

การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของประสิทธิภาพการผสม  
ในถังปั่นกวนที่มีแผ่นกั้นขับเคลื่อนโดยเพลาเกลียว

CFD STUDY OF MIXING PERFORMANCES  
IN THE BAFFLED STIRRED TANK DRIVEN BY SPIRAL SHAFTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-220-101

การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของประสิทธิภาพการผสม  
ในถังปั่นกวนที่มีแผ่นกั้นขับเคลื่อนโดยเพลากลียว

CFD STUDY OF MIXING PERFORMANCES  
IN THE BAFFLED STIRRED TANK DRIVEN BY SPIRAL SHAFTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-220-101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของประสิทธิภาพการผสม  
ในถังปั่นกวนที่มีแผ่นกั้นขับเคลื่อนโดยเพลากลียว

CFD STUDY OF MIXING PERFORMANCES  
IN THE BAFFLED STIRRED TANK DRIVEN BY SPIRAL SHAFTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-220-101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CFD STUDY OF MIXING PERFORMANCES  
IN THE BAFFLED STIRRED TANK DRIVEN BY SPIRAL SHAFTS



AWANEE WONGNUI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-220-101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของประสิทธิภาพการผสมในถังปั่นกวนที่มีแผ่นกั้นขับเคลื่อนโดยเพลากลียว

Thesis Title CFD Study of Mixing Performances in the Baffled Stirred Tank Driven by Spiral Shafts

นักศึกษา นางสาวอานี วงศ์นุ้ย

รหัสประจำตัว 55614809

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-220-101

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนะวงศ์	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	
ผศ.ดร.วัลย์รัตน์	จันทร์อัมพร	วัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสร์	
ผศ.ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดต่อดังกล่าวของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของประสิทธิภาพการผสมในถังปั่นกวนที่มีแผ่นกั้นขับเคลื่อนโดยเพลากลียว
นักศึกษา	นางสาวอานนี่ วงศ์นัย
รหัสประจำตัว	55614809
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหล เวลาในการผสมและพลังงานที่ใช้ในการผสมของเพลากลียว การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษากำหนดค่าเพลารอบไปด้วย จำนวนเกลียว (6 และ 10) มุมของเกลียว ( $45^\circ$  และ  $60^\circ$ ) และความลึกของเกลียว ( $1/4$  และ  $1/2$  ของเส้นผ่าศูนย์กลางเพลารอบ) ในถังผสมที่หมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการหมุนตามเข็มนาฬิกาและการหมุนทวนเข็มนาฬิกาของเพลามีระยะเวลาในการผสมที่สั้นที่สุดจากส่วนแรกของวิทยานิพนธ์นี้ แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ถูกเลือกเพื่อจำลองความปั่นป่วนภายในถังผสม คำนวณการเชื่อมโยงของความเร็วและความดัน ด้วยระเบียบวิธี SIMPLEC รูปแบบการประมาณค่าแบบ Least Squares-cell based และแบบ second order ถูกใช้ในการประมาณค่า gradient และความดัน ตามลำดับ สำหรับการประมาณค่าโมเมนต์ พลังงานจลน์ความปั่นป่วน และ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน ใช้การประมาณแบบ second order upwind จากผลการทดลองพบว่าเพลากลียวที่มีเกลียวจำนวน 10 เกลียว มุมของเกลียว  $45^\circ$  องศาและความลึกของเกลียว  $1/4$  ของเส้นผ่าศูนย์กลางเพลามีระยะเวลาในการผสมต่ำสุด และระยะเวลาการผสมของเพลานี้ยังต่ำกว่าเพลามาตรฐานร้อยละ 5 เนื่องจากเพลานี้มีค่าอัตราส่วน  $k/\epsilon$  ต่ำและราบเรียบ ค่าอัตราส่วน  $k/\epsilon$  ที่ต่ำทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ความปั่นป่วนเป็นพลังงานความร้อนภายในถัง นอกจากนี้เวลาในการผสมและพลังงานในการผสมของถังผสมที่หมุนตามเข็มนาฬิกานั้นน้อยกว่าการหมุนทวนเข็มนาฬิการ้อยละ 8 ทั้งสองค่าเนื่องจากทิศทางของไหลใกล้เพลากลียวเมื่อหมุน

ทวนเข็มนาฬิกา กับทิศทางของไหลของของไหลตรงข้ามกันส่งผลให้ความเร็วใกล้กับเพลาลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	CFD Study of Mixing Performances in The Baffled Stirred Tank Driven by Spiral Shafts
<b>Student</b>	Ms.Awaneer Wongnui
<b>Student ID.</b>	55614809
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Santi Wattananusorn

## ABSTRACT

This thesis studied the flow pattern, mixing time, and mixing energy of spiral shaft. The study was distinguished into two parts. The first part of this thesis was a study of spiral shaft configurations, including number of strands (6 and 10), angle of strand ( $45^\circ$  and  $60^\circ$ ), and depth of strand ( $\frac{1}{4}$  and  $\frac{1}{2}$  of shaft diameter), inside the mixing tank with clockwise rotation. The second part was a comparison between clockwise rotation and counter clockwise rotation for the spiral shaft, which provides the shortest mixing time obtained by first part of this thesis. The k-epsilon turbulence model was selected to simulate the turbulence inside the vessel. The pressure-velocity coupling scheme was SIMPLEC. The least squares cell based and second order were adopted to estimate the gradient and pressure, respectively. For momentum, turbulence kinetic energy, and turbulence kinetic energy dissipation rate, the second order upwind discretization scheme was employed. From the results, it can be seen that the spiral shaft with the strand number of 10, strand angle of  $45^\circ$ , and strand depth of  $\frac{1}{4}$  of shaft diameter showed the lowest mixing time and the mixing time of this shaft was also 5% lower than that obtained by the standard shaft because this shaft produced the low and smooth value of  $k/\epsilon$  ratio. That is, the low value of  $k/\epsilon$  produced the better performance to convert the turbulence kinetic energy into thermal energy inside the tank. Further, the mixing time and mixing energy of clockwise rotation were 8% both less than counter clockwise rotation because the flow directions near the shaft for counter clockwise rotation and the flow direction of bulk fluid were opposite, which directly reduced the velocity near the shaft.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่และให้การสนับสนุนในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอพระขอบคุณทุกท่าน ที่มีได้กล่าวนามในที่นี้ซึ่งมีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอพระขอบคุณบุคลากรที่ให้โอกาสทางการศึกษาและสนับสนุนในทุกด้าน ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ จนประสบความสำเร็จทางการศึกษา และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

อาวณี วงศ์นุ้ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา !!! และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ถังผสม.....	3
2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	5
2.3 สมการควบคุม (Governing equations).....	8
2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations).....	11
2.5 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and Turbulence model).....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณการไหลภายในถังผสม.....	20
3.1 การสร้างแบบจำลอง.....	20
3.2 ศึกษาตัวแปรของเกลียวของเพลลา.....	22
3.3 ศึกษาเวลาผสมของถังผสม.....	23
3.4 ศึกษาการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาในถังผสม.....	23
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลจำลอง.....	24
4.1 ผลการศึกษาจำนวนเมฆที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง และการเปรียบเทียบผล การจำลองกับผลการทดลองอ้างอิง.....	24
4.2 ผลการศึกษาตัวแปรของเกลียวบริเวณเพลลา.....	35
4.3 ผลการศึกษาการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาในถังผสม.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก เวลาในการผสมจากจุดวัดทั้ง 30 จุดของถังผสมที่ทำการจำลอง.....	51
ภาคผนวก ข คอนทัวร์ค่าความเร็วตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลลาชนิดต่าง ๆ.....	54
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบผลจำลองของการแบ่งเมฆแบบมีอินเตอร์เฟซและไม่มีอินเตอร์เฟซ.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ .....	16
3.1 อัตราส่วนขนาดของถังผสม.....	21
3.2 แบบจำลองเกลียวที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของเกลียวเพลลา.....	22
3.3 ตำแหน่งจุดวัดการกระจายตัวของสาร.....	23
4.1 จำนวนเมฆที่ศึกษาที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง.....	24
4.2 การเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า $N_p$ ที่ความละเอียดเมฆต่างๆ.....	25
4.3 เวลาในการผสมของถังผสมที่เพลลาชนิดต่างๆ.....	35
4.4 เวกเตอร์และคอนทัวร์ของอัตราส่วน $k / \epsilon$ บริเวณหน้าตัดใกล้เพลลาที่ความสูง 0.25 เมตร.....	41
4.5 คอนทัวร์ของอัตราส่วน $k / \epsilon$ บริเวณหน้าตัดใกล้เพลลาที่ความสูง 0.23 ถึง 0.25 เมตร.....	42
4.6 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนบริเวณหน้าตัดใกล้เพลลาที่ความสูง 0.1 ถึง 0.2 เมตร.....	45
4.7 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนบริเวณหน้าตัดใกล้เพลลาที่ความสูง 0.2 ถึง 0.3 เมตร.....	46
4.8 เปรียบเทียบค่างานและพลังงานของเพลลาเกลียว.....	47
ก.1 เวลาในการผสมจากจุดวัดทั้ง 30 จุดของถังผสมที่ทำการจำลอง.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองการไหลของถังผสมชนิดใบพัดแบบรัทั้น 6 ใบพัด.....	3
2.2 ลักษณะการไหลของของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงราบเรียบกระทำต่อใบพัด.....	4
2.3 ลักษณะการไหลของของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงปั่นป่วนกระทำต่อใบพัด.....	4
2.4 แผนภาพแสดงองค์ประกอบหลักในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	5
2.5 ขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	6
2.6 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน.....	12
3.1 ภาพโครงสร้างของถังผสมในงานวิจัย.....	20
3.2 ภาพตัวอย่างเพลลาแบบเกลียว 10-60-3.....	22
4.1 ภาพจำลองถังผสมที่เมฆจำนวน 186,701 เซลล์ (ความหนาแน่นเมฆ 0.75X).....	25
4.2 ภาพจำลองถังผสมที่เมฆจำนวน 441,109 เซลล์ (ความหนาแน่นเมฆ 1X).....	25
4.3 ภาพจำลองถังผสมที่เมฆจำนวน 867,683 เซลล์ (ความหนาแน่นเมฆ 1.25X).....	25
4.4 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวแกน ( $U_d/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลองเทียบกับผลจำลอง.....	27
4.5 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวรัศมี ( $U_r/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลองเทียบกับผลจำลอง.....	29
4.6 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ( $U_t/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลองเทียบกับผลจำลอง.....	31
4.7 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของค่าพลังงานความปั่นป่วน ( $k/U_{tip}^2$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลองเทียบกับผลจำลอง.....	33
4.8 ภาพคอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลลาชนิดต่างๆ.....	36
4.9 ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสมเพลลา เกลียวต่างๆ.....	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ค่าความเร็วในแนวรัศมีตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสมเพลลา เกลียวต่างๆ.....	37
4.11 ค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสม เพลลาเกลียวต่างๆ.....	37
4.12 ค่าพลังงานความปั่นป่วนตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสมเพลลา เกลียวต่างๆ.....	38
4.13 อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วนตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของ ถังผสมเพลลาเกลียวต่างๆ.....	38
4.14 อัตราส่วน $k/\varepsilon$ ตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสมเพลลาเกลียวต่างๆ.....	39
4.15 อัตราส่วน $k/\varepsilon$ ตลอดความสูงของเพลลาที่ ระยะ $r = 0.009$ m ของถังผสมเพลลาเกลียวต่างๆ.....	40
4.16 รูปแบบการไหลในถังผสมเพลลาอ้างอิง.....	43
4.17 เวกเตอร์บริเวณหน้าตัดใกล้เพลลา ( $r < 0.009$ m) ที่ความสูง 0.2 ถึง 0.21 เมตร ของเพลลา เกลียว 10-45-1.5 ที่การหมุน.....	44
ข.1 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลลาชนิดต่าง ๆ.....	54
ข.2 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวรัศมีตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลลาชนิดต่าง ๆ.....	56
ข.3 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลลาชนิดต่างๆ.....	58
ค.1 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ที่ระยะหน้าตัด $y=0$ ในถังผสมเพลลาอ้างอิง ที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซและมีอินเตอร์เฟซ.....	61
ค.2 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวแนวรัศมี (Radial velocity) ที่ระยะหน้าตัด $y=0$ ในถังผสม เพลลาอ้างอิงที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซและมีอินเตอร์เฟซ.....	62
ค.3 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) ที่ระยะหน้าตัด $y=0$ ในถังผสมเพลลาอ้างอิงที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซและมีอินเตอร์เฟซ.....	62
ค.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วต่างๆที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$ m) ระหว่างถังผสม ที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซและมีอินเตอร์เฟซ.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.5 กราฟเปรียบเทียบค่าพลังงานความปั่นป่วนที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$ m) ระหว่างถึงผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟสและมีอินเตอร์เฟส.....	63
ค.6 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วนที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$ m) ระหว่างถึงผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟสและมีอินเตอร์เฟส.....	64



## สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

$a$	ความเร็วเสียงอากาศ (เมตรต่อวินาที)
$c$	ความเข้มข้นที่ตำแหน่งใดๆ (-)
$\bar{c}$	ความเข้มข้นเฉลี่ยของทั้งระบบที่จุดสมดุล (-)
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางกระยะไบพัต (เมตร)
$E$	พลังงานจำเพาะของของไหล (จูล)
$G_b$	การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
$G_k$	การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนของความเร็วเฉลี่ย
$\bar{J}_i$	ฟลักซ์ของการแพร่ของสาร $i$ (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
$k$	พลังงานจลน์ปั่นป่วน (จูลต่อกิโลกรัม)
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน)
$N$	ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อวินาที)
$P$	งาน (วัตต์)
$p$	ความดัน (ปาสคาล)
$R_i$	อัตราสุทธิของผลิตภัณฑ์สาร $i$ โดยปฏิกิริยาเคมี (โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
$S_E$	แหล่งพลังงานอื่นๆ
$S_i$	เทอมของแหล่งกำเนิดของสาร $i$
$S_M$	เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ
$S_k$ และ $S_\epsilon$	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นของ $k$ และ $\epsilon$
$T$	อุณหภูมิ (เคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

$t$	เวลา (วินาที)
$U$	เวกเตอร์ความเร็วของแกน (เมตรต่อวินาที)
$U(t)$	ความเร็วของไหลแบบปั่นป่วน (เมตรต่อวินาที)
$U'(t)$	ความเร็วผันผวน (เมตรต่อวินาที)
$\bar{U}$	ความเร็วเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)
$u$	ความเร็วในแนวแกน $x$ (เมตรต่อวินาที)
$\bar{u}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $x$ (เมตรต่อวินาที)
$u'$	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน $x$ (เมตรต่อวินาที)
$v$	ความเร็วในแนวแกน $y$ (เมตรต่อวินาที)
$v'$	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน $y$ (เมตรต่อวินาที)
$\bar{v}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $y$ (เมตรต่อวินาที)
$w$	ความเร็วในแนวแกน $z$ (เมตรต่อวินาที)
$w'$	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน $z$ (เมตรต่อวินาที)
$\bar{w}$	ความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน $z$ (เมตรต่อวินาที)
$Y_i$	สัดส่วนโดยมวลของสาร $i$ (-)
$Y_M$	ค่าการขยายตัวที่เกิดจากการแกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขออภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก

$\varepsilon$	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (วัดต่อกิโลกรัม)
$\lambda$	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
$\mu_{eff}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
$S_E$	ความหนืดปั่นป่วน (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
$\rho$	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
$\sigma_k$	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ $k$ (-)
$\sigma_\varepsilon$	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ $\varepsilon$ (-)
$\tau$	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)
$\varphi$	คุณสมบัติการไหลฉบับพลัน (-)
$\varphi'$	คุณสมบัติของของไหลปั่นป่วน (-)
$\bar{\varphi}$	คุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา (-)
$\overline{\varphi'}$	คุณสมบัติการไหลแกว่ง (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XII** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา

หลักการปั่นกววนหรือการผสมสารนั้นมีการใช้งานกันมานานตั้งแต่สมัยอดีต ในอุตสาหกรรมทั่วไปและอุตสาหกรรมวิศวกรรมเคมีกระบวนการหลายๆอย่างขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการปั่นกววน โดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของการปั่นกววนนั้นจะหมายถึงการผสมของเหลวหลายชนิด การละลายของแข็งในของเหลว การกระจายแก๊สในของเหลว หรือการแยกสารแขวนลอยออกจากของเหลว เป็นต้น ชนิดของถังปั่นกววนและใบพัดเองก็ส่งผลต่อรูปแบบการปั่นกววนจึงมีหลากหลายชนิดแยกใช้ตามความเหมาะสมของสารและชนิดงาน เช่นถังผสมแบบไม่มีแผ่นกั้น และถังผสมแบบมีแผ่นกั้น ใบพัดที่เอียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมในแนวแกน หรือใบพัดที่โค้งงอเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมในแนวขวาง

การศึกษาการไหลของของไหลในถังผสมสามารถศึกษาได้จากการทดลอง โดยวัดค่าความเร็วต่างๆ ที่ตำแหน่งใดๆ ด้วยเทคนิค Laser Doppler Velocimetry (LDV) หรือเทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) และหาค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy) จากความผันผวนของความเร็วที่ตำแหน่งนั้นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ร่วมในการศึกษา โดยตรวจสอบความถูกต้องในการจำลองด้วยการเปรียบเทียบผลกับการทดลองอ้างอิง การจำลองช่วยให้การศึกษาในส่วนที่การทดลองจริงทำได้ยาก อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

โดยทั่วไปเพลลาในถังผสมจะเป็นทรงกระบอกเรียบ แต่ถ้าเพิ่มร่องในเพลลา อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปั่นกววนมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในถังผสมเมื่อเพลลามีลักษณะเป็นเกลียว โดยใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการจำลองถังผสมด้วยโปรแกรม Fluent โดยใช้แบบจำลอง Standard k-epsilon ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน และใช้สมการการขนถ่ายในการคำนวณหาเวลาในการผสม

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาปรากฏการณ์และรูปแบบการไหลของถังผสมแบบมีแผ่นกั้น 4 แผ่น มีฝาปิด จานใบพัดชนิดรัศมี 6 ใบพัดโดยใช้วิธีการจำลองเทียบกับผลการทดลอง

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของเพลลาเกลียวที่ความลึก องศา และจำนวนของเกลียวที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลและเวลาในการผสม

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของทิศการหมุนเพลลาเกลียว ที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหล เวลาในการผสม และพลังงานในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สร้างแบบจำลองถึงผสมจากโปรแกรม Gambit และคำนวณการไหลโดยใช้โปรแกรม FLUENT เพื่อใช้ในการจำลองการไหลในถังผสม อ้างอิงความถูกต้องของผลจำลองโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยที่อ้างอิง

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของจำนวนเพลลาเกลียวเท่ากับ 6 และ 10 เกลียวในถังผสมต่อรูปแบบการไหลและเวลาในการผสม

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลขององศาเกลียวที่ทำมุม 45 กับ 60 องศาในถังผสมต่อรูปแบบการไหลและเวลาในการผสม

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของ ความลึกของเกลียวที่ความลึก  $\frac{1}{2}$  กับ  $\frac{1}{4}$  ของเพลลาในถังผสมต่อรูปแบบการไหลและเวลาในการผสม

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของทิศการหมุนเพลลาเกลียวแบบตามและทวนเข็มนาฬิกาต่อรูปแบบการไหล เวลาในการผสม และ พลังงานในการผสม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบถึงเวลาในการผสมของเพลลาที่มีเกลียวและไม่มีเกลียว

1.4.2 สามารถทราบถึงชนิดเพลลาเกลียวที่เหมาะสม ที่มีเวลาผสมน้อยกว่าเพลลาอ้างอิง

1.4.2 สามารถทราบถึงผลของทิศการหมุนของเพลลาเกลียวที่ทำให้เวลาและพลังงานในการผสมน้อยสุด

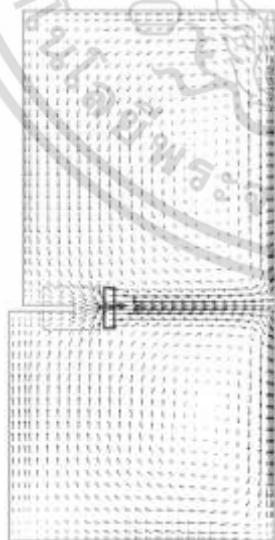
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

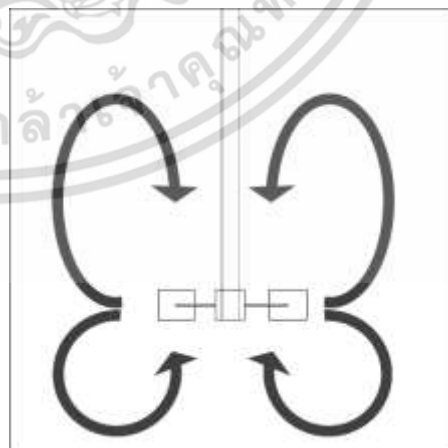
#### 2.1 ถังผสม [1]

กระบวนการผสมสามารถเกิดได้จากหลายกลไก เช่น วิธีการปั่นกวน วิธีการพ่นฟองแก๊ซ (sparging) วิธีการไหลผ่านแผ่นกั้น (static flow) ซึ่งวิธีการปั่นกวนในถังผสมนั้นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุด ถังกวนมักจะประกอบด้วย ใบพัดที่ติดตั้งอยู่บนเพลาหรือแกนหมุน (shaft) และสามารถเพิ่มแผ่นกั้น (baffles) และอุปกรณ์ภายในอื่น ๆ ได้ เช่น ตัวกระจายก๊าซ ขดลวด และท่อร่าง เป็นต้น

ใบพัดที่ใช้งานในถังผสมมีหลายชนิดตามการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใบพัดที่เหมาะสมกับสารที่มีความหนืดสูง รอบในการหมุนน้อย ใบพัดที่เหมาะสมกับการผสมของแข็ง เป็นต้น ซึ่งในการจำลองนี้ ใช้งานใบพัดแบบรัชตัน 6 ใบพัด (Six blade Rushton turbine) เป็นใบพัดแนวแกนรัศมี มีอัตราแรงเฉือนสูงเพราะมุมการเข้าปะทะของใบพัดต่อของไหล ความเร็วรอบที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 100-300 รอบ/นาที และไม่ต้องใช้ถังผสมที่สูงแบบใบพัดที่พัดในแนวแกน จากการจำลองการไหล 2 มิติ ของถังผสมชนิดจานใบพัดแบบรัชตัน 6 ใบพัด (Six blade Rushton turbine) แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 (ก) จะสังเกตเห็นว่าของไหลเข้าสู่ใบพัดจากด้านบนและด้านล่าง และถูกพัดออกในแนวแกนรัศมี ลักษณะของของไหลจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ด้วยการปั่นกวนจากใบพัดแสดงรูปแบบการไหลพอสังเขปดังรูปที่ 2.1 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 แบบจำลองการไหลของถังผสมชนิดใบพัดแบบรัชตัน 6 ใบพัด

(ก) แบบจำลองการไหล 2 มิติ จากโปรแกรมจำลอง [1] (ข) แบบจำลองการไหลพอสังเขป

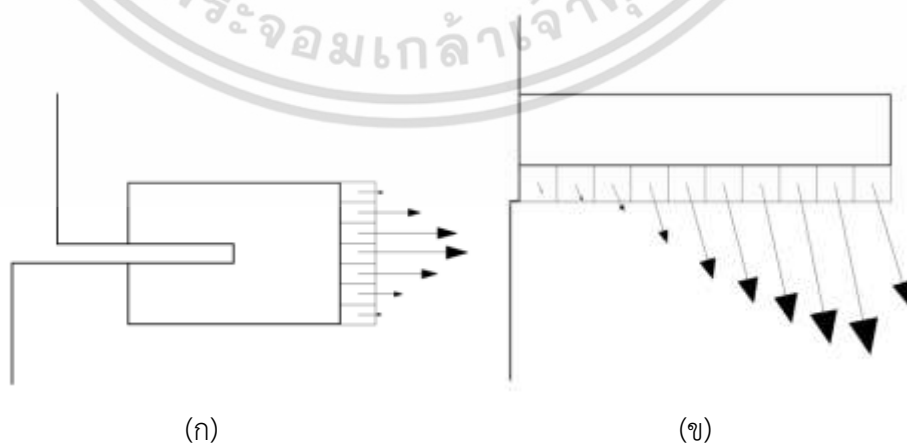
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะการไหลของของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ที่ต่างกันก็มีพฤติกรรมต่อใบพัดต่างกัน โดยของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงแบบราบเรียบ (Laminar) ของไหลจะถูกพัดทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีร่วมกัน ดังรูป 2.2 ส่วนของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงแบบปั่นป่วน (Turbulent) ของไหลจะพัดในแนวแกนและแนวรัศมีแยกกัน ดังรูป 2.3 โดยค่า Re ของถึงผสมสามารถคิดได้ดังสมการ (2.1) ซึ่งแตกต่างจาก Re ของของไหลในท่อหรือของไหลทั่วไป

$$Re = \frac{ND^2\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/วินาที)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางระยะใบพัด (เมตร)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/เมตร<sup>3</sup>)  
 $\mu$  คือ ค่าความหนืดพลวัต (ปาสกาล วินาที)

รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลของของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงราบเรียบที่กระทำต่อใบพัด [1]



รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลของของไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วงปั่นป่วนกระทำต่อใบพัด

(ก) ความเร็วในแนวรัศมี (ข) ความเร็วในแนวแกน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

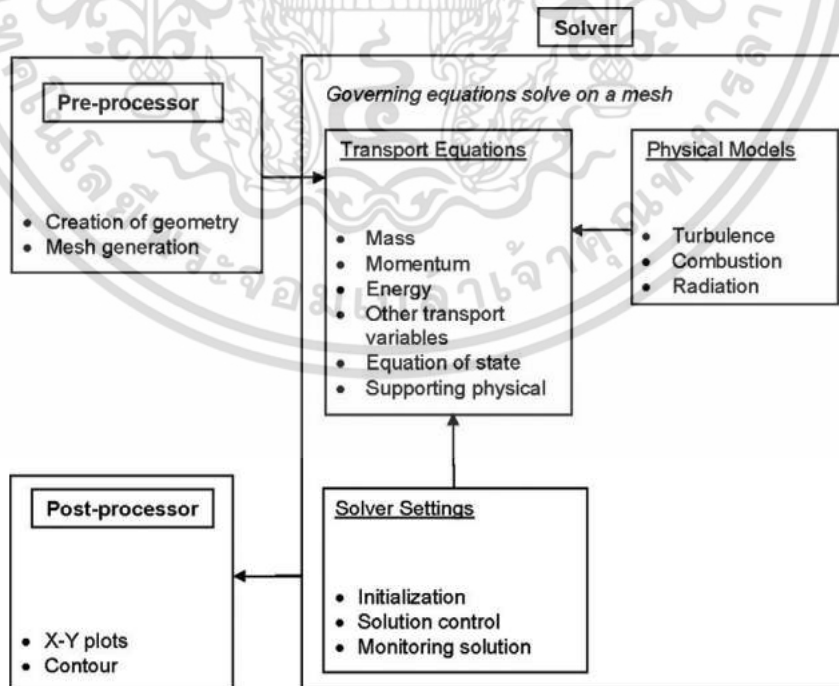
## 2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) [2]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมและงานวิจัยมานาน ในอดีตนิยมใช้ในงานวิศวกรรมขั้นสูงของอากาศยานและอวกาศ แต่ในปัจจุบันได้นำมาใช้แก้ปัญหาที่ซับซ้อนของการใช้งานในวิศวกรรม เช่น เข้าไปในพื้นที่อันตรายที่ที่ไม่คุ้นเคย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการทางเคมี โยธาและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการสร้างหรือปรับปรุงการออกแบบระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือการรวมกันของ พลศาสตร์ของไหล คณิตศาสตร์ และ วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งจะศึกษาพฤติกรรมการไหล และกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อของไหลประกอบไปด้วย การถ่ายเทความร้อนและปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้จากการไหล โดยอาศัยระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนสมการพลศาสตร์ของไหลที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต เพื่อคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

ในปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายเช่น เป็นวิธีในการศึกษาทำงานวิจัย เป็นอุปกรณ์การสอนพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน ออกแบบงานในวิศวกรรม วิศวกรรมการบินและอวกาศ วิศวกรรมยานยนต์ ชีวการแพทย์ วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม โลหะวิทยา กระบวนการเคมีและแร่ ความปลอดภัยเกี่ยวกับนิวเคลียร์ และเกี่ยวกับกีฬา เป็นต้น

โดยทั่วไปขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลักๆแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงองค์ประกอบหลักในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [2]

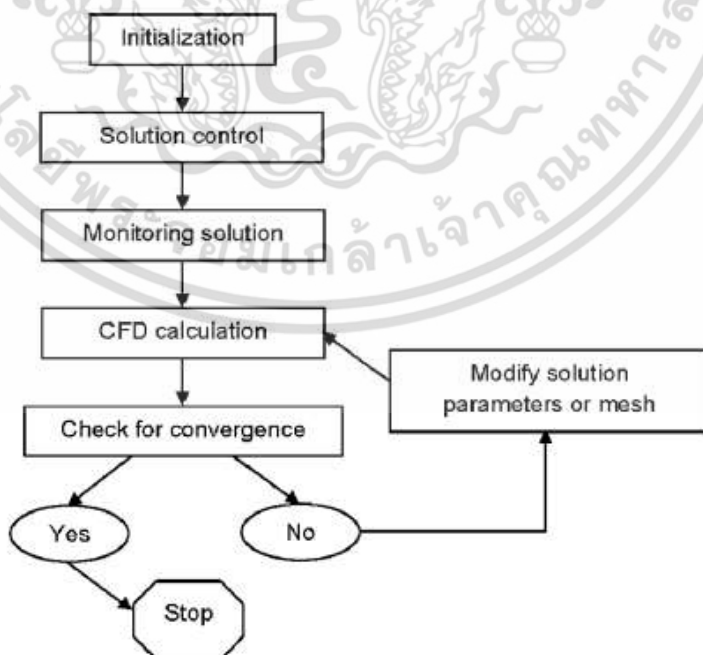
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processing)** คือขั้นตอนการเตรียมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการแก้ปัญหาการไหลในรูปแบบต่างๆก่อนการคำนวณ ประกอบไปด้วย

- การสร้างแบบจำลอง และแบ่งขอบเขตเป็นส่วนเล็กๆ ที่เรียกว่า เมช (mesh) หรือ กริด (Grid) ของรูปทรงที่ใช้ในการแก้ปัญหา
- เลือกรูปแบบการคำนวณและสมการหรือแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณที่สอดคล้องกับปัญหา รวมถึงนิยามสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด ความหนาแน่น เป็นต้น
- กำหนด สภาวะขอบเขต (Boundary conditions) ของปัญหา

**2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)** คือการเปลี่ยนสมการควบคุมให้อยู่ในสมการพีชคณิต และทำการคำนวณแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย

- การประมาณค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (Initialization) ความใกล้เคียงของค่าที่ประมาณกับคำตอบสุดท้าย ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และค่าที่ประมาณไม่เหมาะสม อาจนำไปสู่การคำนวณที่ผิดพลาด ตอนคำนวณซ้ำอาจเกิดการลู่ออก (Diverge) ของผลการคำนวณ
- การควบคุมวิธีการแก้ปัญหา (Solution control) เลือกรูปแบบการคำนวณของแต่ละหน้า (Face) ของเซลล์ปริมาตร เช่น First-order Upwind, Second-order Upwind, Second-order Central และ QUICK และสามารถทำให้ถูกต้องขึ้นอีกในกรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ ด้วยการคำนวณความดันและความเร็วผ่านสมการโมเมนตัม (Pressure-velocity Coupling) ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณที่นิยมเช่น SIMPLE, SIMPLER, และ PISO



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การตรวจสอบการลู่เข้า (Monitoring Convergence) เป็นขั้นตอนการกำหนดค่าการลู่เข้าหรือแสดงผลข้อมูลเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบผลการจำลอง
- การคำนวณ (Calculation) การคำนวณมีทั้งแบบโดยตรง (Direct methods) โดยเป็นขั้นพื้นฐานที่สุดสำหรับการแก้ระบบเชิงเส้นของสมการพีชคณิตโดยการลดรูปสมการ แต่ในวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative methods) เนื่องจากปัญหาของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมักจะมีขนาดใหญ่และเป็นสมการไม่เชิงเส้น

**2.2.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processing)** คือการแสดงผลข้อมูลหลังการคำนวณแบบจำลอง เครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลมีหลากหลายวิธีเช่น

- กราฟ x-y
- เวกเตอร์ (Vector)
- ภาพคอนทัวร์ (Contour)
- การติดตามอนุภาค (Tracer)
- อื่นๆ

## 2.3. สมการควบคุม (Governing equations) [2]

สมการควบคุมเป็นพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นชุดสมการที่ตั้งอยู่บนกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ซึ่งสมการที่ถูกลำเอียงได้แก่ กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่อของไหล และกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ กฎการอนุรักษ์พลังงาน อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มความร้อนให้ของไหล และอัตราของงานที่กระทำจากของไหล

2.3.1 สมการการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation) มวลไม่สามารถสร้างหรือทำให้หายไปได้ สมการสำหรับของไหลสามมิติแสดงดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.2)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

โดยที่

- $\rho$  คือ ความหนาแน่น
- $t$  คือ เวลา
- $u$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $x$
- $v$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $y$
- $w$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $z$
- $\mathbf{U}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของแกน สามารถแสดงได้ดัง  $\mathbf{U} = u \mathbf{i} + v \mathbf{j} + w \mathbf{k}$

ในกรณีของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ที่มีความหนาแน่นคงที่ แสดงได้สมการที่ (2.3)

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2.3)$$

หรือ

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

2.3.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation) อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่อของไหล แรงที่กระทำมี 2 ประเภท แรงกระทำต่อปริมาตรของไหล (Body Force) ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แรงโคลิโอริส และแรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงอีกชนิดหนึ่งคือแรงที่กระทำต่อพื้นผิวของของไหล (Surface Force) ประกอบด้วย แรงดัน (Pressure Forces) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการโมเมนตัมรูปแบบอนุรักษณ์ (Momentum Equation in Conservation Form) ในทิศทาง  $x$   $y$  และ  $z$  แสดงได้ดังสมการที่ (2.4-2.6)

$$\text{แนวแกน } x : \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{M_x} \quad (2.4)$$

$$\text{แนวแกน } y : \rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{M_y} \quad (2.5)$$

$$\text{แนวแกน } z : \rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{M_z} \quad (2.6)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดัน (Pressure)

$\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

$S_{MS}$  คือ เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum Source Terms)

**2.3.3 สมการพลังงาน (Energy equation)** จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ "พลังงานไม่มีการสูญหายหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ แต่พลังงานจะเปลี่ยนแปลงจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง" อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน เท่ากับ อัตราความร้อนสุทธิที่เพิ่มเข้าบวกอัตราของงานสุทธิที่ระบบให้ ซึ่งสมการพลังงานในรูปของพลังงานรวม (total energy,  $E$ ) ในทิศทาง  $x$   $y$  และ  $z$  แสดงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + S_E \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงานภายในและพลังงานจลน์

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$T$  คือ อุณหภูมิ

$S_E$  คือ แหล่งพลังงานอื่นๆ (Energy source terms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.4 สมการถ่ายเทมวล (Species Transport Equations)** สมการการถ่ายเทมวล เป็นสมการที่ใช้สำหรับคาดเดาเวลาที่ใช้ในการผสมหรือเกิดปฏิกิริยาเคมี สำหรับสารผสมชนิด  $i$  สมการอนุรักษ์สัดส่วนโดยมวลของสารผสม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = \nabla \cdot \left( -\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{J}_i + R_i + S_i \right) \quad (2.8)$$

โดยที่  $Y_i$  คือ สัดส่วนโดยมวลของสาร  $i$   
 $\bar{J}_i$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของสาร  $i$   
 $R_i$  คือ อัตราสุทธิของผลิตภัณฑ์สาร  $i$  โดยปฏิกิริยาเคมี  
 $S_i$  คือ เทอมของแหล่งกำเนิดของสาร  $i$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ  $J_i$  หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการไล่ระดับความเข้มข้นของสาร ณ จุดนั้น ส่วนในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน  $J_i$  จะรวมถึงการแพร่กระจายระยะป่วนซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่า Schmidt

## 2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นชุดสมการสำหรับของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluids) กล่าวคือ “แรงเค้นเฉือนในของไหลแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain) และเป็นของเหลวแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ซึ่งสมบัติของสารจะไม่ขึ้นกับทิศทาง สมการนาเวียร์-สโตกส์ จะประกอบไปด้วยสมการโมเมนตัม 3 สมการและสมการความต่อเนื่อง โดยความเค้นเฉือนจะเป็นไปตามกฎนิวตันของความหนืด (Newton’s law of viscosity) และความเครียดหนืด (viscous stress) แสดงดังสมการ

$$\tau_{xx} = -\lambda(\nabla \cdot \mathbf{U}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.9)$$

$$\tau_{yy} = -\lambda(\nabla \cdot \mathbf{U}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$\tau_{zz} = -\lambda(\nabla \cdot \mathbf{U}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.12)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity Coefficient)

$\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง (Second Viscosity Coefficient)

ซึ่งสโตกส์สร้างสมมติฐานว่า  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$

เมื่อแทนค่าความเค้นเฉือนลงในสมการโมเมนตัมในรูปแบบอนุพันธ์ ในสมการ (2.4-2.6) และความสัมพันธ์จากสมการความต่อเนื่อง ในสมการ (2.2) สามารถเขียนเทอม สมการนาเวียร์-สโตกส์ในระบบสามมิติ ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ

$$\text{แนวแกน } x: \quad \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \quad (2.15)$$

$$\text{แนวแกน } y: \quad \rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \quad (2.16)$$

$$\text{แนวแกน } z: \quad \rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \quad (2.17)$$

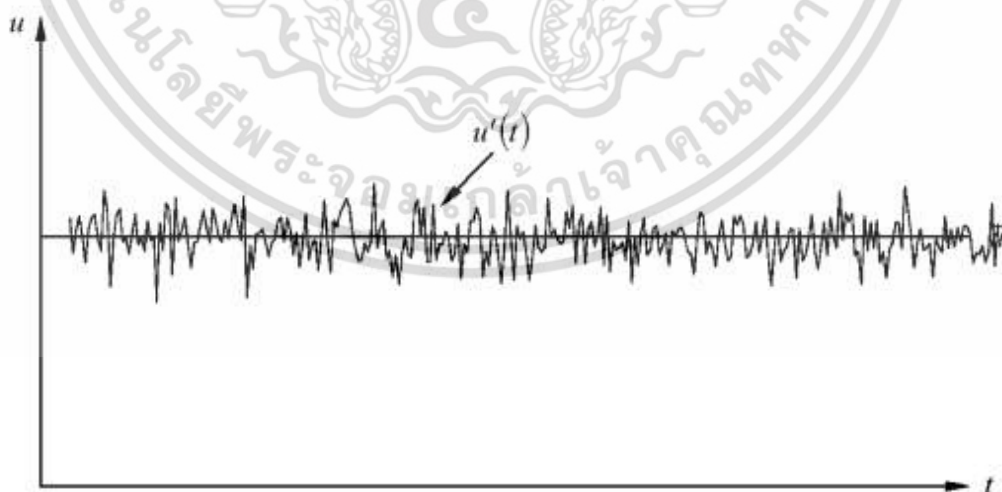
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence and Turbulence model) [2]

ลักษณะการไหลสามารถแบ่งเป็น 3 แบบ ตามช่วงของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของ แรงเฉื่อย (Inertia force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) ประกอบไปด้วยรูปแบบแรก การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลรูปแบบที่สอง แบบทรานซิชัน (Transition) เป็นช่วงการเปลี่ยนรูปแบบการไหลจากราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน และรูปแบบสุดท้าย การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) เกิดจากมีการรบกวนระบบของการไหล ทำให้เกิดการไหลที่ยุ่งเหยิง และไม่มีแบบแผน (Random) การรบกวนนั้นอาจเกิดจากการไหลของของไหลเองหรือพื้นผิวที่ขรุขระ (Roughness)

การเกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ซึ่งถูกแสดงในรูปของค่า  $Re$  โดยธรรมชาติการรบกวนระบบจะค่อยๆ ลดลงและค่อยๆ สลาย ส่งผลให้การไหลกลับสู่การไหลแบบราบเรียบอย่างเดิม การไหลที่  $Re$  สูงๆ ค่าความเฉื่อยจะขยายตัวแปร การรบกวน และเปลี่ยนไปเป็นการเกิดการปั่นป่วน การเคลื่อนที่จะเป็นแบบไม่คงตัว (Unsteady) แม้ว่าสภาวะขอบเขตจะคงที่ ความเร็วและคุณสมบัติการไหลอื่นๆ จะมีทิศทางที่ยุ่งเหยิง (Chaotic) และไม่มีแบบแผน (Random) แสดงตัวอย่างการวัดความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังรูป 2.6 ค่าที่ผันผวนยากต่อการคำนวณจึงจำเป็นต้องจำลองความเร็วจริงที่เกิดขึ้น คือค่าความเร็วผันผวน ( $U'(t)$ ) เมื่อบวกกับค่าความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{U}$ ) จะได้ค่าความเร็วที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$(U(t) = \bar{U} + U'(t)) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.6 ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations: RANS)

การไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณด้วย คุณสมบัติการไหลฉับพลัน ( $\varphi$ ) (Instantaneous Flow Property) ซึ่งเป็นผลรวมของคุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา ( $\bar{\varphi}$ ) (Time-averaged Flow Property) และคุณสมบัติของของไหลผันผวน ( $\varphi'$ ) (Fluctuating Flow Property) แสดงดังสมการที่ (2.19)

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (2.19)$$

ซึ่งนิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล ( $\bar{\varphi}$ ) และเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง ( $\varphi'$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (2.20)-(2.21)

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2.20)$$

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.21)$$

การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds Decomposition) ของความดัน เวกเตอร์ความเร็วและความเร็วในแนวแกน x y และ z สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.20)-(2.21)

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2.22)$$

$$\mathbf{U}(t) = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{U}'(t) \quad (2.23)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.24)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (2.25)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2.26)$$

การไหลเฉลี่ยที่มีอิทธิพลของการแกว่งสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ (2.22-2.26) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของเวลาเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (2.20-2.21)

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของไหลอัดตัวได้แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{U}}) = 0 \quad (2.28)$$

สมการโมเมนต์สำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวไม่ได้ที่ความหนืดคงที่แสดงสมการได้ดังนี้

แนวแกน x :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\bar{u}\bar{w}) \\ &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial z^2} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ } \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{u}) + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\nabla^2\bar{u} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2.30)$$

แนวแกน y :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{v}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\bar{v}\bar{w}) \\ &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial y^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial z^2} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ } \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\nabla^2\bar{v} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2.32)$$

แนวแกน z :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{w}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\bar{w}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\bar{w}^2) \\ &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial y^2} + \mu\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial z^2} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho\overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho\overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\overline{(w')^2}) \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{\mathbf{U}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{Mz} \quad (2.34)$$

เรียกสมการที่ (2.29–2.34) ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations: RANS) ซึ่งเทอมในวงเล็บที่เพิ่มขึ้นมาเกี่ยวข้องกับความเร็วผันผวน เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ความเค้นปั่นป่วนพิเศษ (Extra Turbulent Stresses) สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นป่วนพิเศษ นี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stresses) Boussinesq ได้เสนอสมการความเค้นเรย์โนลด์ที่สามารถเชื่อมโยงกับความเร็วเฉลี่ยได้ ดังสมการ

$$\bar{\tau}_{ij}^{(r)} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.35)$$

โดยที่  $\mu_t$  คือความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity) หรือเรียกว่า ความหนืดหมุนวน (Eddy Viscosity) ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.35) ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.29-2.34) ได้ในรูปของสมการที่ (2.36-2.38) ดังนี้

แนวแกน x:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{\mathbf{U}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{u} + S_{Mx} \quad (2.36)$$

แนวแกน y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{\mathbf{U}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (2.37)$$

แนวแกน z:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{\mathbf{U}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (2.38)$$

โดยที่  $\mu_{eff}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพความหนืด (Effective Viscosity) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k – epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k – epsilon เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง และเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้รับความนิยมในการจำลอง เนื่องจากมีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนเกินไป ประกอบด้วยชุดสมการการถ่ายโอน 2 ชนิดก็คือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy,  $k$ ) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy,  $\varepsilon$ ) ถูกคิดค้นโดย Launder และ Spalding ในปี 1974 พลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ ) คำนวณได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.40)$$

อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$ ) คำนวณได้จาก

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.41)$$

โดยที่

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$G_k$  คือ การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  คือ การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

$Y_M$  คือ บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

$\mu_t$  คือ ความหนืดความปั่นป่วน

$a$  คือ ความเร็วเสียงในอากาศ เมื่อ  $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$

$\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  คือตัวเลขพรีนดิเทิลปั่นป่วนสำหรับ  $k$  และ  $\varepsilon$

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  และ  $C_{3\varepsilon}$  คือค่าคงที่ เมื่อ  $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$

$S_k$  และ  $S_\varepsilon$  คือ เทอมแหล่งกำเนิด

และค่าคงที่ต่างๆแสดงค่าตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B.N. Murthy และคณะ [3] ทำการทดลองในถังปั่นกววนแบบมีแผ่นกั้นที่ใบพัดหลายชนิด เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon แบบ Reynolds Stress Model (RSM) และ แบบ Large Eddy Simulation (LES) ที่ 8 ความสูงตลอดถึงผสม พบว่าที่ชนิดใบพัดแบบรัชทัน ค่าความเร็วในแนวแกนที่แบบจำลองทั้ง 3 แบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าการทดลอง ที่ค่าความเร็วในแนวรัศมี แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RSM และ LES สามารถทำนายค่าในการทดลองได้ทุกๆ ความสูง ในขณะที่แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon มีความแตกต่างกับการทดลองในทุกๆ ความสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเหนือใบพัด และค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RSM และ LES สามารถจำลองได้ค่อนข้างดี ส่วนแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon ผลการจำลองส่วนใหญ่เบี่ยงเบนจากการทดลองในบริเวณใกล้ใบพัด ส่วนค่าพลังงานความปั่นป่วนแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RSM และ Standard k-epsilon ที่บางช่วงความสูงมีแนวโน้มเดียวกันกับการทดลอง แต่ผลการจำลองของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ LES สามารถทำนายในการทดลองได้ดีในทุกๆ ความสูง แต่การจำลองความปั่นป่วนแบบ LES จำเป็นต้องมีทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่สูง และจากการคำนวณค่า Power number ที่คำนวณจากค่าแรงบิด (Torque) ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ เปรียบเทียบค่ากับการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1 พบว่าที่แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon แบบ RSM และ แบบ LES มีค่าเท่ากับ 4.9 5.0 และ 5.1 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับการทดลอง

W. Huang และคณะ [4] ทำการจำลองถึงผสมแบบมีแผ่นกั้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ B.N. Murthy และคณะ [3] โดยแบ่งเมชในถังผสมออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกครอบคลุมบริเวณเหนือและใต้ใบพัดขนาด 1.5 เท่าของความสูงใบพัด ส่วนที่สองครอบคลุมบริเวณที่เหลือในถังผสม โดยมีจำนวนเมช 88128 เซลล์ ( $r \times \theta \times z = 24 \times 204 \times 18$ ) และ 1,652,532 เซลล์ ( $r \times \theta \times z \approx 63 \times 204 \times 126$ ) ตามลำดับ

M. Karimi และคณะ [5] ศึกษาการจำลองการไหลในถังผสมพบว่าควรกำหนดระยะเมชชั้นแรกที่ติดผนังถึงผสม ใบพัด และเพล่าให้มีขนาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งที่  $y^+$  น้อยกว่า 5 เป็นขนาดที่งานวิจัยนี้แนะนำ แต่ในงานวิจัยที่ทำการศึกษากำหนด  $y^+=6$  เนื่องจากเมชที่มีคุณภาพควรมีการขยายขนาดไม่เกิน 2 เท่าของเมชก่อนหน้า เมชชั้นแรกที่ขนาดเล็กจะส่งผลให้จำนวนเมชรวมมีจำนวนที่มากจึงทำการเพิ่มขนาดเมชชั้นแรกขึ้น

D.A. Deglon และคณะ [6] ศึกษาการจำลองถึงปั่นกววนแบบมีแผ่นกั้น 4 แผ่น ชนิดใบพัดแบบรัชทัน โดยการจำลองครึ่งถัง (2 แผ่นกั้น ใบพัด 3 ใบ) ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon คำนวณการเชื่อมโยงของความเร็วและความดัน (Pressure-velocity Coupling) ด้วยระเบียบวิธี SIMPLEC เพื่อคำนวณหาจำนวนเมชที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นใบแจ้งประโยชน์ในการนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสม ส่งผลให้การจำลองใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับ ค่า Power number ความเร็วในแนวรัศมี ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส และค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy)

เอกราช บำรุงชัยชาญ [7] ได้กล่าวถึงการเลือกรูปแบบเชิงตัวเลขของการหาค่าพื้นที่ผิวที่เหมาะสมกับลักษณะเมช รูปแบบเชิงตัวเลขแบบ Second order Upwind คำนวณจากจุดกึ่งกลางเมชของเมชชั้นทาง 2 เซลล์ มีความถูกต้องมากกว่า First order Upwind สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลาย และรูปแบบเชิงตัวเลขแบบ QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) คำนวณจากจุดกึ่งกลางเมช ของเมชชั้นทาง 2 เซลล์ และจุดกึ่งกลางเมชของเมชปลายทาง 1 เซลล์ มี เป็นรูปแบบที่มีความถูกต้องมาก แต่ในบริเวณที่มีเกรเดียนต์สูงจะทำให้เกิดความไม่เสถียรของการหาผลเฉลย

C. Akapivat [8] จำลองถึงผสมแบบไม่มีแผ่นกั้น ใบพัดแบบรัศมี 6 ใบพัด โดยเปรียบเทียบกับ การทดลองของ C. Vella และคณะ เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างการจำลองถึงผสมเต็มถึง และ 1/6 ของถึงผสมโดยเหตุการณ์จำลองแบบ periodic ใน พบว่าผลของการจำลองไม่มีความแตกต่างกัน และศึกษารูปแบบการไหลและเวลาในการผสมของถึงผสมที่มีจำนวนช่องบนใบพัดตั้งแต่ 1 -3 ช่อง ที่ส่งผลให้ใช้เวลาในการผสมน้อยที่สุด

A. Wongnui และคณะ [9] ศึกษาปัจจัยการเพิ่มขนาดใบพัดเป็น 2 เท่า และขนาดแผ่นดิสในถึงผสมขนาดเดียวกับ C. Akapivat [8] ได้ทำการศึกษา เพื่อศึกษารูปแบบการไหล และเวลาในการผสม พบว่าอัตราส่วนของค่าพลังงานความปั่นป่วนต่ออัตราการสลายตัวของความปั่นป่วนที่น้อยกว่า แสดงถึงความสามารถในการผสมที่มากขึ้น

Z. Driss และคณะ [10] จำลองรูปแบบการไหลแบบราบเรียบในถึงผสมแบบไม่มีแผ่นกั้น ด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite Volume คำนวณการเชื่อมโยงของความเร็วจและความดัน (Pressure-Velocity Coupling) ด้วยระเบียบวิธี SIMPLE โดยการศึกษา รูปแบบการไหลเมื่อเพิ่มจำนวนจานใบพัดแบบรัศมีจำนวน 4 ใบพัดจาก 1 เป็น 2 และ 3 ที่เพลลาเดียวกัน ที่ช่วงความสูงต่างๆของถึงผสม พบว่ารูปแบบการไหลของถึงผสมจะเพิ่มบริเวณการหมุนวนเหนือและใต้จานใบพัดตามจำนวนจานใบพัดที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ให้ความเห็นว่าจานใบพัด 2 จานเพียงพอต่อการเพิ่มจานใบพัดในถึงผสม ส่วนในการทดลองได้ทำการทดลองในถึงผสมที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น โดยใช้ค่า Power number ( $N_p$ ) เป็นตัวแสดงความสามารถในการปั่นกววน พบว่าที่การไหลแบบราบเรียบค่า  $N_p$  ไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน แต่ที่การไหลแบบปั่นป่วนค่า  $N_p$  ของถึงผสมที่มีแผ่นกั้นมีค่าสูงกว่ามาก และได้ทำการทดลองจำนวนใบพัดที่ 4 และ 6 ใบ บนจานใบพัดแบบรัศมีในถึงผสมที่มีแผ่นกั้น พบว่าจำนวนใบพัดที่ 6 ใบ มีค่า  $N_p$  สูงกว่าในทุกช่วงความเร็ว

J. Karcz และคณะ [11] ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่า Power Number ( $N_p$ ) กับ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 10,000 ถึง 200,000 ที่ความยาวของแผ่นกั้นในถังผสมขนาด 0 1/3 1/2 2/3 5/6 และ 1 ของความสูงถังผสม โดยทำการศึกษาที่ใบพัดชนิด Rushton ชนิด Smith ชนิด Pitched blade และชนิด propeller พบว่าสามารถแบ่งช่วงสมการเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ความยาวแผ่นกั้นไม่เกินครึ่งถัง และช่วงที่ความยาวแผ่นกั้นเกินครึ่งถังของใบพัดชนิดต่างๆ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้สรุปได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างบริเวณใบพัดและแผ่นกั้น ของถังผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม ส่วนบริเวณแกนเพลานี้ไม่พบการศึกษา ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนบริเวณเพลานี้ โดยศึกษาผลกระทบจากเกลียวที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

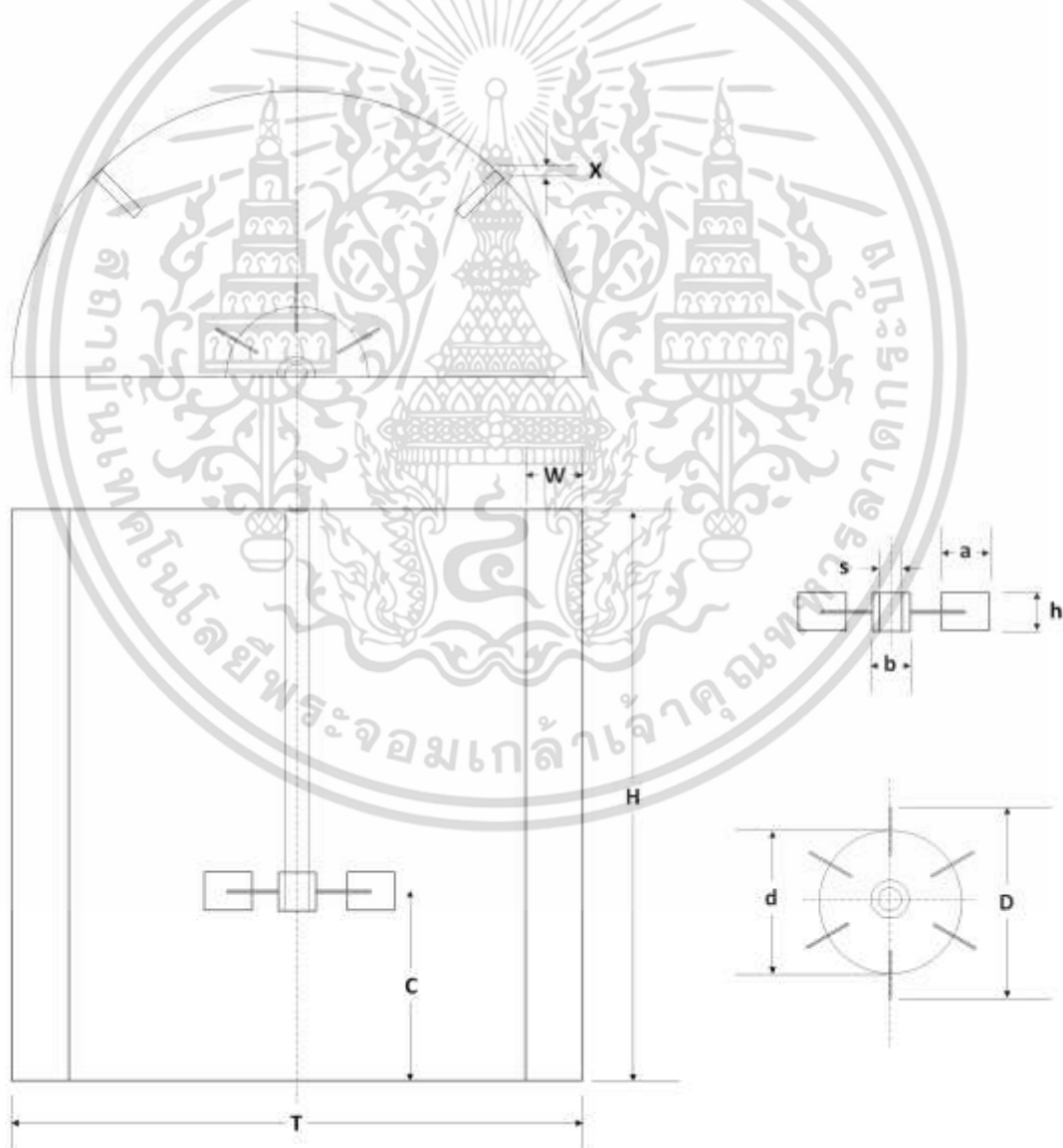
## บทที่ 3

# การออกแบบและการคำนวณการไหลภายในถังผสม

### 3.1 การสร้างแบบจำลอง

#### 3.1.1 ขนาดและรูปทรงของถังผสม

ถังผสมรูปทรงสามมิติ จำลองด้วยโปรแกรม Gambit ถังผสมแบบมีแผ่นกั้น (baffled tank) 4 แผ่น มีฝาปิด ใบพัดชนิดรัชตัน 6 ใบพัด (Six blade Rushton turbine) ถังมีความสูง 0.3 เมตร อ้างอิงขนาดถังผสมจากการทดลองของ B.N. Murthy, J.B. Joshi. [3]. โดยในงานวิจัยนี้จำลองถังผสมครึ่งถัง รายละเอียดต่างๆของถังผสมแสดงดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพโครงสร้างของถังผสมในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนขนาดของถังผสม

H/T	C/T	W/T	X/W	D/T	d/D	a/D	h/D	b/D	s/b
1	1/3	1/10	1/5	1/3	3/4	1/4	1/5	1/5	3/5

### 3.1.2 เมชของถังผสม

งานวิจัยนี้ได้จำลองโดยแบ่งถังผสมเป็น 2 ส่วน คือบริเวณที่หมุน (Moving zone) และบริเวณที่คงที่ (Stationary zone) โดยบริเวณที่หมุนนั้นจะมีพื้นที่ครอบคลุมบริเวณใบพัดที่ระยะ 1.5 เท่าของความสูงใบพัด สำหรับเมชของถังผสมอ้างอิงใช้เมชรูปทรงหกหน้า (Hexahedron grid cells) จำนวนรวม 475,515 เซลล์ เมชในบริเวณที่หมุนมีจำนวน 233,773 เซลล์ ( $r \times \theta \times z = 54 \times 70 \times 62$ ) และบริเวณที่คงที่มีจำนวน 241,742 เซลล์ ( $r \times \theta \times z = 44 \times 62 \times 89$ ) บริเวณใกล้ผนัง ใบพัด จาน และเพลลา จะถูกออกแบบให้เมชมีความละเอียดสูง เนื่องจากบริเวณนี้มีความเร็วและแรงเฉือนสูง โดยเมชชั้นแรกมีความหนา 0.01 มิลลิเมตร ( $y+ = 6$ ) ชั้นต่อไปมีการขยายขนาด 1.2 - 2 เท่า การจำลองนี้ได้ทำอินเตอร์เฟซระหว่างบริเวณที่หมุนและคงที่ และบริเวณพื้นที่รอบๆเพลลา เพื่อการสร้างเมชรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron grid cells) บริเวณเกลียวของเพลลาในงานวิจัย

### 3.1.3 สมมติฐานสำหรับการสร้างแบบจำลอง

ชนิดของไหลที่ใช้การจำลองเป็นของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่ และเป็นสารชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) ของไหลที่ใช้ในการจำลอง คือ น้ำที่อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน) มีความหนืด 0.001 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที และมีความหนาแน่น 998.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนั้น ถังผสมมีลักษณะสมมาตรที่  $1/2$  ของถังผสม ในการจำลองกำหนดให้พฤติกรรมของไหลในถังผสมมีรูปแบบการไหลเหมือนกันทั้งสองด้านเพื่อการจำลองครึ่งถังโดยตั้งค่าแบบ Periodic ใช้สมการการคำนวณปั่นป่วนในการจำลอง กำหนดสภาวะขอบเขตให้ผิวของถังผสมไม่มีค่าความเร็ว

### 3.1.4 การกำหนดวิธีการเชิงตัวเลข

คำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT ที่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite Volume ใช้สมการแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon คำนวณการเชื่อมโยงของความเร็วและความดัน (Pressure-Velocity Coupling) ด้วยระเบียบวิธี SIMPLEC และใช้รูปแบบการประมาณค่า gradient แบบ Least squares cell based ใช้การประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบ Second order ในการคำนวณหาความดัน และแบบ Second order upwind ในการคำนวณหาโมเมนตัม พลังงานจลน์ ความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy) และ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulence dissipation rate)

### 3.2 ศึกษาตัวแปรของเกลียวของเพลลา

ศึกษาความลึก องศา และจำนวนของเกลียวที่แตกต่างกันที่ส่งผลให้มีรูปแบบการผสมที่ต่างกันดังตารางที่ 3.2 และแสดงรูปตัวอย่างดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองเกลียวที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของเกลียวเพลลา

	จำนวน เกลียว	องศา	ความลึก (มิลลิเมตร)	ความลึก (อัตราส่วน)
อ้างอิง (r=6 มิลลิเมตร)	0	0	0	0
10 – 45 – 1.5	10	45	1.5	1/4
10 – 45 – 3	10	45	3	1/2
10 – 60 – 1.5	10	60	1.5	1/4
10 – 60 – 3	10	60	3	1/2
6 – 45 – 1.5	6	45	1.5	1/4
6 – 45 – 3	6	45	3	1/2
6 – 60 – 1.5	6	60	1.5	1/4
6 – 60 – 3	6	60	3	1/2



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างเพลลาเกลียว 10-60-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ศึกษาเวลาผสมของถังผสม

เวลาในการผสม (Mixing time) คำนวณได้จากเวลาการกระจายตัวของสารติดตามในถังผสม โดยวัดจากความเข้มข้นที่วัดได้จากจุดวัด 30 จุดดังตารางที่ 3.3 โดยจะใช้เวลาที่ช้าที่สุดของจุดวัดที่มีความเข้มข้นแตกต่างจากความเข้มข้นสมดุลไม่เกิน 5 % เป็นเวลาในการผสม เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (3.1) โดยสารติดตามที่ใช้มีคุณสมบัติเหมือนสารที่ใช้ในการจำลอง

$$t_{95\%} = \left| \frac{c - \bar{c}}{\bar{c}} \right| \leq 0.05 \quad (3.1)$$

โดยที่  $c$  คือความเข้มข้นที่ตำแหน่งใดๆ

$\bar{c}$  คือความเข้มข้นเฉลี่ยของทั้งระบบที่จุดสมดุล

ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งจุดวัดการกระจายตัวของสาร

x (เมตร)	y (เมตร)	จุดที่	z (เมตร)	จุดที่	z (เมตร)	จุดที่	z (เมตร)
0.03	0	1	0.03	11	0.2	21	0.28
0	0.03	2	0.03	12	0.2	22	0.28
0.05	0	3	0.03	13	0.2	23	0.28
0	0.05	4	0.03	14	0.2	24	0.28
0.075	0	5	0.03	15	0.2	25	0.28
0	0.075	6	0.03	16	0.2	26	0.28
0.1	0	7	0.03	17	0.2	27	0.28
0	0.1	8	0.03	18	0.2	28	0.28
0.12	0	9	0.03	19	0.2	29	0.28
0	0.12	10	0.03	20	0.2	30	0.28

### 3.4 ศึกษาการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาในถังผสม

ศึกษาความแตกต่างของผลจำลองการไหลในถังผสมระหว่างการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาเกลียว โดยใช้เวลาที่ใช้ในการผสมและพลังงานเป็นตัวเปรียบเทียบความสามารถของการผสม

## บทที่ 4

### ผลและการวิเคราะห์ผลจำลอง

#### 4.1 ผลการศึกษาจำนวนเมฆที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง และการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองอ้างอิง

จากการคำนวณการไหลภายในถังผสมที่ความละเอียดเมฆที่ต่างกันดังตารางที่ 4.1 และแสดงดังรูปที่ 4.1-4.3 เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ B.N. Murthy และคณะ [3]. โดยเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า Power number ( $N_p$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (4.1) กับค่าการทดลองที่ใช้อ้างอิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1 แสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.2 พบว่าที่ความหนาแน่นเมฆ  $1x$  มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.38 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity) ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส (tangential velocity) และค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy) ที่ระยะความสูง 0.01 0.044 0.082 0.1 0.118 0.154, 0.19 และ 0.244 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 ตามลำดับ

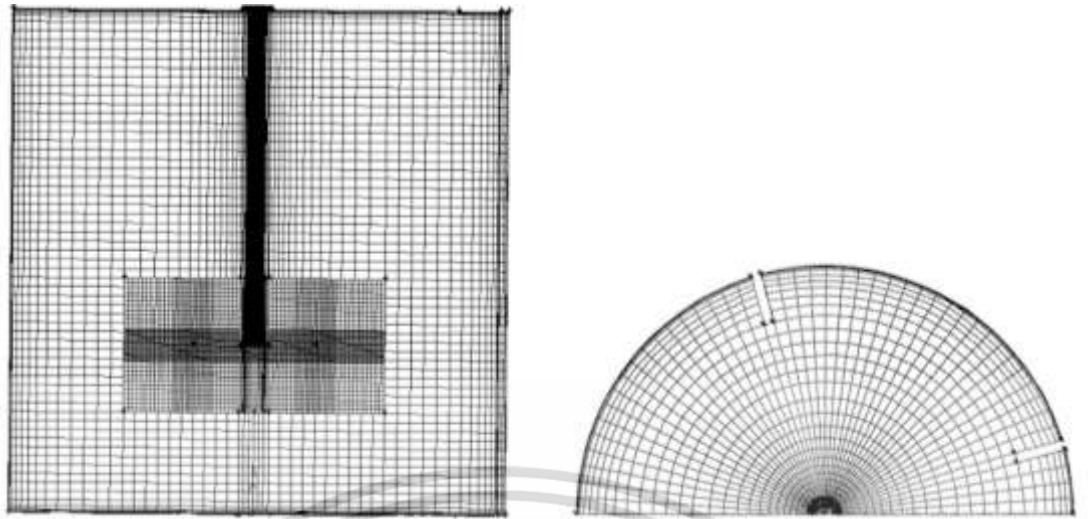
$$N_p = \frac{2\pi N \tau}{\rho N^5 D^3} \quad (4.1)$$

โดยที่  $N$  คือ ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อวินาที)  
 $\tau$  คือ แรงบิด (นิวตันเมตร)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางระยะใบพัด (เมตร)

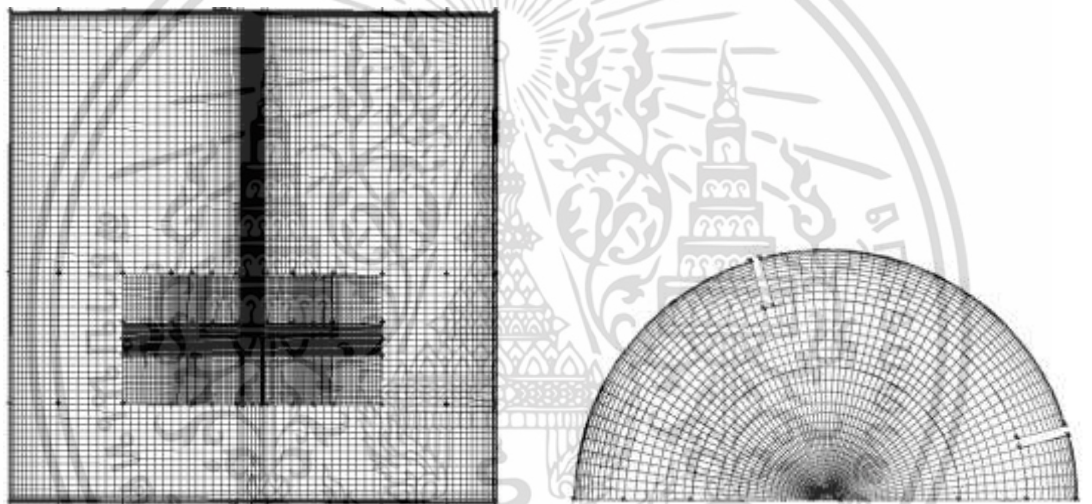
ตารางที่ 4.1 จำนวนเมฆที่ศึกษาที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลง

ความหนาแน่นเมฆ	Moving Zone ( $r \times \theta \times z$ )	Stationary zone ( $r \times \theta \times z$ )	จำนวนเมฆรวม (เซลล์)
0.75 x	41 x 52 x 46	33 x 48 x 67	186,701
1 x	54 x 70 x 62	44 x 62 x 89	475,515
1.25 x	67 x 88 x 78	54 x 76 x 112	867,683

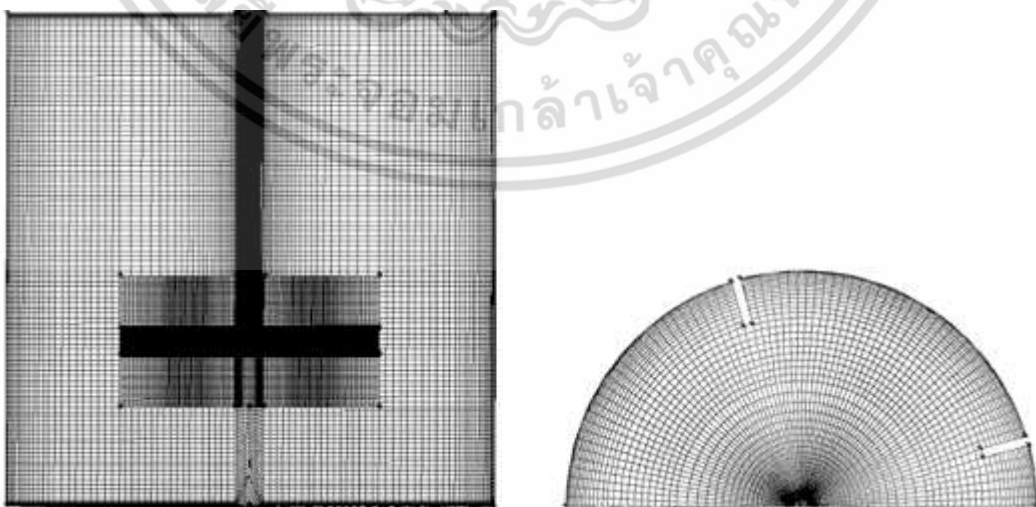
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ภาพจำลองถึงผสมที่เมซจำนวน 186,701 เซลล์ (ความหนาแน่นเมช 0.75x)



รูปที่ 4.2 ภาพจำลองถึงผสมที่เมซจำนวน 475,515 เซลล์ (ความหนาแน่นเมช 1x)



รูปที่ 4.3 ภาพจำลองถึงผสมที่เมซจำนวน 867,683 เซลล์ (ความหนาแน่นเมช 1.25x)

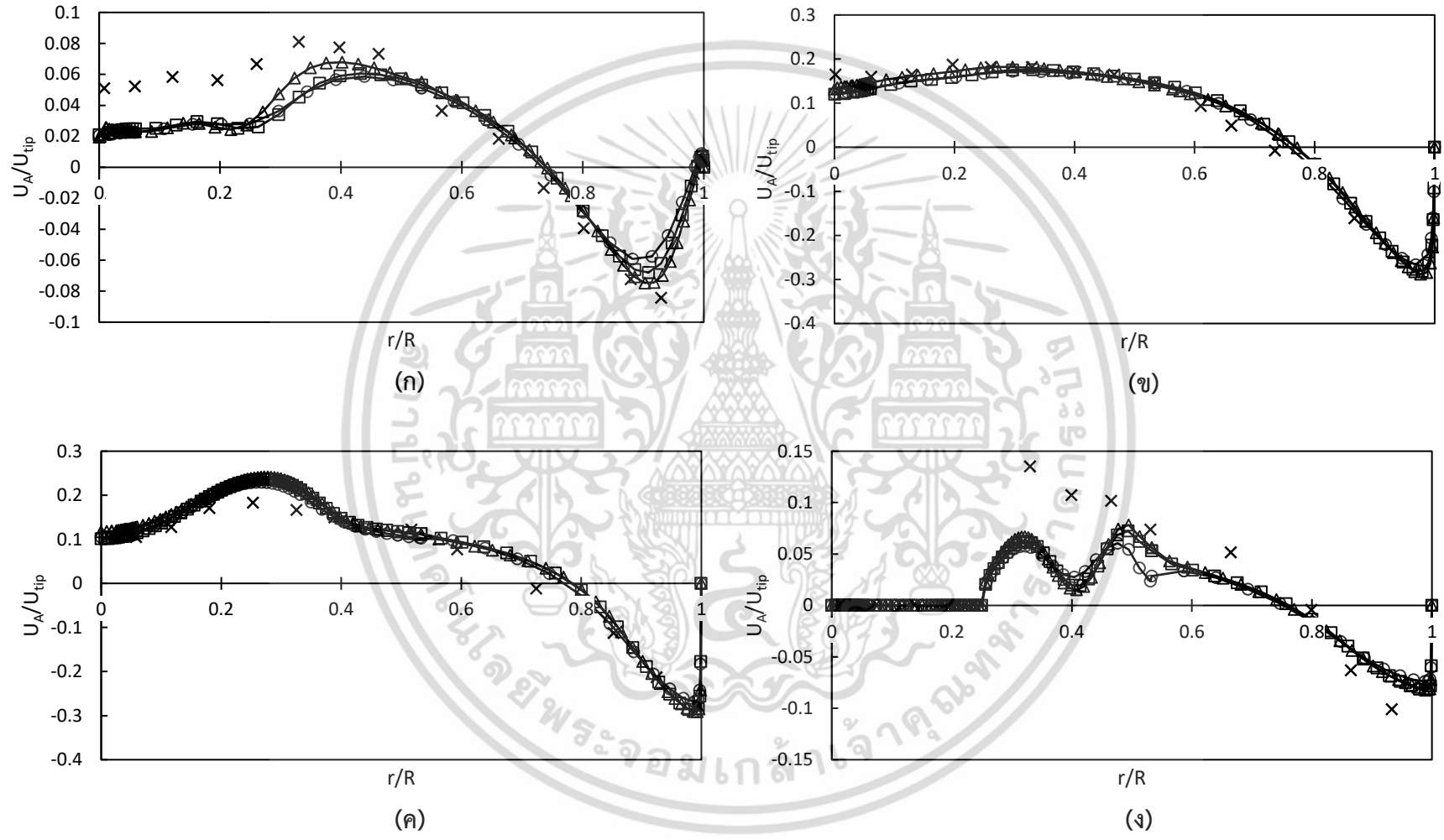
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า  $N_p$  ที่ความละเอียดเมชต่างๆ

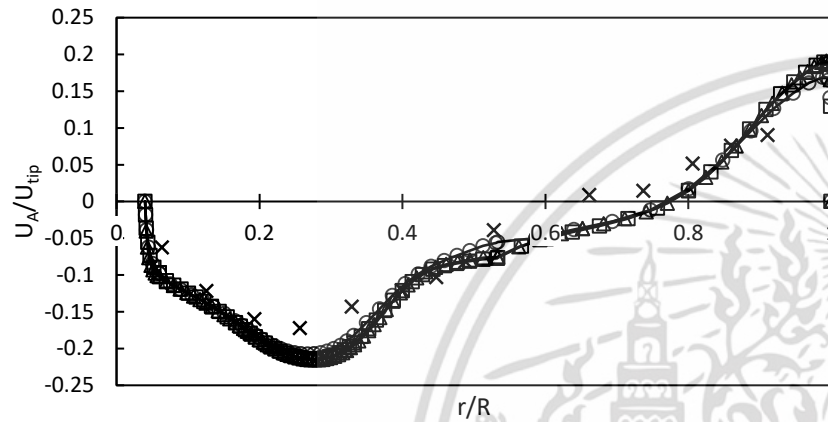
ความหนาแน่นเมช	$N_p$	ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน
0.75 x	5.43	6.56
1 x	5.37	5.38
1.25 x	5.39	5.74

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความเร็วในแนวแกนของการจำลองจากเมชทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในขณะที่ความสูง 0.01 เมตร และ 0.244 เมตร มีความแตกต่างไปจากที่ความสูงอื่นๆ เนื่องจากความสูงในบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ใกล้กับก้นถังและฝาดัง ซึ่งทำให้ผลกระทบจากค่าความขรุขระของวัสดุที่ใช้แตกต่างกันระหว่างการทดลองและการจำลองมีค่าที่มากขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ค่าที่ได้จากการจำลองมีขนาดความเร็วที่น้อยกว่าการทดลอง จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงค่าความเร็วในแนวรัศมีตามความสูงต่างๆของถัง พบว่าที่ความหนาแน่นเมช 1.25x และ 1x ให้ผลการจำลองได้ดีกว่าที่ความหนาแน่น 0.75x โดยที่ระดับความสูงใต้ใบพัด ในระยะรัศมีน้อยกว่า 0.4 เมตร ให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากการทดลองมากกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากการจำลองจะให้ผลที่เป็นไปตามปรากฏการณ์ของการหมุน คือ ค่าความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณกึ่งกลางของการหมุน จึงทำให้ผลในการจำลองมีค่าที่น้อยกว่าการทดลอง จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสบางช่วงความสูงของผลการจำลองของทุกความหนาแน่นเมชมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับการทดลอง และค่าพลังงานความปั่นป่วนของการจำลองที่บางช่วงความสูงมีแนวโน้มเดียวกันกับการทดลอง แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง แสดงดังรูป 4.7 ทั้งนี้ เนื่องจากการจำลองนี้ใช้เพียงสมการความปั่นป่วน Standard k-epsilon ในการคำนวณหาค่าพลังงานความปั่นป่วน ซึ่งลดทอนความเป็นธรรมชาติของความปั่นป่วนลงไป ตามที่แสดงผลในงานวิจัยของ B.N. Murthy และคณะ [3] ซึ่งพบว่าการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ LES จะให้ผลจากการจำลองค่าพลังงานความปั่นป่วนที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองแบบ RSM และ Standard k-epsilon

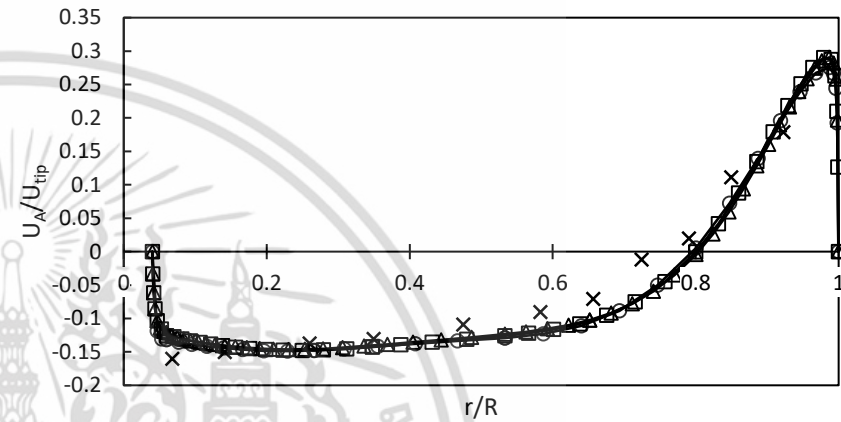
จากผลการจำลองในข้างต้น พบว่าผลการจำลองจากเมชที่ความหนาแน่น 1.25x และ 1x มีค่าไม่แตกต่างกันมาก และให้ค่าที่เข้าใกล้กับการทดลองมากกว่าความหนาแน่นเมช 0.75x แต่เมื่อพิจารณาถึงเมชที่มีความหนาแน่น 1.25x ที่มีจำนวนเมชที่เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าจาก 475,515 เซลล์ เป็น 867,683 เซลล์เมื่อเทียบกับความหนาแน่น 1x รวมกับการคำนวณค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่า Power number เทียบกับการทดลอง ที่เมชความหนาแน่น 1x มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.38 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมชที่ความหนาแน่น 1x ที่มีจำนวนเมช 475,515 เซลล์ สำหรับการศึกษาในหัวข้ออื่นๆต่อจากนี้



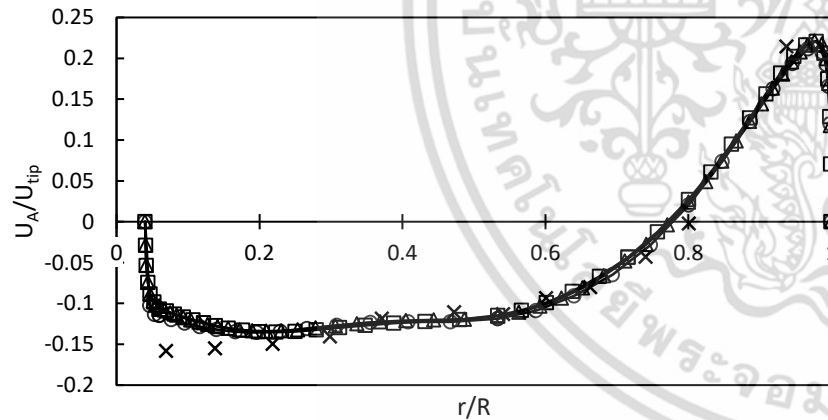
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวแกน ( $U_A/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช 0.75x (—○—) 1x (—■—) 1.25x (—▲—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ซ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



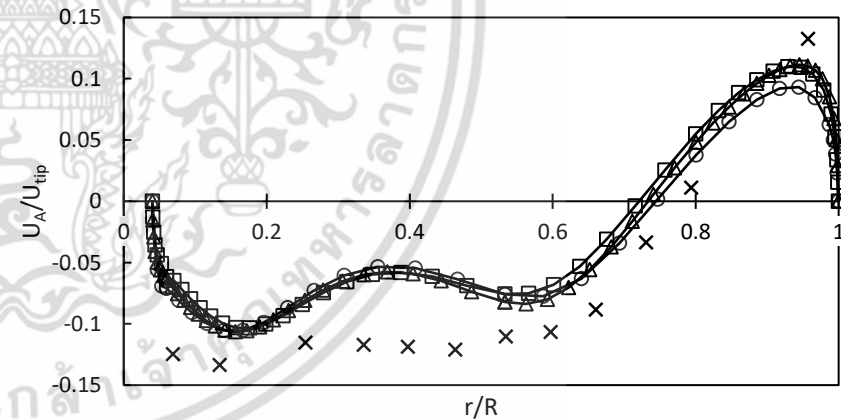
(จ)



(ข)

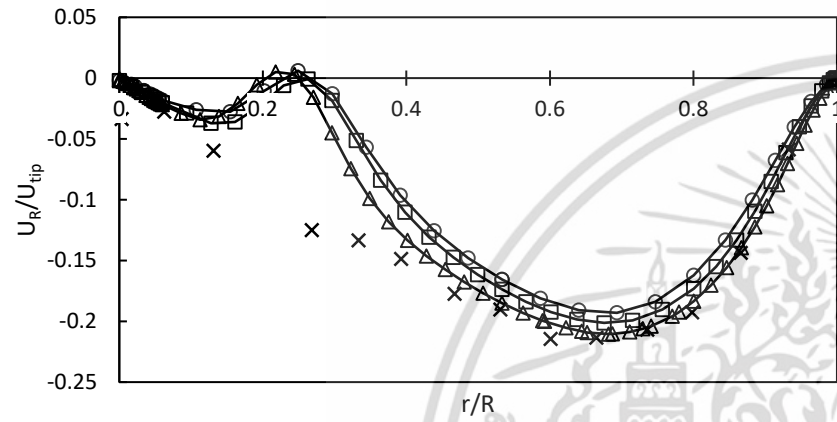


(ค)

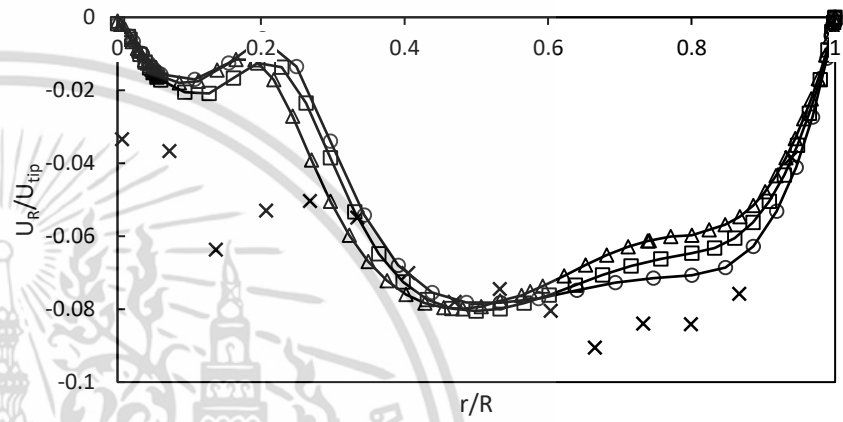


(ง)

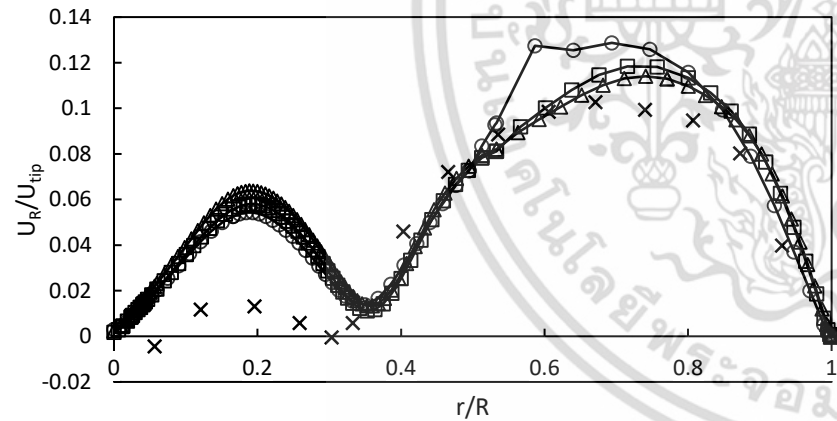
รูปที่ 4.4(ต่อ) การเปรียบเทียบตัวแปรไร้มิติของความเร็วในแนวแกน ( $U_A/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมฆ 0.75x (—○—) 1x (—■—) 1.25x (—▲—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ซ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



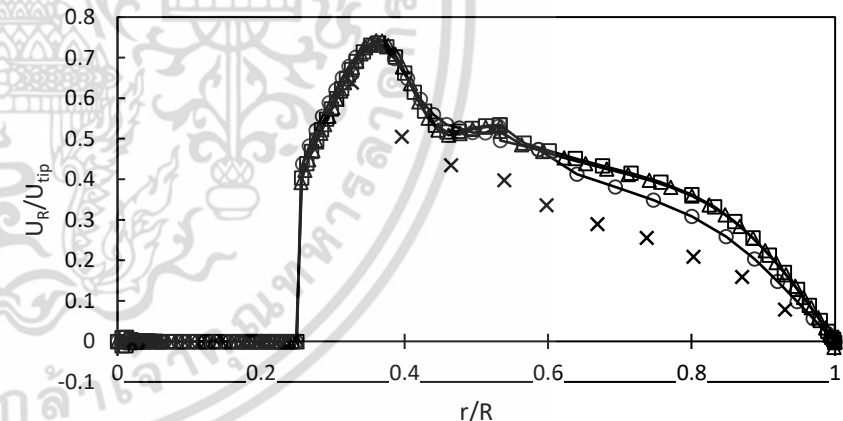
(ก)



(ข)

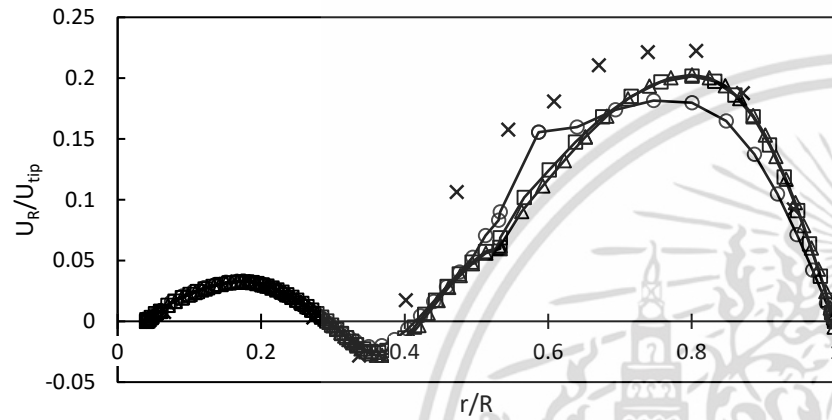


(ค)

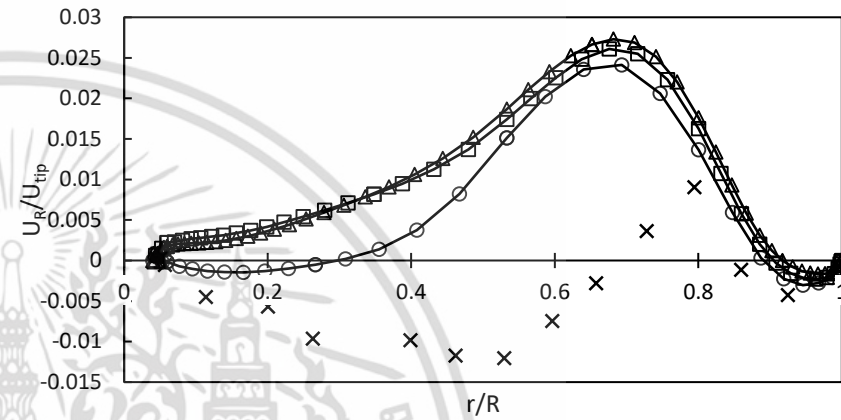


(ง)

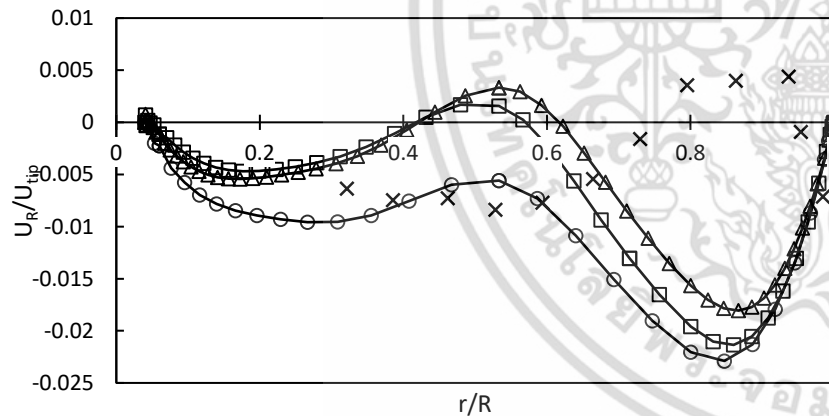
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวรัศมี ( $U_R/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช 0.75x (—○—) 1x (—■—) 1.25x (—▲—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ซ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



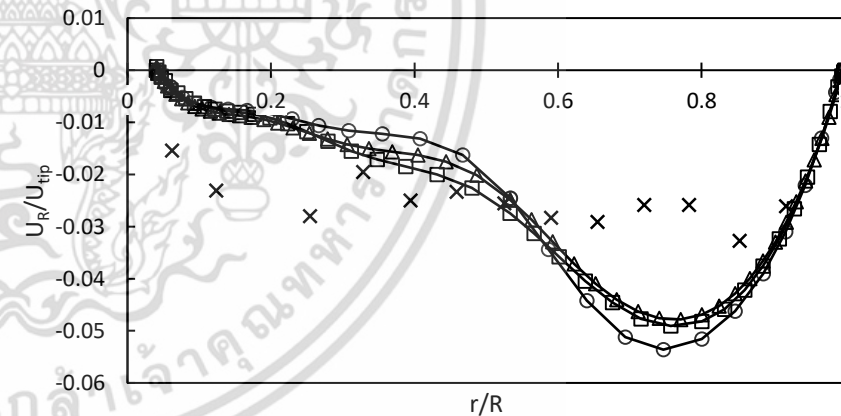
(จ)



(ข)

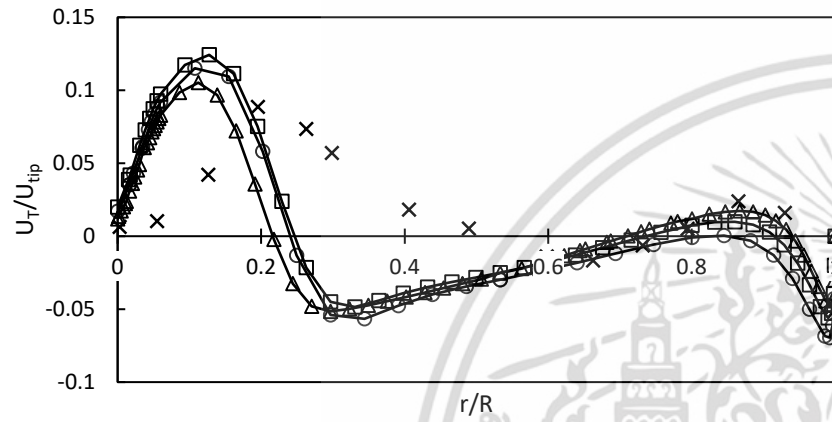


(ค)

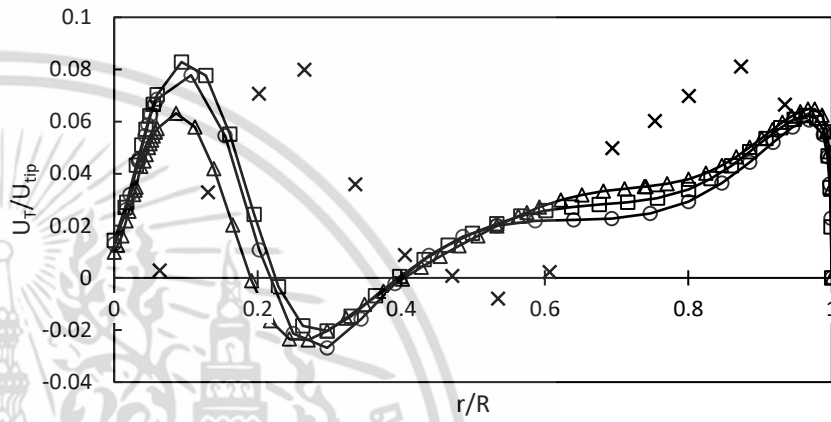


(ง)

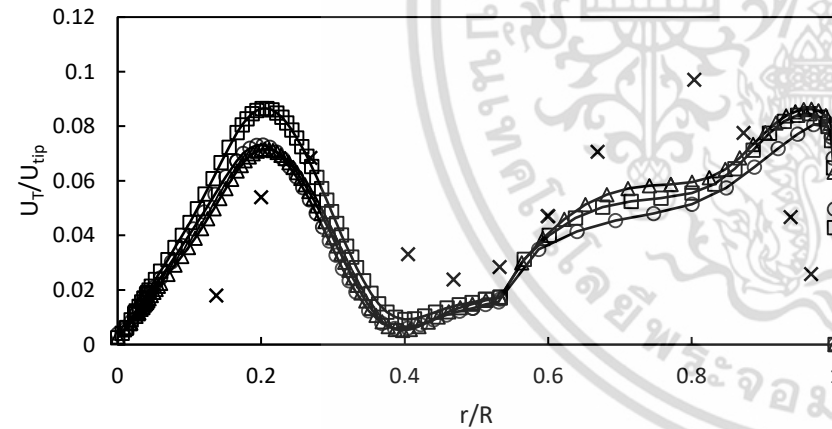
รูปที่ 4.5 (ต่อ) การเปรียบเทียบตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วในแนวรัศมี ( $U_R/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมฆ 0.75x (—○—) 1x (—□—) 1.25x (—△—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.04 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ฉ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



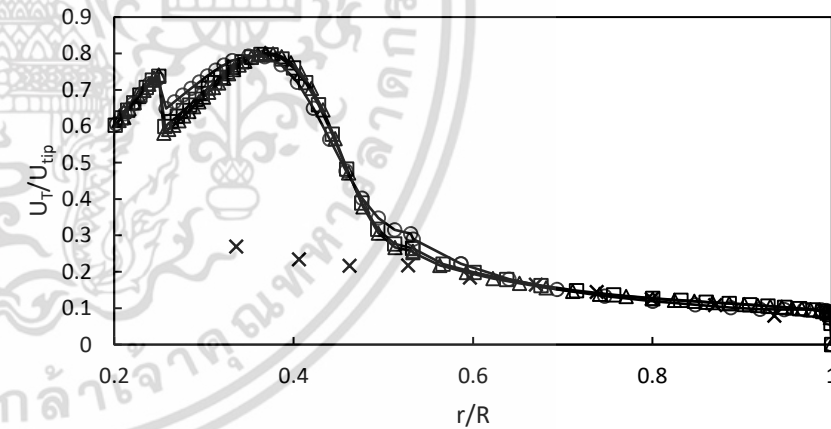
(ก)



(ข)

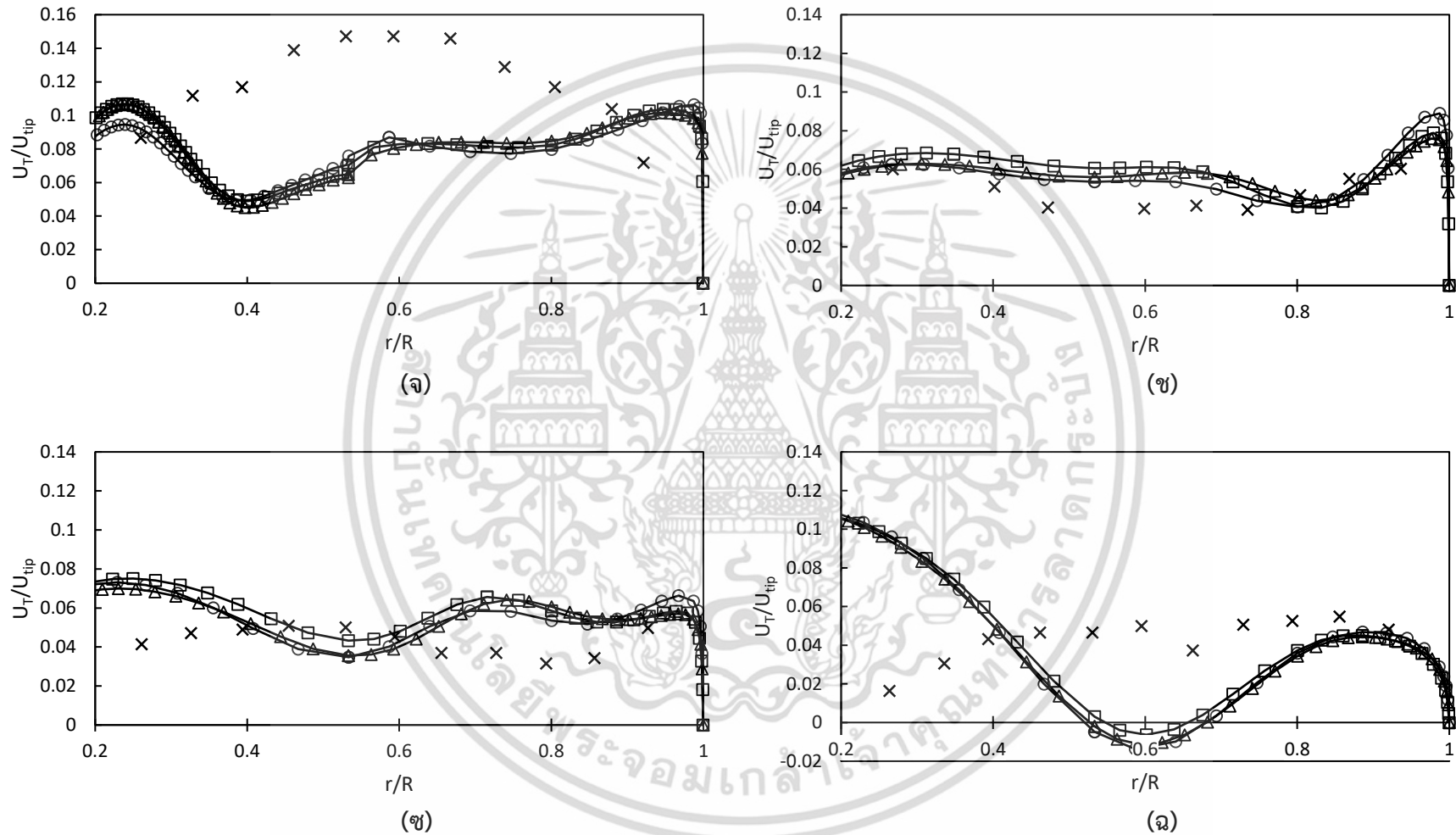


(ค)

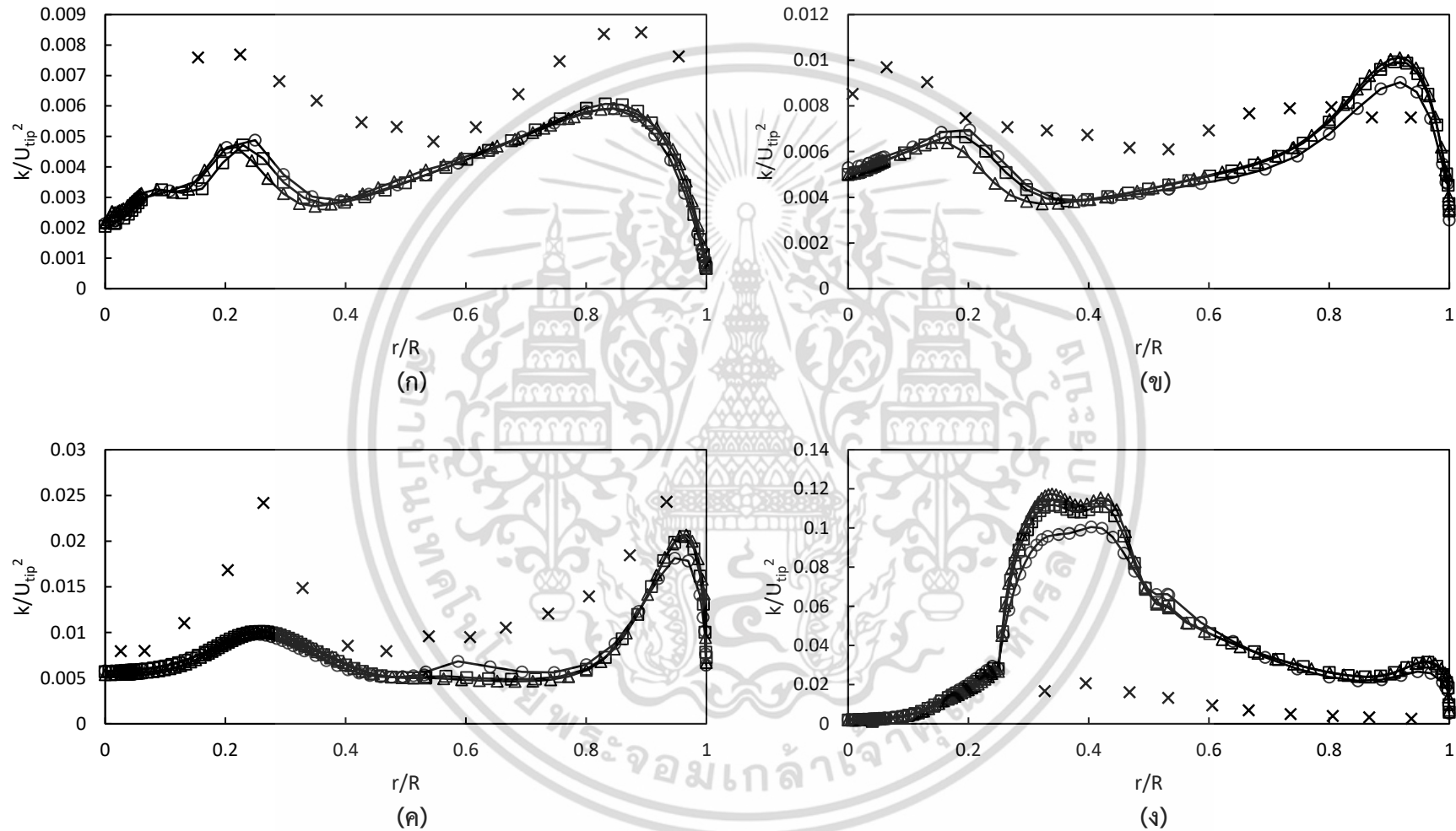


(ง)

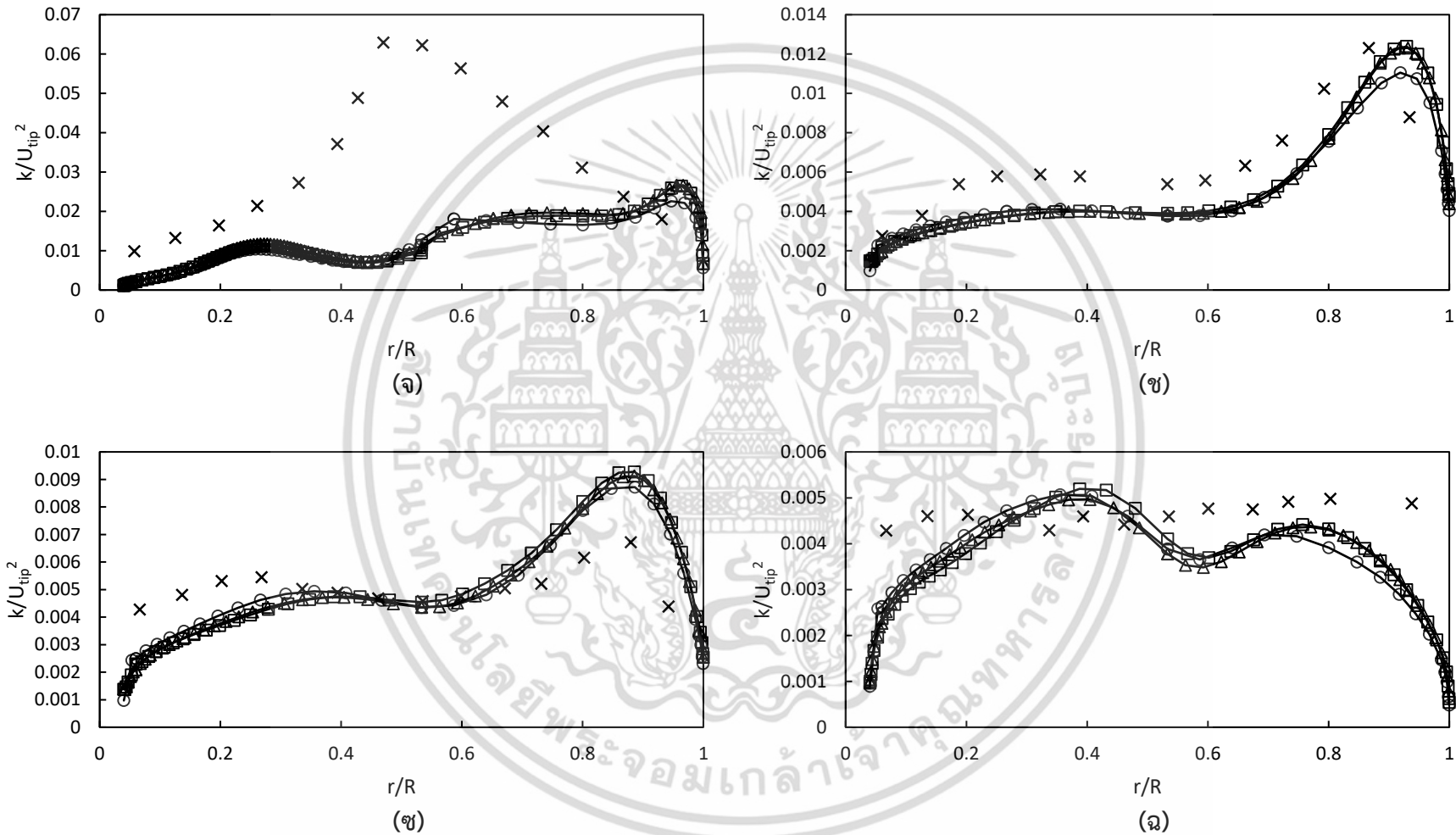
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้มิติของความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ( $U_T/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช 0.75x (—○—) 1x (—□—) 1.25x (—△—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.04 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ฉ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



รูปที่ 4.6 (ต่อ) การเปรียบเทียบตัวแปรไร้มิติของความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ( $U_T/U_{tip}$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช-  
 0.75x (—○—) 1x (—■—) 1.25x (—▲—) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ฉ) 0.244 เมตร



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบตัวแปรไร้มิติของค่าพลังงานความปั่นป่วน ( $k/U_{tip}^2$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช-  
 0.75x (○) 1x (◻) 1.25x (◄) ที่ความสูง ก) 0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ซ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร



รูปที่ 4.7 (ต่อ) การเปรียบเทียบตัวแปรไร้มิติของค่าพลังงานความปั่นป่วน ( $k/U_{tip}^2$ ) ต่ออัตราส่วนรัศมี ( $r/R$ ) ของการทดลอง (x) เทียบกับผลจำลองที่ความหนาแน่นเมช 0.75x (—○—) 1x (—■—) 1.25x (—▲—) ที่ความสูง  $h$  0.01 ข) 0.044 ค) 0.082 ง) 0.1 จ) 0.118 ช) 0.154 ฉ) 0.19 ฉ) 0.244 เมตร

## 4.2 ผลการศึกษาตัวแปรของเพลลาเกลียว

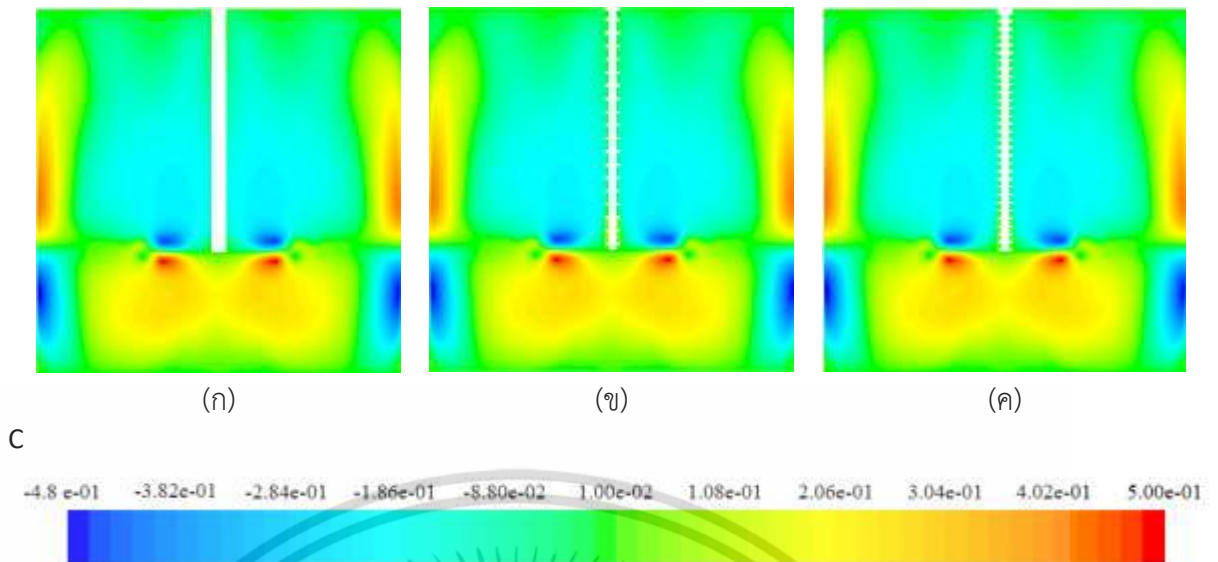
ผลการจำลองถึงผสมที่เกลียวเพลลาชนิดต่างๆ หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ความเร็ว 270 รอบต่อนาที พบว่า จากการวัดจากจุดวัดทั้ง 30 จุด (ภาคผนวก ก) เวลาในการผสมของถึงผสมชนิดเกลียว 10-45-1.5 มีเวลาในการผสม 4.38 วินาที ซึ่งเป็นเพียงชนิดเดียวที่น้อยกว่าเวลาในการผสมของถึงผสมแบบอ้างอิงที่มีเวลาในการผสม 4.6 วินาที แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่.4.3 เวลาในการผสมของถึงผสมที่เพลลาชนิดต่างๆ

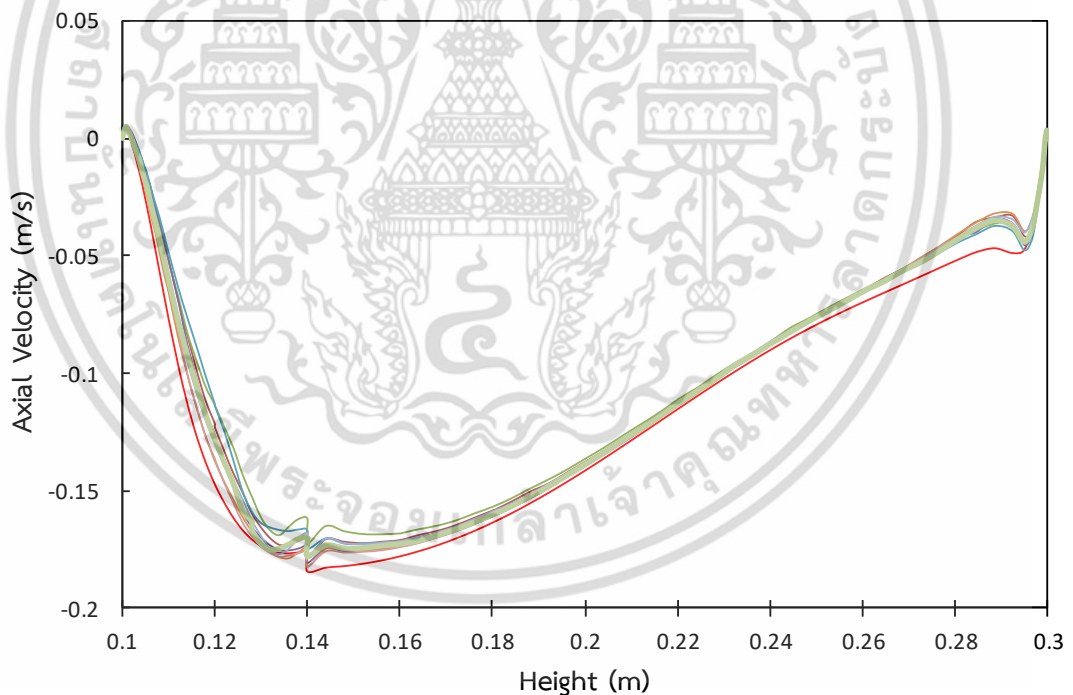
ชนิดเกลียว	เวลาในการผสม (วินาที)
อ้างอิง	4.60
6-45-1.5	5.56
6-45-3	5.17
6-60-1.5	5.03
6-60-3	6.07
10-45-1.5	4.38
10-45-3	5.24
10-60-1.5	5.33
10-60-3	5.07

แต่จากภาพคอนทัวร์ค่าความเร็วที่หน้าตัด  $y = 0$  ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างกันอย่างชัดเจนได้ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.8 และแสดงอย่างละเอียดดังภาคผนวก ข แต่บริเวณพื้นที่ใกล้เกลียวเพลลา มีความแตกต่างกัน จึงทำการวาดกราฟที่ระยะใกล้เพลลา ( $r = 0.009$  เมตร) โดยเปรียบเทียบค่าความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity) ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) ค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy,  $k$ ) และอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (turbulence dissipation rate,  $\varepsilon$ ) กับค่าความสูงตลอดเพลลา แสดงดังรูปที่ 4.9 - 4.13 ตามลำดับ พบว่าถึงผสมที่มีเพลลาเกลียวมีค่าที่แตกต่างจากเพลลาแบบอ้างอิง และที่ระยะความสูง 0.14 เมตร เส้นกราฟจะเกิดพิค เป็นผลมาจากรอยต่อของการทำอินเตอร์เฟส (แสดงการเปรียบเทียบดังภาคผนวก ค) จากภาพที่ระยะความสูง 0.14 ถึง 0.3 เมตร เส้นกราฟของทุกๆ ค่าของเพลลาแบบเกลียวที่ทำการศึกษาก็ไม่มีความต่างกันมากนัก แต่ที่ระยะ 0.1 เมตร ถึง 0.14 เมตร มีความแตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการดึงของไหลลงมาตามร่องเกลียวของเกลียวแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

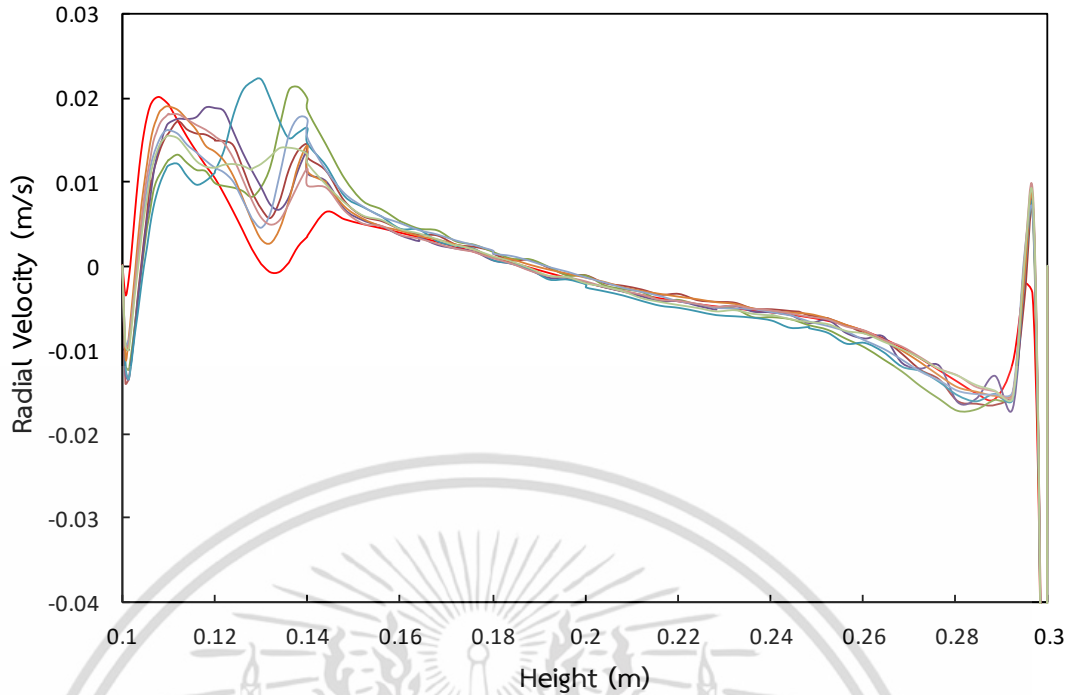


รูปที่ 4.8 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่างๆดังนี้  
(ก) อ่างอิง (ข) 6-60-3 (ค) 10-60-3

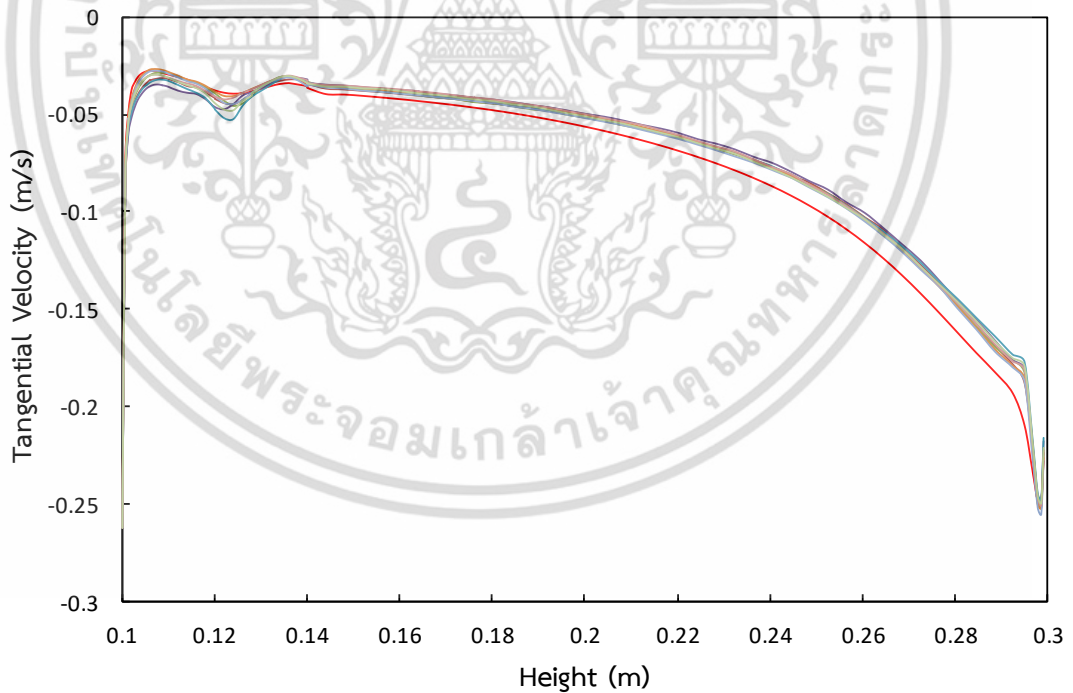


รูปที่ 4.9 ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดความสูงของเพลานิตที่ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถังผสมเพลานิตต่างๆดังนี้ อ่างอิง (—) 6-45-1.5 (—) 6-45-3 (—) 6-60-1.5 (—) 6-60-3 (—) 10-45-1.5 (—) 10-45-3 (—) 10-60-1.5 (—) และ 10-60-3 (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

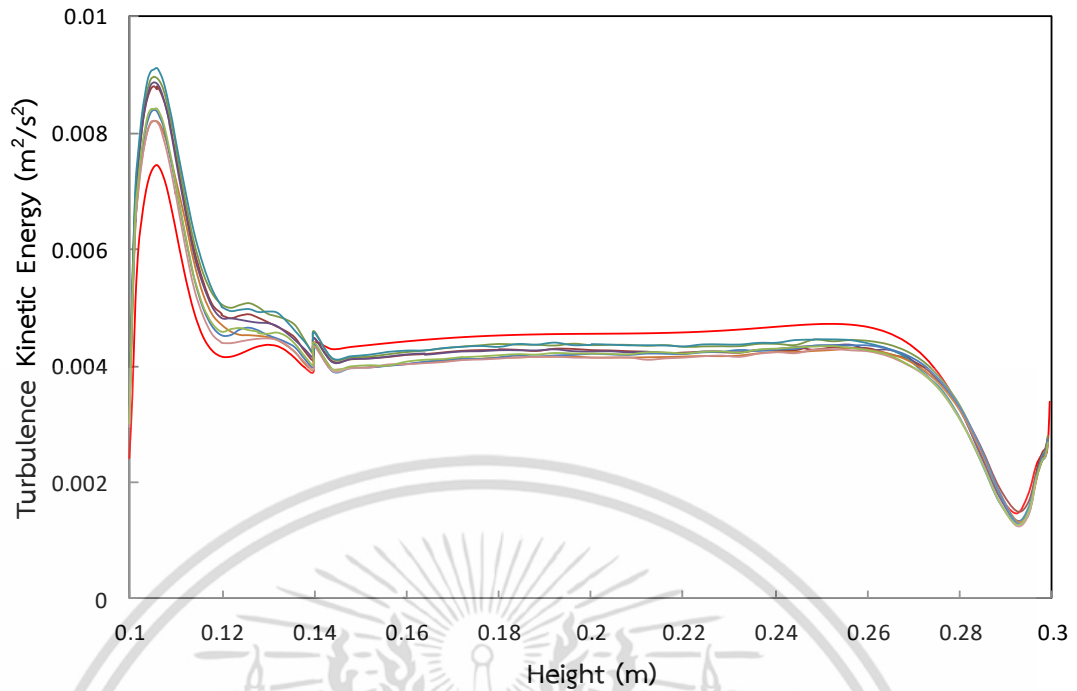


รูปที่ 4.10 ค่าความเร็วในแนวรัศมีตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถึงผสมเพลลาเกลียวต่างๆดังนี้ อ้างอิง (■) 6-45-1.5 (■) 6-45-3 (■) 6-60-1.5 (■) 6-60-3 (■) 10-45-1.5 (■) 10-45-3 (■) 10-60-1.5 (■) และ 10-60-3 (■)

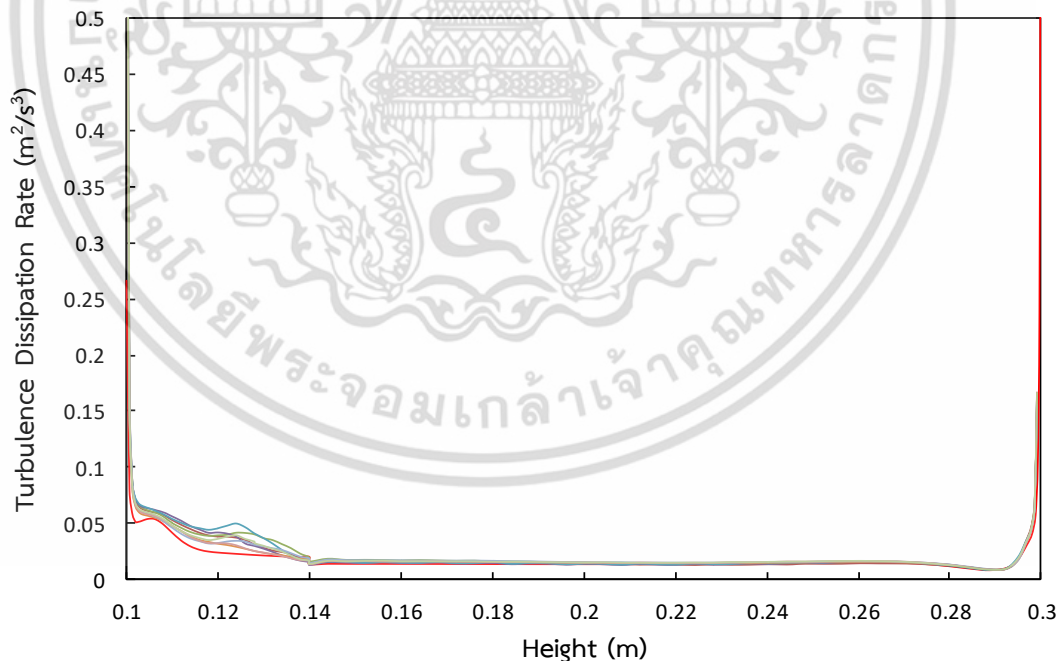


รูปที่ 4.11 ค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสตลอดความสูงของเพลลาที่ ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถึงผสมเพลลาเกลียวต่างๆดังนี้ อ้างอิง (■) 6-45-1.5 (■) 6-45-3 (■) 6-60-1.5 (■) 6-60-3 (■) 10-45-1.5 (■) 10-45-3 (■) 10-60-1.5 (■) และ 10-60-3 (■)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



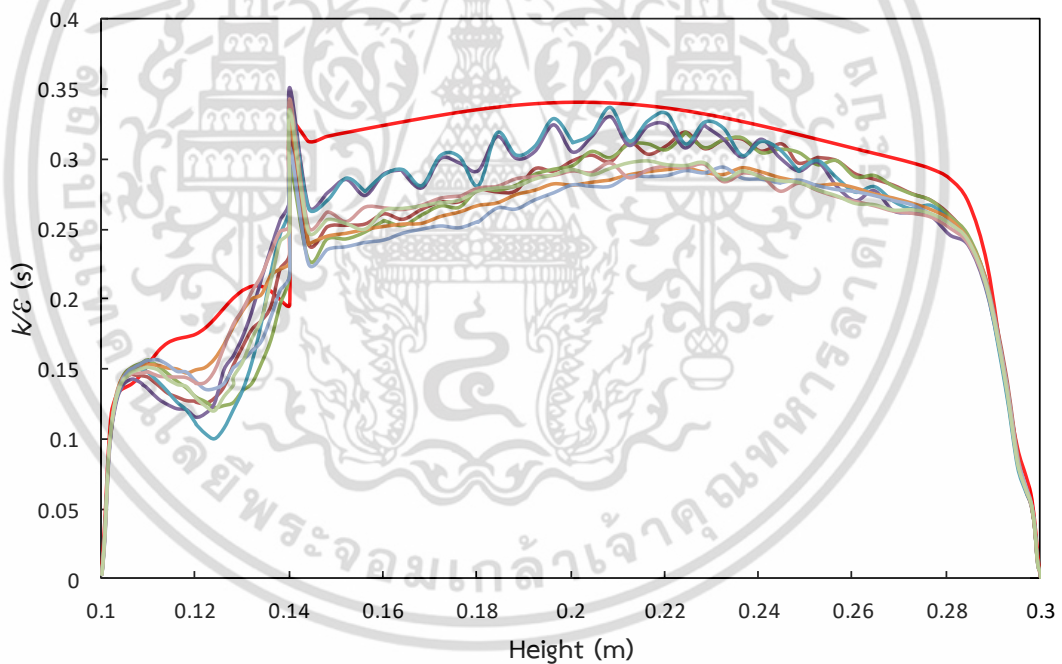
รูปที่ 4.12 ค่าพลังงานความปั่นป่วนตลอดความสูงของเพลลาที่ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถังผสมเพลลาเกลียวต่างๆดังนี้ อ้างอิง (■) 6-45-1.5 (■) 6-45-3 (■) 6-60-1.5 (■) 6-60-3 (■) 10-45-1.5 (■) 10-45-3 (■) 10-60-1.5 (■) และ 10-60-3 (■)



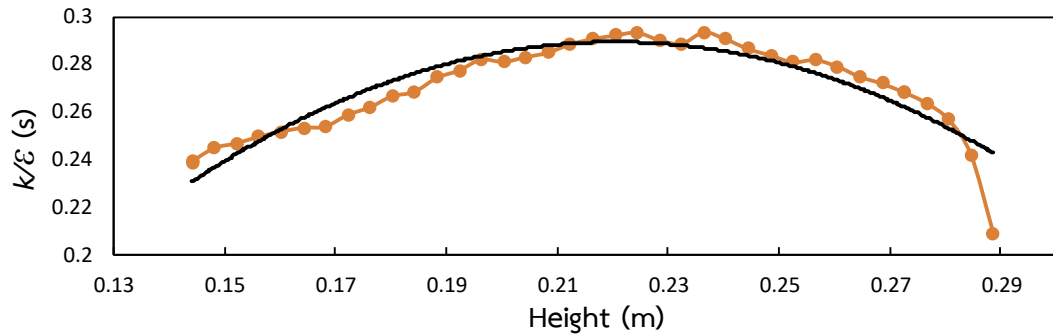
รูปที่ 4.13 อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วนตลอดความสูงของเพลลาที่ ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถังผสมเพลลาเกลียวต่างๆดังนี้ อ้างอิง (■) 6-45-1.5 (■) 6-45-3 (■) 6-60-1.5 (■) 6-60-3 (■) 10-45-1.5 (■) 10-45-3 (■) 10-60-1.5 (■) และ 10-60-3 (■)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

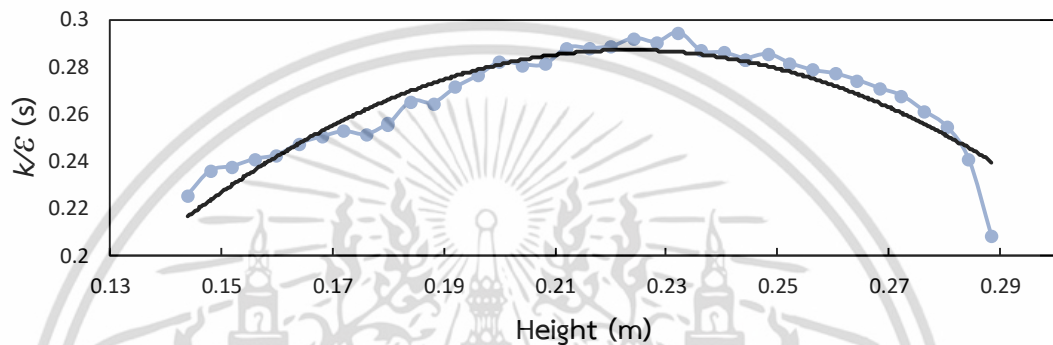
แต่ยังไม่มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับเวลาในการผสม เนื่องจากเวลาในการผสมประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัวแปร แต่พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานความปั่นป่วนกับอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน ( $k/\varepsilon$ ) มีค่าต่ำกว่าจะส่งผลให้เวลาในการผสมต่ำกว่าด้วย [9] เพราะค่าอัตราการสลายตัวของพลังงานความปั่นป่วนหมายถึงอัตราการเปลี่ยนค่าพลังงานความปั่นป่วนไปเป็นค่าความร้อนภายใน เมื่อความความร้อนภายในสูงขึ้นอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้พลังงานจลน์ของไหลมีค่ามากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการผสม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อัตราส่วนนี้แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้งานของค่าพลังงานความปั่นป่วน แต่เมื่อทำการสร้างกราฟอัตราส่วนระหว่าง  $k/\varepsilon$  พบว่าเพลลาแบบมีเกลียวทุกชนิดมีค่าน้อยกว่าเพลลาแบบไม่มีเกลียว (แบบอ้างอิง) ดังรูปที่ 4.14 แต่เส้นกราฟมีลักษณะแกว่งไม่ราบเรียบ เป็นผลมาจากตัวแปรจำนวน ความลึก และองศาของเกลียว จากกราฟเกลียวที่มีค่าอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ต่ำสุดคือเกลียวชนิด 10-45-1.5 และ 10-45-3 แต่เวลาในการผสม เกลียวชนิด 10-45-1.5 มีค่าเวลาการผสมต่ำกว่า เนื่องจากเส้นกราฟมีความราบเรียบมากกว่าแสดงดังรูปที่ 4.15 จากงานวิจัยนี้จึงพบว่าถึงผสมที่มีค่าอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ที่ต่ำไม่เพียงพอต่อการลดเวลาในการผสม จำเป็นต้องมีความราบเรียบไม่แกว่งด้วย



รูปที่ 4.14 อัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ตลอดความสูงของเพลลาที่ ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถังผสมเพลลาชนิดเกลียวต่างๆดังนี้ อ้างอิง (■) 6-45-1.5 (■) 6-45-3 (■) 6-60-1.5 (■) 6-60-3 (■) 10-45-1.5 (■) 10-45-3 (■) 10-60-1.5 (■) และ 10-60-3 (■)



(ก)



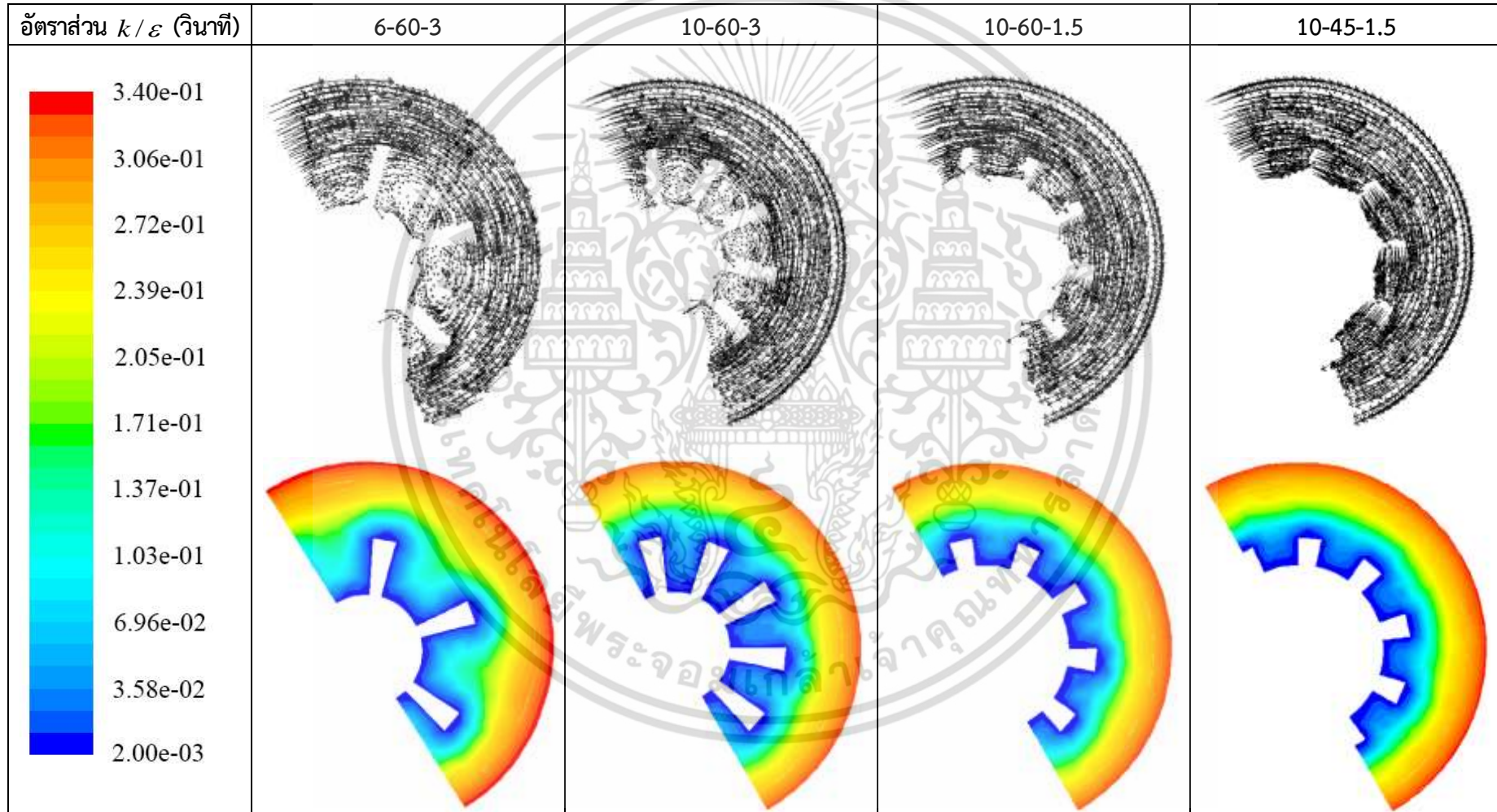
(ข)

**รูปที่ 4.15** อัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ตลอดความสูงของเพลลาที่ ระยะ  $r = 0.009$  เมตร ของถังผสมเพลลาเกลียวต่าง ๆ ดังนี้ (ก) 10-45-1.5 (●) (ข) 10-45-3 (●)

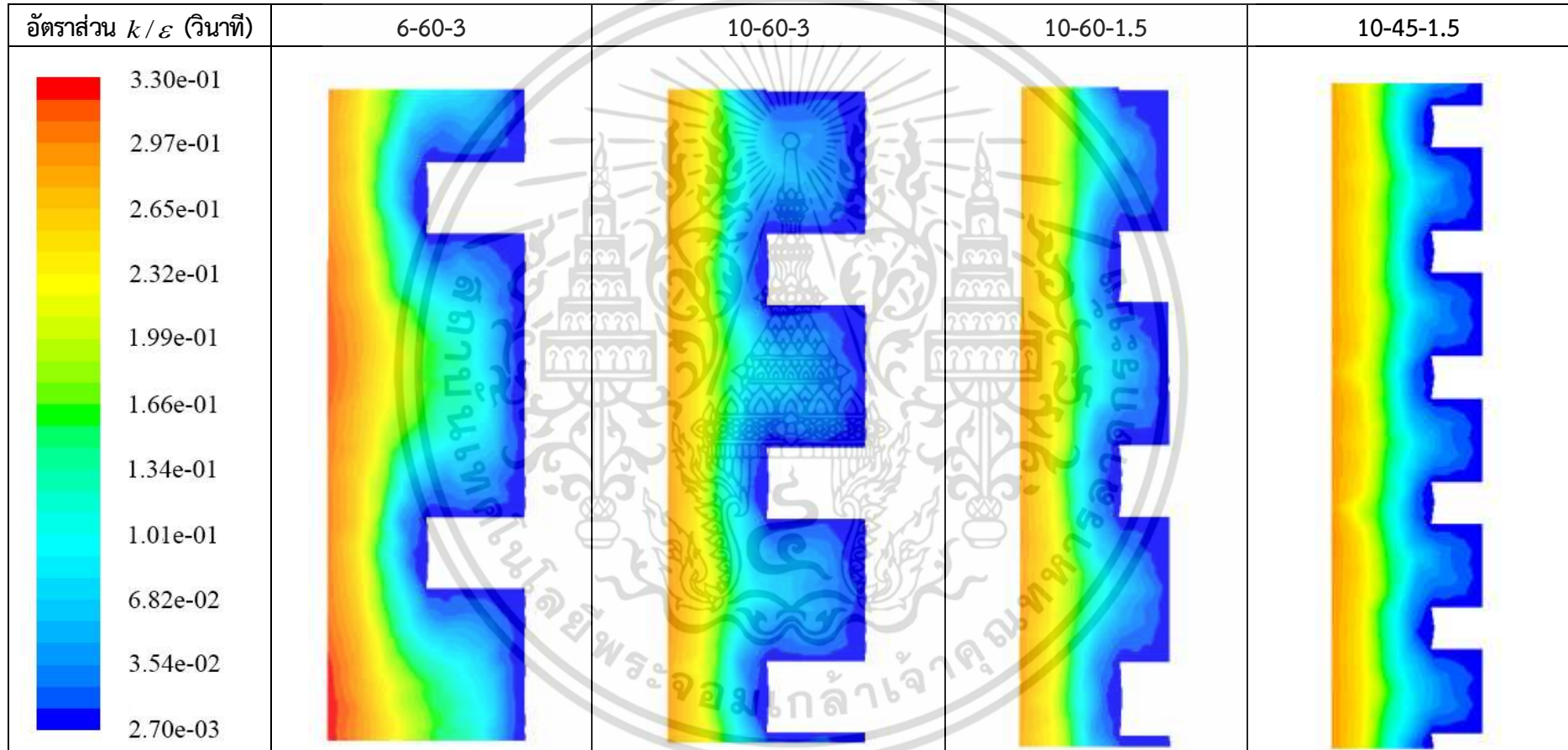
จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  บริเวณใกล้เพลลาแบบมีเกลียวของถังผสมมีความกว้าง เนื่องจากของไหลบริเวณใกล้เพลลาถูกรบกวนจากการหมุนวนที่เกิดขึ้นภายในร่องเกลียว จากตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบเพลลาเกลียว 6-60-3 ที่มีเพลลาจำนวน 6 เกลียว กับเพลลาเกลียว 10-60-3 ที่มีเพลลาจำนวน 10 เกลียว พบว่าเพลลาจำนวน 6 เกลียวมีปริมาณและความกว้างของค่ามากกว่าชนิดจำนวน 10 เกลียว เนื่องจากพื้นที่ของร่องเกลียวเพลลาจำนวน 6 เกลียวมีขนาดใหญ่กว่าชนิดจำนวน 10 เกลียว ส่งผลให้เกิดการหมุนวนในร่องเกลียวที่มีขนาดใหญ่กว่าและส่งผลออกมานอกเกลียวมากกว่า เปรียบเทียบเพลลาเกลียว 10-60-1.5 ที่ร่องเกลียวเอียง 60 องศา และเพลลาเกลียว 10-45-1.5 ที่ร่องเกลียวเอียง 45 องศา พบว่าที่ 60 องศา เกิดการหมุนวนในร่องเกลียวมากกว่าที่ 45 องศา และเปรียบเทียบเพลลาเกลียว 10-60-3 ที่มีความลึกของเกลียว 3 มิลลิเมตร กับเพลลาเกลียว 10-60-1.5 ที่มีความลึกของเกลียว 1.5 มิลลิเมตร พบว่าที่ความลึก 3 มิลลิเมตร มีเกิดการหมุนวนภายในเกลียวได้มากกว่าเกลียวที่ความลึก 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งตรงกับผลการจำลองข้างต้น ที่เวลาในการผสมต่ำสุดคือเพลลาเกลียวชนิด 10-45-1.5 จึงสรุปได้ว่าการเจาะร่องเกลียวทำให้ค่าอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ต่ำลงจริง แต่เกลียวที่มี จำนวน ความลึก หรือองศาที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้ลดประสิทธิภาพในการผสม เนื่องจากเกิดการหมุนวนภายในร่องเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 เวกเตอร์และคอนทัวร์ของอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  บริเวณหน้าตัดโค้งเปลว ( $r < 0.009$  เมตร) ที่ความสูง 0.25 เมตร

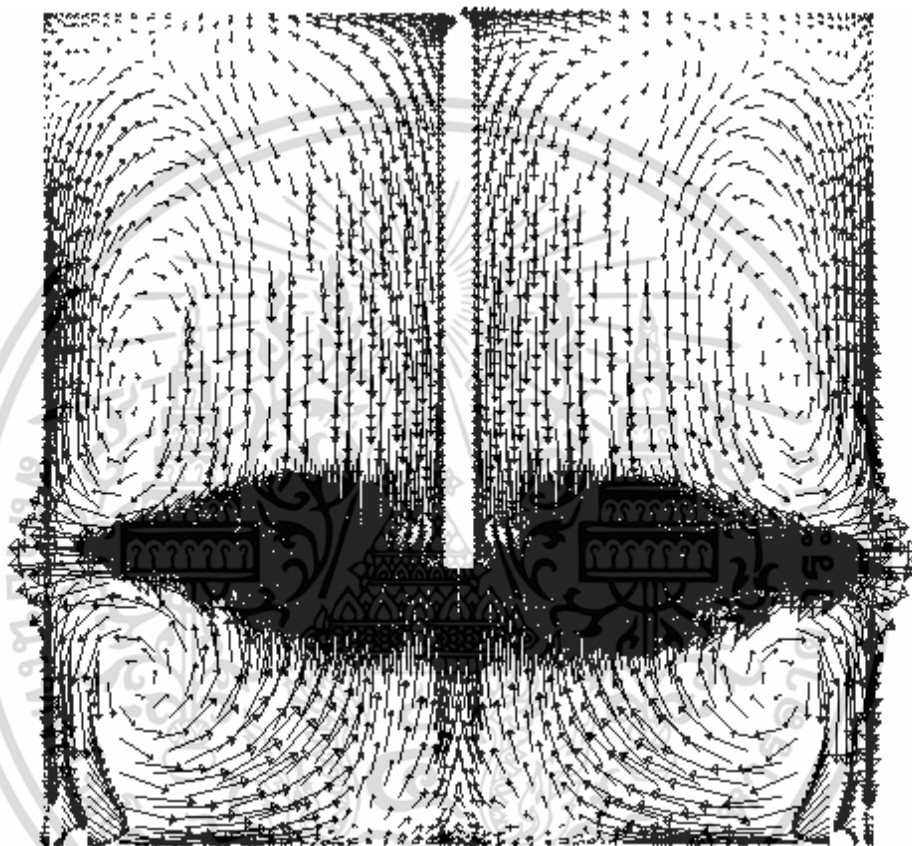


ตารางที่ 4.5 คอนทัวร์ของอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  บริเวณหน้าตัดใกล้เพลลา ( $r < 0.009$  เมตร) ที่ความสูง 0.23 ถึง 0.25 เมตร



### 4.3 ผลการศึกษาการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาในถังผสม

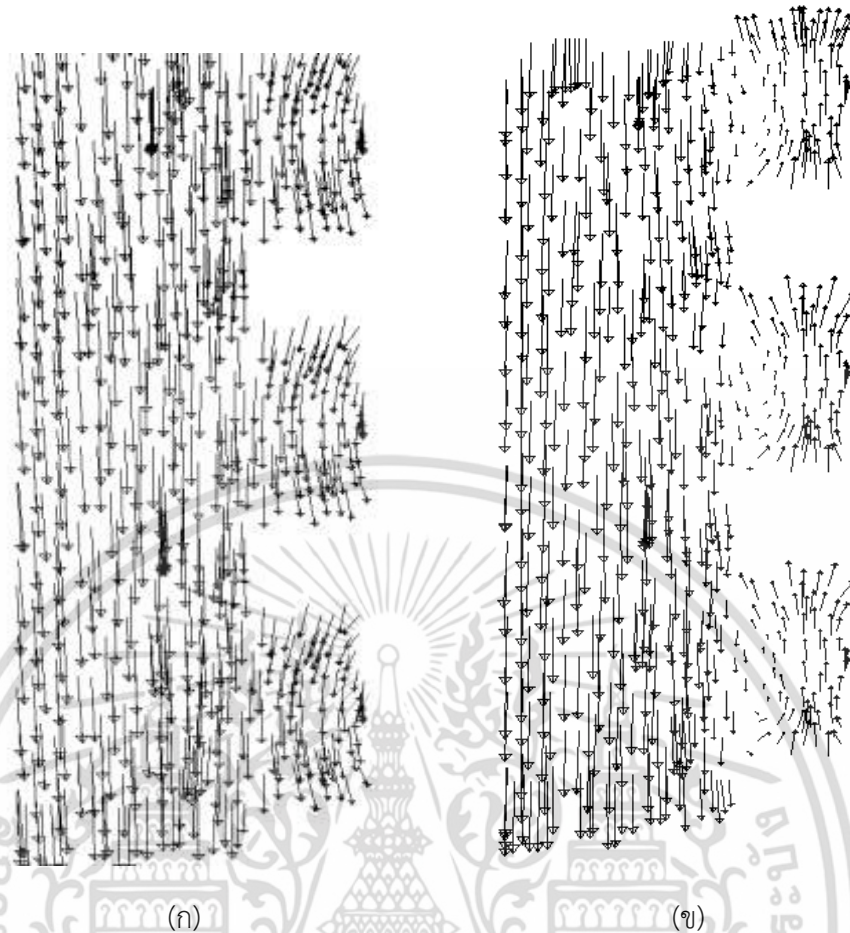
จากการจำลองรูปแบบการไหลในถังผสมเพลลาอ้างอิง พบว่าของไหลในถังผสมจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน บริเวณเหนือและใต้ใบพัด ของไหลบริเวณแกนหมุนเหนือใบพัดจะถูกดึงลงเข้าสู่ใบพัดเพื่อพัดออกแสดงดังรูปที่ 4.16 จึงทำให้การหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาของเพลลาเกลียวมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน เพลลาที่หมุนตามเข็มนาฬิกาจะดึงของไหลลงตามร่องเกลียว แต่เพลลาที่หมุนทวนเข็มนาฬิกาจะดึงของไหลขึ้น



รูปที่ 4.16 รูปแบบการไหลในถังผสมเพลลาอ้างอิง

จากการเปรียบเทียบการจำลองถังผสมที่มีเพลลาเกลียว 10-45-1.5 ที่หมุนตามเข็มนาฬิกา กับทวนเข็มนาฬิกา พบว่าที่เพลลาเกลียว 10-45-1.5 ที่หมุนตามเข็มนาฬิกามีเวลาในการผสม 4.38 วินาที และการหมุนแบบทวนเข็มนาฬิกามีเวลาในการผสม 4.78 วินาที โดยที่เพลลาอ้างอิงมีเวลาในการผสม 4.6 วินาที การหมุนแบบตามเข็มนาฬิกามีเวลาในการผสมน้อยกว่าแบบอ้างอิงประมาณร้อยละ 5 แต่การหมุนแบบทวนเข็มนาฬิกาใช้เวลาในการผสมมากกว่าอ้างอิงประมาณร้อยละ 4 เนื่องจากเพลลาที่หมุนตามเข็มนาฬิกาจะดึงของไหลลงตามร่องเกลียว ซึ่งเป็นทิศเดียวกันกับรูปแบบการไหลของถังผสม แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก) แต่เพลลาที่หมุนทวนเข็มนาฬิกาจะดึงของไหลขึ้นซึ่งเป็นทิศตรงข้ามกับรูปแบบการไหลในถังผสม แสดงดังรูปที่ 4.17 (ข) ส่งผลให้ความเร็วบริเวณใกล้เพลลามีค่าลดลง แสดงการเปรียบเทียบคอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เวกเตอร์บริเวณหน้าตัดใกล้เพลลา ( $r < 0.009$  เมตร) ที่ความสูง 0.2 ถึง 0.21 เมตร ของเพลลาเกลียว 10-45-1.5 ที่การหมุนดังนี้ (ก) หมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) หมุนทวนเข็มนาฬิกา

และการจำลองนี้สามารถหางานและพลังงานในการผสมของถังผสมเพลลาเกลียว 10-45-1.5 ที่หมุนทวนและตามเข็มนาฬิกาเทียบกับเพลลาอ้างอิงได้จากสมการ 4.2 และสมการ 4.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการใช้พลังงานในการผสมของทิศการหมุนเพลลา แสดงค่าได้ดังตารางที่ 4.8

$$P = \tau \times 2\pi \times N \quad (4.2)$$

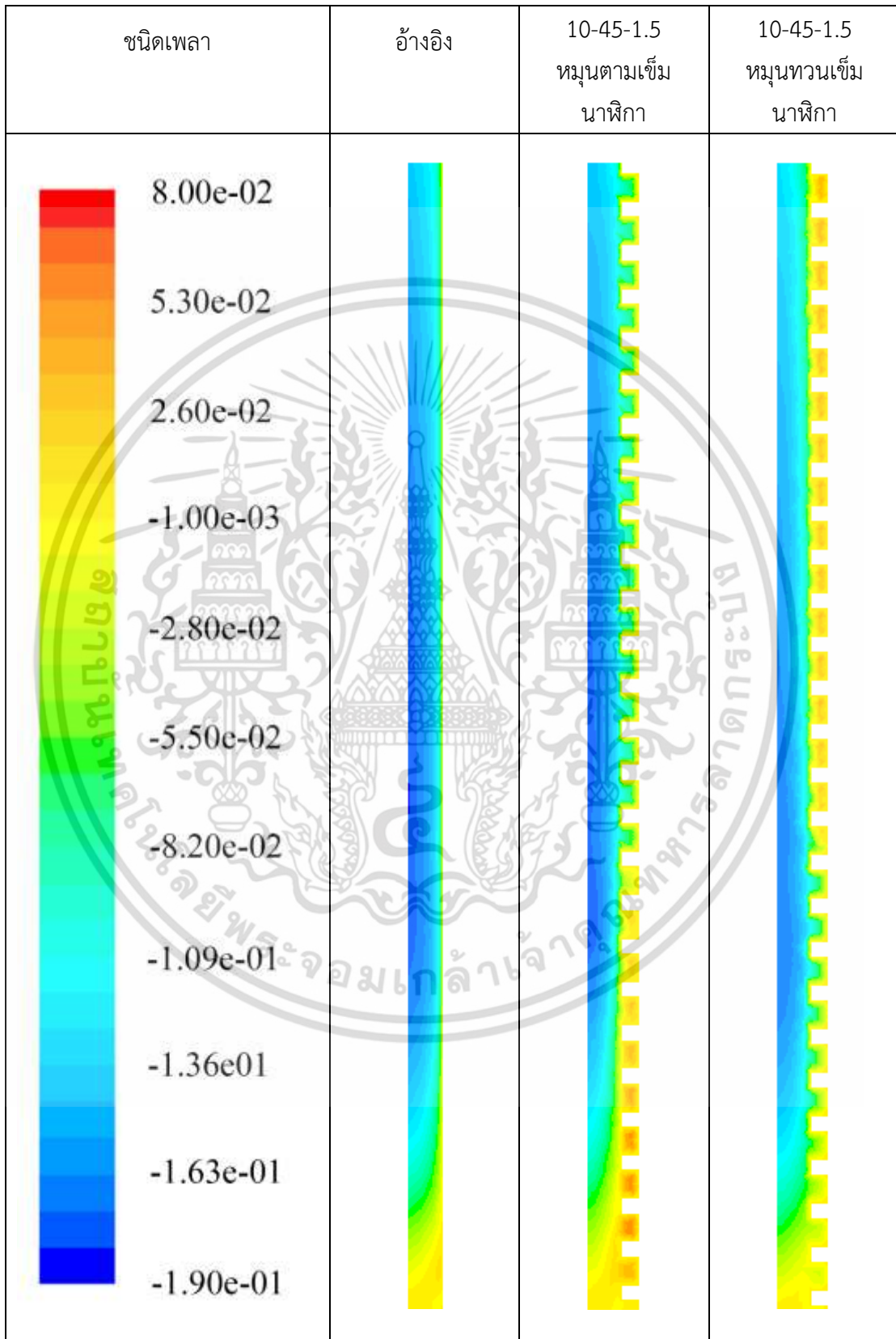
โดยที่  $P$  คือ กำลัง (วัตต์)  
 $N$  คือ ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อวินาที)  
 $\tau$  คือ แรงบิด (นิวตันเมตร)

$$E = P \times t_{Mixing} \quad (4.3)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงาน (จูล)  
 $t_{Mixing}$  คือ เวลาในการผสม (วินาที)

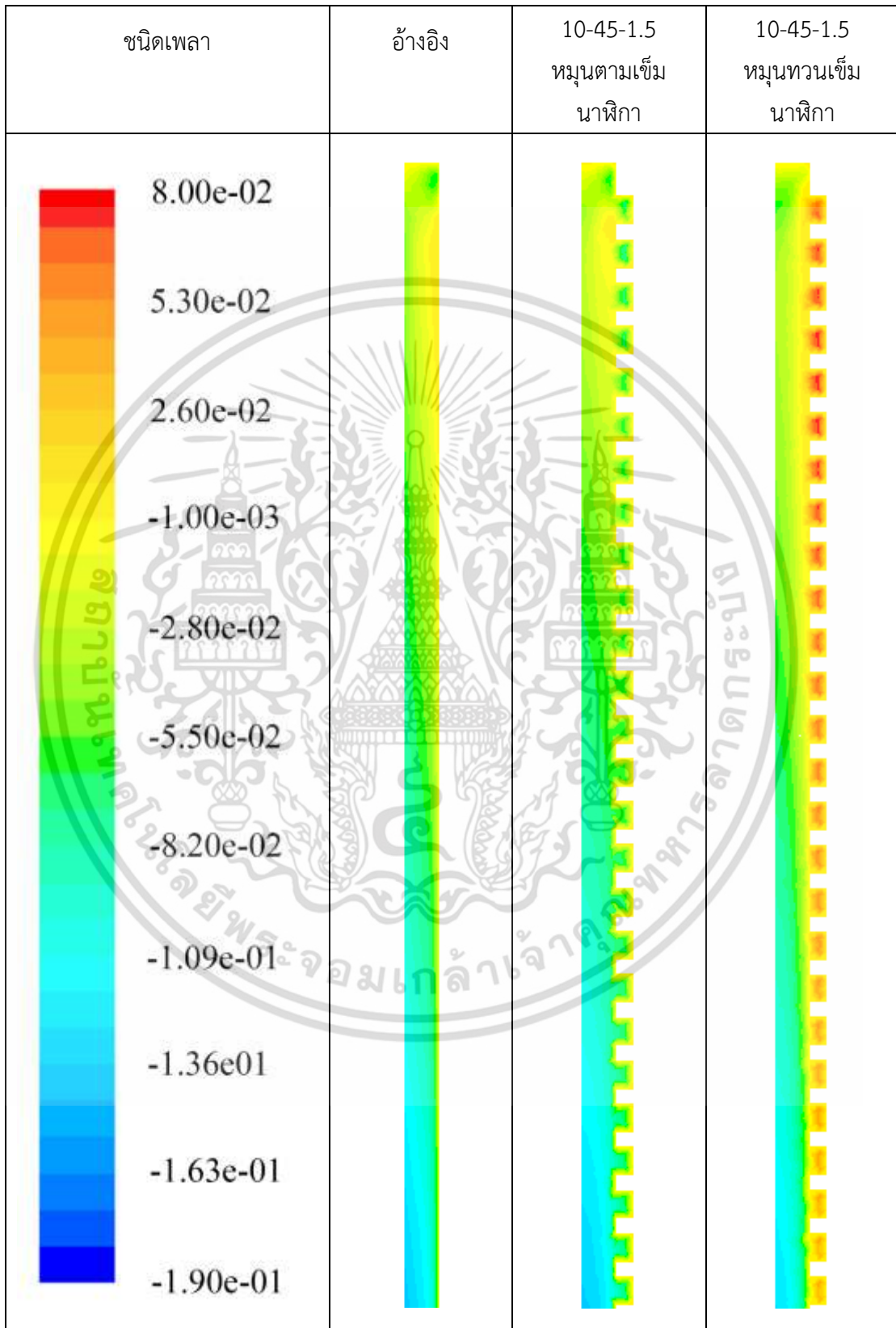
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนบริเวณหน้าตัดใกล้เพลลา ( $r < 0.009$  เมตร) ที่ความสูง 0.1 ถึง 0.2 เมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนบริเวณหน้าตัดใกล้เพลลา ( $r < 0.009$  เมตร) ที่ความสูง 0.2 ถึง 0.3 เมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่างานและพลังงานของเพลากลีเยว

เพล	แรงบิด (นิวตันเมตร)	เวลาในการผสม (วินาที)	กำลัง (วัตต์)	พลังงาน (จูล)
อ้างอิง	0.17289	4.60	4.8885	22.49
10-45-1.5 หมุนตาม เข็มนาฬิกา	0.17297	4.38	4.8907	21.40
10-45-1.5 หมุนทวน เข็มนาฬิกา	0.17270	4.78	4.8830	23.32

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเพลากลีเยวชนิดเดียวกันแต่หมุนต่างทิศทาง พลังงานที่ใช้ในการผสมนั้นต่างกัน เพลากลีเยว 10-45-1.5 ที่หมุนตามเข็มนาฬิกาใช้พลังงาน 21.40 จูล ซึ่งน้อยกว่าเพลากลีเยวชนิดเดียวกันที่หมุนทวนเข็มนาฬิกาและเพลอ้างอิง ที่ใช้พลังงาน 23.32 จูล และ 22.49 จูลตามลำดับ ซึ่งเพลากลีเยว 10-45-1.5 ที่หมุนตามเข็มนาฬิกาใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่าเพลอ้างอิงร้อยละ 5 และน้อยกว่าเพลากลีเยวชนิดเดียวกันที่หมุนทวนเข็มนาฬิกาถึงร้อยละ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบการไหล เวลาในการผสมและพลังงานที่ใช้ในการผสมของเพลากล้วย พบว่าในถังผสมที่มีการปั่นกววนในทิศตามเข็มนาฬิกา เพลากล้วยที่จำนวนเกลียว 10 เกลียว ความเอียงของเกลียว 45 องศา และความลึก 1.5 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการผสมต่ำกว่าเพลาล้อและเพลากล้วยชนิดอื่น เนื่องจากมีค่าอัตราส่วน  $k/\varepsilon$  ที่ต่ำและราบเรียบกว่า ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่มากขึ้นในการเปลี่ยนพลังงานความปั่นป่วนไปเป็นพลังงานความร้อนในถังผสม และเมื่อเปรียบเทียบกับเพลากล้วยที่จำนวนเกลียว 10 เกลียว 45 องศา ความลึก 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับเกลียวในข้างต้นในถังผสมที่มีการปั่นกววนในทิศทวนเข็มนาฬิกา พบว่าในถังผสมที่มีการปั่นกววนในทิศตามเข็มนาฬิกา ใช้เวลาในการผสมต่ำกว่าและใช้พลังงานในการผสมต่ำกว่าด้วย เนื่องจากในถังผสมที่มีการปั่นกววนในทิศทวนเข็มนาฬิกา ลักษณะการไหลของของไหลในร่องเกลียวจะเป็นทิศตรงข้ามกับรูปแบบการไหลในถังผสม ส่งผลให้ความเร็วไหลเพลามีขนาดลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 ควรทำการศึกษาเพลากล้วยที่ความลึกของเกลียวลดลง หรือเพิ่มจำนวนเกลียว การลดพื้นที่ร่องเกลียวทำให้ขนาดการหมุนวนในร่องเกลียวลดลง อาจส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการผสมและการลดเวลาในการผสมได้

5.2 ควรจำลองเต็มถังและใช้ถังที่ไม่มีแผ่นกั้น เพื่อให้ผลกระทบจากเพลากล้วยแสดงออกชัดเจนขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Marshall, E. M. and Bakker, A.. 2003. **Computational Fluid Mixing**. New Hampshire: Fluent.Inc.
- [2] Tu, J. Yeoh, G. and Liu, C. 2013 **Computation Fluid Dynamics a Practical Approach**. 2nd. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [3] Murthy, B. N. and Joshi, J. B. 2008. “Assessment of standard k-, RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel”. **Chemical Engineering Science**. 63(22): 5468-5495.
- [4] Huang, W. Li, K. 2013. “CFD Simulation of Flows in Stirred Tank Reactors Through Prediction of Momentum Source”. **Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Other Applications**. Rijeka: InTech.
- [5] Karimi, M. Akdogan, G. Bradshaw M. S. 2012. “Effects of Different Mesh Schemes and Turbulence Models in CFD Modelling of Stirred Tanks”. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**. 48(2): 513-531.
- [6] Deglon, D. A. and Meyer, C. J. 2006. “CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations”. **Minerals Engineering**. 19(10): 1059–1068.
- [7] เอกราช บำรุงชัยชาญ. 2556. **พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง:ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. สาขาวิศวกรรมเคมี.
- [8] Akavipat, C. 2014. Computational fluid dynamics study on effects of impeller Geometries on flow pattern in stirred tank, Master of Chemical Engineering Thesis, faculty of engineering King mongkut’s institute of technology ladkrabang.
- [9] Wongnui, A. Akavipat, C. Bumrungthaichaichan, E. and Wattananusorn, S. 2015. “CFD simulation of disc radius and blade height effects on mixing performance in the unbaffled tank covered by a lid” **Ladkrabang engineering journal**. 32(4): 49-54
- [10] Driss, Z. Karray, S. Chtourou, W. Kchaou H. Abid, M. S. 2012. “A study of mixing structure in stirred tanks equipped with multiple four-blade rushton impellers”. **The Journal of Committee on Machine Building of Polish Academy of Sciences**. 59(1): 53-72.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Karcz, J. and Major M. 1998. “An effect of a baffle length on the power consumption in an agitated vessel”. *Chemical Engineering and Processing*. 37(3): 249-256.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
เวลาในการผสมจากจุดวัดทั้ง 30 จุดของถังผสมที่ทำการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก เวลาในการผสมจากจุดวัดทั้ง 30 จุดของถังผสมที่ทำการจำลอง

จุดวัด	เวลาในการผสม (วินาที)				
	1 M	6-45-1.5	6-45-3	6-60-1.5	6-60-3
1	4.572	5.532	5.140	5.008	6.040
2	4.60	5.560	5.168	5.032	6.068
3	4.492	5.468	5.064	4.932	5.972
4	4.560	5.520	5.124	4.980	6.060
5	4.440	5.400	4.996	4.876	5.908
6	4.524	5.464	5.072	4.924	5.996
7	4.392	5.360	4.956	4.820	5.904
8	4.456	5.402	5.012	4.864	5.980
9	4.284	5.240	4.836	4.704	5.752
10	4.332	5.280	4.880	4.736	5.864
11	2.904	2.836	2.868	2.840	2.836
12	2.976	2.868	2.908	2.872	2.868
13	3.048	2.876	2.928	2.888	2.872
14	3.752	2.976	3.068	2.996	2.964
15	3.848	3.128	3.308	3.204	3.092
16	3.980	3.256	3.496	3.384	3.196
17	3.724	3.340	3.464	3.428	3.296
18	3.672	3.260	3.412	3.368	3.192
19	3.392	3.076	3.188	3.168	3.024
20	3.280	1.732	2.988	1.736	1.736
21	2.032	2.024	2.028	2.024	2.020
22	2.252	2.236	2.244	2.236	2.236
23	1.936	1.928	1.936	1.932	1.928
24	2.216	2.184	2.192	2.184	2.18
25	2.780	2.076	2.088	2.076	2.072
26	4.056	2.184	2.196	2.184	2.180
27	2.484	2.344	2.372	2.348	2.34
28	2.148	2.124	2.132	2.124	2.124
29	2.404	2.32	2.34	2.324	2.316
30	2.604	2.824	2.012	2.812	2.836

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ) เวลาในการผสมจากจุดวัดทั้ง 30 จุดของถังผสมที่ทำการจำลอง

จุดวัด	เวลาในการผสม (วินาที)			
	10-45-1.5	10-45-3	10-60-1.5	10-60-3
1	4.164	5.220	5.300	5.036
2	4.200	5.244	5.332	5.056
3	4.084	5.140	5.224	4.956
4	4.160	5.200	5.292	5.004
5	4.032	5.076	5.164	4.888
6	4.128	5.160	5.244	4.960
7	3.980	5.032	5.124	4.844
8	4.064	5.088	5.196	4.888
9	3.876	4.912	5.004	4.728
10	3.952	4.968	5.060	4.760
11	2.920	2.844	2.880	2.840
12	2.996	2.880	2.920	2.876
13	3.112	2.888	2.948	2.884
14	4.372	2.996	3.100	2.984
15	4.240	3.180	3.360	3.168
16	4.328	3.328	3.532	3.340
17	3.972	3.392	3.480	3.408
18	3.928	3.324	3.420	3.344
19	3.592	3.124	3.192	3.152
20	3.504	1.732	3.192	1.736
21	2.036	2.024	2.040	2.024
22	2.252	2.24	2.260	2.236
23	1.940	1.932	1.948	1.928
24	2.216	2.184	2.212	2.184
25	2.112	2.076	2.104	2.076
26	4.376	2.184	2.212	2.184
27	4.272	2.348	2.396	2.340
28	4.180	2.124	2.144	2.124
29	2.384	2.324	2.356	2.320
30	2.024	2.008	2.024	2.004

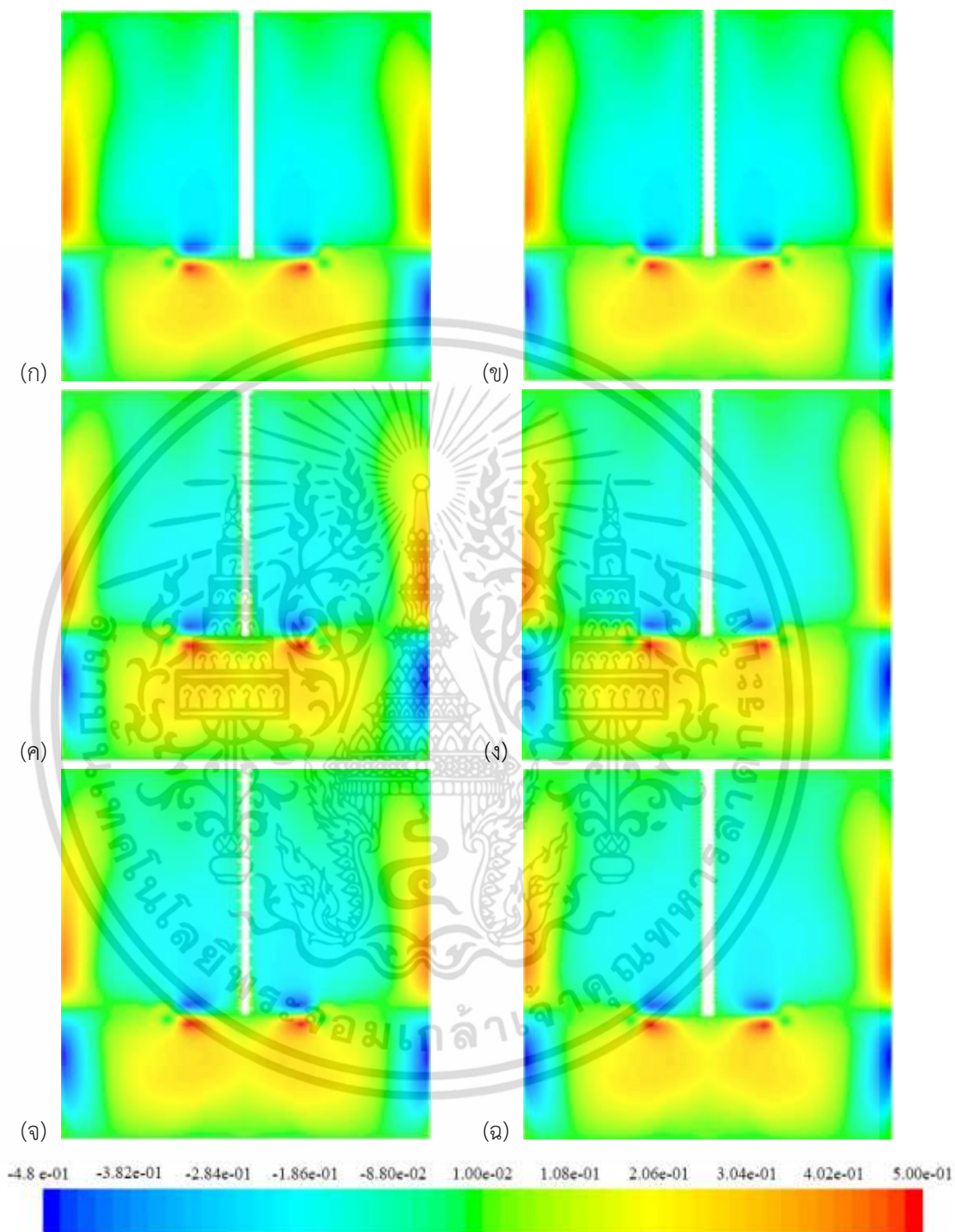
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

คอนทัวร์ค่าความเร็วตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลาชนิตต่าง ๆ

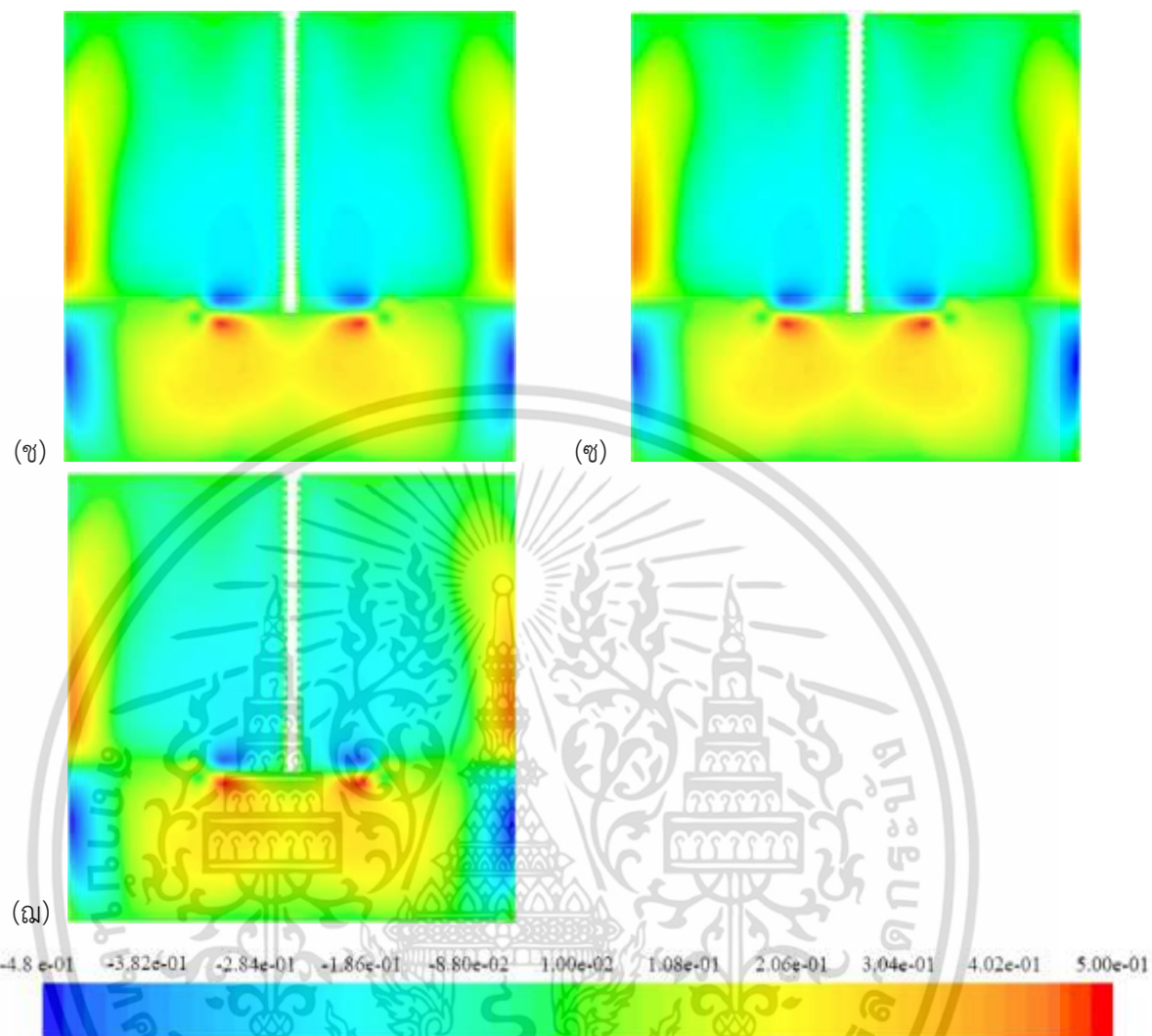
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



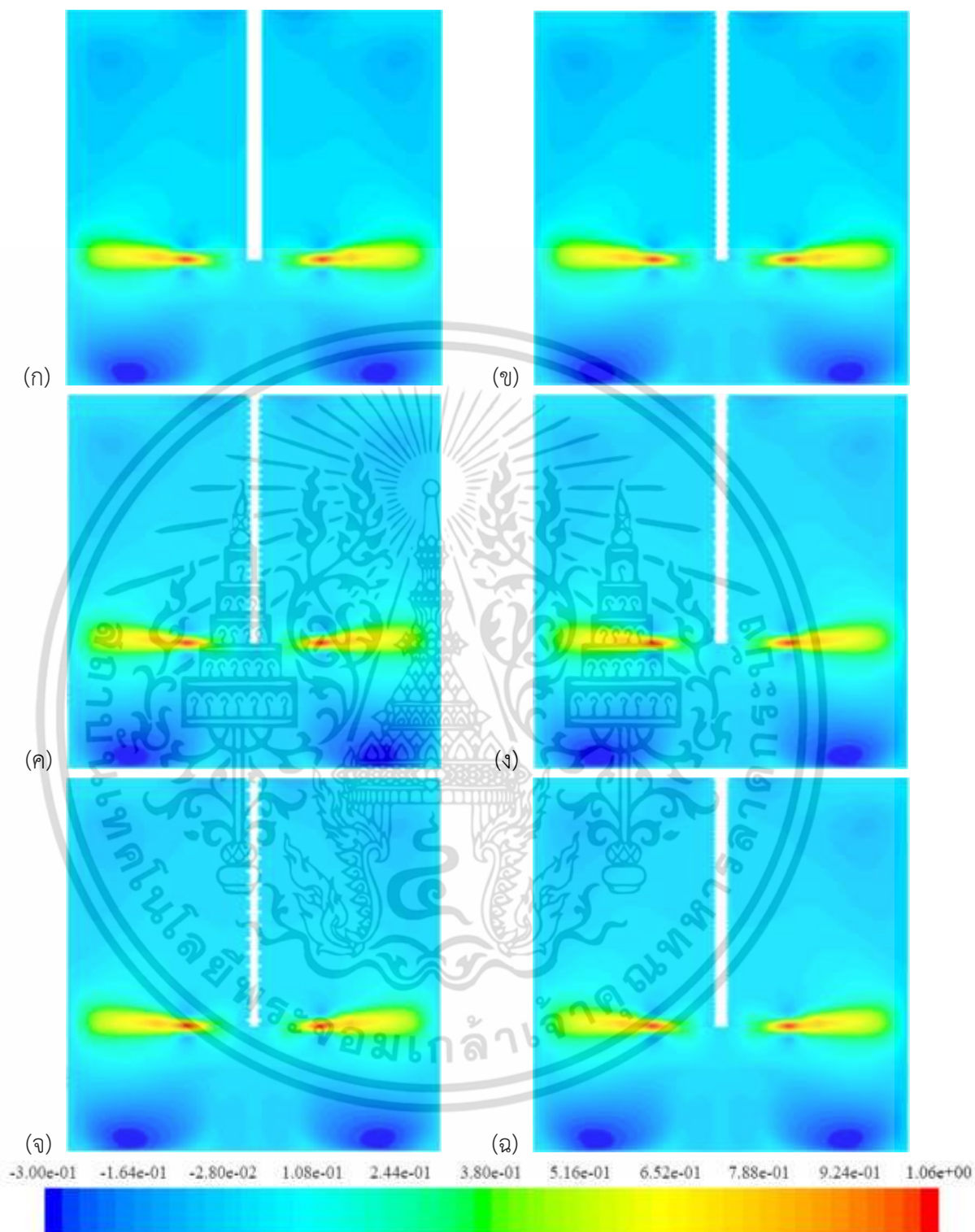
รูปที่ ข.1 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลาชนิตต่าง ๆ ดังนี้

- (ก) อ้างอิง    (ข) 6-45-1.5    (ค) 6-45-3    (ง) 6-60-1.5    (จ) 6-60-3  
 (ฉ) 10-45-1.5    (ช) 10-45-3    (ซ) 10-60-1.5    (ณ) 10-60-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 (ต่อ) คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวแกนตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่าง ๆ ดังนี้  
 (ก) อ่างอิง (ข) 6-45-1.5 (ค) 6-45-3 (ง) 6-60-1.5 (จ) 6-60-3  
 (ฉ) 10-45-1.5 (ช) 10-45-3 (ฅ) 10-60-1.5 (ณ) 10-60-3

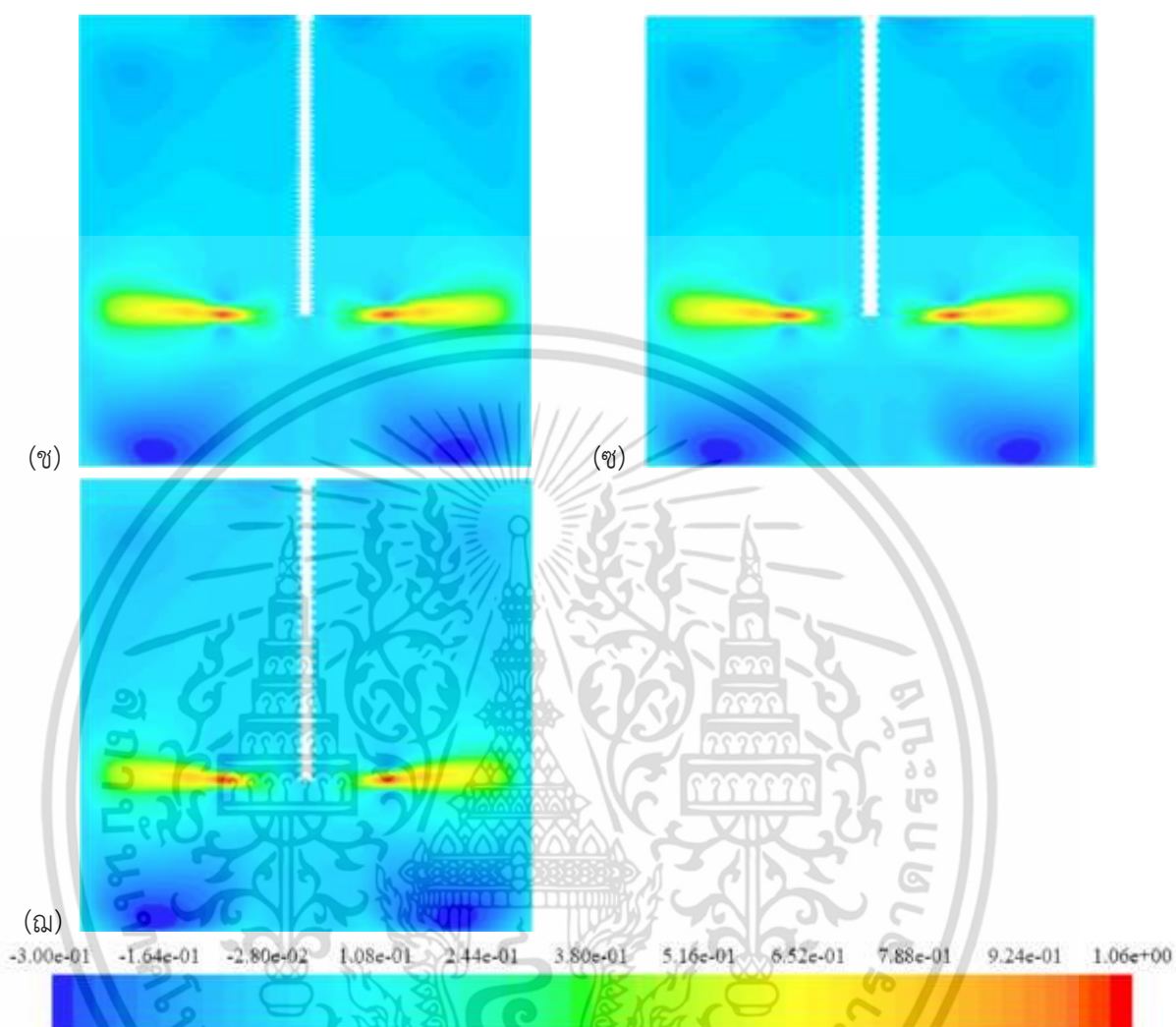


รูปที่ ข.2 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวรัศมีตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่าง ๆ ดังนี้

(ก) อ่างอิง (ข) 6-45-1.5 (ค) 6-45-3 (ง) 6-60-1.5 (จ) 6-60-3

(ฉ) 10-45-1.5 (ช) 10-45-3 (ซ) 10-60-1.5 (ฌ) 10-60-3

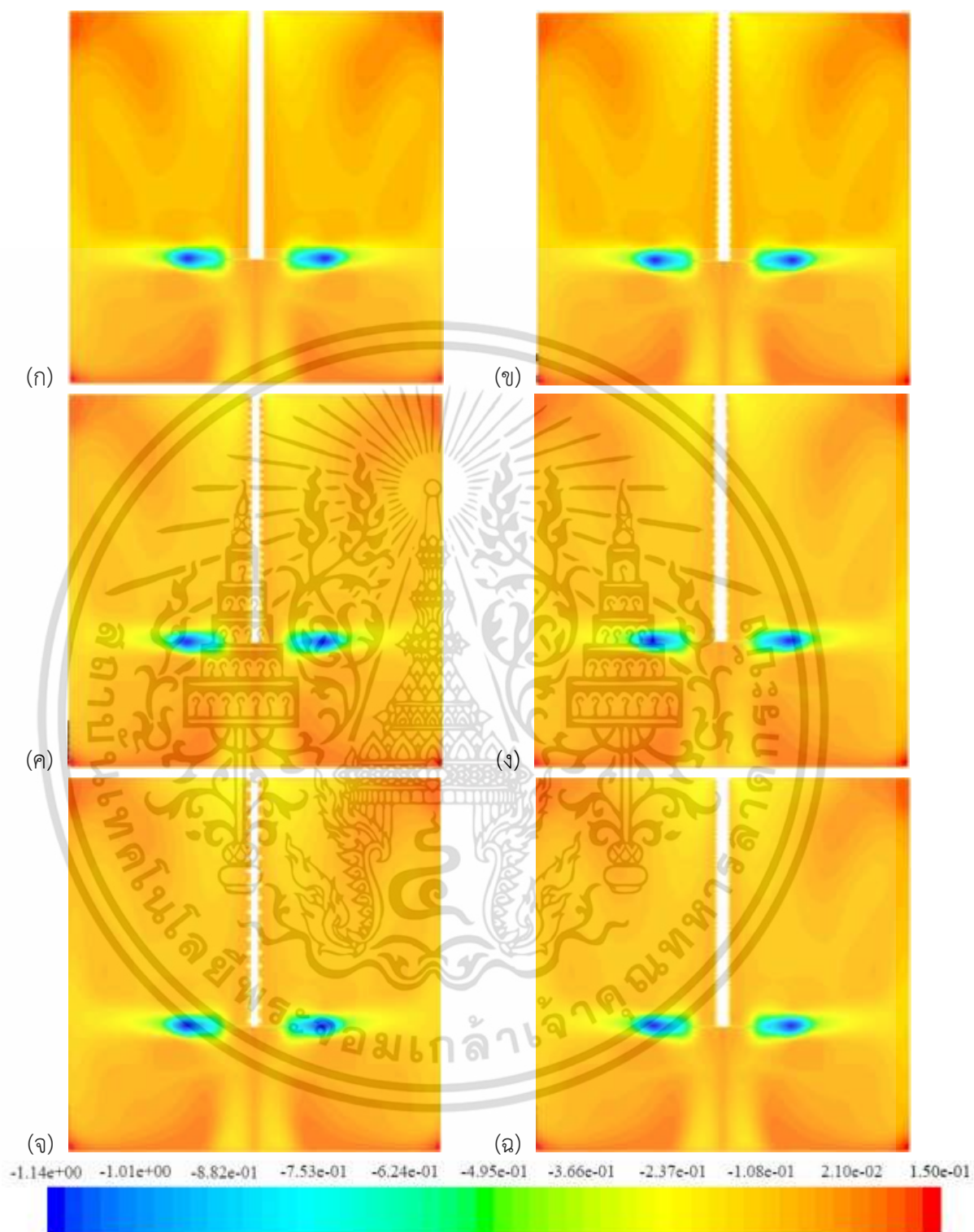
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 (ต่อ) คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวรัศมีตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่าง ๆ ดังนี้

(ก) อ้างอิง (ข) 6-45-1.5 (ค) 6-45-3 (ง) 6-60-1.5 (จ) 6-60-3

(ฉ) 10-45-1.5 (ช) 10-45-3 (ซ) 10-60-1.5 (ฌ) 10-60-3

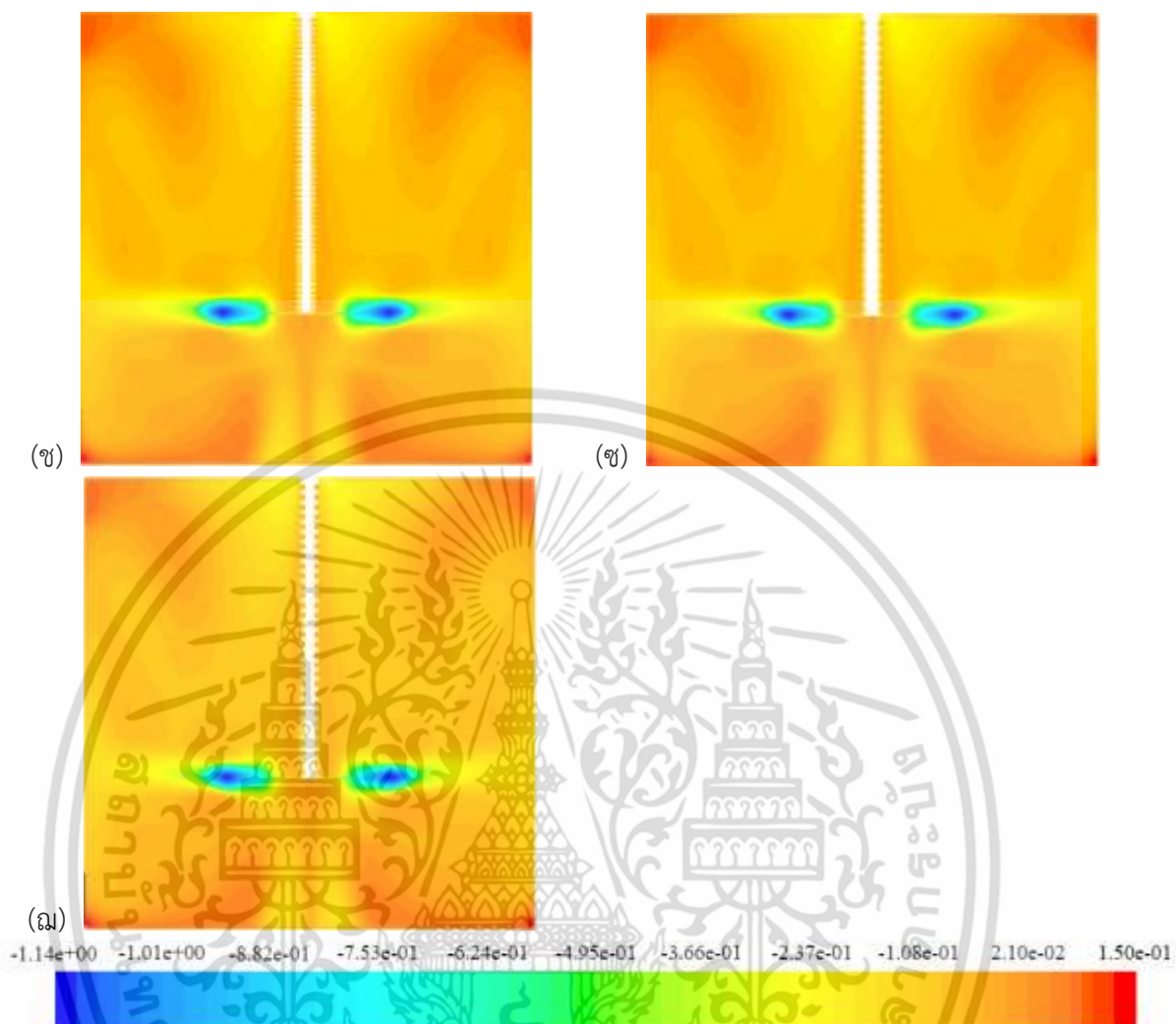


รูปที่ ข.3 คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่าง ๆ ดังนี้

(ก) อ่างอิง (ข) 6-45-1.5 (ค) 6-45-3 (ง) 6-60-1.5 (จ) 6-60-3

(ฉ) 10-45-1.5 (ช) 10-45-3 (ซ) 10-60-1.5 (ฌ) 10-60-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 (ต่อ) คอนทัวร์ค่าความเร็วในแนวเส้นสัมผัสตลอดหน้าตัดของถังผสมที่เพลานิตต่าง ๆ ดังนี้

(ก) อ้างอิง (ข) 6-45-1.5 (ค) 6-45-3 (ง) 6-60-1.5 (จ) 6-60-3

(ฉ) 10-45-1.5 (ช) 10-45-3 (ฅ) 10-60-1.5 (ฌ) 10-60-3

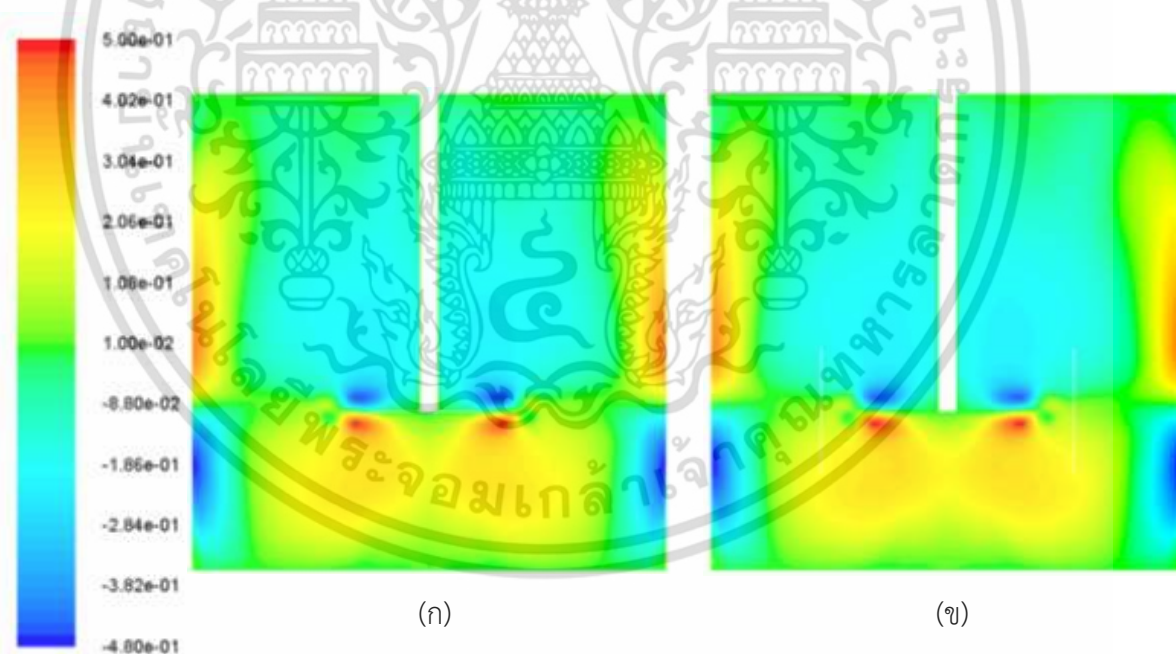
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



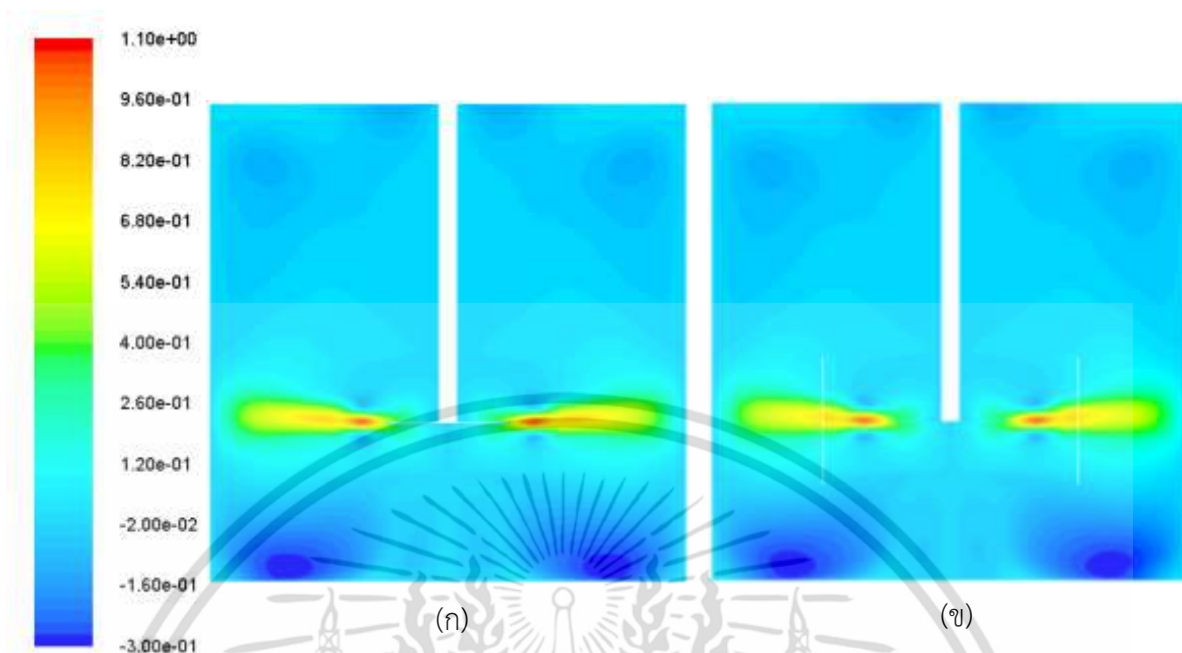
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบผลการจำลองของการแบ่งเมชแบบมีอินเตอร์เฟซและไม่มีอินเตอร์เฟซของถังผสมแบบอ้างอิงที่ถังผสมที่แบ่งเมชแบบมีอินเตอร์เฟซมีจำนวนเซลล์ 475,515 เซลล์ และถังผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซมีจำนวนเซลล์ 748,052 เซลล์ พบว่าถังผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟซมีจำนวนเซลล์มากกว่าประมาณ 1.6 เท่า และใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าด้วย แต่ผลการจำลองไม่มีความแตกต่างมากนัก แสดงดังคอนทัวร์และกราฟที่ค่าความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity) และความเร็วในแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) ดังรูปที่ ค.1.-ค.4. และกราฟค่าพลังงานความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy,  $k$ ) และ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulence dissipation rate,  $\varepsilon$ ) ดังรูปที่ ค.5 และ ค.6 ตามลำดับ

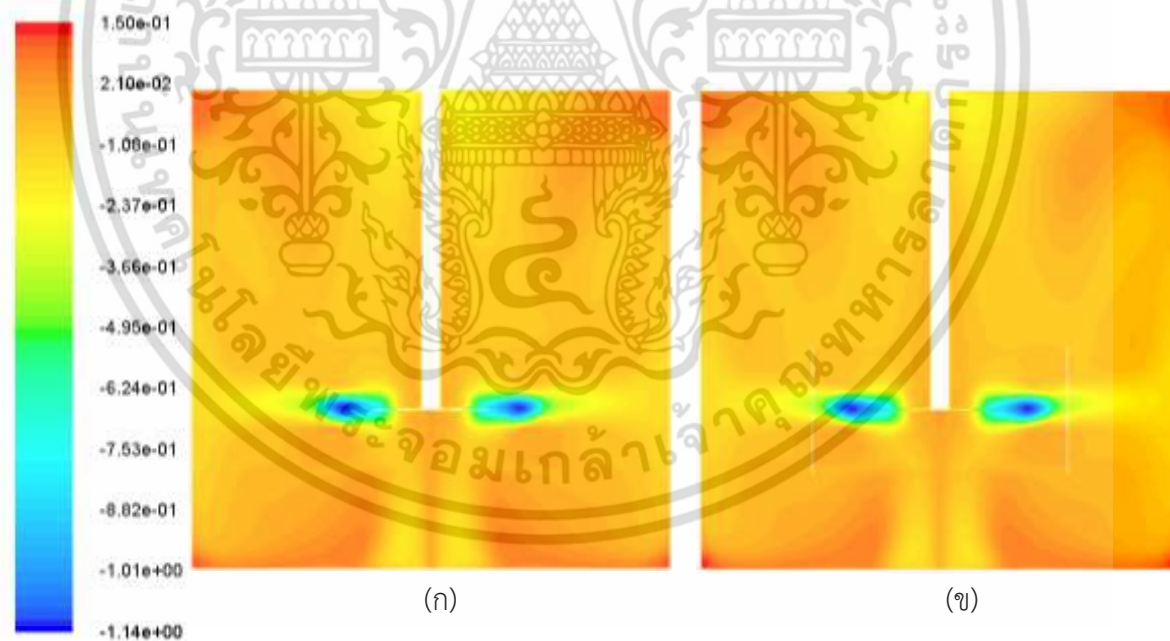
จากกราฟจะสังเกตเห็นความไม่ราบเรียบของเส้นกราฟในถังผสมที่แบ่งเมชแบบมีอินเตอร์เฟซที่ระยะ 0.14 เมตร เป็นผลมาจากรอยต่อของอินเตอร์เฟซระหว่างส่วนบริเวณที่หมุน (Moving zone) และบริเวณที่คงที่ (Stationary zone) และในกรณีถังผสมเพลาเกลียวหลากหลายชนิดจึงเกิดความไม่ราบเรียบของเส้นกราฟที่ระยะนี้เช่นกัน



รูปที่ ค.1 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ที่ระยะหน้าตัด  $y=0$  ในถังผสมเพลาอ้างอิงที่แบ่งเมชแบบ (ก) ไม่มีอินเตอร์เฟซ (ข) มีอินเตอร์เฟซ

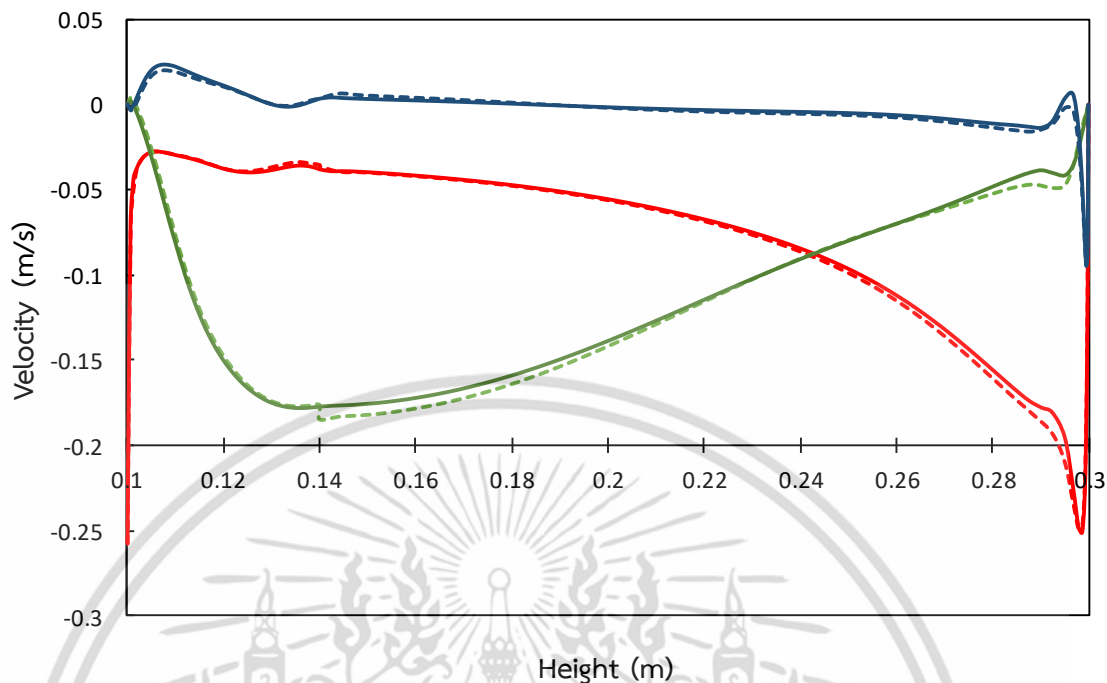


รูปที่ ค.2 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวแนวรัศมี (Radial velocity) ที่ระยะหน้าตัด  $y=0$  ในถึงผสม  
 เพลลาอ้างอิงที่แบ่งเมชแบบ (ก) ไม่มีอินเตอร์เฟส (ข) มีอินเตอร์เฟส

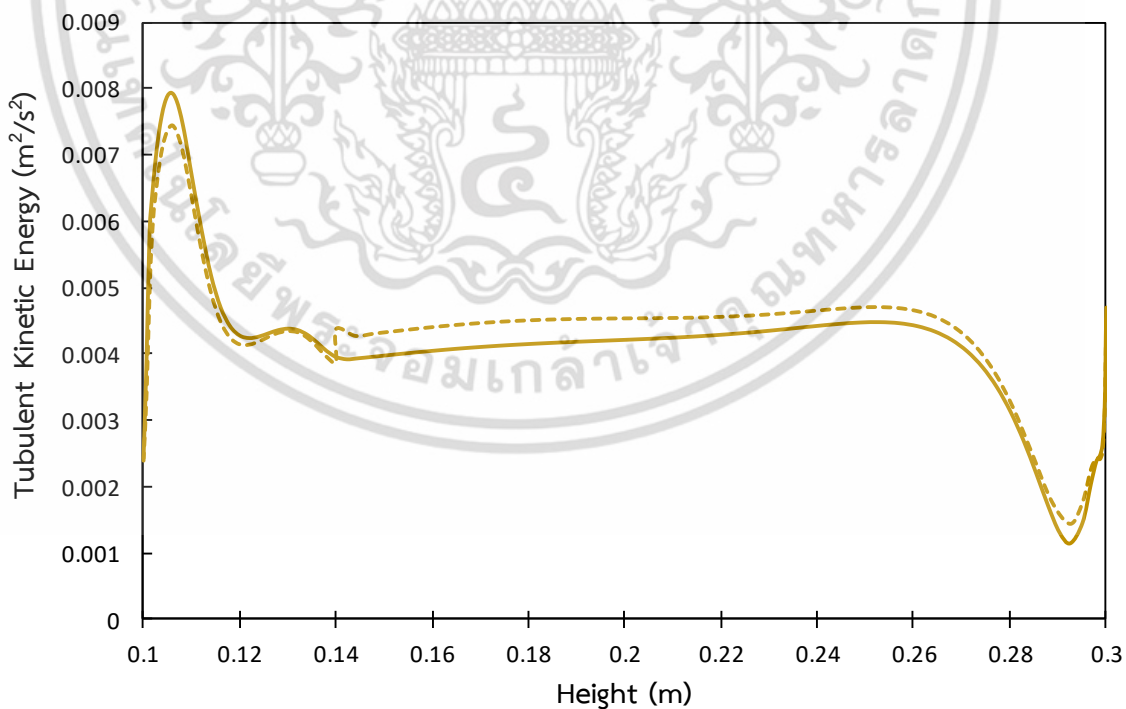


รูปที่ ค.3 คอนทัวร์ค่าความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential velocity) ที่ระยะหน้าตัด  $y=0$   
 ในถึงผสมเพลลาอ้างอิงที่แบ่งเมชแบบ (ก) ไม่มีอินเตอร์เฟส (ข) มีอินเตอร์เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

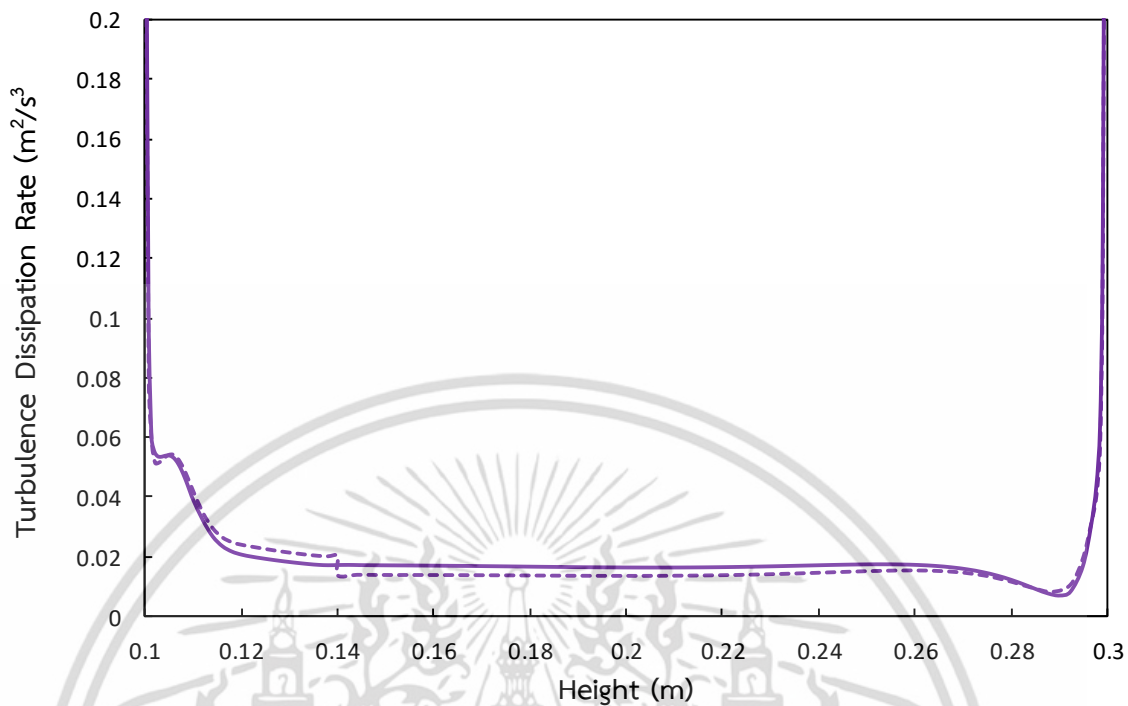


รูปที่ ค.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วต่างๆที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$  เมตร) ระหว่างถังผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟส (—) และมีอินเตอร์เฟส (- -) ที่ค่าความเร็วตามแนวแกน (-) ความเร็วในแนวรัศมี (-) และความเร็วในแนวเส้นสัมผัส (-)



รูปที่ ค.5 กราฟเปรียบเทียบค่าพลังงานความปั่นป่วนที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$  เมตร) ระหว่างถังผสมที่แบ่งเมชแบบไม่มีอินเตอร์เฟส (—) และมีอินเตอร์เฟส (- -)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.6 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วนที่ระยะใกล้เพลลา ( $r=0.009$  เมตร) ระหว่างถึงผลสมที่แบ่งเมซแบบไม่มีอินเตอร์เฟส (—) และมีอินเตอร์เฟส (- -)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวอานี วงค์นัย

วัน เดือน ปีเกิด 16 เมษายน พ.ศ. 2534

ที่อยู่ 8/2 หมู่ 2 ถนนคลองแก้ว แขวงคลองสิบ เขตหนองจอก กทม. 10530

### ประวัติการศึกษา

พศ. 2560 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พศ. 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การทำงานและงานวิจัย

พศ. 2554 นักศึกษาฝึกงาน ฝ่ายกระบวนการการผลิต โรงแยกก๊าซธรรมชาติ ระยอง

พศ. 2558 Wongnui A., Akavipat C., Bumrunghaichaichan E., and Wattananusorn S.  
2015. "CFD simulation of disc radius and blade height effects on mixing performance in the unbaffled tank covered by a lid" Ladkrabang engineering journal. 32(4). 49-54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้