

การปรับปรุงผิวของของเหลวด้านบนสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณของถังผสมแบบเจ็ท

MODIFICATION OF TOP LIQUID-SURFACE FOR COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS SIMULATION OF JET MIXED TANKS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคำหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-220-095

การปรับปรุงผิวของของเหลวด้านบนสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณของถังผสมแบบเจ็ท

MODIFICATION OF TOP LIQUID-SURFACE FOR COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS SIMULATION OF JET MIXED TANKS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-220-095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODIFICATION OF TOP LIQUID-SURFACE FOR COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS SIMULATION OF JET MIXED TANKS



SATAPAN PHAPATARINAN

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

2019

KMITL-2019-EN-M-220-095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงผิวของของเหลวด้านบนสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของถังผสมแบบเจ็ท
นักศึกษา	นายศตปัญญ์ ปภาธารินทร์
รหัสประจำตัว	60601080
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์

บทคัดย่อ

ถังผสมแบบเจ็ทเป็นหนึ่งในอุปกรณ์สำคัญทางอุตสาหกรรมเคมี นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมแล้วยังลดต้นทุนในทางเศรษฐศาสตร์กว่าการใช้ถังผสมชนิดอื่นๆ ดังนั้นการออกแบบถังผสมแบบเจ็ทจึงเป็นงานวิจัยที่มีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา จากงานวิจัยต่างๆในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับถังผสมแบบเจ็ทนั้นได้รายงานผลการจำลองของถังผสมแบบเจ็ทที่ความเร็วต่างๆ ซึ่งยังมีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลอง ในงานวิจัยนี้ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังผสมแบบเจ็ทและพัฒนาแบบจำลองของถังผสมแบบเจ็ท โดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการจำลองการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังผสมแบบเจ็ท ซึ่งจะพิจารณาจากแบบจำลองความปั่นป่วนพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสม และรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน สำหรับการจำลองเบื้องต้นจะนำผลการจำลองไปเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น จากนั้นจึงจะศึกษาตัวแปรอื่นๆโดยการเปรียบเทียบเวลาการผสมรวมและโปรไฟล์ความเข้มข้นซึ่งแสดงถึงรูปแบบการกระจายตัวของสารเข้มข้น จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon มีความถูกต้องสำหรับทำนายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในถังผสมแบบเจ็ท สำหรับอิทธิพลของของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมพบว่า การกำหนดให้พื้นผิวของเหลวด้านบนถังผสมเป็นผนังเคลื่อนที่ 3 ทิศทางนั้นทำให้แนวโน้มของการกระจายตัวของสารติดตามสอดคล้องกับการทดลองมากกว่าพื้นผิวของเหลวด้านบนแบบสมมาตร เนื่องจากหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก จึงทำให้การประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence

Thesis	Modification of Top Liquid-Surface for Computational Fluid Dynamics Simulation of Jet Mixed Tanks
Student	Mr.Satapan Phapatarinan
Student ID.	60601080
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Santi Wattananusorn

ABSTRACT

Jet mixing tank is an important equipment which is widely used in chemical industries. In addition, to increase the mixing efficiency, it also reduces economic cost than the other types of mixing tanks. So, the design of jet mixing tank is a research that has developed over the time. According to previous researches, the simulation results of jet mixing tank at various jet velocities are still inaccurate with the experimental results. This research studied the phenomena that occurred within the jet mixing tank and developed a model of jet mixing tank by using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique to simulate the flow. The effect of turbulence models, top-liquid surface and turbulence kinetic energy estimation model were considered. The preliminary simulated results were validated by comparing with experimental data. The simulated results revealed that the Realizable k-epsilon turbulence model was good enough for jet flow phenomena prediction. For the influence of top-liquid surface, the simulated results revealed that determining the top-liquid surface to be a three-ways moving wall causes the tendency of the dispersion of the tracer to be consistent with the experimental data than symmetry. Because the nozzle diameter is small, the simulated results revealed that the isotropic turbulence kinetic energy estimation is consistent with the experimental data rather than the axisymmetric turbulence kinetic energy estimation.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่างๆตลอดจนการดูแลเอาใจใส่และให้การสนับสนุนในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. Horst Stoff ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัย Ruhr Bochum สำหรับคำแนะนำที่มีคุณค่า

ขอขอบพระคุณ นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่ให้ความรู้ทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติไม่ว่าจะเป็นเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและคำแนะนำสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูงในการจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และ ANSYS FLUENT กกับการจำลองการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท รวมถึงให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา การออกแบบและร่วมวิเคราะห์ผลการจำลอง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและการปรับปรุงโครงร่างวิทยานิพนธ์ ทำให้ปริญญาณิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ถูกต้องมากขึ้น

ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนในห้องวิจัย Computational Fluid Dynamics ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำชี้แนะในเรื่องพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยดีเสมอมา

ขอบคุณ นายณัฐวัตร ใจกลม สำหรับจุดเริ่มต้นของการศึกษากลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในถังผสมแบบเจ็ท และข้อมูลอันมีค่ามหาศาล

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา และผู้อุปการะเลี้ยงดูของข้าพเจ้า ตลอดจนครุบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาอบรมจริยาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า

ศาสตปัญญา ปภาธารินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	3
2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	5
2.2.1 สมการควบคุม.....	5
2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	6
2.3 การไหลแบบเจ็ท.....	8
2.3.1 กลศาสตร์ของไหลของเจ็ท.....	8
2.3.2 การไหลแบบเจ็ทปั่นป่วน.....	10
2.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วน.....	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 การออกแบบและคำนวณการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ทโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	15
3.1 การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองถังผสมแบบเจ็ท.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

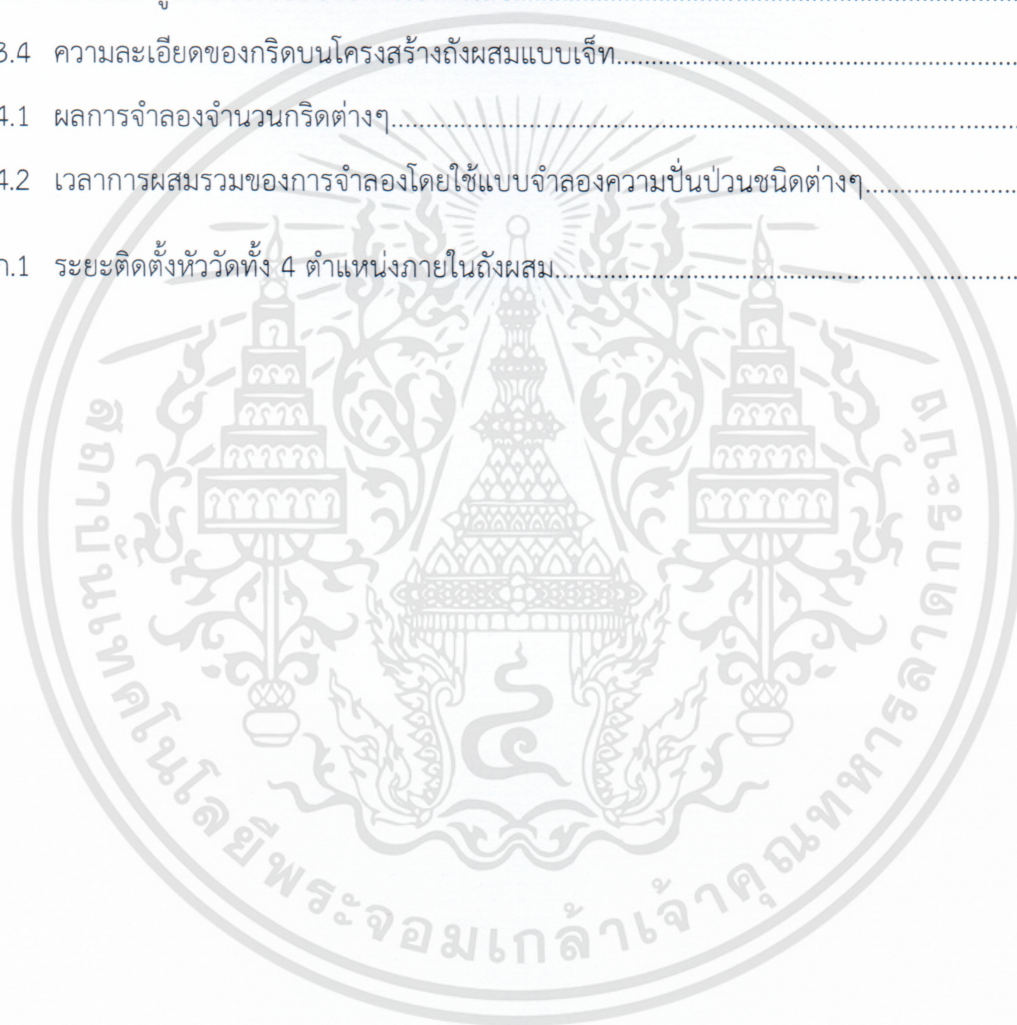
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 โครงสร้างถังผสมแบบเจ็ท	15
3.1.2 แบบจำลองและการกำหนดสมบัติ	17
3.1.3 การศึกษาปริมาณกรดที่เหมาะสมต่อการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	18
3.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน	19
3.3 การศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวของหลอดด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท	20
3.4 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน	22
บทที่ 4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง	23
4.1 ผลการศึกษาปริมาณกรดที่เหมาะสมต่อการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	24
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน.....	25
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวของหลอดด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท.....	27
4.3.1 ผนังเคลื่อนที่ 1 ทิศทาง	28
4.3.2 ผนังเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง	28
4.3.3 ผนังเคลื่อนที่ 3 ทิศทาง	31
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน.....	39
4.4.1 การคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence	39
4.4.2 การคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปผลการจำลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก ก.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายละเอียดของตัวแปรต่างๆในสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	5
3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขต.....	17
3.2 การตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุ.....	17
3.3 การตั้งค่ารูปแบบระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข.....	17
3.4 ความละเอียดของกริดบนโครงสร้างถึงผสมแบบเจ็ท.....	17
4.1 ผลการจำลองจำนวนกริดต่างๆ.....	24
4.2 เวลาการผสมรวมของการจำลองโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดต่างๆ.....	27
ก.1 ระยะติดตั้งหัววัดทั้ง 4 ตำแหน่งภายในถังผสม.....	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นนมัลไลซ์ของหัวฉีดที่เอียงทำมุม 45° ณ ความเร็ว 4.4 เมตร/วินาที ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง.....	2
1.2 การเปรียบเทียบเวลาผสมของหัวฉีดที่เอียงทำมุม 45° ระหว่างผลการจำลองโดยและผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง.....	2
2.1 การทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	4
2.2 ชั้นการไหลของเจ็ทหน้าตัดวงกลม.....	9
2.3 แผนภาพของเจ็ทหน้าตัดวงกลม.....	9
2.4 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท.....	10
3.1 การสร้างกริดของถังผสมแบบเจ็ทตามงานวิจัยอ้างอิง.....	16
3.2 แบบจำลองของถังผสมแบบเจ็ทตามงานวิจัยอ้างอิงและตำแหน่งของหัวฉีด.....	16
3.3 แผนภาพระบบพิกัดของการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท.....	21
4.1 ผลของจำนวนกริดต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการจำลอง.....	24
4.2 คอนทัวร์ของความเร็วเจ็ทภายในถังผสมของแบบจำลองความปั่นป่วนบนระนาบ.....	26
4.3 รูปแบบของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสม.....	28
4.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัวฉีดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร.....	35
4.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัวฉีดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร.....	35
4.6 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัวฉีดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง Z.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง Z.....	36
4.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทางYZ.....	37
4.9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ ในทิศทาง YZ.....	37
4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ.....	38
4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ.....	38
4.12 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ โดยมีรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนต่างกัน.....	41
4.13 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ โดยมีรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนต่างกัน.....	41

สัญลักษณ์

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

c	ความเข้มข้นที่ตำแหน่งใดๆ (-)
\bar{c}	ความเข้มข้นเฉลี่ยของทั้งระบบที่จุดสมดุล (-)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางถังผสม (m)
D_j	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (m)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (m)
E	พลังงานจำเพาะของของไหล (J)
G_b	การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	การเกิดขึ้นของพลังงานปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย
H	ระดับของเหลว (m)
I	ความเข้มข้นของการปั่นป่วน (%)
\bar{J}_i	ฟลักซ์ของการแพร่ของสาร i ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
k	พลังงานจลน์ปั่นป่วน (J/kg)
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)
L_c	ความยาวคุณลักษณะ (m)
p	ความดัน (Pa)
p^*	ความดันคาจดดา (Pa)
p'	ความดันปรับแก้ (Pa)
Q	ฟลักซ์ปริมาตร (m/s)
R_i	อัตราสุทธิของผลิตภัณฑ์สาร i โดยปฏิกิริยาเคมี ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)
r	รัศมีของเจ็ทจากเส้นกึ่งกลางลำเจ็ท (m)
S_E	แหล่งพลังงานอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

S_M	เทอมของแหล่งโมเมนตัมอื่นๆ
S_k และ S_ϵ	เทอมแหล่งกำเนิดที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นของ k และ ϵ
Sc_t	ตัวเลข Schmidt ปั่นป่วน
T	อุณหภูมิ (K)
t	เวลา (s)
U	ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกเจ็ท (m/s)
U^*	ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ (m/s)
U_j	ความเร็วที่ทางออกเจ็ท (m/s)
U_m	ความเร็วกึ่งกลางเจ็ท (m/s)
U_{ref}	ความเร็วอ้างอิงในการไหลเฉลี่ย (m/s)
U_x	ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x (m/s)
U_y	ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y (m/s)
U_z	ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z (m/s)
$U_{z_{max, surface}}$	ความเร็วสูงสุดของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z (m/s)
u_c	ความเร็วเฉลี่ยในแนวการไหล (m/s)
\bar{u}	เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
u^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน x (m/s)
u'	ความเร็วแกว่งในแนวแกน x (m/s)
v'	ความเร็วแกว่งในแนวแกน y (m/s)
v^*	ความเร็วคาดเดาในแนวแกน y (m/s)
v'	ความเร็วปรับแก้ในแนวแกน y (m/s)

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

\bar{v}	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)
$u_{\max}(x)$	ความเร็วสูงสุดที่เส้นกึ่งกลางลำเจ็ท (m/s)
w'	ความเร็วแกว่งในแนวแกน z (m/s)
x	ระยะทางตามแนวแกน x (m/s)
Y_i	สัดส่วนโดยมวลของสาร i (-)
Y_M	บทบาทของการขยายตัวที่แกว่งในความปั่นป่วนที่อัดตัวได้ที่ส่งผลต่ออัตราการสลายตัวทั้งหมด

ตัวอักษรภาษากรีก

α	ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x
α_k	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนดเทิลประสิทธิภาพสำหรับ k (-)
α_ε	ปริมาณส่วนกลับของตัวเลขพรีนดเทิลประสิทธิภาพสำหรับ ε (-)
α_p	ตัวประกอบได้การผ่อนปรนของความดัน (-)
α_s	ค่าคงที่ของการหมุนวน (-)
β	ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y
ε	อัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (m^2/s^3)
γ	ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z
θ	มุมการฉีดเจ็ท (องศา)
λ	สัมประสิทธิ์ความหนืดอันดับสอง ($kg/m \cdot s$)
μ	สัมประสิทธิ์ความหนืด ($kg/m \cdot s$)
μ_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ ($kg/m \cdot s$)
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน ($kg/m \cdot s$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวอักษรภาษากรีก (ต่อ)

μ_{10}	ค่าของความหนืดปั่นป่วนที่ถูกคำนวณโดยปราศจากปรากฏการณ์การหมุนวน (kg/m·s)
ν	ความหนืดเชิงจลน์ (m ² /s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m ³)
σ_k	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ k (-)
σ_ϵ	ตัวเลขพรีนด์เทิลปั่นป่วนสำหรับ ϵ (-)
τ	ความเค้นเฉือน (Pa)
ϕ	คุณสมบัติการไหลฉบับพลัน
$\bar{\phi}$	คุณสมบัติของไหลเฉลี่ยตามเวลา
φ	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล
φ'	เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง
ξ	สัมประสิทธิ์ใดๆ

บทที่ 1

บทนำ

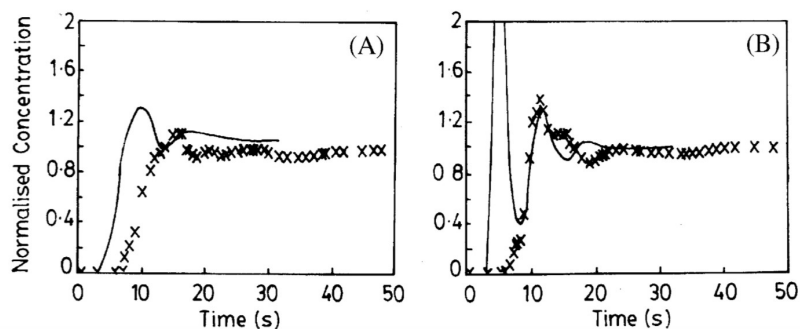
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผสมเป็นหนึ่งในหน่วยปฏิบัติการที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมี ในถังกักเก็บที่มีขนาดใหญ่ การใช้ เครื่องผสมด้านบนอาจจะไม่เหมาะสม โดยทั่วไปจึงมีการใช้เครื่องผสมขนาดเล็กติดตั้งในด้านข้างแทน แต่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมการรั่วไหลภายในถัง ในสถานการณ์เช่นนี้ การประยุกต์ใช้การไหลแบบเจ็ท (Jet Flow) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการไหลแบบเจ็ทนั้นของไหลจะไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) ด้วยความเร็วสูงผ่านของไหลอิสระที่อยู่ภายในถัง โดยความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างลำเจ็ทและกลุ่มของไหลจะทำให้เกิดชั้นการผสมแบบปั่นป่วนที่ขอบเขตของเจ็ทและจะดึงของไหลโดยรอบเข้าสู่ลำเจ็ท ซึ่งทำให้ของไหลโดยรอบเกิดการไหลเวียนเป็นผลให้ลำเจ็ทมีการขยายตัวใหญ่ขึ้น รูปแบบการหมุนเวียนในถังที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปสู่กระบวนการผสมนั่นเอง [1]

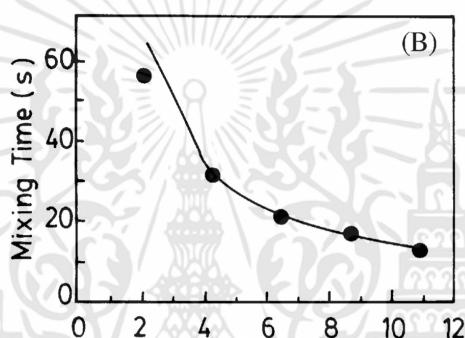
การผสมแบบเจ็ทสามารถติดตั้งได้ง่าย เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนหมุนภายในถังทำให้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งโครงสร้างเสริมแรงและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การผสมอื่นๆ ในแง่ของการบำรุงรักษานั้นสามารถทำได้ง่ายเนื่องจากปราศจากชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหลภายในตัวถัง [2] ด้วยเหตุนี้การผสมแบบเจ็ทจึงเป็นที่นิยมและประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การประยุกต์ใช้ในระบบที่ของไหลประกอบด้วย 2 สถานะ [3] การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน [4] และระบบระบายความร้อนฉุกเฉินสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีเพื่อหยุดปฏิกิริยาที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Runaway Reaction) [5]

เนื่องจากการไหลแบบเจ็ทสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้อย่างดีเยี่ยม จึงทำให้มีการวิจัยและออกแบบถังผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอย่างแพร่หลาย เพื่อลดการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการออกแบบและวิจัย การเลือกใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่งานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหัวฉีดเจ็ทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผสม จากงานวิจัยของ Patwardhan [6] ได้รายงานผลการจำลองของถังแบบเจ็ท ณ ความเร็วต่างๆ โดยทำนายเวลาผสมรวมในกรณีที่เจ็ทมีตัวเลขเรย์โนลด์สูงใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ทำนายการกระจายตัวของสารติดตามที่มีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.1 อีกทั้งช่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ปานกลางได้ทำนายเวลาผสมรวมคลาดเคลื่อนกับแนวโน้มของผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองและการกำหนดสภาวะขอบเขตยังไม่ถูกต้องเท่าที่ควร จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นนอมัลไลซ์ของหัวฉีดที่เอียงทำมุม 45° ณ ความเร็ว 4.4 เมตร/วินาที ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [6] โดยที่ — คือ ผลการจำลอง และ x คือ ผลการทดลอง



รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบเวลาผสมของหัวฉีดที่เอียงทำมุม 45° ระหว่างผลการจำลองโดยและผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [6] โดยที่ — คือ ผลการจำลอง และ ● คือ ผลการทดลอง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ทในถังผสมโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลอง
2. เพื่อปรับปรุงการทำนายเวลาการผสมรวมและโปรไฟล์ความเข้มข้นในถังผสมแบบเจ็ท (Jet Mixing Tank)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างแบบจำลอง 3 มิติโดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.4.6 และคำนวณสนามการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.5 เพื่อทำนายเวลาที่ใช้ในการผสมของถังผสมแบบเจ็ท
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อโปรไฟล์ความเข้มข้น ประกอบด้วย แบบจำลองความปั่นป่วน, พื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสม (Top Liquid-Surface) และรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาหนึ่งของกลศาสตร์ของไหลที่ใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล การถ่ายเทพลังงานและเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาเคมี ซึ่งตั้งอยู่บนกฎพื้นฐาน 3 ข้อ คือ กฎการอนุรักษ์มวล กฎข้อที่สองของนิวตัน และกฎการอนุรักษ์พลังงาน [7] โดยอาศัยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) เพื่อแก้สมการทางพลศาสตร์ของไหลซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) และไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิต เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณการไหลบนโดเมนที่สนใจ จากนั้นสามารถแสดงผลออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น คอนทัวร์ เวกเตอร์ เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์และแก้ปัญหาการไหลรูปแบบต่างๆ ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมมากมาย เช่น การออกแบบยานพาหนะ การกระจายตัวของมลพิษในอากาศ การผสมและแยกสารในอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

ด้วยข้อดีของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เช่น สามารถคำนวณข้อมูลครั้งละมากๆ แม้ข้อมูลจะมีความหลากหลายหรือซับซ้อน ทำให้ประหยัดทั้งทรัพยากรและเวลา อีกทั้งการประมาณค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผล แต่ในกรณีที่การไหลมีความซับซ้อนมากๆ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพสูง นั้นหมายความว่าทรัพยากรที่ใช้จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน เพื่อแลกมาด้วยข้อมูลที่มีค่าซึ่งการทดลองก็ยากที่จะทำได้ และที่สำคัญการจำลองจะต้องมีการเปรียบเทียบข้อมูลกับผลการทดลองหรือทฤษฎีก่อนทุกครั้ง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องจึงสามารถใช้แบบจำลองนี้ต่อไปได้

หลักการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-Processor) กระบวนการคำนวณ (Solver) และกระบวนการหลังการคำนวณ (Post-Processor) แสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-Processor) เป็นขั้นตอนการเตรียมความพร้อมก่อนการคำนวณปัญหาการไหล โดยการป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณให้กับโปรแกรมคำนวณมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การสร้างโดเมนของการคำนวณ (Computational Domain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

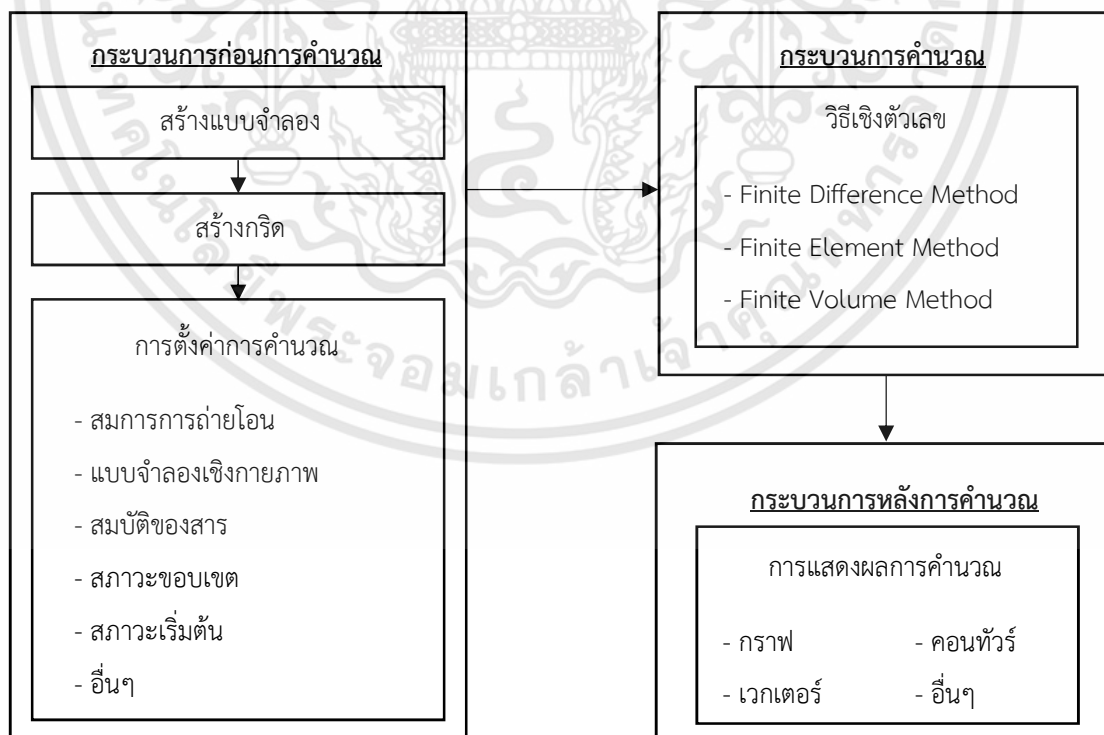
2. การสร้างเมช (Mesh) หรือ กริด (Grid) ซึ่งเป็นกระบวนการที่แบ่งโดเมนของการคำนวณให้เป็นส่วนเล็ก ๆ จำนวนมาก
3. เลือกสมการหรือแบบจำลองที่จำเป็นต่อการคำนวณปรากฏการณ์ที่สนใจ
4. กำหนดสมบัติของการไหล (Fluid Properties)
5. กำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Conditions)

2.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solver) เป็นการคำตอบด้วยวิธีการเชิงตัวเลขซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method: FVM) ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีขั้นตอนดังนี้

1. แบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ
2. อินทิเกรตสมการควบคุมของของไหลทุกปริมาตรควบคุมภายใต้ขอบเขตของปัญหา
3. เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิตด้วยวิธีเชิงตัวเลข ด้วยการแทนค่าเทอมต่างๆ ของสมการควบคุมที่อินทิเกรตแล้วด้วยการประมาณค่า
4. หาคำตอบของสมการพีชคณิตโดยวิธีการกระทำซ้ำ

2.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-Processor) เป็นการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เวกเตอร์ คอนทัวร์ รูปทรงโดเมน และการแสดงกริด การติดตามอนุภาค เป็นต้น

โดยการทำงานของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

2.2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อใช้แก้ไขปัญหาของถังผสมแบบเจ็ทที่สภาวะคงตัว (Steady State) โดยใช้สมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equation) [7] และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equation) [7] ในรูปแบบของสมการเฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds Average Equation) [7] เพื่ออธิบายรูปแบบของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างย่อดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (2.1)$$

โดยที่

U คือ เวกเตอร์ของความเร็วเฉลี่ย

ϕ คือ คุณสมบัติการไหลฉับพลัน (Universal Dependent Variable)

Γ_ϕ คือ ค่าการแพร่

S_ϕ คือ เทอมของแหล่งกำเนิดอื่น ๆ

รายละเอียดของตัวแปรต่างๆสำหรับสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของตัวแปรต่างๆในสมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการ	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
สมการความต่อเนื่อง	1	0	0
สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	\bar{u}_i	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + S_{M,i}$

นอกจากนี้สมการถ่ายเทมวลสารถูกนำมาใช้สำหรับแก้ปัญหาระบบที่มีการแพร่ของสาร รวมถึงมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งมีประโยชน์สำหรับทำนายสัดส่วนโดยมวลของสารแต่ละชนิดที่กระจายตัวอยู่ในระบบที่เวลาใด ๆ [8] สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (2.2)$$

โดยที่

Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของสาร i

$D_{i,m}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลของสาร i ในสารผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Sc_t คือ ตัวเลข Schmidt ปั่นป่วน
 μ_t คือ ค่าความหนืดปั่นป่วน
 S_i คือ เทอมของแหล่งกำเนิดของสาร i

2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon (k-epsilon Turbulence Models)

แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon เป็นแบบจำลองปั่นป่วนที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนในการคำนวณไม่มากจนเกินไป จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและปรับแก้ให้มีการทำนายที่แม่นยำและหลากหลายมากขึ้น ซึ่งหนึ่งในส่วนหนึ่งของงานวิจัยคือการศึกษาคณิตศาสตร์ของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการคำนวณการไหล เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการไหลแบบเฉื่อยภายในถังผสม โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 แบบจำลอง ได้แก่ Standard k-epsilon (SKE), Realizable k-epsilon (RKE) และ Low-Reynolds k-epsilon (LRKE) [8] แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามแบบจำลองจะประกอบไปด้วยชุดสมการการถ่ายโอน 2 ชนิดที่แยกออกจากกัน คือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) และสมการของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation of Turbulent Kinetic Energy, ϵ)

2.2.2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi-Empirical Model) โดยขึ้นอยู่กับสมการถ่ายโอนสองสมการ คือ สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) ซึ่งถูกพิสูจน์จากสมการแม่นยำ (Exact Equation) และสมการถ่ายโอนของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) ซึ่งสามารถหาได้จากเหตุผลทางฟิสิกส์ โดยสมมติฐานของแบบจำลองความปั่นป่วนนี้ คือ การไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (Fully Turbulent) จึงทำให้ผลกระทบเนื่องจากความหนืดของโมเลกุลสามารถละทิ้งได้ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ [8]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.3)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2.4)$$

2.2.2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon เป็นแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงขึ้นจากแบบจำลอง Standard k-epsilon โดยจะมีสูตรการคำนวณความหนืดปั่นป่วนในรูปแบบใหม่ ทำให้สมการถ่ายโอนของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) จะถูกเขียนในรูปแบบใหม่ ซึ่งถูกพิสูจน์จากสมการแม่นยำตรงสำหรับการถ่ายโอนของค่าเฉลี่ยของการหมุนวนผันผวนยกกำลังสอง (Mean-Square Vorticity Fluctuation) โดยข้อดีของแบบจำลองความปั่นป่วน RKE คือ มีความแม่นยำในการทำนายอัตราการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ทหน้าตัดวงกลม (Round Jet) และการไหลแบบเจ็ทระนาบ (Planar Jet) อีกทั้งแบบจำลองยังคงมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายการไหลที่การหมุนวนที่ซับซ้อนขอบเขตภายใต้เกรเดียนต์ของความดันสวนทาง (Adverse Pressure) สูง พลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ [8]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.5)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2.6)$$

2.2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon เป็นแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงการคำนวณบริเวณชั้นขอบการไหล (Boundary Layer) มีการปรับลดความหนืดใกล้ผนัง และเพิ่มความหนืดของโมเลกุล เพื่อคำนวณการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์น้อย โดยพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) หาได้จากสมการถ่ายโอนที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ [9]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \epsilon + \mu_t S^2 \quad (2.7)$$

และ

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (f_1 C_{1\epsilon} \mu_t S^2 - f_2 C_{2\epsilon} \epsilon) \quad (2.8)$$

2.3 การไหลแบบเจ็ท (Jet Flow)

การไหลแบบเจ็ทเป็นหนึ่งในกรไหลแบบเฉือน (Shear Flow) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากโมเมนตัม โดยของไหลจะไหลผ่านช่องแคบหรือหัวฉีด (Nozzle) ไปยังของไหลอีกชนิดที่หยุดนิ่งอยู่ (Surrounding Fluid) จะทำให้เกิดชั้นการเฉือนกันระหว่างของไหลสองชนิด ซึ่งความแตกต่างของความเร็วระหว่างลำเจ็ทกับของไหลโดยรอบจะทำให้เกิดการหมุนวน (Eddy) ที่ชั้นการเฉือนและดึงมวลของของไหลที่อยู่โดยรอบเข้าสู่ลำเจ็ท (Entrainment) จึงทำให้เกิดการผสมของของไหลทำให้ของไหลในระบบมีการไหลเวียน ด้วยเหตุผลดังกล่าวการไหลแบบเจ็ทจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย หนึ่งในนั้นคือกระบวนการผสม เพราะต้องการให้ของไหลในระบบมีการไหลเวียนที่ดีจะทำให้ของไหลในระบบมีการผสมกันอย่างทั่วถึง ซึ่งนำไปสู่การลดของระยะเวลาในการผสมนั่นเอง ซึ่งคุณสมบัติของเจ็ทถูกควบคุมโดยตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia Force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force) [10] ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$Re = \frac{\text{Inertia forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{\rho \bar{v}^2}{\mu \bar{v} / L_c} = \frac{\rho \bar{v} L_c}{\mu} = \frac{\bar{v} L_c}{\nu} \quad (2.9)$$

โดยที่

- \bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ย
- L_c คือ ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic Length)
- ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic Viscosity)

2.3.1 กลศาสตร์ของไหลของเจ็ท (Fluid Dynamics of Jets)

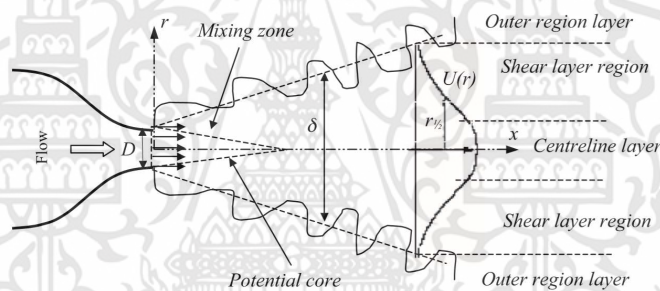
โดยทั่วไปสามารถจำแนกชั้นการไหลของเจ็ทออกเป็น 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นเส้นกึ่งกลาง (Centerline Layer) ชั้นการเฉือน (Shear Layer Region) และชั้นนอก (Outer Layer Region) [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการผสมในชั้นการเฉือนจะเกี่ยวข้องกับการผสมของของไหลโดยรวม (Bulk Mixing) จะถูกขับเคลื่อนด้วยโครงสร้างเชื่อมโยงขนาดใหญ่ (Scale Coherent Structures) ที่ทำหน้าที่เหนี่ยวนำของไหลโดยรอบเข้ามาผสมในชั้นการเฉือน และการผสมขนาดเล็ก (Small-Scale Mixing) ที่ถูกควบคุมโดยการแกว่งของความเร็วปั่นป่วน (Turbulent Velocity Fluctuations) [12]

การไหลของเจ็ทผ่านหัวฉีดที่มีหน้าตัดวงกลมด้วยความเร็วที่ทางออกหัวฉีด U_j ไปสู่ของไหลอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ โดยในช่วงแรกความเร็วเฉลี่ยตามแนวการไหล (u_c) จะมีค่าเท่ากับความเร็วเริ่มต้น ณ ทางออกหัวฉีด (U_j) และในช่วงนี้จะไม่มีการเกิดขึ้นของการผสมปั่นป่วนที่กึ่งกลางของเจ็ท จะเรียกช่วงดังกล่าวว่าช่วงแกนกลางศักยภาพ (Potential Core Region) ซึ่งจะมีความยาวประมาณ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (D_j) และเรียกบริเวณระหว่างหัวฉีดจนถึงจุดจบของช่วงแกนกลางศักยภาพว่า บริเวณการสร้างการไหล (Zone of Flow) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

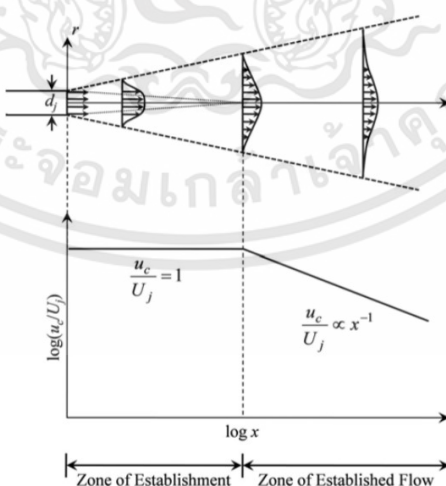
Establishment: ZFE) ซึ่งในบริเวณนี้โครงสร้างเชื่อมโยงขนาดใหญ่จะเหนี่ยวนำของไหลโดยรอบเข้ามาในชั้นของเจ็ทเฉือน เรียกว่าการผสมของของไหลโดยรวม ในช่วงที่สองคือระยะที่อยู่นอกเหนือบริเวณการสร้างการไหล จะเรียกว่าบริเวณการไหลที่ถูกสร้าง (Zone of Establish Flow: ZEF) โดยในบริเวณนี้จะเกิดการกวัดแกว่งของความเร็วที่กึ่งกลางเจ็ท และเกิดการลดลงของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนการไหลตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น (x) นำไปสู่การผสมปั่นป่วนในสเกลใหญ่และเล็ก หากสังเกตโปรไฟล์ความเร็วตามแนวขวางจะพบว่าเป็นรูประฆัง (Bell Shape) หรือเป็นการกระจายตัวแบบ Gaussian Distribution [13] ซึ่งสามารถหาความเร็วกึ่งกลางเจ็ท (U_m) ได้ดังสมการที่ 2.11

$$\frac{U_m}{U_j} \approx \frac{6D_j}{x} \tag{2.10}$$

$$U_m \approx \frac{6D_j U_j}{x} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.2 ชั้นการไหลของเจ็ทหน้าตัดวงกลม [11]

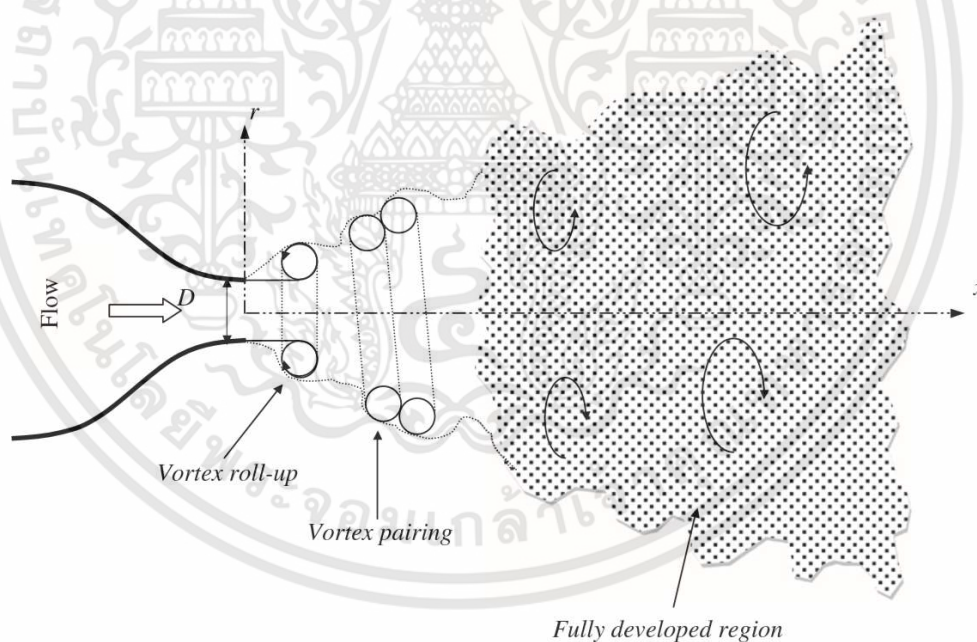


รูปที่ 2.3 แผนภาพของเจ็ทหน้าตัดวงกลม [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การไหลแบบเจ็ทปั่นป่วน (Turbulent Jet)

การไหลแบบเจ็ทมีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากการไหลแบบอื่นๆ คือ เป็นการไหลแบบเฉือนที่ประกอบไปด้วยการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) อยู่ด้วยกัน โดยเมื่อของไหลไหลออกจากหัวฉีดจะเป็นการไหลแบบราบเรียบในช่วงเวลาสั้นๆ เมื่อเคลื่อนตัวต่อไปจะถูกรบกวนจนก่อให้เกิดการหมุนวน (Vortex Roll-up) ที่บริเวณใกล้ทางออกของหัวฉีด หลังจากนั้นจะเกิดการขยายตัวซึ่งประกอบด้วยการรวมตัวของการหมุนวนแบบเดี่ยวที่มีความแข็งแรง (Single Strength Vortex) และการจับคู่ของการหมุนวน (Vortex Pairing) จนเกิดเป็นโครงสร้างเชื่อมโยงขนาดใหญ่ เมื่อเลยแกนกลางศกยภาพจะเกิดการรบกวนเนื่องจากความหนืดซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการหมุนวนไม่ปกติ หลังจากนั้นการไหลแบบเจ็ทจะสลายตัวกลายเป็นการไหลวนขนาดเล็ก (Small Scale Eddy) จำนวนมาก จนในที่สุดจะกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณปลายเจ็ท เมื่อความหนืดสามารถเอาชนะความปั่นป่วนได้ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจะถูกแปรเปลี่ยนเป็นความร้อนจนหมด จึงทำให้ความปั่นป่วนนั้นสิ้นสุดลง [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท [11]

2.4 พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)

พลังงานจลน์ปั่นป่วนในทางกลศาสตร์ของไหล คือ พลังงานจลน์เฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยมวลซึ่งเกี่ยวข้องกับการหมุนวนในการไหลแบบปั่นป่วน โดยทั่วไปแล้วพลังงานจลน์ปั่นป่วนสามารถหาค่าได้จากวิธีการหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square) ของความเร็วแกว่ง (Velocity Fluctuations) พลังงานจลน์ปั่นป่วนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการเฉลี่ยเรย์โนลด์ [15] โดยการใช้ค่าเฉลี่ยของความเค้นตั้งฉากปั่นป่วน (Turbulence Normal Stresses) ได้ดังสมการที่ 2.12

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่

u' คือ ความเร็วแกว่งในแนวแกน x
 v' คือ ความเร็วแกว่งในแนวแกน y
 w' คือ ความเร็วแกว่งในแนวแกน z

โดยหนึ่งในสมมติฐานของแบบจำลองความปั่นป่วน k -epsilon คือ มีความปั่นป่วนสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือเรียกว่า Isotropic Turbulence [16] ซึ่งจะให้ความเค้นตั้งฉากในทุกแกนเท่ากัน ดังสมการที่ 2.13

$$\overline{(u')^2} = \overline{(v')^2} = \overline{(w')^2} \quad (2.13)$$

ทำให้

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \overline{(u')^2} + \overline{(u')^2} \right) \quad (2.14)$$

$$k = \frac{1}{2} \left(3 \overline{(u')^2} \right) \quad (2.15)$$

ในด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นเพื่อความแม่นยำในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน จะมีการนำความเข้มข้นของการปั่นป่วน (Turbulence Intensity) มาคำนวณในเงื่อนไขเริ่มต้น ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะเป็นไปตามสมการที่ 2.16

$$k = \frac{3}{2} \overline{(u'I)^2} \quad (2.16)$$

โดยที่

I คือ ความเข้มข้นของการปั่นป่วน (%)

แต่โดยธรรมชาติของการไหลแล้วจะสังเกตเห็นถึงความแอนไอซิงของความเร็วเฉลี่ยในแกนใดแกนหนึ่งเสมอ กล่าวคือความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนการไหลจะมีค่ามากกว่าความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนรัศมีอย่างมีนัยสำคัญ ในที่นี้จะสมมติให้ความเร็วในแนวแกนรัศมีมีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกว่า Axisymmetric Turbulence [17] จากเหตุผลดังกล่าวจะทำให้การคำนวณของค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะเปลี่ยนไปดังสมการ 2.17

$$\overline{(u')^2} \neq \overline{(v')^2} \quad \text{และ} \quad \overline{(u')^2} \neq \overline{(w')^2} \quad (2.17)$$

แต่

$$\overline{(v')^2} = \overline{(w')^2} \quad (2.18)$$

ทำให้

$$\overline{(v')^2} = \overline{(w')^2} = \xi \overline{(u')^2} \quad (2.19)$$

โดยที่

ξ คือ สัมประสิทธิ์ใดๆ

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \xi \overline{(u')^2} + \xi \overline{(u')^2} \right) \quad (2.20)$$

$$k = \frac{1}{2} \left((2\xi + 1) \overline{(u')^2} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อนำความเข้มข้นของการปั่นป่วนมาคำนวณพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะได้ดังสมการที่ 2.22

$$k = \frac{1}{2} \left(\psi \overline{(u'I)^2} \right) \quad (2.22)$$

โดยที่ $\psi = 2\xi + 1$

จึงทำให้การคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนมีทั้งแบบ Isotropic Turbulence และ Axisymmetric Turbulence ซึ่งในการไหลในระบบต่างๆ นั้นมีทั้งตำแหน่งการไหลที่เป็น Isotropic Turbulence และตำแหน่งการไหลที่เป็น Axisymmetric Turbulence รวมอยู่ในระบบการไหลเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ศึกษาว่าจะศึกษาและให้ความสำคัญ ณ ตำแหน่งใดในระบบ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านทำการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับถึงผสมแบบเจ็ทในรูปทรงถังที่แตกต่างกัน มีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อระยะเวลาในการผสมและเสนอความสัมพันธ์เพื่อประมาณค่าระยะเวลาในการผสม ทั้งนี้ความสัมพันธ์ที่นำเสนอต่างขึ้นอยู่กับรูปทรงและขนาดของถังผสมซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ถูกนำมาพัฒนาอยู่ตลอดเวลา เพื่อหาความสัมพันธ์ที่สามารถประมาณค่าระยะเวลาในการผสมโดยไม่มีข้อจำกัด (Universal Correlation)

Fossett และ Prosser [1] เป็นคนแรกที่ทำเนการศึกษาเรื่องนี้ โดยศึกษาเกี่ยวกับการผสม Tetraethyl Lead (TEL) สำหรับใช้งานเป็นเชื้อเพลิงด้านการบิน ซึ่งถึงผสมที่ใช้เป็นแบบติดตั้งเจ็ทด้านข้าง แต่ยังมีข้อจำกัดของความสัมพันธ์ คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ท (Re_j) ต้องอยู่ระหว่าง 4,500-80,000 หลังจากนั้น Fossett [18] ได้ปรับปรุงความสัมพันธ์ของ Fossett และ Prosser [1] และปรับเปลี่ยนค่าคงที่เพื่อทำลายข้อจำกัดเกี่ยวกับตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ทให้สามารถใช้ได้หลากหลายมากขึ้น

Fox และ Gex [19] พิสูจน์ให้เห็นว่าถึงผสมแบบเจ็ทใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าถึงผสมแบบใบพัด เนื่องจากเจ็ทนั้นก่อให้เกิดฟลักซ์ของโมเมนตัมภายในถังได้มากกว่า จากการทดลองดังกล่าวนำไปสู่การตั้งสมมติฐานว่าถึงผสมแบบเจ็ทหรือแบบใบพัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่แต่ความเร็วต่ำ จะใช้พลังงานน้อยกว่าถึงผสมแบบเจ็ทหรือแบบใบพัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กแต่มีความเร็วสูง

Okita และ Oyama [20] ได้ปรับเปลี่ยนวิธีการหาระยะเวลาในการผสมโดยการฉีดพัลส์ (Pulse) ของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ณ ศูนย์กลางของถังบนผิวของของเหลว ซึ่งมีการวัดการนำไฟฟ้าโดยใช้หัววัด (Probe) 2 หัวในการตรวจวัด หัวหนึ่งติดตั้งอยู่ใกล้กับก้นถัง ส่วนอีกหัวหนึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ผนังใกล้พื้นผิวของของเหลว และพบว่าระดับของเหลวมีผลต่อระยะเวลาในการผสม หลังจากนั้น Marayama และคณะ [21] นำเทคนิคเดียวกันนี้ใช้ในการหาระยะเวลาในการผสม พบว่าความเอียงของหัวฉีดอาจนำไปสู่การลดลงของระยะเวลาในการผสม

Patwardhan และ Gaikwad [2] ค้นพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการผสมนั้นมีมากมาย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การเอียงทำมุมของหัวฉีด และความเร็วของเจ็ท จากผลการทดลองและผลการจำลองนำไปสู่ข้อสรุปว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดนำไปสู่การลดลงของระยะเวลาในการผสม และถึงผสมแบบเจ็ทที่หัวฉีดเอียงทำมุม 45° จะใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยที่สุดอีกทั้งยังมีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากกว่า

Patwardhan [6] ประยุกต์ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายการผสมในถังผสมแบบเจ็ท ศึกษากรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การเอียงทำมุมของหัวฉีด และความเร็วของเจ็ทที่ต่างกัน โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างระดับของเหลวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon สามารถทำนายระยะเวลาในการผสมได้ดี แต่การทำนายรูปแบบการกระจายของโปรไฟล์ความเข้มข้นยังมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง ซึ่งอาจจะมาจากการที่ไม่สามารถทำนายได้ถึงระดับการแพร่ที่หมุนวน

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีการศึกษารูปแบบการไหลและการกำหนดค่าต่างๆอย่างหลากหลาย จนได้ข้อสรุปว่าการฉีดเจ็ทที่กั้นถึงทำมุม 45° จะใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยที่สุด แต่เมื่อนำเทคนิคพลศาสตร์ของไหลมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น ได้ทำนายโปรไฟล์ความเข้มข้นคลาดเคลื่อนกับผลการทดลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแบบจำลองและการตั้งค่าในการจำลองให้ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อให้ผลการจำลองและผลการทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรที่งานวิจัยนี้เลือกศึกษาได้แก่ อิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีผลต่อการทำนายปรากฏการณ์การไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท อิทธิพลของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังที่มีผลต่อการกระจายตัวของโปรไฟล์ความเข้มข้น และรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่มีผลต่อพารามิเตอร์ความปั่นป่วนต่างๆ

บทที่ 3

การออกแบบและคำนวณการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท

โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

การออกแบบเพื่อปรับปรุงการทำนายระยะเวลาในการผสมและโปรไฟล์ความเข้มข้นในถังผสมแบบเจ็ทปริมาณในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยขั้นตอนการศึกษาดังนี้

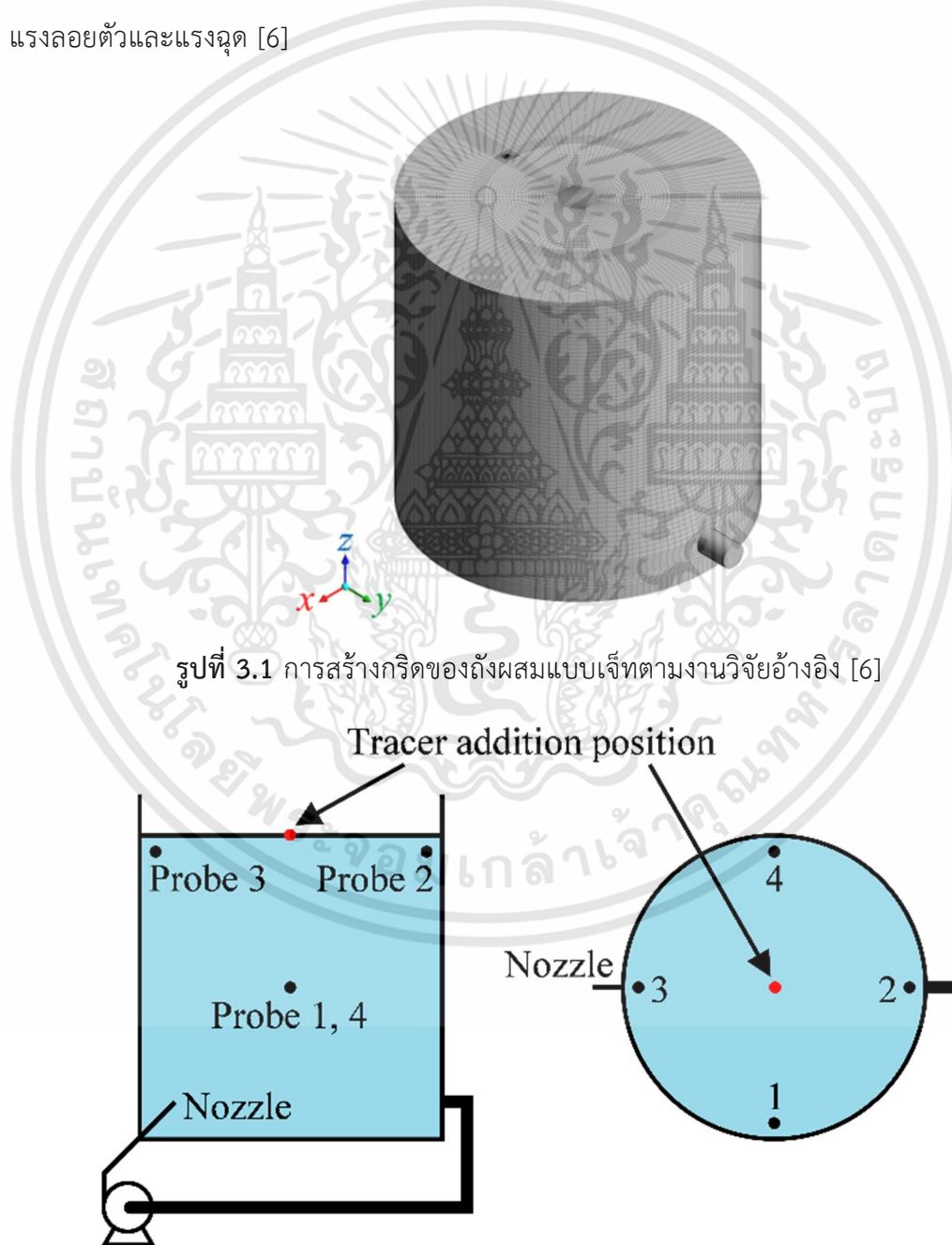
1. การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยการนำผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์การไหลภายในถังผสมแบบเจ็ทได้ดีเพียงพอ
2. การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน โดยการเปลี่ยนแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดต่างๆในการจำลองการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท จากนั้นนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วนที่เหมาะสมที่สุด
3. การศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวของหลอดด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท โดยการเปรียบเทียบระหว่างพื้นผิวแบบสมมาตร (Symmetry) และพื้นผิวแบบผนังเคลื่อนที่ (Moving Wall)
4. การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน โดยการเปรียบเทียบระหว่างแบบ Isotropic Turbulence และแบบ Axisymmetric Turbulence

3.1 การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองถังผสมแบบเจ็ท

3.1.1 โครงสร้างถังผสมแบบเจ็ท

แบบจำลอง 3 มิติของถังผสมแบบเจ็ทถูกสร้างโดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.4.6 โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Patwardhan [6] ซึ่งถูกนำมาใช้ศึกษาต่อในหลายงานวิจัย ในส่วนของถังผสมในงานวิจัยดังกล่าวนี้เป็นไปตามมาตรฐานของถังผสมที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.5 m ผิวด้านบนเปิดสู่บรรยากาศ ภายในถังบรรจุน้ำรักษาระดับไว้ที่ (H) 0.5 m บริเวณก้นถังติดตั้งหัวฉีดเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (d) 0.008 m โดยจะฉีดด้วยความเร็ว (U_j) 4.4 m/s และทำมุม (θ) 45° ส่วนของท่อทางออกจะเป็นทรงกระบอกแวนอนวางตรงข้ามกับหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.038 m และวางสูงจากก้นถัง 0.05 m ในส่วนงานวิจัยของ Patwardhan [6] นั้นจะศึกษาอิทธิพลของมุมในการฉีด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และความเร็วของเจ็ท แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดทั้ง 3 ปัจจัยคงที่เพื่อง่ายต่อการพัฒนาแบบจำลอง โครงสร้างและกริดที่สมบูรณ์แล้วแสดงดังรูปที่ 3.1

การวัดความเข้มข้นที่เวลาต่างๆวัดโดยหัววัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Probe) รวมทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คือ บริเวณผิวน้ำเหนือท่อทางออก (หัววัดที่ 2) บริเวณผิวน้ำเหนือหัวฉีด (หัววัดที่ 3) บริเวณกึ่งกลางของระดับของเหลวด้านขวาของหัวฉีด (หัววัดที่ 1) และบริเวณกึ่งกลางของระดับของเหลวด้านซ้ายของหัวฉีด (หัววัดที่ 4) แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยสารติดตาม (Tracer) ที่ใช้สำหรับการศึกษาการกระจายตัวของโปรไฟล์ความเข้มข้นนั้น จะใช้เป็นสารละลายเกลือความเข้มข้นต่ำ (Dilute Sodium Chloride Solution) ซึ่งสมมติให้มีคุณสมบัติของไหลเปรียบเสมือนน้ำ หยดลงบนผิวน้ำด้านบนด้วยความเร็ว 0.1 m/s มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.010 m เป็นเวลา 1 วินาที เนื่องจากเวลาที่หยดนั้นน้อยมากจึงทำให้ไม่มีอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงแรงลอยตัวและแรงฉุด [6]



รูปที่ 3.1 การสร้างกริดของถังผสมแบบเจ็ทตามงานวิจัยอ้างอิง [6]

รูปที่ 3.2 แบบจำลองของถังผสมแบบเจ็ทตามงานวิจัยอ้างอิง [6] และตำแหน่งของหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แบบจำลองและการกำหนดสมบัติ

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ทอ้างอิงจากงานวิจัยของ Patwardhan [6] เป็นพื้นฐานในการจำลองโดยการตั้งค่าต่าง ๆ นั้นแสดงดังตารางที่ 3.1–3.3

ตารางที่ 3.1 การกำหนดสภาวะขอบเขต

ประเภท	สภาวะขอบเขต
Inlet	ชนิด Velocity-inlet และกำหนดความเร็วที่ 4.4 m/s และ 2.2 m/s ในทิศทางแกน z
Outlet	ชนิด Pressure-outlet ความดันบรรยากาศ
Wall	ชนิด Stationary wall และ no slip condition
Top Surface	Symmetry

ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	คุณสมบัติ
Water-liquid	Density = 998.2 kg/m ³ Viscosity = 1.003e-3 kg/m-s
Tracer	Density = 998.2 kg/m ³ Viscosity = 1.003e-3 kg/m-s

ตารางที่ 3.3 การตั้งค่ารูปแบบระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Schemes)

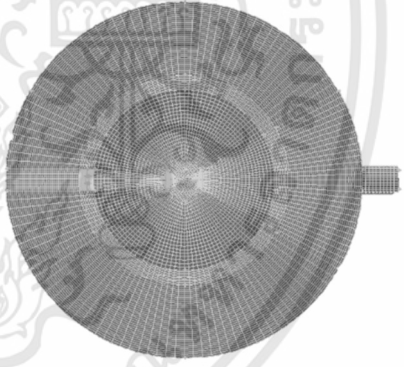
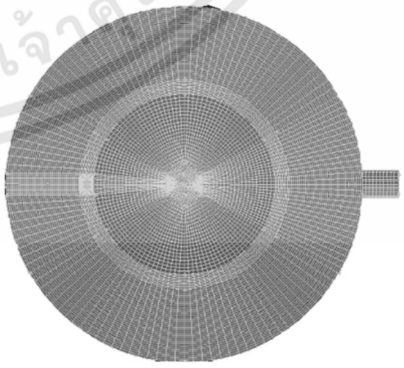
ประเภท	ระเบียบวิธีการ
Pressure-velocity coupling scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent kinetic energy	Second Order Upwind
Turbulent dissipation rate	Second Order Upwind

3.1.3 การศึกษาปริมาณกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

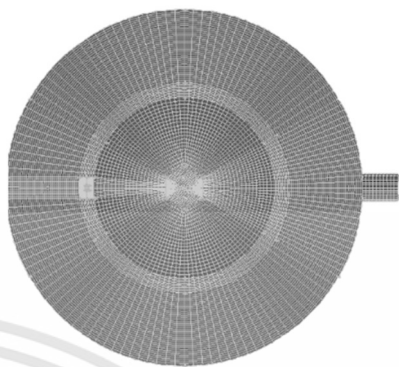

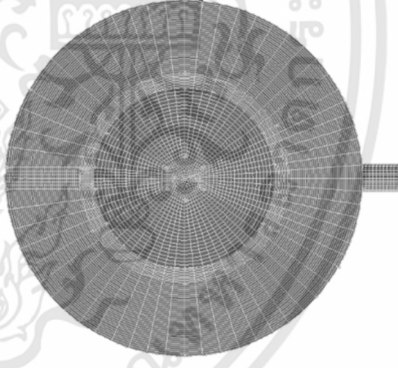
กริดเป็นสิ่งสำคัญในการจำลองที่ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากกริดที่ใช้จำเป็นต้องมีความละเอียดสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตที่จำลอง หากกริดมีความละเอียดน้อยเกินไปอาจทำให้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตที่จำลองคลาดเคลื่อนหรือไม่ครบถ้วน แต่หากกริดที่ใช้มีความละเอียดมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรและเวลาในการจำลองโดยไม่จำเป็น ดังนั้นการศึกษาหาปริมาณกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองจึงเป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการจำลองในงานวิจัยขั้นต่อไป

โดยกริดที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยกริด 5 ขนาด ได้แก่ 341,850, 650,332, 1,087,312, 1,380,304 และ 2,256,875 เซลล์ ซึ่งสร้างกริดให้อยู่ในรูปทรงที่มีลักษณะทรงหกหน้า เพื่อลดการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการตัดปลาย (Truncation Error) จากนั้นจะนำผลการจำลองจากหาปริมาณกริดที่ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองในงานวิจัย และแสดงความละเอียดของกริดแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความละเอียดของกริดบนโครงสร้างถังผสมแบบเจ็ท

จำนวนกริด (เซลล์)	รูปโดเมน
341,850	
650,332	

ตารางที่ 3.4 ความละเอียดของกริดบนโครงสร้างถังผสมแบบเจ็ท (ต่อ)

จำนวนกริด (เซลล์)	รูปโดเมน
1,087,312	
1,380,304	
2,256,875	

3.2 การศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน

การคำนวณสนามการไหลโดยอาศัยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์์ประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม 3 ทิศทาง โดยสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์์จะมีพจน์ ความหนืดปั่นป่วน (μ_t) ซึ่งจำเป็นต้องมีแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อใช้ในการคำนวณพจน์ดังกล่าว ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อให้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการศึกษากลังผสมแบบเจ็ท ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบจำลองด้วยกันคือ

1. แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon (SKE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon (RKE)
3. แบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon (LRKE)

3.3 การศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท

จากงานวิจัยของ Patwardhan [6] ได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวของเหลวด้านบนเป็นผิวสมมาตร (Symmetry) ทั้งหมด โดยนิยามของผิวสมมาตรนั้นคือเปรียบเสมือนกระจกสะท้อนเพื่อใช้กับระบบที่มีโครงสร้างทางกายภาพที่สมมาตรกัน เพื่อลดขอบเขตในการจำลองของแบบจำลอง ซึ่งในที่นี้จะใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่พื้นผิวนั้นเป็น Zero-Shear Slip Walls กล่าวคือปริมาณและฟลักซ์ (Flux) ไตๆที่ผ่านพื้นผิวนั้นมีค่าเป็นศูนย์

แต่ในความเป็นจริงแล้วฟลักซ์ที่ไหลกระทบหรือผ่านบริเวณพื้นผิวของเหลวด้านบนนั้นมีค่าใกล้เคียงศูนย์ [22] ฉะนั้นหากต้องการผลการจำลองที่แม่นยำสูงจะต้องจำลองบริเวณพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นการไหลสองสถานะระหว่างน้ำและอากาศที่อยู่เหนือฝาเปิดของถังผสม แต่การจำลองการไหลและการแพร่ระหว่างสถานะนั้นใช้ทรัพยากรและเวลาสูง ดังนั้นจึงเกิดความคิดที่จะปรับเปลี่ยนพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมเป็นผนังเคลื่อนที่ (Moving Wall) โดยมีแนวการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับของไหลในถัง เพื่อทำให้เกิดความเค้นเฉือนระหว่างผนังกับของไหลน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงศูนย์นั่นเอง

เมื่อพิจารณาที่ความเค้นเฉือนบริเวณพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมแบบผนังเคลื่อนที่พบว่าหากต้องการให้เกิดความเค้นเฉือนเข้าใกล้ค่าศูนย์ จะต้องกำหนดความเร็วของผนังเคลื่อนที่มีค่าประมาณใกล้เคียงกับของไหลที่อยู่ติดกับผนังเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากความเร็วกึ่งกลางเจ็ท (สมการที่ 2.11) โดยที่ระยะทางที่เจ็ทเดินทางสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$\cos \theta = \frac{0.5}{x} \quad (3.1)$$

โดยที่ x คือ ระยะทางที่เจ็ทเคลื่อนที่

เมื่อคำนวณความเร็วกึ่งกลางเจ็ท ณ ระยะที่เจ็ทเคลื่อนที่ได้แล้ว จึงสามารถนำมาประมาณค่าความเร็วของผนังเคลื่อนที่ได้ดังสมการที่ 3.2

$$U^* \approx \omega U_m \quad (3.2)$$

โดยที่

U^* คือ ความเร็วของผนังเคลื่อนที่

ω คือ ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่

ซึ่งในธรรมชาติพบว่าเจ็ทที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิด (Far Field) มักจะมีการเบี่ยงออกจากแกนกลางการเคลื่อนที่เสมอ [22] หากนำความเร็วของผนังเคลื่อนที่มาพิจารณาความเร็วในทิศทางต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยกำหนดให้หัวฉีดทำมุม θ กับแกน y ดังนั้นสามารถคำนวณความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x และ y ได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$U_x \approx \alpha U_m \cos \theta \quad (3.3)$$

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta \quad (3.4)$$

โดยที่

U_x คือ ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x

U_y คือ ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y

α คือ ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x

β คือ ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y

ส่วนความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z นั้น จำเป็นจะต้องนำค่าจากการจำลองของแบบจำลองที่กำหนดค่าพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) โดยจะใช้ค่าความเร็วสูงสุดของของไหลบริเวณใกล้ผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z เพื่อยืนยันว่าผนังเคลื่อนที่จะเคลื่อนไปด้วยความเร็วที่ไม่น้อยกว่าความเร็วของของไหลในทิศทางแกน z ดังสมการที่ 3.5

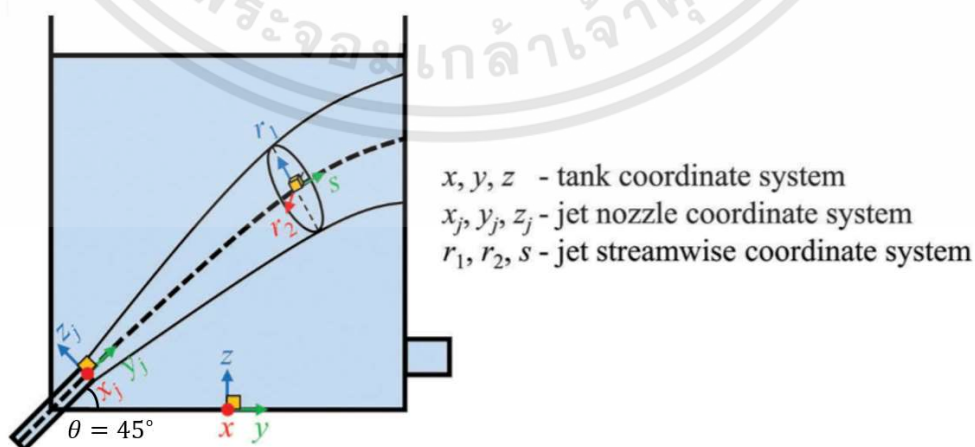
$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}} \quad (3.5)$$

โดยที่

U_z คือ ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z

$U_{z_{\max, \text{surface}}}$ คือ ความเร็วสูงสุดของของไหลในทิศทางแกน z บริเวณผนังเคลื่อนที่

γ คือ ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบพิกัดของการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน

การศึกษาอิทธิพลของการเลือกใช้รูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับถังผสมแบบเจ็ทในงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบคือ

1. แบบ Isotropic Turbulence
2. แบบ Axisymmetric Turbulence



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผลการจำลอง

ก่อนที่จะกล่าวถึงผลการจำลองในบทนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนในการคำนวณการไหลและการศึกษาการกระจายตัวของสารติดตามในถังผสมแบบเจ็ท ขั้นตอนดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การคำนวณการไหลแบบคงตัวในสามมิติ (Three-Dimensional Steady State Flow) ในส่วนนี้จะคำนวณสนามการไหลโดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ยเรย์โนลด์ ซึ่งประกอบไปด้วยสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้ง 3 ทิศทาง

2. การคำนวณการไหลแบบไม่คงตัวในสามมิติ (Three-Dimensional Unsteady State Flow) ในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อคำนวณการกระจายตัวของสารติดตามที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นคือสนามการความเร็วที่ได้จากการคำนวณการไหลแบบคงตัวในสามมิติ ซึ่งในการคำนวณการไหลแบบไม่คงตัวจะไม่มีกรคำนวณสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ทำให้สนามความเร็วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะคำนวณเฉพาะสมการถ่ายเทมวลสารในระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจะคิดเฉพาะการแพร่ของสารเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นและอิทธิพลของสนามความเร็วเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะหาค่าติดตามลงบนผิวหน้าเป็นเวลา 1 วินาที ด้วยความเร็ว 0.1 m/s และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตผิวหน้าด้านบนบริเวณช่องเปิดกว้าง 0.005 m เป็นความเร็วขาเข้า การคำนวณจะกำหนดขนาดของช่วงเวลาคำนวณ (Time Step Size) เท่ากับ 0.0025 วินาที จำนวน 24000 ช่วง [6] ในที่นี้จะทำให้ระยะเวลาในการผสม (Mixing Time) ที่ต้องการศึกษาเท่ากับ 60 วินาที โดยประเมินจากความเข้มข้นที่วัดได้จากหัววัดทั้งสอง ซึ่งมีนิยามระยะเวลาในการผสมว่า เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นที่จุดใด ๆ มีความเข้มข้นแตกต่างจากความเข้มข้นที่จุดสมดุลไม่เกิน 5% [6] และจะยึดเวลาที่ช้าที่สุดของหัววัดนั้นๆ เป็นเกณฑ์การตัดสิน โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$t_{95\%} = \text{time for } \left| \frac{c - \bar{c}}{\bar{c}} \right| \leq 0.05 \quad (3.6)$$

โดยที่ c คือ ความเข้มข้นที่ตำแหน่งใดๆ, \bar{c} คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของทั้งระบบที่จุดสมดุล

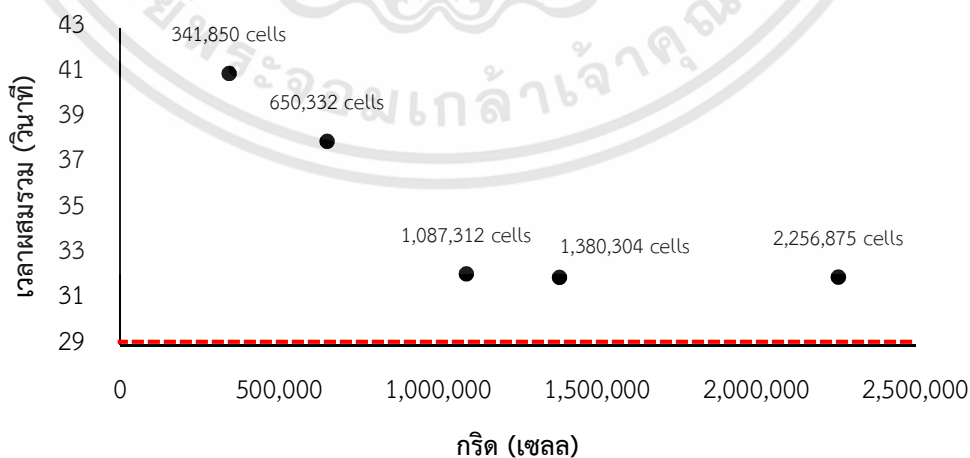
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการศึกษาปริมาณกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ขนาดและความละเอียดของกริดส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำและระยะเวลาในการคำนวณ ดังนั้นการจำลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาขนาดของกริดและความละเอียดที่เหมาะสมกับโดเมนของแบบจำลอง การศึกษาปริมาณกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดจำนวนกริดที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon กำหนดเงื่อนไขพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร และใช้ผลการทดลองอ้างอิงจากงานวิจัยของ Patwardhan [6] ผลการจำลองของกริดจำนวนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีการใช้จำนวนกริดมากขึ้นจะทำให้เวลาผสมรวม (Overall Mixing Time) มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ใช้อ้างอิงมากขึ้น แต่ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองจำนวนกริดต่างๆ

จำนวนกริด (เซลล์)	เวลาผสมรวม (วินาที)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน (%)	เวลาที่ใช้จำลอง (ชั่วโมง)
การทดลอง [6]	30	-	-
341,850	41	36.67	30
650,332	38	26.67	48
1,087,312	32.15	7.17	65
1,380,304	32	6.67	82
2,256,875	32	6.67	90



รูปที่ 4.1 ผลของจำนวนกริดต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการจำลอง

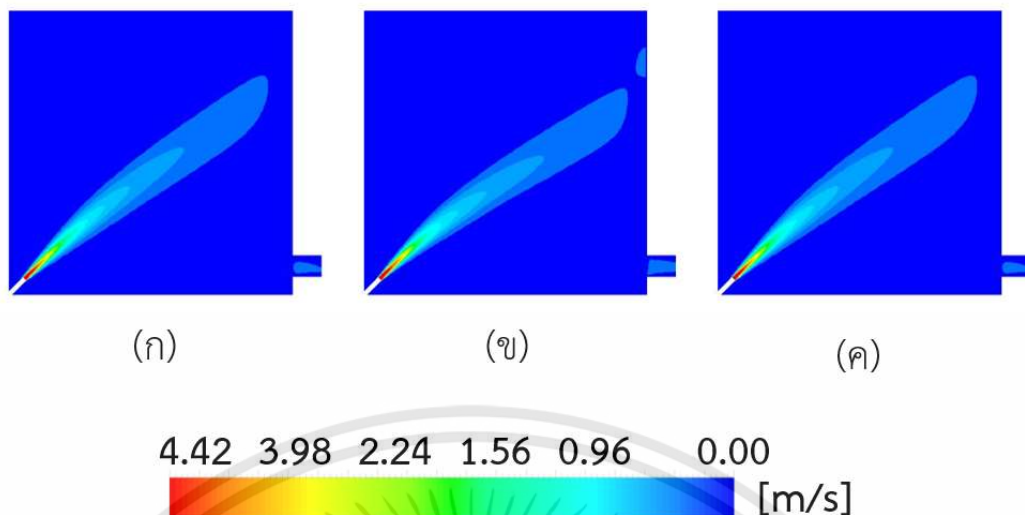
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของเวลาผสมรวมเทียบกับผลการทดลอง [6] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อกริดมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความแม่นยำในการทำนายมีค่ามากขึ้น โดยจำนวนกริดตั้งแต่ 1,380,304 เซลล์นั้นมียุทธศาสตร์ความคลาดเคลื่อนลดลงจากเดิมเพียง 6.67% แต่ใช้เวลาในการจำลองเพิ่มสูงเป็นอย่างมากซึ่งทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการจำลองโดยใช้เหตุ ดังนั้นปริมาณกริด 1,087,312 เซลล์จึงเหมาะสมแก่การนำไปจำลองศึกษาการไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท เนื่องจากมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนและเวลาในการจำลองนั้นมีค่าที่เหมาะสมและยอมรับได้

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของแบบจำลองความปั่นป่วน

จากในหัวข้อที่แล้วเมื่อได้จำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับอธิบายปรากฏการณ์การไหลภายในถังผสมแล้ว แต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เลือกใช้อาจจะยังไม่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สำหรับคำนวณการไหลประกอบด้วย แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon และแบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon สำหรับอธิบายปรากฏการณ์การไหลแบบเจ็ทภายในถังผสมและทำนายเวลาที่ใช้ในการผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองอ้างอิงของ Patwardhan [6] โดยมีจำนวนกริดเท่ากับ 1,087,312 เซลล์และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร โดยใช้รูปแบบของคอนทัวร์ และเวลาผสมรวมมาวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองอ้างอิงดังนี้

สำหรับคอนทัวร์ของความเร็วในถังผสมแบบเจ็ทของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามให้ผลการจำลองของการกระจายความเร็วในระนาบ $x=0$ ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อเจ็ทถูกฉีดออกจากหัวฉีดจะไหลผ่านไปยังของเหลวอิสระในถัง และเหนี่ยวนำมวลของเหลวเข้าหาลำเจ็ท ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างลำเจ็ทและของไหลโดยรอบโดยที่โมเมนตัมของเจ็ทจะลดน้อยลงแต่โมเมนตัมของของเหลวอิสระจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการผสม ถึงแม้ว่าเจ็ทจะสูญเสียโมเมนตัมไปส่วนหนึ่งแต่ยังสามารถเคลื่อนที่ต่อไปข้างหน้าโดยวกไปตามผิวด้านบนของผนังด้านข้างของถังทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในถัง โดยกระบวนการผสมและการหมุนเวียนภายในถังนี้จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อความหนืดและแรงเสียดทานจะเอาชนะการไหลได้



รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ของความเร็วเจ็ทภายในผนังผสมของแบบจำลองความปั่นป่วน (ก) Standard k-epsilon (ข) Realizable k-epsilon และ (ค) Low-Reynolds k-epsilon บนระนาบ $x=0$

การเปรียบเทียบเวลาผสมรวมของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วน จะแยกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่เจ็ทมีความเร็ว 4.4 m/s และกรณีที่เจ็ทมีความเร็ว 2.2 m/s พบว่าในกรณีแรกแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ทำนายเวลาผสมรวมได้ถูกต้องแม่นยำกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon และ Low-Reynolds k-epsilon เนื่องจากแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon มีการพัฒนาการคำนวณอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่มีความถูกต้องและสอดคล้องกับการไหลที่มีการหมุนวน ส่งผลให้การคำนวณพลังงานจลน์ปั่นป่วนมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง Standard k-epsilon จึงทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon คำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนมากกว่าความเป็นจริงและทำนายเวลาผสมรวมคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ในส่วนของแบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon นั้นทำนายเวลาผสมรวมที่ความเร็วของเจ็ทเท่ากับ 4.4 m/s ได้คลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุด แต่กลับทำนายเวลาผสมรวมในกรณีที่เจ็ทมีความเร็วของเจ็ทเท่ากับ 2.2 m/s ได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากการปรับแก้การคำนวณความหนืดของโมเลกุลส่งผลต่อการกระจายความเร็วของเจ็ท ทำให้แบบจำลองความปั่นป่วน Low-Reynolds k-epsilon เหมาะแก่การจำลองสำหรับเจ็ทที่มีความเร็วปานกลางจนถึงต่ำ [24] ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเวลาผสมรวมในกรณีที่เจ็ทมีความเร็ว 4.4 m/s ดังตารางที่ 4.2 จึงเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ซึ่งมีความถูกต้องมากที่สุดเพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้

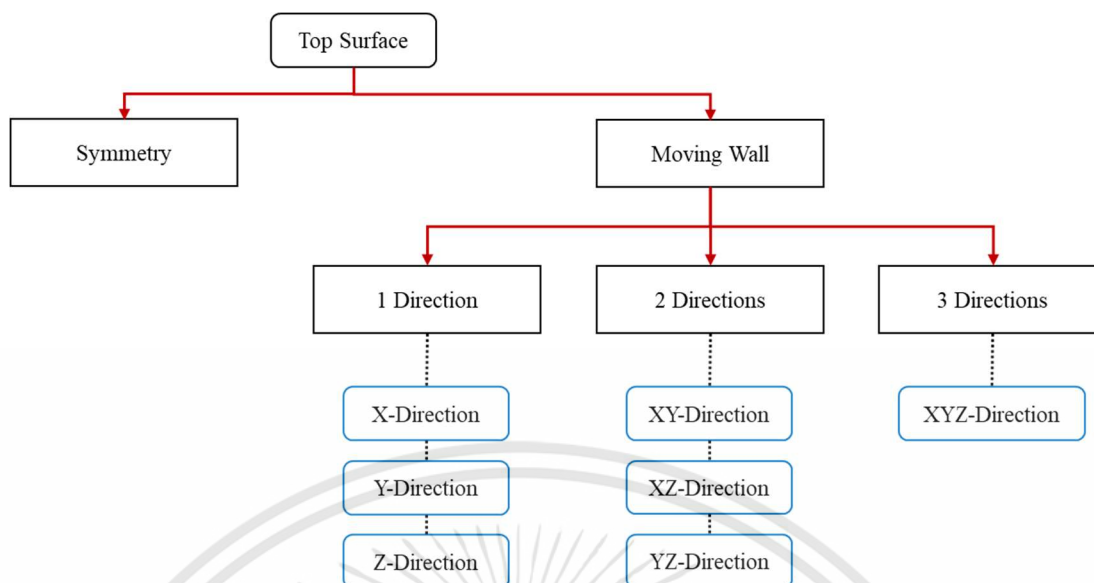
ตารางที่ 4.2 เวลาผสมรวมของการจำลองโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดต่างๆ

แบบจำลองความปั่นป่วน	เวลาผสมรวม (วินาที)	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน (%)	เวลาที่ใช้จำลอง (ชั่วโมง)
การทดลอง [6]	30	-	-
Standard k-epsilon	32.15	7.17	65
Realizable k-epsilon	31.625	5.42	67
Low-Reynolds k-epsilon	40	33.33	68

4.3 อิทธิพลของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท

ในหัวข้อนี้จะศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสมแบบเจ็ท 2 รูปแบบ คือ พื้นผิวแบบสมมาตรและผนังเคลื่อนที่ โดยพื้นผิวทั้งสองต่างให้เวลาผสมรวมที่ใกล้เคียงกับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แต่เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสารติดตามดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่า การกระจายตัวของสารติดตามของถังผสมแบบเจ็ทที่มีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตรมีการกระจายตัวของสารติดตามบริเวณหัววัดที่ 1 ที่มีแนวโน้มและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ในขณะเดียวกันหัววัดที่ 2 กลับให้ผลการกระจายของสารติดตามที่คลาดเคลื่อนไปจากการทดลอง เนื่องจากตำแหน่งของหัววัดที่ 2 วางอยู่ในบริเวณใกล้ผิวน้ำด้านบน ซึ่งได้รับอิทธิพลของการสมมติเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบผิวสมมาตรทำให้ผิวน้ำบริเวณดังกล่าวเป็นแผ่นเรียบ ฟลักซ์และความเค้นมีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้ความเร็วมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง จากผลของความเร็วที่สูงกว่าความเป็นจริงนั้นส่งผลโดยตรงกับการกระจายตัวของสารติดตาม เนื่องจากการกระจายของสารติดตามแปรผันตรงกับความเร็ว เมื่อความเร็วที่ได้สูงกว่าความเป็นจริงทำให้การกระจายตัวของสารติดตามสูงกว่าความเป็นจริงด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เกิดโอกาสที่ทำให้สารติดตามเกิดการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น ซึ่งทำให้ในช่วงแรก (0 – 12 วินาที) ความเข้มข้นของสารติดตามมีค่าสูงกว่าที่ควรเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากผลการจำลองที่ยังคลาดเคลื่อนอยู่ในกรณีที่พื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นพื้นผิวสมมาตร จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะทำให้พื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่เพื่อให้สอดคล้องกับธรรมชาติที่เกิดขึ้น คือมีฟลักซ์บริเวณผิวด้านบนใกล้เคียงศูนย์ ฉะนั้นจึงต้องกำหนดทิศทางของผนังเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับรูปแบบการไหลภายในถังผสมและคำนึงถึงการกระเพื่อมบริเวณผิวด้านบน ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่ที่สามารถจำแนกได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแบบของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสม

4.3.1 ผนังเคลื่อนที่ 1 ทิศทาง

จากแนวคิดในการลดความเค้นเฉือนบริเวณพื้นผิวของเหลวด้านบนของถังผสม ในกรณีแรกจึงตั้งสมมติฐานว่าต้องตั้งค่าผนังเคลื่อนที่ให้เคลื่อนไปในทิศทาง z เพื่อให้สอดคล้องกับทิศทางของของไหล การที่ตั้งค่าความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง z ได้นั้นจะต้องทราบค่าของความเร็วในทิศทาง z ของของไหลภายในถังผสมก่อน ดังนั้นจึงต้องอ้างอิงค่าความเร็วดังกล่าวในกรณีที่ตั้งค่าพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตรซึ่งมีความเร็วในทิศทาง z (Z-Velocity) เท่ากับ 0.529026 m/s ผลการจำลองทำนายว่าเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 30.25 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเวลาผสมรวมของการทดลอง [6] แต่เมื่อนำความเข้มข้นนมอัลโลสของสารติดตามมาพล็อตกับเวลาเพื่อดูการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าการกระจายตัวของสารติดตามบริเวณหัววัดที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ตั้งค่าพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร แต่การกระจายตัวของสารติดตามของหัววัดที่ 1 มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองแต่ยังมีแนวโน้มของการกระจายตัวเหมือนกับผลการทดลอง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่ที่พื้นผิวของเหลวด้านบนในทิศทาง z อาจยังเข้าเกินไป จึงทำให้สารติดตามเกิดการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น ทำให้จุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรก (Local Maximum) ของกราฟของหัววัดที่ 2 มีค่าที่สูงเกินไป ดังนั้นการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง z เพียงทิศทางเดียวยังไม่สอดคล้องกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังผสม

4.3.2 ผนังเคลื่อนที่ 2 ทิศทาง

จากกรณีที่แสดงใน 4.3.1 พบว่าการตั้งค่าผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง z เพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ จึงเกิดแนวคิดเพิ่มทิศทางให้ผนังเคลื่อนที่อีกหนึ่งทิศทางนั่นคือทิศทาง y เพื่อให้สอดคล้องไปกับการไหลของของไหลที่ออกจากหัววัดในทิศทาง y ฉะนั้นการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่จะกลายเป็นทิศทาง yz ในส่วนของความเร็วในทิศทาง y นั้นจำเป็นต้องคำนวณความเร็วกึ่งกลางเจ้าจากสมการที่ 2.11 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_m \approx \frac{6D_j U_j}{x}$$

$$U_m \approx 0.299 \text{ m/s}$$

จากนั้นนำความเร็วที่กลางเจ็ทที่คำนวณได้จะถูกนำมาคำนวณความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง y และ z โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 $\beta=1$ และ $\gamma=1$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (1)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_y \approx 0.2114 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

$$U_z \approx (1)(0.529026)$$

$$U_z \approx 0.529026 \text{ m/s}$$

ผลการจำลองได้ทำนายเวลาในการผสมมีค่าเท่ากับ 29.5 s และเมื่อพล็อตความเข้มข้นนอมัลไลซ์ของสารติดตามกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ในทิศทาง y ส่งผลต่อความสูงของจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกของกราฟของหัววัดที่ 1 ในขณะที่ยังคงตั้งค่าการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง z ให้มีค่าเท่าเดิม เนื่องจากปกติแล้วของไหลถูกฉีดออกจากหัววัดในทิศทาง y ดังนั้นการกำหนดให้ผนังเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่ตามของไหลไปด้วยทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงในส่วนของหัววัดที่ 2 ยังคงมีการกระจายตัวของสารติดตามใกล้เคียงกับกรณีที่มีผนังเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่ไปยังทิศทาง z เพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.9 สรุปได้ว่าความเร็วของผนังเคลื่อนที่ที่ยังช้าเกินกว่าความเร็วของของไหลภายในถังผสม จึงต้องเพิ่มความเร็วของผนังเคลื่อนที่ให้มีค่ามากขึ้น

กรณีที่ 2 $\beta=2$ และ $\gamma=1$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (2)(0.299) \cos 45^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_y \approx 0.422786 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

$$U_z \approx (1)(0.529026)$$

$$U_z \approx 0.529026 \text{ m/s}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y หรือ β มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2 เพื่อเพิ่มความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง y มากขึ้น ผลการจำลองได้ทำนายเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 41.125 s ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการทดลอง (Overpredicted) เมื่อพล็อตความเข้มข้นนมัลไลซ์ของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าความสูงของจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกมีค่าลดลงแต่ไม่ปรากฏจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ชัดเจน เนื่องจากความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง y มีค่ามากจนทำให้สารติดตามไหลวนมายังบริเวณหัววัดที่ 1 มีความเร็วมากเกินไป จึงทำให้การแพร่ของสารติดตามเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นในบริเวณนั้นเกิดขึ้นน้อยลง สารติดตามส่วนใหญ่ถูกพัดพาไปยังของหัววัดที่ 2 เป็นเหตุให้ของไหลบริเวณหัววัดที่ 2 เกิดการถ่ายโอนมวลสารโดยการพา (Convective Mass Transfer) ที่มากขึ้น ส่งผลให้จุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกของหัววัดที่ 2 มีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 จึงสรุปได้ว่าความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง y ที่กำหนดมีแนวโน้มที่ดีในหัววัดที่ 2 อีกทั้งยังมีผลโดยตรงต่อความสูงของจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกของหัววัดที่ 1 อีกด้วย

กรณีที่ 3 $\beta = 2$ และ $\gamma = 2$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (2)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_y \approx 0.422786 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

$$U_z \approx (2)(0.529026)$$

$$U_z \approx 1.058052 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y หรือ β มีค่าเท่าเดิม แต่ปรับค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z หรือ γ เพิ่มขึ้นมีจนค่าเท่ากับ 2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง z ผลการจำลองได้ทำนายเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 42.75 s ซึ่งมีความมากกว่าผลการทดลองอีกทั้งยังมากกว่ากรณีที่ 2 เมื่อพล็อตความเข้มข้นมวลไลซ์ของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 และหัววัดที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏความเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการกระจายตัวของสารติดตามที่ชัดเจน แต่จุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกของหัววัดที่ 2 มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองอ้างอิง [6] เนื่องจากความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง y และ z มียังไม่สอดคล้องกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังผสม ฉะนั้นจึงต้องเพิ่มการเคลื่อนที่ในทิศทางอื่นเพิ่มเติม เพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น ทั้งนี้การตรวจพบความเข้มข้นของสารติดตามของหัววัดที่ 2 ในเวลาที่ต่างกันเมื่อเทียบกับกรณีแรกนั้น เกิดจากการผสมปั่นป่วน (Turbulent Mixing) ที่เกิดขึ้นในระดับสเกลขนาดเล็ก (Small Scale) ของกรณีที่ 3 มีค่ามากกว่ากรณีที่ 1 ณ เวลาเดียวกัน โดยเป็นผลมาจากรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นต่างกัน ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนบริเวณหัววัดที่ 2 โดยค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ $6.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ซึ่งน้อยกว่าค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนในกรณีนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $7.29 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$

4.3.3 ผนังเคลื่อนที่ 3 ทิศทาง

เมื่อการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่แบบ 2 ทิศทางยังไม่สามารถอธิบายลักษณะการกระจายตัวของสารติดตามให้สอดคล้องกับการไหลในธรรมชาติได้ ทำให้เกิดแนวคิดเพิ่มการไหลในทิศทาง x ให้กับผนังเคลื่อนที่ โดยจะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง x ดังนี้

กรณีที่ 1 $\alpha = 0.5$, $\beta = 2$ และ $\gamma = 2$

จากสมการที่ 3.3 จะได้

$$U_x \approx \alpha U_m \cos \theta$$

$$U_x \approx (0.5)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_x \approx 0.1056965 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (2)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_y \approx 0.422786 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

$$U_z \approx (2)(0.529026)$$

$$U_z \approx 1.058052 \text{ m/s}$$

การปรากฏขึ้นของการเคลื่อนที่ในทิศทาง x ของผนังเคลื่อนที่ ทำให้ผลการทำนายของเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 32.375 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองอ้างอิง [6] เมื่อพล็อตความเข้มข้นของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 พบว่าจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองเนื่องจากความเร็วในทิศทาง x ที่เพิ่มขึ้นทำให้การไหลในระบบเบี่ยงเข้าหาหัววัดที่ 1 มากเกินความเป็นจริงจึงทำให้เกิดการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารติดตามบริเวณหัววัดที่ 1 ต่ำกว่าความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อความเร็วในทิศทาง x มากกว่าความเป็นจริงจะทำให้สารติดตามไหลไปยังบริเวณหัววัดที่ 2 ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเป็นจริง จึงทำให้บริเวณหัววัดที่ 2 เกิดการแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารติดตามมากกว่าความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 4.11 ฉะนั้นจะต้องลดความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง x ลง

กรณีที่ 2 $\alpha = 0.15$, $\beta = 2$ และ $\gamma = 2$

จากสมการที่ 3.3 จะได้

$$U_x \approx \alpha U_m \cos \theta$$

$$U_x \approx (0.15)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_x \approx 0.03170895 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (2)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_y \approx 0.422786 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

$$U_z \approx (2)(0.529026)$$

$$U_z \approx 1.058052 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของผนังเคลื่อนที่ลงจากกรณีที่ 1 พบว่าผลการทำนายของเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 33 s ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองอ้างอิง [6] เมื่อพล็อตความเข้มข้นมวลไคซ์ของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 ปรากฏว่าการลดลงของความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง x ส่งผลให้จุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรกมีการปรับค่าเข้าใกล้การทดลองมากขึ้นโดยสอดคล้องกับผลการจำลองในกรณีที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในส่วนของหัววัดที่ 2 มีรูปแบบของการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับกรณีแรกแต่ให้ผลการจำลองที่สวนทางกับผลการจำลองกรณีก่อนหน้า เนื่องจากการลดความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง x ในกรณีนี้ จะต้องส่งผลให้ทิศทางการไหลโดยรวมของระบบมีทิศทางไปในทิศทาง y มากขึ้น ซึ่งจะทำให้การแพร่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นหรือพีคแรกของหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยลง แต่ในที่นี้กลับสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 ฉะนั้นจึงอ้างอิงจากกรณีที่ 2 ของผนังเคลื่อนที่สองทิศทางที่รายงานว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศทาง y ส่งผลต่อความสูงของจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นสูงสุดแรก ทั้งนี้จึงต้องปรับเปลี่ยนความเร็วของผนังเคลื่อนที่ทั้งสามทิศทางเพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบการไหลภายในถังผสม โดยมีการคำนวณขนาดเวกเตอร์ลัพธ์ของการไหลทั้งสามทิศทางในทุกกรณีจะต้องมีค่าเท่ากัน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอีกสองทิศทางจะต้องเปลี่ยนด้วยเช่นกัน เพื่อรักษาขนาดเวกเตอร์ลัพธ์ให้มีปริมาณเท่าเดิม

กรณีที่ 3 $\alpha = 0.1485$, $\beta = 1.4847$ และ $\gamma = 2$

จากสมการที่ 3.3 จะได้

$$U_x \approx \alpha U_m \cos \theta$$

$$U_x \approx (0.1485)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_x \approx 0.031391 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.4 จะได้

$$U_y \approx \beta U_m \cos \theta$$

$$U_y \approx (1.4847)(0.299) \cos 45^\circ$$

$$U_y \approx 0.313861 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้

$$U_z \approx \gamma U_{z_{\max, \text{surface}}}$$

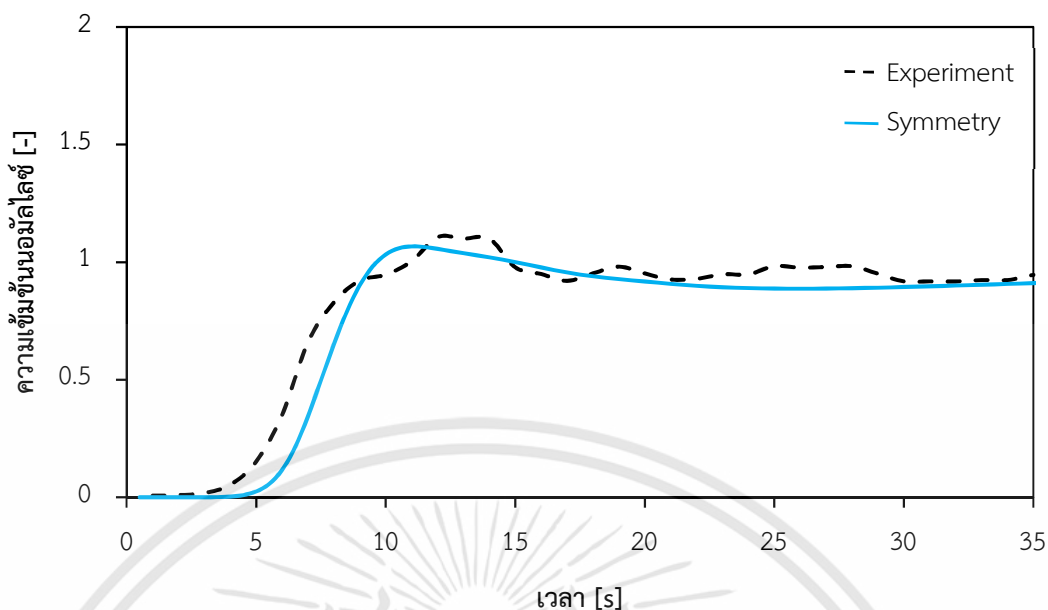
$$U_z \approx (2)(0.529026)$$

$$U_z \approx 1.058052 \text{ m/s}$$

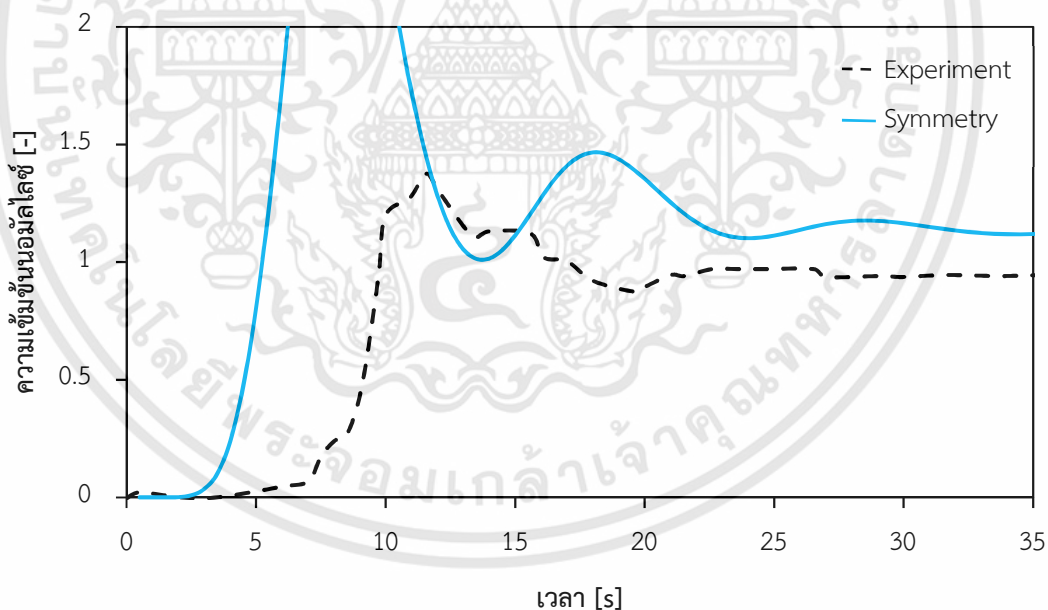
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้มีการปรับเปลี่ยนความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ จนนำมาสู่สนามความเร็วที่ทำนายเวลาผสมรวมเท่ากับ 31.625 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองอ้างอิง [6] เมื่อพล็อตความเข้มข้นนมัลไลซ์ของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามสอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี โดยที่มีการปรับเปลี่ยนค่าปรับแก้ความเร็วของผนังเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x หรือ α จากกรณีที่ 2 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กลับให้รูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามที่ต่างกันสิ้นเชิงดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในส่วนของหัววัดที่ 2 มีรูปแบบการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองอ้างอิง แต่มีการตรวจพบความเข้มข้นของสารติดตามก่อนเวลาเมื่อเทียบกับการทดลอง ซึ่งเกิดจากการผสมปั่นป่วนในช่วงเวลาแรก (0-10 s) ของแบบจำลองมีค่าสูงกว่าที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากการรบกวนรูปแบบการไหลภายในถังผสมดังที่กล่าวไว้ในกรณีที่ 3 ของผนังเคลื่อนที่สองทิศทาง ทั้งนี้ถึงแม้จะเกิดการผสมปั่นป่วนก่อนเวลาแต่รูปแบบการกระจายตัวของหัววัดที่ 2 ยังคงมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับการทดลองและทำนายเวลาในการผสมที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองอ้างอิงอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.11



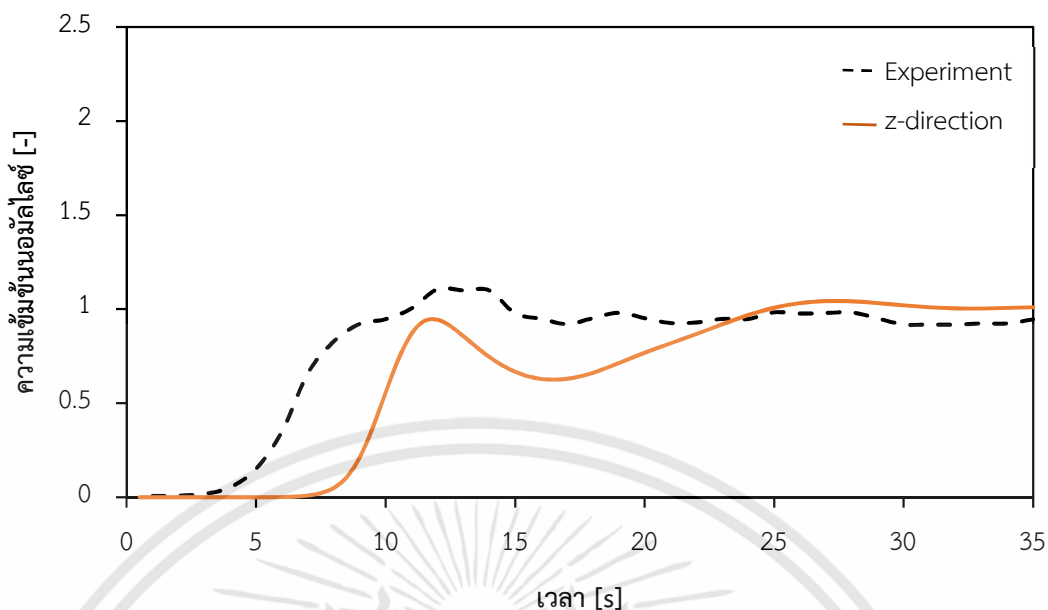


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร

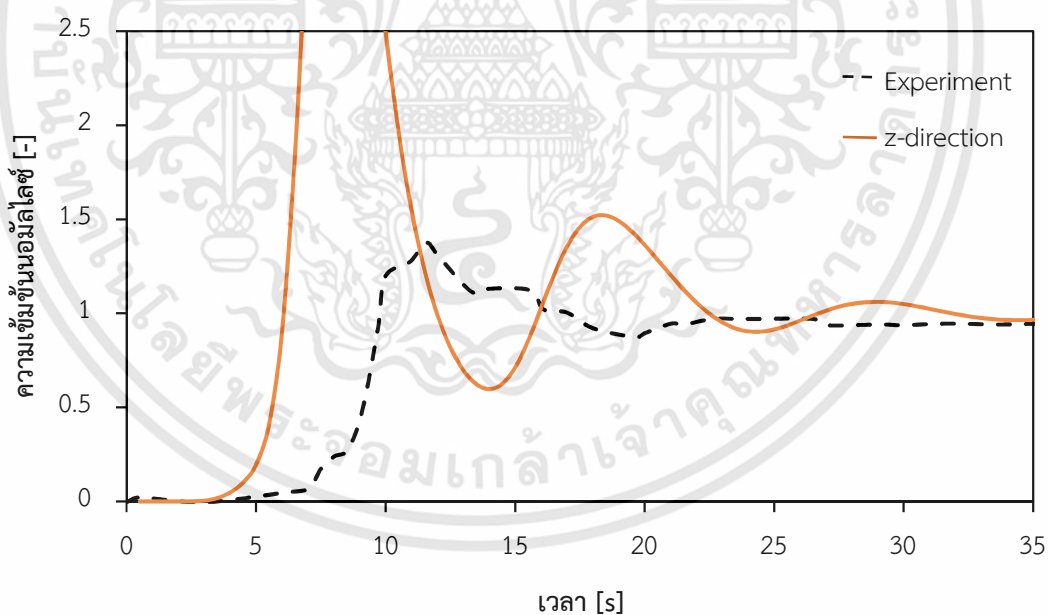


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

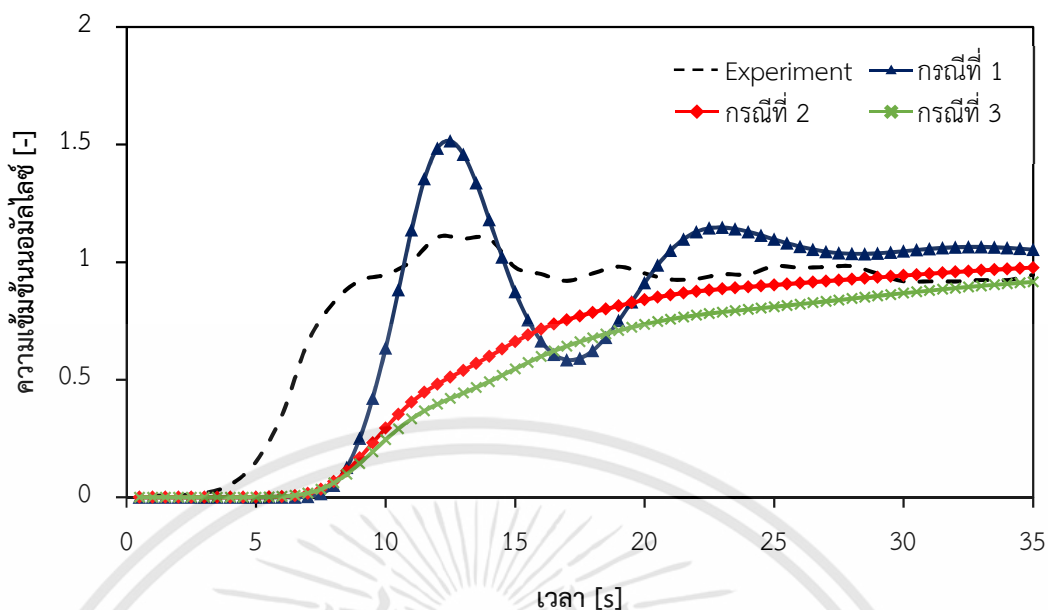


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง Z

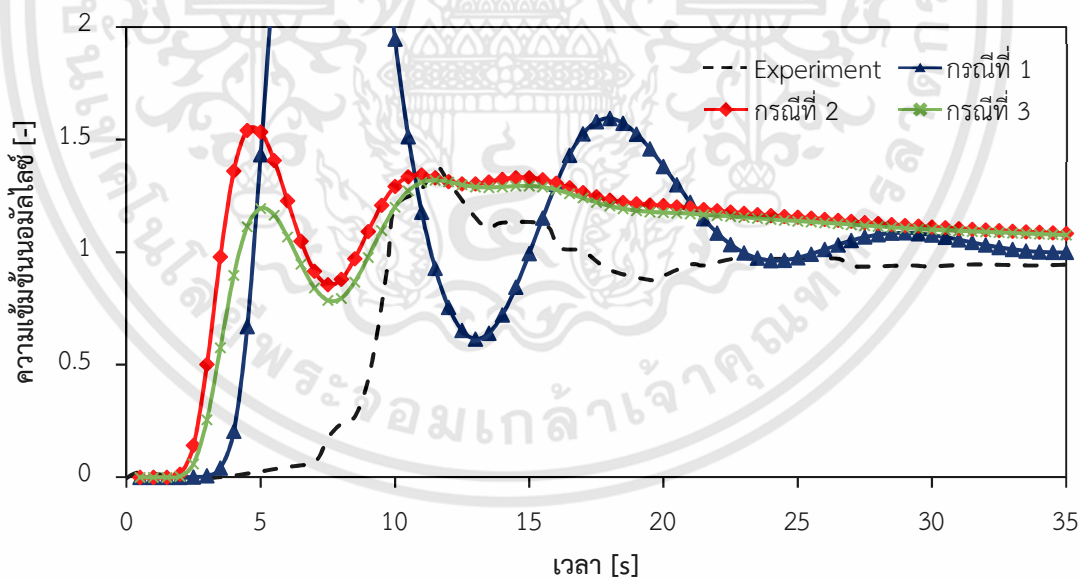


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

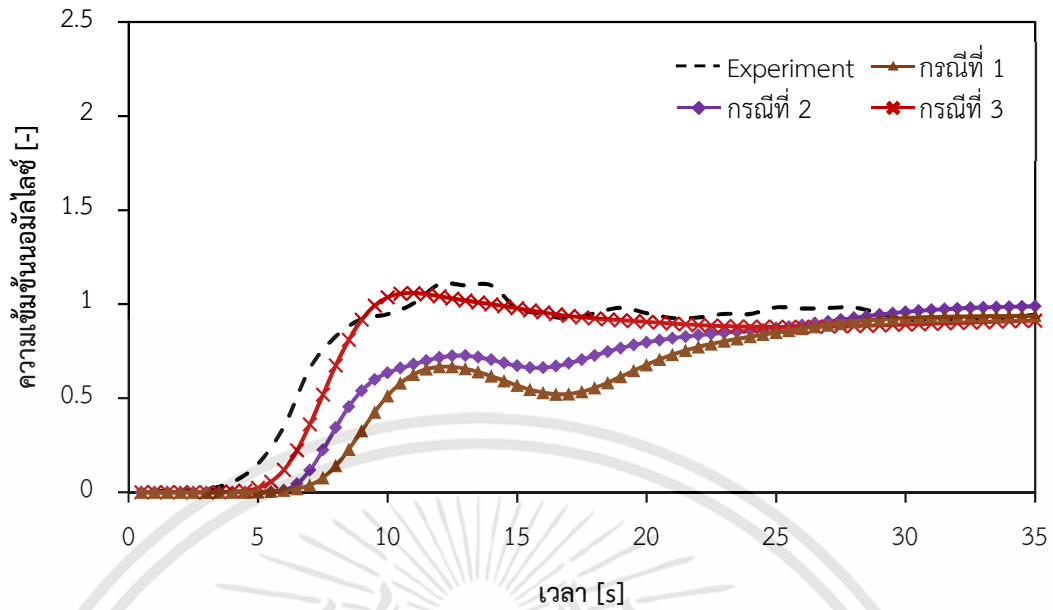


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง YZ

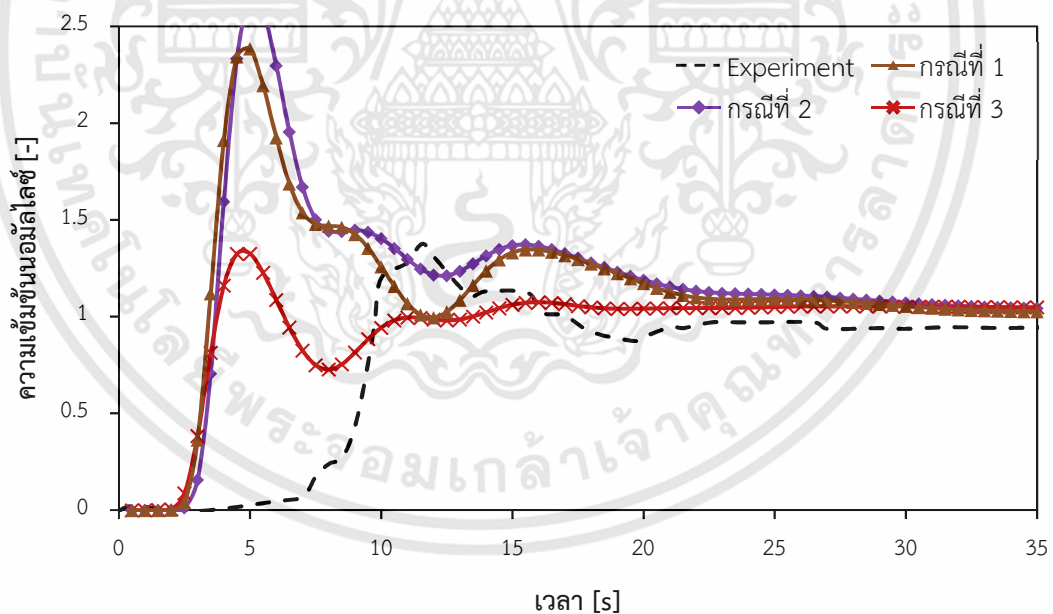


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง YZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารติดตามที่เวลาต่างๆของหัววัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของเหลวด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน

ดังที่กล่าวไปในข้างต้นว่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนส่งผลต่อการผสมในระดับสเกลขนาดเล็ก ดังนั้นรูปแบบการคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่ต่างกันย่อมส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการผสมที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้จะศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนโดยแยกการประมาณค่าออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบ Isotropic Turbulence และแบบ Axisymmetric Turbulence ทั้งนี้เพื่อความแม่นยำของผลการจำลองจึงกำหนดให้รูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนทั้งสองอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน คือมีรูปแบบของผนังเคลื่อนที่เป็นผนังเคลื่อนที่สามทิศทาง โดยมีความเร็วทั้งสามทิศทางเป็นไปตามกรณีที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง

4.4.1 การคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence

ในรูปแบบแรกนั้นเกิดจากสมมติฐานว่ามีความปั่นป่วนสม่ำเสมอเท่ากันในทุกทาง โดยการกำหนดค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนในทางพลศาสตร์ของไหลซึ่งคำนวณนั้น จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 และจะใช้ค่าความเร็วเริ่มต้นแทนค่าความเร็วแกว่ง ซึ่งในถังผสมแบบเจ็ทนั้นจะกำหนดค่าความเข้มข้นของการปั่นป่วนเท่ากับ 10% [8] จะได้

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2$$

$$k = \frac{3}{2} ((4.4)(0.1))^2$$

$$k = 0.2904 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ผลการจำลองทำนายว่าเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 31.625 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่อพล็อตความเข้มข้นของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามสอดคล้องกับการกระจายตัวของการทดลองอ้างอิง [6] ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในส่วนของหัววัดที่ 2 มีรูปแบบการกระจายของสารติดตามใกล้เคียงกับการทดลองอ้างอิง [6] แต่มีการผสมเกิดขึ้นก่อนเวลาในช่วงเวลาแรก เนื่องจากการผสมปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบริเวณหัววัดที่ 2 มีค่าสูงเกินความเป็นจริงในช่วงเวลาแรกดังแสดงในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้การประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนส่งผลโดยตรงต่ออัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน [15] ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดมีอิทธิพลต่ออัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ฉะนั้นการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence จึงมีความสอดคล้องและเหมาะสมกับถังผสมแบบเจ็ทที่มีโครงสร้างและรูปแบบดังงานวิจัยนี้

4.4.2 การคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence

รูปแบบการคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence นั้นเกิดขึ้นจากสมมติฐานของการไหลที่ไม่สมมาตรในแนวแกนปกติทั้งสาม แต่จะมีความสมมาตรในแนวแกนรัศมีทั้งสองแกน ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ความไม่สมมาตรสูงสุดคือ กำหนดให้ $\xi = 0$ ทำให้ความเร็วแกว่งในแนวแกนรัศมีมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่า การไหลที่เกิดขึ้นมีเฉพาะความเร็วแกว่งในแนวแกนการไหลเท่านั้น เมื่อใช้ค่าความเร็วเริ่มต้นแทนค่าความเร็วแกว่งและกำหนดให้ค่าความเข้มข้นการปั่นป่วนมีค่าเท่ากับ 10% ในสมการที่ 2.22 จะได้

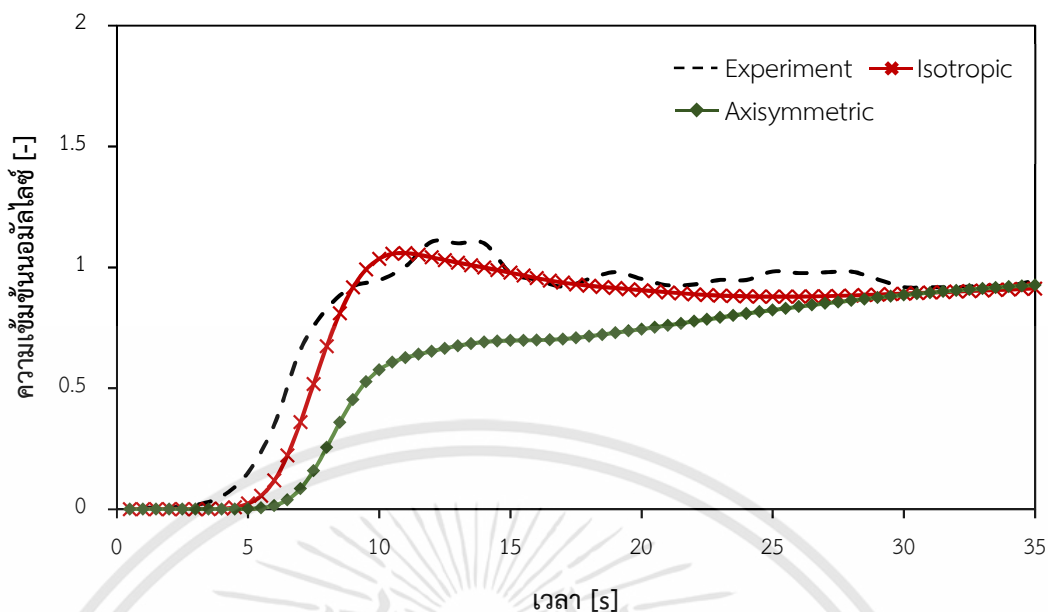
$$k = \frac{1}{2} (\overline{\psi(UI)^2})$$

โดยที่ $\psi = 2\xi + 1$ ทำให้

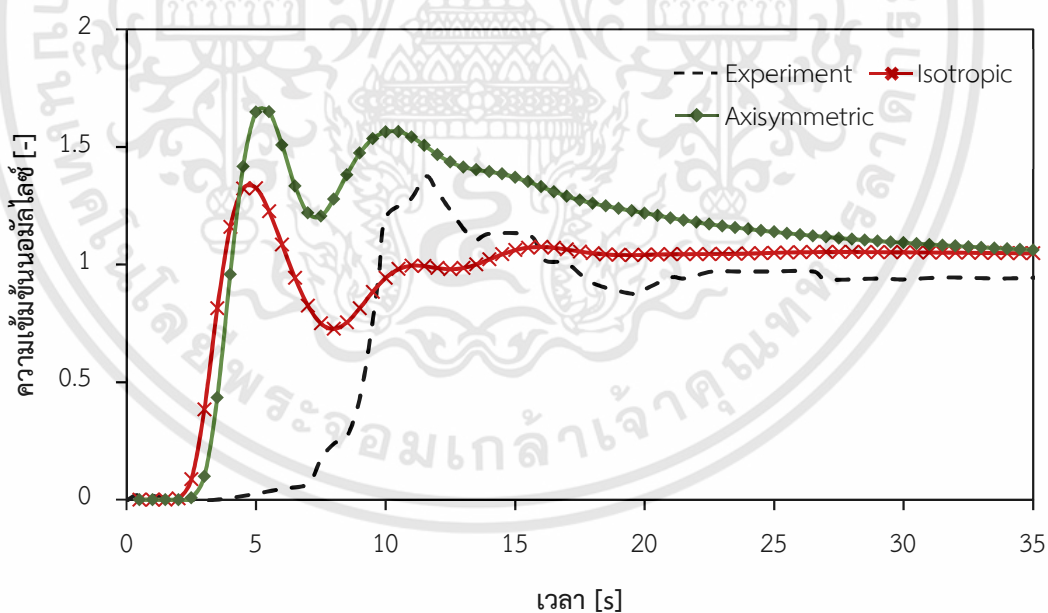
$$k = \frac{1}{2} [(2)(0) + 1] [(4.4)(0.1)]^2$$

$$k = 0.0968 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ผลการจำลองทำนายว่าเวลาผสมรวมมีค่าเท่ากับ 34.25 s ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 14.17% เมื่อพล็อตความเข้มข้นอมัลไลซ์ของสารติดตามกับเวลาของหัววัดที่ 1 พบว่าในช่วงแรกมีค่าความเข้มข้นที่ต่ำกว่าผลการทดลองอ้างอิงเป็นอย่างมาก แต่ค่อยๆมีการปรับตัวเข้าสู่ค่าการทดลองในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในส่วนของหัววัดที่ 2 พบว่าในช่วงแรกเกิดการผสมก่อนและมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าผลการทดลองแต่ยังน้อยกว่ากรณีก่อนหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากผลการจำลองทั้งสองหัววัดสามารถสรุปได้รูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence ทำให้เกิดการผสมน้อยกว่าการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence และน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีขนาดเล็กมาก ทำให้มีอิทธิพลของความหนืดสูง (Viscosity Dominated) ซึ่งทำให้เกิดการผสมในสเกลระดับเล็ก มีแนวโน้มน้อยกว่าที่ควรจะเป็น การกำหนดค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence มีการสมมติให้ความเร็วในแนวแกนรัศมีมีค่าเท่ากันและเท่ากับศูนย์ซึ่งทำให้การผสมกันระหว่างชั้นของของไหลในแนวรัศมีไม่เกิดขึ้นเลย ฉะนั้นเมื่อนำมาคำนวณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนจะทำให้มีค่าน้อยกว่าปกติเป็นอย่างมาก ส่งผลให้รูปแบบการกระจายตัวไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มเชิงโพลาไรซ์ตามเวลาที่วัดที่ 1 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของหลอดด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ โดยมีรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนต่างกัน



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มเชิงโพลาไรซ์ตามเวลาที่วัดที่ 2 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองอ้างอิง [6] ในกรณีพื้นผิวของหลอดด้านบนเป็นผนังเคลื่อนที่ในทิศทาง XYZ โดยมีรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการจำลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองของถังผสมแบบเจ็ท เพื่อปรับปรุงการถ่ายเทมวลสารและการผสมและโปรไฟล์ความเข้มข้น โดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 3 มิติผ่านโปรแกรม ANSYS FLUENT ซึ่งโครงสร้างและเงื่อนไขขอบเขตของถังผสมแบบเจ็ทที่ป้อนนั้นจะเป็นไปตามงานวิจัยของ Patwardhan [6] โดยจะฉีดเจ็ทที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ 35,200 เข้าสู่ถังผสมที่บรรจุน้ำไว้เต็มถัง ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมเนื่องจากการไหลแบบเจ็ท เนื่องจากเจ็ทไหลผ่านของไหลที่หยุดนิ่งภายในถัง จะทำให้เกิดชั้นการเฉือนระหว่างของไหลและตั้งมวลของของไหลที่อยู่โดยรอบเข้าสู่ลำเจ็ททำให้เกิดการผสม ในส่วนของการคำนวณความปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon และใช้สมการถ่ายเทมวลสารเพื่อคำนวณการกระจายตัวของสารติดตาม โดยจะประเมินประสิทธิภาพในการผสมผ่านหัววัดทั้ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งจะใช้เวลาที่ใช้ในการผสมที่ทำให้ความเข้มข้นแตกต่างจากจุดสมดุลน้อยกว่า 5% เป็นเกณฑ์

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองอ้างอิง [6] พบว่าโครงสร้างของถังผสมแบบเจ็ทที่มีปริมาตร 1,087,312 เซลล์ทำให้ผลการจำลองไม่เปลี่ยนแปลงและใช้เวลาในการจำลองที่เหมาะสมจากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k-epsilon ทำนายเวลาในการผสมใกล้เคียงกับผลการทดลองและแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของหัววัดที่ 1 สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ในส่วนของการจำลองของหัววัดที่ 2 ในช่วงแรกคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลอง เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวของหลอดด้านบนเป็นแบบผิวสมมาตร จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะปรับปรุงแบบจำลองเพื่อทำนายเวลาในการผสมและโปรไฟล์ความเข้มข้นให้มีสอดคล้องกับผลการทดลองมากขึ้น จึงศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำนายและรูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามในถังผสมแบบเจ็ทสรุปได้ดังนี้

อิทธิพลของแบบจำลองปั่นป่วนที่มีผลต่อการทำนายปรากฏการณ์การไหลภายในถังผสมแบบเจ็ท พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon และ Realizable k-epsilon ทำนายเวลาการผสมรวมใกล้เคียงกับผลการทดลองสำหรับเจ็ทที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูง แต่แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon สามารถทำนายเวลาการผสมรวมได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่า เนื่องจากมีความแม่นยำในการคำนวณอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วนมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon ในส่วนของเจ็ทที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ปานกลางพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Low-

Reynolds k-epsilon สามารถทำนายเวลาในการผสมได้ดีกว่าสองแบบจำลองความปั่นป่วนข้างต้น เนื่องจากมีการคำนวณบริเวณชั้นขอบการไหลและความหนืดของโมเลกุลที่เหมาะสมกับการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์น้อย ทั้งนี้ถึงผสมแบบเจ็ทในอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่แล้วนั้นมีการไหลด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูง จึงทำให้พื้นฐานของงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองของถึงผสมแบบเจ็ทที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูงเป็นหลัก จึงเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable k-epsilon ในการพัฒนาแบบจำลอง

อิทธิพลของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถึงผสมพบว่า พื้นผิวของเหลวด้านบนแบบสมมาตรจะทำนายเวลาผสมรวมใกล้เคียงกับผลการทดลอง อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของสารติดตามบริเวณหัววัดที่ 1 ใกล้เคียงกับการทดลองอีกด้วย แต่ในขณะเดียวกันกลับมีความคลาดเคลื่อนของผลการกระจายตัวของสารติดตามบริเวณหัววัดที่ 2 เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดทำให้สนามความเร็วบริเวณพื้นผิวด้านบนไม่ตรงกับความเป็นจริงในธรรมชาติ ดังนั้นจึงพัฒนาพื้นผิวของเหลวด้านบนของถึงให้เป็นผนังเคลื่อนที่เพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณนั้น พบว่าการกำหนดให้ผนังเคลื่อนที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ 3 ทิศทางนั้นทำให้แนวโน้มของการกระจายตัวของสารติดตามสอดคล้องกับการทดลองมากขึ้น อีกทั้งยังทำนายเวลาผสมรวมใกล้เคียงกับการทดลองเช่นกัน ทั้งนี้การกำหนดอัตราส่วนของความเร็วในแต่ละทิศทางนั้นจะต้องสอดคล้องกับโครงสร้างและรูปแบบของถึงผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปแบบของถึงผสมแบบเจ็ทจากงานวิจัยของ Patwardhan [6] เพื่อพัฒนาแบบจำลองของถึงผสมแบบเจ็ทเพื่อให้สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติมากยิ่งขึ้น

อิทธิพลของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน เนื่องจากหัวฉีดที่ศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก ทำให้ได้รับอิทธิพลของความหนืดจากบริเวณผนังของหัวฉีดสูง ซึ่งส่งผลให้การผสมในสเกลระดับเล็กมีแนวโน้มน้อยกว่าที่ควรจะเป็น การประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Axisymmetric Turbulence จึงทำให้ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่คำนวณมีค่าน้อยกว่าความจริงเป็นอย่างมาก ส่งผลให้รูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามไม่สอดคล้องกับการทดลอง ในส่วนของรูปแบบการประมาณค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนแบบ Isotropic Turbulence นั้น พบว่ามีการกระจายตัวของแบบจำลองใกล้เคียงกับการทดลอง มีการผสมก่อนในช่วงแรกของบริเวณหัววัดที่ 2 แต่มีความเข้มข้นและรูปแบบการกระจายตัวของสารติดตามใกล้เคียงกับการทดลอง ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้คำนวณสำหรับถึงผสมแบบเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเล็ก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากความไม่สมมาตรของเจ็ทที่เกิดขึ้นภายในถึงผสมอาจเกิดจากปัญหาเชิงตัวเลขในการคำนวณของกริดที่สร้างขึ้นบริเวณหัวฉีด ฉะนั้นการแบ่งครึ่งของพื้นผิวของเหลวด้านบนของถึงผสมเป็นผนังเคลื่อนที่ 2 ชั้นแล้วเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ทำมุมกับหัวฉีดเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน อาจทำให้การไหลวกกลับของเจ็ทสอดคล้องกับธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของสารติดตามอีกด้วย

5.2.2 งานวิจัยนี้ต้องการลดการใช้ทรัพยากรในการคำนวณจึงจำลองการเกิดปรากฏการณ์ Two-Phases Flow Interface ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของของไหลและอากาศบริเวณพื้นผิวด้านของถังผสม ซึ่งส่งผลต่อผลการจำลองที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น แต่ยังไม่สอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ดังนั้นหากต้องการผลการจำลองที่มีความแม่นยำมากขึ้นจะต้องใช้แบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับการไหลที่มีหลายวัฏภาค เช่น แบบจำลอง VOF (Volume of Fluid) โดยมีข้อเสียคือการใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่มากขึ้นเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.Fossett and L.E. Prosser. "The application of free jets to the mixing of fluids in bulk" **Proc. I. Mech. E.** Vol. 160. 1949. pp. 224-232.
- [2] A. W. Patwardhan and S. G. Gaikwad. "Mixing in tanks agitated by jets" **Trans IChemE.** Vol. 81. 2003.
- [3] T. Yousefi Amiria, J.S. Moghaddasa and Y. Moghaddasb. "Jet mixing study in two phase gas-liquid systems" **Chemical Engineering Research and Design.** Vol. 89. 2011. pp. 352-366.
- [4] D. Emil Sekula. "The structure of turbulent jets : Application of experimental and environmental methods" Thesis of Universitat Politècnica de Catalunya. July 2010.
- [5] D. Dakshinamoorthy and J.F. Louvar. "Shortstopping and jet mixers in preventing runaway reactions" **Chemical Engineering Science.** Vol.63. 2008. pp. 2283-2293.
- [6] A. W. Patwardhan. "CFD modeling of jet mixed tanks" **Chemical Engineering Science.** Vol. 57. 2002. pp. 1307-1318.
- [7] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. **An introduction to computational fluid dynamics : The finite volume method.** New York : Longman Scientific & Technical. 1995.
- [8] ANSYS Inc., **ANSYS Fluent Theory Guide: Release 15.0.** November 2013.
- [9] N. Xin and L. Lei. "A comparison of low Reynolds number k- ϵ models" **ICCMCEE.** 2015.
- [10] เอกราช บำรุงไทยชัยชาญ. **พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สาขาวิศวกรรมเคมี. 2556.
- [11] C.G. Ball, H. Fellouah and A. Pollard. "The flow field in turbulent round free jets" **Prog. Aerosp. Sci.** Vol. 50. 2012. pp. 1-26.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Xi-kun Wang and Soon Keat Tan. "Environmental fluid dynamics-jet flow" **International Conference on Hydrodynamics**. October 11-15. 2010.
- [13] N. Harnby, M.F. Edwards. and A.W. Nienow. **Mixing in the process industries**. 2ed. Oxford : Butterworth-Heinemann. 1992
- [14] E. Bumrunghthaichachan. " A review on numerical consideration for computational fluid dynamics modeling of jet mixing tanks" **Korean J. Chem. Eng.** Vol. 33. 2016. pp. 3050-3068.
- [15] S.B. Pope. **Turbulent flows**. Cambridge : Cambridge University Press. 2000
- [16] Taylor and G.I. " Statistical theory of turbulence" **Proc. Roy. Soc.** Vol. 151. 1935. pp. 421-444.
- [17] S. Chandrasekhar. " The theory of axisymmetric turbulence" **Proc. Roy. Soc.** Vol. 242. 1950. pp. 557-577.
- [18] Fossett H. " The action of free jets in mixing of fluids" **Trans IChemE.** Vol. 29. 1951. pp. 322-332.
- [19] Fox E.A. and Gex V.E. " Single-phase blending of liquids" **AIChE J.** Vol. 2. 1956. pp. 539-544.
- [20] Okita N. and Oyama Y. " Mixing characteristics in jet mixing" **Jpn. J. Chem. Eng.** Vol. 31. 1963. pp. 92-101.
- [21] Maruyama T, Ban Y. and Mizushina T. " Jet mixing of fluids in tanks" **J. Chem. Eng. Jpn.** Vol. 15. 1982. pp. 342-148.
- [22] E. Bumrunghthaichachan and S. Wattananusorn. " CFD modelling of pump-around jet mixing tanks: a reliable model for overall time prediction" **J. Chin. Inst. Eng.** Vol. 42. 2019. pp. 428-437.
- [23] E. Bumrunghthaichachan, A. Namkanisorn and S. Wattananusorn. " CFD modelling of pump-around jet mixing tanks: a discrepancy in concentration profiles" **J. Chin. Inst. Eng.** Vol. 41. 2018. pp. 612-621.
- [24] S. Phapatarianan, E. Bumrunghthaichachan and S. Wattananusorn. " A suitable k-epsilon model for CFD simulation of pump-around jet mixing tank with moderate jet Reynolds number" **MATEC Web Conf.** Vol. 192. 2018.

ภาคผนวก ก.

ตำแหน่งติดตั้งหัววัด (Probes)

ตารางที่ ก.1 ระยะติดตั้งหัววัดทั้ง 4 ตำแหน่งภายในถังผสม

หัววัด	ระยะในแกน x (m)	ระยะในแกน y (m)	ระยะในแกน z (m)
Probe 1	0.2375	0	0.25
Probe 2	0	0.2375	0.45
Probe 3	0	-0.2375	0.45
Probe 4	-0.2375	0	0.25

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายศาสตปัญญา ปภาธารินทร์

วัน เดือน ปีเกิด 23 กันยายน 2537

ที่อยู่ 99/454 หมู่บ้านบ้านกลางเมืองสาทร-ตากสิน 2 แขวงบ้างค้อ เขตจอมทอง
จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150 โทร. 0869698195

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2562 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2) การออกแบบถังผสมแบบเจ็ท

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2559 นักศึกษาฝึกงาน ตำแหน่ง Process Engineer
ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร

พ.ศ.2561 งานประชุมวิชาการนานาชาติ The 4th International Conference on
Engineering, Applied Sciences and Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้