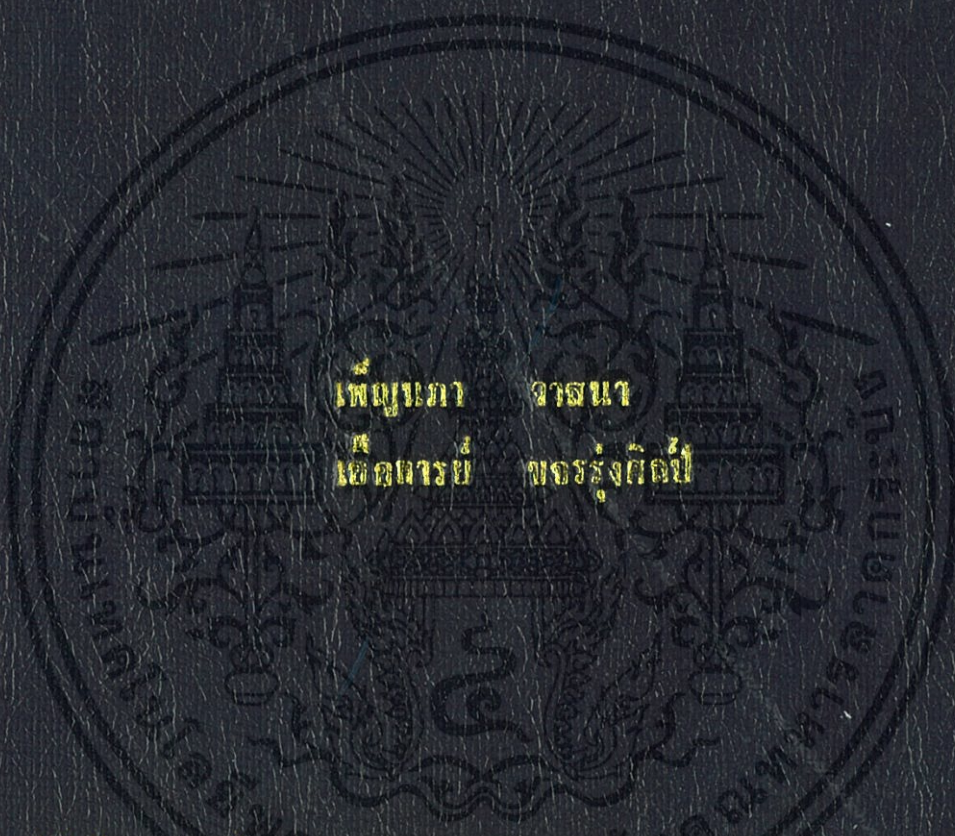


การจำลองด้วยเทคโนโลยีของไบโอดีเอ็นเอเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของ  
จอคอมพิวเตอร์ในดาตาสถิติในหน่วยงานพระราชวัง



ปริญญาตรี ๗๓๓ เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษาระดับมัธยมศึกษา

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๕

การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของ  
วอเตอร์เจ็ทในการผลักดันน้ำตามแนวพระราชดำริ



เพ็ญภา ภาสนา

เออการย์ ขจรรุ่งศิลป์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

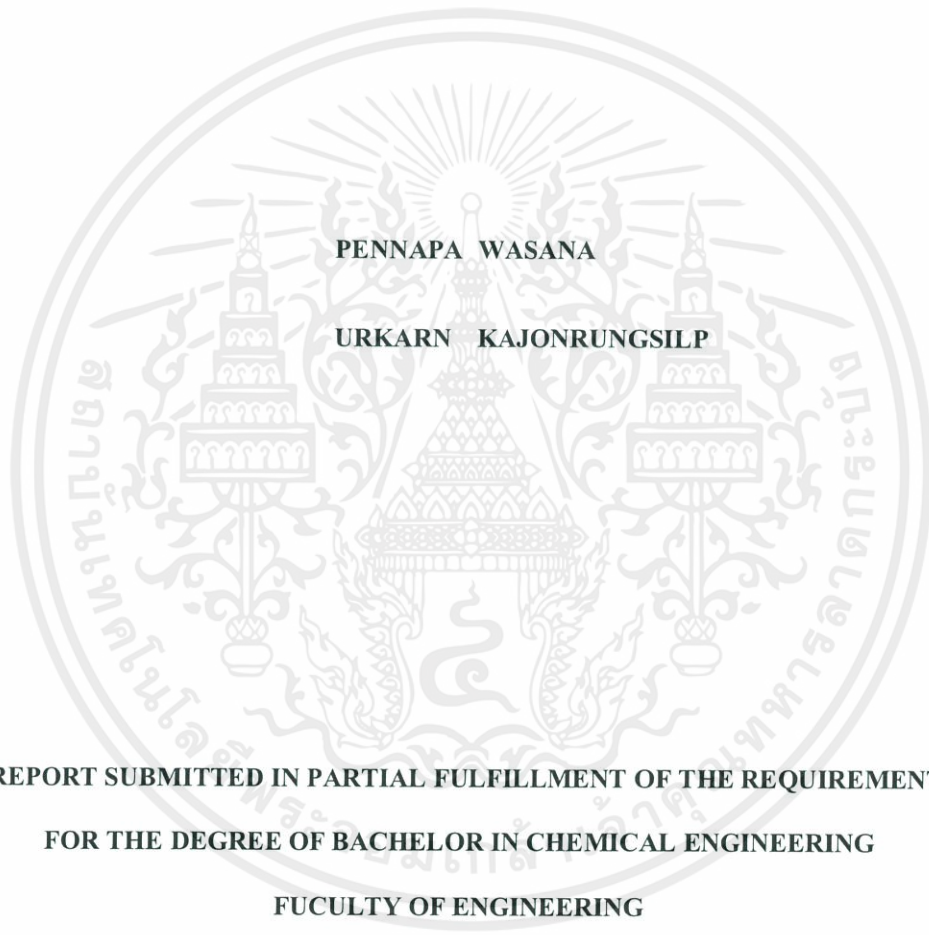
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CFD INVESTIGATION OF WATER JET PROPULSION UNDER  
THE ROYAL DEVELOPMENT PROJECT INITIATED  
BY HIS MAJESTY THE KING**



**PENNAPA WASANA**

**URKARN KAJONRUNGSILP**

**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FUCULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2012**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของ  
วอเตอร์เจ็ทในการผลักดันน้ำตามแนวพระราชดำริ  
โดย นางสาวเพ็ญภา วาสนา  
นางสาวเอื้อการย์ ขจรรุ่งศิลป์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

  
..... ประธานกรรมการ  
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ญานีพร พ็ชรวรโชติ)

  
..... กรรมการ  
(ดร.ชนวรรณ พิณรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของวอเตอร์เจ็ทในการปลักคั้นน้ำตามแนวพระราชดำริ
โดย	นางสาวเพ็ญภา วาสนา นางสาวเอื้อการย์ ขจรรุ่งศิลป์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่มีต่อประสิทธิภาพการปลักคั้นน้ำด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองทั้งหมดสร้างขึ้นโดยโปรแกรม GAMBIT และอ้างอิงจากลักษณะทางกายภาพของแม่น้ำจริง สนามการไหลของแบบจำลองทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ผลการจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วตามแนวแกน  $x$  ลดลงทำให้ระยะทางตามแนวแกน  $x$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อบริเวณการสร้างการไหล (ZFE) ลดลงตัวเลขเรย์โนลด์จะเพิ่มขึ้นซึ่งผลการจำลองสอดคล้องตามทฤษฎีของเจ็ทปั่นป่วน ประสิทธิภาพสูงสุดในการปลักคั้นน้ำเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทเท่ากับ 1.0668 เมตรจากระดับผิวน้ำ

**Report Title** CFD INVESTIGATION OF WATER JET PROPULSION UNDER  
THE ROYAL DEVELOPMENT PROJECT INITIATED BY HIS  
MAJESTY THE KING

**By** Miss. Pennapa Wasana  
Miss. Urkarn Kajonrungsilp

**Degree** Bachelor of Engineering

**Program** Chemical Engineering

**Year** 2012

**Advisor** Dr. Santi Wattananusorn

## ABSTRACT

In this project, the effect of water jet position on water discharge in flooding area using Computational Fluid Dynamics were studied. The simulation models were created by using GAMBIT®. The dimensions of these models were refer to the real situation. The flow fields were simulated by FLUENT® software. The simulated results were validated by comparing with turbulent jet theory to confirm the accuracy of the models. The simulated results revealed that the x-velocity was found to decreased with increasing longitudinal distance and the zone of flow establishment (ZFE) was also found to decrease with increasing Reynolds number. These results were in good agreement with the jet theory. The maximum discharge efficiency was obtained at the jet position of 1.0668 meters from water surface level.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ สำหรับคำแนะนำ คำสอน และคำปรึกษา รวมไปถึงแนวทางในการวิเคราะห์แก้ไขปรับปรุงงานวิจัย

อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และเป็นพื้นฐานสำคัญในการประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

นายเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ สำหรับคำแนะนำและแนวคิดเกี่ยวกับการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลให้ความรู้กับพวกน้องๆ ทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เพราะพี่เอกคอยช่วยเหลือเป็นอย่างมาก

นายทัพไทย สีเทา นายณัฐวัตร ใจกลม และนางสาวดวงกมล อ่อนพรม สำหรับคำปรึกษา คำแนะนำที่ดีกับน้องๆ ทำให้การแก้ปัญหาในการทำงานสามารถปรับปรุงได้ดีขึ้น

คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้การอบรมสั่งสอนและให้การสนับสนุนด้านการศึกษา ตลอดมา ทั้งค่าเทอม ค่าหอ ค่าใช้จ่ายต่างๆ

นายณัฐพล ศรีอุบลหรือเพื่อนโอ ที่เป็นห่วงเพื่อนๆจึงมีหน้าที่คอยไปส่งเพื่อนทุกคนกลับหอเวลาที่กลับดึกมากๆ ไม่มีรถจะกลับกันแล้ว แม้ว่าโอจะต้องขับมอเตอร์ไซค์ไปส่งที่ละคนสองคน จึงทำให้โอต้องกลับบ้านช้าที่สุดแต่โอก็ไม่บ่นและส่งเพื่อนกลับหออย่างปลอดภัย

พี่ๆน้องๆ และเพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจและมอบความเป็นมิตรที่ดีตลอดมา

นางสาวเพ็ญภา วาสนา

นางสาวเอื้อการย์ ขจรรุ่งศิลป์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์.....</b>	<b>3</b>
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD).....	3
2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	4
2.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor).....	4
2.2.2 กระบวนการคำนวณ (Solver).....	5
2.2.2.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method).....	5
2.2.2.2 วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method).....	5
2.2.2.3 วิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method).....	6
2.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor).....	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	7
2.3.1 สมการควบคุม (Governing Equation).....	7
2.3.1.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation).....	7
2.3.1.2 สมการ โมเมนตัม (Momentum equation).....	7
2.3.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation).....	8
2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	8
2.4.1 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)....	9
2.4.2 สมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds average Navier–Stokes equations: RANS).....	10
2.4.3 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	13
2.5 เจ็ต (Jet).....	14
2.5.1 กลไกการไหลแบบเจ็ต (Round jet).....	14
2.6 การทำงานของเรือผลัดค้ำน้ำ.....	17
2.7 วรรณกรรมปริทัศน์.....	18
2.7.1 การจำลองการไหลผ่านท่อเปิด โดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ....	18
2.7.2 การไหลแบบเจ็ต.....	19
บทที่ 3 การจำลอง.....	21
3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง.....	21
3.1.1 แบบจำลองของการผลัดค้ำน้ำ (Modeling of water jet).....	21
3.1.2 สภาวะขอบเขต.....	22
3.1.3 สมมติฐานของแบบจำลอง.....	22
3.1.4 สมการควบคุม.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method).....	23
3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	24
3.3 ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ต.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	26
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	26
4.1.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองรูปแบบของความเร็วกับทฤษฎี.....	26
4.1.2 การเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์กับทฤษฎี.....	28
4.2 อิทธิพลของตำแหน่งวอเตอร์เจ็ตที่ส่งผลต่อการผลักดันน้ำ.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	42
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT.....	43
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการใช้โปรแกรม FLUENT.....	48

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	14
ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดลักษณะการไหลของของไหลแบบต่าง ๆ.....	14
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวอเตอร์เจ็ท.....	18
ตารางที่ 3.1 สภาวะขอบเขต.....	22
ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	24



# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน.....	9
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท.....	15
รูปที่ 2.3 แผนภาพของ Round jet.....	16
รูปที่ 2.4 เครื่องพ่นน้ำ (Water Jet).....	17
รูปที่ 3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT.....	21
รูปที่ 3.2 การกำหนดสถานะขอบเขตของแบบจำลอง.....	22
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	24
รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางวอเตอร์เจ็ท.....	25
รูปที่ 4.1 คอนทัวร์ของ (a) ขนาดความเร็ว (b) ความเร็วแกน x และ (c) ความเร็วแกน y ที่ $H^* = 28.12$ .....	27
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 28.12.....	28
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758.....	29
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E^*$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758.....	29
รูปที่ 4.5 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วที่ $H^*$ เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18.....	31
รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ของความเร็วตามแนวแกน x ที่ $H^*$ เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18.....	32

## สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของความเร็วตามแนวแกน y ที่ $H^*$ เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18.....	33
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E^*$ กับ $H^*$ ที่ตำแหน่ง $x^*$ เท่ากับ (a) 0.8 (b) 3 (c) 4 (d) 5 และ (e) 6.....	35
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_{0.5}^*$ กับ $x^*$ ที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 6.....	36
รูปที่ 4.10 เวกเตอร์ของขนาดความเร็วที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 6 และ $x^*$ เท่ากับ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 ตามลำดับ.....	37
รูปที่ 5.1 การวางวอเคอร์เจ็ทของกองทัพเรือในช่วงที่เกิดอุทกภัย.....	39
รูปที่ ก.1 วิธีสร้างจุด.....	43
รูปที่ ก.2 วิธีสร้างเส้น.....	43
รูปที่ ก.3 วิธีสร้างระนาบ.....	44
รูปที่ ก.4 วิธีสร้างกริดที่เส้น.....	44
รูปที่ ก.5 วิธีสร้างกริดที่ระนาบ.....	45
รูปที่ ก.6 วิธีกำหนดสภาวะขอบเขต.....	45
รูปที่ ก.7 วิธีกำหนด Specify Continuum Types.....	46
รูปที่ ก.8 วิธีบันทึกงานและส่งออกกริด.....	47
รูปที่ ข.1 หน้าต่างของโปรแกรม FLUENT.....	48
รูปที่ ข.2 การเลือก Mesh ที่ใช้ในการคำนวณและหน้าจอแสดงผลของโปรแกรม FLUENT.....	49
รูปที่ ข.3 การตั้งค่า General.....	49
รูปที่ ข.4 การตั้งค่า Models.....	50
รูปที่ ข.5 การตั้งค่า Materials และขั้นตอนการเพิ่ม Materials.....	50
รูปที่ ข.6 การเพิ่มน้ำเข้าไปใน Materials.....	51
รูปที่ ข.7 การตั้งค่า Cell Zone Conditions.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.8 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in_bot.....	52
รูปที่ ข.9 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in_jet.....	52
รูปที่ ข.10 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in_top.....	53
รูปที่ ข.11 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน out.....	53
รูปที่ ข.12 การตั้ง Solution Initialization.....	54
รูปที่ ข.13 การตั้งค่า Run Calculation.....	54
รูปที่ ข.14 หน้าต่างที่ขึ้นเมื่อทำการคำนวณเสร็จ.....	55
รูปที่ ข.15 ขั้นตอนการดูผลการจำลองซึ่งเปิดอยู่ในรูปของคอนทัวร์.....	55
รูปที่ ข.16 รายละเอียดการเรียกดูผลในรูปคอนทัวร์.....	56
รูปที่ ข.17 ผลการจำลองในรูปของคอนทัวร์.....	56
รูปที่ ข.18 ขั้นตอนการบันทึกงาน.....	57
รูปที่ ข.19 การบันทึกงาน.....	57

## รายการสัญลักษณ์

$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางของวอเตอร์เจ็ต
$E$	พลังงานจำเพาะของของไหล
$E^*$	ตัวแปรไร้มิติของความเร็วเหนี่ยวนำ
$E_{0.5}^*$	ตัวแปรไร้มิติของความเร็วเหนี่ยวนำที่บริเวณขอบเขตด้านบนหรือด้านล่าง
$g$	ความเร่งที่เกิดจากโน้มถ่วงของโลก
$h$	ระยะทางจากผิวน้ำถึงเส้นกึ่งกลางของวอเตอร์เจ็ต
$H^*$	ตัวแปรไร้มิติของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ต
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
$p$	ความดัน
$p'$	ความดันที่เกิดจากการไหลแกว่ง
$\bar{p}$	ความดันที่เกิดจากการไหลเฉลี่ย
Re	เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
$S_E$	แหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy source term)
$S_M$	แหล่งกำเนิดโมเมนตัม (Momentum source term)
$t$	เวลา
$T$	อุณหภูมิ
$u_{max}$	ความเร็วสูงสุดในแนวแกน x
$\vec{u}$	เวกเตอร์ความเร็ว
$U$	ความเร็วตั้งต้นของเจ็ตในแนวแกน x
$U'$	เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากการไหลแกว่ง
$\bar{U}$	เวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากการไหลเฉลี่ย
$u, v, w$	ความเร็วในแนวแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ
$u', v', w'$	ความเร็วที่เกิดจากการไหลแกว่งในแนวแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	ความเร็วที่เกิดจากการไหลเฉลี่ยในแนวแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับ
$v_{positive}$	ความเร็วเหนี่ยวนำที่มีค่าบวก
$v_{negative}$	ความเร็วเหนี่ยวนำที่มีค่าลบ
$v_{max}$	ความเร็วเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุด
$x$	ระยะทางตามแนวแกน x
$x^*$	ตัวแปรไร้มิติของระยะทางตามแนวแกน x
$\mu$	ความหนืด
$\mu_t$	ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity หรือ Eddy viscosity)
$\mu_{eff}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity)
$\rho$	ความหนาแน่น
$\varphi$	คุณสมบัติการไหลฉับพลัน (Instantaneous flow property)
$\bar{\varphi}$	คุณสมบัติการไหลเฉลี่ย (Time-averaged flow property)
$\varphi'$	คุณสมบัติการไหลแกว่ง (Fluctuation flow property)
$\tau$	ความเค้นเฉือน (Shear stress)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปี พ.ศ. 2554 มีพายุเข้าประเทศไทยได้แก่ "ไหหมา" (ปลาย มิ.ย.-ก.ค.) "นกเตน" (ปลาย ก.ค.-ส.ค.) พายุโซนร้อน "ไหถ่าง" และ "เนสาด" (เดือน ก.ย.) และ "นาลแก" (เดือน ต.ค.) ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำในเขื่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการระบายน้ำออกจากเขื่อน ประกอบกับระบบการจัดการน้ำมีความผิดพลาด ส่งผลให้เกิดมหาอุทกภัย ซึ่งการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุคือการเร่งระบายน้ำลงสู่อ่าวไทย โดยเส้นทางระบายน้ำมี 3 เส้นทางคือ เส้นทางหลักลงสู่อ่าวไทยโดยไหลผ่ากลางกรุง เส้นทางที่ผันสู่อ่าวไทยโดยอ้อมผ่านเขตชั้นในทางฝั่งตะวันออกและเส้นทางที่ผันสู่อ่าวไทยโดยอ้อมผ่านเขตชั้นในทางฝั่งตะวันตก โดยภาพรวมจะเห็นว่าทางระบายน้ำเหล่านี้มีความล่าช้าในการระบายน้ำออกสู่อ่าวไทย เกิดจากปริมาณน้ำจำนวนมาก น้ำทะเลหนุนสูง แม่น้ำ คู คลอง มีขนาดเล็กและตื้นเขิน สาเหตุเหล่านี้ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำออกสู่ทะเลได้ในปริมาณที่เพียงพอ ซึ่งเกิดผลกระทบคือ มีน้ำสะสมอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่ม บริเวณที่นา นิคมอุตสาหกรรม ฯลฯ เป็นเวลานาน แม้ว่าหน่วยงานราชการและภาคเอกชนได้น้อมนำวิธีการแก้ปัญหาตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยการดัดแปลงหน่วยขับเคลื่อนของเรือยนต์ให้กลายเป็นวอเตอร์เจ็ต (Water Jet) เพื่อใช้ผลักดันน้ำ จากผลที่ได้จะเห็นว่าประสิทธิภาพของการเร่งระบายน้ำไม่มากพอเมื่อเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป จึงไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการช่วยผลักดันน้ำ นอกเหนือไปจากการไหลออกสู่ทะเลตามธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงถูกคิดค้นเพื่อหาวิธีการใช้วอเตอร์เจ็ตให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (หรือสูงกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน) โดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของไหล

จากเหตุการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้น การไหลของของไหลในการขับเคลื่อนน้ำมีความยุ่งยากและลำบากต่อการทดลองจากบริเวณสถานการณ์จริง จึงใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical methods) มาคำนวณแทน โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองหาตำแหน่งในการวางวอเตอร์เจ็ตที่เหมาะสมในการผลักดันน้ำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมและผลักดันน้ำได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) สามารถลดเวลาและต้นทุนในการทดลองได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการระบายน้ำออกจากแม่น้ำลงสู่อ่าวไทยให้เร็วขึ้นซึ่งจะช่วยบรรเทาทุกข์ของประชาชนที่ได้รับความเดือดร้อนจากอุทกภัย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ตที่ส่งผลต่อการผลักดันน้ำโดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
- 1.4.2 สามารถใช้โปรแกรม GAMBIT และ FLUENT ในการสร้างแบบจำลองและจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้
- 1.4.3 สามารถนำผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ตที่ดีที่สุดไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์จริง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) [1]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นสาขาหนึ่งในวิชากลศาสตร์ของไหล ที่นำกระบวนการเชิงตัวเลขและระเบียบวิธีมาใช้แก้และวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วยกฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน CFD สามารถแสดงกราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ของปริมาณต่างๆที่ผู้วิจัยสนใจ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหล รวมทั้ง CFD มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ และสามารถผลิตข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ CFD เป็นที่ยอมรับในงานด้านวิศวกรรมและด้านต่างๆ เช่น

- ทางด้านวิศวกรรมกระบวนการทางเคมี เช่น การผสม การแยกสารและการขึ้นรูปของพอลิเมอร์
- ทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์และแผงวงจรไฟฟ้า
- ทางด้านอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน
- พลศาสตร์ของน้ำที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เรือ
- สิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกของอาคาร เช่น แรงของลมที่กระทำกับอาคาร
- ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลภาวะและการไหลออก
- ทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น การไหลในหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ
- ทางด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น การพยากรณ์อากาศ
- ทางด้านอุทกวิทยาและชลศาสตร์ เช่น การไหลในแม่น้ำ ปากน้ำ และมหาสมุทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถศึกษาระบบที่มีสภาวะความเสี่ยงสูงหรือศึกษาระบบที่มีข้อจำกัดมาก
- สามารถลดระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายของการออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ได้
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการทดลองและอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ง่าย
- สามารถเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในอุปกรณ์ซึ่งเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์

ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น

## 2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

หลักการทำงานของ CFD สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) กระบวนการคำนวณ (Solver) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ทำการคำนวณและแก้ปัญหา โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) และส่วนสุดท้ายคือกระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

### 2.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนที่ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาการไหลของของไหลให้กับโปรแกรมคำนวณ ขั้นตอนนี้เป็นการนิยามรูปร่างขอบเขตของปัญหาที่เราสนใจ มีการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการคำนวณโดยการสร้างกริด (Grid หรือ Mesh) ซึ่งเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นส่วนเล็ก ๆ และเลือกแบบจำลองเพื่อนำมาแก้ปัญหาปรากฏการณ์ที่เราสนใจ รวมถึงการกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา จากการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลลัพธ์หรือคำตอบที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของกริด จำนวนกริดยิ่งมากคำตอบที่ได้ยิ่งมีความแม่นยำ กริดที่คืนนั้นจะมีการแบ่งอย่างสม่ำเสมอ มีความละเอียดในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบเป็นอย่างมาก

## 2.2.2 กระบวนการคำนวณ (Solver)

เป็นขั้นตอนการคำนวณและแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) ขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้ ประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่รู้ค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่ายและแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของโหนด (Discretisation) ซึ่งจะแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมและจัดรูปให้เป็นสมการคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงเป็นการหาคำตอบของสมการพีชคณิต (Algebraic equations) จากการคำนวณเชิงตัวเลข 3 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความแตกต่างกันตรงที่วิธีการประมาณค่าตัวแปรและขั้นตอนการแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่โหนด

### 2.2.2.1 วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method)

วิธีผลต่างสืบเนื่องเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ โดยขั้นตอนในเทคนิคนี้คือแปลงรูปสมการอนุพันธ์ของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าจากปัญหาของปรากฏการณ์การไหล โดยพิจารณาตัวแปรที่ตำแหน่งกริดและอาศัยการกระจายฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) ซึ่งจะทำให้การตัดพจน์อันดับสูงออกทำให้ได้สมการพีชคณิตของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในแต่ละกริดออกมาเพื่อประมาณค่าผลเฉลย

### 2.2.2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือที่เรียกว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ เขียนเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น คำนวณหาความแข็งแรงของวัสดุหรือชิ้นส่วนเครื่องกล ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหล การถ่ายเท

ความร้อนในชิ้นส่วนเครื่องกล รูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาที่อยู่ในสถานะคงที่) หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐานทางคณิตศาสตร์เช่น Euler method Runge–Kutta methods ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น

ปัญหาพื้นฐานคือการสร้างสมการที่สามารถประมาณค่าสมการที่กำลังสนใจศึกษาแต่มีความแน่นอนทางตัวเลข ซึ่งหมายความว่าความคลาดเคลื่อนในข้อมูลนำเข้า (Input) และการคำนวณระหว่างกลางจะไม่ถูกรวมเข้าไป และส่งผลให้ข้อมูลส่งออก (Output) ไร้ความหมาย ซึ่งวิธีการนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป วิธีไฟไนต์เอลเมนต์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน (complex domains) เมื่อขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลงหรือเมื่อผลที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดขอบเขต หรือเมื่อผลลัพธ์ไม่มีความราบเรียบ

### 2.2.2.3 วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องเป็นระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับการใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย สมการควบคุม (Governing Equation) จะถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Control Volumes) และอาศัยการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์

### 2.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processor)

เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณที่ได้จำลองออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น เวกเตอร์ รูปร่างขอบเขตของปัญหาและแสดงกริด คอนทัวร์และเส้น พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ การติดตามอนุภาค เป็นต้น จะเห็นได้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการทำ

กราฟฟิคและให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก จึงได้รับความนิยมใช้เทคนิคนี้ในการแก้ไขปัญหาการไหล

## 2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

### 2.3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

สมการควบคุมจะใช้กฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) โดยจะเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

#### 2.3.1.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่น

$t$  คือ เวลา

$\vec{u}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) และกระจายออกได้เป็น  $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$

$u$  คือ ความเร็วในแนวแกน x

$v$  คือ ความเร็วในแนวแกน y

$w$  คือ ความเร็วในแนวแกน z

ซึ่งสมการที่ (1) เป็นสมการทั่วไปของของไหล สำหรับกรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ สมการที่ (1) จะลดรูปได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

#### 2.3.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าแรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ดังนั้นสมการโมเมนตัมแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (3)$$

โดย  $p$  คือ ความดัน (Pressure)

$\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)

$S_M$  คือ แหล่งโมเมนตัม (Momentum source terms)

### 2.3.1.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

สมการนี้ นำมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวไว้ว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างหรือทำให้พลังงานสูญหายได้

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho \bar{u}E) + \nabla \cdot (\bar{u} \cdot \tau) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (4)$$

โดย  $E$  คือ พลังงานจำเพาะของไหล

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$T$  คือ อุณหภูมิ

$S_E$  คือ แหล่งพลังงาน (Energy source terms)

## 2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon [1, 2]

รูปแบบการไหลของของไหลประกอบด้วย การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) สามารถวิเคราะห์ได้โดยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อย (Inertia force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) จากการทดลองการไหลพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds Number:  $Re_{crit}$ ) การไหลจะราบเรียบและที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตจะเกิดความซับซ้อนซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการไหล ที่สภาวะสุดท้ายพฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบสุ่ม (Random) และปั่นป่วนวุ่นวายถึงแม้ว่ากำหนดให้สภาวะขอบเขตคงที่ และเรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

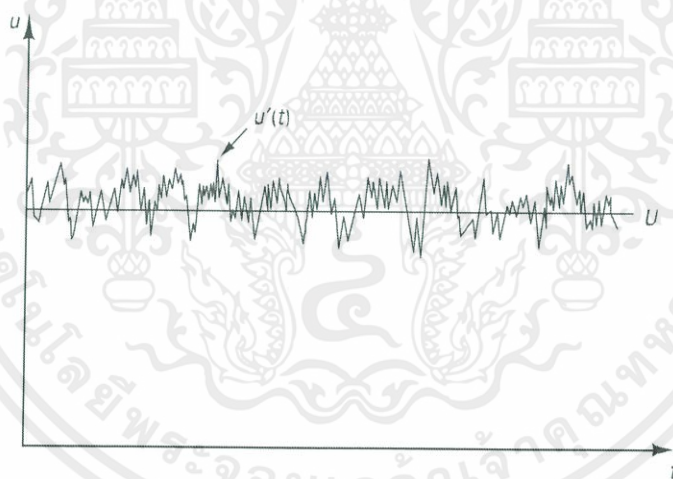
### 2.4.1 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the turbulent flow)

การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สภาวะไม่คงตัวสูง (Highly unsteady): การไหลมีสภาวะไม่คงตัวสูง ความเร็วเป็นฟังก์ชันกับเวลาและรูปแบบของการวัดความเร็ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

- มีความไม่ปกติ (Irregularity): การไหลมีความผิดปกติ ไม่สม่ำเสมอ เป็นลักษณะการไหลที่ทำให้การหาค่าตอบแบบแม่นยำตรงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)

- การแพร่ (Diffusivity): การไหลมีการแพร่กระจาย ถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (Random) แต่ไม่แสดงการกระจายตัวของการแกว่งไปมาของความเร็วที่รอบ ๆ ของไหล การไหลนี้จะไม่เรียกเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัมความร้อนและมวล



รูปที่ 2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน [1]

- สามมิติ (Three dimensional): การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลแบบสามมิติและเกิดการหมุนวน (Rotational) ของของไหล

- การสลายตัว (Dissipative): การไหลแบบปั่นป่วนสามารถสลายตัวได้

- ตัวเลขเรย์โนลด์สูง (Reynolds Number): การไหลแบบปั่นป่วนมักเกิดที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง

#### 2.4.2 สมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์

(Reynolds average Navier–Stokes equations: RANS)

ลักษณะการไหลที่ไม่ปกติของการไหลแบบปั่นป่วนตามที่ได้กล่าวมานั้น เป็นสาเหตุทำให้การคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลอย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามการคำนวณของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแก้ได้โดยใช้วิธีทางสถิติ ซึ่งคุณสมบัติการไหลนับพลา  $\varphi$  (Instantaneous flow property) สามารถแยกได้เป็นคุณสมบัติการไหลเฉลี่ย  $\bar{\varphi}$  (Time-averaged flow property) และคุณสมบัติการไหลแกว่ง  $\varphi'$  (Fluctuation flow property) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (5)$$

กระบวนการนี้เรียกว่า การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ซึ่ง Osborne Reynolds เป็นคนแรกที่น่าเสนอ ซึ่งนิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล  $\varphi$  และเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง  $\varphi'$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (6)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (7)$$

การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds decomposition) ของความดันเวกเตอร์ความเร็วและองค์ประกอบความเร็ว ซึ่งประกอบด้วยความเร็วในแนวแกน x y และ z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (8)$$

$$U(t) = \bar{U} + U'(t) \quad (9)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (10)$$

$$v(t) = \bar{v} + v'(t) \quad (11)$$

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (12)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ (8) -

(12) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของเวลาเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (6) - (7)

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (13)$$

หรือ 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (14)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวไม่ได้ที่ความหนืดคงที่คือ

องค์ประกอบ x: 
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{u}v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{u}w) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \\ & + \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (15)$$

หรือ 
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \\ & + \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{(u')^2}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{u'w'}) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (16)$$

องค์ประกอบ y: 
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v}u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{v}w) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \\ & + \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{(v')^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (17)$$

หรือ 
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v}$$

$$+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \quad (18)$$

องค์ประกอบ z:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{w}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{wu}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{wv}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w^2}) \\ &= -\frac{\partial \overline{p}}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial z^2} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (19)$$

หรือ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u}) + \nabla \cdot (\rho \overline{uU}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \overline{u} \\ &+ \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'w'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{w'^2}) \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (20)$$

เรียกสมการที่ (15) - (20) ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation) และในสมการที่ (15) - (20) มีเทอมที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วแกว่งเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ความเค้นปั่นป่วนพิเศษ (Extra turbulent stresses) [3] สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นป่วนพิเศษนี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses)

เพื่อความสะดวกความเค้นเรย์โนลด์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

โดย  $\mu_t$  คือ ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent viscosity หรือ Eddy viscosity) โดยปกติแล้วความหนืดปั่นป่วนจะขึ้นกับตำแหน่ง

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (21) นำเสนอโดย Boussinesq ในปี ค.ศ. 1877 ดังนั้นสมการที่ (16) (18) และ (20) สามารถแสดงใหม่ได้เป็น

องค์ประกอบ x:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u}) + \nabla \cdot (\rho \overline{uU}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \nabla^2 \overline{u} + S_{Mx} \quad (22)$$

$$\text{องค์ประกอบ } y: \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{v} + S_{My} \quad (23)$$

$$\text{องค์ประกอบ } z: \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{w}) + \nabla \cdot (\rho \bar{w} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu_{eff} \nabla^2 \bar{w} + S_{Mz} \quad (24)$$

โดย  $\mu_{eff}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดประสิทธิภาพ (Effective viscosity) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (25)$$

### 2.4.3 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมมากที่สุด ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย Launder และ Spalding [4] โดยแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยสมการการเคลื่อนที่พิเศษสองสมการเพื่อแสดงคุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วน ประกอบไปด้วยสมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy) และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Dissipation rate of turbulent kinetic energy) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (26)$$

สมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$ -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (27)$$

$$\text{โดย } \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2 \quad C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{y}{u} \right|$$

และค่าคงต่างๆในแบบจำลองแสดงค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon

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

## 2.5 เจ็ท (Jet)

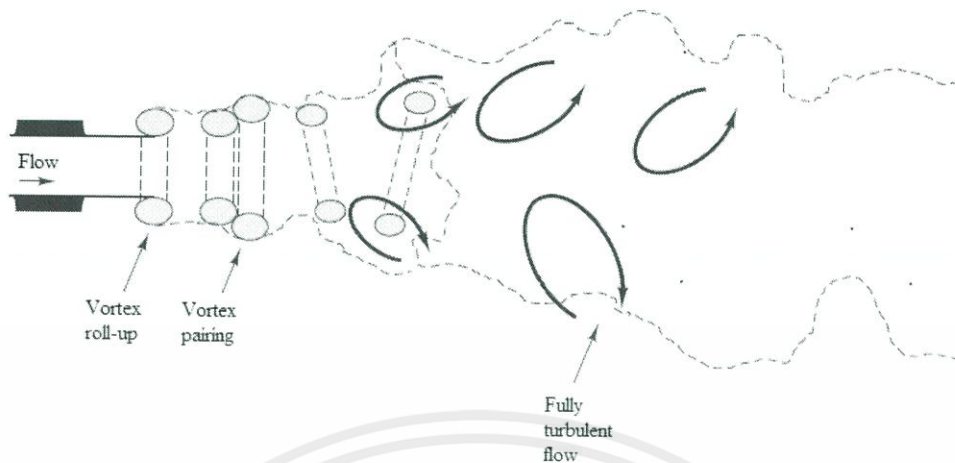
เจ็ทคือการไหลแบบเฉือน (shear flow) ที่พบมากที่สุด ซึ่งเป็นการไหลของไหลชนิดหนึ่ง ไหลออกจากช่องเปิดพุ่งไปสู่ของไหลอีกชนิดหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ควันที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม การปล่อยของเสียจากท่อลงสู่แม่น้ำ เป็นต้น การไหลแบบเจ็ทมีหลายประเภท ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดลักษณะการไหลของของไหลแบบต่าง ๆ [5]

แหล่งกำเนิด	การฉีดอย่างต่อเนื่อง (Continuous injection)	การฉีดแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent injection)
โมเมนตัม (Momentum Only)	เจ็ท (Jets)	พัฟ (Puff)
แรงลอยตัว (Buoyancy Only)	พวยม (Plume)	ความร้อน (Thermal)
โมเมนตัมและแรงลอยตัว (Both momentum and buoyancy)	เจ็ทหรือพวยม (Buoyant jet or forced plume)	พัฟลอยตัว (Buoyant puff)

### 2.5.1 กลไกการไหลแบบเจ็ท (Round jet)

เจ็ทปั่นป่วนแบบแกนสมมาตรที่ไหลออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วที่ปากทางออก ( $U$ ) โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ทนิยามได้จาก  $Re = Ud/\nu$  เมื่อ  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด และ  $\nu$  คือความหนืดเชิงจลน์ของของไหล กระบวนการการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทสามารถอธิบายโดยแผนภาพของเจ็ทดังรูปที่ 2.2

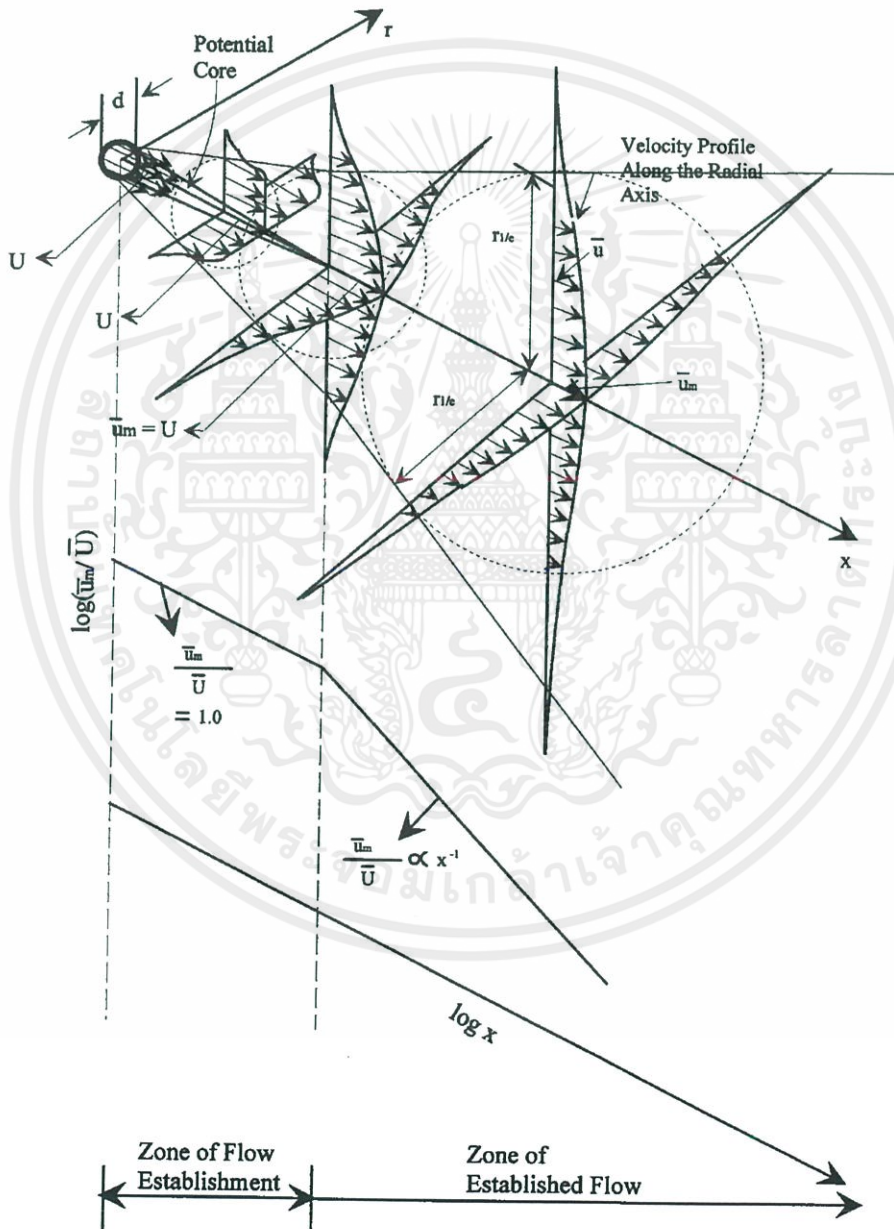


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท [1]

หลังจากของไหลไหลออกจากหัวฉีด การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งก่อให้เกิดการหมุนวน (Vortex roll-up) ที่บริเวณต่อทางออกของหัวฉีดต่อจากนั้นเกิดการขยายตัวซึ่งประกอบด้วย การรวมตัวของ การหมุนวนแบบเดี่ยวที่มีความแข็งแกร่ง (Single strength vortex) จนถึง การจับคู่ของการหมุนวน (Vortex pairing) ระยะทางหลังต่อทางออกเพียงเล็กน้อยจะเกิดการรบกวนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การหมุนวนไม่ปกติต่อจากนั้นการไหลแบบเจ็ทจะแตกตัวกลายเป็นการไหลวนขนาดเล็ก (Small scale eddy) จำนวนมาก และในที่สุดการไหลจะกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบเจ็ทมีบริเวณที่สำคัญ 2 บริเวณ ประกอบไปด้วยบริเวณการสร้างการไหล (Zone of flow establishment: ZFE) และบริเวณการไหลที่ถูกสร้าง (Zone of establish flow: ZEF) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ในบริเวณ ZFE เป็นบริเวณที่มีความเร็วคงที่คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนการไหล ( $\bar{u}_m$ ) มีค่าเท่ากับความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออก ( $U$ ) การผสมปั่นป่วนจะไม่เกิดที่กึ่งกลางของเจ็ท อย่างไรก็ตามกระบวนการการผสมจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ โดยโครงสร้างที่เชื่อมโยงขนาดใหญ่ (large-scale coherent structure: CS) จะเหนี่ยวนำของไหลภายนอกเข้ามาในชั้นของเจ็ทเฉือน (Jet shear layer) เรียกกระบวนการนี้ว่า การผสมแบบบัลค์ (Bulk mixing) และเกิดการผสมในขนาด

ที่เล็กกว่า (smaller-scale) ซึ่งเกิดจากความเร็วแกว่ง [6] บริเวณ ZFE จะหมดไปหลังจากเจ็ทเคลื่อนที่ห่างจากหัวฉีดจนมีระยะทางเท่ากับ 4-6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด [7] และในบริเวณ ZEF การผสมปั่นป่วนจะเกิดที่กึ่งกลางของเจ็ท ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนการไหลจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยรูปแบบของความเร็วจะกระจายตัวเป็นรูประฆัง (Bell shape หรือ Gaussian distribution)

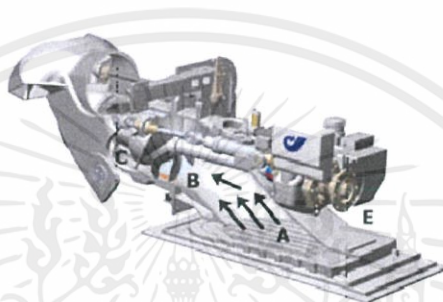


รูปที่ 2.3 แผนภาพของ Round jet [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การทำงานของเรือผลักดันน้ำ [9]

การทำงานของเรือผลักดันน้ำนั้นอาศัยคุณสมบัติของการไหล จากสมการอนุรักษ์พลังงานของของไหล สามารถอธิบายได้ว่าของไหลที่ออกจากหัวฉีดซึ่งมีความเร็วสูงและมีความดันต่ำทำให้ของไหลภายนอกที่มีความเร็วต่ำกว่าและมีความดันสูงกว่าถูกเหนี่ยวนำเข้ามาให้เจ็ท ทำให้เกิดการผลักดันและทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปในแนวระนาบได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.4 เครื่องพ่นน้ำ (Water Jet)

จากรูปที่ 2.4 วอเตอร์เจ็ท (Water jet) ประกอบด้วย (A) Intake Duct (B) Pump Impeller (C) Stator (E) Outlet Nozzle Reverse Gate และ Deflector การทำงานของเครื่องพ่นน้ำนั้นเมื่อ Pump Impeller ได้รับแรงขับจากเครื่องยนต์แล้วจะส่งผลทำให้น้ำถูกดูดเข้ามาทาง Intake Duct ผ่าน Impeller ก่อนเข้าสู่ Stator น้ำในบริเวณนี้จะถูกทำให้เกิดแรงดันสูงขึ้น แล้วไหลผ่านเข้าสู่ Outlet Nozzle ที่ท้ายเรือเกิดเป็นพลังงานจลน์ให้เรือขับเคลื่อนไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูงได้ สำหรับการลดความเร็ว การหยุดเรือและทำให้เรือเกิดการถอยหลัง ทำได้โดยการเคลื่อนตัว Reverse Gate ลงมาขวางทางพ่นน้ำที่ออกจาก Outlet Nozzle ถ้าเคลื่อนตัวลงมาต่ำมากขึ้นจะส่งผลให้เรือเกิดแรงต้านเพิ่มมากขึ้น จนสามารถหยุดเรือและถอยหลังได้ในที่สุด Deflector มีหน้าที่เหมือนกับหางเสือที่ใช้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ ซึ่งเกิดจากการหักเหการไหลของน้ำที่พ่นออกมาจาก Outlet Nozzle โดยวอเตอร์เจ็ทที่ใช้งานในปัจจุบันมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวอเตอร์เจ็ต

คุณสมบัติ	ค่า
กำลังสูงสุด	23 MW
เส้นผ่านศูนย์กลาง Impeller	2.8 m
เส้นผ่านศูนย์กลาง Inlet	2.1 m
จำนวนรอบ	2,500 rpm
ความเร็วสูงสุด	>70 Knot

จากปัญหาอุทกภัยเมื่อปี พ.ศ.2554 กองเรือยุทธการได้ดำเนินการเร่งระบายน้ำโดยใช้เรือผลักดันน้ำ แต่ยังมีจุดบกพร่องที่ต้องแก้ไขคือความสามารถในการผลักดันน้ำมีค่าน้อยไม่เป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ตไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของการหาตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ตโดยอาศัยคุณสมบัติของการไหลดังที่กล่าวมาข้างต้นและเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อแสดงค่าสนามความเร็วและหาตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ตที่ทำให้ได้ค่าอัตราการไหลสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำให้มากยิ่งขึ้น

## 2.7 วรรณกรรมปริทัศน์

### 2.7.1 การจำลองการไหลผ่านท่อเปิด โดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Li และ Zeng [10] จำลองการไหลของของไหลผ่านช่องเปิดโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติ RANS โดยแบ่งการศึกษาเป็นสองกรณีคือ กรณีที่มีวัชพืชรากขวางและกรณีที่ไม่มีวัชพืชรากขวางและมีตัวแปรในที่ศึกษาได้แก่ ความกว้างและความสูงของแม่น้ำและความหนาแน่นของวัชพืช จากการจำลองพบว่าระดับผิวน้ำในแม่น้ำจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัชพืชเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำเพิ่มขึ้นตามความกว้างของแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลจะลดลงเมื่อมีปริมาณวัชพืชเพิ่มขึ้น

Gandhi และคณะ [11] จำลองหารูปแบบของความเร็วของสภาวะการไหลจริงและสภาวะการไหลในอุดมคติโดยใช้เทคนิค CFD และเปรียบเทียบผลการจำลองกับความเร็วที่วัดค่าโดย Acoustic doppler current profiler (ADCP) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความชัน ลักษณะของช่องเปิดที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปการจำลองแบ่งเป็น 6 กรณีดังนี้ การไหลในช่องเปิดที่มีความชันเท่ากับ 1/75 1/30 และ 1/10 การไหลที่มีมุมโค้ง 90 องศา การไหลในท่อที่มีปลายเปิดสู่เข้าและการไหลในท่อเปิดที่มีปลายท่อลู่ออก ผลการจำลองนั้นแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความลึกและความกว้าง ผลการจำลองพบว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำนายตำแหน่งการติดตั้งและจำนวนของเครื่องรับรู้ (Sensor) ในการวัดอัตราการไหลให้ช่องเปิดได้

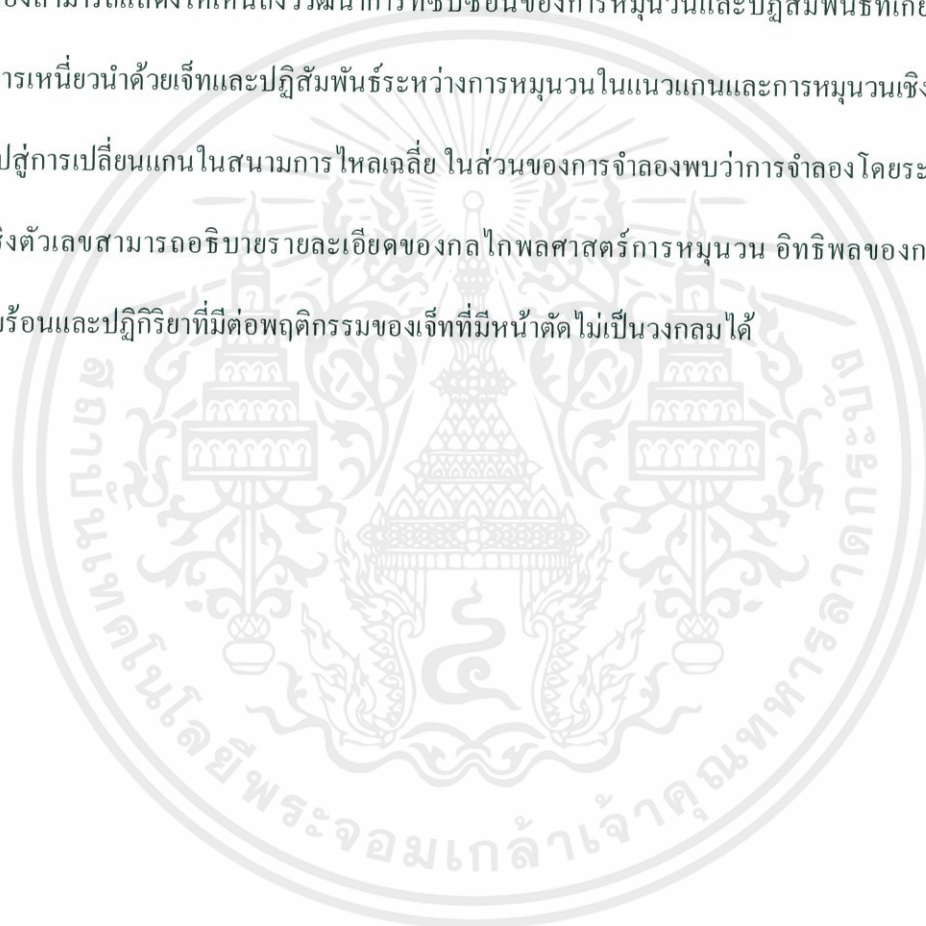
### 2.7.2 การไหลแบบเจ็ท

Seok และ Il [8] ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อการไหลแบบเจ็ท โดยสนามความเร็วถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วของภาพอนุภาค (Particle image velocimetry: PIV) โดยช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 177 ถึง 5,142 จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบความเร็วในแนวแกนมีการไหลเป็นแบบราบเรียบใกล้เคียงกับปากทางออกความยาวของบริเวณ ZFE จะลดลงเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น อัตราการกระจายตัวของการไหลแบบปั่นป่วนจะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สำหรับเจ็ทปั่นป่วนพบว่าระดับของความเค้นเฉือนเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

Wang และ Tan [6] ศึกษาการไหลแบบเจ็ทและเสนอการควบคุมการพัฒนาของการไหลชนิดนี้ ผลการทดลองพบว่าวิวัฒนาการของเจ็ทจะขึ้นกับสภาวะเริ่มต้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของการหมุนวนขนาดใหญ่ การเหนี่ยวนำและการผสมในส่วนที่อยู่ใกล้ปากทางออก

การควบคุมการไหลแบบเจ็ทสามารถทำได้โดยการจัดการ โครงสร้างที่เชื่อมโยงขนาดใหญ่ใน บริเวณใกล้ท่อทางออก

Gutmark และ Grinstein [7] เรียบเรียงการศึกษาเกี่ยวกับการทดลองและการจำลอง ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลแบบเจ็ทที่มีหน้าตัดที่ไม่เป็นวงกลม เนื่องจากเจ็ทที่มีหน้าตัด ไม่เป็นวงกลมสามารถปรับปรุงกระบวนการทั่วไปได้โดยมีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ จากการ ทดลองสามารถแสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการที่ซับซ้อนของการหมุนวนและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง กับการเหนี่ยวนำด้วยเจ็ทและปฏิสัมพันธ์ระหว่างการหมุนวนในแนวแกนและการหมุนวนเชิงมุมซึ่ง นำไปสู่การเปลี่ยนแกนในสนามการไหลเฉลี่ย ในส่วนของการจำลองพบว่า การจำลองโดยระเบียบ วิธีเชิงตัวเลขสามารถอธิบายรายละเอียดของกลไกพลศาสตร์การหมุนวน อิทธิพลของการลด ความร้อนและปฏิกิริยาที่มีต่อพฤติกรรมของเจ็ทที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลมได้



## บทที่ 3

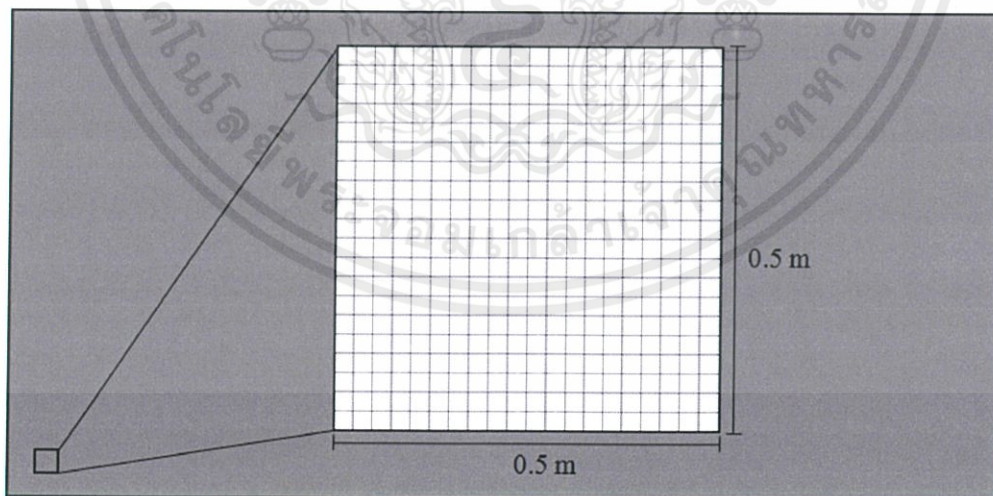
### การจำลอง

ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนการจำลองการผลัดค้ำน้ำโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่ก่อให้เกิดการเหนียวน้ำสูงสุด ซึ่งในการจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (i) การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี (ii) ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ท

#### 3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง

##### 3.1.1 แบบจำลองของการผลัดค้ำน้ำ (Modeling of water jet)

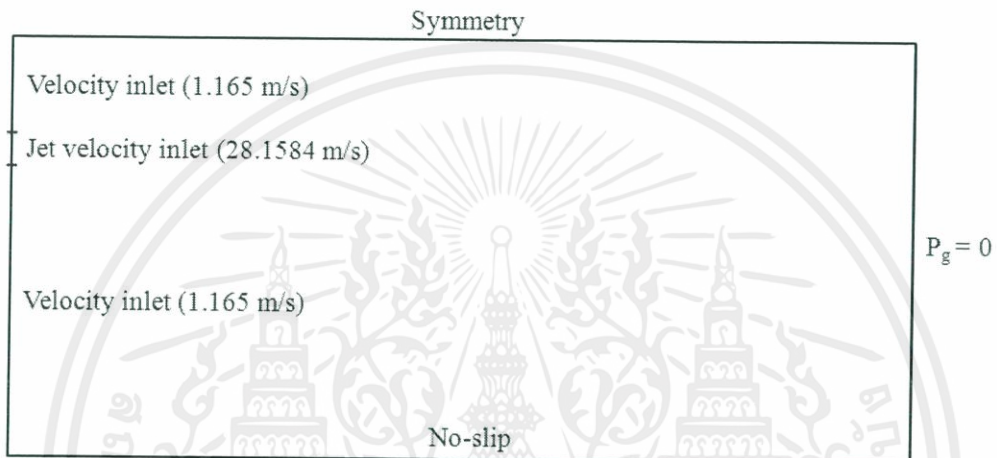
แบบจำลองที่สร้างขึ้นอ้างอิงจากลักษณะทางกายภาพของแม่น้ำจริง โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นถูกกำหนดเป็นแบบจำลองสองมิติ โดยมีความสูงเท่ากับ 10 เมตร ความยาวเท่ากับ 20 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของวอเตอร์เจ็ทเท่ากับ 0.1778 เมตร แบบจำลองทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม GAMBIT ดังแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT

### 3.1.2 สภาวะขอบเขต

สภาวะขอบเขตทั้งหมดอ้างอิงข้อมูลจากกรมอุทกหารเรือ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ความเร็วขาเข้าถูกสมมติให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) กำหนดความเร็วที่พื้นแม่น้ำเป็นศูนย์ (No-slip boundary condition) และที่ผิวน้ำกำหนดให้เกรเดียนในแนวตั้งฉากกับการไหลของคุณสมบัติการไหลมีค่าเป็นศูนย์ (Symmetry boundary condition) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 สภาวะขอบเขต

รายละเอียด	ค่า
ความเร็วของแม่น้ำ	1.165 m/s
ความเร็ววอเตอร์เจ็ท	28.158 m/s

### 3.1.3 สมมติฐานของแบบจำลอง

- 3.1.3.1 แบบจำลองที่สร้างขึ้นกำหนดให้เป็นสองมิติ
- 3.1.3.2 ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (คำนวณเฉพาะน้ำเท่านั้น)
- 3.1.3.3 การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
- 3.1.3.4 ความเร็วของวอเตอร์เจ็ทมีค่าคงที่

### 3.1.4 สมการควบคุม

จากการตั้งสมมติฐาน สมการควบคุมของแบบของแบบจำลองนี้ ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (28)$$

สมการโมเมนตัม

$$\text{แกน x: } \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}u)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (29)$$

$$\text{แกน y: } \rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}v)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}^2)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \rho g \quad (30)$$

สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (31)$$

สมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$  -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (32)$$

### 3.1.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

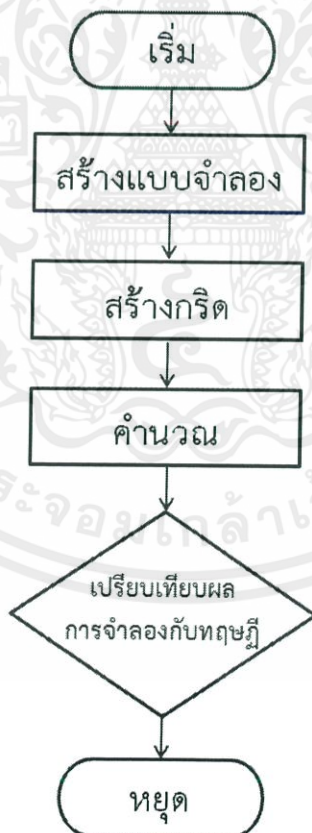
สมการควบคุมทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยการคำนวณจะเริ่มจากแบ่งขอบเขตการคำนวณเป็นเซลล์ขนาดเล็กจำนวนมาก แล้วอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นเซตของสมการพีชคณิต สมการพีชคณิตเหล่านี้จะถูกคำนวณจนได้สนามการกระจายตัวของตัวแปรตามที่ต้องการ โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการจำลองครั้งนี้สรุปได้ดังตารางที่ 3.2

### ตารางที่ 3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รายละเอียด	รูปแบบ
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent kinetic energy	First Order Upwind
Turbulent dissipation rate	First Order Upwind

### 3.2 การจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

ผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม FLUENT จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยกระบวนการในขั้นตอนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

### 3.3 ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ท

เป็นการจำลองอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่มีต่อการผลักดันน้ำหรือเหนี่ยวนำน้ำภายนอกเข้าสู่ลำเจ็ท เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ท ( $H^*$ ) กับประสิทธิภาพในการผลักดันน้ำ (ความเร็วเหนี่ยวนำ (Entrainment velocity)) ซึ่งตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ท ( $H^*$ ) นิยามจากอัตราส่วนระหว่างระยะทางจากผิวน้ำถึงเส้นกึ่งกลางของวอเตอร์เจ็ท ( $h$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางของวอเตอร์เจ็ท ( $d$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยระยะ  $H^*$  ที่ทำการจำลองประกอบไปด้วย 0.5 2 3 4 6 8 10 14 14.06 28.12 และ 42.18



รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางวอเตอร์เจ็ท

## บทที่ 4

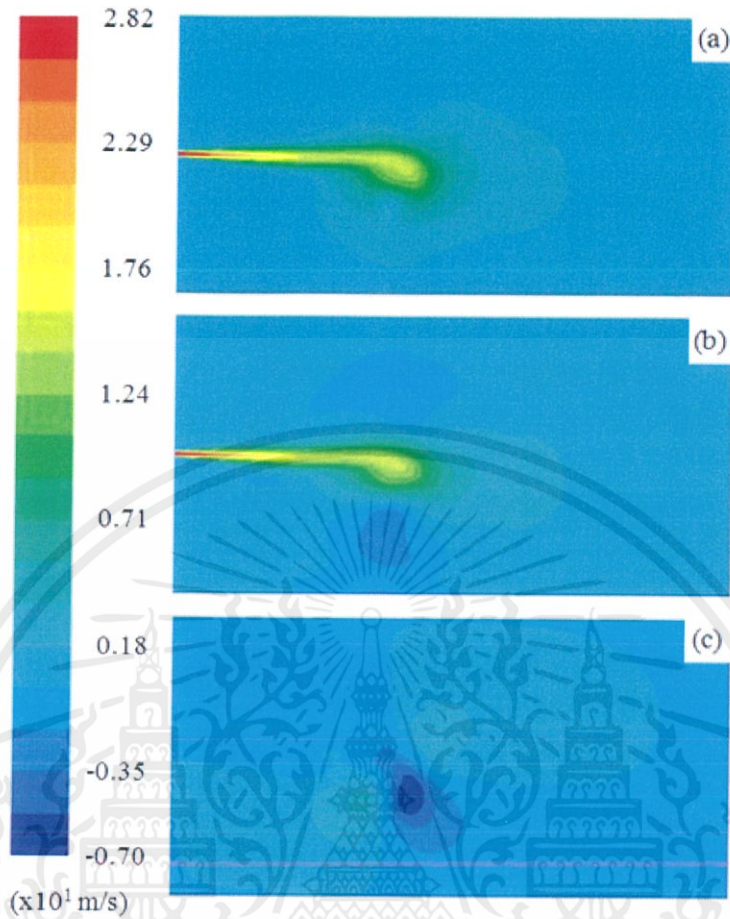
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

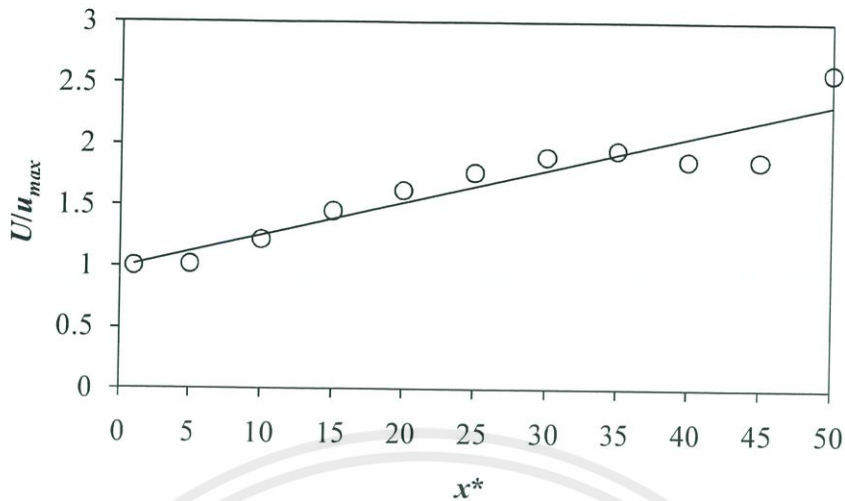
ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี โดยแบ่งการเปรียบเทียบเป็น 2 กรณี คือการเปรียบเทียบผลการจำลองรูปแบบของความเร็วของตำแหน่งการตั้งวอเตอร์เจ็ต ( $H^* = h/d$ ) เท่ากับ 28.12 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 กับทฤษฎี และการเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ของการจำลองที่  $H^*$  เท่ากับ 28.12 กับทฤษฎี โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นทั้งหมดถูกคำนวณในโปรแกรม FLUENT เพื่อคำนวณสนามการไหลและความปั่นป่วน โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในครั้งนี่คือ แบบจำลอง Standard k-epsilon

##### 4.1.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองรูปแบบของความเร็วกับทฤษฎี

จากการจำลองคอนทัวร์ของขนาดความเร็ว ความเร็วตามแนวแกน x และความเร็วตามแนวแกน y ในตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 28.12 ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^* = x/d$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากกราฟพบว่าเมื่อ  $x^*$  เพิ่มขึ้น  $U/u_{max}$  จะเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าความเร็วแกน x ที่มีค่าสูงสุด ( $u_{max}$ ) จะลดลงเมื่อ  $x^*$  เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีของเจ็ทปั่นป่วน [5]



รูปที่ 4.1 คอนทัวร์ของ (a) ขนาดความเร็ว (b) ความเร็วแกน x และ (c) ความเร็วแกน y ที่  $H^* = 28.12$



#### รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ )

และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) ที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 28.12

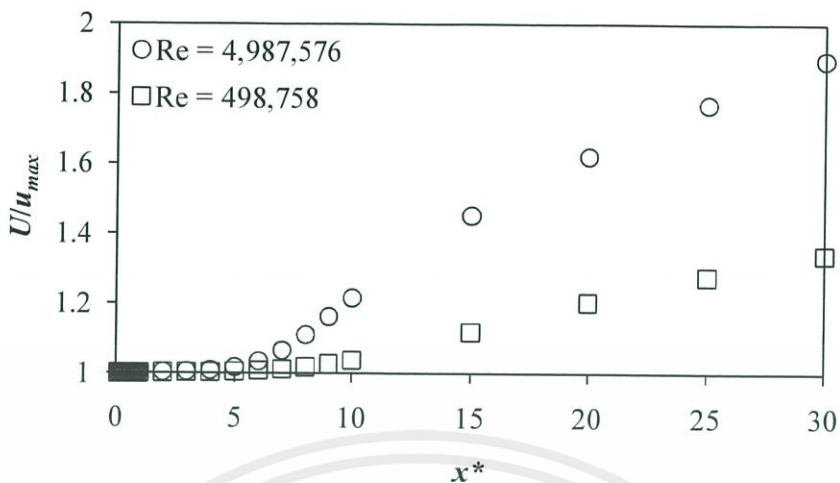
#### 4.1.2 การเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์กับทฤษฎี

แบบจำลองที่  $H^*$  เท่ากับ 28.12 จะถูกจำลองโดยการปรับเปลี่ยนตัวเลขเรย์โนลด์ 2 ค่า คือ 4,987,576 และ 498,758 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์กับทฤษฎี จากการจำลอง แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E^*$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ โดยตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E^*$ ) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$E^* = \frac{v_{positive} - v_{negative}}{2|v_{max}|} \quad (33)$$

จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นบริเวณการสร้างการไหล

(Zone of flow establishment: ZFE) จะลดลง ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีของเจ็ทปั่นป่วน [5, 8]



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758

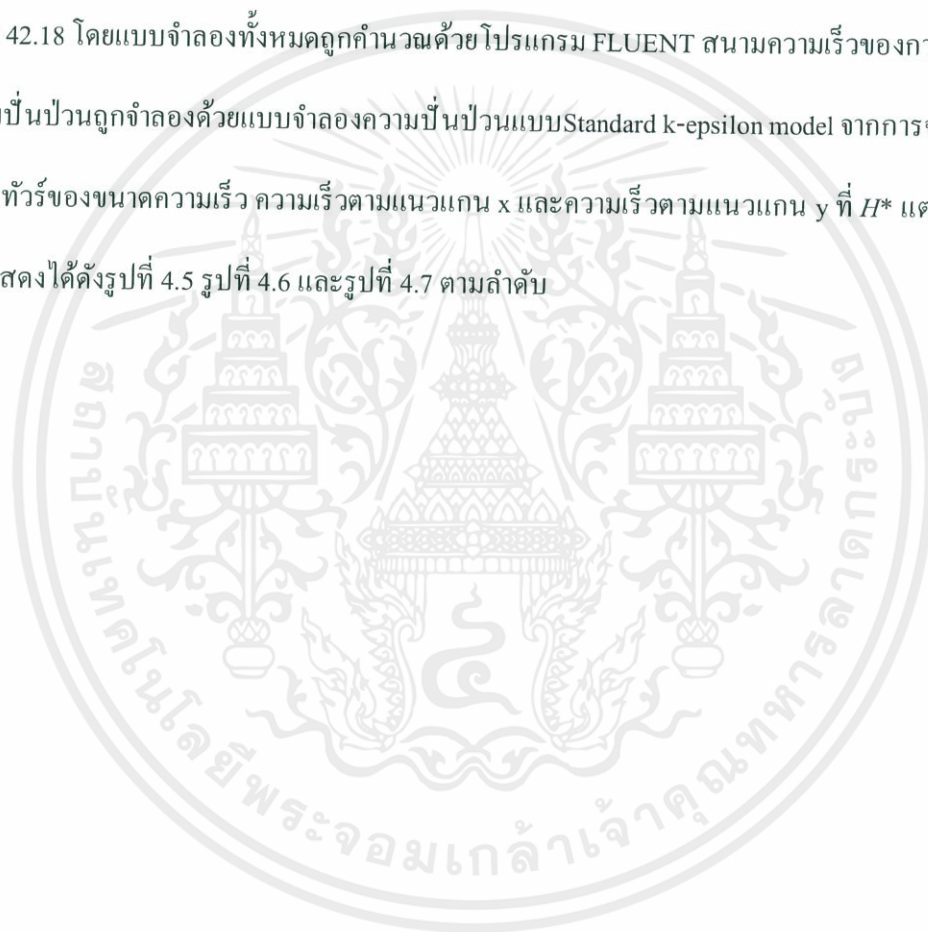


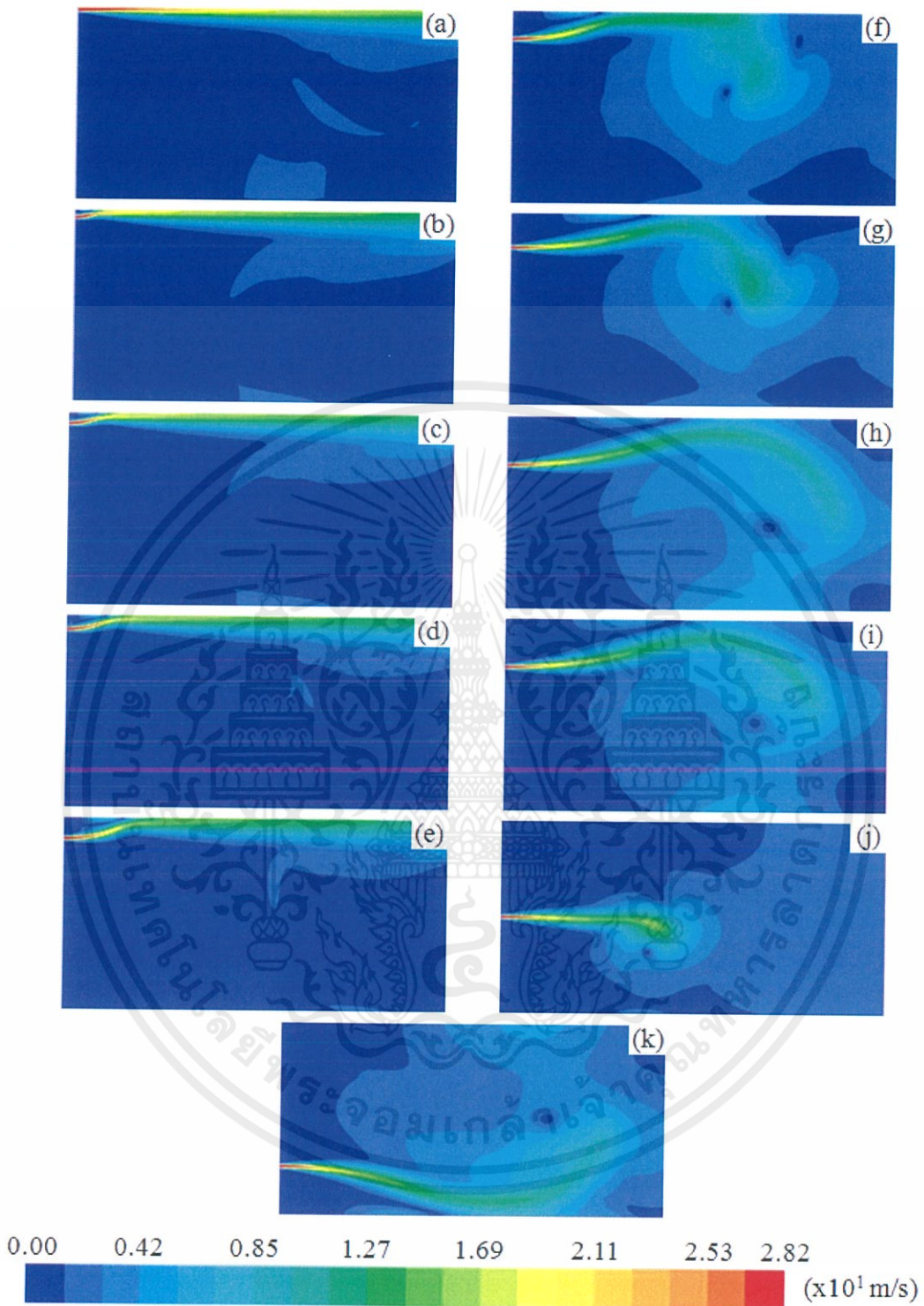
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E^*$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎีทั้งสองกรณีพบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับทฤษฎีการไหลแบบเจ็ท ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือในการทำนายพฤติกรรมการไหลแบบเจ็ท

#### 4.2 อิทธิพลของตำแหน่งวอเตอร์เจ็ทที่ส่งผลต่อการผลักดันน้ำ

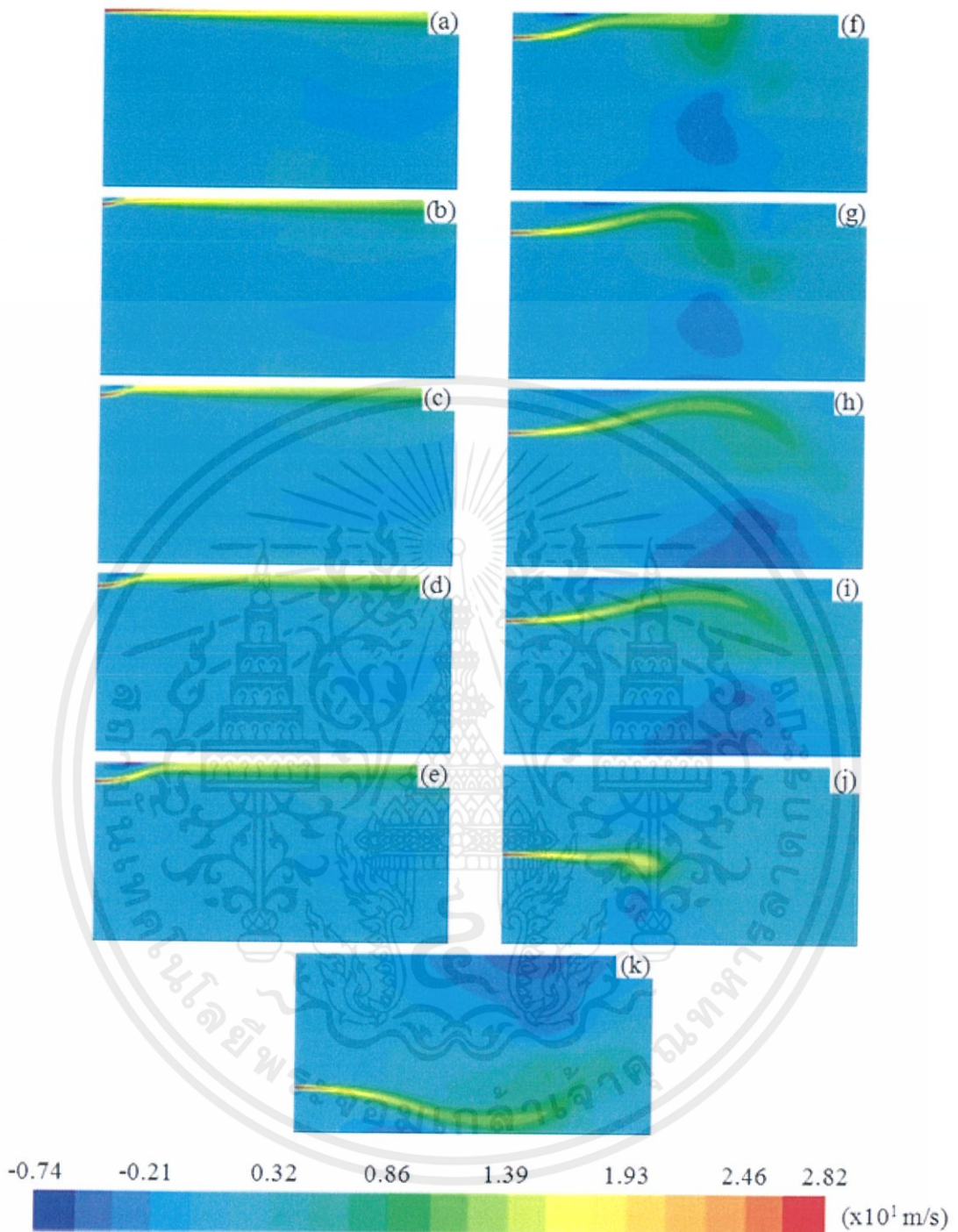
ตำแหน่งวอเตอร์เจ็ทที่จำลองประกอบไปด้วย  $H^*$  เท่ากับ 0.5 2 3 4 6 8 10 14 14.06 28.12 และ 42.18 โดยแบบจำลองทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT สนามความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนถูกจำลองด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon model จากการจำลองคอนทัวร์ของขนาดความเร็ว ความเร็วตามแนวแกน x และความเร็วตามแนวแกน y ที่  $H^*$  แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ





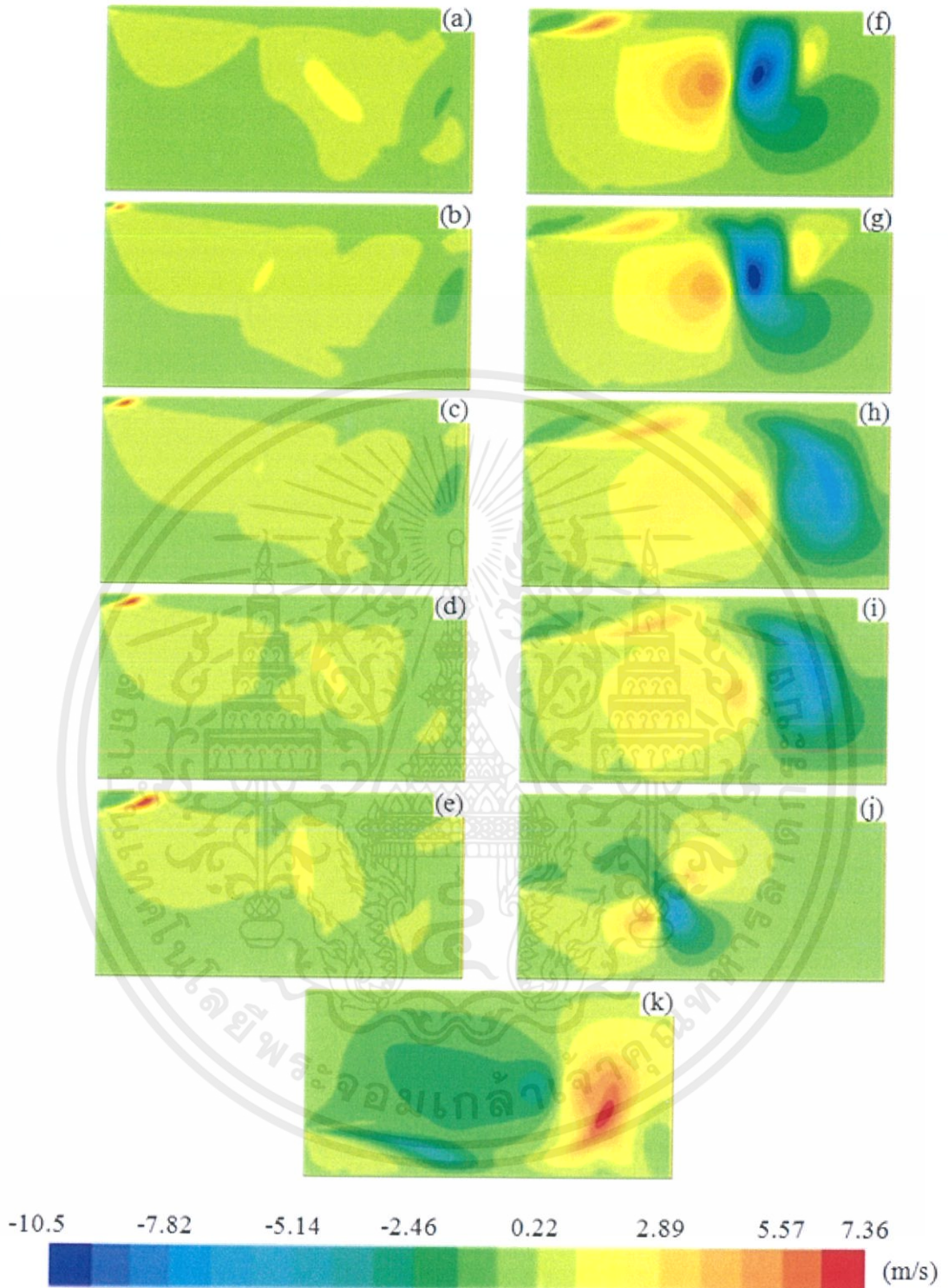
รูปที่ 4.5 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วที่  $H^*$  เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4

(e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18



รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ของความเร็วตามแนวแกน x ที่  $H^*$  เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4

(e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18

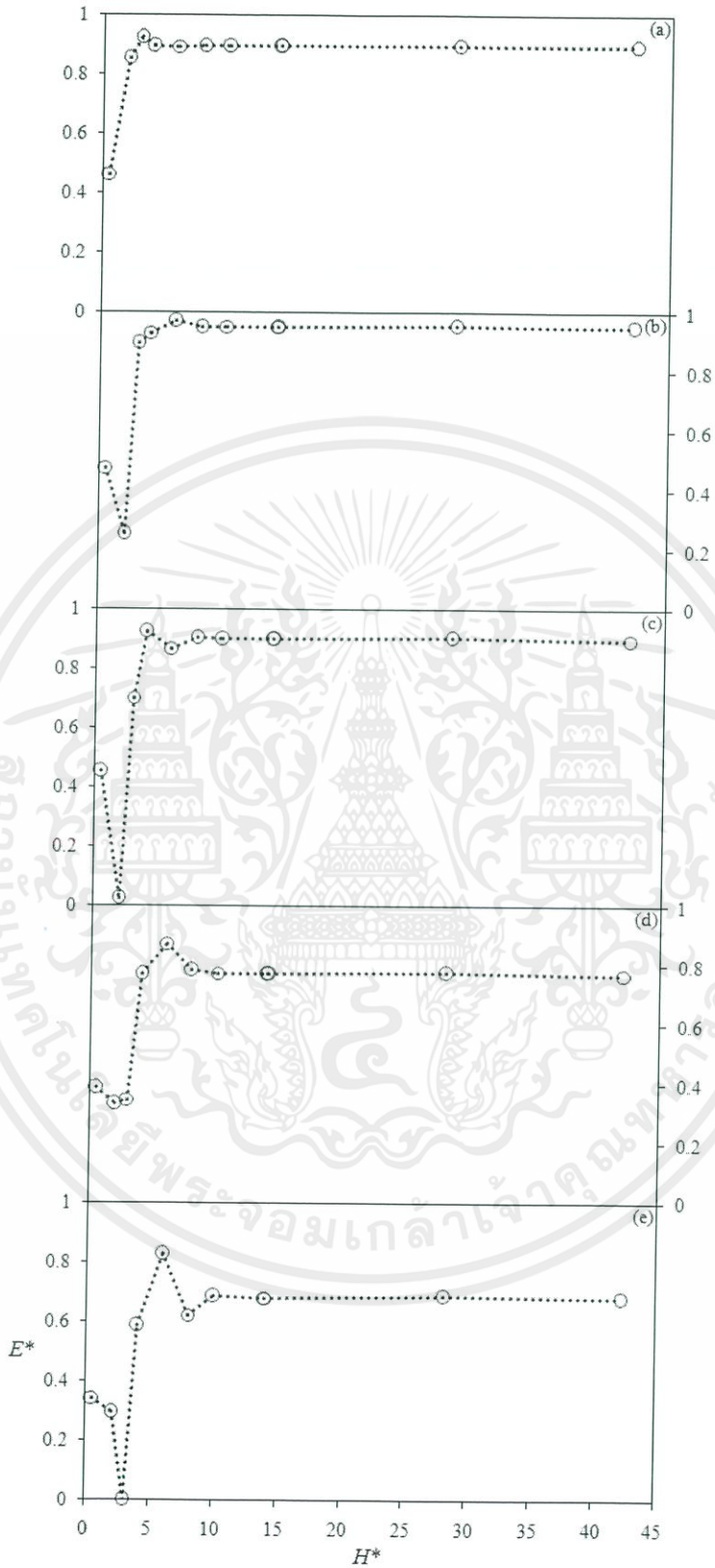


รูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของความเร็วตามแนวแกน  $y$  ที่  $H^*$  เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4

(e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18

ประสิทธิภาพการผลักดันน้ำที่เกิดจากวอเตอร์เจ็ทสามารถหาได้จากความเร็วเหนี่ยวนำที่เกิดจากเจ็ท (Entrainment velocity) หรือความเร็วแกน  $y$  ( $v$ ) จากการจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E^*$ ) และ  $H^*$  ที่ตำแหน่ง  $x^*$  ต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



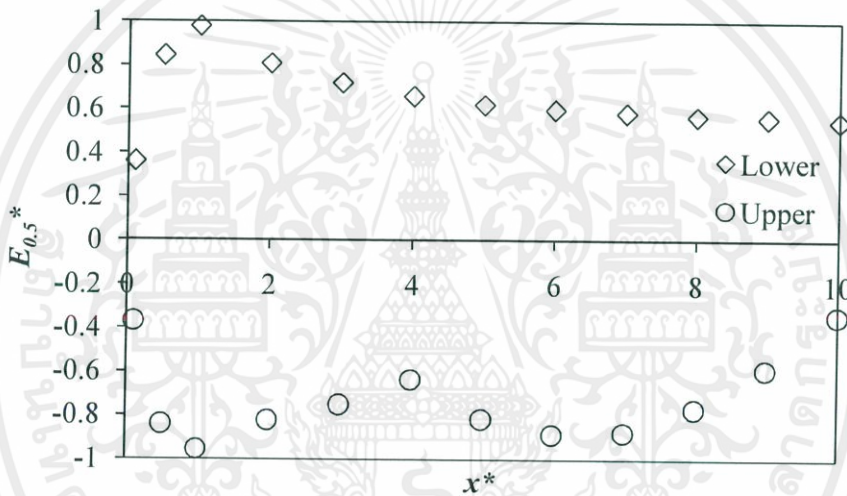


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E^*$  กับ  $H^*$  ที่ตำแหน่ง  $x^*$  เท่ากับ (a) 0.8 (b) 3 (c) 4 (d) 5 และ (e) 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 พบว่าที่  $H^*$  เท่ากับ 6 มี  $E^*$  สูงที่สุด ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ต ( $H^*$ ) เท่ากับ 6 จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลักดันน้ำ โดยประสิทธิภาพในการผลักดันน้ำที่บริเวณขอบเขตด้านบนและด้านล่าง ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E_{0.5}^*$ ) ของตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6 ที่ตำแหน่ง  $x^*$  แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E_{0.5}^*$ ) สามารถนิยามได้ดังนี้

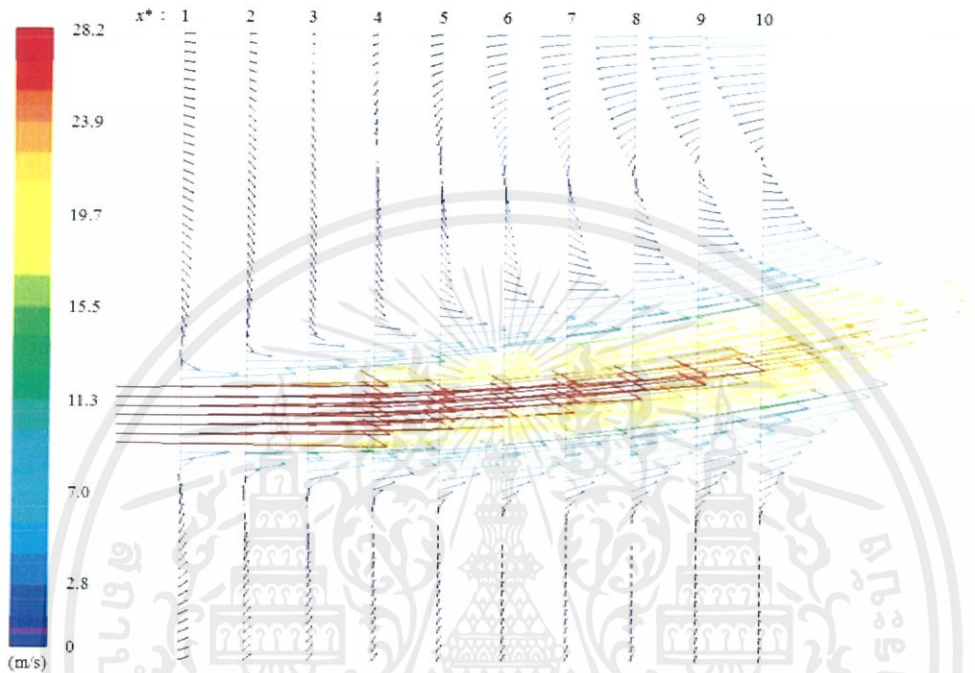
$$E_{0.5}^* = \frac{v_{positive}}{|v_{max}|} \quad \text{หรือ} \quad E_{0.5}^* = \frac{v_{negative}}{|v_{max}|} \tag{34}$$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{0.5}^*$  กับ  $x^*$  ที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6

เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.9 พบว่าตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E_{0.5}^*$ ) ที่ตำแหน่ง  $x^*$  ระหว่าง 5 ถึง 9 มีค่าเพิ่มขึ้นจากตำแหน่ง  $x^*$  เท่ากับ 4 เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวเกิดการหมุนวนเป็นสาเหตุทำให้ความเร็วเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้จากเวกเตอร์ของขนาดความเร็วในรูปที่ 4.10

จากการจำลองสามารถกล่าวได้ว่าตำแหน่งการตั้งวอเตอร์เจ็ทควรตั้งที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6 เพื่อให้มีประสิทธิภาพการผลักดันน้ำสูงสุด หรืออย่างน้อยตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทควรวางลึกกว่าตำแหน่งการใช้งานในปัจจุบัน



รูปที่ 4.10 เวกเตอร์ของขนาดความเร็วที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6 และ  $x^*$  เท่ากับ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลัดกันน้ำด้วยวอเตอร์เจ็ทด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่มีต่อประสิทธิภาพการผลัดกันน้ำ สภาพวะขอบเขตของงานวิจัยอ้างอิงข้อมูลจากกรมอุทกหารเรือ สมมติฐานของแบบจำลองในงานวิจัยประกอบไปด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้นกำหนดให้เป็นสองมิติของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (คำนวณเฉพาะน้ำเท่านั้น) การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและความเร็วของวอเตอร์เจ็ทมีค่าคงที่

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k$ -epsilon model ถูกใช้ในการคำนวณสนามการไหลและความปั่นป่วน จากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎี
- การวางตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ทให้มีประสิทธิภาพในการผลัดกันน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6

ดังนั้นกองทัพเรือ ไม่ควรวางตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ทไว้ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับผิวน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพในการผลัดกันน้ำไม่มากพอเมื่อเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป



รูปที่ 5.1 การวางวอเตอร์เจ็ทของกองทัพเรือในช่วงที่เกิดอุทกภัย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ทำการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลอง เพื่อยืนยันผลการจำลอง
- 5.2.2 สร้างแบบจำลองเป็นแบบสามมิติ เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ
- 5.2.3 ปรับปรุงการจำลองให้มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เช่น การจำลองแบบหลายเฟส การกำหนดค่าของความเร็วขาเข้าของวอเตอร์เจ็ท เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Vertsteeg, H. K. and Malalasekera, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.** Malaysia : Prentice Hall, Inc. 1995.
- [2] OH, H. W. **Computational Fluid Dynamics.** India : Tech. 2010.
- [3] Socolofsky, S. **Lecture note on Fluid Dynamics for Ocean and Environment Engineering.** TEXAS A&M UNIVERSITY. 2012.
- [4] ANSYS, Inc. **ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide.** 2009.
- [5] Crushman-Roisin, B. **ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS.** USA : Wiley. 2010.
- [6] Wang, X. and Tan, S. K. “Environmental fluid dynamics-jet flow” **9<sup>th</sup> International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2010).** October 11-15, 2010. pp. 962-967.
- [7] Gutmark, E. J. and Grinstein, F. F. “FLOW CONTROL WITH NONCIRCULAR JETS” **Annual Review of Fluid Mechanics.** no. 31. 1999. pp. 239-272.
- [8] Seok, J. K. and Il, W. S. “Reynolds number effects on the behavior of a non-buoyant round jet” **Experiments in Fluids.** no. 38. 2005. pp. 801-812.
- [9] ชลัมพ์ โสมาภา และสมัย ใจอินทร์. การพิจารณาระบบขับเคลื่อนเครื่องพ่นน้ำของ กองทัพเรือ. 2548. หน้า 1-7.

- [10] Li, C. W. and Zeng, C. “3D Numerical modeling of flow division at open channel junctions with or without vegetation” **Advances in Water Resources**. no. 32. 2009. pp. 49-60.
- [11] Gandhi, B. K., Verma, H. K. and Abraham, B. “INVESTIGATION OF FLOW PROFILE IN OPEN CHANNELS USING CFD” **IIT Roorkee**. October 21-23, 2010. pp. 243-251.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

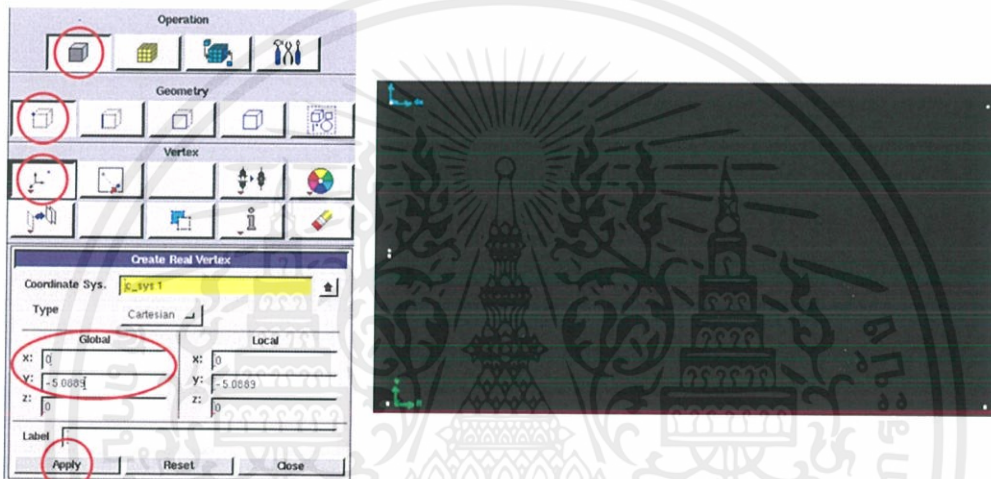
## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT

เลือกสร้างแบบจำลองที่วางเจ็ทอยู่ที่ตำแหน่ง 5 เมตร

1. เลือกคำสั่ง Operation → Geometry → Vertex → Create Real Vertex

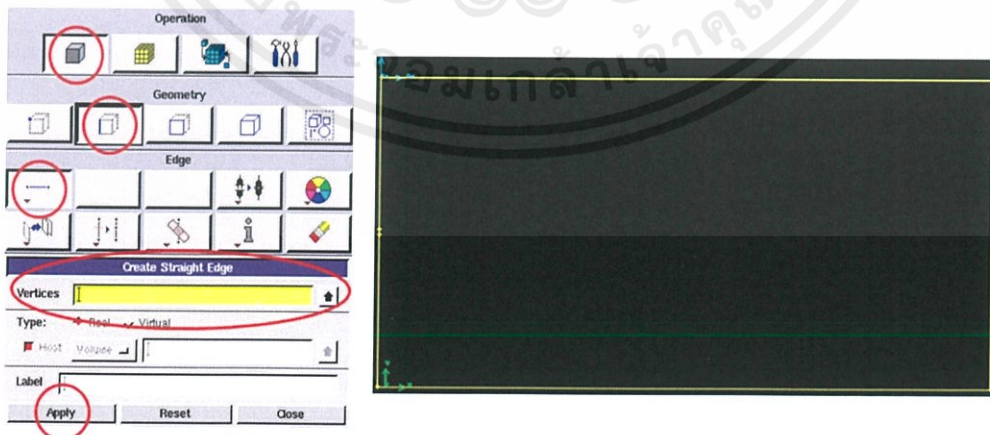
สร้างพิกัดที่คู่อันดับ (0,0) (20,0) (20,-10) (0,-10) (0,-4.9111) และ (0,-5.0889)



รูปที่ ก.1 วิธีสร้างจุด

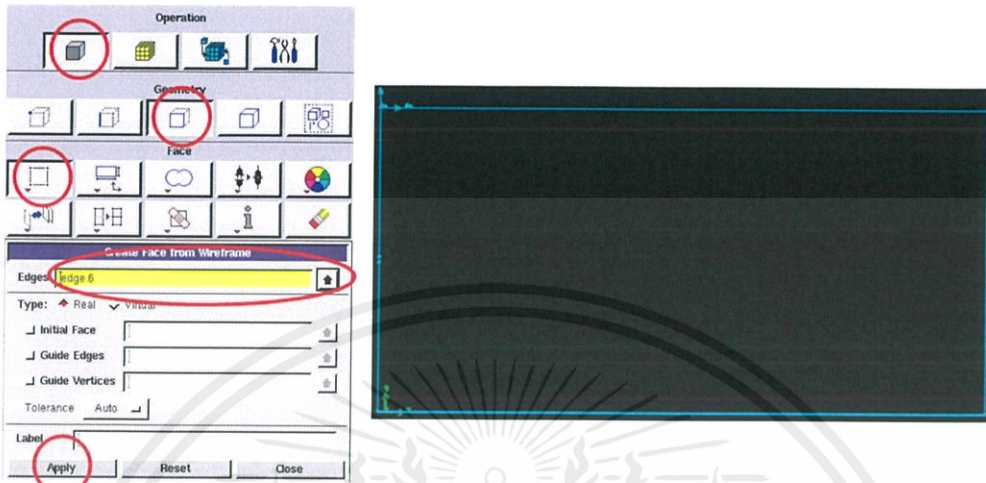
2. สร้างเส้นต่อ โดยเลือกคำสั่ง Operation → Geometry → Edge → Create

Straight Edge เลือก vertex.1 vertex.2 vertex.3 vertex.4 vertex.5 และ vertex.6 กด Apply



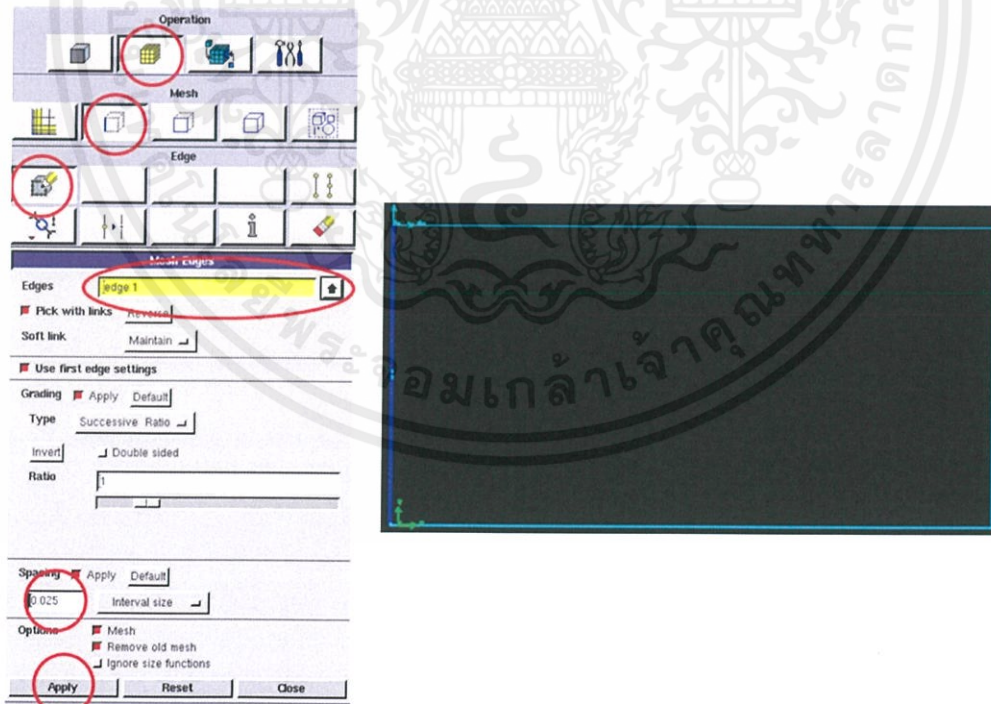
รูปที่ ก.2 วิธีสร้างเส้น

3. สร้างระนาบโดยเลือกคำสั่ง Operation → Geometry → Face → Create Face from Wireframe เลือก edge.1 edge.2 edge.3 edge.4 edge.5 และ edge.6 กด Apply



รูปที่ ก.3 วิธีสร้างระนาบ

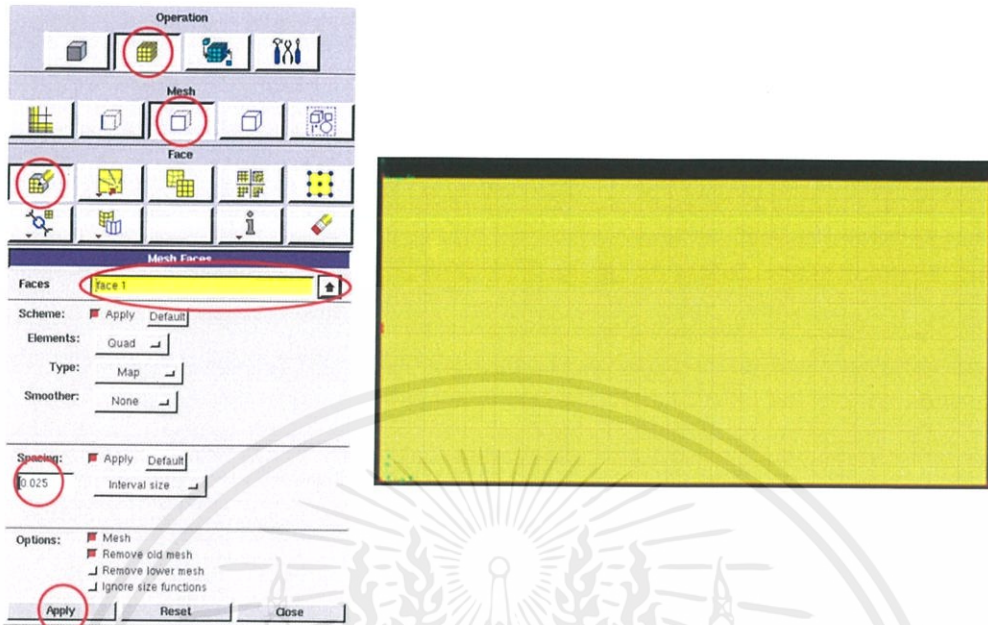
4. สร้างกริดขนาด 0.025 โดยเลือกคำสั่ง Operation → Mesh → Edge → Mesh Edges แล้วเลือก edge.1 edge.2 และ edge.3 กำหนด Spacing เป็น 0.025 กด Apply



รูปที่ ก.4 วิธีสร้างกริดที่เส้น

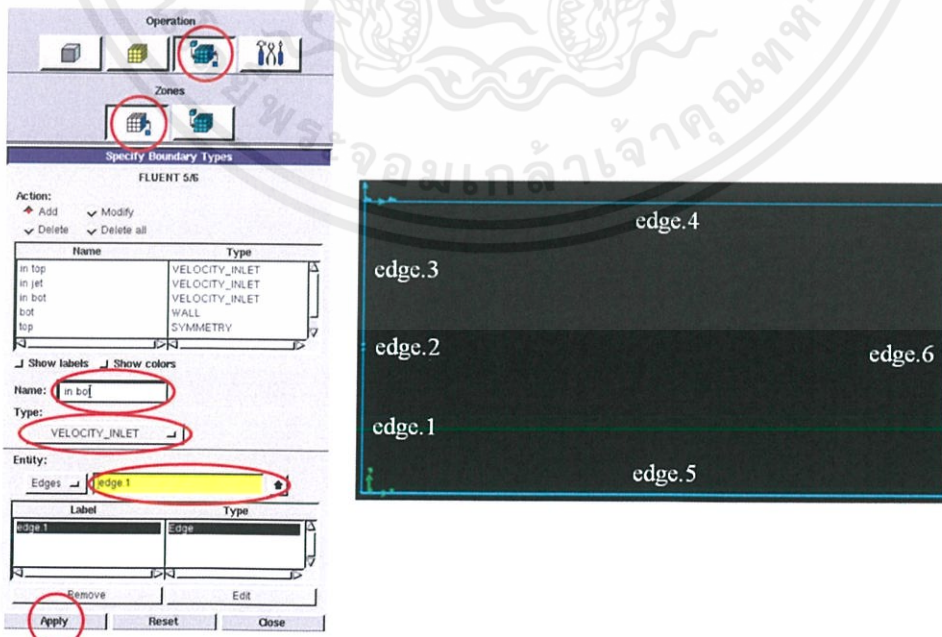
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือกคำสั่ง Operation → Mesh → Face → Mesh Face แล้วเลือก face.1



รูปที่ ก.5 วิธีสร้างกริดที่ระนาบ

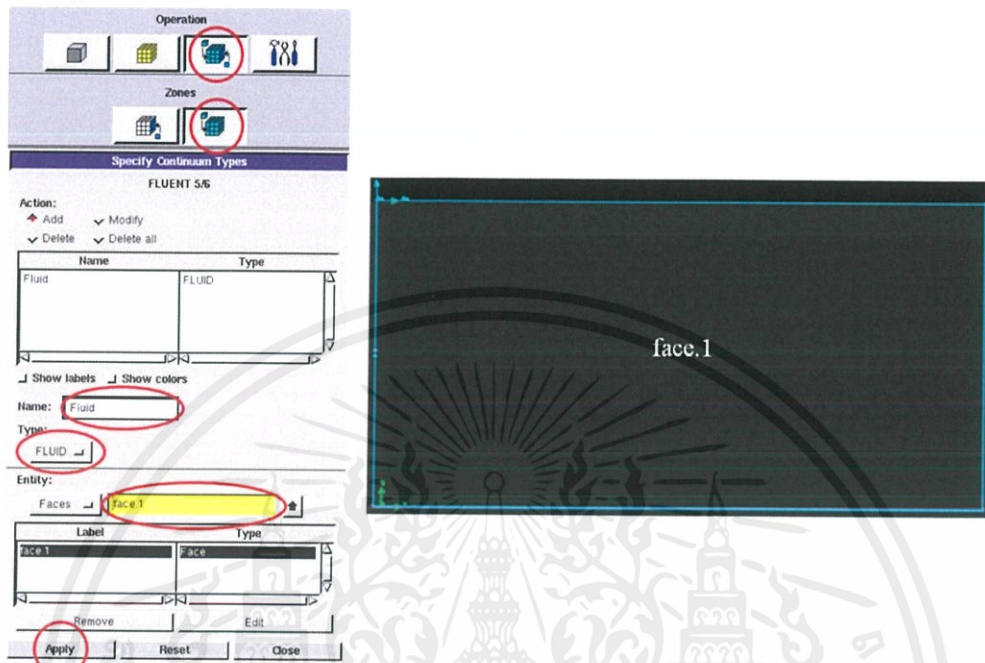
6. กำหนดสภาวะขอบเขต โดยเลือกใช้คำสั่ง Operation → Zones → Specify Boundary Types ให้ edge.1 edge.2 และ edge.3 กำหนดสภาวะขอบเขตเป็น velocity inlet ทั้งหมด และตั้งชื่อให้เป็น in bot in jet และ in top ตามลำดับ edge.4 กำหนดสภาวะขอบเขตเป็น symmetry ตั้งชื่อเป็น top edge.5 กำหนดสภาวะขอบเขตเป็น wall ตั้งชื่อเป็น bot และ edge.6 กำหนดสภาวะขอบเขตเป็น pressure outlet ตั้งชื่อเป็น out



รูปที่ ก.6 วิธีกำหนดสภาวะขอบเขต

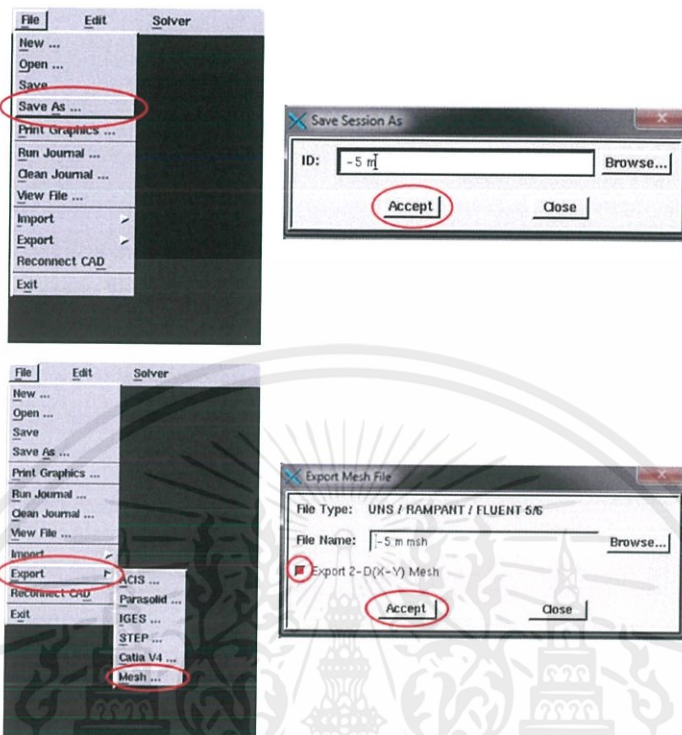
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. กำหนด Specify Continuum Types โดยเลือกคำสั่ง Operation → Zone → Specify Continuum Types เลือก face.1 กำหนดให้เป็น Fluid



รูปที่ ก.7 วิธีกำหนด Specify Continuum Types

## 8. ทำการบันทึกงานและส่งออกกริดเพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม FLUENT

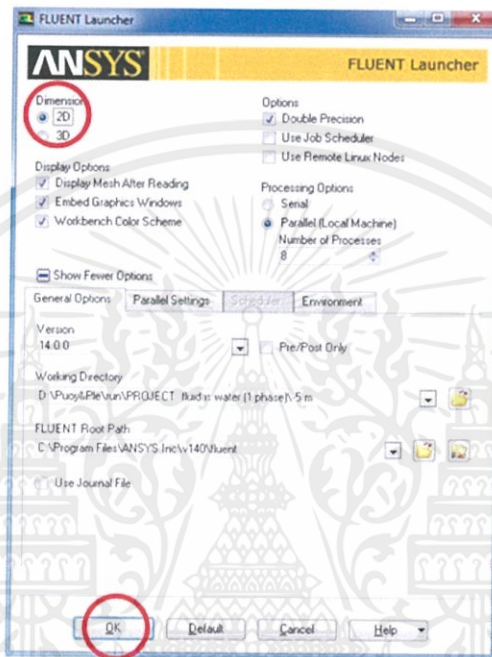


รูปที่ ก.8 วิธีบันทึกงานและส่งออกกริด

## ภาคผนวก ข

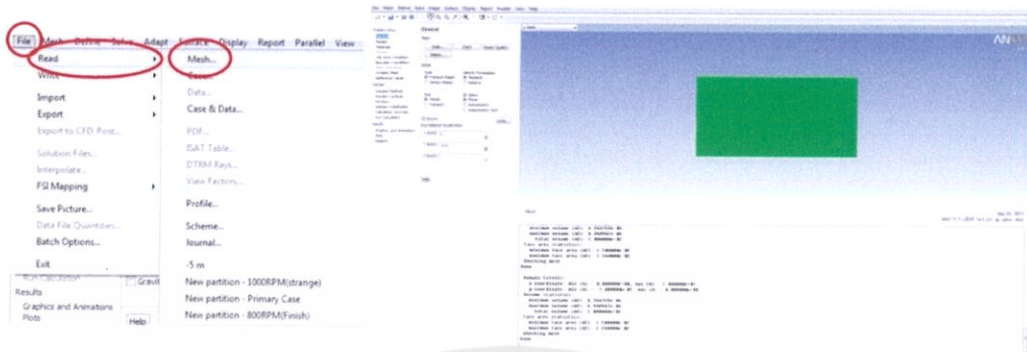
## ตัวอย่างการใช้โปรแกรม FLUENT

1. เปิดโปรแกรม FLUENT เลือก Dimension เป็น 2D แล้วกด OK



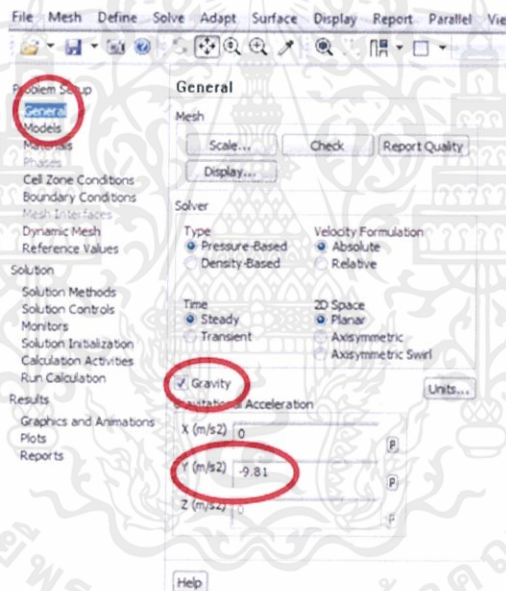
รูปที่ ข.1 หน้าต่างของโปรแกรม FLUENT

2. เลือก Mesh ที่ต้องการจะทำการคำนวณ โดยใช้คำสั่ง File → Read → Mesh



รูปที่ ข.2 การเลือก Mesh ที่ใช้ในการคำนวณและหน้าจอแสดงผลของ โปรแกรม FLUENT

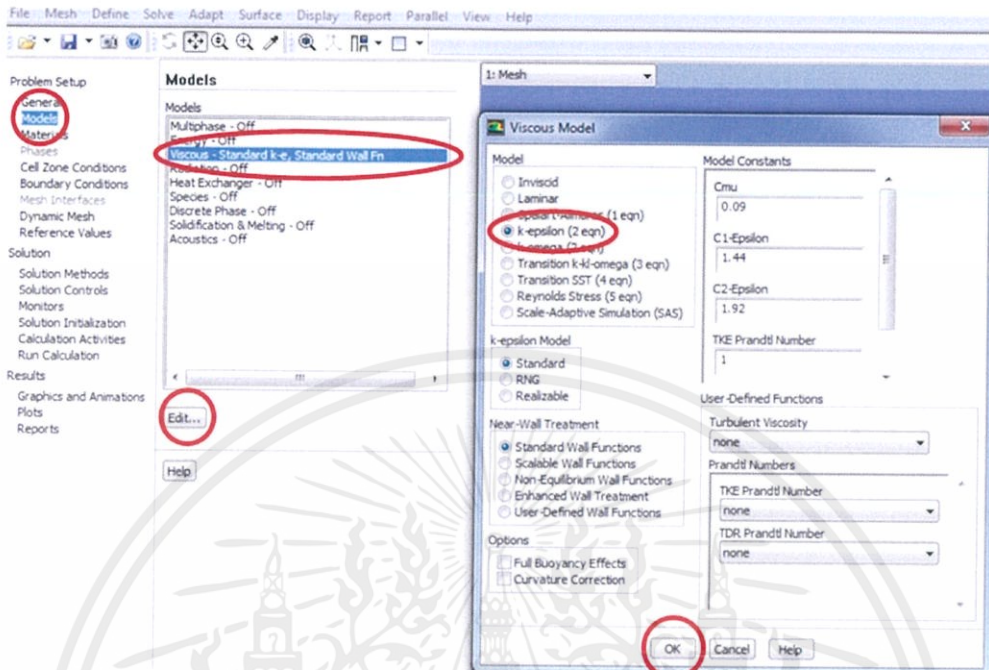
3. เลือก General → Gravity ใส่ค่า -9.81 ในแกน y



รูปที่ ข.3 การตั้งค่า General

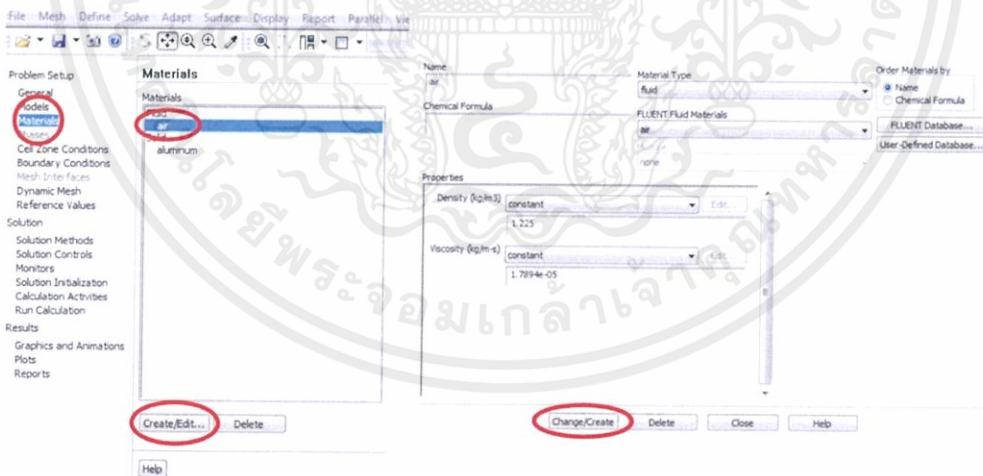
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เลือก Models → Viscous → Edit → k-epsilon (2 eqn) → OK



รูปที่ ข.4 การตั้งค่า Models

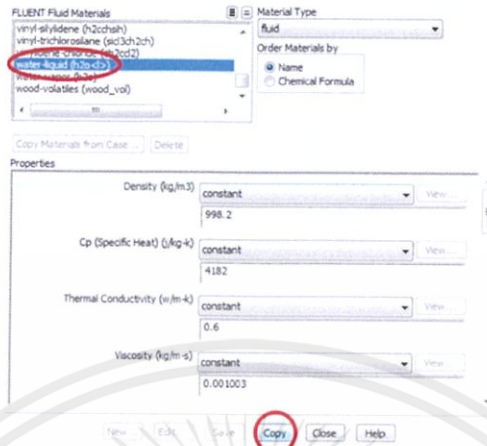
5. เลือก Materials → air → Create/Edit → FLUENT Database



รูปที่ ข.5 การตั้งค่า Materials และขั้นตอนการเพิ่ม Materials

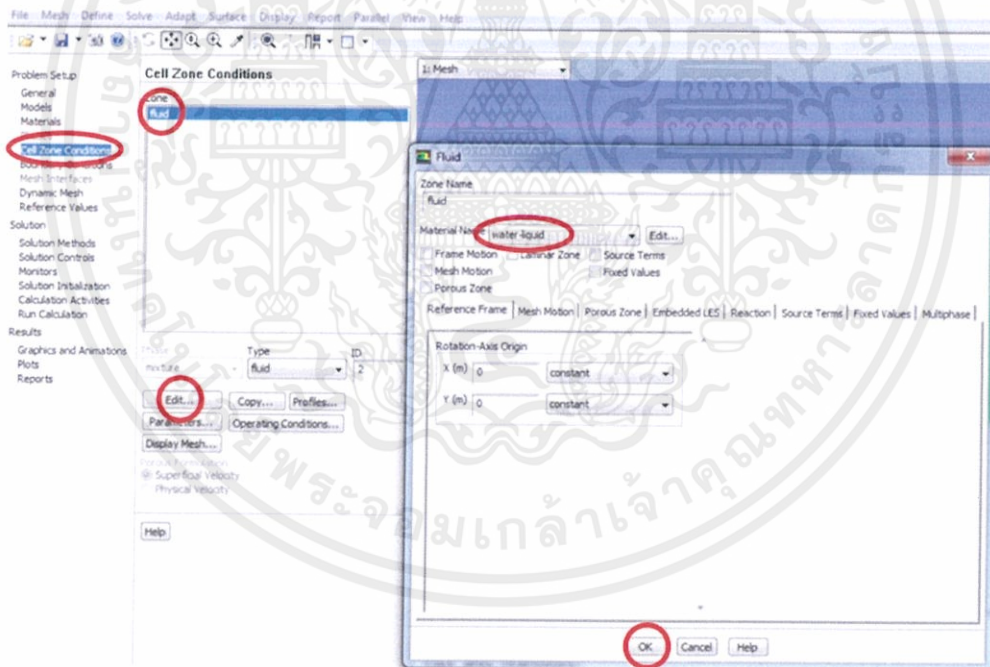
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เลือก water-liquid (h<sub>2</sub>O<l>) กด Copy กด Close



รูปที่ ข.6 การเพิ่มน้ำเข้าไปใน Materials

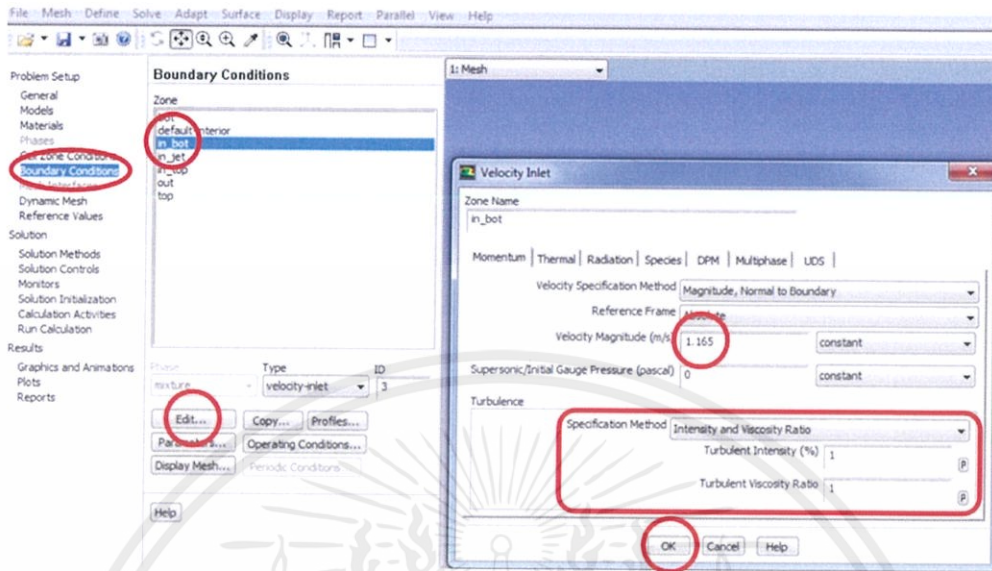
7. เลือก Cell Zone Conditions → fluid → Edit เปลี่ยน Material Name ให้เป็น water-liquid



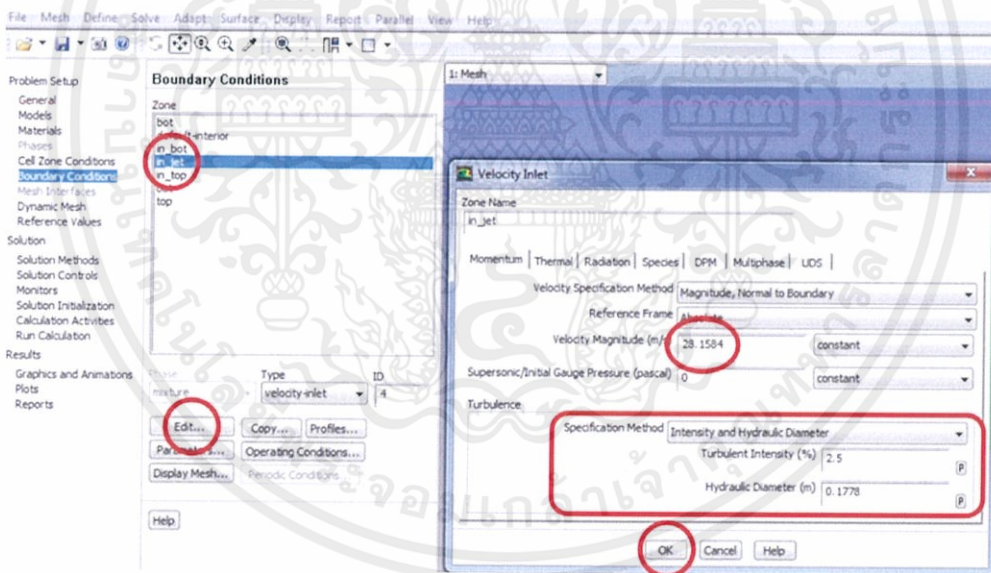
รูปที่ ข.7 การตั้งค่า Cell Zone Conditions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

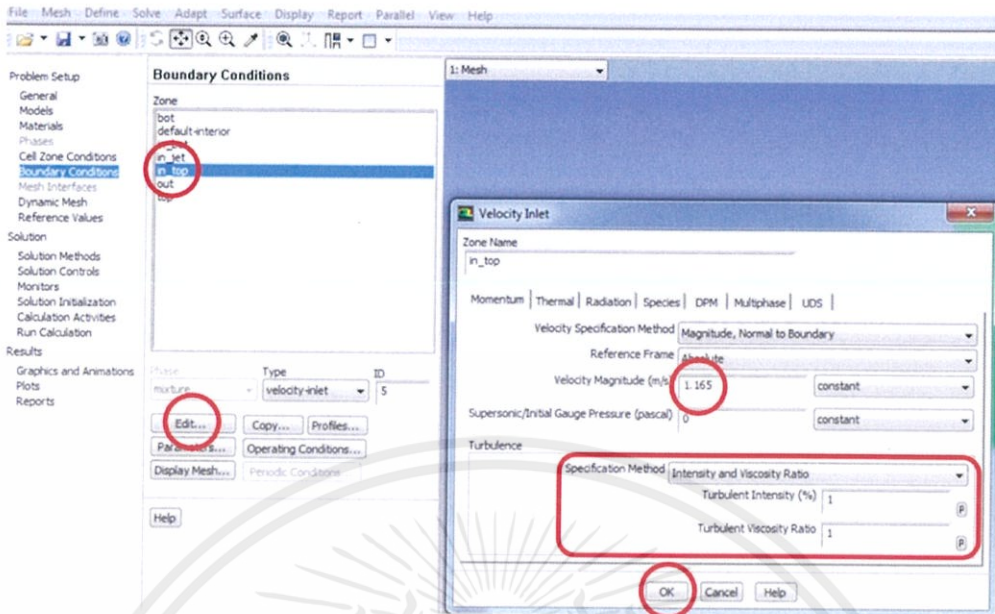
## 8. เลือก Boundary Conditions แล้วตั้งค่าตามรูป



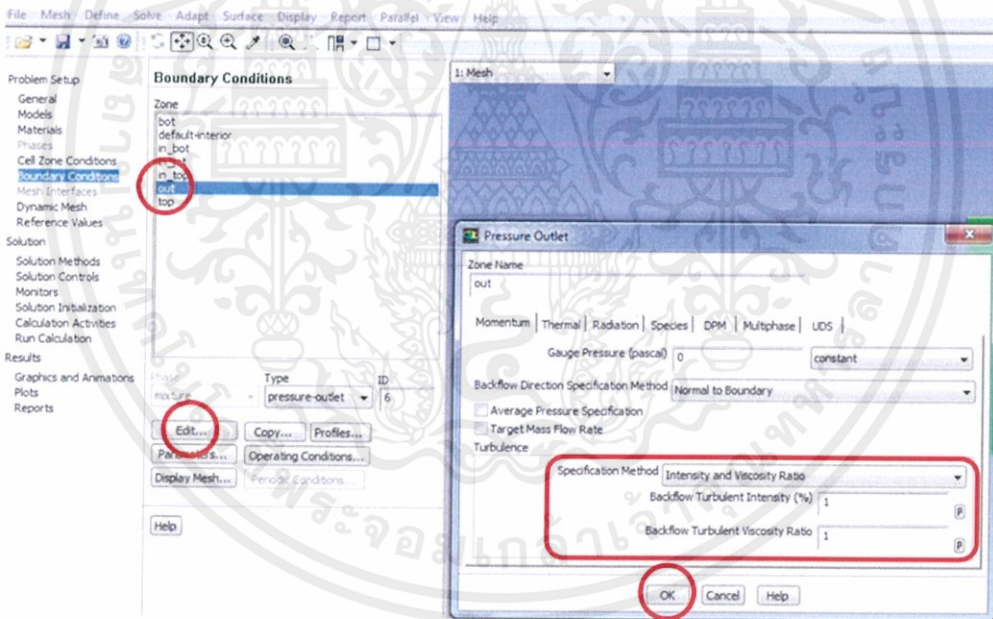
รูปที่ ข.8 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in\_bot



รูปที่ ข.9 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in\_jet

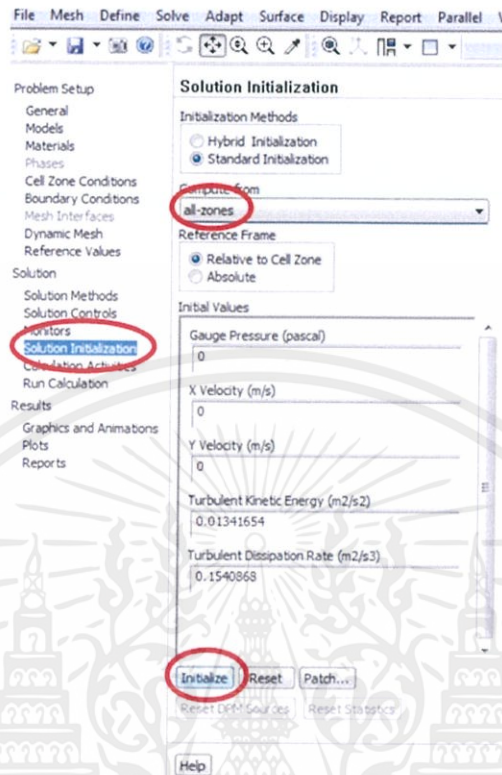


รูปที่ ข.10 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน in\_top



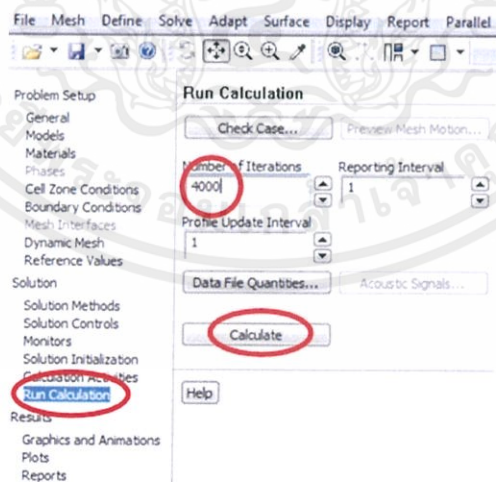
รูปที่ ข.11 การตั้งค่า Boundary Conditions ของด้าน out

9. เลือก Solution Initialization → all-zone → Initialize



รูปที่ ข.12 การตั้ง Solution Initialization

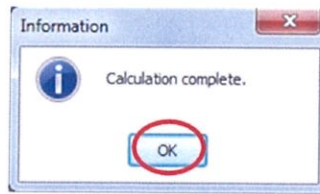
10. เลือก Run Calculation โดยกำหนดให้ Number of Iterations เป็น 4,000 แล้วกด Calculate



รูปที่ ข.13 การตั้งค่า Run Calculation

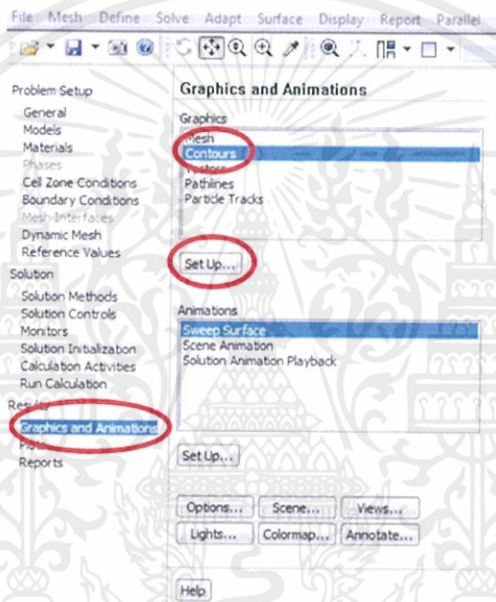
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว จะขึ้นหน้าต่างนี้มา กด OK

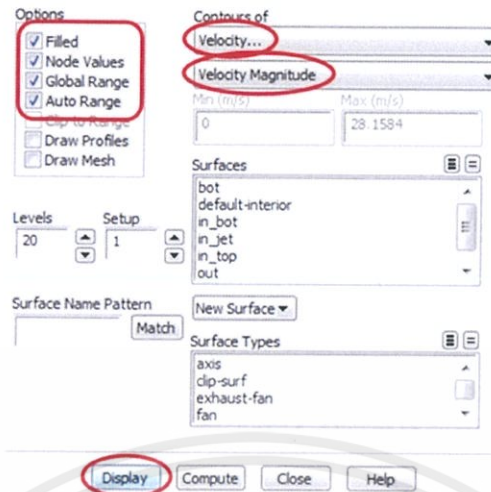


รูปที่ ข.14 หน้าต่างที่ขึ้นเมื่อทำการคำนวณเสร็จ

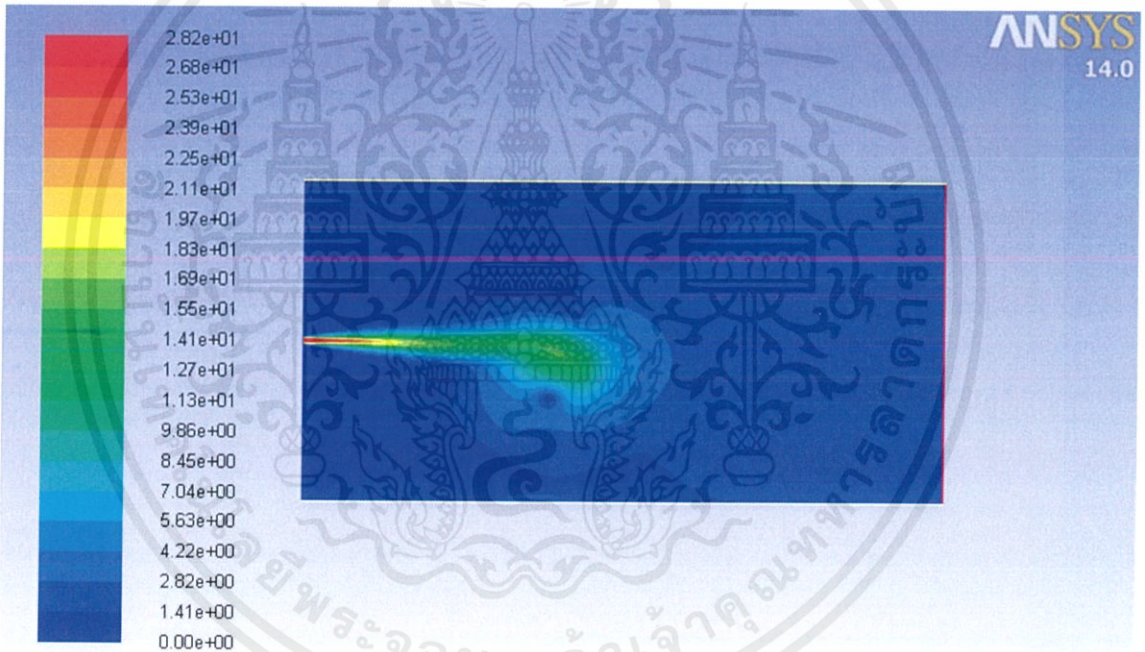
11. เลือก Graphics and Animations → Contours → Set Up แล้วตั้งค่าตามรูปที่ ข.15



รูปที่ ข.15 ขั้นตอนการดูผลการจำลองซึ่งเปิดอยู่ในรูปของคอนทัวร์



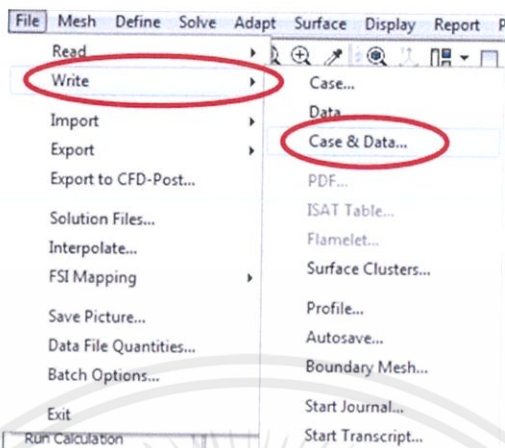
รูปที่ ข.16 รายละเอียดการเรียกดูผลในรูปคอนทัวร์



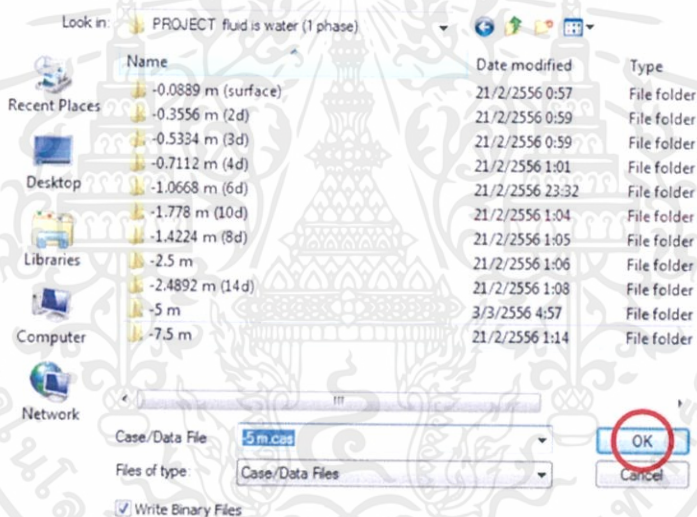
รูปที่ ข.17 ผลการจำลองในรูปของคอนทัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 12. เลือก Write → Case &amp; Data



รูปที่ ข.18 ขั้นตอนการบันทึกงาน



รูปที่ ข.19 การบันทึกงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้