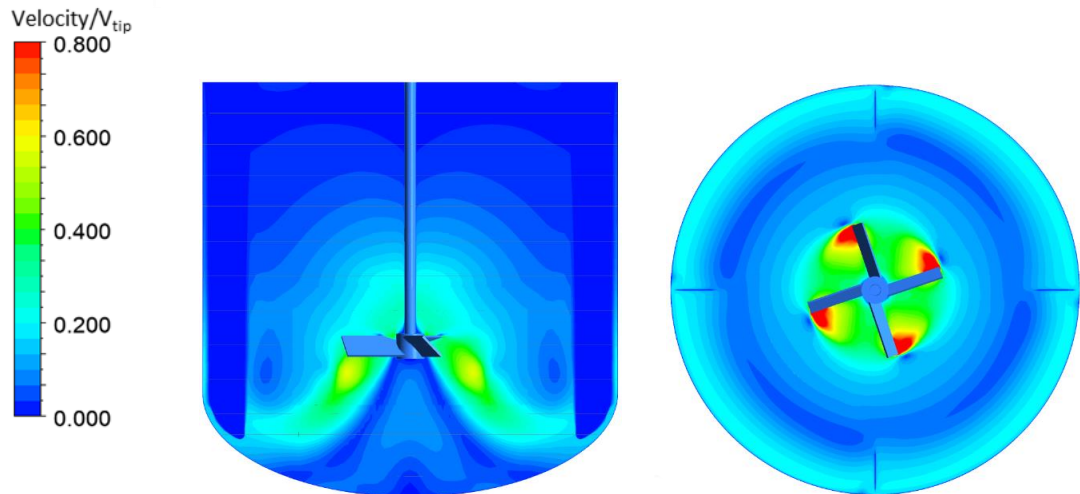
แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine, Pitched Blade Turbine และ Retreat Curve แสดงในรูปที่ 4.23, รูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ดังนี้



รูปที่ 4.23ก

รูปที่ 4.23ข

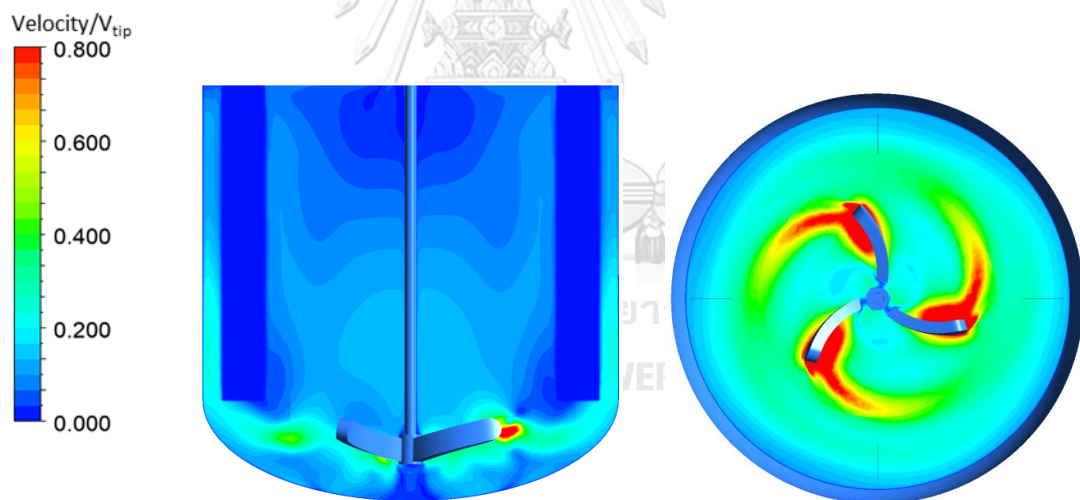
รูปที่ 4.23ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine ใน ระนาบแนวตั้งและระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นตามลำดับ



รูปที่ 4.24ก

รูปที่ 4.24ข

รูปที่ 4.24ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่เกิดจากใบป้อนกวนชนิด Pitched Blade Turbine ในระนาบแนวตั้งและระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบป้อนตามลำดับ



รูปที่ 4.25ก

รูปที่ 4.25ข

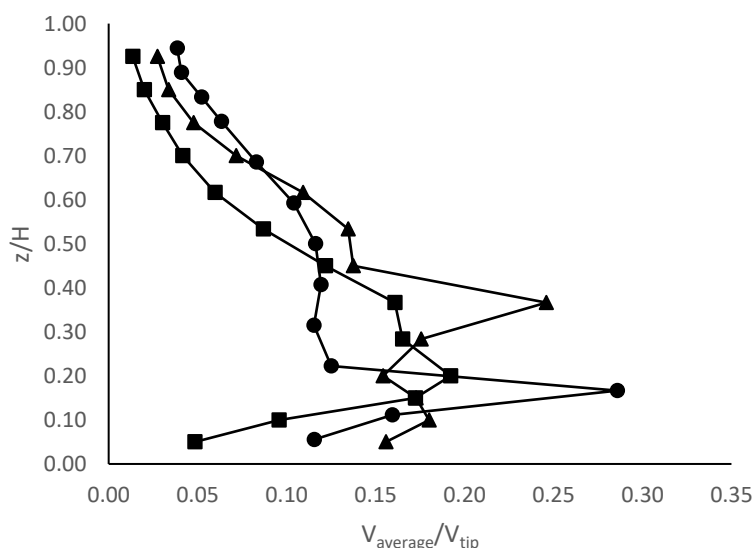
รูปที่ 4.25ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่เกิดจากใบป้อนกวนชนิด Retreat Curve ในระนาบแนวตั้งและระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบป้อนตามลำดับ

การพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่ได้จากการคำนวณพลศาสตร์การไหลในถังกวนผสมทำให้สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาจากแถบสี โดยขอบเขตของแถบสีแสดงถึงขนาดของความเร็วโดยอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.8 เท่าของความเร็วปลายใบพัดเพื่อให้เห็นสีของการกระจายตัวของความเร็วที่

ชัดที่สุด โดยพื้นที่ที่เป็นสีแดงคือพื้นที่ที่ของไหลมีความเร็วเข้าใกล้ 0.8 เท่าของความเร็วปลายในทางกลับกันพื้นที่ที่เป็นสีน้ำเงินคือพื้นที่ที่ของไหลมีความเร็วเข้าใกล้ 0

การศึกษาการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวต่างชนิดกันภายในถึงปั่นกวที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานสำหรับของไหล 1 ภูมิภาค โดยลักษณะของการกระจายตัวของความเร็วเมื่อพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วของใบปั่นกวทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่า ใบปั่นกวชนิด Rushton Turbine ให้ความสม่ำเสมอของสีมากกว่าใบปั่นกวอีก 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามในพื้นที่ด้านบนของถึงปั่นกวที่ใช้ใบพัดทั้ง 3 ชนิดนั้นมีค่าต่ำ กล่าวคือมีค่าน้อยกว่า 0.1 เท่าของความเร็วปลายของใบปั่นกวหรือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความเร็วปลาย แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้เป็น การวิเคราะห์เบื้องต้นโดยการสังเกตจากสีของคอนทัวร์โดยสามารถวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยที่ระยะความสูงต่างกัน ถึงปั่นกวโดยแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 4.26 ดังนี้

#### 4.4.2 การพิจารณากราฟระหว่างความสูงไร้หน่วยและความเร็วไร้หน่วย



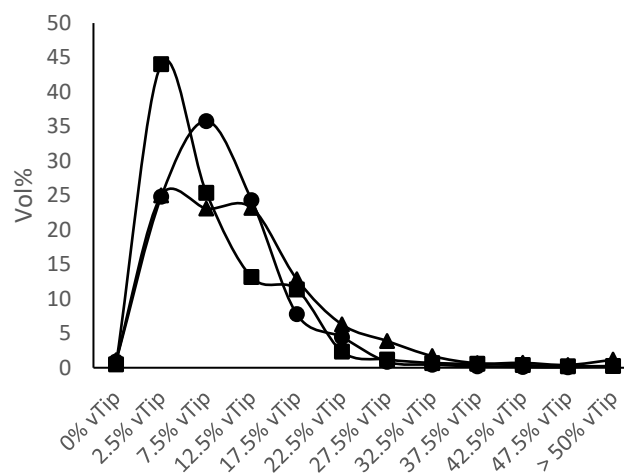
รูปที่ 4.26 กราฟระหว่างความสูงไร้หน่วยและความเร็วไร้หน่วยภายในกวนผสมที่เกิดจากใบปั่นชนิด Rushton Turbine, Pitched Blade Turbine และ Retreat Curve ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 รอบต่อนาที

(โดยที่ ▲ Rushton Turbine ■ Pitched Blade Turbine ● Retreat Curved)

กราฟในรูปที่ 4.26 เป็นการวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยในรูปของตัวแปรไร้หน่วยกับความสูงไร้หน่วย โดยการวิเคราะห์กราฟดังกล่าวเป็นการพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วในแนวตั้งซึ่งจะทำให้เห็นขนาดของความเร็วได้ชัดเจนขึ้น เมื่อพิจารณาจากกราฟ จุดที่ความเร็วสูงจะเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของใบพัดและลดลงเมื่อห่างจากใบปั่นกว นอกจากนี้จากกราฟสามารถวิเคราะห์ว่าการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวชนิด Rushton Turbine ให้ขนาด

ของความเร็วจนเร็วกว่าใบปั่นกววนอีก 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามใบปั่นกววนทั้ง 3 ชนิดนั้นให้การกระจายตัวของความเร็วที่ด้านบนของใบปั่นกววนต่ำกว่าคือมีค่าน้อยกว่า 0.05 หรือ 0.1 เท่าของความเร็วปลายของใบพัด แต่การวิเคราะห์กราฟนี้อาจไม่ทำให้เห็นถึงสัดส่วนของของไหลในถังปั่นกววนที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งการจำลองพลศาสตร์การไหลนั้นสามารถคำนวณปริมาณของของไหลในช่วงความเร็วที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็ว โดยแสดงในรูปที่ 4.27 ดังนี้

#### 4.4.3 การพิจารณารูปการกระจายตัวของความเร็วกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลภายในถังกวนผสม



รูปที่ 4.27 กราฟการกระจายตัวของความเร็วกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลภายในถังกวนผสม ที่เกิดจากใบปั่นชนิด Rushton Turbine, Pitched Blade Turbine และ Retreat Curve ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 100 รอบต่อนาที (โดยที่ ▲ : Rushton Turbine ■ Pitched Blade Turbine ● Retreat Curved)

รูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของของไหลที่ความเร็วต่าง ๆ ภายในถังปั่นกววนซึ่งสามารถวิเคราะห์ให้เห็นถึงบริเวณที่มีความเร็วต่ำในถังกวนผสม โดยการเกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำนั้นอาจจะส่งผลให้เกิดการผสมที่ไม่ดี จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนผสมที่เกิดจากใบปั่นกววนต่างชนิดกัน ซึ่งการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine นั้นส่งผลให้ของไหลประมาณร้อยละ 45 มีความเร็วเท่ากับร้อยละ 2.5 ของความเร็วปลาย ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการไม่กระจายตัวของความเร็วภายในถังกวนผสมของใบปั่นกววนดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ที่แสดงให้เห็นถึงแถบสีของความเร็วเป็นสีน้ำเงิน นอกจากนี้การกระจายตัวของความเร็วของใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine และ Retreat Curve นั้นใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากรูปที่ เนื่องจากใบปั่นกววนทั้ง 2 ชนิดนั้นทำให้เกิดลักษณะการไหลในแนวรัศมีเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายตัวของความเร็วที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine นั้นให้การ

กระจายตัวที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟที่ความเร็วเท่ากับร้อยละ 7.5 ของความเร็วปลายสัดส่วนของของไหลที่มีความเร็วดังกล่าวที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine และ Retreat Curve มีค่าเท่ากับประมาณร้อยละ 23.1 และ 35.8 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความเร็วที่สูงขึ้นสัดส่วนของของไหลภายในถังปั่นกววนที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine มีค่ามากกว่า แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ใบปั่นกววนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น การปั่นกววนเพื่อให้ของแข็งกระจายตัว ในลักษณะงานดังกล่าวควรเลือกใช้ใบปั่นกววนที่ให้ความเร็วในบริเวณส่วนล่างในถังปั่นกววนมากกว่า เพื่อให้ของแข็งเกิดการไหลจากด้านล่างและถูกพัดขึ้นด้านบนจากนั้นจึงกลับมาที่ใบปั่นหรือเป็นลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนชนิด Retreat Curve เป็นต้น

การพิจารณาลักษณะการไหลที่ภายในถังปั่นที่ขนาดเป็นใบตามมาตรฐานนั้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดจากใบปั่นกววนแต่ละชนิดรวมถึงค่า Power Number ที่สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในบริเวณส่วนบนของถังปั่นกววนนั้นมีค่าต่ำซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ เพราะฉะนั้นการเลือกเพิ่มใบปั่นกววนในบริเวณด้านบนของถังปั่นกววนหรือการเลือกผสมใบปั่นกววนหลายชนิดกันเพื่อให้เกิดการไหลที่ดีขึ้นภายในถังปั่นกววน ซึ่งการเพิ่มจำนวนของใบปั่นกววนนั้นส่งผลให้ถังกววนผสมที่ต้องการออกแบบไม่เป็นไปตามขนาดมาตรฐานและทำให้ขาดข้อมูลที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ค่า Power Number ซึ่งจากผลการสอบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้การคำนวณพลศาสตร์การไหลหรือ CFD สามารถใช้เพื่อคำนวณค่า Power Number รวมถึงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปั่นกววนได้

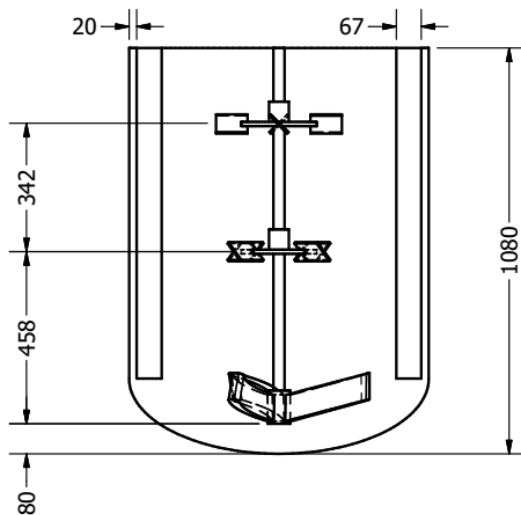
## บทที่ 5

### ผลการจำลองการไหลของกังป่นกวนที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

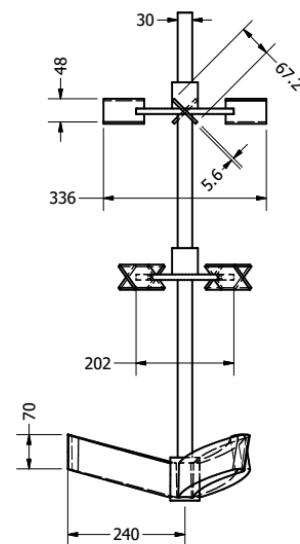
#### 5.1 ผลการจำลองการไหลของกังป่นกวนผสมที่ใช้ระบบใบป่นกวน

##### 5.1.1 รูปร่างและขนาดของกังป่นกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบป่นกวน

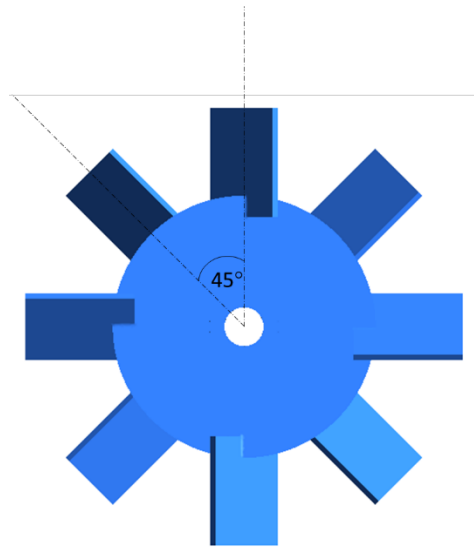
ระบบใบป่นกวนที่ใช้สำหรับกังป่นกวนชนิดนี้นั้นประกอบด้วยใบป่นกวน 2 ชนิด คือ  $45^{\circ}$  Pitched Blade Disk Turbine และ Retreat Curve โดยลักษณะของใบป่นกวนชนิด  $45^{\circ}$  Pitched Blade Disk Turbine นั้นจะแตกต่างไปจากแบบมาตรฐานเนื่องจากการติดตั้งจากแกนหมุนเพื่อติดตั้งใบพัดส่งผลให้ลักษณะเหมือนใบป่นกวนชนิด Rushton turbine ที่มีกรเอียงของใบป่นกวน โดยมุมเอียงนั้นเท่ากับ  $45$  องศา โดยลักษณะการนำระบบใบป่นกวนนี้ไปใช้ คือ กรณีที่ต้องการผสมสาร 3 วัฏภาคเข้าด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น ถึงปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของโพรพิลีน โดยการเลือกใช้ใบป่นกวนที่มีงานนั้นเพื่อต้องการเพิ่มเวลาที่แก๊สอยู่ในถังปฏิกรณ์ รวมถึงการใช้ใบป่นกวนชนิด Retreat Curve และการทำมุมเอียงของใบป่นกวนชนิด Rushton turbine เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวของของแข็งซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงการกระจายตัวของเม็ดพลาสติกที่เกิดขึ้น (Dohi et al., 2004) โดยมีขนาดและรูปร่างแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1ก



รูปที่ 5.1ข



รูปที่ 5.1ค

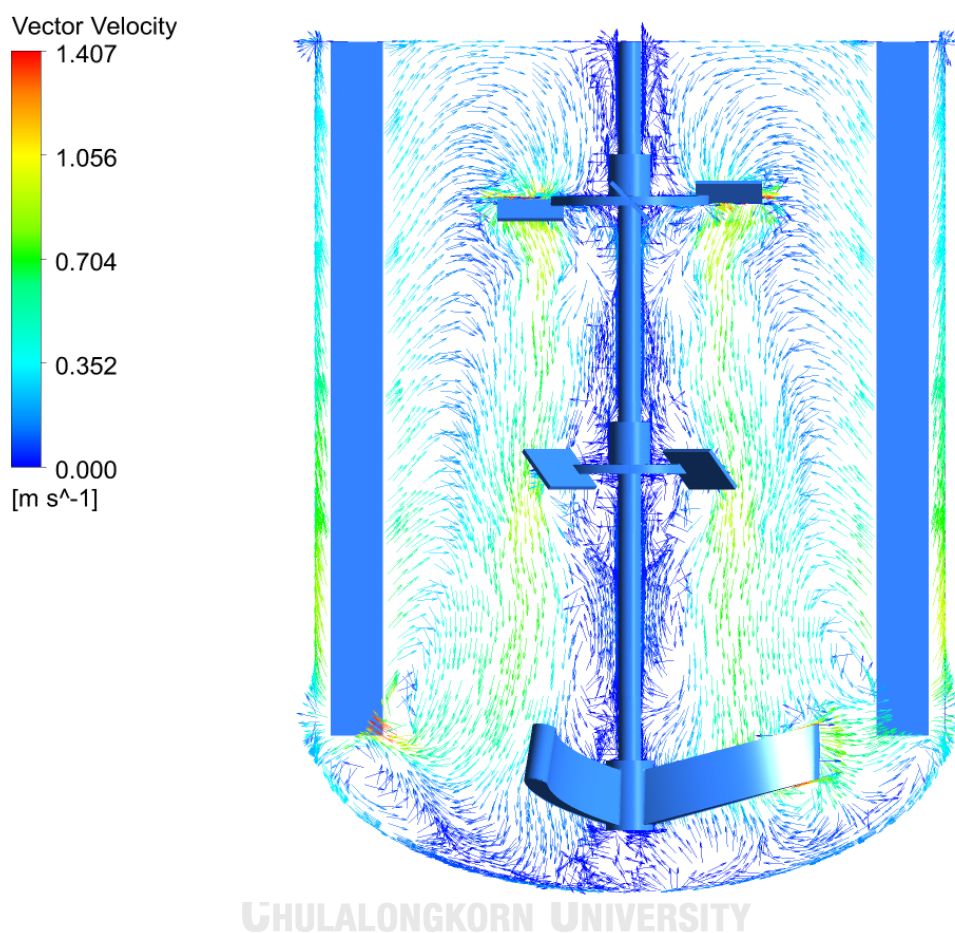
รูปที่ 5.1 รูปร่างและขนาดของถังกวนผสมที่ติดตั้งใบปั่นระบบใบปั่นกวน (หน่วยมิลลิเมตร)





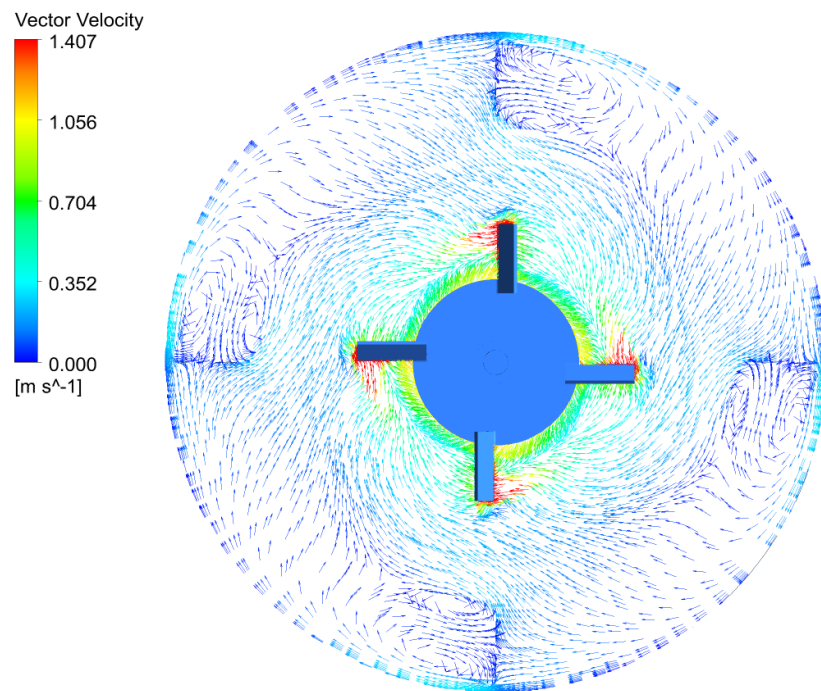
### 5.1.2 ลักษณะการไหลภายในถังกวนผสมที่ใช้ระบบใบปั่นกวน

ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการไหลของระบบใบปั่นกวนที่ใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมกันเท่ากับ  $45$  องศา โดยมีลักษณะการไหลแสดงในแผนภาพเวกเตอร์ในรูปที่ 5.2 ดังนี้



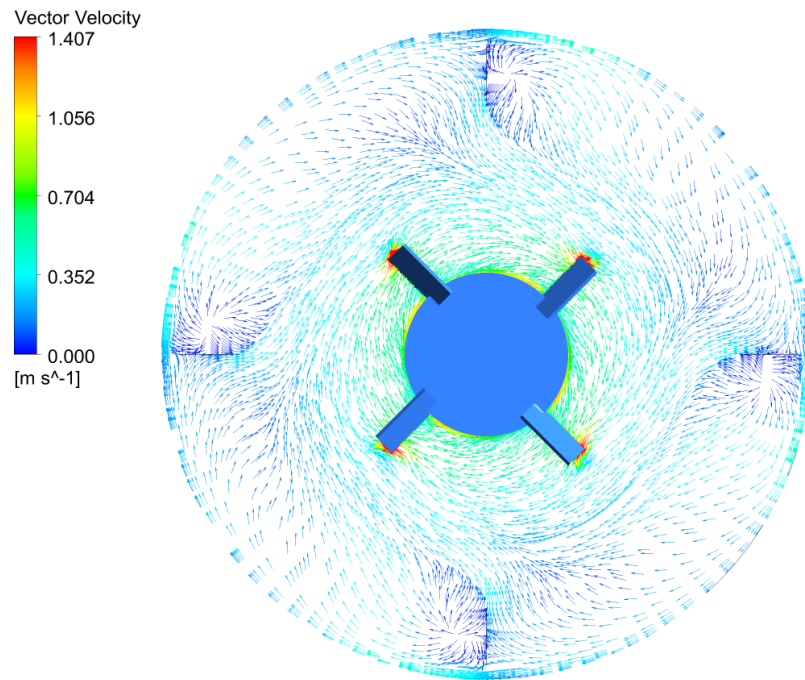
รูปที่ 5.2 แผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดการระบบใบปั่นกวนในระนาบแนวดิ่ง

รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลภายในถังกวนที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน เนื่องจากการทำมุมของใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine และการยกตัวของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve นั้นส่งผลให้การไหลภายในถังกวนเป็นการไหลในแนวดิ่งเป็นหลัก ซึ่งเมื่อพิจารณาให้การไหลเริ่มจากใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve นั้นของไหลจะถูกพัดออกจากใบปั่นกวนชนิดนี้และถูกทำให้อยกขึ้นไปสู่ด้านบนของถังก่อนที่จะถูกใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ดูดเข้าหาและพัดลงทางด้านล่างของถัง ดังนั้นโดยลักษณะการไหลดังกล่าวสามารถพิจารณาให้เป็น 1 Recirculation Loop หรือเป็น 1 รอบของการหมุนวนภายในถังกวน ซึ่งเกิดจากการเสริมกันของการไหลของใบปั่นกวนทั้ง 3 ใบ นอกจากนี้สามารถพิจารณาการไหลในแนวระนาบได้ในรูปที่ 5.3, รูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5 ดังนี้

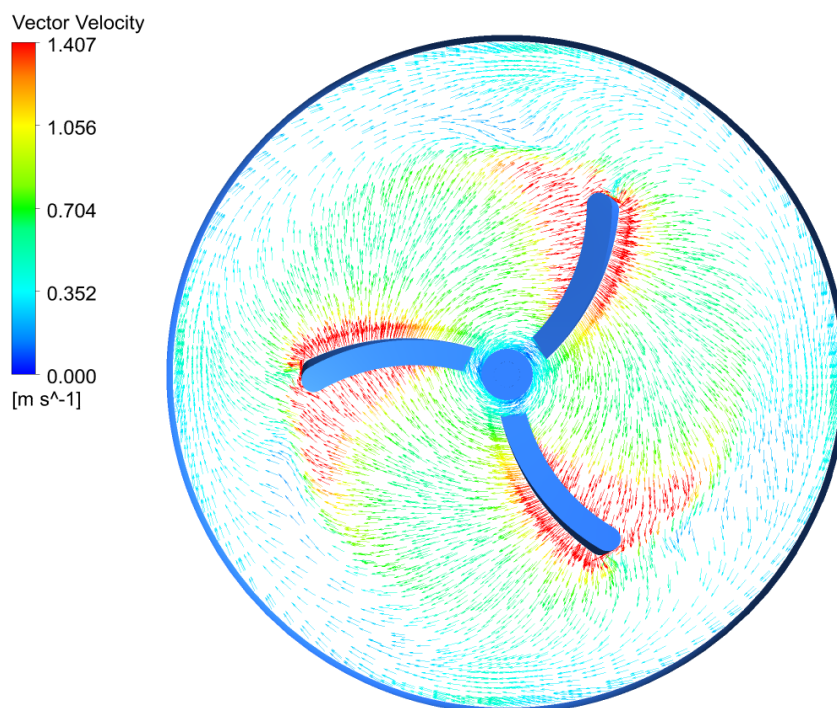


รูปที่ 5.3 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากระบบไบนารีในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งไบนารี

ไบน

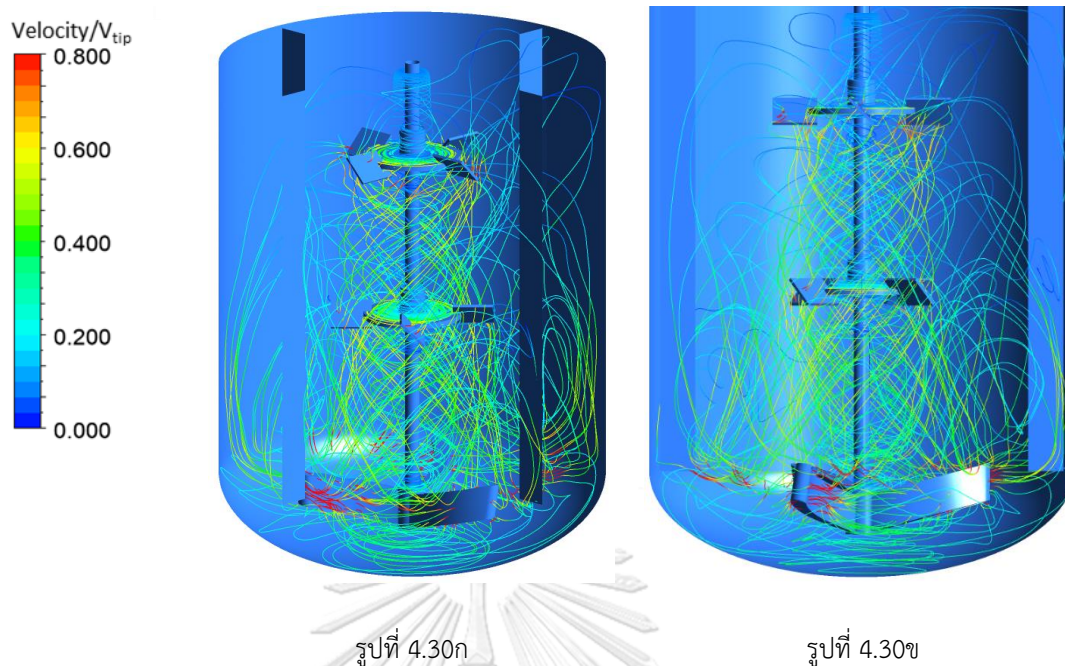


รูปที่ 5.4 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากระบบใบปั่นกววนในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นกววน  
ใบกลาง



รูปที่ 5.5 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากระบบใบปั่นกวนในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งใบปั่นกวน  
ใบล่าง

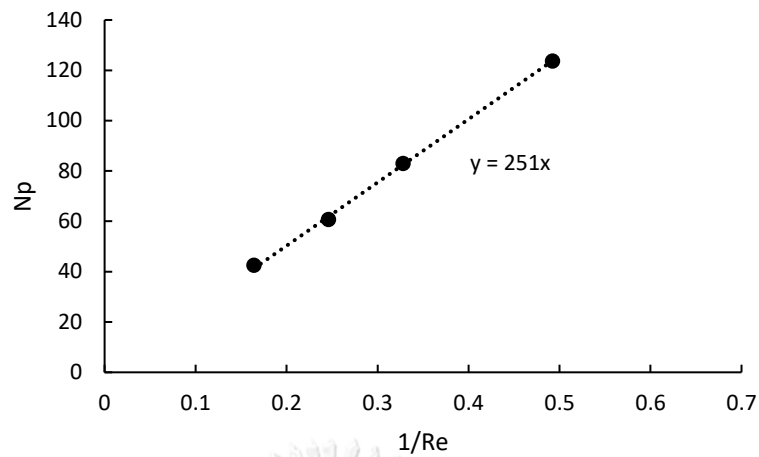
ลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine นั้นสามารถสังเกตได้จากแผนภาพเวกเตอร์ได้ในรูปที่ ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวจะมีลักษณะที่รวมตัวกันอยู่ในบริเวณใบปั่นกวนเนื่องจากการไหลในแนวตั้งเป็นหลัก ซึ่งส่งผลให้ในบริเวณของ Baffles นั้นมีความเร็วต่ำเมื่อสังเกตจากสีของเวกเตอร์ในบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine เพียงชนิดเดียว การติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ช่วยลดพื้นที่ที่ความเร็วต่ำในบริเวณส่วนล่างของถังปั่นกวนที่เกิดจากการใช้ใบปั่นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ที่มีลักษณะเป็นทรงกรวย นอกจากการพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์เพื่อศึกษาการไหลภายในถังกวนนั้น การคำนวณพลศาสตร์การไหลสามารถให้ผลลัพธ์ในรูปแบบของ Streamline เพื่อให้เข้าใจการไหลภายในกวนมากขึ้น โดยการพิจารณา Streamline แสดงในรูปที่ 5.6 ดังนี้



รูปที่ 5.6ก และ ข รูปแสดง Streamline ที่เกิดจากระบบใบปั่นกวนในมุมมอง Isometric และในระนาบแนวตั้ง

### 5.1.3 ผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน

การคำนวณพลศาสตร์การไหลเพื่อหาค่า Power Number ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติสำหรับการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนผสม รวมถึงใช้ในการขยายขนาดเพื่อคำนวณหาขอบเขตของใบปั่นกวน ซึ่งการคำนวณค่า Power Number จากแบบจำลองนั้นเป็นการคำนวณแรงบิดที่ของเหลวกระทำต่อใบปั่นกวน ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับการทดลองเพื่อหาค่า Power Number โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาค่า Power Number ที่ย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน โดยค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบนั้นจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับส่วนกลับของ Reynolds Number ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.7 ดังนี้



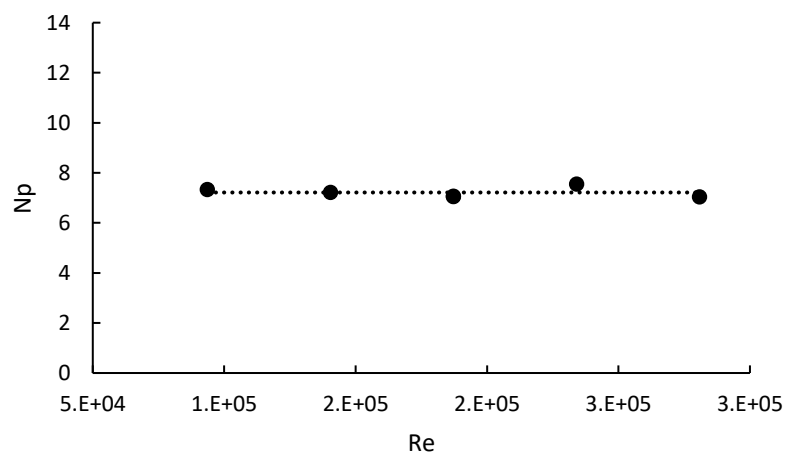
รูปที่ 5.7 กราฟระหว่างค่า Power Number และส่วนกลับของ Reynolds Number ในย่านการไหลแบบ

ราบเรียบ

จากกราฟสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number ได้ดังนี้

$$N_p = \frac{251}{Re} \quad 5.1$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะมีลักษณะแตกต่างออกไป ซึ่งค่า Power Number ในย่านการไหลนี้จะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นค่า Reynolds Number โดยแสดงในรูปที่ 5.8 ดังนี้



รูปที่ 5.8 กราฟระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วน

จากกราฟสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number ได้ดังนี้

$$N_p = 7.21$$

5.2

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number มีลักษณะเหมือนความสัมพันธ์ระหว่างค่า Friction Factor กับค่า Reynolds Number โดยในย่านการไหลแบบราบเรียบผลของความหนืดหรือ Viscose Force นั้นส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนหรือเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Power Number และ Reynolds Number และพิจารณาให้ความหนาแน่น, ความเร็วรอบ, เส้นผ่านศูนย์กลางของถังปั่นกวน เป็นค่าคงที่ พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนนั้นจะแปรผันตรงกับความหนืด โดยสามารถพิจารณาเป็นสมการได้ดังนี้

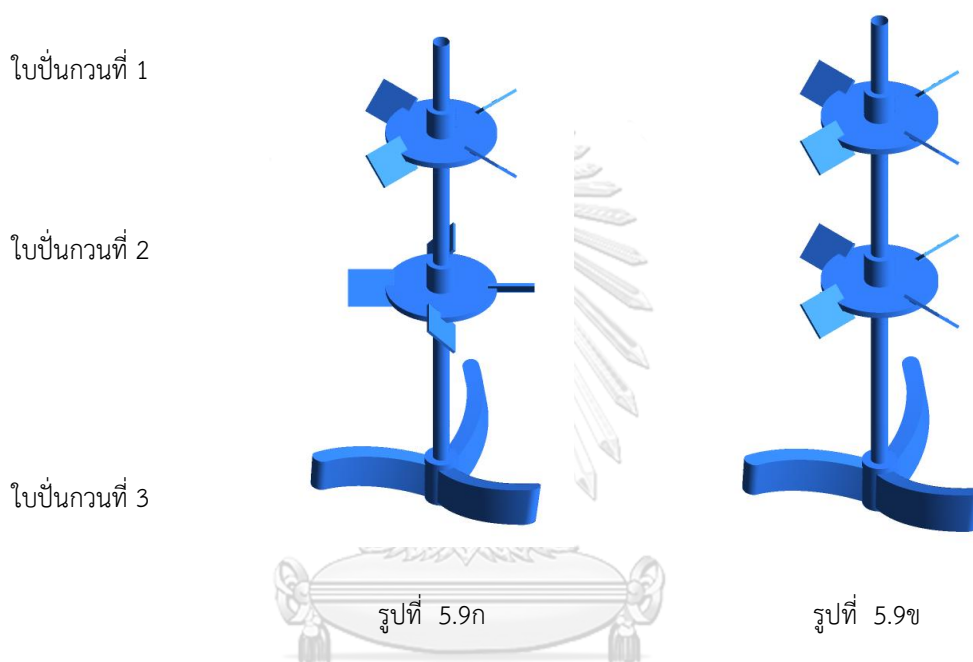
$$P = K_L N^2 D^3 \times \mu$$

ในทางกลับกันนั้นในย่านการไหลแบบปั่นกวน พลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนจะขึ้นกับความหนาแน่นของสาร กล่าวคือพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวนนั้นจะขึ้นแรงเฉื่อยหรือ Inertia Force เป็นหลักโดยมาสามารถพิจารณาเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = K_T N^3 D^5 \times \rho$$

#### 5.1.4 การเปรียบเทียบการท่ามุมระหว่าง 45° Pitched Blade Disk Turbine

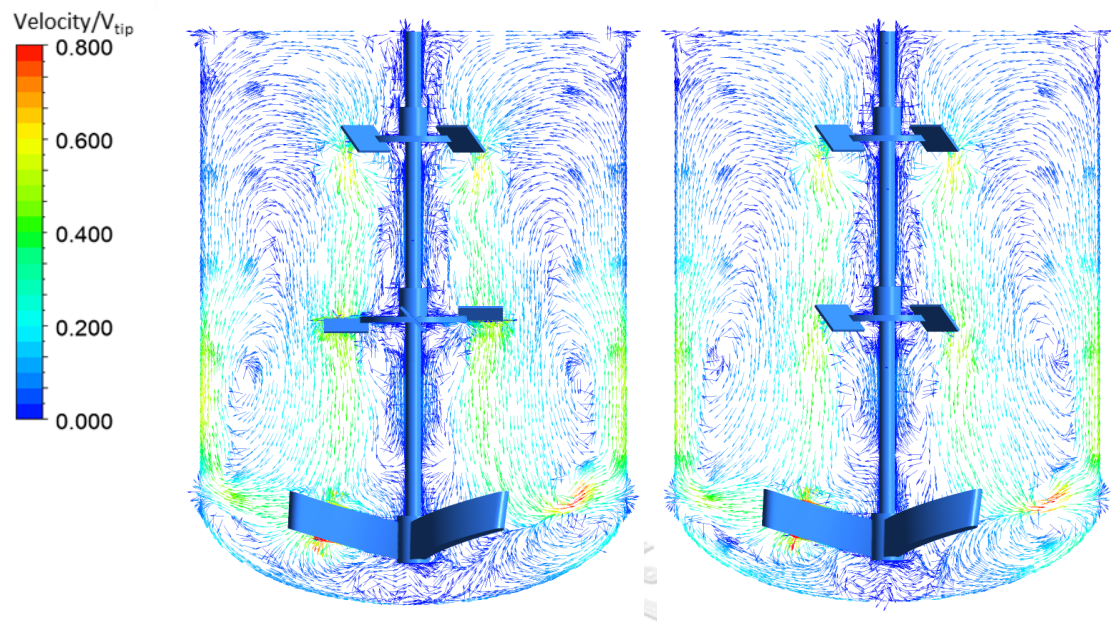
การเรียงตัวของใบปัดกังหันชนิด 45° Pitched Blade Disk Turbine ซึ่งเป็นการจัดการท่ามุมของใบปัดกังหันทั้งสองเพื่อให้การท่ามุมของตำแหน่งใบพัด ท่ามุมต่างกัน 0 และ 45 องศา โดยแสดงดังรูปที่ 5.9 ดังนี้ ซึ่งการท่ามุมต่างกัน 45 องศา นั้นทำให้เกิดที่ว่างเมื่อพิจารณาให้เกิดการไหลจากใบปัดกังหัน 45° Pitched Blade Disk Turbine ที่ 1 ลงมาใบปัดกังหันที่ 2



รูปที่ 5.9ก และ ข แสดงรูปทรงของระบบใบปัดกังหันซึ่งใบพัดของใบปัดกังหันชนิด Pitched Blade Turbine ท่ามุมต่างกัน 45 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ

การเปลี่ยนการจัดตำแหน่งของใบปัดกังหันนั้นไม่ส่งผลต่อการไหลในภาพโดยสามารถวิเคราะห์ได้จากแผนภาพเวกเตอร์และแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วในรูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.11 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อวิเคราะห์การพาระหว่างความเร็วเฉลี่ยและความสูงในรูปที่ 5.12 ในระยะความสูงเท่ากับ 0.5 ของความสูงของกังหันลงมาถึงที่ส่วนล่างของกังหันสำหรับกรณีใบปัดกังหันชนิด Pitched Blade Disk Turbine ท่ามุมต่อกัน 45 องศา นั้นมีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่า เนื่องจากการไหลหลักที่เกิดจากใบปัดกังหันชนิดนี้เป็นกวนไหลในแนวตั้ง ซึ่งการจัดเรียงให้เกิดที่ว่างนั้นย่อมส่งผลให้การไหลนั้นถูกเสริมให้ไหลเร็วขึ้นจากใบปัดกังหันที่ 2 ก่อนที่จะไหลไปใบปัดกังหันที่ 3 โดยลักษณะการจัดเรียงของใบปัดกังหันนั้นส่งผลให้การกระจายตัวของความเร็ว เมื่อพิจารณากราพระหว่างสัดส่วนของของเหลวและความเร็วไร้หน่วยในรูปที่ 5.13 ซึ่งการจัดเรียงให้ใบปัดกังหันท่ามุม 45 นั้นส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของความเร็วในกังหันได้ดีกว่า

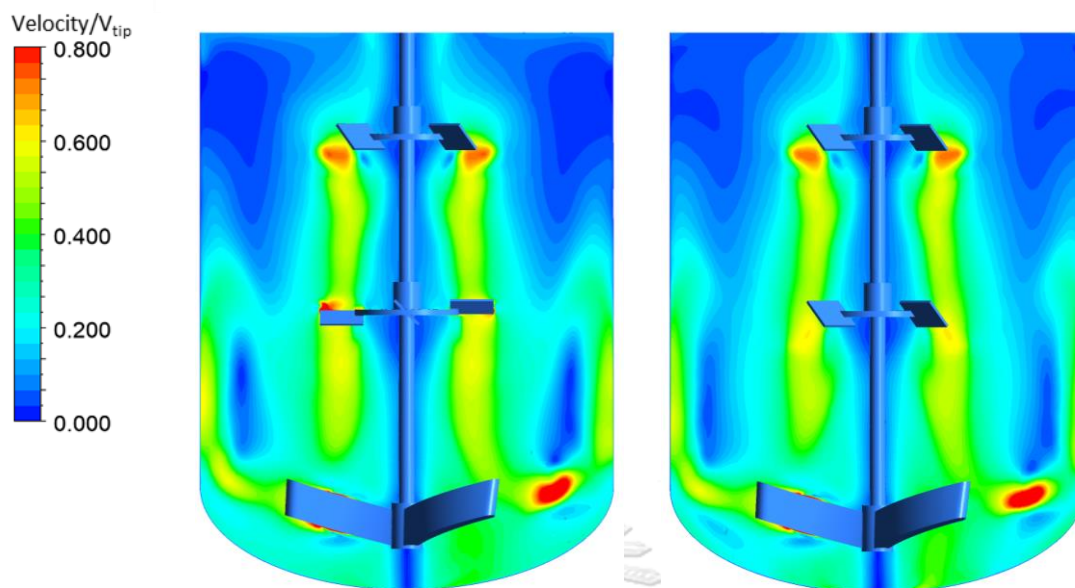




รูปที่ 5.10ก

รูปที่ 5.10ข

รูปที่ 5.10ก และ 4.41ข แสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากระบบใบปั่นกวานซึ่งใบพัดของใบปั่นกวานชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน  $45$  องศา และ  $0$  องศา ตามลำดับ

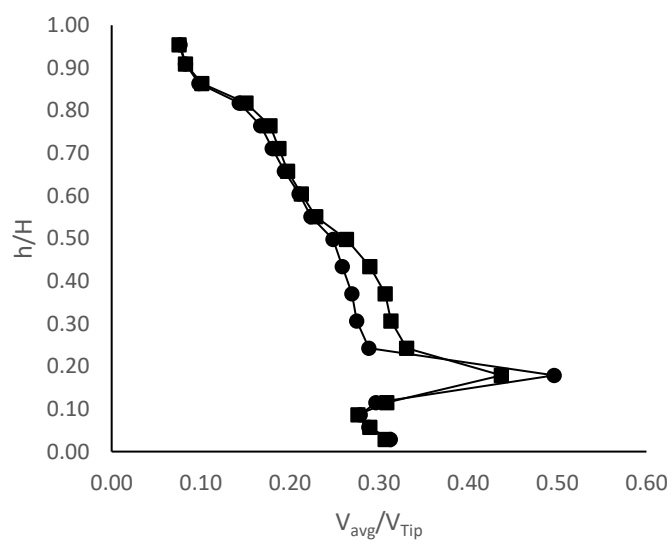


รูปที่ 5.11ก

รูปที่ 5.11ข

รูปที่ 5.11ก และ ข แสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วที่เกิดจากระบบใบปั่นกวานซึ่งใบพัดของใบปั่นกวานชนิด

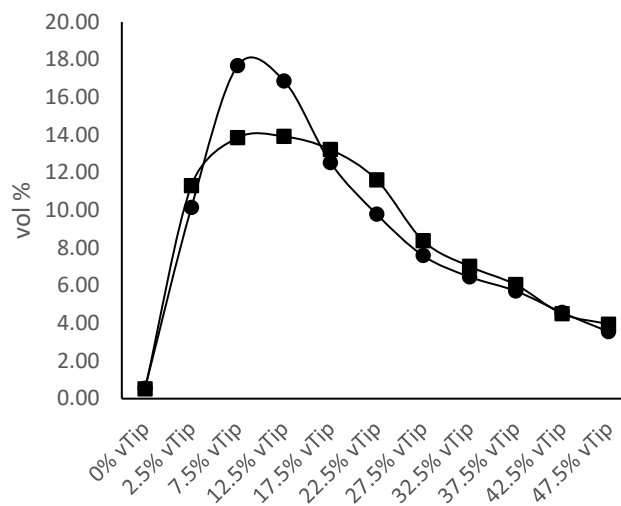
$45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน 45 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ระหว่างความสูงไร้หน่วยกับความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากระบบใบปั่นกวานซึ่งใบพัดของใบปั่นกวานชนิด

$45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน 45 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ (โดยที่ ● และ ■ แทน

ใบพัดของใบปั่นกวานชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน 0 องศา และ 45 องศา ตามลำดับ)

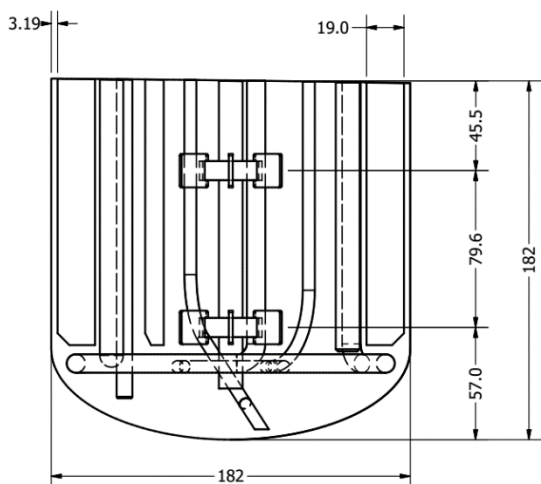


รูปที่ 5.13 กราฟการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลของระบบใบปัด กวนซึ่งใบปัดของใบปัดกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน 45 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ (โดยที่ ● และ ■ แทนใบปัดของใบปัดกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ทำมุมต่างกัน 0 องศา และ 45 องศา ตามลำดับ)

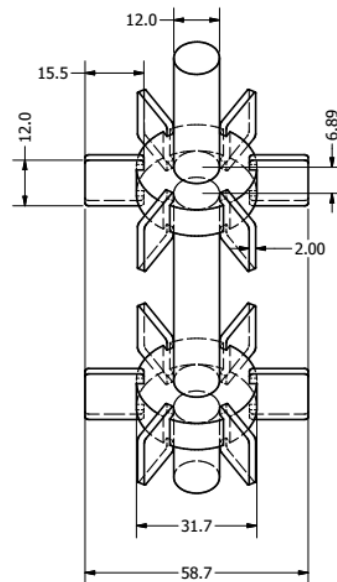
## 5.2 ผลการจำลองการไหลภายในถังหมัก

### 5.2.1 รูปร่างและขนาดของถังหมัก

ถังหมักเป็นถังปั่นกวนผสมที่ใช้สำหรับเป็นถังปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นที่เป็นแก๊สและของเหลว โดยลักษณะโดยทั่วไปของถังหมักนั้นจะประกอบด้วย Sparger ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้อนแก๊สเข้าสู่ถังกวนผสมและใช้ใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine เพื่อพัดแก๊สให้กระจายออกไปด้านข้างของถังปั่นกวน ซึ่งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine นั้นให้ค่า Power Number ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับใบปั่นกวนชนิดอื่น โดยค่า Power Number ที่ถูกนั้นหมายถึงของไหลรับพลังงานจากใบปั่นกวนได้มากกว่าและส่งผลให้การกระจายตัวของแก๊สและการหน่วงของแก๊ส (Gas Hold-up) (Xie et al., 2014) นอกจากนี้ใบปั่นกวนชนิดดังกล่าวมีงานของใบพัดเพื่อเพิ่มระยะเวลาที่แก๊สอยู่ในถังปั่นกวนโดยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นลักษณะของถังหมักที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Luan et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตามถังหมักที่ใช้ในห้องทดลองนั้นมีอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ เช่น เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ, เครื่องวัดค่า pH, เครื่องวัด และท่อเก็บตัวอย่าง เป็นต้น โดยรูปร่างและขนาดของถังหมักแสดงในรูปที่ 5.14 ดังนี้



รูปที่ 5.14ก

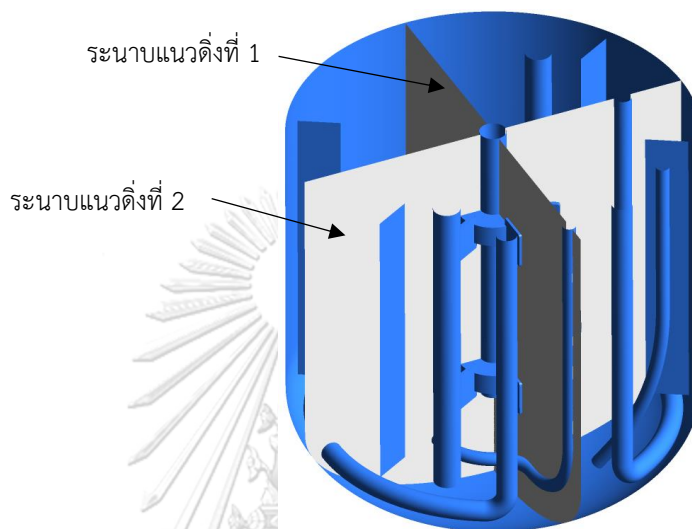


รูปที่ 5.14ข

รูปที่ 5.14ก และ ข รูปร่างและขนาดของถังหมักและใบปั่นตามลำดับ (หน่วยมิลลิเมตร)

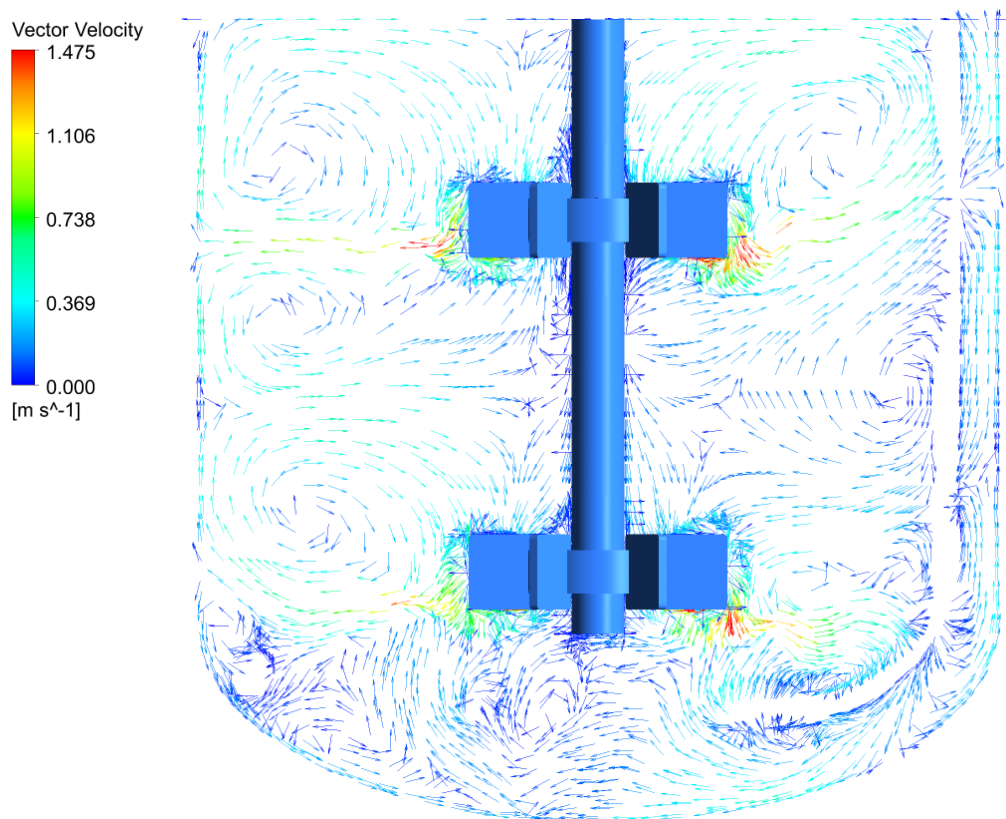
### 5.2.2 ลักษณะการไหลภายในถังกวนหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ

การติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นส่งผลให้การไหลที่เกิดขึ้นนั้นไม่สมมาตร เพราะฉะนั้นการแสดงผลจึงเป็นการแสดงในหลายระนาบเพื่อสามารถวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้น โดยตำแหน่งของระนาบในแนวตั้งที่ใช้แสดงผลการไหลแสดงในรูปที่ 5.15 ดังนี้

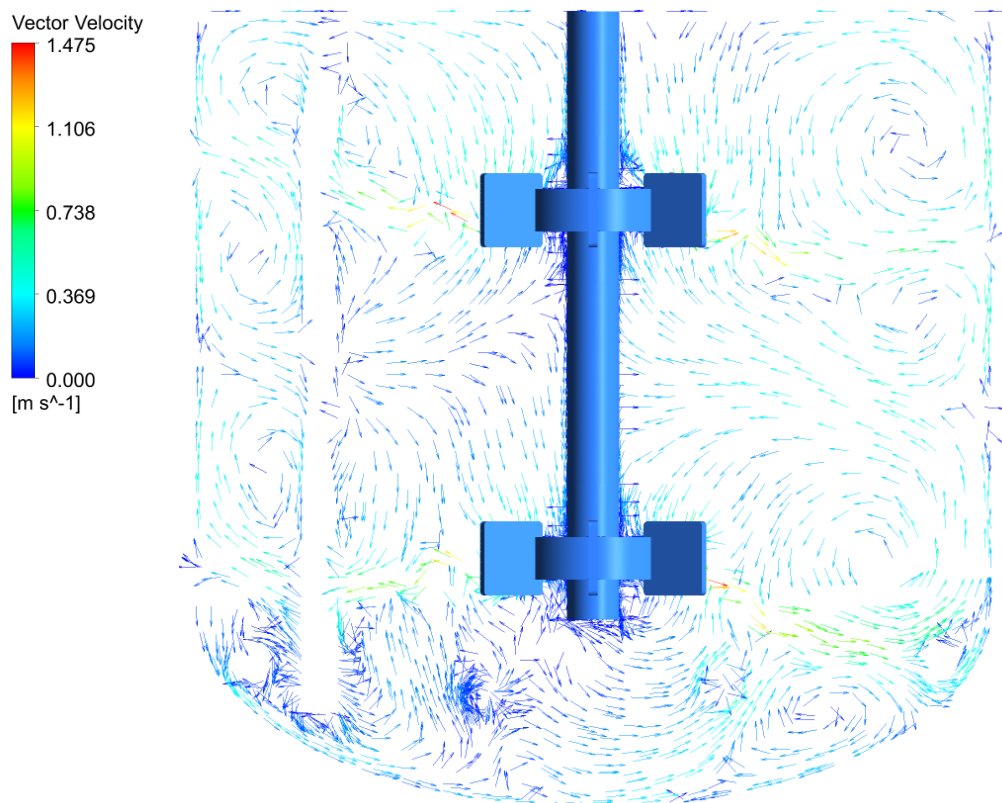


รูปที่ 5.15 รูปแสดงระนาบในแนวตั้งเพื่อแสดงลักษณะการไหล

นอกจากนี้ลักษณะการไหลภายในถังปั่นกววนชนิดนี้แสดงในรูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 ดังนี้

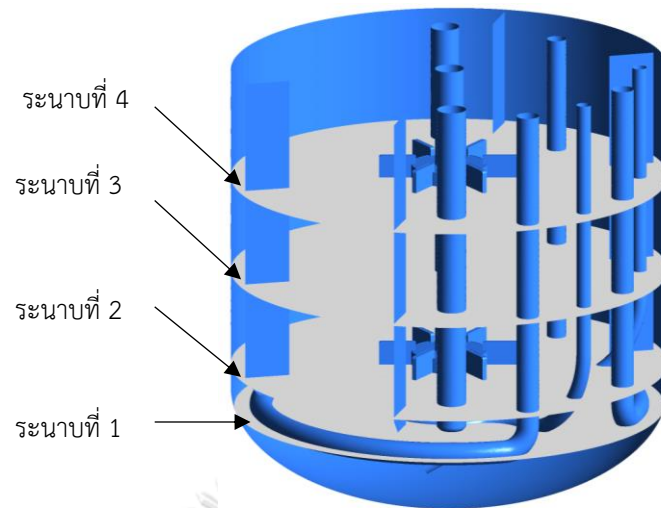


รูปที่ 5.16 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ความเร็วในระนาบแนวตั้งที่ 1



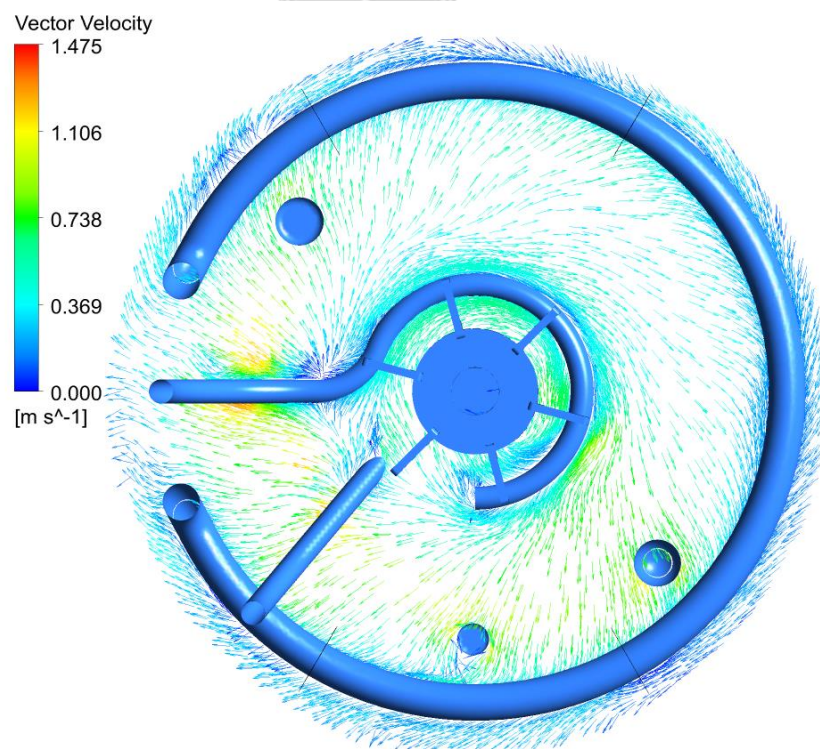
รูปที่ 5.17 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ความเร็วในระนาบแนวดิ่งที่ 2

ลักษณะการไหลที่ขึ้นเมื่อติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ ให้ลักษณะการไหลในแนวดิ่งเป็นหลักเหมือนกับการติดตั้งใบปั่นชนิดนี้เพียง 1 ใบ ซึ่งจากแผนภาพเวกเตอร์ในรูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 ลักษณะการไหลวนที่เกิดขึ้นสามารถนับได้เป็น 4 การหมุนวนกล่าวคือเกิด 2 การหมุนวนต่อ 1 ใบปั่นกวน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นไม่สมมาตรเมื่อสังเกตจากเวกเตอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมีไปผนังของถังกวนผสม นอกจากนี้สามารถพิจารณาการไหลในระนาบตัดขวางโดยแสดงตำแหน่งของระนาบตัดขวางในรูปที่ 5.18 ดังนี้



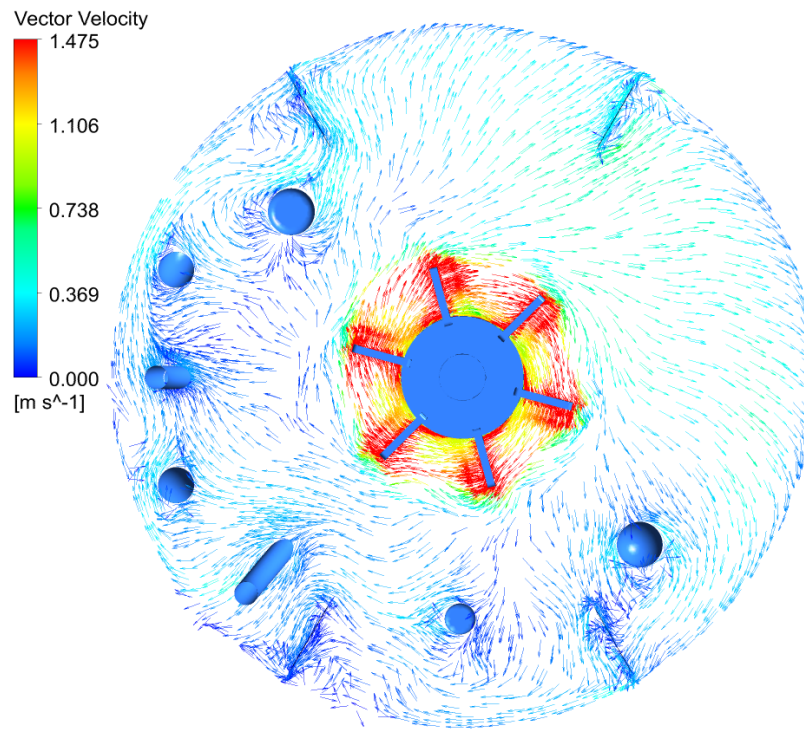
รูปที่ 5.18 รูปแสดงตำแหน่งของระนาบตัดขวาง

ระนาบที่ 1, 2, 3 และ 4 แสดงระนาบตัดขวางที่ตำแหน่งของ Sparger, ใบบิ้นกวนที่ตำแหน่งล่าง, ระนาบกึ่งกลางระหว่างใบบิ้นกวนและ ใบบิ้นกวนที่ตำแหน่งบนตามลำดับ ซึ่งแผนภาพเวกเตอร์เพื่อวิเคราะห์การไหลในระนาบดังกล่าวดังนี้

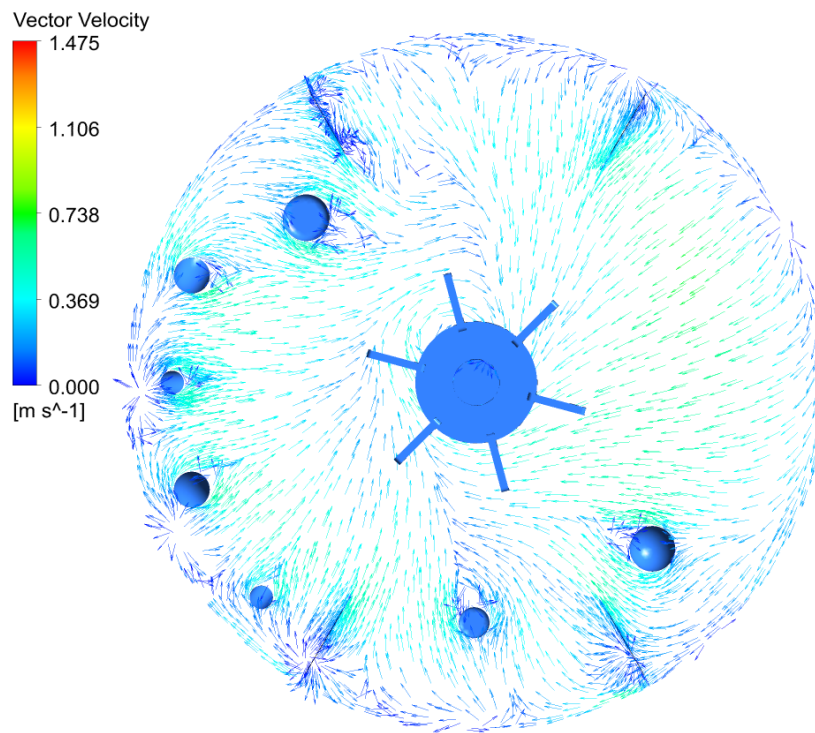


รูปที่ 5.19 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ในระนาบตัดขวางที่ 1

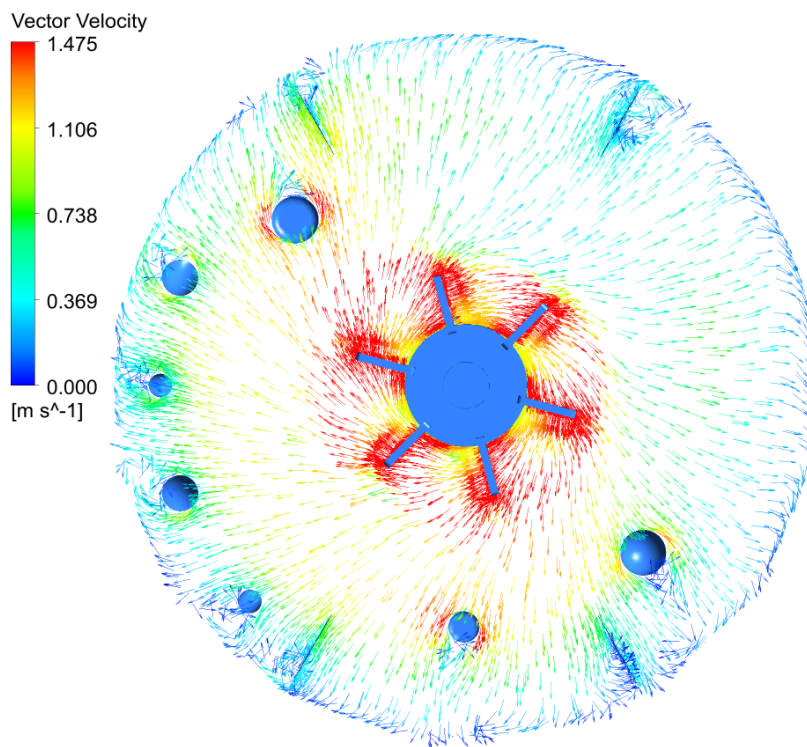




รูปที่ 5.20 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ในระนาบตัดขวางที่ 2



รูปที่ 5.21 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ในระนาบตัดขวางที่ 3

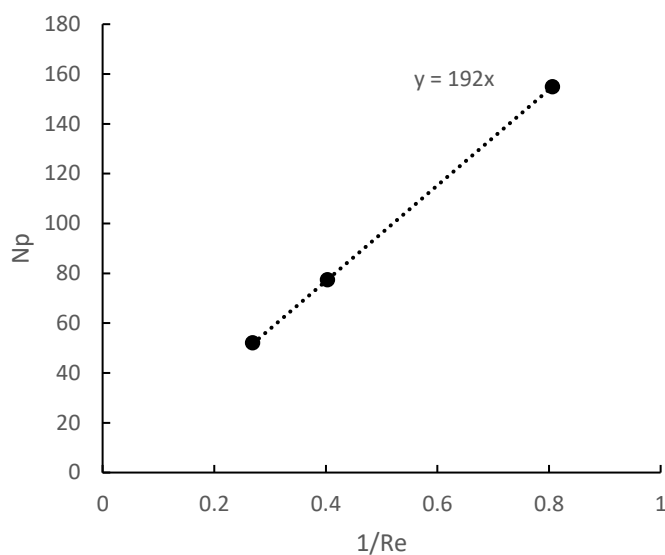


รูปที่ 5.22 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ในระนาบตัดขวางที่ 4

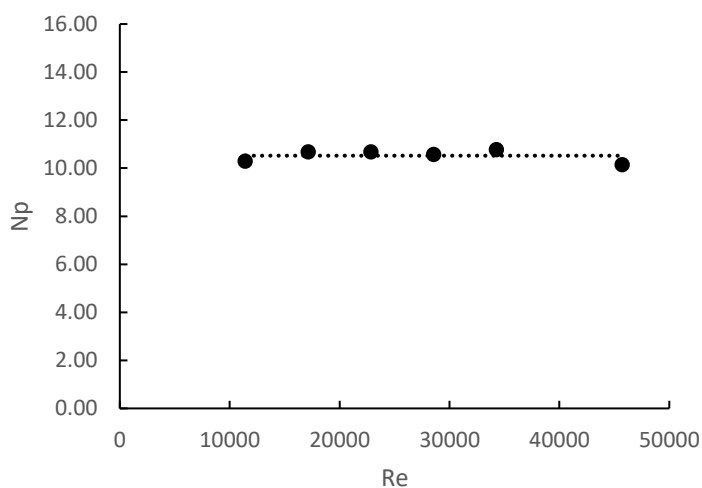
ลักษณะการไหลในระนาบตัดขวางที่เกิดจากใบปั่นกวน์ที่ตำแหน่งบนและล่างต่างกัน เนื่องจากการไหลที่ไหลออกจากใบปั่นกวน์ไปกระทบกับผนังของถังไม่สามารถถอยกลับไปที่ใบปั่นกวน์ได้อย่างอิสระเนื่องจากขดท่อให้ความร้อน (Heating Coil) กีดขวางการไหลรวมถึงส่งผลให้การไหลในบริเวณดังกล่าวนี้มีลักษณะที่พุ่งลงทางด้านล่างของถังปั่นกวน์ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของการเกิดจากหมุนวนของการไหลที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นถึงการทำงานที่แยกกันของใบปั่นกวน์ทั้ง 2 ใบ สามารถสังเกตได้จากแผนภาพเวกเตอร์ที่ระนาบกึ่งกลางระหว่างใบปั่นกวน์ทิศทางของการไหลนั้นไหลเข้าหาจุดศูนย์กลางของถังปั่นกวน์ ก่อนที่การไหลจะแยกเป็นสองทางเข้าหาใบปั่นกวน์ที่ตำแหน่งบนและล่าง

### 5.2.3 ผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน

ผลการคำนวณค่า Power Number ของถังกวนผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ ร่วมกับอุปกรณ์ที่ใช้วัดผลการทดลองในถังหมัก แสดงในรูปที่ 5.23 และ รูปที่ 5.24 ดังนี้



รูปที่ 5.23 รูปแสดงผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบราบเรียบที่ความเร็วรอบต่างกัน



รูปที่ 5.24 รูปแสดงผลการคำนวณค่า Power Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วนที่ความเร็วรอบต่างกัน

ลักษณะของกราฟระหว่าง Power Number และ Reynolds Number นั้นเหมือนกับผลการคำนวณของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน โดยในย่านการไหลแบบราบเรียบค่า Power Number เป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับส่วนกลับของ Reynolds Number โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$N_p = \frac{192}{Re} \quad 5.3$$

ในขณะที่ย่านการไหลแบบปั่นป่วนค่า Reynolds Number เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ Reynolds Number โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$N_p = 10.52 \quad 5.4$$

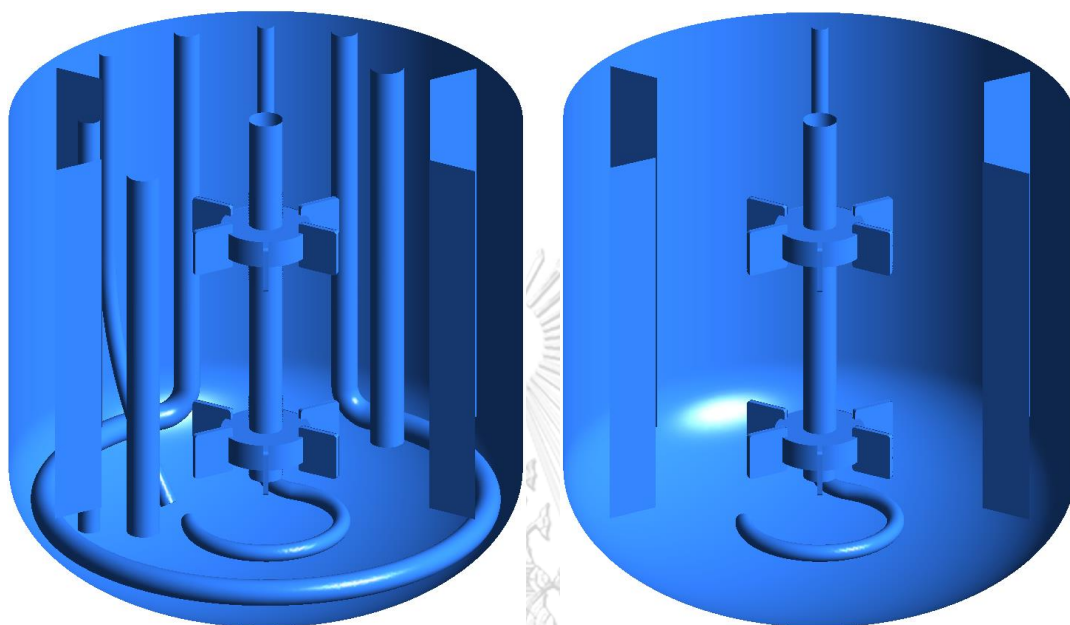
ค่า Power Number เมื่อใช้ใบปั่นกววน Ruston Turbine 2 ใบ มีค่าประมาณ 2 เท่าของค่า Power Number เมื่อใช้ใบปั่นกววนใบเดียวซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Rutherford et al., 1996) และ (Chunmei et al., 2008)



## 5.2.4 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลและ Power Number ในถังหมักที่มีเครื่องมือวัดและไม่มีเครื่องมือวัด

### 5.2.4.1 ลักษณะการไหลของถังหมักที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด

รูปทรงของถังปั่นกวนที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดแสดงในรูปที่ 5.25 ดังนี้

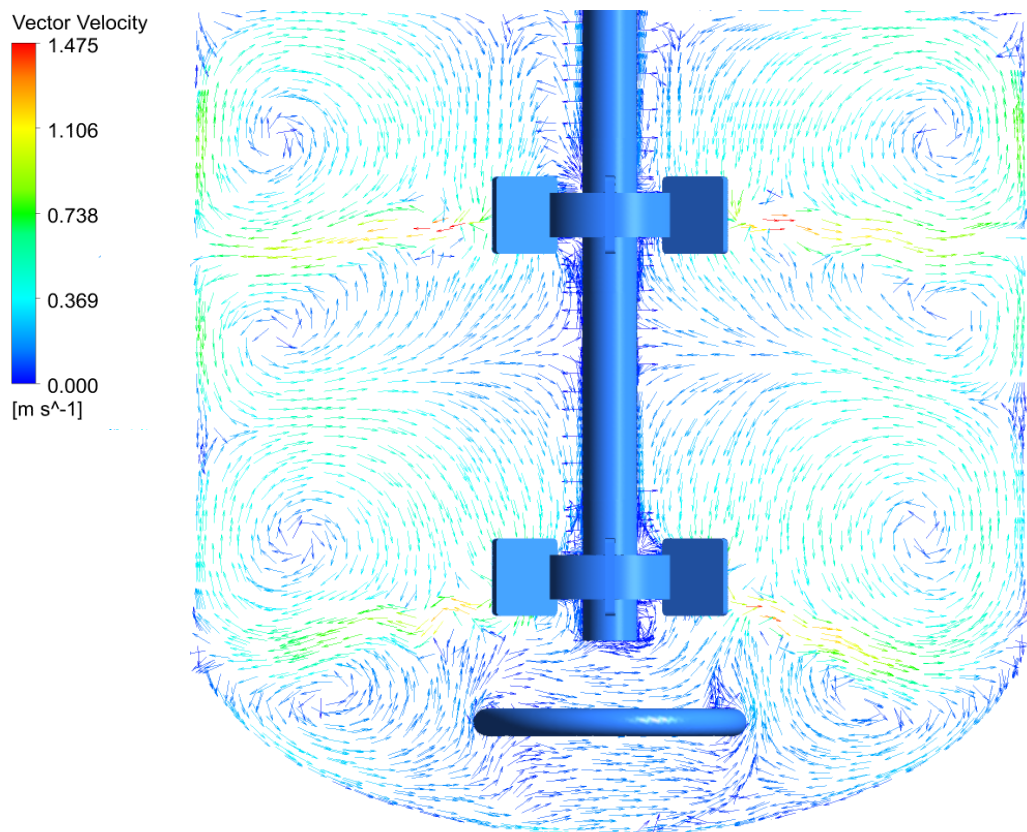


รูปที่ 5.25ก

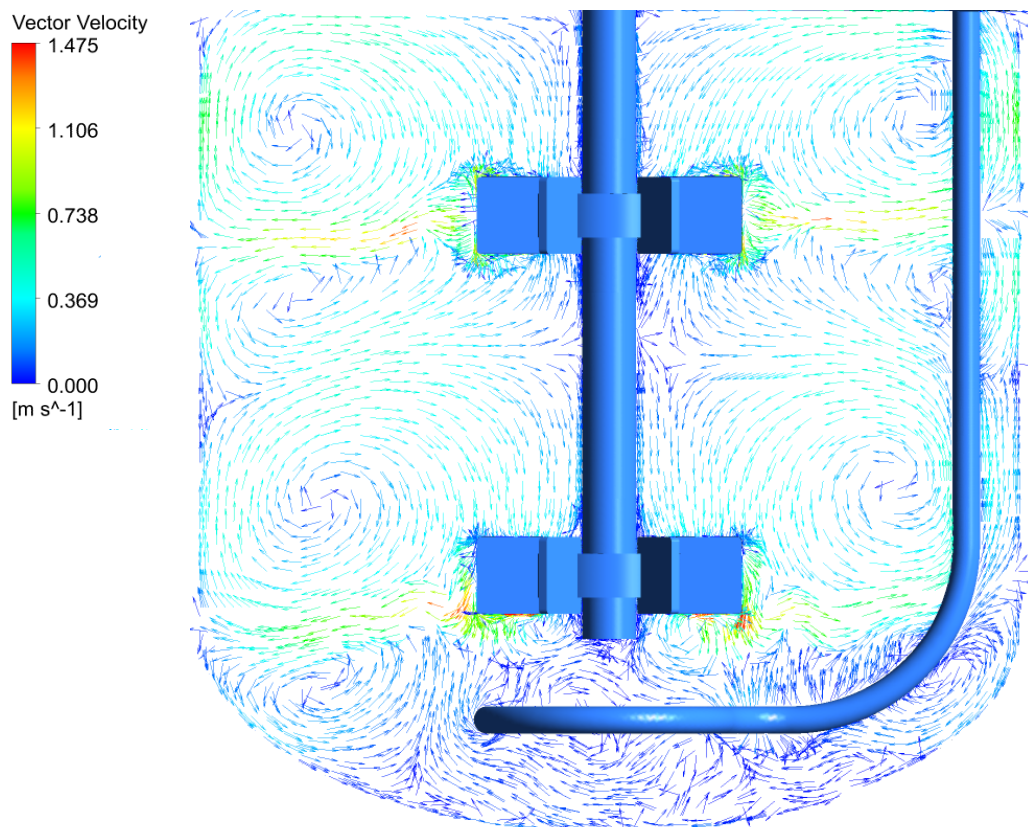
รูปที่ 5.25ข

รูปที่ 5.25ก และ ข แสดงถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับ

กรณีที่ถังหมักนั้นมีการติดตั้งเครื่องมือวัดซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางการไหลนั้นย่อมส่งผลให้เกิดลักษณะการไหลนั้นแตกต่างกัน โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความสมมาตรมากกว่าในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยลักษณะการไหลถูกแสดงในแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 5.26 และ รูปที่ 5.27 ดังนี้



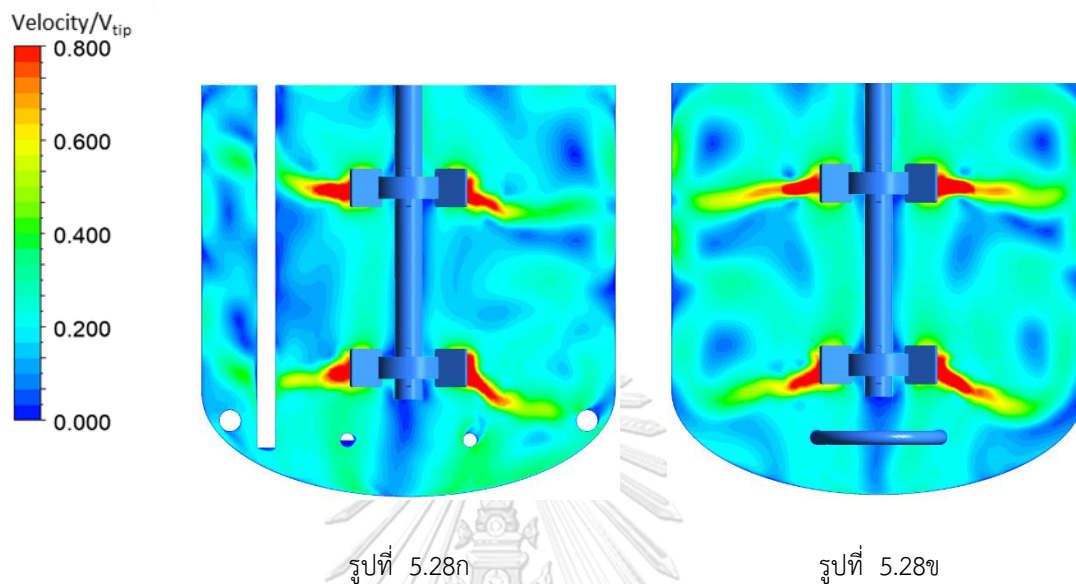
รูปที่ 5.26 แผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของถังหมักที่ไม่มีเครื่องมือวัดในระนาบแนวตั้งที่ 1



รูปที่ 5.27 แผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วของถังหมักที่ไม่มีเครื่องมือวัดในระนาบแนวตั้งที่ 2

ลักษณะการไหลจากการพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์ในรูปที่ 5.27 นั้นมีลักษณะการไหลคล้ายกับกรณีของถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด แต่ลักษณะของการเคลื่อนที่ของของไหลที่ออกจากใบพัดนั้นมีความสมมาตรกว่า รวมถึงแสดงให้เห็นถึง 4 รอบของการหมุนวนที่เกิดขึ้นหรือ 2 รอบการหมุนวนต่อ 1 ใบปั่นกววนซึ่งเป็นลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine

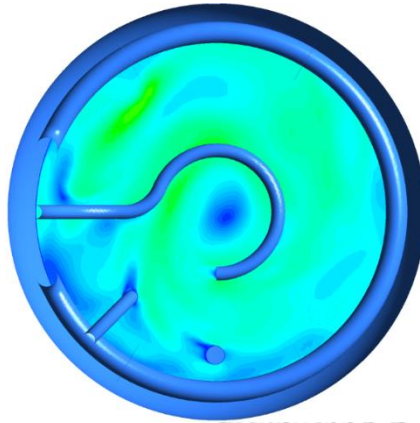
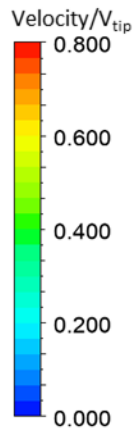
การติดตั้งเครื่องมือวัดในถังกวนผสมส่งผลให้ความเร็วของของไหลนั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อพิจารณาสีของแผนภาพคอนทัวร์ของถังหมักที่มีเครื่องมือวัดและไม่มีเครื่องมือวัด ในรูปที่ 5.28



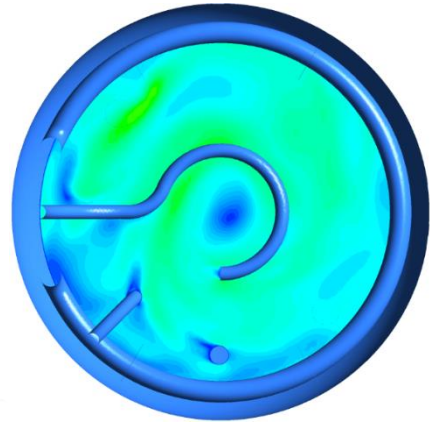
รูปที่ 5.28ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในระนาบแนวตั้งของถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด

การพิจารณาลักษณะการไหลในระนาบแนวตั้งที่แสดงในรูปที่ 5.28 ของถังหมักติดตั้งเครื่องมือวัดนั้น พบว่าการไหลของของไหลที่ออกจากใบปั่นกวนที่ตำแหน่งบนของถังปั่นกวนมีลักษณะเข้ขึ้นในฝั่งซ้ายของรูป เนื่องจากการไหลที่พุ่งออกตามแนวรัศมีของถังปั่นกวนผ่านสิ่งกีดขวางการไหลซึ่งคือเครื่องมือวัดและกระทบกับผนังของถังปั่นกวนต้องวกกลับมาที่ใบปั่นกวน กล่าวคือเกิดการหมุนวน โดยสิ่งกีดขวางการไหลนั้นส่งผลให้วงของการหมุนกว้างขึ้นในฝั่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและส่งผลให้การไหลมีลักษณะดังรูป ซึ่งเมื่อพิจารณาถังหมักที่ไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นการไหลมีความสมมาตรมากกว่า โดยการไหลในระนาบตัดขวางแสดงในรูปที่ 5.29, รูปที่ 5.30, รูปที่ 5.31 และ รูปที่ 5.32 ดังนี้



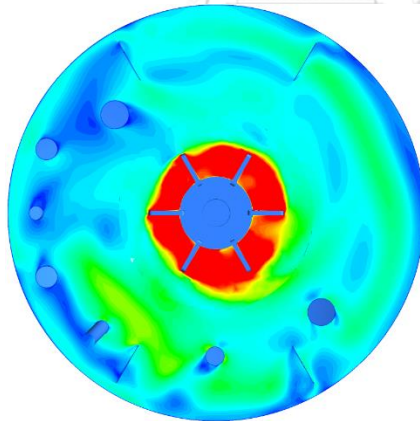
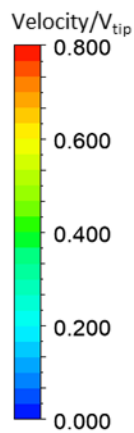


รูปที่ 5.29

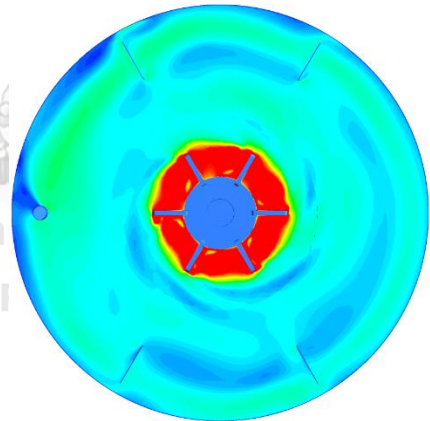


รูปที่ 5.29

รูปที่ 5.29ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในระนาบตัดขวางที่ 1 ของถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มี  
การติดตั้งเครื่องมือวัด

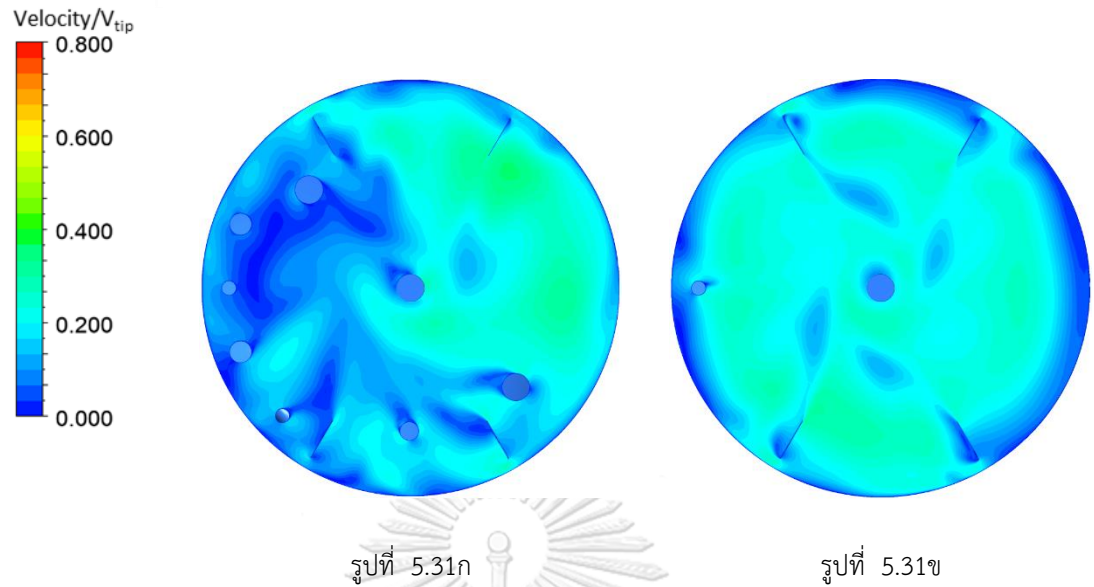


รูปที่ 5.30ก

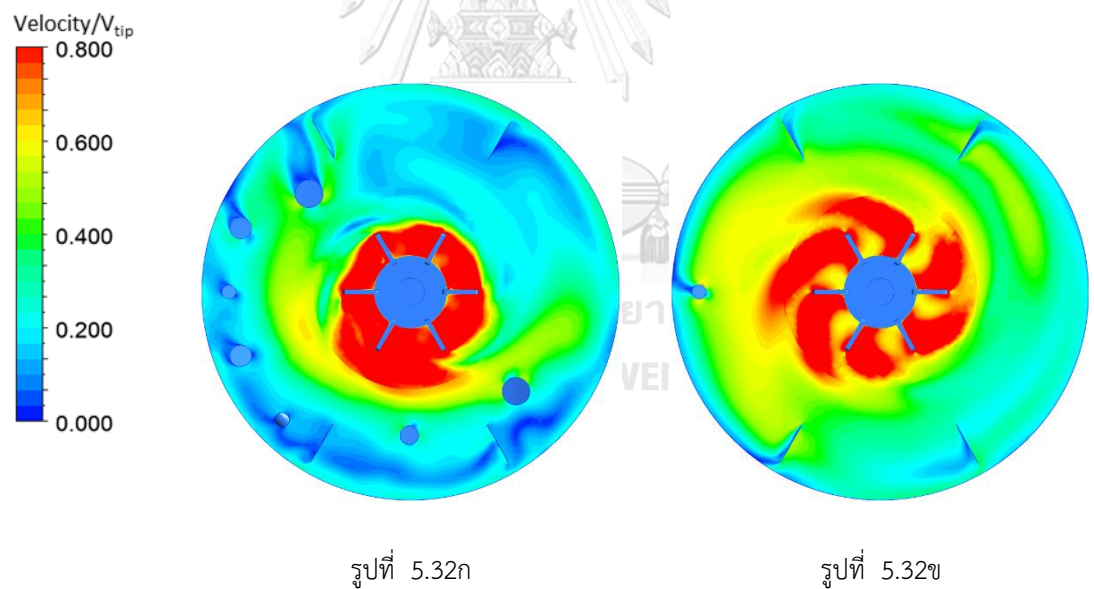


รูปที่ 5.30ข

รูปที่ 5.30ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในระนาบตัดขวางที่ 2 ของถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มี  
การติดตั้งเครื่องมือวัด



รูปที่ 5.31ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในระนาบตัดขวางที่ 3 ของกังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มี  
การติดตั้งเครื่องมือวัด



รูปที่ 5.32ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ในระนาบตัดขวางที่ 4 ของกังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มี  
การติดตั้งเครื่องมือวัด

การพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ทำให้ทราบถึงความแตกต่างของขนาดของความเร็วในกังหมักที่ติดตั้ง  
เครื่องมือวัดและไม่มีติดตั้งเครื่องมือวัด โดยในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นความเร็วของเหลวในถังกวนผสม  
จะมีขนาดน้อยกว่า เนื่องจากของไหลที่ไหลไปกระทบกับเครื่องมือวัดส่งผลให้ความเร็วลดลงและเปลี่ยนทิศทางการ

ไหล นอกจากนี้การติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นส่งผลกระทบต่อแรงบิดและค่า Power Number โดยแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการคำนวณค่า Power Number ในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด

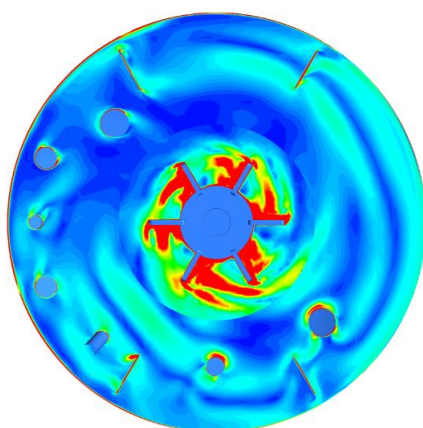
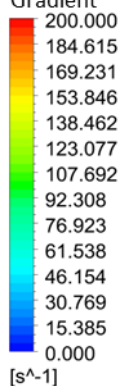
เงื่อนไข	แรงบิด [N-m]	ค่า Power Number
มีเครื่องมือวัด	0.119	10.77
ไม่มีเครื่องมือวัด	0.112	10.14

ความแตกต่างของผลการคำนวณแรงบิดและค่า Power Number นั้นส่งผลจากการเปลี่ยนแปลงการการไหลเมื่อของไหลไหลออกจากใบปั่นกววนไปกระทบกับเครื่องมือวัดซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงความเร็ว (velocity Gradient) ในของไหลมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการไหลในปั่นกววนนั้นมีความในทิศทาง ถึงแม้ว่าความเร็วหลักที่เกิดขึ้นเป็นความเร็วในแนวรัศมี แต่การติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นส่งผลให้เกิดการไหลในแนวตั้งเมื่อพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ 5.28 เพราะฉะนั้นการเปรียบเทียบ Stress หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วจึงต้องพิจารณาความเร็วในทุกทิศทางและสามารถพิจารณาได้ดังนี้

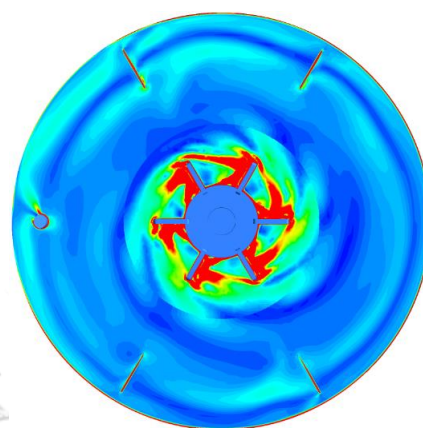
## 5.2.4.2 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระนาบตัดขวางที่ 2 (Velocity Gradient)

### 5.2.4.2.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวตั้ง

Velocity Axial.  
Gradient



รูปที่ 5.33ก

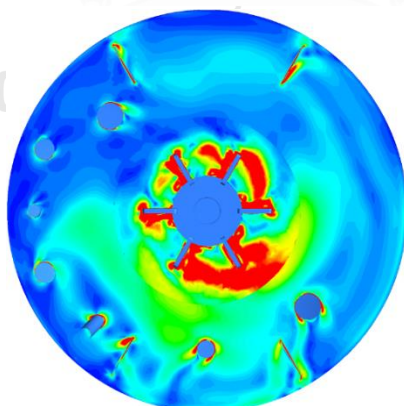
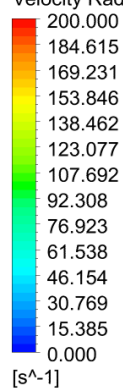


รูปที่ 5.33ข

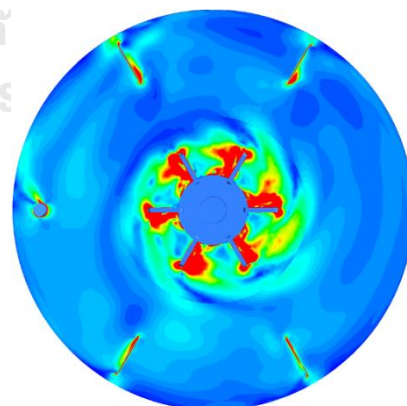
รูปที่ 5.33ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวตั้งต่อระยะทางหรือ Axial Velocity Gradient ของกังหันที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับในระนาบตัดขวางที่ 2

### 5.2.4.2.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวรัศมี

Velocity Radial.Gradient



รูปที่ 5.34ก

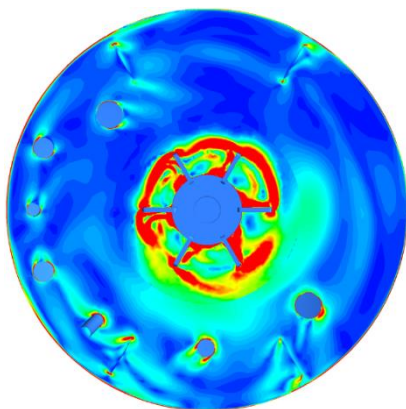
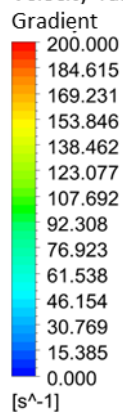


รูปที่ 5.34ข

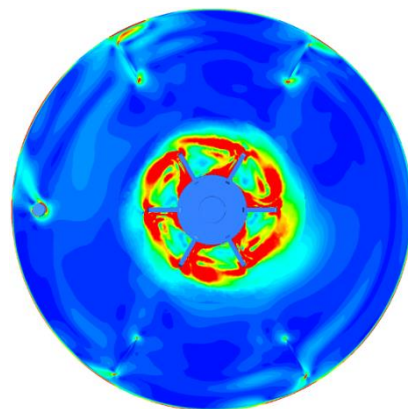
รูปที่ 5.34ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวรัศมีต่อระยะทางหรือ Radial Velocity Gradient ของกังหันที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับในระนาบตัดขวางที่ 2

### 5.2.4.2.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวสัมผัส

Velocity Tangential.



รูปที่ 5.35ก

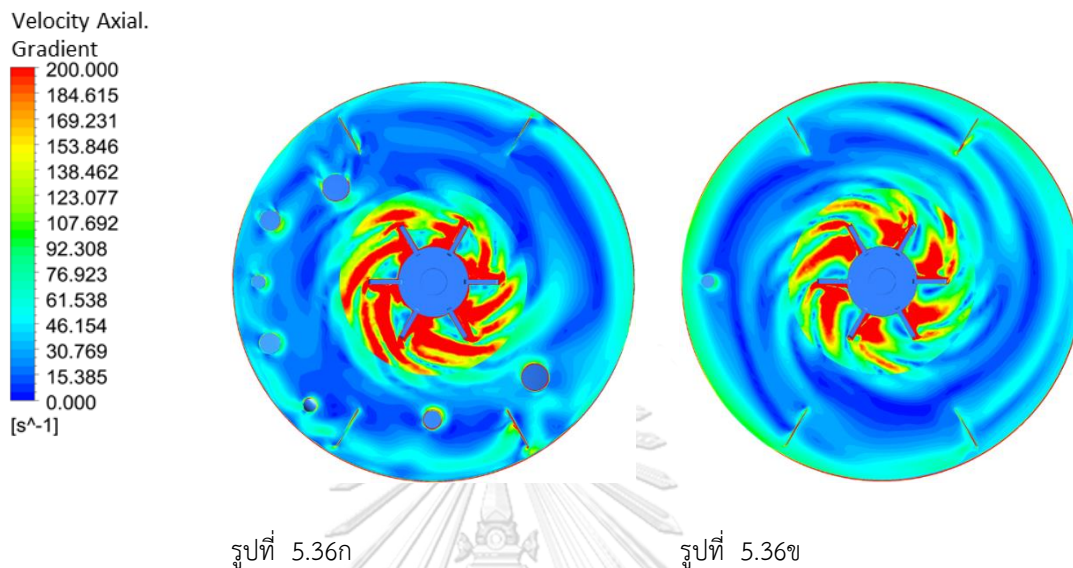


รูปที่ 5.35ข

รูปที่ 5.35ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวสัมผัสต่อระยะทางหรือ Tangential Velocity Gradient ของถังหมักที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับในระนาบตัดขวางที่ 2

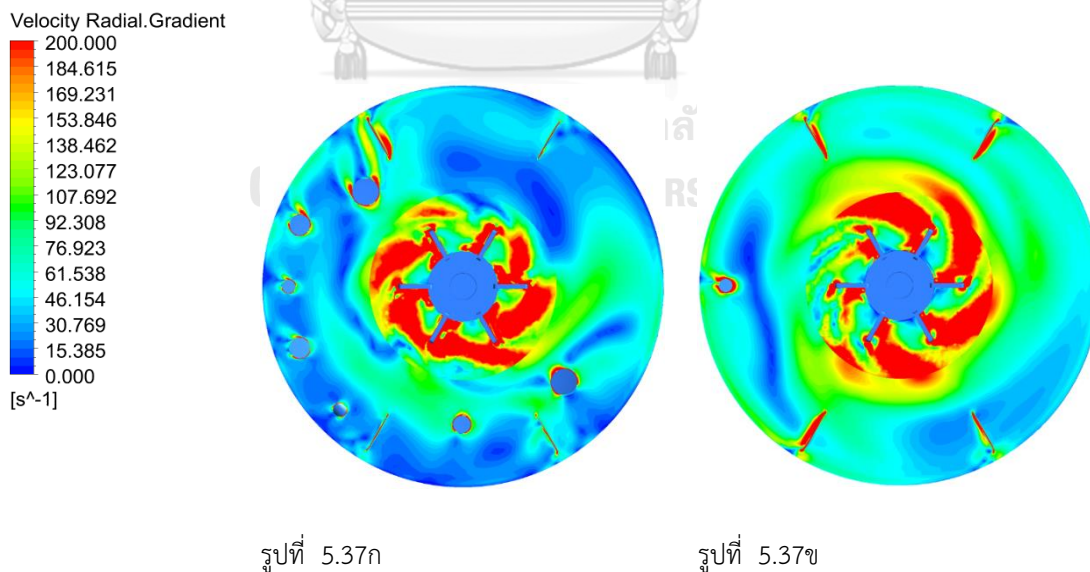
5.2.4.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระนาบตัดขวางที่ 4 (Velocity Gradient)

5.2.4.3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวตั้ง



รูปที่ 5.36ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวตั้งต่อระยะทางหรือ Axial Velocity Gradient ของถังหมักที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับในระนาบตัดขวางที่ 4

5.2.4.3.2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวรัศมี

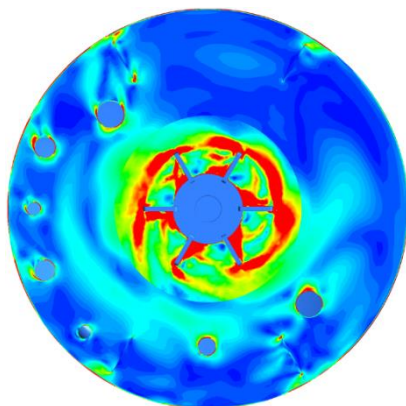
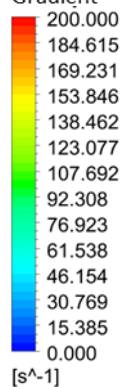


รูปที่ 5.37ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวรัศมีต่อระยะทางหรือ Radial Velocity Gradient ของถังหมักที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับในระนาบตัดขวางที่ 4

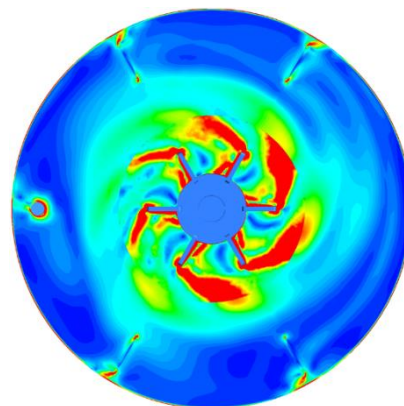
### 5.2.4.3.3 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวสัมผัส

Velocity Tangential.

Gradient



รูปที่ 5.38ก



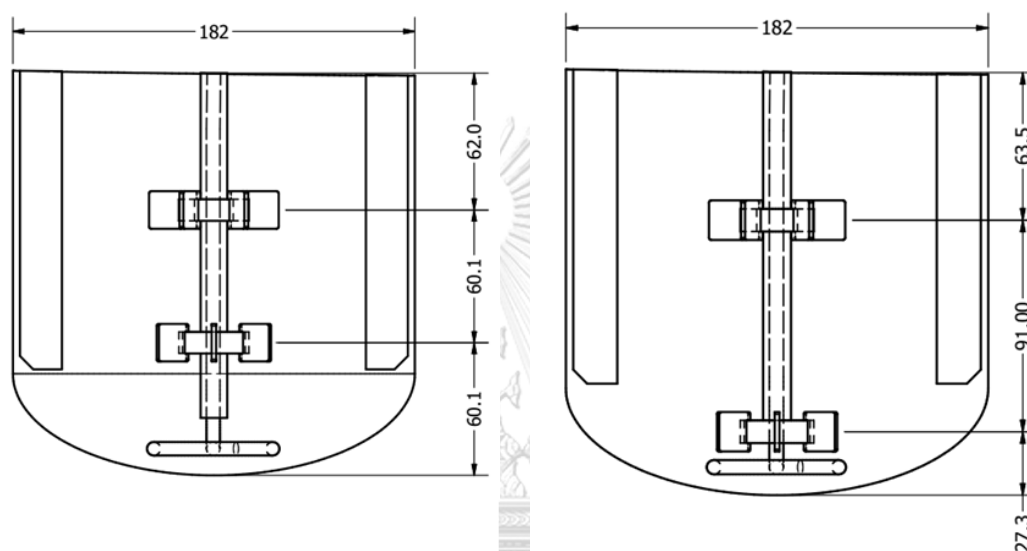
รูปที่ 5.38ข

รูปที่ 5.38ก และ ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวตั้งต่อระยะทางหรือ Axial Velocity Gradient ของถังหมักที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดตามลำดับ

แผนภาพคอนทัวร์ของการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวรัศมีที่ระนาบตัดขวางที่ 4 พบว่าขนาดของ Stress ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นมีความมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในแนวนี้ พบว่ามีค่าน้อยกว่าโดยเป็นผลจากลักษณะการไหลในรูปที่ 5.28 ก

### 5.2.5 การเปรียบเทียบผลของระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนต่อลักษณะการไหลและค่า Power number

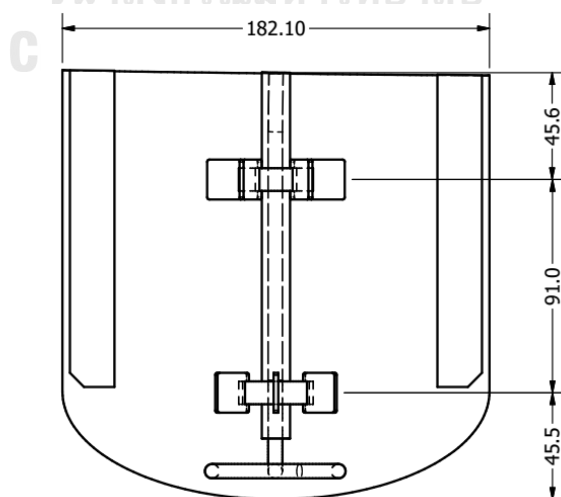
ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนนั้นส่งผลต่อลักษณะการไหลภายในถังกวนผสม ซึ่งลักษณะการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นย่อมส่งผลต่อค่า Power Number การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนนั้นจะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบบนห่างจากส่วนล่างของถังเป็นค่าคงที่และปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างโดยปรับเพิ่มและลดเพื่อวิเคราะห์การไหลที่เกิดขึ้น โดยมีระยะห่างแสดงในรูปที่ 5.39 ดังนี้



รูปที่ 5.39ก  $C1/T = 0.313$ ,  $C2/T = 0.437$

รูปที่ 5.39ข  $C1/T = 0.165$ ,  $C2/T = 0.585$

และ  $C3/T = 0.25$



รูปที่ 5.39ค  $C1/T = 0.387$ ,  $C2/T = 0.362$

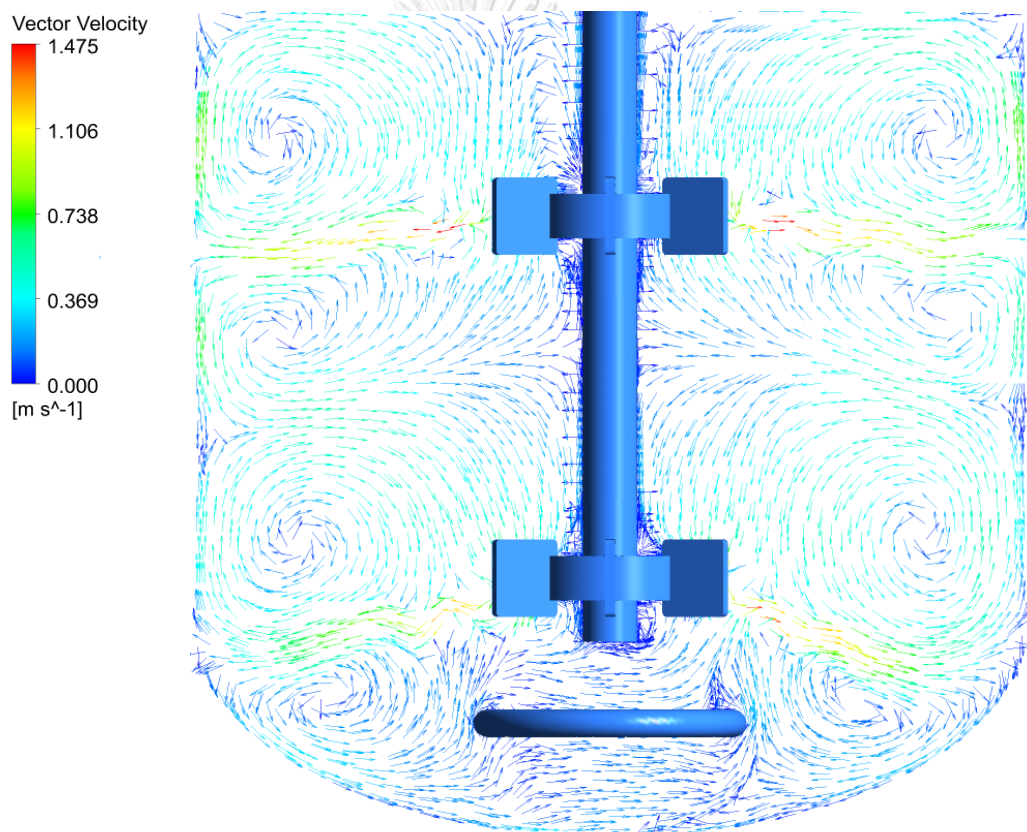


รูปที่ 5.39 รูปแสดงระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนและระยะห่างระหว่างใบปั่นกับฐานของถังกวนผสม

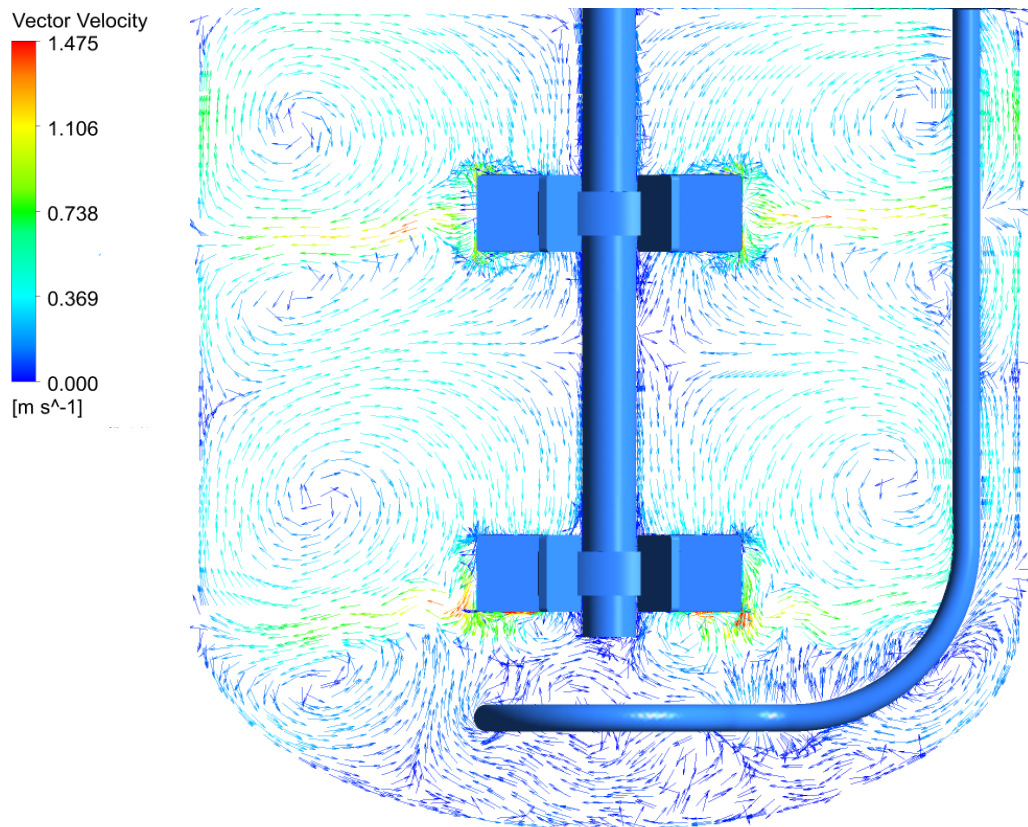
ผลการจำลองการไหลของระยะในรูปที่ 5.39 ถูกแสดงในรูปที่ 5.26 และ รูปที่ 5.27 โดยผลการจำลองการไหลของระยะในรูปที่ 5.39 แสดงดังต่อไปนี้

#### 5.2.5.1 อัตราส่วน $C1/T = 0.313$ , $C2/T = 0.437$ และ $C3/T = 0.25$

การปรับอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบกับส่วนสูงของถังกวนผสมและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนกับส่วนสูงของถังกวนผสมให้มีค่าเท่ากับ 0.313 และ 0.437 ตามลำดับ นั้นมีลักษณะการไหลแสดงในรูปที่ 5.40 และรูปที่ 5.41 ดังนี้



รูปที่ 5.40 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวตั้งที่ 1 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบกับส่วนสูงของถังกวนผสมและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนกับส่วนสูงของถังกวนผสมให้มีค่าเท่ากับ 0.313 และ 0.437 ตามลำดับ ( $C1/T = 0.313$ ,  $C2/T = 0.437$  และ  $C3/T = 0.25$ )

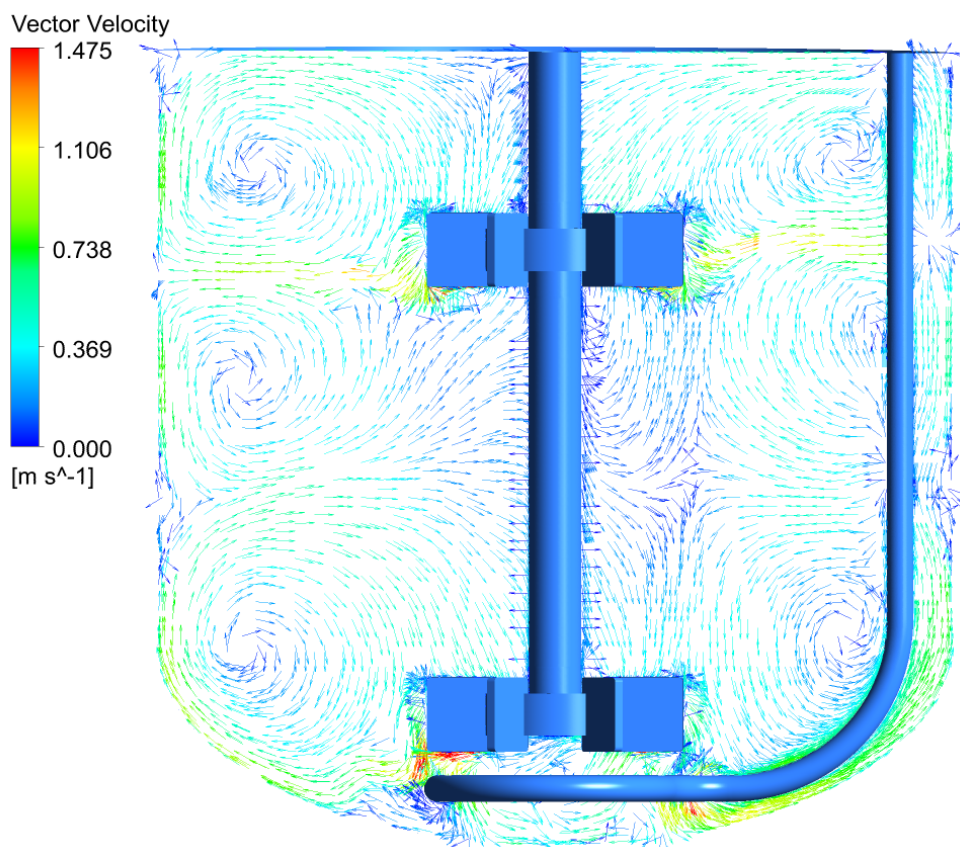


รูปที่ 5.41 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวดิ่งที่ 2 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบกับส่วนสูงของถังกวนผสมและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนกับส่วนสูงของถังกวนผสม ให้มีค่าเท่ากับ 0.313 และ 0.437 ตามลำดับ ( $C1/T = 0.313$ ,  $C2/T = 0.437$  และ  $C3/T = 0.25$ )

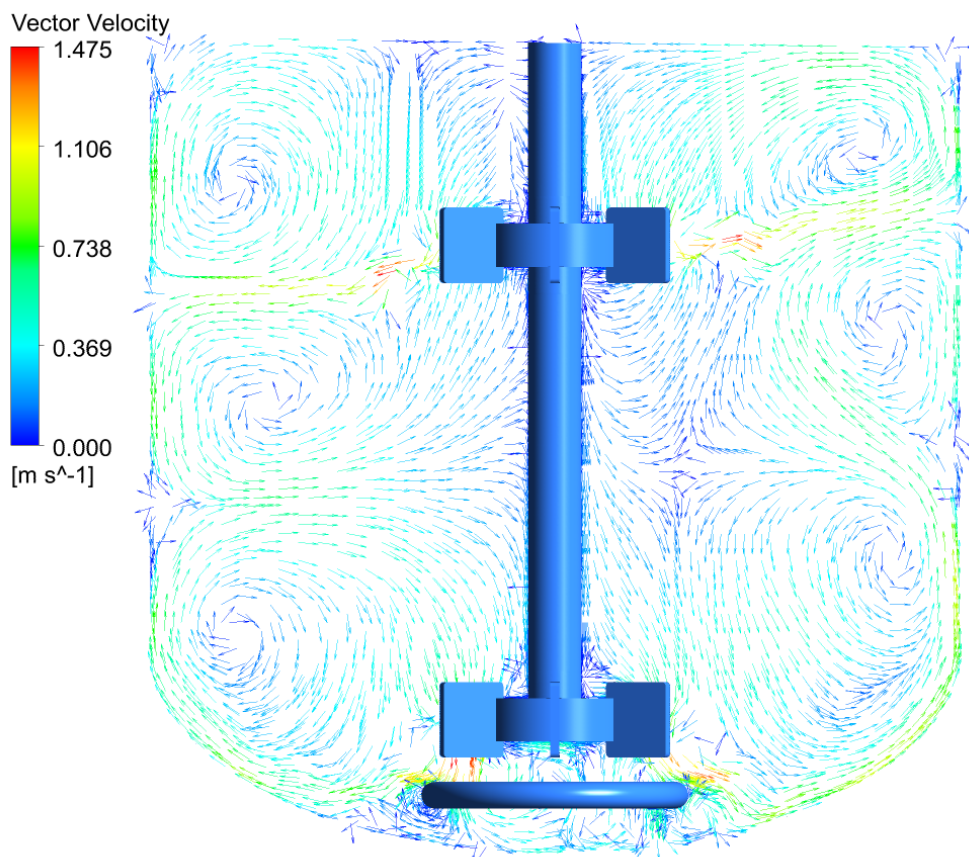
ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็น 4 รอบของการหมุนวนที่เกิดจากการทำงานที่ขนานกันของใบปั่นกวนทั้ง 2 ใบ โดยลักษณะการไหลในรูปแบบดังกล่าวเกิดขึ้นจากการปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองรวมถึงระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนให้อยู่ในช่วงดังนี้  $C1/T > 0.2$ ,  $C2/T > 0.85$  และ  $C3/T < 0.41$  (Rutherford et al., 1996) และโดยในรูปมีค่า  $C1/T$ ,  $C2/T$  และ  $C3/T$  เท่ากับ 0.313, 0.437 และ 0.25 ตามลำดับ โดยลักษณะการไหลดังกล่าวถูกเรียกว่าการไหลแบบ Parallel Flow นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่า Power Number ในกรณีนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.14 หรือมีค่าประมาณ 2 เท่าของการใช้ใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine

### 5.2.5.2 อัตราส่วน $C1/T = 0.165$ , $C2/T = 0.585$

ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากการปรับระยะห่างของใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนให้ลดลง แสดงในรูปที่ 5.42 ดังนี้



รูปที่ 5.42 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวดิ่งที่ 1 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนเท่ากับ 0.165 ( $C1/T = 0.165$ )

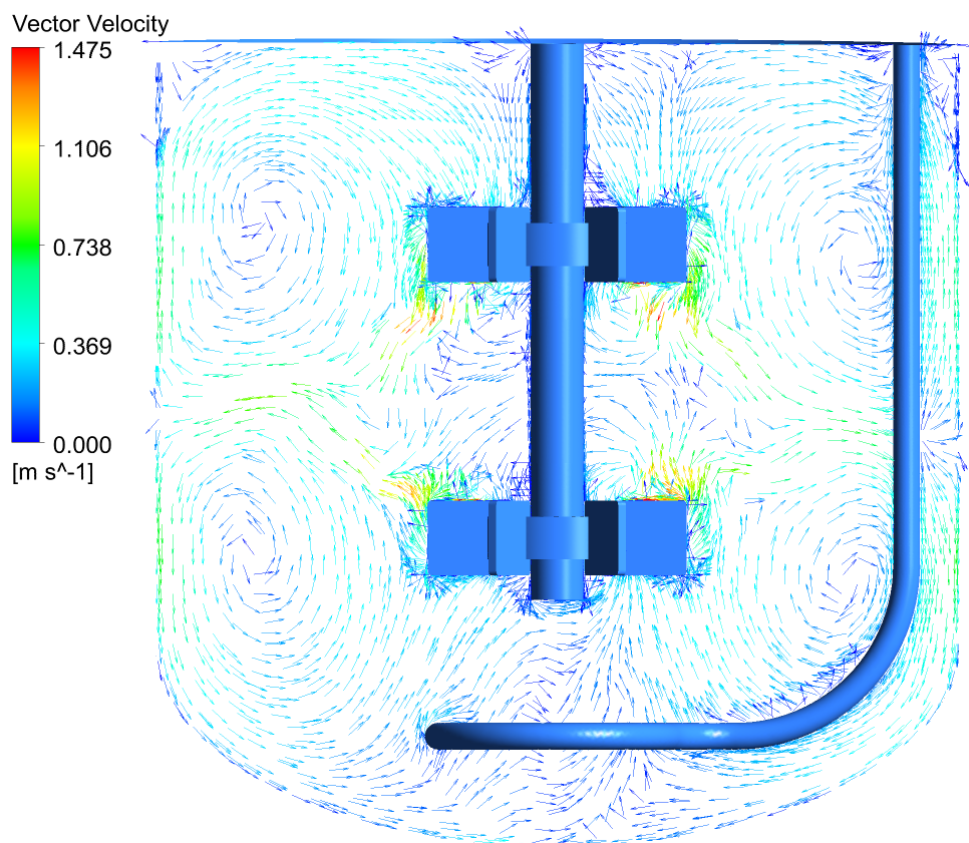


รูปที่ 5.43 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวตั้งที่ 2 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนเท่ากับ 0.165 ( $C1/T = 0.165$ )

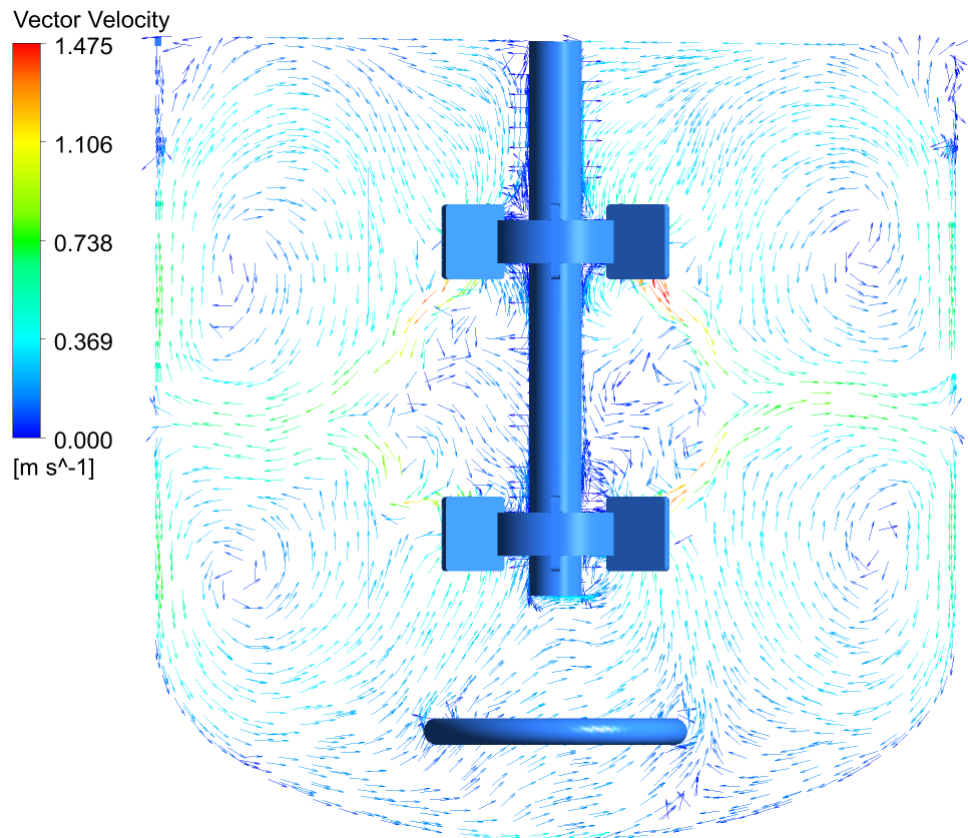
ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นสามารถสังเกตเห็นถึงการหมุนวนที่เกิดจากใบปั่นกววนใบล่างนั้นมีเพียง 1 รอบการหมุนวนซึ่งต่างจากการหมุนวนที่เกิดจากใบปั่นกววนใบบน ลักษณะการไหลดังกล่าวถูกเรียกว่า Diverging Flow หรือการไหลที่แยกออกซึ่งเกิดจากการปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนให้เหมาะสม ถึงแม้ว่าจากบทบทวนวรรณกรรมอัตราส่วนระหว่าง  $C1/T$  ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.15 ถึงจะส่งผลให้รูปแบบการไหลที่แยกออก แต่เนื่องด้วยชนิดของฐานของถังกวนผสมที่แตกต่างกันโดยในงานวิจัยของ (Rutherford et al., 1996) และ (Chunmei et al., 2008) ใช้ฐานเรียบ (Flat Bottom) แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ฐานที่เป็นลักษณะวงรี (Ellipsoidal) รวมถึงต้องเว้นที่ว่างสำหรับ Sparger ส่งผลให้ค่า  $C1/T$  ที่ต่ำที่สุดจึงเท่ากับ 0.165 นอกจากนี้จากบทบทวนวรรณกรรมค่า  $C1/T$  อยู่ระหว่าง 0.15 กับ 0.17 นั้นไม่สามารถสรุปรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นได้ (Rutherford et al., 1996) แต่จากผลการคำนวณการไหลที่แสดงในรูปที่ 5.42 และ รูปที่ 5.43 แสดงให้เห็นว่าการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนใบล่างจะกระทบกับฐานของถังปั่นกววนและสะท้อนทำให้ 1 รอบการหมุนวน

### 5.2.5.3 อัตราส่วน $C1/T = 0.387$ , $C2/T = 0.362$

ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากการปรับระยะห่างของใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนให้ลเพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 5.44 และ รูปที่ 5.45 ดังนี้



รูปที่ 5.44 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวดิ่งที่ 1 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับส่วนล่างสุดของถังปั่นกววนเท่ากับ 0.385 ( $C1/T = 0.385$ )



รูปที่ 5.45 แผนภาพเวกเตอร์แสดงการไหลในระนาบแนวตั้งที่ 2 อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างใบปั่นกวบใบล่าง กับส่วนล่างสุดของถังปั่นกวบเท่ากับ 0.385 ( $C1/T = 0.385$ )

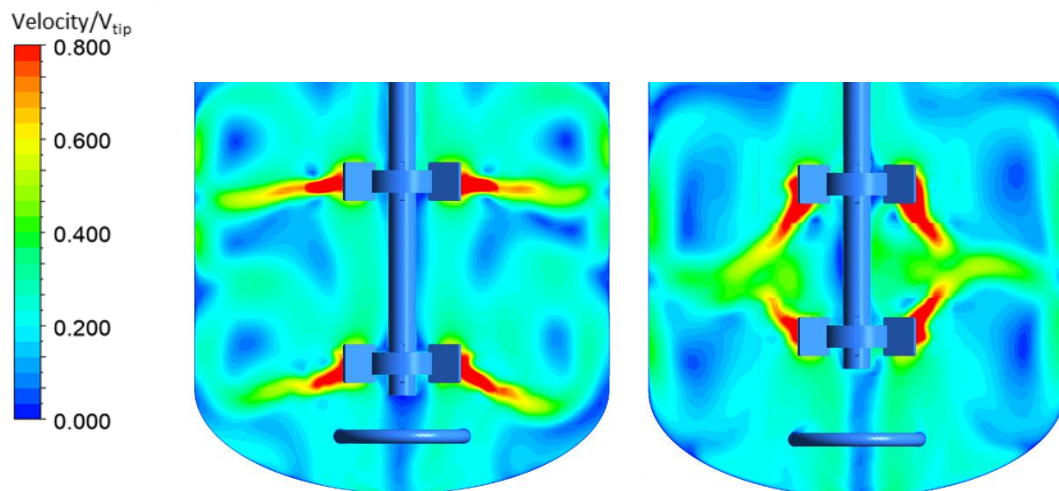
ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นใกล้เคียงกับการติดตั้งใบปั่นกวบชนิด Rushton Turbine เพียง 1 ใบ เมื่อพิจารณาลักษณะของการหมุนวนที่เกิดขึ้น ลักษณะการไหลดังกล่าวเกิดขึ้นจากการปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกวบให้ใกล้กันมากขึ้นหรือเป็นไปตามเงื่อนไข  $C1/T > 0.17$  และ  $C2/T < 0.385$  ซึ่งส่งผลให้การไหลระหว่างใบปั่นกวบนั้นไหลมารวมกันที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างใบปั่นกวบทั้ง 2 โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นถูกเรียกว่า Merging flow หรือการไหลที่รวมกัน (Rutherford et al., 1996)

ลักษณะการไหลที่ขึ้นภายในถังปั่นกวบที่ติดตั้งใบปั่นกวบชนิด Rushton Turbine 2 ใบนั้นสามารถทำให้เกิดการไหลที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือ การไหลแบบ Parallel, การไหลแบบ Merging และการไหลแบบ Diverging ซึ่งการเกิดลักษณะการไหลที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่า Power Number นั้นแตกต่างกัน โดยค่า Power Number แสดงในตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่า Power Number ของการไหลที่แตกต่างกันในกังวณผสมที่มีความสูงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง

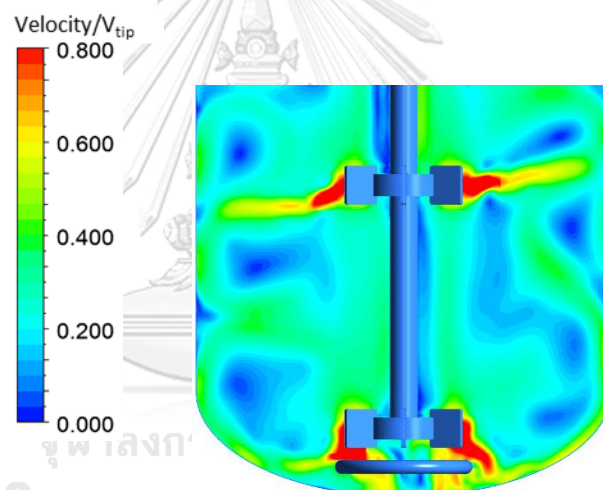
ระยะห่างระหว่างใบปั่นกววน	รูปแบบการไหล	ค่า Power Number
$C1/T = 0.313, C2/T = 0.437$	Parallel flow	10.17
$C1/T = 0.387, C2/T = 0.362$	Merging flow	7.88
$C1/T = 0.165, C2/T = 0.585$	Diverging flow	8.61

ค่า Power Number ของการไหลแบบ Parallel Flow มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลรูปแบบอื่นที่เกิดขึ้นในกังวณ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการเกิดการหมุนวน เมื่อพิจารณาจากกังวณผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานและติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นถึง 2 รอบการหมุนที่ตำแหน่งเหนือใบปั่นกววนและตำแหน่งใต้ใบปั่นกววน ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวเกิดขึ้นจากการกำหนดระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนและฐานของกังวณผสมที่เหมาะสม เพราะฉะนั้นเมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนทั้งสองใบและระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับฐานของกังวณผสมเพื่อให้ใบปั่นกววนทั้งสองใบนั้นมีการทำงานที่ขนานกันซึ่งจะส่งผลให้ค่า Power Number ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสองเท่าหรือเป็นผลรวมจากใบปั่นกววนทั้งสองใบ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการปรับระยะระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับฐานของกังวณผสมเพื่อให้เกิดการไหลแบบ Diverging และทำให้เกิดการหมุนวน 2 รอบ กล่าวคือเกิด 2 การหมุนจากใบปั่นกววนใบบนและเกิด 1 รอบใหญ่จากใบปั่นกววนใบล่างซึ่งเป็นผลจากการสะท้อนของการไหลที่เกิดจากใบปั่นกววนใบล่างกับฐานของกังวณผสม โดยค่า Power Number นั้นมีค่าน้อยกว่าการไหลแบบ Parallel แต่มีค่ามากกว่าการไหลแบบ Merging โดยลักษณะการไหลแบบ Merging นั้นเกิดเพียง 2 รอบการหมุนวนและส่งผลให้มีค่า Power Number ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรไหล 2 รูปแบบที่กล่าวไปตอนต้น เมื่อเปรียบเทียบค่า Power Number ที่ได้จากการไหลแบบ Merging กับกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine เพียง 1 ใบนั้นค่า Power Number ที่มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนใบปั่นกววนกล่าวคือ เป็นเพียงการเพิ่มพื้นที่ที่ใช้สัมผัสกับของไหลและส่งผลให้ค่า Power Number มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า Power Number นั้นไม่ได้บ่งบอกถึงการกระจายตัวของความเร็วในกังวณ โดยการกระจายตัวของความเร็วสามารถพิจารณาในแผนภาพคอนทัวร์ได้ดังรูปที่ 5.46 ดังนี้



รูปที่ 5.46ก

รูปที่ 5.46ข



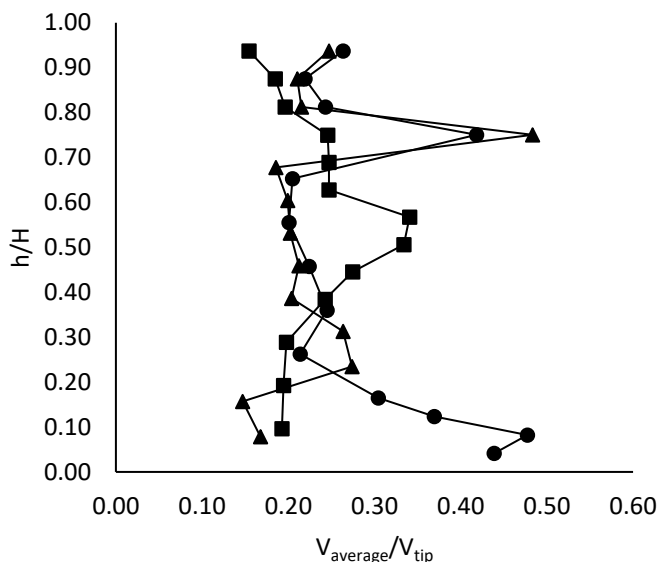
รูปที่ 5.46ค

รูปที่ 5.46ก, ข และ ค คือรูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่ระนาบตัดขวางตามแนวตั้งของการไหลแบบ Parallel, Merging และ Diverging ตามลำดับ

การพิจารณาแผนภาพของคอนทัวร์ทำให้เห็นถึงขนาดของความเร็วของการไหลแต่ละรูปแบบ ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปที่ 5.46ข พบว่ามีพื้นที่ที่เป็นสีน้ำเงินซึ่งแสดงถึงพื้นที่ที่มีความเร็วต่ำในถึงปั่นกวานั้นมีมากกว่าการไหลรูปแบบอื่น แต่อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของแถบสีของกรณีการไหลแบบ Parallel และ Diverging นั้นใกล้เคียงกันแต่แตกต่างที่บริเวณส่วนล่างของกังหัน ซึ่งการไหลในบริเวณส่วนล่างของกังหันนี้อาจส่งผลสำคัญต่อการกวนผสมสาร เนื่องจากการไหลหลักของใบปั่นกวาชนิด Rushton Turbine นั้นเป็นการไหลในแนว



รัศมีซึ่งส่งผลให้ความเร็วในแนวตั้งในบริเวณส่วนล่างของถังกวนผสมนั้นมีค่าต่ำ โดยการปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังกวนผสมอาจช่วยให้ความเร็วในบริเวณดังกล่าวนั้นเร็วขึ้นซึ่งส่งผลให้แถบสีของแผนภาพคอนทัวร์ของการไหลแบบ Diverging มีลักษณะในรูปที่ 5.46 นอกจากนี้สามารถพิจารณาความเร็วในถังกวนผสมได้ในรูปที่ 5.47 ดังนี้

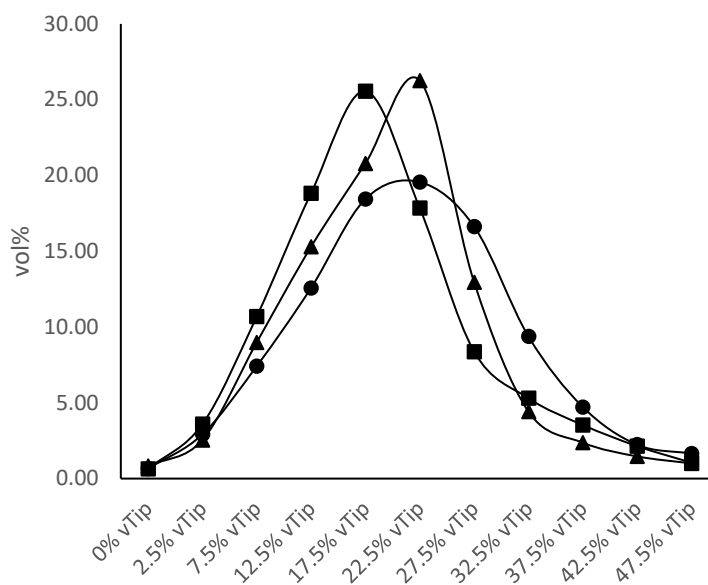


รูปที่ 5.47 กราฟระหว่างความสูงไร้หน่วยและความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton turbine 2 ใบที่ติดตั้งภายในถังหมักโดยมีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน (โดยที่ ▲ Parallel Flow, ■ Merging Flow, ●

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
Diverging Flow)

รูปที่ 5.47 เป็นการพิจารณาความเร็วไร้หน่วยเฉลี่ยที่ความสูงต่าง ๆ ในถังปั่นกวน ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์โดยการไหลแบบ Parallel และการไหลแบบ Diverging มีลักษณะที่คล้ายกันคือมีส่วนของกราฟที่มีความเร็วสูง 2 ส่วน คือที่บริเวณใบปั่นกวนทั้งสองใบ ซึ่งแตกต่างกับกราฟของการไหลแบบ Merging ที่มีส่วนที่ความเร็วสูงที่บริเวณที่การไหลจากใบปั่นกวนทั้ง 2 ใบรวมกันกล่าวคือเป็นระยะความสูงที่กึ่งกลางของถังกวนผสม นอกจากนี้กราฟสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบการไหล Diverging ถึงแม้ว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้ง 2 ใบนั้นอาจส่งผลให้บริเวณความสูงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของถังปั่นกวนมีค่าต่ำ แต่จากกราฟนั้นพบว่าบริเวณดังกล่าวมีขนาดของความเร็วเฉลี่ยไม่แตกต่างกับรูปแบบการไหล Parallel นอกจากนี้รูปแบบการไหล Diverging flow มีค่าความเร็วเฉลี่ยในบริเวณส่วนล่างของถังปั่นกวนมากกว่าในกรณีอื่น เพื่อเป็นการยืนยันว่าการกำหนดระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบรวมถึงระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวน

เพื่อให้เกิดการไหลแบบ Diverging นั้นให้การกระจายตัวของความเร็วได้ดีกว่ารูปแบบการไหล Parallel และ Diverging สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟระหว่างร้อยละสัดส่วนของของไหลกับความเร็วในรูปที่ 5.48 ดังนี้

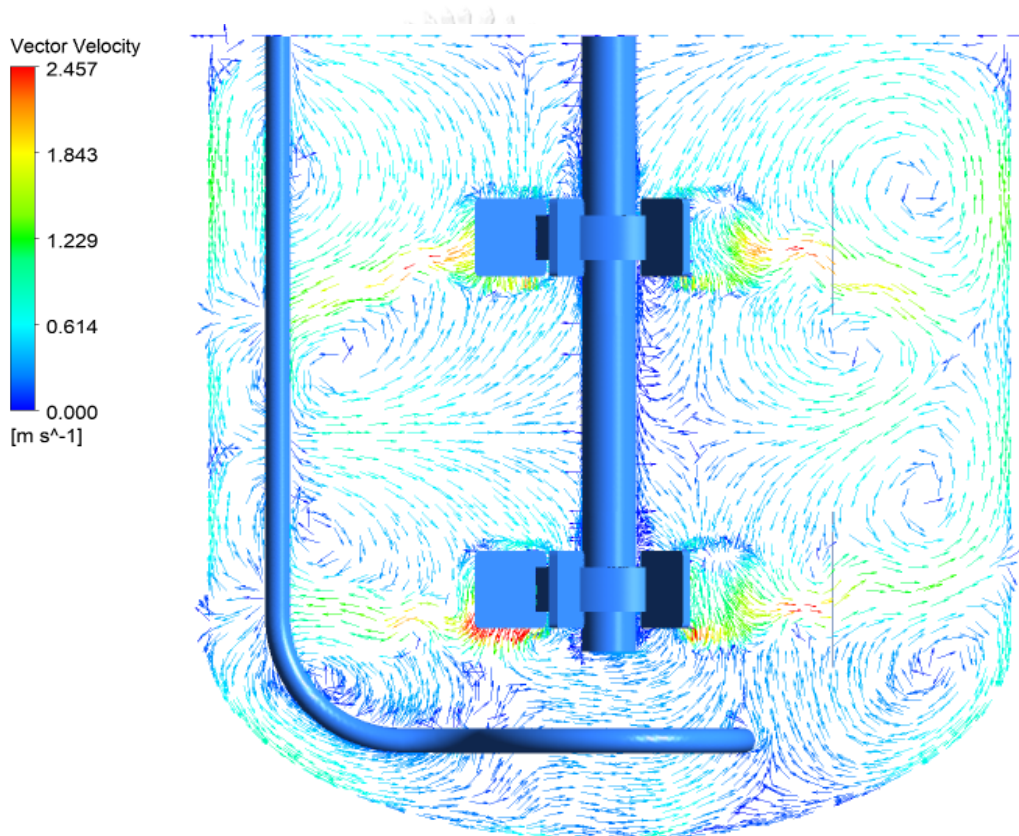


รูปที่ 5.48 กราฟการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลเกิดจากใบปั่นกววนชนิด Rushton turbine 2 ใบที่ติดตั้งภายในถังหมักโดยมีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน (โดยที่ ▲ Parallel Flow, ■ Merging Flow, ● Diverging Flow)

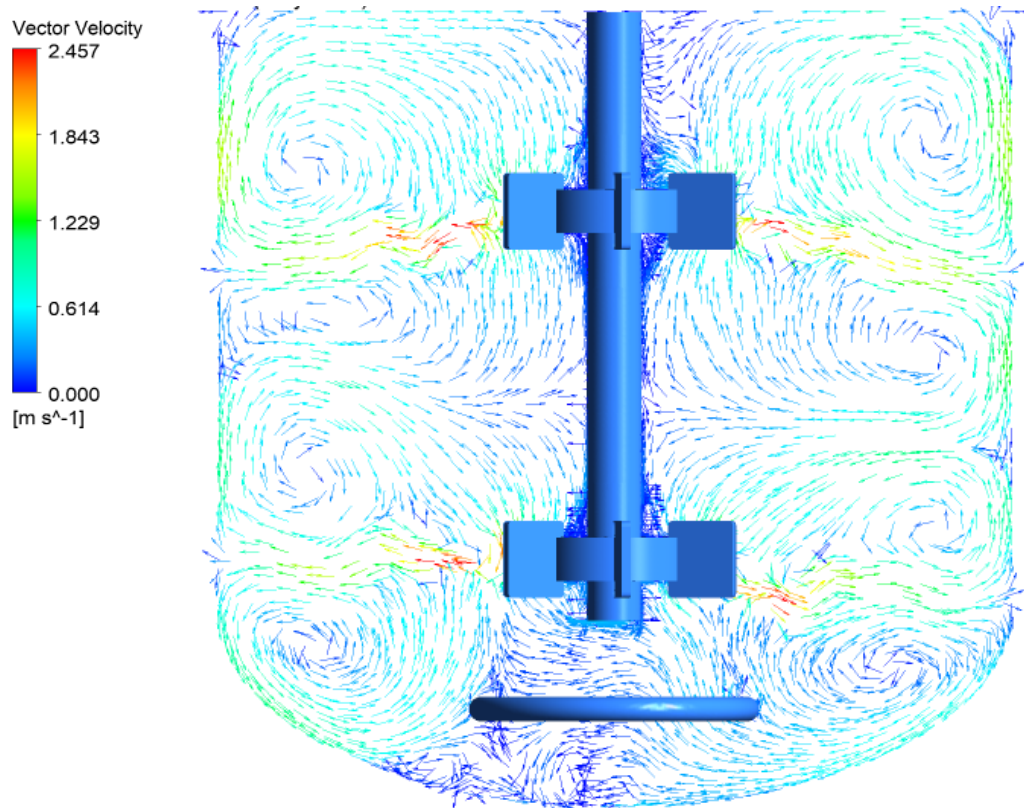
กราฟในรูปที่ 5.48 แสดงให้เห็นถึงปริมาณสัดส่วนของของไหลที่มีความเร็วแตกต่างกัน โดยความกว้างของกราฟนั้นบ่งบอกถึงการกระจายตัวของความเร็วภายในถังปั่นกววน ซึ่งการไหลแบบ Parallel นั้นมีลักษณะของกราฟที่แคบกว่ารูปแบบการไหลอื่น โดยปริมาณของไหลร้อยละ 26.6 มีความเร็วอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึง 25 ของความเร็วปลายของใบพัด ซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีของรูปการไหลแบบ Merging ที่ปริมาณของไหลร้อยละ 25.3 มีความเร็วอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 ของความเร็วปลายของใบพัด ถึงแม้ว่ารูปแบบการไหล 2 รูปแบบที่กล่าวไปข้างต้นมีการกระจายตัวของความเร็วที่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหล Diverging แต่การไหลแบบ Diverging นั้นมีสัดส่วนของความเร็วต่ำน้อยกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟที่ค่าความเร็วน้อยกว่าร้อยละ 12.5 ของความเร็วปลาย นอกจากนี้การไหลแบบ Diverging มีปริมาณของของไหลที่มีความเร็วสูงมากกว่าการไหลรูปแบบอื่น ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่จะเกิดส่วนที่สารผสมกันไม่ดีหรือ Dead Zone เพราะฉะนั้นจากกราฟวิเคราะห์แผนภาพ Contour, กราฟระหว่างความเร็วกับความสูง และกราฟการกระจายตัวของความเร็ว ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันคือ การกำหนดระยะห่างเพื่อให้เกิดการไหลแบบ Diverging ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของความเร็วได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลแบบ Parallel และ Diverging สำหรับถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ

### 5.2.6 การขยายขนาดถังปั่นกวน

การขยายขนาดโดยกำหนดให้พลังงานที่ใช้ในการกวนผสมต่อปริมาตรของของไหลเป็นค่าคงที่เพื่อหาความเร็วรอบที่ใช้ในการปั่นกวนผสมในถังกวนผสมขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเป้าหมายของการขยายขนาดคือเพื่อให้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังกวนผสมที่ขนาดต่างกันั้นเหมือนกันก็ต่อเมื่อลักษณะการไหลเหมือนกัน โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขยายขนาดถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 182 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 600 รอบต่อนาที โดยใช้หลักการขยายขนาดดังกล่าวเพื่อหาความเร็วรอบของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร และมีความเร็วรอบเท่ากับ 220 รอบต่อนาที โดยมีลักษณะการไหลแสดงในรูปที่ 5.49 และ รูปที่ 5.50 ดังนี้

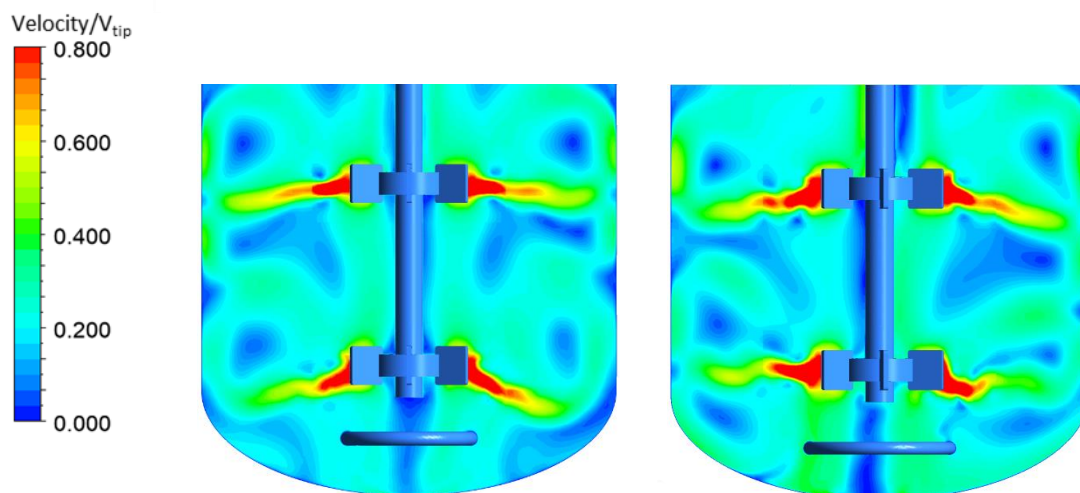


รูปที่ 5.49 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบตามแนวตั้งที่ 1 ของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.50 รูปแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบตามแนวตั้งที่ 2 ของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800

ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นใกล้เคียงกับถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตร การไหลที่ไหลออกจากใบปั่นกวนในแนวรัศมีซึ่งเป็นการไหลหลักที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton turbine นอกจากนี้ระยะระหว่างใบปั่นกวนนั้นใช้อัตราส่วนระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนและระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังหมักเท่ากับ 0.313 และ 0.437 ( $C1/T = 0.313$ ,  $C2/T = 0.437$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนเดียวกับที่ใช้ในถังหมักขนาดห้องทดลอง ซึ่งเมื่อสังเกตจากจำนวนของการหมุนวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในถังกวนผสมเท่า 4 รอบการหมุน แสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลที่เป็นแบบ Parallel นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์การเปรียบเทียบขนาดของความเร็วต่อความเร็วปลายของใบปั่นกวนในแผนภาพคอนทัวร์ซึ่งแสดงในรูปที่ ดังนี้

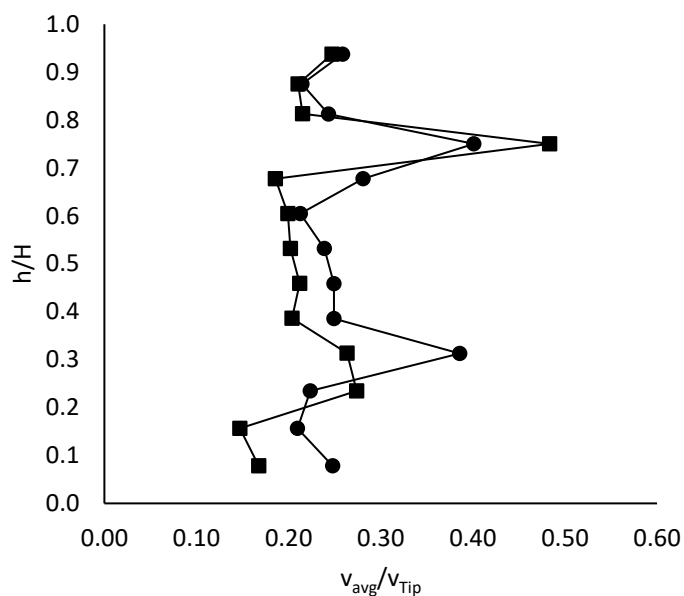


รูปที่ 5.51ก

รูปที่ 5.51ข

รูปที่ 5.51ก และ ข รูปแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยในระนาบตามแนวตั้งของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 182 และ 800 มิลลิเมตร ตามลำดับ

แผนภาพคอนทัวร์ที่แสดงในรูปที่เป็นการพิจารณาความเร็วไร้หน่วยเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการไหลที่ใกล้เคียงกันในถังกวนทั้ง 2 ขนาด รวมถึงการกระจายตัวของขนาดของความเร็วที่ใกล้เคียงกัน และสามารถพิจารณาจากกราฟระหว่างความเร็วไร้หน่วยและความสูงไร้หน่วยในรูปที่ 5.52 ดังนี้



รูปที่ 5.52 กราฟระหว่างความเร็วไร้หน่วยและความสูงไร้หน่วยของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตร (■) และ 800 มิลลิเมตร (●)

ความเร็วเฉลี่ยในระนาบของใบปั่นกวนทั้งสองของถังหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มิลลิเมตร นั้นมีความเร็วใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากถังหมักที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของผลการคำนวณนั้นคือการจัดเรียงของ Baffle หรือแผ่นกั้น โดยการจัดเรียง Baffle ของถังหมักขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แสดงในรูปที่ 5.53 ดังนี้



รูปที่ 5.53ก



รูปที่ 5.53ข

รูปที่ 5.53ก และ ข รูปแสดงการจัดเรียง Baffle ของถังหมักที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตรและ 800 มิลลิเมตร

ลักษณะของการจัดเรียง Baffle ของถังหมักที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ สำหรับการทดลอง การติดตั้ง Baffle นั้นเพื่อลดความเร็วในแนวรัศมี เพราะฉะนั้นเมื่อติดตั้ง Baffle ให้มีระยะห่างมากขึ้นย่อมส่งผลให้ความเร็วในแนวสัมผัสมากขึ้นโดยแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยในระนาบตัดขวางที่ 2 และ 4 ในตารางที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.4 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะการหมุนวนที่เกิดขึ้นของไหลที่ไหลออกตามแนวรัศมีนั้นจะกระทบกับผนังของถังจนผสมก่อนที่จะแยกการไหลออกเป็น 2 ส่วน และไหลกลับมารวมกันที่ใบปั่นกวน เพราะฉะนั้นเมื่อความเร็วในแนวรัศมีมีค่าต่ำย่อมส่งผลให้ความเร็วในแนวตั้งมีค่าต่ำเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของกราฟในรูปที่ ความเร็วเฉลี่ยในบริเวณที่ต่ำกว่าใบปั่นกวนใบล่าง ( $h/H < 0.3$ ) ของถังปั่นกวนขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าถังปั่นกวนขนาดใหญ่



ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยความเร็วไร้หน่วยในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัสที่ระนาบตัดขวางที่ 2

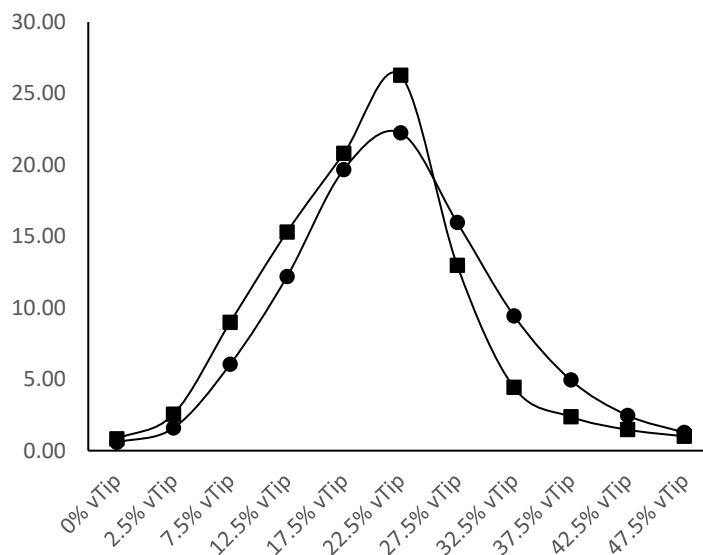
ตัวแปร	เส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก (มิลลิเมตร)	
	182	800
ความเร็วเฉลี่ยในแนวรัศมี	0.111	0.181
ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส	0.124	0.226

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัสต่อความเร็วปลายของใบพัดที่ระนาบตัดขวางที่ 4

ตัวแปร	เส้นผ่านศูนย์กลางของถังหมัก (มิลลิเมตร)	
	182	800
ความเร็วเฉลี่ยในแนวรัศมี	0.368	0.238
ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส	0.227	0.176

การจัดเรียง Baffle ที่แตกต่างกันส่งผลให้การกระจายตัวของเหลวในถังหมักต่างกัน โดยสามารถพิจารณาในกราฟของการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลในรูปที่ 5.54 ดังนี้





รูปที่ 5.54 กราฟของการกระจายตัวของความเร็วไว้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลของถังหมักที่  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 182 มิลลิเมตร (■) และ 800 มิลลิเมตร (●)

ลักษณะของการกระจายตัวของของเหลวระหว่างถังหมัก 2 ขนาดนั้นใกล้เคียงกัน แต่ถังหมักขนาดใหญ่มี  
ปริมาตรของของไหลที่มีความเร็วสูงกว่าเนื่องจากการจัดเรียงตัวของ Baffle

การจัดเรียง Baffle ในหมักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มิลลิเมตรเป็นการจัดเรียง Baffle ตาม  
ถึงกวนผสมขนาดมาตรฐานที่มุมระหว่างแต่ละระนาบของ Baffle เท่ากับ 90 องศา ซึ่งการจัดเรียง Baffle ดังกล่าว  
ในถึงกวนผสมนั้นส่งผลให้ค่า Power Number มีค่ามากที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเกิดขึ้น  
มากกว่าในกรณีที่มีการติดตั้งมุมระหว่างระนาบ Baffle แบบอื่น โดยลักษณะของการจัดเรียงมุมระหว่าง Baffle เป็น  
มุมแหลมสลับมุมป้านนั้นเสมือนเป็นการปรับลดจำนวนของ Baffle โดยนับ Baffle ที่ทำมุมแหลมต่อกับเป็น 1 แผ่น  
REF เพราะฉะนั้นค่า Power Number ในกรณีของถังหมักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 800 มิลลิเมตรจึงมีค่า  
มากกว่า โดยแสดงใน

ตารางที่ 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงค่า Power Number ของถังกวนผสมที่ขนาดแตกต่างกัน

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังปั่นกวน	ค่า Power Number
182 มิลลิเมตร	10.14
800 มิลลิเมตร	11.07

## บทที่ 6

### สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการดำเนินการ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การสอบผลการคำนวณกับผลการทดลอง และการใช้พลศาสตร์การไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการคำนวณ Power Number ของถังกวนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยมีข้อสรุปดังนี้

##### 6.1.1 การสอบเทียบผลการทดลอง

การสอบเทียบผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น การสอบเทียบความเร็วที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine กับผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) และการพิจารณาลักษณะการไหลกับค่า Power Number โดยมีข้อสรุปผลการดำเนินการดังนี้

1. การสอบเทียบผลการทดลองความเร็วที่คำนวณได้กับผลการทดลองของ Wu and Patterson (1989) ของใบปั่นกวน Rushton Turbine พบว่าผลการคำนวณนั้นให้แนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง ถึงแม้ว่าความเร็วในแนวตั้งจะมีความคลาดเคลื่อน แต่ความเร็วในแนวรัศมีและแนวสัมผัสซึ่งเป็นความเร็วหลักที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine นั้นให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ค่า Power Number จากการคำนวณได้นั้นให้ความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 และสามารถวิเคราะห์ได้จากลักษณะการไหลในแนวรัศมีที่ทำให้เกิด 2 รอบการหมุนวน (Recirculation) เมื่อพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์ในแนวตั้ง จากการสอบเทียบความเร็วที่เกิดจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine นั้นสามารถสรุป ความเร็ว, ลักษณะการไหลเฉพาะ และค่า Power Number นั้นสอดคล้องกันซึ่งในกรณีที่ต้องการสอบเทียบแต่ไม่มีข้อมูลความเร็วที่วัดได้นั้นสามารถพิจารณาจากลักษณะการไหลและค่า Power Number ได้
2. การสอบเทียบค่า Power Number ของถังกวนผสมที่ขนาดเป็นไปตามมาตรฐานซึ่งติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine, Pitched Blade Turbine และ Retreat Curve พบว่าสำหรับใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine นั้นผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ของผลการทดลอง นอกจากนี้ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการไหลเฉพาะที่เกิดขึ้น โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine นั้นเป็นการไหลในแนวตั้งเป็นหลักทำให้เกิด 1 รอบการหมุนเมื่อพิจารณาแผนภาพเวกเตอร์ แต่การคำนวณค่า Power Number ของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10 เนื่องจากลักษณะรูปทรงของใบปั่น

กวนชนิดนี้มีความซับซ้อนและทำให้เกิดการไหลที่ซับซ้อน โดยการบิดตัวของใบพัดนั้นทำให้เกิดการไหลที่แตกต่างกันรวมถึงให้ค่า Power Number ที่แตกต่างกัน โดยในกรณีที่ใบพัดไม่มีการบิดตัวนั้นการไหลที่เกิดขึ้นจะเป็นการไหลในแนวรัศมีและให้ค่า Power Number ที่สูงกว่าในกรณีที่มีการบิดตัวเนื่องจากการบิดตัวของใบพัดนั้นจะเป็นการลดแรงต้านของของไหลและเปลี่ยนทิศทางของของไหลให้ไหลในทิศทางในแนวตั้งมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่ค่า Power Number ของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine มีค่ามากกว่าใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine

### 6.1.2 การใช้พลศาสตร์การไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการคำนวณ Power Number ของถังกวนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

การใช้พลศาสตร์การไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการคำนวณ Power Number ของถังกวนผสมที่ขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน โดยลักษณะของถังกวนผสมที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานนั้นเป็น ถังปั่นกวนที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวนที่ประกอบด้วยใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine 2 ใบ ที่ด้านบนของถังปั่นกวนและใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ที่ด้านล่างของถังปั่นกวน และ ถังหมักติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ และมีการติดตั้งเครื่องมือวัด เช่น เครื่องวัดค่า pH, เครื่องวัดการละลายของออกซิเจน และท่อเก็บตัวอย่าง เป็นต้น โดยมีข้อสรุปผลการดำเนินการดังนี้

1. ผลการคำนวณการไหลและค่า Power Number ของถังปั่นกวนที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวนที่ประกอบด้วยใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine 2 ใบ ที่ด้านบนของถังปั่นกวนและใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve ที่ด้านล่างของถังปั่นกวน โดยลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นทำให้เห็นถึงการไหลที่เสริมกันของใบปั่นกวนทั้ง 3 ชนิด โดยเมื่อพิจารณาให้ของไหลเริ่มไหลจากใบปั่นกวนใบบนสุดพบว่าของไหลจะถูกเสริมจากใบปั่นกวนใบกลางก่อนที่จะถูกใบปั่นกวนใบล่างสุดทำให้กระจายออกตามแนวรัศมีและย้อนกลับไปไปที่ใบปั่นกวนใบบนสุด ซึ่งจากแผนภาพเวกเตอร์แสดงให้เห็นถึง 1 รอบการหมุนวน โดยเป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวตั้งโดยค่าคงที่  $K_L$  และ  $K_T$  แสดงในตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ตารางแสดงค่าคงที่  $K_L$  และ  $K_T$  ของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน

ค่าคงที่	ค่า Power Number
$K_L$	251

$K_T$ 

7.21

ลักษณะของการเรียงตัวของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine ทั้ง 2 ใบนั้นพบว่าเมื่อเรียงตัวให้ทำมุมระหว่างกัน 45 กล่าวคือเมื่อของไหลถูกพัดออกจากใบปั่นกววนใบบนสุดนั้นจะไม่ถูกใบปั่นกววนใบกลางขวางเนื่องจากการทำมุมให้เกิดที่ว่างซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของของเหลวดีกว่าเมื่อพิจารณากราฟการกระจายตัวของความเร็วกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหล

2. ผลการคำนวณการไหลและค่า Power Number ในถังหมักที่มีเครื่องมือวัดและติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นถึงการทำงานที่แยกกันของใบปั่นกววนทั้ง 2 ใบ โดยสังเกตได้จาก 4 รอบการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในถังกวนผสมซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณของใบปั่นกววนชนิดนี้ 1 ใบที่ให้ 2 รอบการหมุนวน นอกจากนี้ค่า Power Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าเท่ากับ 10.52 และมีค่าคงที่  $K_L$  และ  $K_T$  แสดงในตารางที่ 6.2 ดังนี้
- ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงค่าคงที่  $K_L$  และ  $K_T$  ของถังหมักที่มีเครื่องมือวัดและติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Rushton Turbine 2 ใบ

ค่าคงที่	ค่า Power Number
$K_L$	192
$K_T$	10.52

ถังหมักที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดและไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นส่งผลให้ค่า Power Number ที่ได้ต่างกันโดยในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นมีค่า Power Number สูงกว่าเนื่องจากของไหลนั้นไหลไปกระทบกับเครื่องมือวัดส่งผลให้ความเร็วลดลงและเปลี่ยนทิศทางซึ่งทำให้แรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น โดยในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นมีค่า Power Number เท่ากับ 10.14 แต่อย่างไรก็ตามค่า Power Number ในย่านการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าประมาณ 2 เท่าของการใช้ใบปั่นกววนชนิดนี้ 1 ใบ โดยรูปแบบการไหลที่เกิด 4 รอบการหมุนวนหรือ 2 รอบการหมุนวนต่อ 1 ใบปั่นกววนนั้นถูกเรียกว่า Parallel Flow นอกจากนี้การปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับฐานของถังปั่นกววนให้ต่ำลงส่งผลให้ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนไปโดยเกิดเพียง 3 รอบการหมุนซึ่งแบ่ง

ออกเป็น 1 รอบการหมุนวนที่เกิดขึ้นใบปั่นกววนใบล่างและ 2 รอบการหมุนวนที่ใบปั่นกววนใบบนโดยรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า Diverging Flow ซึ่งค่า Power Number เท่ากับ 8.61 ซึ่งมีค่าลดลงและเมื่อปรับปรับระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนใบล่างกับฐานของถังใบปั่นให้สูงขึ้นทำให้การไหลในแนวรัศมีที่ออกจากใบปั่นกววนทั้ง 2 ใบมารวมกันที่ตรงกลางของถังกววนผสมทำให้เกิด 1 รอบการหมุนวน รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า Merging Flow และให้ค่า Power Number ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.88 แต่อย่างไรก็ตามค่า Power Number นั้นไม่ได้บ่งบอกถึงความสามารถในการผสมกันที่เกิดจากการปรับระยะห่าง โดยการกระจายตัวของความเร็วกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลในถังปั่นกววนทำให้ว่ารูปแบบการไหลแบบ Diverging Flow นั้นให้มีสัดส่วนของของไหลที่มีความเร็วสูงมากกว่ารูปแบบการไหล Parallel Flow และ Diverging Flow การขยายขนาดนั้นเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบถังกววนผสม โดยเป้าหมายในการขยายขนาดนั้นเป็นการทำให้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปั่นกววนที่มีขนาดแตกต่างกันนั้นเหมือนกันกล่าวคือ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเหมือนกันโดยผลการคำนวณที่ได้นั้นแสดงให้เห็นถึงข้อสรุปดังกล่าว โดยการไหลที่เกิดขึ้นในถังปั่นกววนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 800 มิลลิเมตรให้ลักษณะการไหลในแนวรัศมีเป็นหลักและเกิด 4 รอบการหมุนวนและมีค่า Power Number เท่ากับ 11.07 ซึ่งสอดคล้องผลการคำนวณการไหลของถังปั่นกววนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 182 มิลลิเมตรที่ใช้ในห้องทดลอง โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการเรียงตัวของ Baffle ที่แตกต่างกัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณค่า Power Number ของใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve นั้นอาจต้องพิจารณาผลของจำนวนปริมาตรควบคุมในบริเวณใบปั่นกวน เนื่องจากใบปั่นกวนชนิดนี้มีลักษณะที่แตกต่างจากใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine ที่มีรูปร่างของใบพัดที่ไม่ซับซ้อน แต่ใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve มีความโค้งและมีการบิดตัวของใบพัด เพราะฉะนั้นอาจจะต้องทำการศึกษาผลของจำนวนปริมาตรควบคุมต่อการคำนวณ Power Number เช่นเดียวกับในกรณีของใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine เพื่อเป็นการยืนยันว่าจำนวนปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นมานั้นมากพอที่จะไม่ส่งผลต่อการคำนวณ นอกจากนี้อาจต้องพิจารณาการบิดตัวของใบพัดเพิ่ม เพื่อหารูปร่างและรูปทรงรวมถึงขนาดที่ชัดเจนที่ทำให้ผลการคำนวณค่า Power Number ของใบปั่นกวนชนิดนี้สอดคล้องกับผลการทดลอง

การเปรียบเทียบความเร็วนั้นอาจต้องพิจารณาความเร็วในหลายด้านนอกเหนือจากการวิเคราะห์ขนาดของความเร็วเพียงอย่างเดียวในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวนที่ทำให้เกิดลักษณะการไหลหลักแตกต่างกัน

การวิเคราะห์การไหลเพื่อนำไปออกแบบถังปั่นกวนนั้นอาจต้องพิจารณาถึงระบบจริงที่ต้องการนำไปใช้ เช่น กรณีของการผสมระหว่างของเหลว, แก๊ส และ/หรือ ของแข็ง นั้นต้องจำลองการไหลทุกภูมิภาคเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของภูมิภาคที่ต้องการศึกษา

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการสร้างปริมาตรควบคุม**

**ก.1 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine**

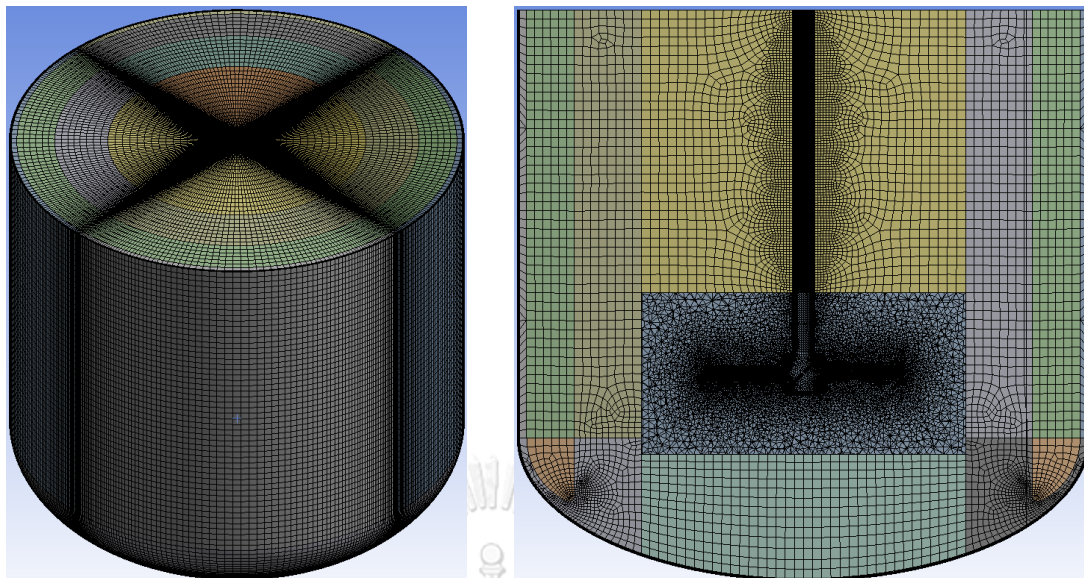
ปริมาตรควบคุมของแบบจำลองกังววนผสมที่ติดตั้งใบปั่นกววนชนิด Pitched Blade Turbine ถูกแบ่งออกเป็นสองคือ ส่วนที่ใหญ่หนึ่งและส่วนที่เกิดการหมุน ซึ่งจะกำหนดขนาดของปริมาตรควบคุมของแบบจำลองนี้ให้ใกล้เคียงกับขนาดของปริมาตรควบคุมของแบบจำลอง Rushton Turbine โดยแสดงค่าในตารางที่ ก.1 ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงขนาดของปริมาตรควบคุมของแบบจำลอง Pitched Blade Turbine

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	0.2 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffles	1.1 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกววน	0.3 มิลลิเมตร
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	8 มิลลิเมตร
จำนวนของปริมาตรควบคุม	3.3 ล้าน

ส่วนที่ใหญ่หนึ่งนั้นสามารถสร้างปริมาตรควบคุมโดยใช้วิธี Structure Mesh เพื่อให้ปริมาตรควบคุมเป็นทรงสี่เหลี่ยม แต่เช่นเดียวกับการสร้างปริมาตรควบคุมของใบปั่นกววนชนิด Rushton turbine ในส่วนที่เกิดการหมุนมีรูปทรงที่ซับซ้อนของใบปั่นกววนจึงสร้างปริมาตรควบคุมด้วยวิธี Unstructured mesh ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นปริมาตรควบคุมที่เป็นทรง 4 หน้าร่วมกับเป็นปริซึมในบริเวณของใบปั่นกววน โดยมีผลการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงในรูปที่ ก.1 และ รูปที่ ก.2

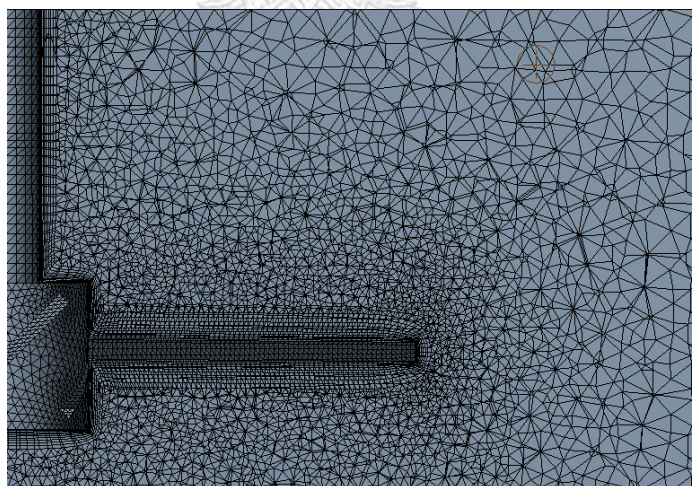




รูปที่ ก.1ก

รูปที่ ก.1ข

รูปที่ ก.1ก และ ข รูปแสดงผลการสร้างปริมาตรควบคุมของกังหันผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวานชนิด Pitched Blade Turbine โดยมีจำนวนของปริมาตรควบคุมทั้งหมดเท่ากับ 3.3 ล้าน



รูปที่ ก.2 รูปแสดงปริมาตรควบคุมในส่วนที่เกิดการหมุนของใบปั่นกวานชนิด Pitched Blade Turbine

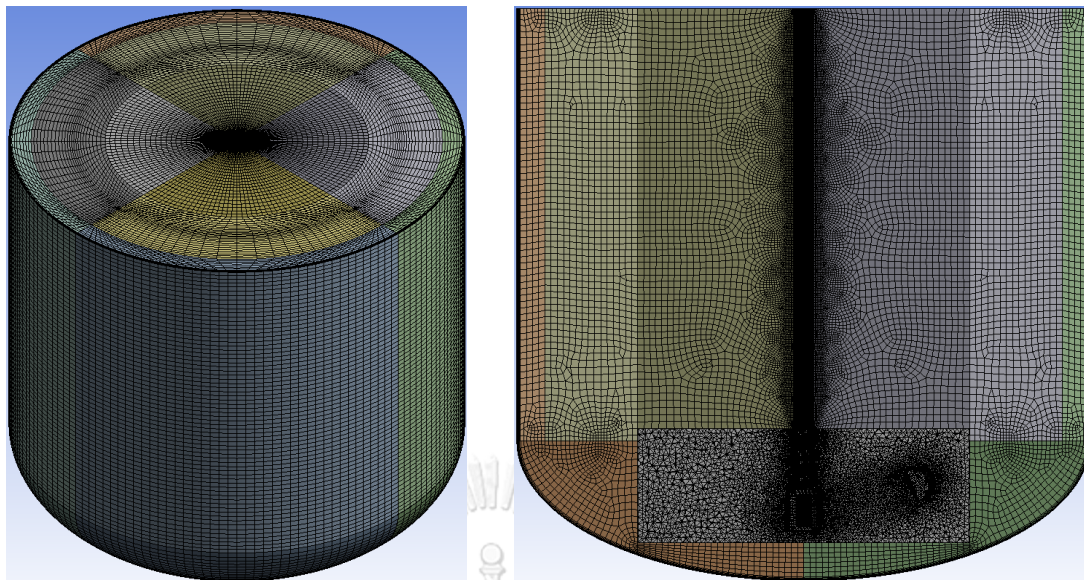
## ก.2 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของใบปั่นกวานชนิด Retreat Curve

ปริมาตรควบคุมของแบบจำลองกังวณผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวานชนิด Retreat Curve นั้นเหมือนกันในกรณีของแบบจำลองที่ติดตั้งใบปั่นกวานชนิด Rushton Turbine และ Pitched Blade Turbine โดยมีขนาดของปริมาตรควบคุมแสดงในตารางที่ ก.1 ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงขนาดของปริมาตรควบคุมของใบปั่นกวานชนิด Retreat Curve

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	0.1 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffles	1.8 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกวาน	0.4 มิลลิเมตร
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	5 มิลลิเมตร
จำนวนของปริมาตรควบคุม	3.07 ล้าน

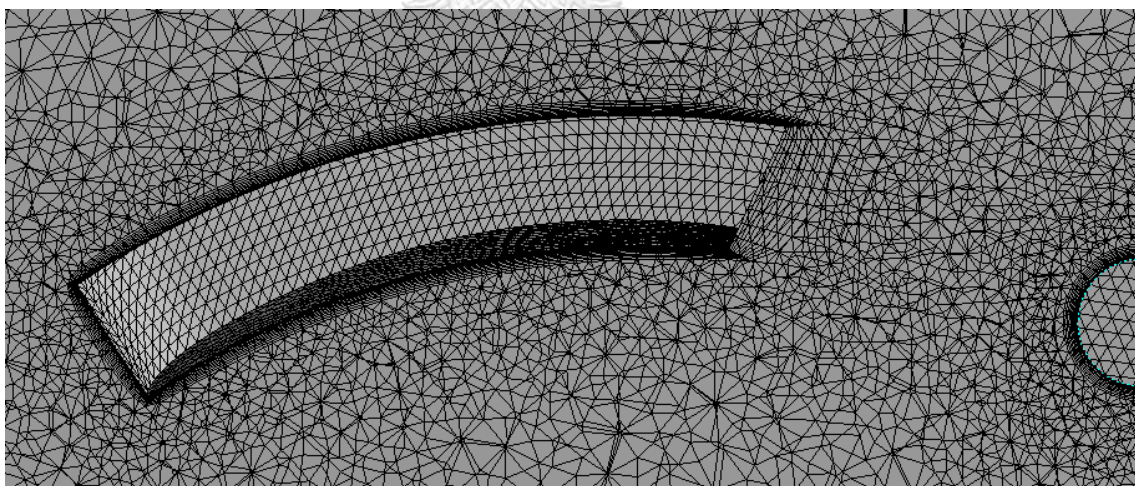
ปริมาตรควบคุมถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่อยู่นิ่ง และส่วนที่เกิดการหมุนเพื่อใช้แบบจำลองการหมุนแบบ Sliding Mesh โดยมีผลการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงในรูปที่ รูปที่ ก.1 และ รูปที่ ก.2 ดังนี้



รูปที่ ก.1ก

รูปที่ ก.1ข

รูปที่ ก.1ก และ ข รูปแสดงผลการสร้างปริมาตรควบคุมของกังหันผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Pitched Blade Turbine โดยมีจำนวนของปริมาตรควบคุมทั้งหมดเท่ากับ 3.07 ล้าน



รูปที่ ก.2 รูปขยายผลการสร้างปริมาตรควบคุมในบริเวณใบพัดของส่วนที่เกิดการหมุนของแบบจำลองกังหันผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve

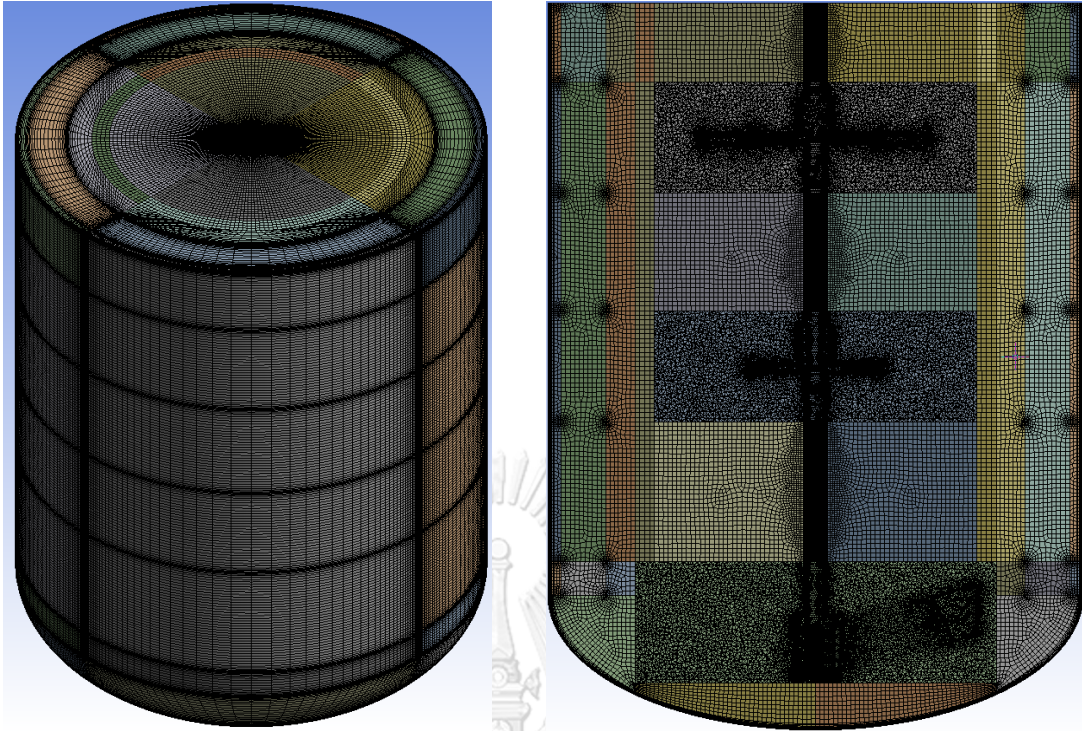
### ก.3 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของระบบใบปั่นกวน

ปริมาตรควบคุมของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวนนั้น มีจำนวนใบปั่นกวนทั้งหมด 3 ใบปั่น ซึ่งการจำลองการหมุนโดยใช้วิธี Sliding Mesh นั้นต้องแยกส่วนของปริมาตรทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วนสำหรับแต่ละใบปั่นกวน โดยมีขนาดของปริมาตรควบคุมแสดงในตารางที่ ก.1 ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงขนาดของปริมาตรควบคุมของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	0.2 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffles	1.6 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกวน	0.6 มิลลิเมตร
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	6.8 มิลลิเมตร
จำนวนของปริมาตรควบคุม	8.2 ล้าน

ส่วนที่หยุดนี้สามารถสร้างปริมาตรควบคุมโดยใช้วิธี Structured Mesh เพื่อสร้างปริมาตรควบคุมให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยม แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของรูปทรงของใบปั่นกวนในส่วนที่เกิดการหมุนจึงสร้างปริมาตรควบคุมด้วยวิธี Unstructured Mesh โดยมีผลการสร้างแบบจำลองใน Error! Reference source not found. ดังนี้



รูปที่ ก.1ก

รูปที่ ก.1ข

รูปที่ ก.1ก และ ข ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังปั่นกวนที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน

ผลการสร้างปริมาตรควบคุมในรูปที่ ก.1 ในบริเวณส่วนล่างที่ถัดจากใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve นั้นมีความละเอียดของปริมาตรควบคุมมากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการไหลซับซ้อนของการสะท้อนการไหลระหว่างใบปั่นกวน Retreat Curve และฐานของถังปั่นกวน

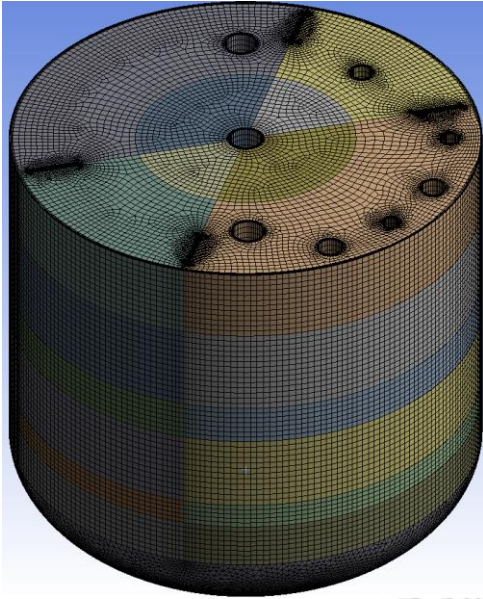
### ก.3 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังหมัก

ถังหมักเป็นถังกวนผสมที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine 2 ใบที่ตำแหน่งบนและล่างของถังกวนผสม เพราะฉะนั้นปริมาตรทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1 ส่วนสำหรับส่วนที่อยู่ข้างในจะประกอบด้วยเครื่องมือวัด และ 2 ส่วนที่เหลือเป็นส่วนที่เกิดการหมุน โดยมีขนาดของปริมาตรควบคุมแสดงในตารางที่ ก.1 ดังนี้

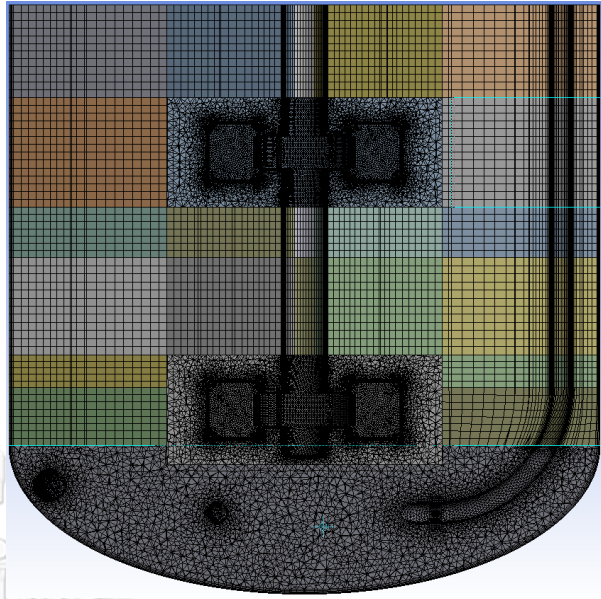
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงขนาดของปริมาตรควบคุมของแบบจำลองการไหลภายในถังหมัก

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาดและจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	0.08 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffles	0.15 มิลลิเมตร
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกวน	0.2 มิลลิเมตร
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	2.5 มิลลิเมตร
จำนวนของปริมาตรควบคุม	3.7 ล้าน

การสร้างปริมาตรควบคุมของแบบจำลองนี้แตกต่างกับแบบจำลองอื่นเนื่องการติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นส่งผลให้ไม่สามารถสร้างปริมาตรควบคุมด้วยวิธี Structure Mesh ในส่วนล่างของถังปั่นกวนนั้น จึงสร้างด้วยวิธี Unstructured Mesh เช่นเดียวกับส่วนที่เกิดการหมุนทั้ง 2 ส่วน โดยมีผลการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงในรูปที่ ก.1 ดังนี้



รูปที่ ก.1ก



รูปที่ ก.1ข

รูปที่ ก.1 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังหมัก

## ภาคผนวก ข

### ผลการจำลองการไหลที่ความเร็วรอบต่างกัน

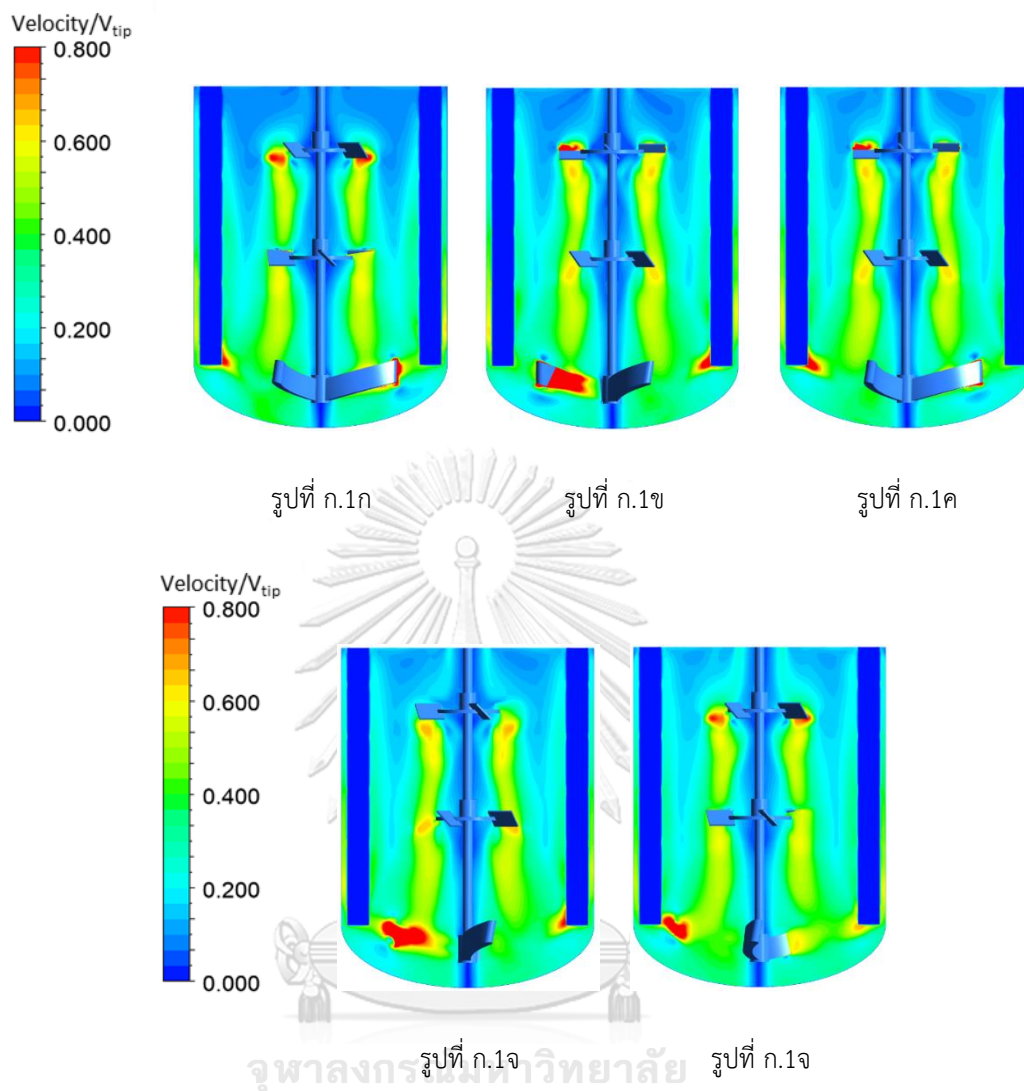
#### ข.1 ผลการจำลองการไหลที่เกิดจากการหมุนของระบบใบปั่นกววนที่ความเร็วรอบต่างกัน

ลักษณะการไหลภายในถังปั่นกวนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของใบปั่นกวนที่นำมาติดตั้ง เพราะฉะนั้นการเพิ่มความเร็วยรอบจะส่งผลให้ความเร็วของของไหลในถังปั่นกวนจะเพิ่มขึ้นแต่ลักษณะการไหลนั้นเหมือนเดิม โดยสามารถพิจารณาจากแผนภาพคอนทัวร์ที่ระนาบตัดตามแนวตั้งของความเร็วไร้หน่วยซึ่งเป็นความเร็วในถังปั่นกวนต่อความเร็วปลายของใบพัด ในรูปที่ ก.1 ดังนี้



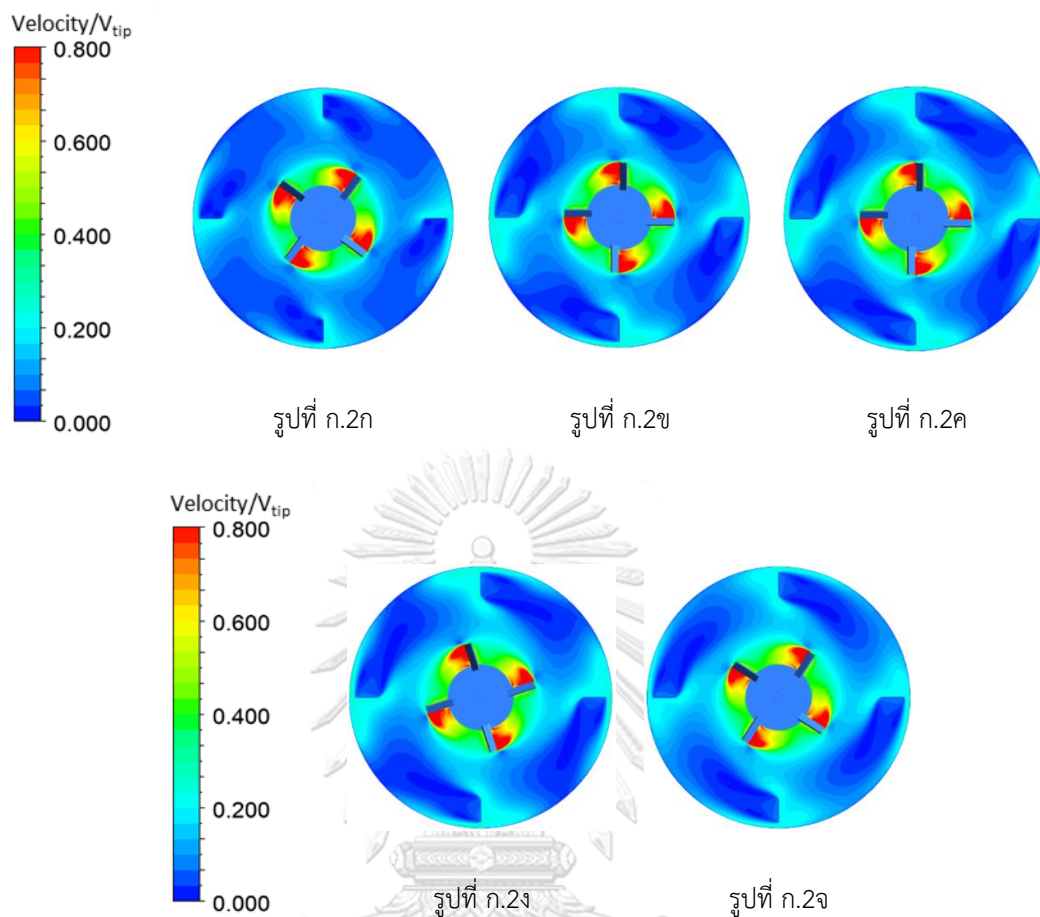
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



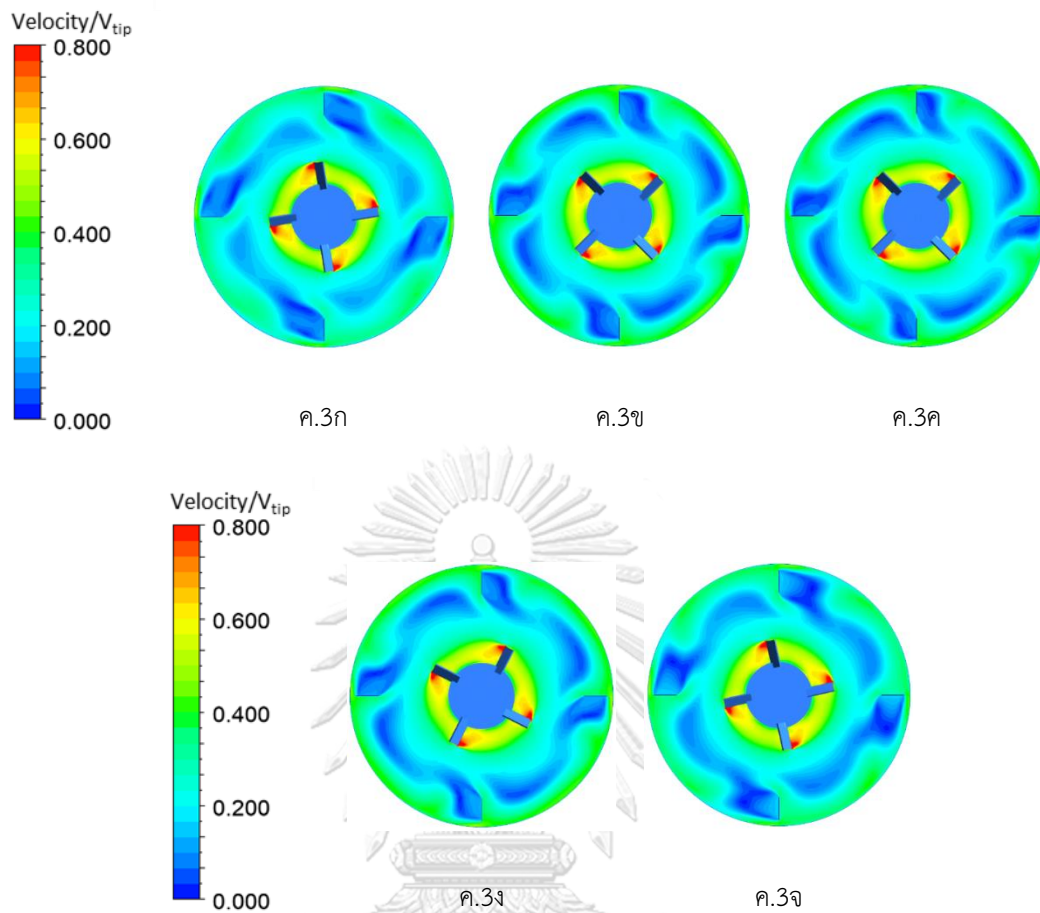


รูปที่ ก.1 แผนภาพคอนทัวร์ที่ระนาบตัดตามแนวตั้งของความเร็วไร้หน่วย โดยที่รูปที่ ก - จ คือที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 รอบต่อนาที

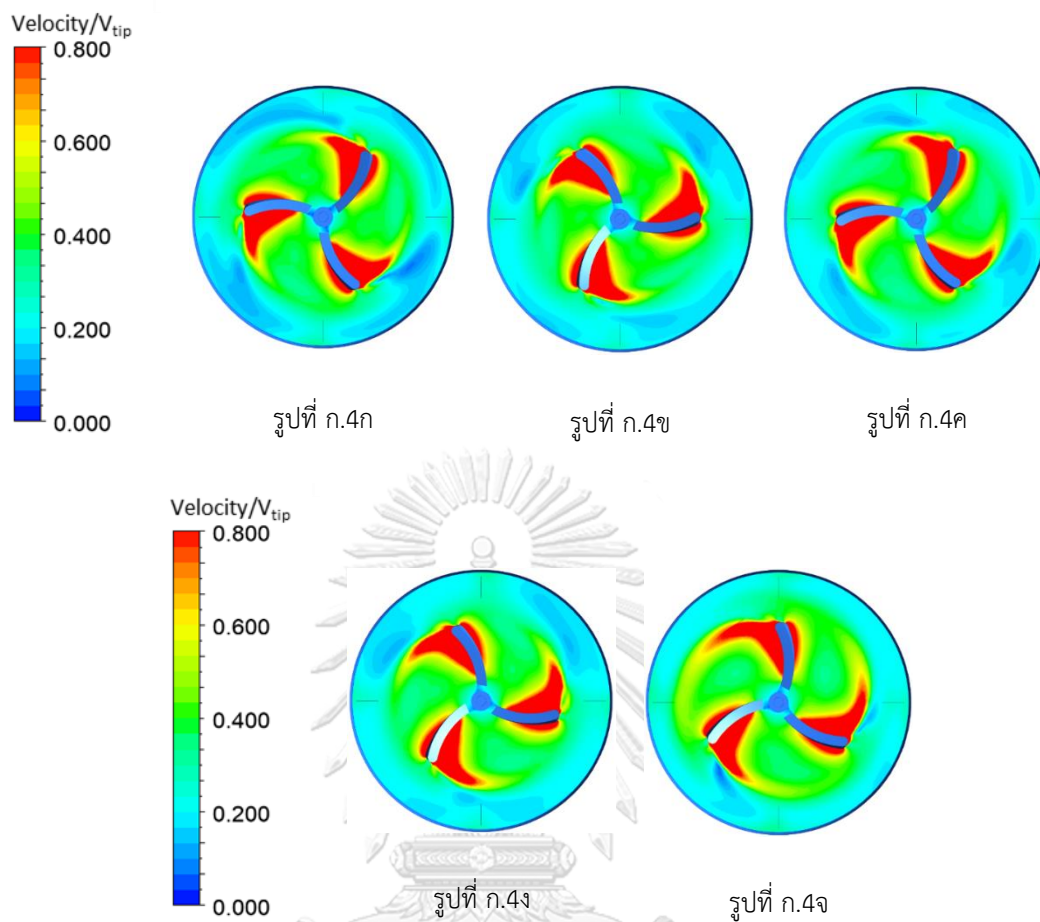
ลักษณะของแทบสีของแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ ก.1 แสดงให้เห็นถึงขนาดของความเร็วที่เกิดจากการเสริมกันของใบปั่นกวททั้ง 3 ใบ ซึ่งการพิจารณาในรูปของความเร็วไร้หน่วยนั้นเพื่อให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบต่างกัน ลักษณะของการกระจายตัวของความเร็วนั้นมีลักษณะคล้ายเดิม นอกจากนี้สามารถพิจารณาการไหลที่แผนภาพคอนทัวร์ที่ระนาบตัดขวางของใบปั่นกวททั้ง 3 ใบ โดยที่แสดงในรูปที่ ก.2, ข.3 และ ข.4



รูปที่ ก.2 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่ระนาบตัดขวางใบปั่นกววนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ที่ตำแหน่งบนของถังปั่นกววน โดยที่รูปที่ ก - จ คือที่ความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 รอบต่อนาที

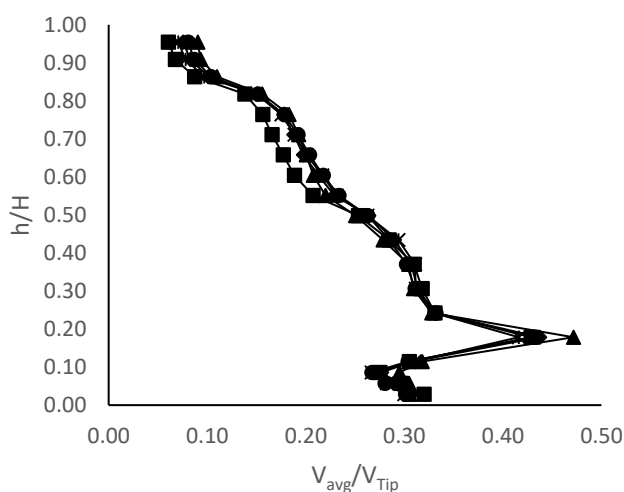


รูปที่ ก.3 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่ระนาบตัดขวางใบปั่นกววนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine ที่ตำแหน่งกลางของถังปั่นกววน โดยที่รูปที่ ก - จ คือที่ความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 รอบต่อนาที



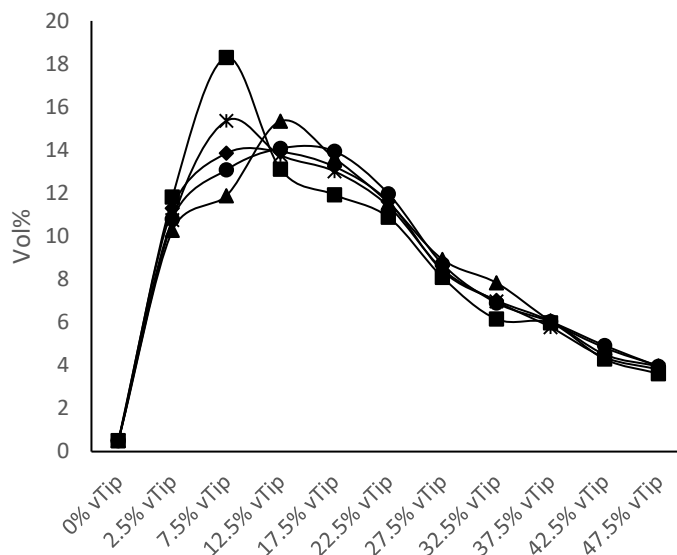
รูปที่ ก.4 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่ระนาบตัดขวางใบปีนกววนชนิด Retreat Curve ที่ตำแหน่งล่างของถังปีนกววน โดยที่รูปที่ ก - จ คือที่ความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 รอบต่อนาที

การวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยในพื้นที่ตัดขวางที่ระยะความสูงต่างกันในถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน โดยแสดงผลในรูปที่ ก.5 ดังนี้ การวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นการพิจารณาภาพรวมของการกระจายตัวของความเร็วในถังกวนผสมซึ่งจะสอดคล้องกับการพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วซึ่งแสดงในรูปที่ ก.1 โดยการวิเคราะห์เป็นกราฟแสดงให้เห็นถึงขนาดของความเร็วที่ระดับความสูงต่าง ๆ โดยความเร็วจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งใบปั่นกวนชนิด Retreat Curve



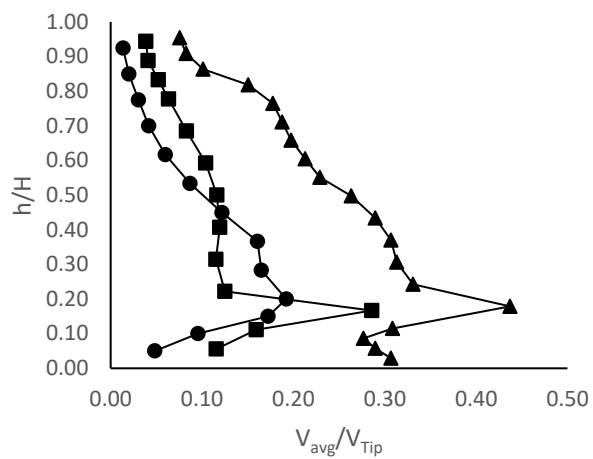
รูปที่ ก.5 กราฟระหว่างความสูงและความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากระบบใบปั่นกวนชนิดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 RPM ตามลำดับ (โดยที่ ■ 50 RPM, \* 75 RPM, ◆ 100 RPM, ● 125 RPM และ ▲ 150 RPM)

การเพิ่มความเร็วยังไม่ได้ส่งผลให้รูปแบบของการกระจายตัวเปลี่ยนไป รวมถึงไม่เปลี่ยนสัดส่วนของของไหลที่ความเร็วต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วปลายของใบป็นโดยแสดงในรูปที่ ก.6 ดังนี้



รูปที่ ก.6 กราฟการกระจายตัวของความเร็วไว้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลของระบบใบป็นกวน ความเร็วรอบเท่ากับ 50, 75, 100, 125 และ 150 RPM ตามลำดับ (โดยที่ ■ 50 RPM, \* 75 RPM, ◆ 100 RPM, ● 125 RPM และ ▲ 150 RPM)

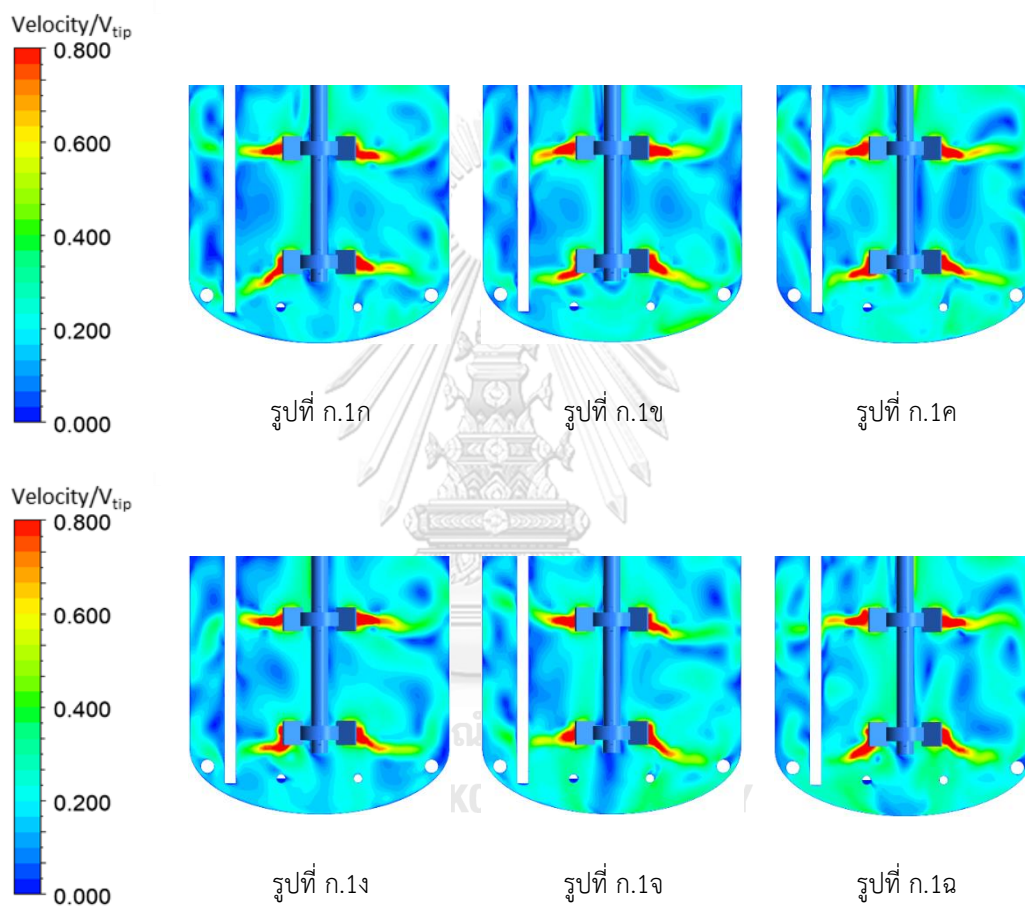
นอกจากนี้การเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากถังปั่นกวนขนาดมาตรฐานที่ใช้ใบป็นกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine, Retreat Curve กับถังปั่นกวนที่ติดตั้งระบบใบป็นกวนโดยแสดงในรูปที่ ก.7 แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วนั้นสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่ความสูงเท่ากันเนื่องจากการไหลที่เสริมกันของใบป็นกวนทั้ง 3 ใบในถังปั่นกวน



รูปที่ ก.7 กราฟระหว่างความสูงไร้หน่วยกับความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปัดกวนชนิด  $45^\circ$  Pitched Blade Disk Turbine, Retreat Curve และระบบใบปัดกวน (โดยที่ ● Pitched Blade Turbine, ■ Retreat Curve และ ▲ ระบบใบปัดกวน)

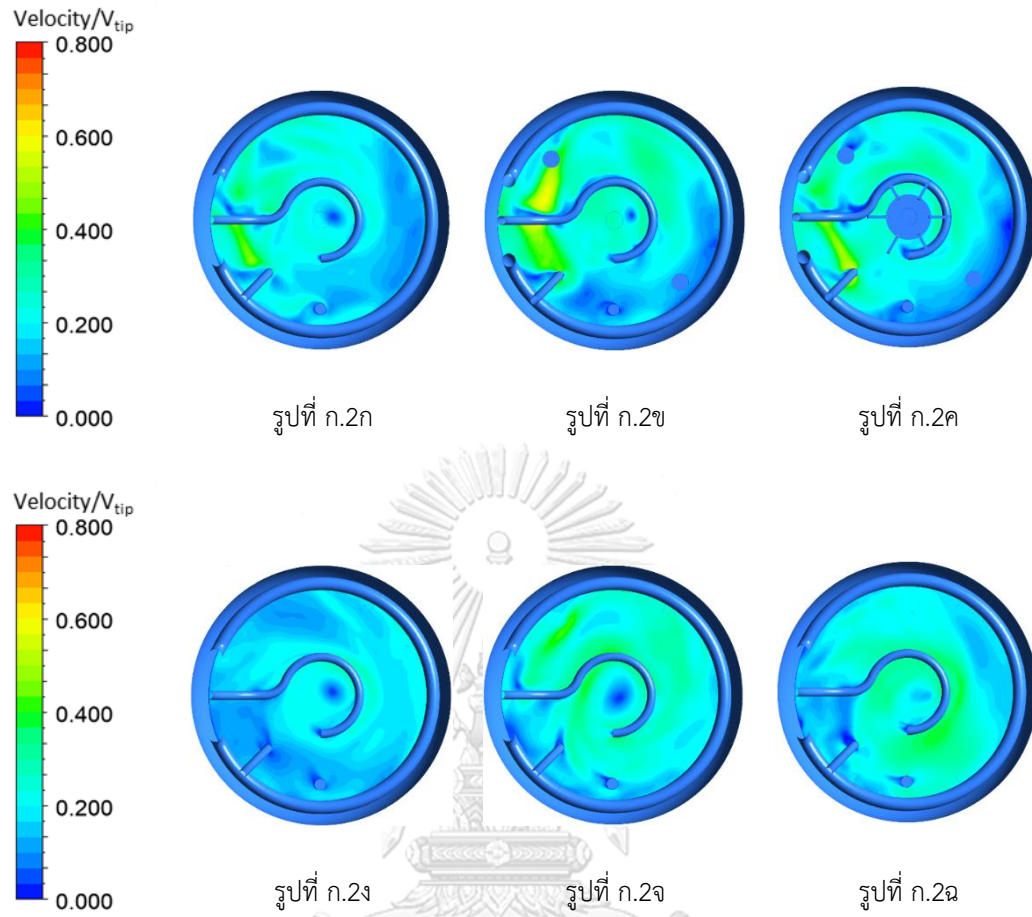
## ข.2 ผลการจำลองการไหลภายในถังหมักที่ความเร็วรอบต่างกัน

การเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นกวนนั้นไม่ส่งผลให้ลักษณะการไหลของของไหลภายในถังกวนผสมเปลี่ยนแปลงไป แต่เป็นการเพิ่มความเร็วของของไหล โดยความเร็วที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถพิจารณาเป็นตัวแปรไร้หน่วย เช่นเดียวกับการพิจารณาการไหลของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน โดยแสดงในแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ ข.8 ดังนี้

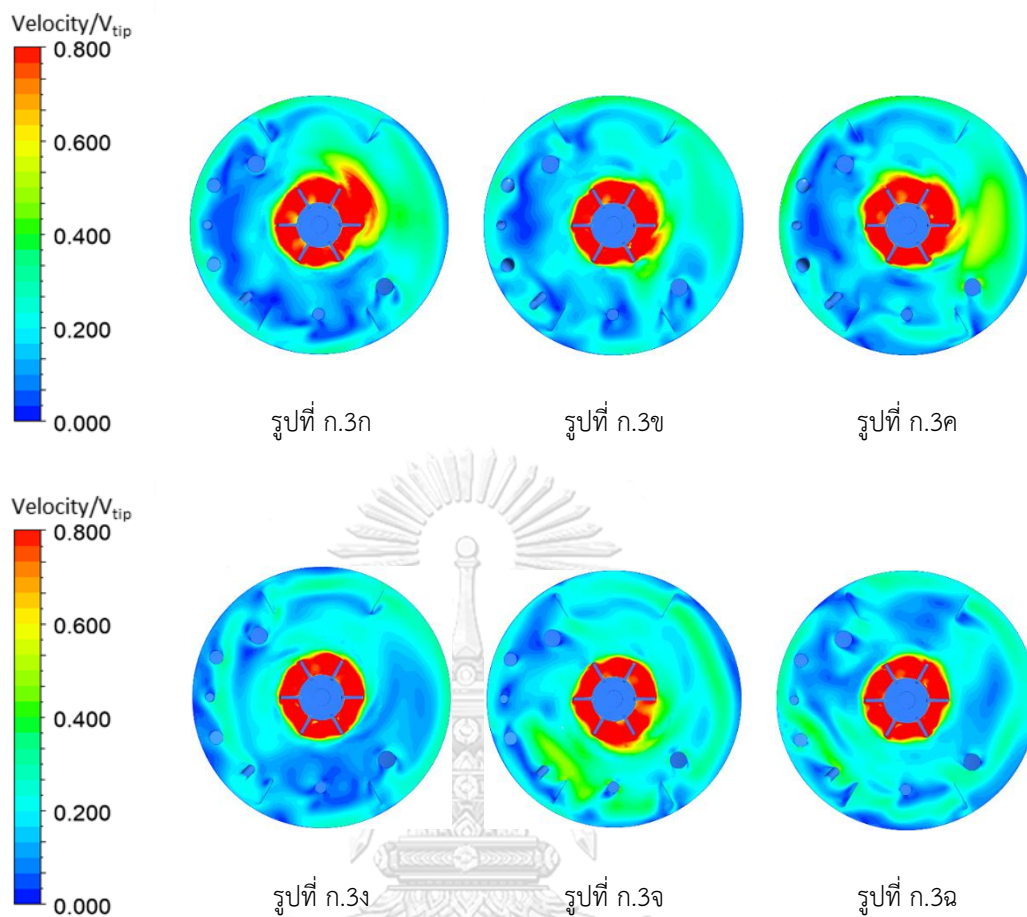


รูปที่ ก.1ก - ฉ แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบในระนาบแนวตั้ง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 200, 300, 400, 500, 600 และ 800 ตามลำดับ

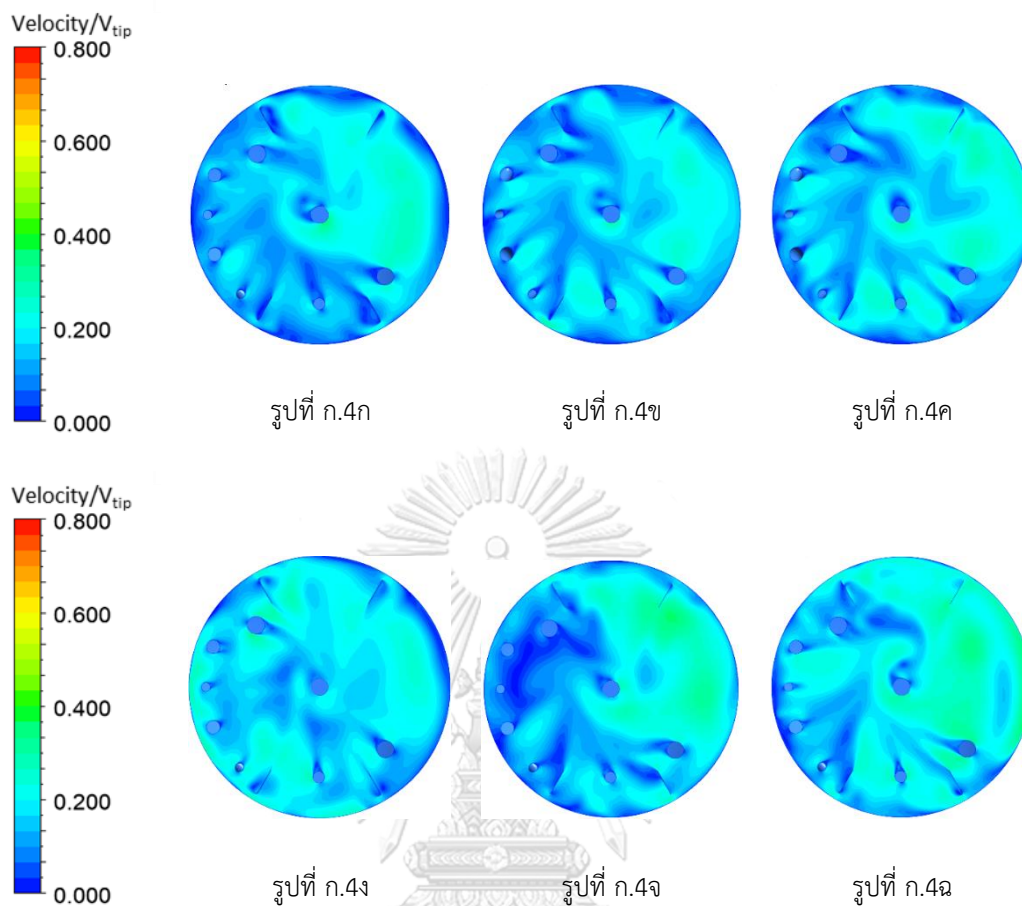




รูปที่ ก.2ก - ฉ แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบในระนาบตัดขวางที่ 1 ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 200, 300, 400, 500, 600 และ 800 ตามลำดับ

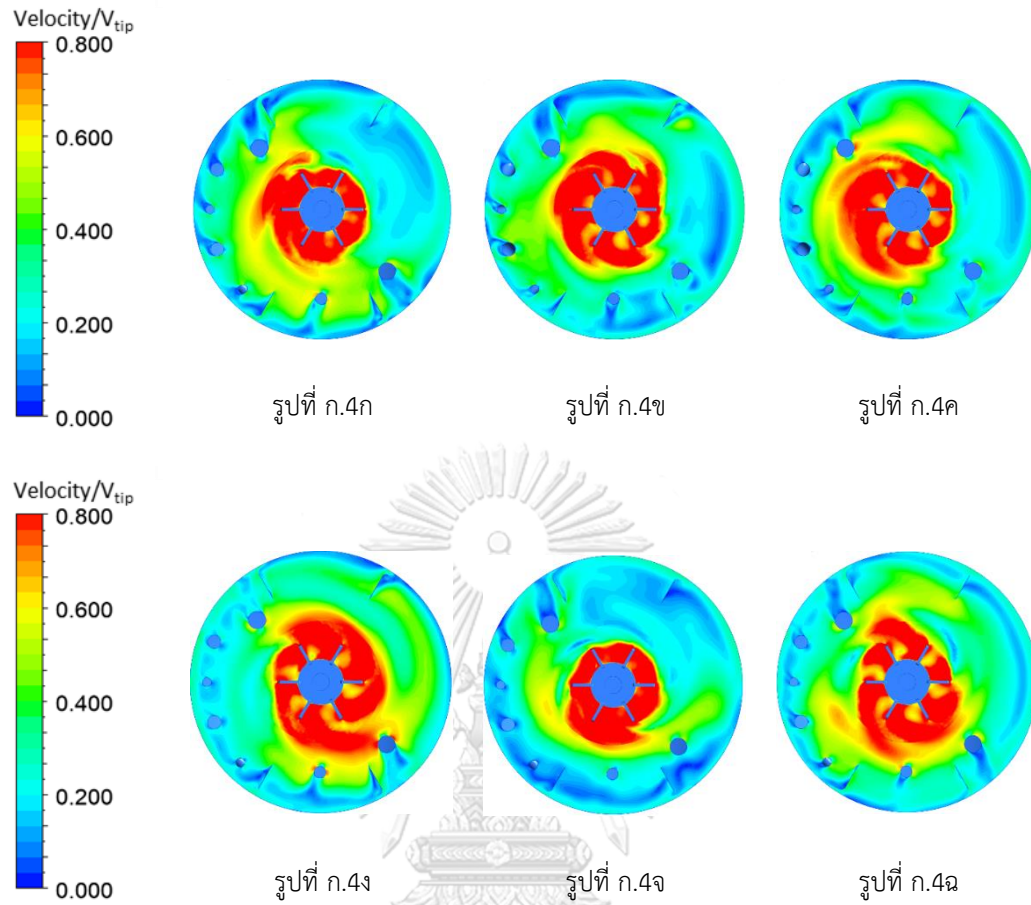


รูปที่ ก.3 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบในระนาบตัดขวางที่ 2 ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 200, 300, 400, 500, 600 และ 800 ตามลำดับ



รูปที่ ก.4 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบในระนาบตัดขวางที่

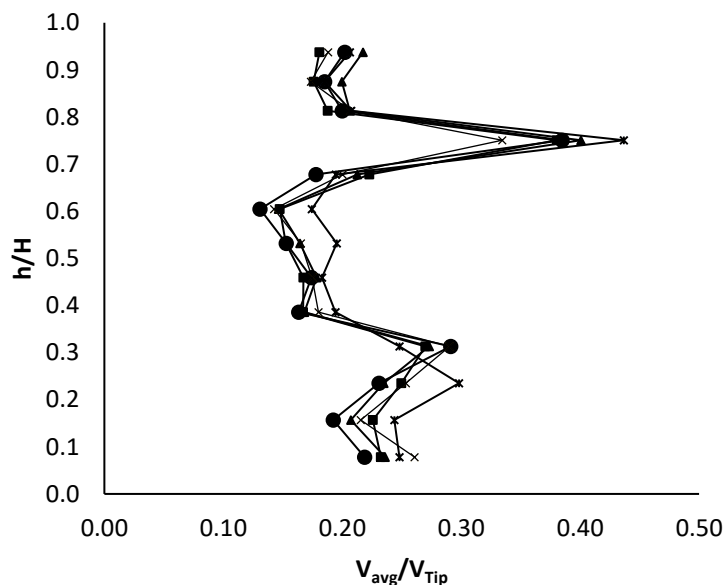
3 ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 200, 300, 400, 500, 600 และ 800 ตามลำดับ



รูปที่ ก.5 แผนภาพคอนทัวร์ของความเร็วไร้หน่วยที่เกิดจากใบปั่นกวน Rushton Turbine 2 ใบในระนาบตัดขวางที่

4 ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 200, 300, 400, 500, 600 และ 800 ตามลำดับ

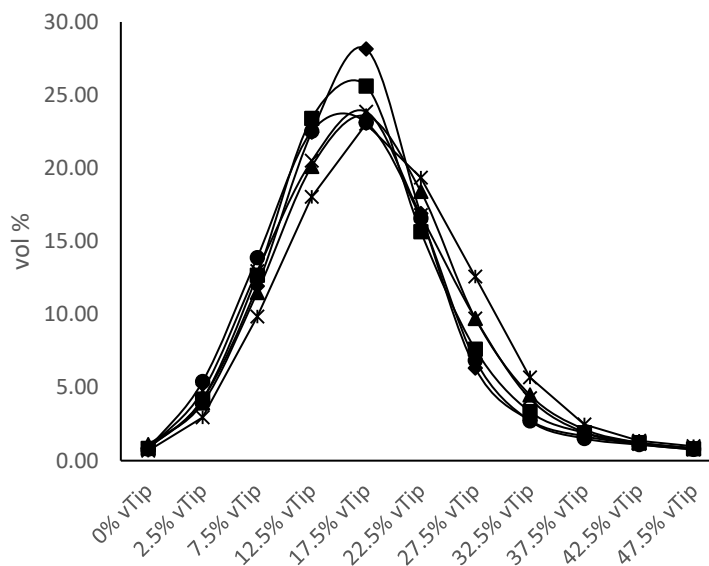
การเพิ่มความเร็วยรอบไม่ส่งผลให้ขนาดของความเร็วเร็วต่อความเร็วปลายของใบปั่นกววนเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาแผนภาพคอนทัวร์ในรูปที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเร็วในระนาบในแนวตั้งและระนาบตัดขวางที่ความสูงต่างกัน นอกจากนี้สามารถพิจารณากราประหว่างความเร็วเฉลี่ยที่ความเร็วยรอบต่างกับกับความสูงของถังกวนผสมในรูปที่ ก.6 ดังนี้



รูปที่ ก.6 กราประหว่างความเร็วเฉลี่ยไร้หน่วยในระนาบตัดขวางกับความสูงของถังกวนผสมที่ความเร็วยรอบต่างกัน

(โดยที่ ● 200 RPM, ■ 300 RPM, ▲ 400 RPM, × 600 RPM, \* 800 RPM)

ลักษณะของกราฟในรูปที่ แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยที่เป็นแนวโน้มเดียวกันในทุก ๆ ความเร็วยรอบ โดยผลการคำนวณนั้นสอดคล้องกับผลการคำนวณการไหลของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกววน นอกจากนี้สามารถพิจารณากราการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของไหลในรูปที่ ก.7 ดังนี้



รูปที่ ก.7 กราฟแสดงการกระจายตัวของความเร็วไร้หน่วยกับร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของเหลว

(โดยที่ ● 200 RPM, ■ 300 RPM, ▲ 400 RPM, ◆ 500 RPM × 600 RPM, ✱ 800 RPM)

การเพิ่มความเร็วรอบนั้นไม่ทำให้ลักษณะการไหลภายในถังกวนผสมเปลี่ยนแปลง โดยผลการคำนวณสอดคล้องกับผลการจำลองการไหลของถังกวนผสมที่ติดตั้งระบบใบปั่นกวน โดยจากกราฟระหว่างร้อยละสัดส่วนโดยปริมาตรของของเหลวในถังหมักกับการกระจายตัวของความเร็วแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วรอบนั้นไม่ส่งผลให้ปริมาตรของของไหลที่มีอัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ตำแหน่งนั้น ๆ ต่อความเร็วปลายของใบปั่นกวนเพิ่มขึ้น

## ภาคผนวก ค

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$C$	คือ ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวน
$C_1$	คือ ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับฐานของถังปั่นกวนในกรณีของถังหมักที่ติดตั้งใบปั่นกวน 2 ใบ
$C_2$	คือ ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบล่างกับใบปั่นบน
$C_3$	คือ ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนใบบนกับพื้นผิวของของเหลว
$D_a$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบปั่นกวน
$D_d$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของจานของใบปั่นกวน
$g, g_x$	คือ ความโน้มถ่วงของโลก
$gap$	คือ ช่องว่างระหว่างขอบของ Baffle กับผนังของถังกวนผสม
$H$	คือ ความสูงของถังกวนผสม
$J$	คือ ความกว้างของ Baffle
$k$	คือ Turbulent kinetic Energy
$\ell$	คือ Length Scale
$L$	คือ ความยาวของถังปั่นกวน
$N$	คือ ความเร็วรอบ
$N_p$	คือ ค่า Power Number
$P$	คือ ความดัน
$Re$	คือ Reynolds Number
$\nu$	คือ Velocity Scale
$v(t)$	คือ ความเร็วที่ขึ้นกับเวลาในการไหลแบบปั่นป่วน
$v^+$	คือ ความเร็วไร้หน่วยเพื่อใช้อธิบายการไหลที่บริเวณขอบเขตที่เป็นกำแพง
$v'(t), v'_i, v'_j$	คือ ความเร็วปั่นป่วน
$v_\tau$	คือ ความเร็วของปริมาตรควบคุมที่ของเขตที่เป็นกำแพง
$V, V_x, V_i, V_j$	คือ ความเร็วเฉลี่ย
$W$	คือ ความกว้างของใบปั่นกวน

$X$	คือ ความหนาของใบพัด
$y_p^+$	คือ ระยะทางไร้หน่วยจากขอบเขตที่เป็นกำแพง
$\varepsilon$	คือ Turbulent Dissipation Energy
$\kappa$	คือ Dilatational Viscosity
$\kappa$	คือ ในสมการที่ 2.32 คือ ค่าคงที่ของ von Kármán
$\mu$	คือ ความหนืด
$\mu_t$	คือ ความหนืดปั่นป่วน
$\nu$	คือ ความหนืดคินเนติก
$\nu_t$	คือ ความหนืดคินเนติกปั่นป่วน
$\rho$	คือ ความหนาแน่น
$\vec{\tau}$	คือ เทนเซอร์ของความเค้นเฉือน (Shear Stress Tensor)
$\bar{\tau}_{ij}$	คือ ความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ใช้อธิบายความปั่นป่วน
$\tau_w$	คือ ความเค้นเฉือนที่ขอบเขตที่เป็นกำแพง
$\omega$	คือ Specific rate of dissipation
$\omega_p$	คือ Specific rate of dissipation ที่ขอบเขตที่เป็นกำแพง



### บรรณานุกรม

- Ameur, H. (2015). Energy efficiency of different impellers in stirred tank reactors. *Energy*, *93*, 1980-1988. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.084>
- Ameur, H., & Bouzit, M. (2013). Power consumption for stirring shear thinning fluids by two-blade impeller. *Energy*, *50*, 326-332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.016>
- Aubin, J., Fletcher, D. F., & Xuereb, C. (2004). Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *28*(5), 431-445. doi:<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2003.04.001>
- Bonvillani, P., Ferrari, M., Ducrós, E., & Orejas, J. (2006). Theoretical and experimental study of the effects of scale-up on mixing time for a stirred-tank bioreactor. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *23*(1), 1-7.
- Brucato, A., Ciofalo, M., Grisafi, F., & Micale, G. (1998). Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches. *Chemical Engineering Science*, *53*(21), 3653-3684. doi:10.1016/S0009-2509(98)00149-3
- Bujalski, W., Nienow, A., Chatwin, S., & Cooke, M. (1987). The dependency on scale of power numbers of Rushton disc turbines. *Chemical Engineering Science*, *42*(2), 317-326.
- Chapple, D., Kresta, S., Wall, A., & Afacan, A. (2002). The effect of impeller and tank geometry on power number for a pitched blade turbine. *Chemical Engineering Research and Design*, *80*(4), 364-372.
- Chunmei, P., Jian, M., Xinhong, L., & Zhengming, G. (2008). Investigation of fluid flow in a dual Rushton impeller stirred tank using particle image velocimetry. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *16*(5), 693-699.
- Coroneo, M., Montante, G., Paglianti, A., & Magelli, F. (2011). CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations. *Computers & Chemical Engineering*, *35*(10), 1959-1968.
- Cortada-Garcia, M., Dore, V., Mazzei, L., & Angeli, P. (2017). Experimental and CFD studies of power consumption in the agitation of highly viscous shear thinning fluids. *Chemical Engineering Research and Design*, *119*, 171-182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.018>
- Couper, J. R., Penney, W. R., & Fair, J. R. (2009). *Chemical Process Equipment-Selection and Design (Revised 2nd Edition)*: Gulf Professional Publishing.
- Deglon, D., & Meyer, C. (2006). CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. *Minerals Engineering*, *19*(10), 1059-1068.
- Delafosse, A., Line, A., Morchain, J., & Guiraud, P. (2008). LES and URANS simulations of hydrodynamics in mixing tank: comparison to PIV experiments. *Chemical Engineering Research and Design*, *86*(12), 1322-1330.
- Dohi, N., Takahashi, T., Minekawa, K., & Kawase, Y. (2004). Power consumption and solid suspension performance of large-scale impellers in gas-liquid-solid three-phase stirred tank reactors. *Chemical Engineering Journal*, *97*(2-3), 103-114.

- Garcia-Ochoa, F., & Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview. *Biotechnology advances*, 27(2), 153-176.
- Joshi, J. B., Nere, N. K., Rane, C. V., Murthy, B., Mathpati, C. S., Patwardhan, A. W., & Ranade, V. V. (2011). CFD simulation of stirred tanks: comparison of turbulence models. Part I: radial flow impellers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(1), 23-82.
- Kresta, S. M., & Wood, P. E. (1993). The flow field produced by a pitched blade turbine: Characterization of the turbulence and estimation of the dissipation rate. *Chemical Engineering Science*, 48(10), 1761-1774. doi:[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80346-R](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)80346-R)
- Kumaresan, T., & Joshi, J. B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, 115(3), 173-193.
- Lane, G. L. (2017). Improving the accuracy of CFD predictions of turbulence in a tank stirred by a hydrofoil impeller. *Chemical Engineering Science*, 169, 188-211.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289. doi:[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Li, M., White, G., Wilkinson, D., & Roberts, K. J. (2004). LDA measurements and CFD modeling of a stirred vessel with a retreat curve impeller. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(20), 6534-6547.
- Li, M., White, G., Wilkinson, D., & Roberts, K. J. (2005). Scale up study of retreat curve impeller stirred tanks using LDA measurements and CFD simulation. *Chemical Engineering Journal*, 108(1-2), 81-90.
- Li, Z., Bao, Y., & Gao, Z. (2011). PIV experiments and large eddy simulations of single-loop flow fields in Rushton turbine stirred tanks. *Chemical Engineering Science*, 66(6), 1219-1231.
- Luan, D., Zhang, S., Wei, X., & Chen, Y. (2017). Study on mathematical model to predict aerated power consumption in a gas-liquid stirred tank. *Results in Physics*, 7, 4085-4088. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.042>
- Malik, S., L ev eque, E., Bouaifi, M., Gamet, L., Flottes, E., Simo ens, S., & El-Hajem, M. (2016). Shear improved Smagorinsky model for large eddy simulation of flow in a stirred tank with a Rushton disk turbine. *Chemical Engineering Research and Design*, 108, 69-80.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- Micale, G., Brucato, A., Grisafi, F., & Ciofalo, M. (1999). Prediction of flow fields in a dual-impeller stirred vessel. *AIChE Journal*, 45(3), 445-464.
- Murthy, B., & Joshi, J. (2008). Assessment of standard k- $\epsilon$ , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs. *Chemical Engineering Science*, 63(22), 5468-5495.
- Patel, D., Ein-Mozaffari, F., & Mehrvar, M. (2012). Improving the dynamic performance of continuous-flow mixing of pseudoplastic fluids possessing yield stress using Maxblend impeller. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(4), 514-523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.08.022>

- Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: science and practice*: John Wiley & Sons.
- Rielly, C., Habib, M., & Sherlock, J.-P. (2007). Flow and mixing characteristics of a retreat curve impeller in a conical-based vessel. *Chemical Engineering Research and Design*, 85(7), 953-962.
- Rushton, J. (1950). Power characteristics of mixing impellers Part 1. *Chem. Eng. Prog.*, 46, 395-404.
- Rutherford, K., Lee, K., Mahmoudi, S., & Yianneskis, M. (1996). Hydrodynamic characteristics of dual Rushton impeller stirred vessels. *AIChE Journal*, 42(2), 332-346.
- Senso, N., Jongsomjit, B., & Praserttham, P. (2011). Behaviors in ethylene polymerization of MgCl<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/TiCl<sub>4</sub>/THF Ziegler-Natta catalysts with differently treated SiO<sub>2</sub>. *Molecules*, 16(2), 1323-1335.
- Shinji, N. (1975). *Mixing Principles and Applications*. In: John Wiley and Sons, New York, USA.
- Singh, H., Fletcher, D. F., & Nijdam, J. J. (2011). An assessment of different turbulence models for predicting flow in a baffled tank stirred with a Rushton turbine. *Chemical Engineering Science*, 66(23), 5976-5988.
- Sirasitthichoke, C., & Armenante, P. M. (2017). Power Dissipation and Power Number Correlations for a Retreat-Blade Impeller under Different Baffling Conditions. *Industrial & engineering chemistry research*, 56(36), 10123-10133. doi:10.1021/acs.iecr.7b02634
- Šulc, R., & Dittl, P. (2017). Scale-up rules for flocculation. *International Journal of Mineral Processing*, 167, 79-85.
- Taghavi, M., Zadghaffari, R., Moghaddas, J., & Moghaddas, Y. (2011). Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(3), 280-290.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (1995). Computational fluid dynamics. *The finite volume method*.
- Wu, H., & Patterson, G. K. (1989). Laser-Doppler measurements of turbulent-flow parameters in a stirred mixer. *Chemical Engineering Science*, 44(10), 2207-2221.  
doi:[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(89\)85155-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(89)85155-3)
- Xie, M., Xia, J., Zhou, Z., Chu, J., Zhuang, Y., & Zhang, S. (2014). Flow Pattern, Mixing, Gas Hold-Up and Mass Transfer Coefficient of Triple-Impeller Configurations in Stirred Tank Bioreactors. *Industrial & engineering chemistry research*, 53(14), 5941-5953. doi:10.1021/ie400831s
- You, S. T., Raman, A. A. A., Shah, R. S. S. R. E., & Nor, M. I. M. (2014). Multiple-impeller stirred vessel studies. *Reviews in Chemical Engineering*, 30(3), 323-336.
- Zadghaffari, R., Moghaddas, J., & Revstedt, J. (2010). Large-eddy simulation of turbulent flow in a stirred tank driven by a Rushton turbine. *Computers & Fluids*, 39(7), 1183-1190.

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย อาทร เต่นดี
วัน เดือน ปี เกิด	20 กุมภาพันธ์ 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	333/439 อาคารบางนาเพลซ ซอยออนป่า ถนนสรรพาวุธ แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

