



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของวอเตอร์เจ็ท

ในการผลักดันน้ำตามแนวพระราชดำริ

CFD Investigation of Water Jet Propulsion under the Royal  
Development Project initiated by His Majesty the King

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ **รายได้** ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของวอเตอร์เจ็ท  
ในการผลักดันน้ำตามแนวพระราชดำริ

CFD Investigation of Water Jet Propulsion under the Royal  
Development Project initiated by His Majesty the King

ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

12833368

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)** การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบของวอเตอร์เจ็ทในการผลักดันน้ำตามแนวพระราชดำริ

แหล่งเงิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

**หัวหน้าโครงการวิจัย**

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) สันติ วัฒนานุสรณ์

ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 166

โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4

E-mail santi\_wattananusorn@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

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

**คำสำคัญ :** วอเตอร์เจ็ท, CFD, การผลักดันน้ำ

**Research Title:** CFD Investigation of Water Jet Propulsion under the Royal Development  
Project initiated by His Majesty the King

**Researcher:** Dr.Santi Wattananusorn

**Faculty:** Engineering **Department:** Chemical Engineering

## ABSTRACT

In this project, the effects 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.

**Keywords :** water jet, CFD, water jet propulsion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556 จำนวนเงิน 80,000 บาท  
จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สันติ วัฒนานุสรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	v
สารบัญรูป.....	vi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	3
2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	4
2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล.....	6
2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon.....	7
2.5 เจ็ท (Jet).....	13
2.6 การทำงานของเรือผลักดันน้ำ.....	16
2.7 วรรณกรรมปริทัศน์.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	25
4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	25
4.2 อิทธิพลของตำแหน่งวอเตอร์เจ็ทที่ส่งผลต่อการผลักดันน้ำ.....	28
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข.....	35
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ประวัตินักวิจัย.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ของแบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon.....	12
2.2 แหล่งกำเนิดลักษณะการไหลของของไหลแบบต่างๆ.....	13
2.2 คุณสมบัติของวอเตอร์เจ็ต.....	17
3.1 สภาวะขอบเขต.....	21
3.2 การตั้งค่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน.....	8
2.2 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท.....	14
2.3 แผนภาพของ Round jet.....	15
2.4 เครื่องพ่นน้ำ.....	16
3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT .....	20
3.2 การกำหนดสถานะขอบเขตของแบบจำลอง.....	21
3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี.....	23
3.4 ลักษณะการวางวอเตอร์เจ็ท.....	24
4.1 คอนทัวร์ของ (a) ขนาดความเร็ว (b) ความเร็วแกน x และ (c) ความเร็วแกน y ที่ $H^* = 28.12$ ....	26
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 28.12 .....	26
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758 .....	27
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนียวนำ ( $E^*$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน x ( $x^*$ ) ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 4,987,576 และ 498,758 .....	28
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 .....	29
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 .....	30
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 .....	31
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E^*$ กับ $H^*$ ที่ตำแหน่ง $x^*$ เท่ากับ (a) 0.8 (b) 3 (c) 4 (d) 5 และ (e) 6 .....	32
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_{0.5}^*$ กับ $x^*$ ที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 6 .....	33
4.10 เวกเตอร์ของขนาดความเร็วที่ตำแหน่ง $H^*$ เท่ากับ 6 และ $x^*$ เท่ากับ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 ตามลำดับ .....	34
5.1 การวางวอเตอร์เจ็ทของกองทัพเรือในช่วงที่เกิดอุทกภัย .....	35

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผลของโครงการวิจัย

มหาอุทกภัยในปี พ.ศ. 2554 สร้างความเสียหายแก่ประเทศชาติและสร้างความเดือดร้อนต่อประชาชนในด้านทรัพย์สินและจิตใจ ไม่ว่าจะสาเหตุของการเกิดมหาอุทกภัยในครั้งนี้จะมาจากภัยพิบัติทางธรรมชาติหรือจากการบริหารงานที่ผิดพลาดในการจัดการน้ำ แต่สุดท้ายการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าเป็นสิ่งจำเป็นที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ปัญหาที่พบอย่างหนึ่งก็คือ ความล่าช้าของการระบายน้ำจากแม่น้ำออกสู่ทะเล ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำจำนวนมาก น้ำทะเลหนุนสูง แม่น้ำ คู คลองมีขนาดเล็กและตื้นเขิน ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำออกสู่ทะเลได้ในปริมาณที่มากเพียงพอ ส่งผลให้น้ำสะสมอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มบ้านเรือน ที่นา นิคมอุตสาหกรรม ฯลฯ เป็นเวลานาน แม้ว่าหน่วยงานราชการและภาคเอกชนได้น้อมนำวิธีการแก้ปัญหาตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยการดัดแปลงหน่วยขับเคลื่อนของเรือยนต์ให้กลายเป็นวอเตอร์เจ็ท (Water Jet) เพื่อใช้ผลักดันน้ำ แต่ดูเหมือนว่าประสิทธิภาพของการเร่งระบายน้ำจะไม่มากพอเมื่อเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป จึงไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการช่วยผลักดันน้ำนอกเหนือไปจากการไหลออกสู่ทะเลตามธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงถูกคิดค้นเพื่อหาวิธีการใช้วอเตอร์เจ็ทให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (หรือสูงกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน) โดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของไหล

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการระบายน้ำออกจากแม่น้ำเจ้าพระยาให้ไหลลงสู่อ่าวไทยให้เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยบรรเทาทุกข์ของประชาชนที่ได้รับความเดือดร้อนจากอุทกภัย

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาการไหลของเจ็ทแบบปั่นป่วน (Turbulent Jet) ในระบบที่เป็นช่องเปิดสู่บรรยากาศ (Open Channel) เพื่อหาดำแหน่งที่เหมาะสมของหัวฉีด (Nozzle) ในการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาวะเอนเทรนเมนต์ (Entrainment) สูงสุด

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง : เป็นการจำลองสภาวะการไหลของวอเตอร์เจ็ทด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เพื่อแสดงค่าสนามความเร็วที่สภาวะการใช้งานในปัจจุบัน โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองของกองเรือยุทธการ และใช้ข้อมูลสนับสนุนในส่วนของกำลังเครื่องยนต์จากกรมอุทกทหารเรือ (กองทัพเรือ)

1.4.2 การทำนายของแบบจำลอง : เป็นการจำลองการผลึกตันน้ำที่สภาวะอื่นๆที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อการผลึกตันน้ำด้วยวอเตอร์เจ็ท ในขั้นตอนนี้จะทำการพัฒนาประสิทธิภาพโดยหาตำแหน่งของหัวฉีดที่เกิดเอนเทรนเมนต์สูงขึ้น โดยอาศัยข้อมูลความเร็วของน้ำจากกรมชลประทาน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) พร้อมด้วยความลึกของภูมิประเทศจากกรมเจ้าท่า (กระทรวงคมนาคม)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำองค์ความรู้ที่ได้ไปช่วยแก้ปัญหาการผลึกตันน้ำตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว พร้อมจัดทำแผนภูมิเชื่อมโยงตัวแปรที่มีผลกระทบ เช่น อัตราการไหลของน้ำ ความลึกของแม่น้ำ กับตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นสาขาหนึ่งในวิชากลศาสตร์ของไหล ที่นำกระบวนการเชิงตัวเลขและระเบียบวิธีมาใช้แก้และวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน CFD สามารถแสดงกราฟ คอนทัวร์ เวกเตอร์ของปริมาณต่างๆที่ผู้วิจัยสนใจ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหล รวมทั้ง CFD มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำและสามารถผลิตข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ CFD เป็นที่ยอมรับในงานด้านวิศวกรรมและด้านต่างๆ เช่น

- ทางด้านวิศวกรรมกระบวนการทางเคมี เช่น การผสม การแยกสาร และการขึ้นรูปของพอลิเมอร์
- ทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์และแผงวงจรไฟฟ้า
- ทางด้านอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบินและยานพาหนะ เช่น แรงยกและแรงต้าน
- พลศาสตร์ของน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆเรือ
- สิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกของอาคาร เช่น แรงของลมที่กระทำกับอาคารและการระบายอากาศ
- ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลภาวะและการไหลออก
- ทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น การไหลในหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ
- ทางด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น การพยากรณ์อากาศ
- ทางด้านอุทกวิทยาและชลศาสตร์ เช่น การไหลในแม่น้ำ ปากน้ำ และมหาสมุทร

ข้อดีของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถศึกษาระบบที่มีสภาวะความเสี่ยงสูงหรือศึกษาระบบที่มีข้อจำกัดมาก
- สามารถลดระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายของการออกแบบ พัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ได้
- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการทดลอง และอุปกรณ์อื่นๆได้ง่าย
- สามารถเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในอุปกรณ์ซึ่งเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การทำงานของโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

หลักการทำงานของ CFD สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ Pre-processor Solver ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ทำการคำนวณและแก้ปัญหา โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ Finite Difference Method Finite Element Method และ Finite Volume Method และส่วนสุดท้ายคือ Post-processor

### 2.2.1 Pre-processor

Pre-processor ในขั้นตอนนี้เป็นส่วนที่ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาการไหลของของไหลให้กับโปรแกรมคำนวณ ขั้นตอนนี้เป็นการนิยามรูปร่างขอบเขตของปัญหาที่เราสนใจ มีการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่ต้องการคำนวณโดยการสร้างกริด (Grid หรือ Mesh) ซึ่งเป็นการแบ่งขอบเขตปัญหาเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกแบบจำลองเพื่อนำมาแก้ปัญหาปรากฏการณ์ที่เราสนใจ รวมถึงการกำหนดสภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา จากการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลลัพธ์หรือคำตอบที่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของกริด จำนวนกริดยิ่งมากคำตอบที่ได้ยิ่งมีความแม่นยำ กริดที่ตื้นนั้นจะมีการแบ่งอย่างสม่ำเสมอ มีความละเอียดในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบเป็นอย่างมาก

### 2.2.2 Solver

Solver เป็นขั้นตอนการคำนวณและแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหล โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขมีอยู่ 3 วิธี คือ Finite Difference Method Finite Element Method และ Finite Volume Method ขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้ ประมาณค่าตัวแปรการไหลที่ไม่รู้ค่าด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย และแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของโหนด (Discretisation) ซึ่งจะแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมและจัดรูปให้เป็นสมการคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงเป็นการหาคำตอบของสมการพีชคณิต (Algebraic equations) จากการคำนวณเชิงตัวเลข 3 วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความแตกต่างกันตรงที่วิธีการประมาณค่าตัวแปร และขั้นตอนการแปลงรูปให้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่โหนด

#### 2.2.2.1 วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ โดยขั้นตอนในเทคนิคนี้คือแปลงรูปสมการอนุพันธ์ของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าจากปัญหาของปรากฏการณ์การไหล โดยพิจารณาตัวแปรที่ตำแหน่งกริดและอาศัยการกระจายฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) ซึ่งจะทำการตัดพจน์อันดับสูงออกทำให้ได้สมการพีชคณิตของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในแต่ละกริดออกมาเพื่อประมาณค่าผลเฉลย

#### 2.2.2.2 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือที่เรียกว่า FEM คือเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อมกับสมการปริพันธ์ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ เขียนเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้คำนวณแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น คำนวณหาความแข็งแรงของวัสดุหรือ ชิ้นส่วนเครื่องกล ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน ในชิ้นส่วนเครื่องกล รูปแบบ การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากทั้งการกำจัด สมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาที่อยู่ในสถานะคงที่) หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้ กลายเป็นระบบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐาน ทางคณิตศาสตร์เช่น Euler method Runge–Kutta methods ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น

ปัญหาพื้นฐานคือการสร้างสมการที่สามารถประมาณค่าสมการที่กำลังสนใจศึกษาแต่มี ความแน่นอนทางตัวเลข ซึ่งหมายความว่าความคลาดเคลื่อนในข้อมูลนำเข้า (Input) และการคำนวณ ระหว่างกลางจะไม่ถูกรวมเข้าไป และส่งผลให้ข้อมูลส่งออก (Output) ไร้ความหมาย ซึ่งวิธีการนั้นมีหลาย วิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่ต่างกันอย่างออกไป วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหา สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน (Complex Domains) เมื่อขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลงหรือ เมื่อผลที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงตลอดขอบเขต หรือเมื่อผลลัพธ์ไม่มีความราบเรียบ

### 2.2.2.3 วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องเป็นระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย สมการควบคุม (Governing Equation) จะถูกแก้โดยพิจารณาให้ เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete Control Volumes) และอาศัยการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ปริมาณ ที่มีการอนุรักษ์

### 2.2.3 Post-processor

Post-processor เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณที่ได้จำลองออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น เวกเตอร์ รูปร่างขอบเขตของปัญหาและแสดงกริด คอนทัวร์และเส้น พื้นผิว 2 มิติและ 3 มิติ การ ติดตามอนุภาค เป็นต้น จะเห็นได้ว่าพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการทำกราฟฟิคมาก และได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมากจึงได้รับความนิยมในการแก้ไขปัญหาคาร์ไหลโดยใช้เทคนิคนี้

## 2.3 สมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การไหล

### 2.3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

สมการควบคุมจะใช้กฎทางฟิสิกส์ 3 ข้อ ซึ่งประกอบไปด้วย กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎการ อนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) โดยจะเขียนสมการควบคุมได้ดังนี้

#### 2.3.1.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่น (Density)  
 $t$  คือ เวลา (Time)  
 $\vec{u}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector)

ซึ่งสมการที่ (2-1) เป็นสมการทั่วไปของของไหล สำหรับกรณีที่ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ สมการที่ (2-1) จะลดรูปได้ดังนี้

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

### 2.3.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่าแรงเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม ดังนั้นสมการโมเมนตัมแสดงได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2-3)$$

โดย  $p$  คือ ความดัน (Pressure)  
 $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (Shear Stress)  
 $S_M$  คือ แหล่งโมเมนตัมอื่นๆ (Momentum Source Terms)

### 2.3.1.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการนี้ นำมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวไว้ว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างหรือทำให้พลังงานสูญหายได้

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u} E) + \nabla \cdot (\vec{u} \cdot \tau) + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (2-4)$$

โดย  $E$  คือ พลังงานจำเพาะของของไหล  
 $k$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  
 $T$  คือ อุณหภูมิ  
 $S_E$  คือ แหล่งพลังงานอื่นๆ (Energy Source Terms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

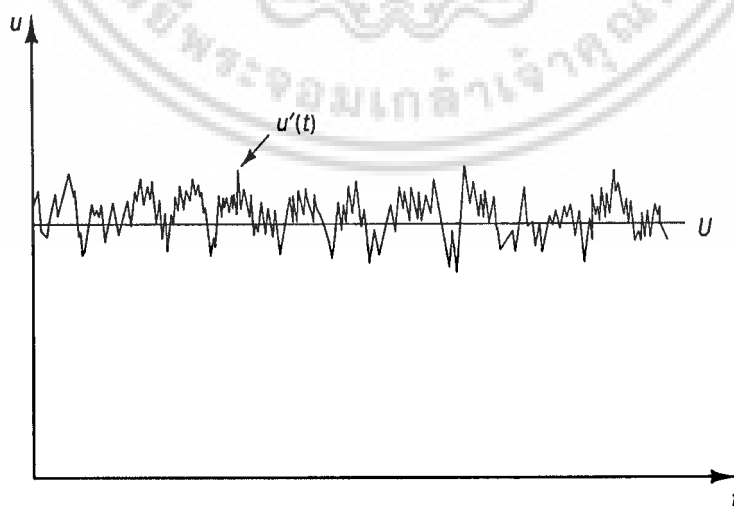
## 2.4 ความปั่นป่วนและแบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon [2]

รูปแบบการไหลของของไหลประกอบด้วย การไหลแบบราบเรียบ (Laminar) การไหลแบบทรานซิชัน (Transition) การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) สามารถวิเคราะห์ได้โดยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number:  $Re$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อย (Inertia Force) และแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force) จากการทดลองการไหลพบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds Number:  $Re_{crit}$ ) การไหลจะราบเรียบ และที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงกว่าตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตจะเกิดความซับซ้อนซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการไหล ที่สภาวะสุดท้ายพฤติกรรมของการไหลจะเป็นแบบสุ่ม (Random) และปั่นป่วนวุ่นวาย ถึงแม้ว่ากำหนดให้สภาวะขอบเขตคงที่ และเรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

### 2.4.1 ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Characteristics of the Turbulent Flow)

การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สภาวะไม่คงตัวสูง (Highly Unsteady): การไหลมีสภาวะไม่คงตัวสูง ความเร็วเป็นฟังก์ชันกับเวลาและรูปแบบของการวัดความเร็ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1
- มีความไม่ปกติ (Irregularity): การไหลมีความผิดปกติ ไม่สม่ำเสมอ เป็นลักษณะการไหลที่ทำให้การหาค่าตอบแบบแม่นยำเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางสถิติ (Statistical)
- การแพร่ (Diffusivity): การไหลมีการแพร่กระจาย ถ้ารูปแบบการไหลมีลักษณะสุ่ม (Random) แต่ไม่แสดงการกระจายตัวของการแกว่งไปมาของความเร็วที่รอบๆ ของไหล การไหลนี้จะไม่เรียกเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วนนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดการผสมกันอย่างรวดเร็วและเพิ่มอัตราการถ่ายโอนของโมเมนตัม ความร้อน และมวล



รูปที่ 2.1 ความเร็วที่ตำแหน่งที่สนใจของการไหลแบบปั่นป่วน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 ซึ่งคุณสมบัติการไหลฉับพลัน  $\varphi$  (Instantaneous Flow Property) สามารถแยกได้เป็นคุณสมบัติการไหลเฉลี่ย  $\bar{\varphi}$  (Time-Averaged Flow Property) และคุณสมบัติการไหลแกว่ง  $\varphi'$  (Fluctuation Flow Property) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \varphi'(t) \quad (2-5)$$

กระบวนการนี้เรียกว่า การแยกเรย์โนลด์ (Reynolds Decomposition) ซึ่ง Osborne Reynolds เป็นคนแรกที่นำเสนอ ซึ่งนิยามของเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหล  $\varphi$  และเวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติการไหลแกว่ง  $\varphi'$  แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (2-6)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0 \quad (2-7)$$

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

$$p(t) = \bar{p} + p'(t) \quad (2-8)$$

$$U(t) = \bar{U} + U'(t) \quad (2-9)$$

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2-10)$$

$$\mathbf{v}(t) = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'(t) \quad (2-11)$$

การที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2-11) รั้ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w(t) = \bar{w} + w'(t) \quad (2-12)$$

อิทธิพลของการแกว่งที่มีต่อการไหลเฉลี่ยสามารถหาได้จากการแทนที่สมการที่ (2-8) - (2-12) ลงในสมการควบคุมและใช้นิยามของเวลาเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (2-6) - (2-7)

สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวได้คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (2-13)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (2-14)$$

สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลเฉลี่ยของของไหลอัดตัวไม่ได้ที่ความหนืดคงที่คือ

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \\ & + \left[ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho \overline{u'v'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho \overline{v'^2}) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho \overline{v'w'}) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบ z:

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

หรือ

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

เรียกสมการที่ (2-15) – (2-20) ว่าสมการเรย์โนลด์ (Reynolds Equation) และในสมการที่ (2-15) – (2-20) มีเทอมที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วแกว่งเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ความเค้นปั่นป่วนพิเศษ (Extra Turbulent Stresses) [3]สามารถอธิบายธรรมชาติของการแพร่ได้ ซึ่งเรียกความเค้นปั่นป่วนพิเศษนี้ว่า ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stresses)

เพื่อความสะดวกความเค้นเรย์โนลด์สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-21)$$

โดย  $\mu_t$  คือ ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity หรือ Eddy Viscosity) โดยปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2-21) นำเสนอโดย Boussinesq ในปี ค.ศ. 1877 ดังนั้นสมการที่ (2-16) (2-18) และ (2-20) สามารถแสดงใหม่ได้เป็น

องค์ประกอบ x:

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

องค์ประกอบ y:

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2-25)$$

### 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)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2-26)$$

สมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$ -Transport Equation)

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

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

และค่าคงต่างๆในแบบจำลองแสดงค่าตามตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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 เจ็ต (Jet) [4]

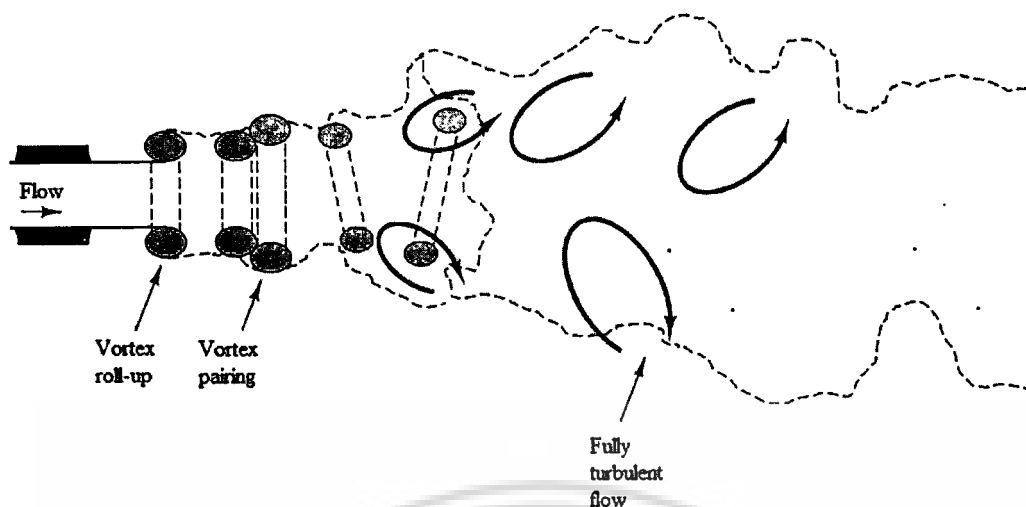
เจ็ตคือการไหลแบบเฉือน (Shear Flow) ที่พบมากที่สุด ซึ่งเป็นการไหลของไหลชนิดหนึ่งไหลออกจากช่องเปิดพุ่งไปสู่ของไหลอีกชนิดหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ควันที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม การปล่อยของเสียจากท่อลงสู่น้ำ เป็นต้น การไหลแบบเจ็ตมีหลายประเภท ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

### ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดลักษณะการไหลของของไหลแบบต่างๆ [5]

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

#### 2.5.1 กลไกการไหลแบบเจ็ต (Round Jet)

เจ็ตปั่นป่วนแบบแกนสมมาตรที่ไหลออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วที่ปากทางออก ( $U$ ) โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ตนิยามได้จาก  $Re = Ud / \nu$  เมื่อ  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและ  $\nu$  คือความหนืดเชิงจลน์ของของไหล กระบวนการเปลี่ยนแปลงของเจ็ตสามารถอธิบายโดยแผนภาพของเจ็ตดังรูปที่ 2.1

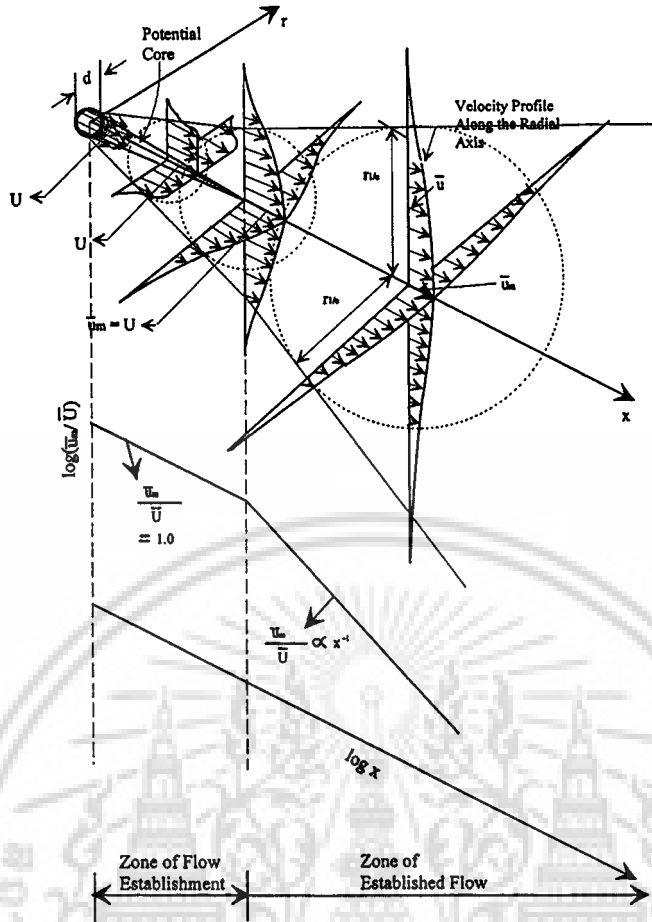


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบเจ็ท

หลังจากของไหลไหลออกจากหัวฉีด การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งก่อให้เกิดการหมุนวน (Vortex Roll-Up) ที่บริเวณท่อทางออกของหัวฉีด ต่อจากนั้นเกิดการขยายตัวซึ่งประกอบด้วยการรวมตัวของการหมุนวนแบบเดี่ยวที่มีความแข็งแรง (Single Strength Vortex) จนถึงการจับคู่ของการหมุนวน (Vortex Pairing) ระยะทางหลังท่อทางออกเพียงเล็กน้อยจะเกิดการรบกวนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การหมุนวนไม่ปกติต่อจากนั้นการไหลแบบเจ็ทจะแตกตัวกลายเป็นการไหลวนขนาดเล็ก (Small Scale Eddy) จำนวนมาก และในที่สุดการไหลจะกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบเจ็ทมีบริเวณที่สำคัญ 2 บริเวณ ประกอบไปด้วยบริเวณการสร้างการไหล (Zone of Flow Establishment: ZFE) และบริเวณการไหลที่ถูกสร้าง (Zone of Establish Flow: ZEF) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ในบริเวณ ZFE เป็นบริเวณที่มีความเร็วคงที่คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนการไหล ( $\overline{u_m}$ ) มีค่าเท่ากับความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออก ( $U$ ) การผสมปั่นป่วนจะไม่เกิดที่กึ่งกลางของเจ็ท อย่างไรก็ตามกระบวนการผสมจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ โดยโครงสร้างที่เชื่อมโยงขนาดใหญ่ (Large-Scale Coherent Structure: CS) จะเหนี่ยวนำของไหลภายนอกเข้ามาในชั้นของเจ็ทเฉือน (Jet Shear Layer) เรียกกระบวนการนี้ว่า การผสมแบบบัลค์ (Bulk Mixing) และเกิดการผสมในขนาดที่เล็กกว่า (Smaller-Scale) ซึ่งเกิดจากความเร็วแกว่ง [6] บริเวณ ZFE จะหมดไปหลังจากเจ็ทเคลื่อนที่ห่างจากหัวฉีดจนมีระยะทางเท่ากับ 4 - 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด [7] และในบริเวณ ZEF การผสมปั่นป่วนจะเกิดที่กึ่งกลางของเจ็ท ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนการไหลจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยรูปแบบของความเร็วจะกระจายตัวเป็นรูประฆัง (Bell Shape หรือ Gaussian Distribution)

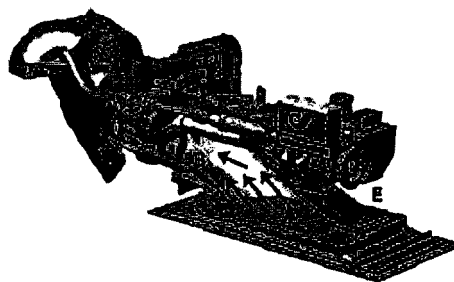
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพของ Round jet [8]

2.6 การทำงานของเรือผลัดต้นน้ำ [9]

การทำงานของเรือผลัดต้นน้ำนั้นอาศัยคุณสมบัติของการไหล จากสมการอนุรักษ์พลังงานของของไหล สามารถอธิบายได้ว่าของไหลที่ออกจากหัวฉีดซึ่งมีความเร็วสูงและมีความดันต่ำ ทำให้ของไหลภายนอกที่มีความเร็วต่ำกว่าและมีความดันสูงกว่าถูกเหวี่ยงเข้ามาให้เจ็ท ทำให้เกิดการผลัดต้นและทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปในแนวระนาบได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.4 เครื่องพ่นน้ำ (Water Jet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 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 ที่ท้ายเรือ เกิดเป็นพลังงานจลน์ให้เรือขับเคลื่อนไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูงได้ สำหรับการลดความเร็ว การหยุดเรือ และทำให้เรือเกิดการถอยหลัง ทำได้โดยการเคลื่อนตัว Reverse Gate ลงมาขวางทางพ่นน้ำที่ออกจาก Outlet Nozzle ถ้าเคลื่อนตัวลงมาต่ำมากขึ้นจะส่งผลให้เรือเกิดแรงต้านเพิ่มมากขึ้น จนสามารถหยุดเรือ และถอยหลังได้ในที่สุด Deflector มีหน้าที่เหมือนกับหางเสือที่ใช้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ ซึ่งเกิดจากการหักเหการไหลของน้ำที่พ่นออกมาจาก Outlet Nozzle โดยวอเตอร์เจ็ทที่ใช้งานในปัจจุบันมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวอเตอร์เจ็ท

คุณสมบัติ	ค่า
กำลังสูงสุด	23 MW
เส้นผ่านศูนย์กลาง Impeller	2.8 m
เส้นผ่านศูนย์กลาง Inlet	2.1 m
จำนวนรอบ	2500 rpm
ความเร็วสูงสุด	>70 Knot

จากปัญหาอุทกภัยเมื่อปี พ.ศ. 2554 กองเรือยุทธการได้ดำเนินการเร่งระบายน้ำโดยใช้เรือผลักดันน้ำ แต่ยังมีจุดบกพร่องที่ต้องแก้ไขคือความสามารถในการผลักดันน้ำมีค่าน้อยไม่เป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของการหาตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทโดยอาศัยคุณสมบัติของการไหลดังที่กล่าวมาข้างต้นและเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อแสดงค่าสนามความเร็วและหาตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่ทำให้ได้ค่าอัตราการไหลสูงสุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำให้มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 วรรณกรรมปริทัศน์

### 2.7.1 การจำลองการไหลผ่านท่อเปิดโดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Li และ Zeng [10] จำลองการไหลของของไหลผ่านช่องเปิดโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสามมิติ RANS โดยแบ่งการศึกษาเป็นสองกรณีคือ กรณีที่มีวัชพืชกีดขวางและกรณีที่ไม่มีวัชพืชกีดขวาง และมีตัวแปรในที่ศึกษาได้แก่ ความกว้างและความสูงของแม่น้ำ และความหนาแน่นของวัชพืช จากการจำลองพบว่าระดับผิวน้ำในแม่น้ำจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัชพืชเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำเพิ่มขึ้นตามความกว้างของแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นและอัตราการไหลจะลดลงเมื่อมีปริมาณวัชพืชเพิ่มขึ้น

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

### 2.7.2 การไหลแบบเจ็ท

Seok และ Il [8] ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อการไหลแบบเจ็ท โดยสนามความเร็วถูกตรวจวัดด้วยเครื่อง Particle image velocity (PIV) โดยช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 177 ถึง 5142 จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบความเร็วในแนวแกนมีการไหลเป็นแบบราบเรียบใกล้กับปากทางออก ความยาวของบริเวณ ZFE จะลดลงเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น อัตราการกระจายตัวของความเร็วแบบปั่นป่วนจะลดลงอย่างช้าๆเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น สำหรับเจ็ทปั่นป่วนพบว่าระดับของความเค้นเฉือนเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

Wang และ Tan [6] ศึกษาการไหลแบบเจ็ทและเสนอการควบคุมการพัฒนาของการไหลชนิดนี้ ผลการทดลองพบว่าวิวัฒนาการของเจ็ทจะขึ้นกับสภาวะเริ่มต้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของการหมุนวนขนาดใหญ่ การเหนี่ยวนำและการผสมในส่วนที่อยู่ใกล้ปากทางออก การควบคุมการไหลแบบเจ็ทสามารถทำได้โดยการจัดการโครงสร้างที่เชื่อมโยงขนาดใหญ่ในบริเวณใกล้ท่อทางออก

Gutmark และ Grinstein [7] เรียบเรียงการศึกษาเกี่ยวกับการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลแบบเจ็ทที่มีหน้าตัดที่ไม่เป็นวงกลม เนื่องจากเจ็ทที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลมรัศมีไม่เท่ากันทุกด้าน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปรับปรุงกระบวนการทั่วไปได้โดยมีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ จากการทดลองสามารถแสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการที่ซับซ้อนของการหมุนวนและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำด้วยเจ็ทและปฏิสัมพันธ์ระหว่างการหมุนวนในแนวแกนและการหมุนวนเชิงมุมซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแกนในสนามการไหลเฉื่อย ในส่วนของการจำลองพบว่า การจำลองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถอธิบายรายละเอียดของกลไกพลศาสตร์การหมุนวน อิทธิพลของการลดความร้อนและปฏิกิริยาที่มีต่อพฤติกรรมของเจ็ทที่มีหน้าตัดไม่เป็นวงกลมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

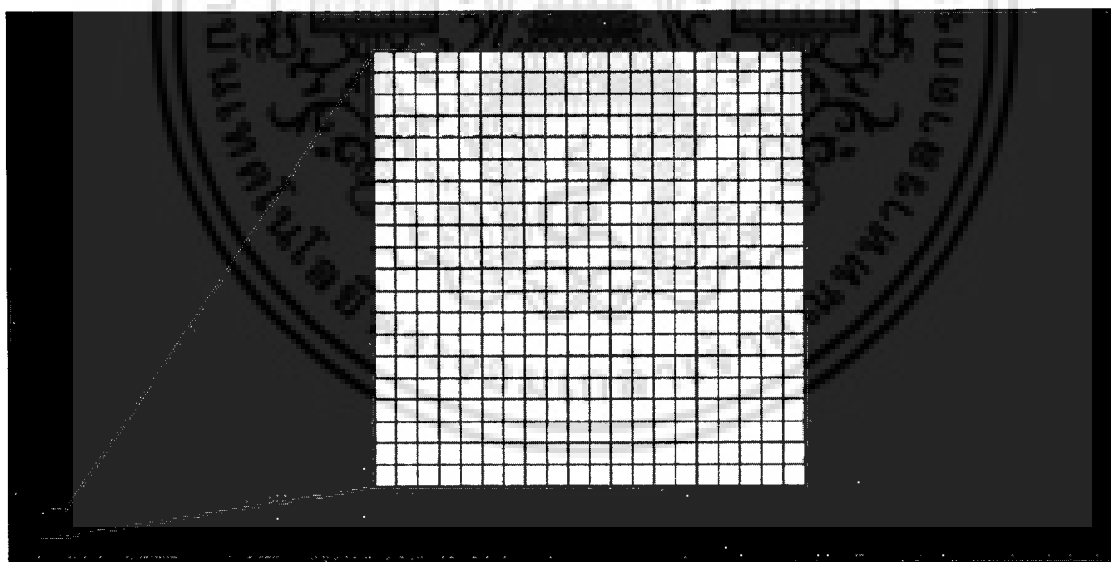
### วิธีดำเนินการวิจัย

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

#### 3.1 การตั้งค่าแบบจำลอง

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

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

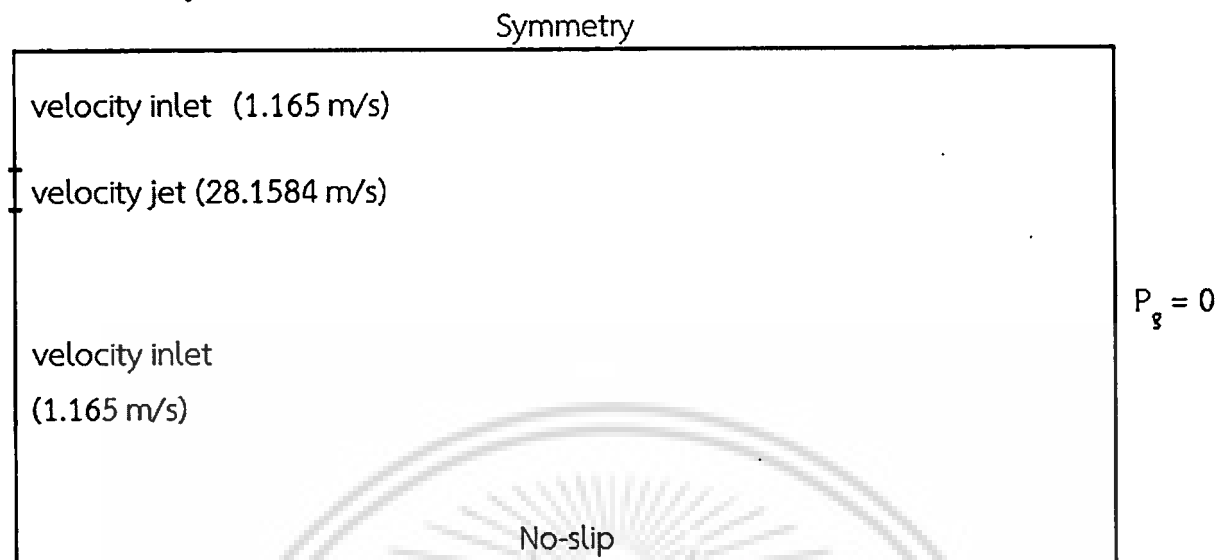


รูปที่ 3.1 กริดของแบบจำลองที่สร้างโดยโปรแกรม GAMBIT

##### 3.1.2 สภาวะขอบเขต

สภาวะขอบเขตทั้งหมดอ้างอิงข้อมูลจากกรมอุทกหารเรือ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3:1 ความเร็วขาเข้าถูกสมมติให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform flow) กำหนดความเร็วที่พื้นแม่น้ำเป็นศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(No-slip boundary condition) และที่ผิวหน้ากำหนดให้เกรเดียนในแนวตั้งฉากกับการไหลของคุณสมบัติการไหลมีค่าเป็นศูนย์ (Symmetry boundary condition) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 สภาวะขอบเขต

รายละเอียด	ค่า
ความเร็วของแม่น้ำ	1.165 m/s
ความเร็วของเทอร์เจ็ท	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 ความเร็วของเทอร์เจ็ทมีค่าคงที่

### 3.1.4 สมการควบคุม

จากการตั้งสมมติฐาน สมการควบคุมของแบบของแบบจำลองนี้ ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม แบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

### สมการความต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3-1)$$

สมการโมเมนตัม

แกน x: 
$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{u})}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (3-2)$$

แกน y: 
$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}^2)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu_{eff} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \rho g \quad (3-3)$$

สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $k$ -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3-4)$$

สมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์ปั่นป่วน ( $\varepsilon$ -transport equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3-5)$$

### 3.1.5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

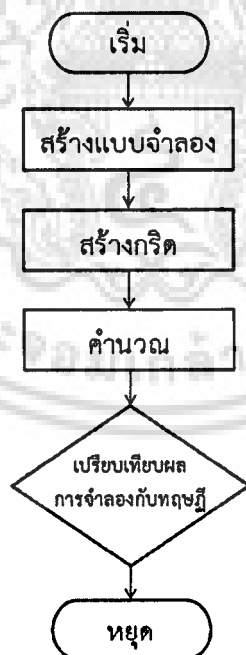
สมการควบคุมทั้งหมดถูกคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งเป็นวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยการคำนวณจะเริ่มจากแบ่งขอบเขตการคำนวณเป็นเซลล์ขนาดเล็กจำนวนมาก แล้วอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดให้เป็นเขตของสมการพีชคณิต สมการพีชคณิตเหล่านี้จะถูกคำนวณจนได้สนามการกระจายตัวของตัวแปรตามที่ต้องการ โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการจำลองครั้งนี้สรุปได้ดังตารางที่ 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 โดยกระบวนการในขั้นตอนนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

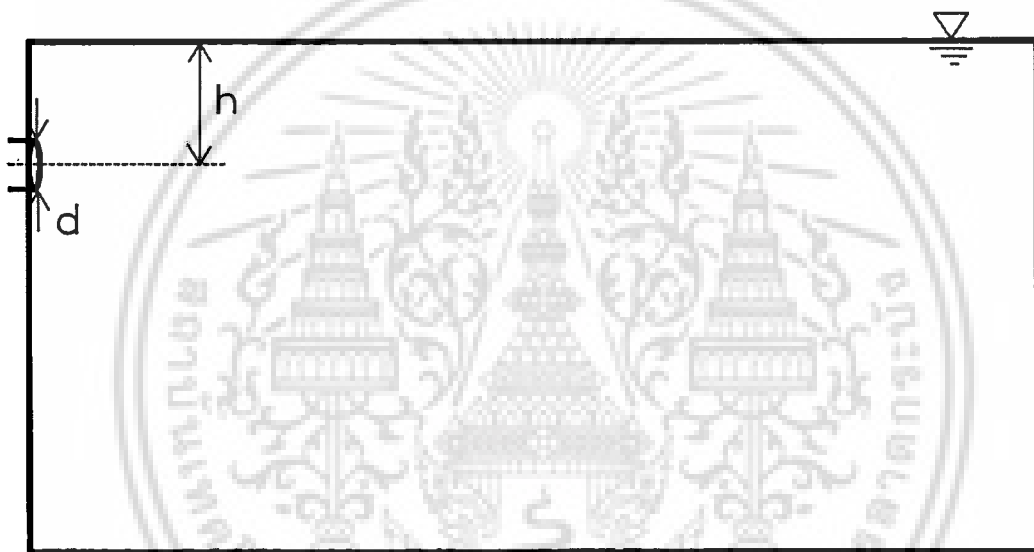


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

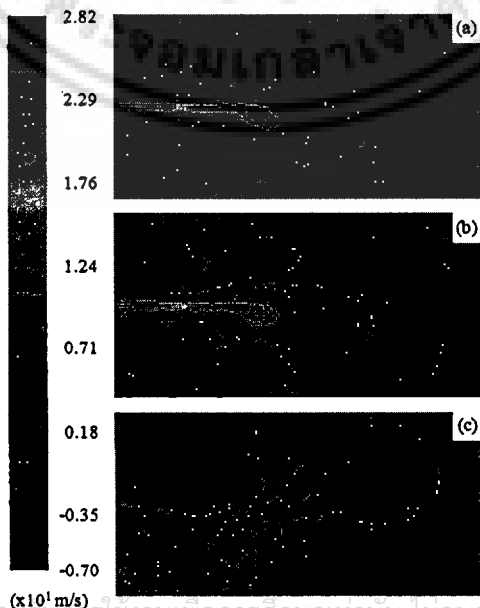
### ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

#### 4.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎี

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

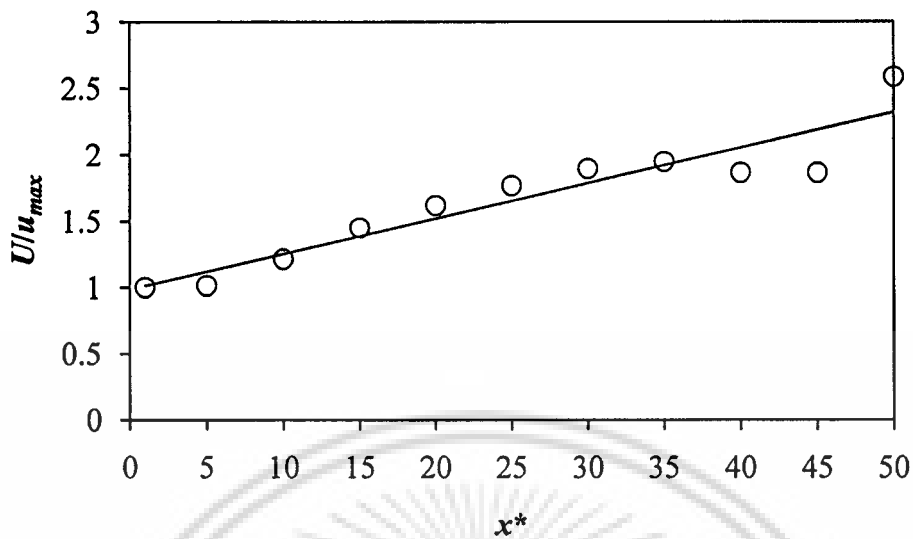
##### 4.1.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองรูปแบบของความเร็วกับทฤษฎี

จากการจำลอง คอนทัวร์ของขนาดความเร็ว 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



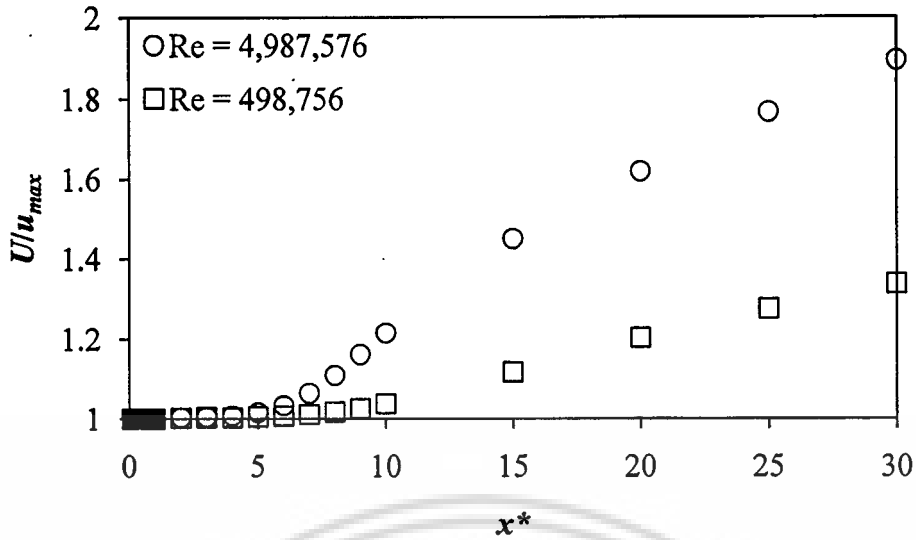
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) ที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 28.12

#### 4.1.2 การเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์กับทฤษฎี

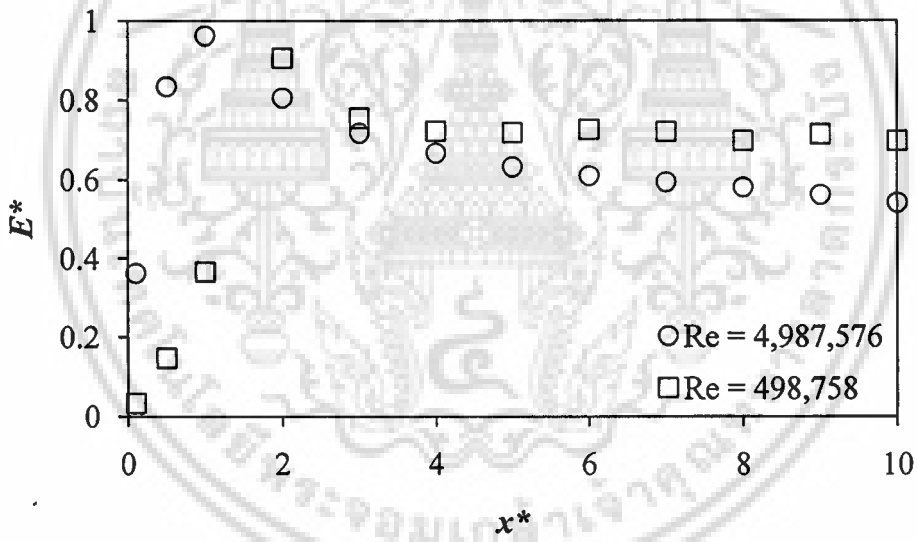
แบบจำลองที่  $H^*$  เท่ากับ 28.12 จะถูกจำลองโดยการปรับเปลี่ยนตัวเลขเรย์โนลด์ 2 ค่าคือ 4,987,576 และ 498,758 เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวเลขเรย์โนลด์กับทฤษฎี จากการจำลองแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็ว ( $U/u_{max}$ ) และตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางตามแนวแกน  $x$  ( $x^*$ ) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ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

$$E^* = \frac{v_{positive} - v_{negative}}{2|v_{max}|} \quad (4-1)$$

จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นบริเวณการสร้างการไหล (Zone of flow establishment: ZFE) จะลดลง ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีของเจ้ทป่น่วน



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

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับทฤษฎีทั้งสองกรณีพบว่า ผลการจำลองสอดคล้องกับทฤษฎีการไหลแบบเจ็ท ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือในการทำนายพฤติกรรมการไหลแบบเจ็ท

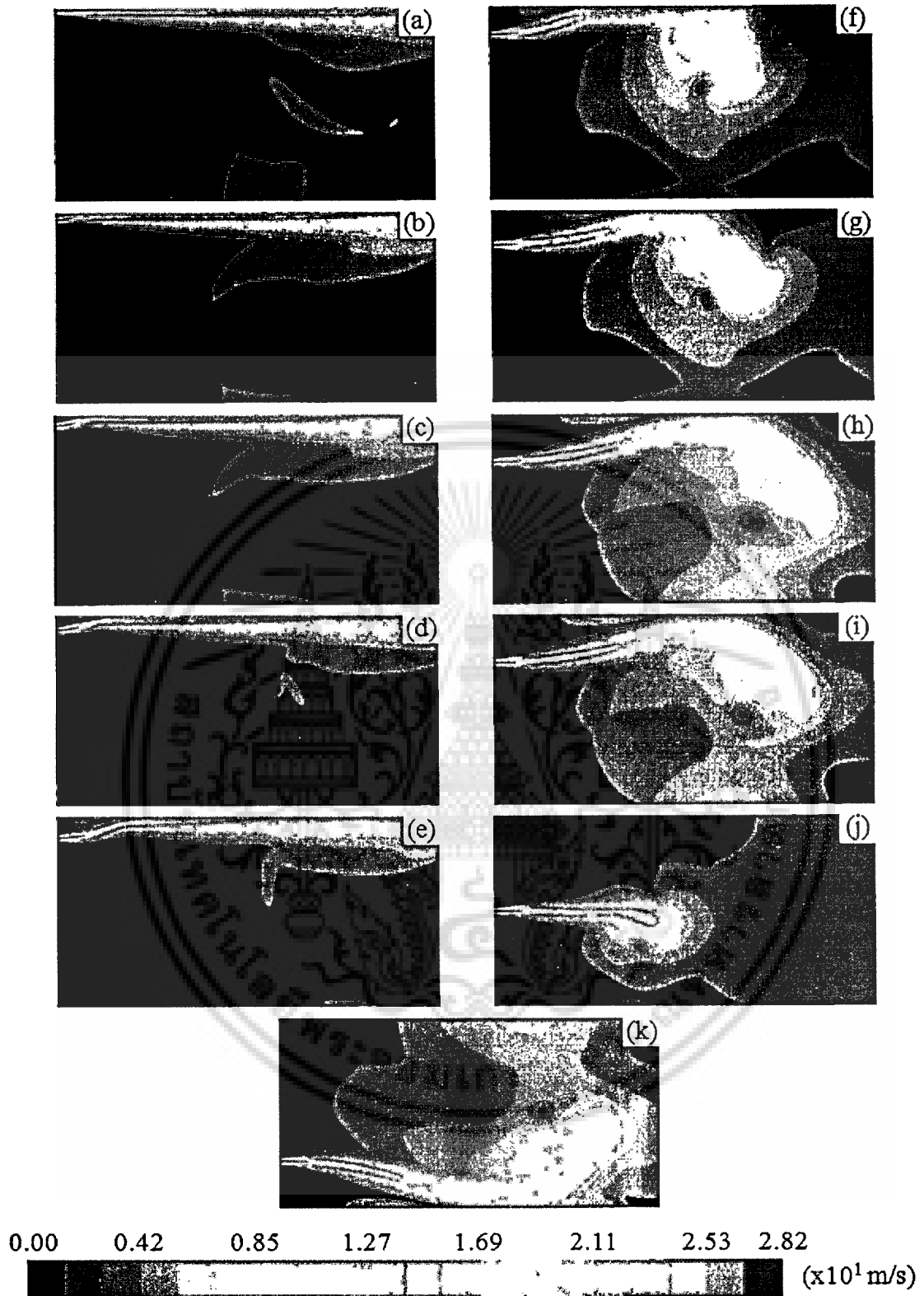
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 อิทธิพลของตำแหน่งวอเตอร์เจ็ทที่ส่งผลต่อการปลักตันน้ำ

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 4.5รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

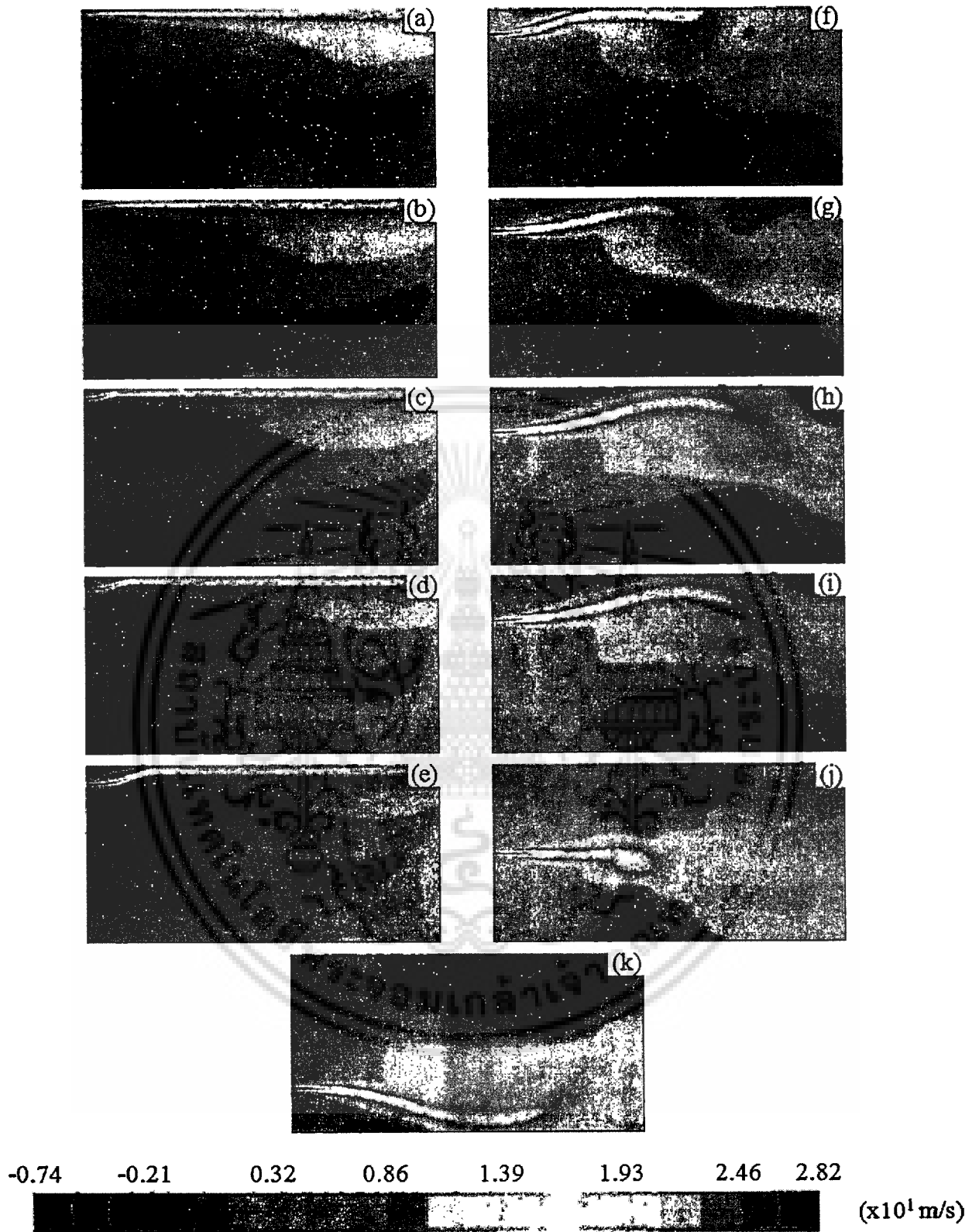


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



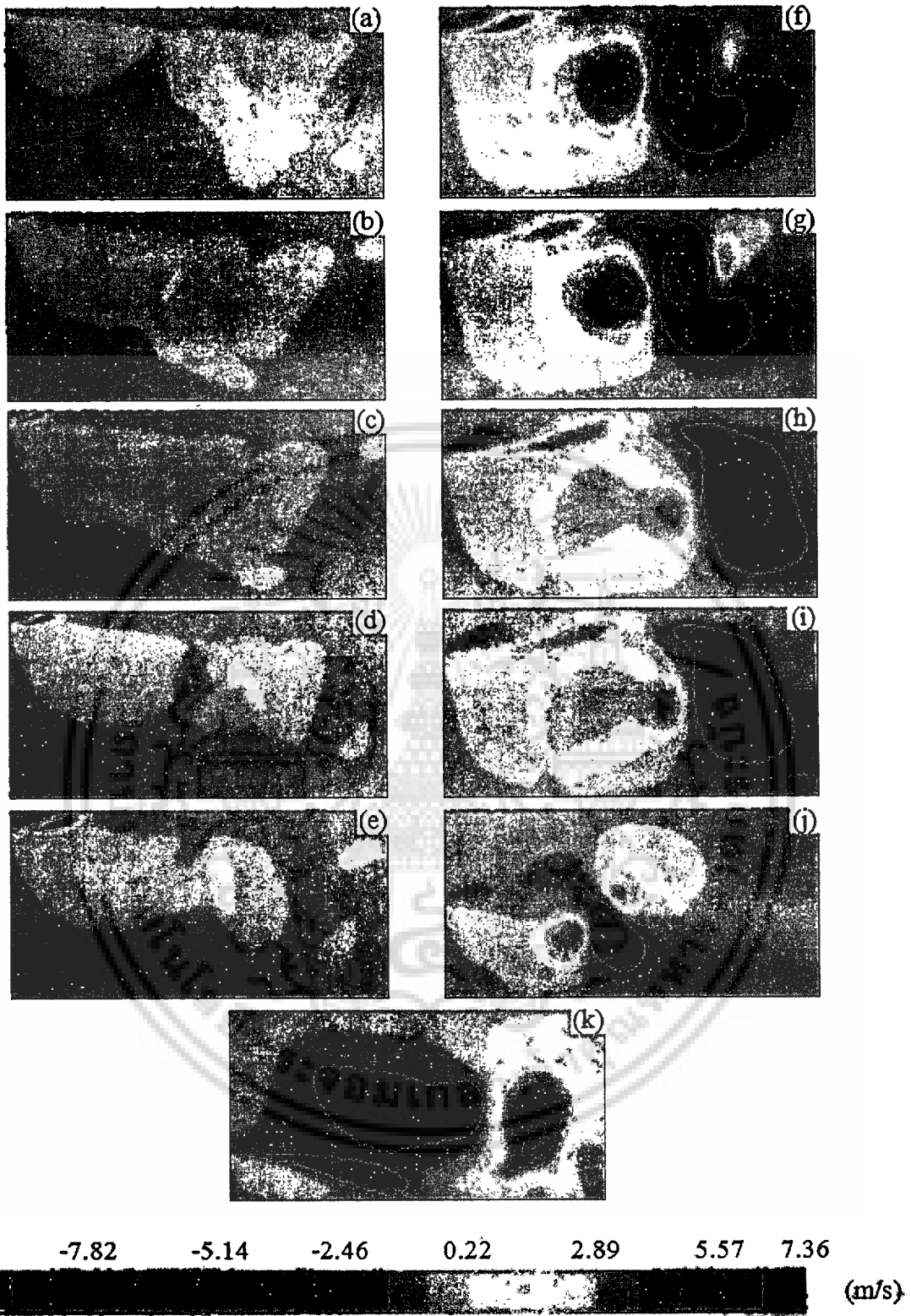
รูปที่ 4.5 คอนทัวร์ของขนาดความเร็วที่  $H^*$  เท่ากับ (a) 0.5 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 6 (f) 8 (g) 10 (h) 14 (i) 14.06 (j) 28.12 และ (k) 42.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

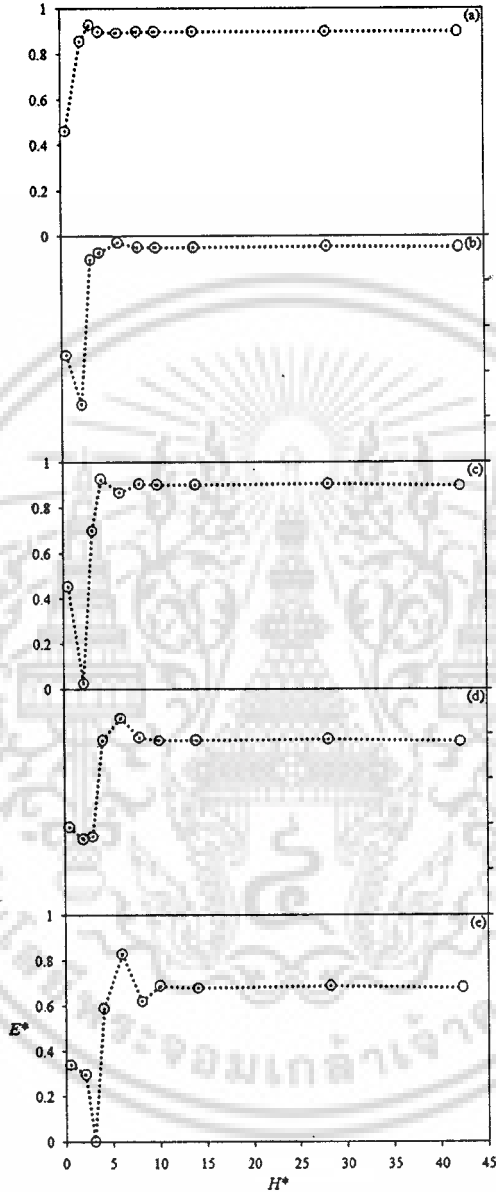
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



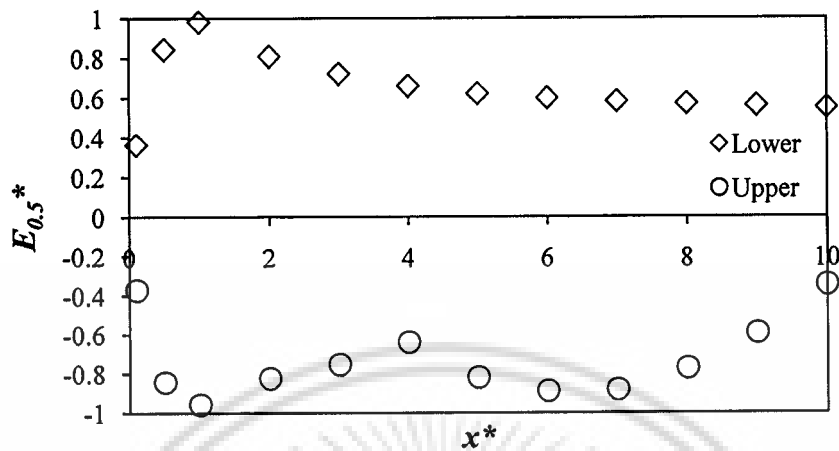
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E^*$  กับ  $H^*$  ที่ตำแหน่ง  $x^*$  เท่ากับ (a) 0.8 (b) 3 (c) 4 (d) 5 และ (e) 6

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

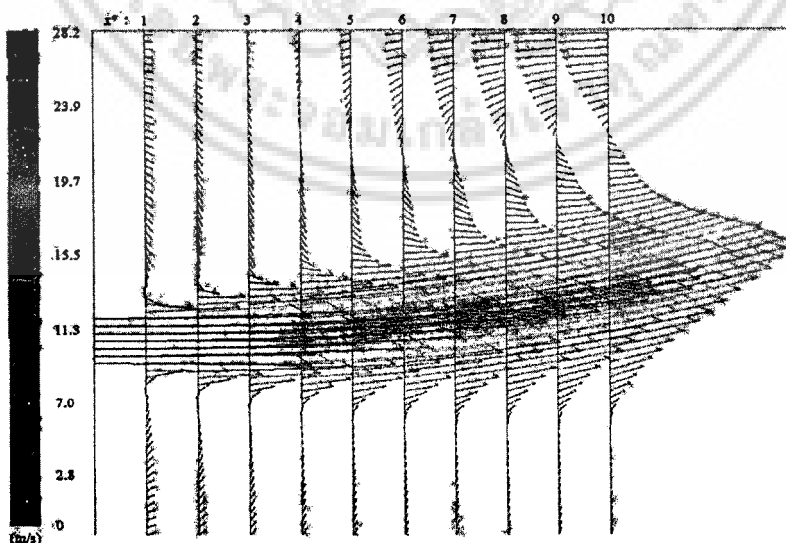
$$E_{0.5}^* = \frac{v_{positive}}{|v_{max}|} \text{ หรือ } E_{0.5}^* = \frac{v_{negative}}{|v_{max}|} \quad (4-2)$$



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

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 พบว่าตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วเหนี่ยวนำ ( $E_{0.5}^*$ ) ที่ตำแหน่ง  $x^*$  ระหว่าง 5 ถึง 9 มีค่าเพิ่มขึ้นจากตำแหน่ง  $x^*$  เท่ากับ 4 เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวเกิดการหมุนวน เป็นสาเหตุทำให้ความเร็วเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น 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 ตามลำดับเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข

#### 5.1 สรุปผลการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลัดดันน้ำด้วยวอเตอร์เจ็ทด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางวอเตอร์เจ็ทที่มีต่อประสิทธิภาพการผลัดดันน้ำสภาวะขอบเขตของงานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลจากกรมอุทกหารเรือ สมมติฐานของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นกำหนดให้เป็นสองมิติ ของไหลเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (คำนวณเฉพาะน้ำเท่านั้น) การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและความเร็วของวอเตอร์เจ็ทมีค่าคงที่

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-epsilon model ถูกใช้ในการคำนวณสนามการไหลและความปั่นป่วน จากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับทฤษฎี
- การวางตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ทให้มีประสิทธิภาพในการผลัดดันน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $H^*$  เท่ากับ 6

ดังนั้นกองทัพเรือไม่ควรวางตำแหน่งของวอเตอร์เจ็ทไว้ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับผิวน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพในการผลัดดันน้ำไม่มากพอเมื่อเทียบกับพลังงานที่สูญเสียไป



รูปที่ 5.1 การวางวอเตอร์เจ็ทของกองทัพเรือในช่วงที่เกิดอุทกภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลอง เพื่อยืนยันผลการจำลอง

5.2.2 สร้างแบบจำลองเป็นแบบสามมิติ เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นในสามมิติ

5.2.3 ปรับปรุงการจำลองให้มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เช่น การจำลองแบบหลายเฟสการกำหนดค่าของความเร็วขาเข้าของวอเตอร์เจ็ต เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Versteeg, 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 Li, W.S. "Reynolds number effect on the behavior of a non-buoyant round jet" Experiments in Fluids. No. 38. 2005. pp.801-812.
- [9] ชลัมภ์ โสมาภา และสมัย ใจอินทร์. การพิจารณาระบบขับเคลื่อนเครื่องพ่นน้ำของกองทัพเรือ. 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" Advance 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.

## ประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Dr.Santi Wattananusorn

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน -

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์

อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail) : สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์

02-3298360-3 ต่อ 166 โทรสาร 02-3298360-3 ต่อ 4 E-mail santi\_wattananusorn@

hotmail.com

### ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ไทย)

ระดับปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ไทย)

ระดับปริญญาเอก Dr.-Ing. (วิศวกรรมเครื่องกล) Ruhr-University Bochum (เยอรมนี)

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

1. Wattananusorn, S. ( 2012 ) : Special-Relativistic Hydrodynamics for Higher-Order Boundary-Layer Flow over a Flat Plate. [ to be published ]
2. Wattananusorn, S. ( 2009 ) : Explicit Analytical Solution for Drying Kinetics of Flat Materials. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, vol. 43, no. 1, pp. 70 - 73.
3. Wattananusorn, S. ( 2006 ) : New Space-Averaging Procedure for Inhomogeneous Flow Fields using Balance Equation Formulations. Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 220, no. 9, pp. 1363 - 1374.
4. Wattananusorn, S. ( 2008 ) : Determination of Membrane Resistance for Cross-Flow Microfiltration in a Rectangular Module including Back-Flow. Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 222, no. 1, pp. 75 - 77.
5. Wattananusorn, S. ( 2004 ) : Interference of Laminar Flow on Displacement Thickness in a Streamwise Corner. Journal of Power and Energy, vol. 218, no. 1, pp. 51 - 53.
6. Wattananusorn, S. ( 2007 ) : Significance of the Balance-Based Averaging

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Theory for Application in Energy and Process Engineering. [ Dissertation, Ruhr-University Bochum ]

7. Wattananusorn, S. ( 2002 ) : Umformung der Wellengleichung. [ in the Prof. Dr. Heinz Dieter Papenfuss's manuscript notes for lecture course on Numerische Stroemungsmechanik, pp. 135 - 137, translated into German by Dr. Frank Seifert ]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้