

การศึกษาวิธีการป้องกันไวรัสเทกซ์ในป่อสูบน้ำด้วยไวรัสเทกซ์เบรกเกอร์โดยวิธีการ  
คำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญาานิพนธ์

ของ

วิรุพห์ ไสอินทร์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

การศึกษาวิธีการป้องกันไวรัสเทกซีในป่อบสูบน้ำด้วยไวรัสเทกซ์เบรคเกอร์โดยวิธีการ  
คำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญาานิพนธ์

ของ

วิรุพห์ ไสอินทร์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาวิธีการป้องกันไวรัสเทกซีในป่อบสูบน้ำด้วยไวรัสเทกซ์เบรคเกอร์โดยวิธีการ  
คำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

บทคัดย่อ  
ของ  
วิรุพห์ โสอินทร์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
พฤษภาคม 2550

วิรุพห์ โสอินทร์(2550). การศึกษาวิธีการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำด้วยวอร์เทกซ์เบรกเกอร์โดย  
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล ปรินญาณีพนธ์ วัฒน.  
(วิศวกรรมเครื่องกล) กรุงเทพฯ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, พ.ท. ผู้ช่วย  
ศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ่ง

ปรากฏการณ์การไหลในบ่อสูบน้ำถูกคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขทาง  
พลศาสตร์ของไหล หรือ CFD บนพื้นฐานของระเบียบวิธีผลต่างปริมาตรสี่เหลี่ยมโดยเปรียบเทียบกับ  
ผลที่ได้จากการทดลองที่เงื่อนไขทางมิติและการไหลเดียวกัน สมการนาเวียร์-สโตกส์ ร่วมกับ  
แบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิด k- $\epsilon$  ถูกนำมาใช้ในการคำนวณผ่านปริมาตรควบคุมจำนวน  
578,025 เซลล์ ซึ่งพบว่าเป็นจำนวนที่เหมาะสมสำหรับคำนวณโดยให้ความผิดพลาดจากการ  
คำนวณในช่วงที่ยอมรับได้พร้อมกับประหยัดทั้งทรัพยากรคอมพิวเตอร์และเวลา

ผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จาก [4] โดยพบวอร์เทกซ์สาม  
ตำแหน่งที่ผนังทั้งสามด้านของบ่อสูบน้ำและอีกหนึ่งตำแหน่งที่พื้นบ่อสูบน้ำ อย่างไรก็ตามที่รัศมี  
การหมุนของวอร์เทกซ์ที่มากขึ้น ผลการคำนวณมีแนวโน้มคลาดเคลื่อนไปจากการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้รับการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่พื้น  
บ่อสูบน้ำ และทำการเปลี่ยนขนาดความกว้างและความสูงของเบรกเกอร์ดังกล่าวเพื่อศึกษาถึงผล  
ของการลดความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ในแต่ละระนาบของบ่อ

ผลการคำนวณทำให้ทราบว่าตัวแปรทั้งสองนอกจากจะมีผลต่อความแข็งแรงของวอร์  
เทกซ์แล้วยังส่งผลกระทบต่อการสร้างวอร์เทกซ์ที่ตำแหน่งอื่นๆอีกด้วย โดยการเพิ่มหรือลดตัวแปร  
ใดๆอาจจะช่วยให้วอร์เทกซ์ในบางระนาบลดความแข็งแรงลงหรือถูกกำจัดได้โดยสิ้นเชิง ใน  
ขณะเดียวกันผลจากการเพิ่มหรือลดตัวแปรดังกล่าวนั้นอาจเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและจำนวน  
ของวอร์เทกซ์ในระนาบอื่นๆให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ตัวแปรทั้งสองมีจุดที่เหมาะสมที่เบรก  
เกอร์สามารถให้ผลในการป้องกันวอร์เทกซ์ได้ดีแต่อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวอาจใช้ไม่ได้กับ  
เงื่อนไขอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนมิติของบ่อสูบน้ำหรือเงื่อนไขการไหลใดๆแตกต่างจากที่ใช้ในการ  
คำนวณนี้ ดังนั้นการจะหาจุดเหมาะสมด้านมิติของเบรกเกอร์จึงเป็นสิ่งที่ได้ไม่ถนัดนักในทางปฏิบัติ

THE STUDY OF VORTEX PREVENTION IN SUMP WITH VORTEX BREAKER BY  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

AN ABSTRACT

BY

WIROON SO-IN

Presented in partial fulfillment of the requirements  
for the Master of Engineering degree in Mechanical Engineering  
at Srinakharinwirot University

May 2007

Wiroon So-in. (2006). The Study of Vortex Prevention in Sump with Vortex Breaker by Computational Fluid Dynamics, Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.  
Advisor Committee : Asst. Dr. Jutarat Kurujareon, Lt.Col. Asst. Dr. Anotai Suksangpanomrung

The flow characteristic in sump with suction pipe was numerically studied utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) technique based on a finite volume method (FVM). The Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS) equation with two-layer k- $\epsilon$  model was solved unsteadily through out the numerical model with 578,025 cells, which was the suitable quantity of number of cells for giving a proper calculation with saving time and computer resource.

It was found that our numerical results agreed well with the experimental results conducted by [4] which produced three vortexes at three bounded walls and one at the bottom of sump. However, the result were deviated from experimental at the larger radius of vorticity.

Moreover, in our investigation, a simple geometry vortex breaker was added at the bottom of sump for the purpose of preventing the vortex. The width and the height of such vortex breaker were varied to account for the changes of vortex strength.

It was found that increasing or decreasing the width or height of vortex could help in prevention of vortex at some surface while increasing the strength for other surfaces with some additional weak vortexes. There was the optimum point of such the two parameters to give the best way in prevention of vortex without adding the load the pump but it is practically difficult to find. Also these parameters may not applicable for the other conditions of dimension or flow.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาวิธีการป้องกันวอร์เทกซ์ในท่อสูบน้ำด้วยวอร์เทกซ์เบรกเกอร์โดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

ทางพลศาสตร์ของไหล

ของ

วิรุพห์ ไสอินทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญสิริ จิระเดชากุล)

วันที่ ..... เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์เจต พรหมวงศ์)

..... กรรมการ

(พันโท ผศ. ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

..... กรรมการ

(พันโท ผศ. ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

..... กรรมการ

(ดร. ไพศาล นาผล)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์  
คุรุเจริญ ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญาบัตร และ พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.  
อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง กรรมการควบคุมการทำปริญญาบัตร ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ให้  
แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ตลอดจนช่วยกรุณาตรวจแก้ปริญญา  
บัตรจนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว คุณสมมาศ แก้วล้วน ที่กรุณาให้  
ข้อเสนอแนะขั้นตอนวิธีการทำปริญญาบัตร และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

วิรุฬห์ ไสอินทร์

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	3
วิธีดำเนินการวิจัย .....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
บทปริทัศน์วรรณกรรม .....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	9
วอร์เทกซ์ .....	12
ทฤษฎีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล.....	14
วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน .....	25
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
สมมติฐานในการวิจัย .....	29
แบบจำลองบ่อสูบน้ำ .....	29
การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	36
การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	38
4 ผลการคำนวณ	
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ .....	45
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อได้รับการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ .....	56

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปและวิเคราะห์ผลการคำนวณ	
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ .....	70
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อได้รับการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ .....	72
สรุป .....	73
ข้อเสนอแนะ .....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	78
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	92

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ตัวอย่างวอร์เทกซ์เบรกเกอร์.....	2
2 แสดงวอร์เทกซ์ใต้น้ำ .....	3
3 แสดงขนาดของเบรกเกอร์ที่ปรับเปลี่ยนขนาดเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการ ป้องกันวอร์เทกซ์.....	4
4 แสดงวอร์เทกซ์ชนิดต่างๆ.....	12
5 แสดงการเกิดวอร์เทกซ์และความสัมพันธ์ของความดันและความเร็วในแนว สัมผัสเทียบกับระยะในทิศพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางการหมุน.....	14
6 ปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติ.....	19
7 แสดงกริดชนิดเรียงตัวแบบโครงสร้าง.....	20
8 แสดงกริดชนิดการเรียงตัวแบบโครงสร้างกลุ่ม.....	21
9 แสดงกริดชนิดเรียงตัวแบบไร้รูปแบบ.....	21
10 Suction Umbrella.....	25
11 Vertical Splitter.....	26
12 Suction Cone.....	26
13 Cruciform.....	27
14 รูปร่างและขนาดของบ่อสูบน้ำจำลอง.....	29
15 แสดงตำแหน่งของวอร์เทกซ์ที่ระนาบต่างๆของบ่อสูบ.....	30
16 แบบจำลองโดยโปรแกรม Gambit.....	32
17 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ขนาด ต่างๆ.....	33
18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับ รัศมีการหมุนของวอร์เทกซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการ ทดลอง.....	39
19 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลเทียบกับแบบจำลองของ Rajendran.....	46
20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุน วนที่รัศมีการหมุนต่างๆ.....	47

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
21 กราฟเปรียบเทียบผลของความละเอียดของกริดต่อความถูกต้องของการคำนวณ โดยแสดงค่าเซอร์คูล์เลชันและค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับการหมุนเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์.....	52
22 เปรียบเทียบสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของเบรกเกอร์(กรณี 1.1 1.2 และ 1.3).....	57
23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ต่างๆ (กรณี 1.1 1.2 และ 1.3).....	61
24 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของเบรกเกอร์ (กรณี 2.1 2.2 และ 2.3).....	64
25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความสูงของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ต่างๆ (กรณี 2.1 2.2 และ 2.3).....	68
26 เปรียบเทียบจุดกำเนิดของกริด ซ้ายแสดงจุดกำเนิดของกริดของงานวิจัยนี้ ขวาแสดงจุดกำเนิดของกริดของ Rajendran และคณะ[4].....	70

## คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อสูบน้ำ	mm
V	คือ	ความเร็วของน้ำที่ไหลในท่อสูบน้ำ	m/s
r	คือ	รัศมีของวอร์เทกซ์	mm
$R_{ave}$	คือ	รัศมีเฉลี่ยของวอร์เทกซ์	mm
$V_\theta$	คือ	ความเร็วในทิศตั้งฉากกับการหมุนของวอร์เทกซ์	m/s
$\Gamma$	คือ	เซอร์คิวเลชัน	
Re	คือ	ค่าตัวเลขของเรย์โนลด์	-
W	คือ	ค่าตัวเลขของเวเบอร์	-
F	คือ	ค่าตัวเลขของฟรูด	-
$N_c$	คือ	ค่าตัวเลขของเซอร์คิวเลชัน	-
E	คือ	ค่าตัวเลขของออยเลอร์	-
x	คือ	ความเร็วในแนวแกน X	m/s
y	คือ	ความเร็วในแนวแกน Y	m/s
z	คือ	ความเร็วในแนวแกน Z	m/s
g	คือ	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก	$m/s^2$
$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ	$Kg/m^3$
v	คือ	สัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำ	
s	คือ	เวลา	วินาที

## บทที่ 1

### บทนำ

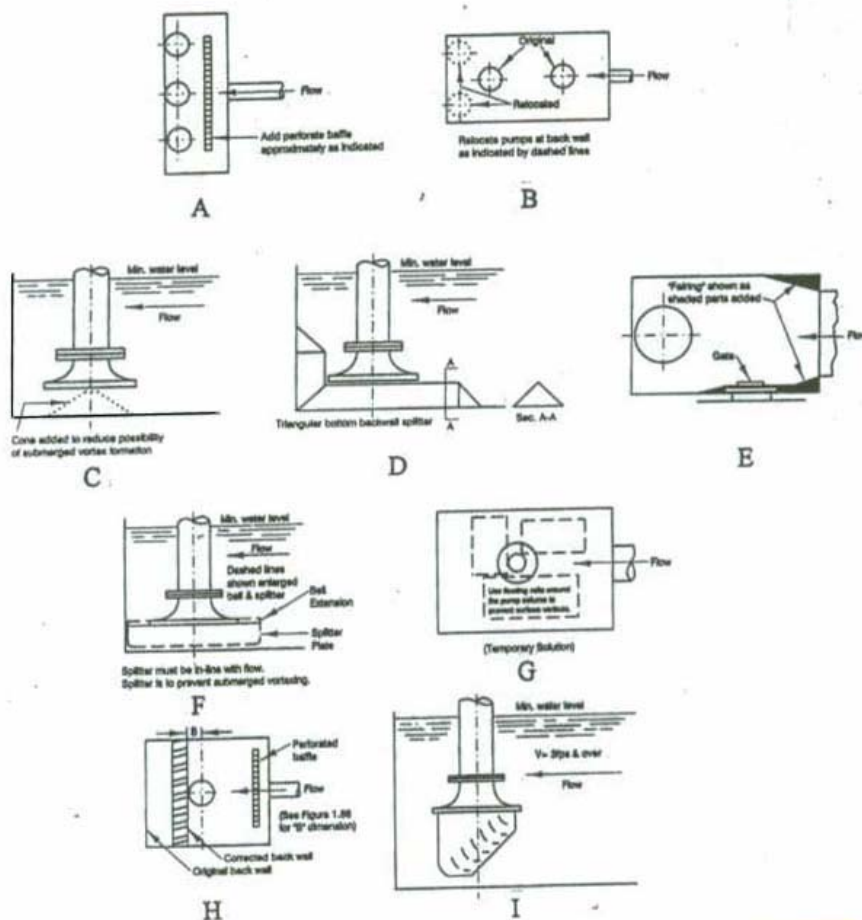
#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการออกแบบระบบปั้มน้ำต้องมีการคำนึงถึงการป้องกันการเกิดวอร์เทกซ์(Vortex)หรือการหมุนวนของน้ำบริเวณปากท่อดูด (Inlet Suction Pipe) ของปั้มน้ำเสมอเนื่องจากวอร์เทกซ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและอายุการใช้งานของปั้มน้ำและระบบท่อ โดยที่ผู้ออกแบบจะเป็นผู้กำหนดตำแหน่งของท่อด้านดูดที่เหมาะสมด้วยประสบการณ์ และมาตรฐานการติดตั้งทั่วไปเพื่อมิให้เกิดการหมุนวนของน้ำ แต่ในบางครั้งด้วยข้อจำกัดบางประการเช่น สภาพพื้นที่ความเหมาะสมในการติดตั้ง หรือแม้แต่งบประมาณ ทำให้ไม่สามารถออกแบบท่อด้านดูดที่ดีตามมาตรฐานดังกล่าวได้ ผลที่ตามมาคือผู้ออกแบบไม่สามารถระบุได้ว่าตำแหน่งที่ออกแบบนั้นจะก่อให้เกิดการหมุนวนของน้ำหรือไม่ ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบจะกำหนดให้มีการป้องกันการเกิดการหมุนวนไว้ก่อนเสมอไม่ว่าในความเป็นจริงจะเกิดการหมุนวนหรือไม่ก็ตาม ด้วยเพราะค่าใช้จ่ายที่ต่ำเมื่อเทียบกับการแก้ไขด้านอื่นๆ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันการหมุนวนของน้ำเรียกว่าวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ (Vortex Breaker หรือ Anti-Vortex) ซึ่งในปัจจุบันมีให้เลือกใช้หลายชนิดระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบและติดตั้งทั่วไป แบ่งแยกตามลักษณะของบ่อสูบน้ำและรูปแบบของท่อดูด ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 1 ดังนั้นอาจนับได้ว่าวอร์เทกซ์เบรกเกอร์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์มาตรฐานในระบบสูบน้ำทั่วไปที่จะต้องพึงมี

เนื่องจากมีความหลากหลายของบ่อสูบน้ำ วอร์เทกซ์เบรกเกอร์จึงมีมากมายหลายชนิดด้วยกัน จึงอาจทำให้เกิดความสับสนในการเลือกใช้สำหรับผู้ที่มีประสบการณ์ไม่มากนัก ประกอบกับการพยากรณ์การเกิดและตำแหน่งที่เกิดของวอร์เทกซ์ก็มีความสลับซับซ้อน ส่งผลให้การออกแบบและการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ในขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมเป็นไปได้ยากเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม วอร์เทกซ์เบรกเกอร์บางชนิดถูกติดตั้งในลักษณะขวางพื้นที่ปากท่อดูดของเครื่องสูบน้ำ ลักษณะดังกล่าวนี้จะกระทบต่อความสามารถในการทำงานของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งการเลือกใช้วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่มีขนาดใหญ่ และติดตั้งในบางตำแหน่งอาจเกินความจำเป็นในจุดประสงค์ของการป้องกันการเกิดวอร์เทกซ์ ในขณะที่เดียวกันส่วนเกินดังกล่าวอาจไปเพิ่มภาระการทำงานให้กับเครื่องสูบน้ำได้ ในทางตรงกันข้ามหากวอร์เทกซ์เบรกเกอร์มีขนาดเล็กเกินไป นอกจากจะไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันแล้ว ยังทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการแก้ไขอีกด้วย



ภาพประกอบ 1 ตัวอย่างวอร์เทกซ์เบรกเกอร์[1]

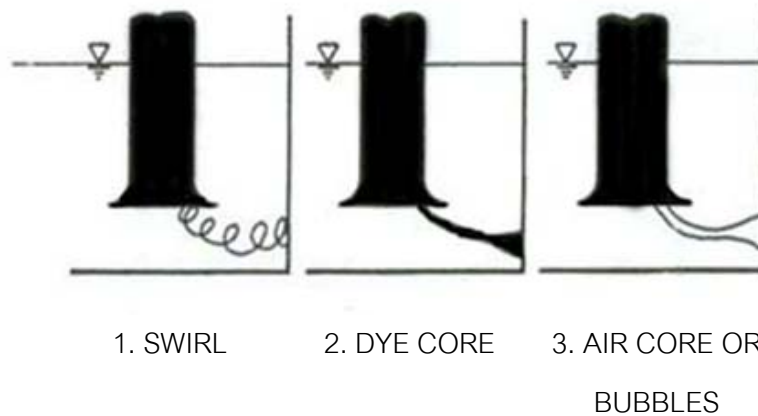
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำ ด้วยวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ โดยเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความสูงของเบรกเกอร์ ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อความสามารถในการป้องกันวอร์เทกซ์ที่แต่ละระนาบในบ่อสูบน้ำ เพื่อเป็นความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นในการศึกษาถึงคุณลักษณะที่เหมาะสมของเบรกเกอร์ ที่นอกจากจะช่วยในการป้องกันวอร์เทกซ์แล้วยังไม่เป็นการเพิ่มภาระให้กับเครื่องสูบน้ำเกินความจำเป็น แต่ด้วยการวิเคราะห์การไหลและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกระทำได้อย่าง เนื่องจากความซับซ้อนของสมการและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง จึงใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD เป็นเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

## 1.2.วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำด้วยวอร์เทกซ์เบรกเกอร์
- 1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรความกว้างและความสูงของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ต่อความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำ

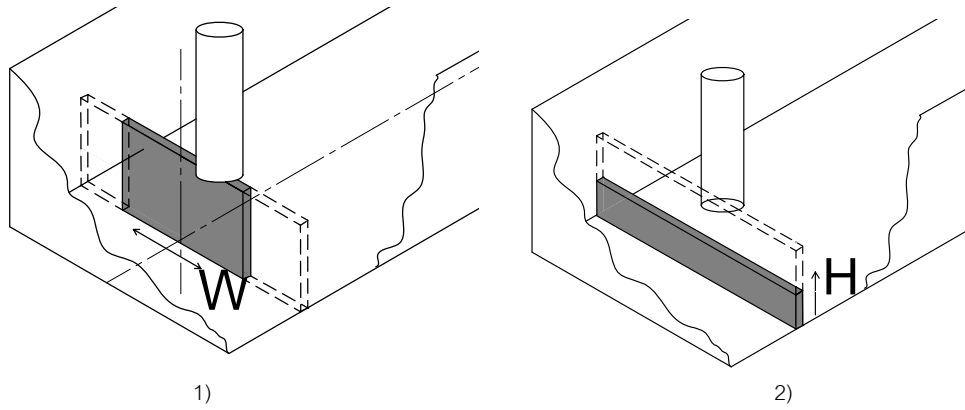
## 1.3.ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ใน 3 มิติ
- 1.3.2 ไม่คำนึงถึงวอร์เทกซ์หรือการหมุนวนใดๆจากต้นน้ำ(Pre-Swirl)
- 1.3.3 การไหลของน้ำเข้าสู่ปากท่อเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานของท่อสูบน้ำ
- 1.3.4 ให้ความสนใจเฉพาะวอร์เทกซ์ที่เกิดใต้น้ำ (Submerged Vortex) เท่านั้นดังในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงวอร์เทกซ์ใต้น้ำ[1]

- 1.3.5 บ่อสูบน้ำประกอบด้วยท่อสูบน้ำในแนวตั้งฉากกับผิวน้ำ 1 ท่อ
- 1.3.6 วอร์เทกซ์เบรกเกอร์เป็นชนิดที่ขวางพื้นที่หน้าตัดของปากท่อสูบน้ำ มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดตั้งที่พื้นของบ่อสูบน้ำใต้ท่อสูบน้ำ และทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆดังแสดงในภาพประกอบ.3 ดังนี้
  - 1.3.6.1 ความกว้างของเบรกเกอร์
  - 1.3.6.2 ความสูงของเบรกเกอร์



1.) เปลี่ยนความกว้าง (W) ของเบรคเกอร์

กรณีที่ 1.1	W=61.6 mm	H = 70.4 mm
กรณีที่ 1.2	W=184.8 mm	
กรณีที่ 1.3	W=308 mm	

2.) เปลี่ยนความสูง (H) ของเบรคเกอร์

กรณีที่ 2.1	H=14.1 mm	W = 308 mm
กรณีที่ 2.2	H=42.2 mm	
กรณีที่ 2.3	H=70.4 mm	

ภาพประกอบ 3 แสดงขนาดของเบรคเกอร์ที่ปรับเปลี่ยนขนาดเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการป้องกัน  
วอร์เทกซ์

#### 1.4. วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สร้างและทดสอบแบบจำลองบนเงื่อนไขของการเกิดวอร์เทกซ์
- 1.4.2 ติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่ขนาดต่างๆเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความแข็งแรงของวอร์เทกซ์
- 1.4.3 สรุปผลการทดลอง

#### 1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1.5.1 สร้างความรู้ความเข้าใจพื้นฐานของวอร์เทกซ์และกระบวนการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำ
- 1.5.2 เป็นองค์ความรู้ในเบื้องต้นอันนำไปสู่งานวิจัยในขั้นต่อไป
- 1.5.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ในการออกแบบวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Review)

Constantinescu[2] จำลองการไหลด้านดุดของเครื่องสูบน้ำใน 3 มิติเพื่อศึกษาการเกิด วอร์เทกซ์ผิวหน้า (Free Surface Vortex) และวอร์เทกซ์ใต้น้ำ (Wall Attached Vortices) โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) สมการ Reynolds- Averaged Navier-Stokes ถูกนำมาใช้ในการคำนวณร่วมกับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent Model) คือ Two Layer k- $\epsilon$  เนื่องจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิดนี้ประกอบด้วยสมการที่ทำการคำนวณเฉพาะการไหลบริเวณชนิดผนังของวัตถุที่ไหลผ่านเท่านั้น จึงเอื้ออำนวยต่อการวิเคราะห์วอร์เทกซ์ใต้น้ำได้แม่นยำขึ้น เพราะวอร์เทกซ์ใต้น้ำเกิดขึ้นที่บริเวณการไหลชนิดผนังดังกล่าวและข้อดีที่สำคัญของแบบจำลองนี้คือ ไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ผนังเหมือนกับแบบจำลองอื่นๆทั่วไปทำให้ลดความซับซ้อนในการคำนวณ

โดยแบบจำลองของบ่อที่ใช้ในการวิจัยดังกล่าวเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประกอบด้วยท่อสูบน้ำ 1 ท่อ ขนาดระยะต่างๆใช้ตามมาตรฐานการออกแบบทั่วไป และตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) หรือ Re ของการไหลที่ 60,000

การไหลปกติจะให้ตัวเลขเวเบอร์ (Waber Number, W) มากกว่าช่วง 120 – 1,000 เสมอ ซึ่งการไหลนี้สามารถตัดผลกระทบจากแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำออกได้

Constantinescu[3] ยังได้ศึกษาต่อเนื่องถึงผลกระทบของแบบจำลองการไหลปั่นป่วนและความขรุขระของผนัง (Wall Roughness) ต่อการทำนายการเกิด ตำแหน่งและความแข็งแรง (Strength) ของวอร์เทกซ์ชนิดต่างๆ ผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- $\epsilon$  Turbulent Model เปรียบเทียบกับ k- $\omega$  Turbulent Model ให้รูปร่างและขนาดของวอร์เทกซ์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ตำแหน่งที่เกิดและความแข็งแรงขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลอง และการวิธีการคำนวณกับการไหลที่ผนัง และพบว่าเมื่อนำผลของความขรุขระที่ผนังมาเป็นตัวแปรในการคำนวณจะได้ค่าของวอร์เทกซ์ที่อ่อนกำลังกว่า และเป็นที่น่าสนใจว่าการออกแบบความขรุขระของผนังที่ดีเสมือนเป็นอุปกรณ์ป้องกันวอร์เทกซ์(Vortex Suppression Device) ได้เช่นกัน

Rajendran[4] จำลองบ่อสูบน้ำในห้องทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยระเบียบวิธีผลต่างปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) บ่อสูบน้ำมีรูปร่างเช่นเดียวกับกับ Constantinescu[2] แต่ได้เปลี่ยนตำแหน่งของท่อสูบน้ำให้เอียงศูนย์กับแนว

เส้นกึ่งกลางความกว้างของบ่อ โดยจะทำให้บ่อสูบน้ำนี้สามารถสร้างวอร์เทกซ์ที่ระนาบต่างๆได้ถึง 5 จุดด้วยกัน ได้แก่ ที่ระนาบผิวน้ำ ผนังบ่อสูบน้ำด้านใกล้กับท่อสูบน้ำทั้งสามด้าน และที่ระนาบพื้นบ่อ วัดค่าตัวแปรการไหลต่างๆจากบ่อสูบน้ำจำลองนี้ด้วยวิธี PIV หรือ Particle Image Velocimetry ค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากห้องทดลองถูกนำมาใช้ตรวจสอบความถูกต้องกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Rajendran ใช้สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- $\epsilon$  คำนวณที่เงื่อนไขการไหลในสภาวะคงตัว (Steady State) ผ่าน กริด (Grid) จำนวน 550,000 กริด เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองสอดคล้องกันด้วยดี

งานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลของบ่อสูบน้ำนี้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเช่นกัน

Ansar[5] ศึกษาการไหลของน้ำในบ่อสูบน้ำเช่นกัน แต่เพิ่มจำนวนท่อสูบน้ำเป็นสองท่อในบ่อสูบน้ำเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของการไหลในกรณีที่มีการไหลของน้ำขวางทิศทางการไหลหลักอีกด้วย

Shibata[6] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพยากรณ์การก่อตัวของฟองอากาศ (Cavitation) ของวอร์เทกซ์ใต้น้ำ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องขนาดของกริดที่มักจะใหญ่กว่าขนาดของฟองอากาศเสมอ สาเหตุมาจากข้อจำกัดด้านทรัพยากรคอมพิวเตอร์นั่นเองทำให้การคำนวณที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำโดยใช้จำลองวอร์เทกซ์ (Vortex Model) ซึ่งเป็นผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการ Navier-Stokes แต่การจะใช้แบบจำลองวอร์เทกซ์ดังกล่าวได้ต้องรู้ว่า มีวอร์เทกซ์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดในบ่อสูบน้ำก่อนแล้วจึงใส่แบบจำลองในบริเวณนั้น

Nagahara[7] ทำการศึกษาถึงผลของฟองอากาศในขณะประทะกับใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ต่อกำลังของเครื่องสูบน้ำชนิด Mixed Flow Impeller โดยใช้แบบจำลองย่อยส่วน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า

1. แรงกระทำต่อใบพัดเครื่องสูบน้ำ (Hydraulic Force) แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ
2. ความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ใต้น้ำแปรผันเป็นสัดส่วนตรงกับการหมุนวนที่ต้นน้ำ
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับเซอร์คิวเลชัน (Circulation) ของวอร์เทกซ์

Iwano และคณะ[8] ทำการศึกษาวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับวอร์เทกซ์ใต้น้ำพร้อมกับประยุกต์ใช้จำลองการไหลในบ่อสูบน้ำที่ติดและไม่ติดตั้ง Baffle Plate

สมการ RANS และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน RNG k- $\epsilon$  ถูกนำมาใช้ในการคำนวณที่การไหลในสภาวะคงตัวในเบื้องต้นเพื่อหาตำแหน่งก่อดำของวอร์เทกซ์

เนื่องจากการไหลที่มี Baffle Plate เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและแปรปรวนตามระยะเวลาหรือไม่คงตัว (Unsteady) นั้นเอง การคำนวณจึงต้องเปลี่ยนเงื่อนไขการคำนวณเป็นแบบไม่คงตัวโดยใช้ระเบียบวิธี SMAC และ QUICK ผลที่ได้คือ Baffle Plate ช่วยเพิ่มความเร็ววิกฤตซึ่งเป็นความเร็วที่เกิดการก่อดำของฟองอากาศให้สูงขึ้นอีก 2-3 เท่า ซึ่งหมายความว่า การติดตั้ง Baffle Plate สามารถช่วยลดการเกิดฟองอากาศในบ่อสูบน้ำรูปแบบนี้ลงได้

Bauer[9] ได้จำลองบ่อสูบน้ำด้วยขนาดย่อส่วน 1 : 4 จากแบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อเป็นการศึกษาการเกิดวอร์เทกซ์ที่อาจจะเกิดขึ้นกับบ่อสูบน้ำจริง พร้อมกับแก้ไขการเกิดวอร์เทกซ์ดังกล่าวด้วยการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดต่าง ๆ ในบ่อจำลองดังกล่าวเพื่อให้ได้การไหลของน้ำที่ดีที่สุด บ่อสูบน้ำประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำจำนวน 7 เครื่อง ด้วยขนาดที่แตกต่างกัน พบว่าเกิดการหมุนวนที่ต้นน้ำและวอร์เทกซ์ชนิดต่าง ๆ มากมายในบ่อสูบน้ำจำลองซึ่งในที่สุดแก้ไขโดยการ

- ติดตั้งแผ่นเหล็กกันระหว่างท่อสูบน้ำเพื่อป้องกันเซอร์คูเลชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำซึ่งกันและกันระหว่างท่อสูบน้ำที่อยู่ข้างเคียง
- ติดตั้ง ตะแกรง (Grating) ขนาด 5 ซม. x 5 ซม. x 5 ซม. ที่ปลายของ Strainer เพื่อลดวอร์เทกซ์ใต้น้ำที่เกิดบริเวณพื้นบ่อสูบน้ำ
- ผนังบ่อสูบด้านหลังท่อสูบน้ำติดตั้ง Splitter สี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดวอร์เทกซ์ใต้น้ำที่เกิดบริเวณผนังด้านหลังของบ่อสูบน้ำ
- วอร์เทกซ์ผิวน้ำป้องกันโดยการติดตั้งตะแกรงที่ผิวของน้ำในบ่อสูบน้ำ

นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อให้ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับบ่อสูบน้ำลักษณะอื่น ๆ ได้มากขึ้น บ่อสูบน้ำชุดที่ 2 ย่อส่วนด้วยอัตราส่วน 1:16 ประกอบด้วยบ่อสูบน้ำสี่เหลี่ยมและเครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง ที่ขนาดและกำลังการสูบน้ำเท่ากัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองชุดได้แก่เครื่องสูบน้ำทั้ง 4 เครื่องทำงานพร้อมกัน และ เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่องทำงานพร้อมกัน

Johansson[10] ได้สร้างบ่อสูบน้ำย่อส่วนจากแบบจริงควบคู่กับการใช้ CFD ในการศึกษาและแก้ไขการเกิดวอร์เทกซ์ ชนิดต่าง ๆ CFD ถูกใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นเบื้องต้นจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ในบ่อสูบน้ำ จนได้แบบบ่อสูบน้ำที่ดีแล้ว จึงดำเนินการสร้างบ่อสูบน้ำจริงในขนาดย่อส่วนเพื่อตรวจสอบปรากฏการณ์การไหลจริงอีกครั้ง ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายจากการลองผิดลองถูกในการออกแบบและแก้ไขวอร์เทกซ์โดยการใช้ CFD และทำให้ได้แบบบ่อสูบน้ำที่มั่นใจได้ว่าจะไม่ทำให้เกิดวอร์เทกซ์ ด้วยการสร้างแบบจำลองจริงนั่นเอง

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มีปัจจัยที่ทำให้เกิดวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำหลายชนิดด้วยกัน[1] ลักษณะทางกายภาพของบ่อสูบน้ำและเครื่องสูบน้ำเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวสามารถอธิบายได้ในเชิงคณิตศาสตร์ในเทอมของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameters) ปัจจัยทางกายภาพดังกล่าวได้แก่

1. ความไม่สม่ำเสมอของการไหล (Non-uniformities) ก่อนเข้าสู่ปากท่อสูบน้ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นตั้งแต่ต้นน้ำ
2. เวค (Wake) ซึ่งอาจเกิดจากชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่อยู่ต้นน้ำ
3. การไหลชนิดผนังที่เกิดขึ้นเสมอตามท่อที่ผนังเป็นของแข็ง
4. ตำแหน่งปากท่อดูดที่ไม่สมมาตรกับผนังบ่อสูบน้ำ มีแนวโน้มที่จะขยายขนาดหรือกำลัง หรือแม้แต่เปลี่ยนรูปร่างของวอร์เทกซ์ไปในทางใดทางหนึ่งเสมอ และยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวอร์เทกซ์อีกด้วย

จากปัจจัยทางกายภาพสามารถอธิบายในเทอมทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

1. ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re),  $Re = \frac{VD}{\nu}$  หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงเนื่องจากความหนืด
2. ตัวเลขฟรูด (Froude Number, F),  $F = \frac{U_{ref}}{\sqrt{gs}}$  หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก
3. เซอร์คิวเลชัน (Circulation Number, Nc),  $Nc = \frac{\Gamma D}{Q_c}$
4. ตัวเลขเวเบอร์ (Waber Number, W),  $W = \frac{V^2 \rho D}{\sigma}$  หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงตึงผิว
5. ตัวเลขออยเลอร์ (Euler Number, E),  $E = \frac{u}{\sqrt{\Delta P / \rho}}$  หรือก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงเนื่องจากความดัน

จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรมากมายที่มีผลต่อการไหลในบ่อสูบน้ำ และการตัดตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งออกเพื่อลดความซับซ้อนสมการลงก็จะส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้ต้องพึ่งพา CFD เนื่องจาก CFD สามารถคำนวณครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแต่ละตัวแต่ละตัวได้ครบถ้วนกว่า โดยขึ้นอยู่กับสมการที่เลือกใช้ซึ่งแปรผันตามทรัพยากรของเครื่องคำนวณที่มีอยู่

สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes หรือ RANS เป็นสมการตั้งต้นในการคำนวณปัญหาการไหล สมการนี้ได้รับการพัฒนามาจากสมการ Navier-Stokes ที่การไหลปกติ โดยได้ปรับสมการให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยต่อเวลา เพื่อแยกค่าการไหลเฉลี่ยซึ่งสามารถคำนวณได้ง่ายออกจากค่าแปรปรวนตามเวลาซึ่งไม่สามารถคำนวณได้โดยสมการทั่วไป การแก้สมการค่าแปรปรวนตามเวลาสามารถทำได้โดยการเพิ่มชุดของสมการที่สอดคล้องกับการไหลแต่ละประเภทหรือที่เรียกกันว่าแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วนนั่นเอง (Turbulent Model)

RANS ถูกแก้สมการด้วยวิธี Implicit ซึ่งให้ผลการคำนวณที่เป็นค่าเฉลี่ย แต่ความน่าเชื่อถือของคำตอบกลับขึ้นอยู่กับแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่นำมาใช้

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลทั่วไปได้แก่สมการ Navier – Stokes ดังนี้  
สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

ในพิกัดทรงกระบอกหรือ Cylindrical Coordinate จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equations)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) \quad (3)$$

ในพิกัดทรงกระบอกหรือ Cylindrical Coordinate จะได้

*r – Coordinate*

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = \quad (4)$$

$$- \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] + \rho g_r$$

$\theta$  – Coordinate

$$\rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta \quad (5)$$

$z$  – Coordinate


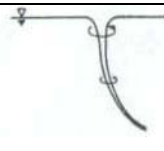
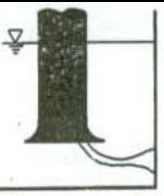
$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (6)$$

## 2.3 วอร์เทกซ์

### 2.3.1 ชนิดของวอร์เทกซ์

สามารถจำแนกชนิดของวอร์เทกซ์ตามลักษณะของการเกิดได้ดังภาพประกอบ 4

	<p>การหมุนต้นน้ำ (Swirl) หรือการหมุนวนของน้ำที่ระดับผิวซึ่งอาจจะเกิดขึ้นก่อนที่ต้นน้ำแล้วมาขยายกำลังใหญ่ขึ้นที่ท่อสูบน้ำ หรืออาจจะเกิดจากความไม่สมมาตรของการไหลที่ท่อสูบน้ำเอง การหมุนต้นน้ำ คือจุดเริ่มต้นของการเกิดวอร์เทกซ์ระดับรุนแรงต่อไปซึ่งก็คือวอร์เทกซ์ผิวน้ำ</p>
	<p>วอร์เทกซ์ผิวน้ำ (Free Surface Vortex) มีพัฒนาการมาจากการหมุนต้นน้ำแต่รุนแรงมากกว่าโดยเกิดเป็นวงของอากาศไหลเข้าสู่ท่อสูบน้ำ วิธีการป้องกันวอร์เทกซ์ชนิดนี้ทำได้ไม่ยากนักเนื่องจากมีมาตรฐานการออกแบบระบุไว้อย่างแพร่หลาย เช่น การเพิ่มความลึกของท่อสูบน้ำ (Submergence) การสลายการหมุนวนที่ต้นน้ำโดยใช้อุปกรณ์พิเศษ ซึ่งจะกล่าวถึงโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.5</p>
	<p>วอร์เทกซ์ใต้น้ำ (Submerged Vortex) เป็นวอร์เทกซ์ที่เกิดขึ้นเองใต้ผิวน้ำอันเนื่องจากความดัน ณ จุดนั้นๆ ลดลงต่ำกว่าความดันของการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ทำให้เกิดการเดือดของน้ำและเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวการเป็นไอ แล้วไหลเข้าสู่ปากท่อสูบน้ำ ข้อสังเกตคือวอร์เทกซ์ชนิดนี้มักเกิดขึ้นที่ผนังหรือพื้นของบ่อสูบน้ำ การคาดเดาการเกิด ตำแหน่งที่เกิดหรือกำลังของวอร์เทกซ์ทำได้ค่อนข้างยาก</p>
<p>ภาพประกอบ 4 แสดงวอร์เทกซ์ชนิดต่างๆ[1]</p>	

### 2.3.2 คุณลักษณะของวอร์เทกซ์

เซอร์คิวเลชันและวอร์เทกซ์ (Circulation and Vorticity)[11]

เซอร์คิวเลชันหรือ  $\Gamma$  (gamma) หมายถึงการอินทิเกรตความเร็วไปตามเส้นโค้งปิดใดๆ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Gamma = \oint_L \vec{V} \cdot d\vec{L} = \oint V \cos \beta \, dL \quad (7)$$

เมื่อ  $\vec{V}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วในสนามการไหลที่ตำแหน่ง  $dL$  ของเส้นโค้งปิด

$\vec{L}$  คือ เส้นโค้งปิดใดๆ

$\beta$  คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วและเส้นสัมผัสเส้นรอบโค้งปิด ณ ตำแหน่ง  $dL$  ในทิศทางที่เป็นบวก

หรือสามารถแสดงในรูปของอนุพันธ์ในพิกัด  $x$ - $y$  ได้ดังนี้

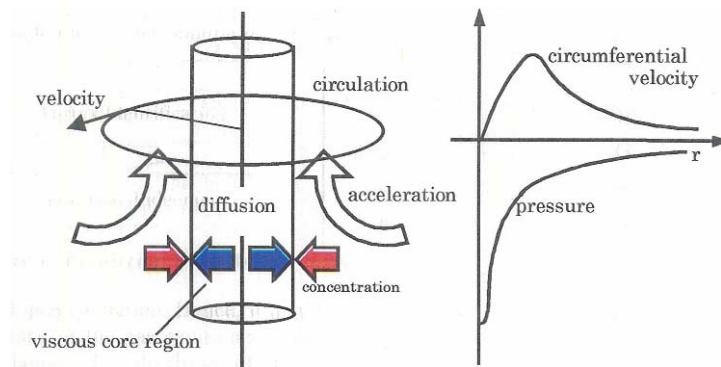
$$d\Gamma = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy \quad (8)$$

วอร์เทกซ์หรือ  $\xi$  ( $\xi$ ) หมายถึงผลลัพธ์ของเซอร์คิวเลชันต่อพื้นที่ภายในของเส้นโค้งปิด แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\xi = \frac{d\Gamma}{dx dy} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

ความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วในแนวสัมผัส (Axial and Tangential Velocity) คือความเร็วที่มีทิศทางพุ่งเข้าหรือออกจากจุดศูนย์กลางการหมุนหรือจุดกำเนิดในพิกัด  $r - \theta$  (พิกัดทรงกระบอกในระนาบ 2 มิติ) ส่วนความเร็วในแนวสัมผัสคือความเร็วที่ตั้งฉากกับความเร็วในแนวรัศมี ณ ตำแหน่งใดๆ

การกระจายความดันและความเร็วในแนวสัมผัสของวอร์เทกซ์แสดงได้ดังภาพประกอบ 5 ที่จุดศูนย์กลางของการหมุนมีความเร็วในแนวสัมผัสเป็นศูนย์ และจะเพิ่มขึ้นในทิศทางออกจากจุดศูนย์กลาง จนถึงจุดหนึ่งความเร็วจะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเท่ากับของไหลบริเวณใกล้เคียงที่ไม่ได้เกิดวอร์เทกซ์ (Free Stream) ในขณะที่ความดันที่จุดศูนย์กลางการหมุนมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าความดันของการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในทิศทางพุ่งออกจากจุดศูนย์กลาง จนมีค่าเท่ากับความดันของของไหลบริเวณใกล้เคียงเช่นกัน



ภาพประกอบ 5 แสดงการเกิดวอร์เทกซ์และความสัมพันธ์ของความดันและความเร็วในแนวสัมผัสเทียบกับระยะในทิศพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางการหมุน [6]

## 2.4 ทฤษฎีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหล

### 2.4.1 ทฤษฎีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

ในสภาวะการไหลปั่นป่วนสมบัติการไหลต่างๆ เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาของการไหลและไม่มีรูปแบบที่คงที่ ทำให้ยากต่อการคาดเดาสมบัติดังกล่าว ในทางปฏิบัติจึงใช้หลักการของค่าเฉลี่ยและในที่นี้ใช้เกณฑ์การเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา เมื่อนำมาประยุกต์กับสมการ Navier-Stokes จะได้สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{\rho u_i' u_j'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (11)$$

โดยที่เทอม  $(\bar{\quad})$  หมายถึงค่าเฉลี่ยของตัวแปรนั้นๆ และเทอม  $(\quad')$  หมายถึงค่าแปรปรวน (Fluctuation) ที่อยู่นอกช่วงของค่าเฉลี่ย สมการดังกล่าวรู้จักกันในนามสมการ Reynolds Averaged Navier-Stokes หรือ RANS ดังนั้นสมการ RANS จึงประกอบด้วยเทอมเฉลี่ยบวกกับเทอมแปรปรวน

จากสมการที่ (11) เปรียบเทียบกับสมการที่ (4) ถึง (6) จะพบว่า มีเทอมที่เพิ่มขึ้นมาหนึ่งเทอม คือ  $\tau_{ij}$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

เทอมนี้เป็นตัวแทนของความแปรปรวนของการไหลนั่นเองและดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นว่า เทอมแปรปรวนถูกแทนที่ด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วนเพื่อให้สมการการไหลสามารถหาค่าได้

แบบจำลองการไหลปั่นป่วนมีให้เลือกใช้หลายแบบด้วยกัน สำหรับการจำลองการไหลที่เกิดวอร์เทกซ์ที่ผนัง Constantinescu[2] แนะนำให้ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิด Two Layer k- $\epsilon$  ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ครอบคลุมการคำนวณการไหลชนิดผนังอันเป็นจุดที่เกิดวอร์เทกซ์ และยังช่วยให้ง่ายต่อการคำนวณเนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขขอบเขตที่ผนัง

หลักการคำนวณของ Two Layer k- $\epsilon$  คือการแบ่งเขตการคำนวณเป็น 2 เขตด้วยกันได้แก่[11] เขตที่ 1 การไหลเป็นแบบปั่นป่วนและมีผลของความหนืดน้อย

การคำนวณในเขตนี้ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- $\epsilon$  หรือพลังงานจลน์(Kinetic) และอัตราการสลาย(Dissipation) ตามลำดับ k คำนวณได้จากสมการแม่นยำตรง  $\epsilon$  ได้จากการคาดเดา และในการพัฒนาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ต้องใช้สมมติฐานที่การไหลแบบปั่นป่วน และไม่มีผลกระทบของความหนืดมาเกี่ยวข้อง (Fully Turbulence) และนี่เองที่ทำให้สมการนี้ไม่สามารถใช้คำนวณการไหลชนิดผนังที่ซึ่งมีผลของความหนืดเป็นส่วนสำคัญได้ สมการแบบจำลอง k- $\epsilon$  เป็นดังนี้

Transport Equation สำหรับ k

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (13)$$

Transport Equation สำหรับ  $\epsilon$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (14)$$

เมื่อ  $\mu_t$  = Eddy Turbulent Viscosity และมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (15)$$

## เขตที่ 2 การไหลชนิดผนังที่ซึ่งมีผลของความหนืดเป็นส่วนสำคัญ

การคำนวณในเขตการไหลนี้ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนเช่นเดียวกับการไหลในเขตที่ 1

เพียงแต่ค่าของ  $\mu_t$  คำนวณจาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{kl_\mu} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (17)$$

เมื่อ

$$l_\mu = C_l y \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\text{Re}_y}{A_\mu}\right) \right] \quad (18)$$

$$l_\varepsilon = C_l y \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\text{Re}_y}{A_\varepsilon}\right) \right] \quad (19)$$

### 2.4.2 การดิสครีตสมการควบคุม (Discretization)

ขั้นตอนต่อไปหลังจากที่ได้สมการควบคุมคือการเลือกวิธีดิสครีตสมการควบคุมดังกล่าว ซึ่งมีหลายวิธีการได้แก่ 1.) Finite Difference Method (FV) 2.) Finite Volume Method (FV) และ 3.) Finite Element Method

Fluent เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่คำนวณบนพื้นฐานของวิธีการทาง Finite Volume ซึ่งจะกล่าวถึงโดยสังเขปดังนี้

Finite Volume Method ใช้พื้นฐานของ Integral Form ของสมการอนุพันธ์เป็นจุดเริ่มต้น และพื้นที่คำนวณถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรย่อยๆขนาดเล็กเรียกว่าปริมาตรควบคุม (Control Volume) ปริมาตรควบคุมทั้งหมดถูกคำนวณโดยใช้สมการอนุพันธ์ในรูปของ Integral Form ผ่านจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละปริมาตรหลังจากนั้นตัวแปรต่างๆที่ต้องการจะถูกประมาณค่า (Interpolation) จากจุดศูนย์กลางปริมาตรไปยังพื้นผิวทั้งหมดด้านหรือก็คือจุดต่อของแต่ละปริมาตรควบคุมนั่นเอง ด้วยเหตุนี้เองทำให้การคำนวณไม่ต้องอ้างอิงจากพิกัดอ้างอิงเช่น พิกัดฉาก หรืออื่นๆเป็นต้น

โปรแกรม Fluent[12] ทำการดิสครีตสมการควบคุมให้เป็นสมการพีชคณิตให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถคำนวณเชิงตัวเลขได้โดยใช้เทคนิคของปริมาตรควบคุม กล่าวคือสมการควบคุมจะถูกอินทิเกรตที่แต่ละปริมาตรควบคุม ผลที่ได้เป็นสมการพีชคณิตที่ยังคงกฎการอนุรักษ์

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (20)$$

โดยที่

- $\rho$  = ความหนาแน่น  
 $\vec{v}$  = เวกเตอร์ความเร็ว  
 $\vec{A}$  = เวกเตอร์ของพื้นผิว  
 $\Gamma_\phi$  = ค่าคงที่ของการแพร่ (Diffusion) ของเทอม  $\phi$   
 $\nabla_\phi$  = เกรเดียนของ  $\phi$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $(\partial\phi/\partial x)i + (\partial\phi/\partial y)j$   
 ในระนาบ 2 มิติ  
 $S_\phi$  = แหล่งกำเนิดของ  $\phi$  ต่อหนึ่งปริมาตรควบคุม

ผลที่ได้จากการอินทิเกรตสมการควบคุมที่แต่ละปริมาตรควบคุมตามสมการที่ (20) แสดงได้ตามสมการที่ (21)

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (21)$$

เมื่อ

- $N_{faces}$  = จำนวนพื้นผิวที่ปิดล้อมเซลล์  
 $\phi_f$  = ค่าของ  $\phi$  ที่ถูกพาให้ไหลผ่านพื้นผิว  $f$   
 $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$  = ฟลักซ์ของมวลของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิว  
 $\vec{A}_f$  = พื้นผิว  $f$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $|A| = |A_x i + A_y j|$  ในระนาบ 2 มิติ  
 $(\nabla \phi)_n$  = ค่าของ  $\nabla \phi$  ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว  $f$   
 $V$  = ปริมาตรของเซลล์

สมการที่นี้เป็นรูปแบบสุดท้ายของสมการควบคุมที่โปรแกรม Fluent นำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข

### 2.4.3 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Scheme)

ปัจจุบันมีนักวิจัยที่คิดค้นแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขมากมาย ซึ่งขอกล่าวถึงเฉพาะแบบแผนที่ใช้ในการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent ดังนี้

#### 2.4.3.1 แบบแผนวิธีผลต่างอันดับสอง (2<sup>nd</sup>-order upwind differencing scheme)

แบบแผนวิธีผลต่างอันดับสองถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำในการคำนวณให้สูงขึ้น โดยอาศัยอนุกรมขยายของเทเลอร์ (Taylor Series Expansion) จากตัวแปรที่จุดศูนย์กลางเซลล์ของปริมาตรควบคุมแล้วทำการประมาณค่าต่างๆที่ต้องการที่ผิวเซลล์แต่ละด้านด้วยสมการที่ (22)

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \Delta \vec{S} \quad (22)$$

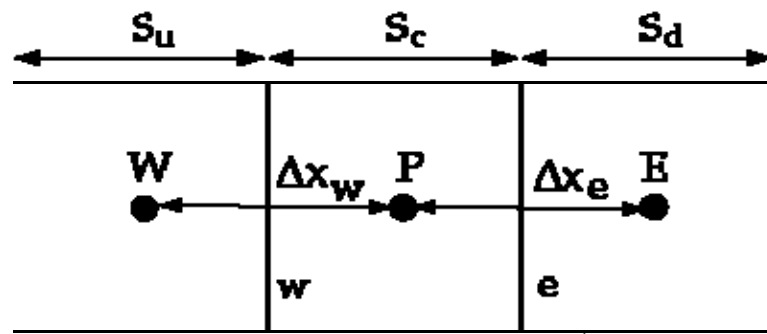
โดยที่  $\phi$  และ  $\nabla \phi$  คือค่าตัวแปรที่จุดศูนย์กลางเซลล์และค่า Gradient ที่ต้นน้ำของเซลล์ ส่วน  $\Delta \vec{S}$  คือเวกเตอร์ระยะขจัดจุดศูนย์กลางไปยังผิวเซลล์ ค่า  $\nabla \phi$  ที่แต่ละเซลล์หาได้จากความทฤษฎี Divergence Theorem แสดงได้ดังสมการที่ (23)

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \tilde{\phi}_f \vec{A}_f \quad (23)$$

$\tilde{\phi}_f$  หาได้จากการเฉลี่ยค่าของตัวแปร  $\phi$  ระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกัน

#### 2.4.3.2 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics Differencing Scheme, QUICK)

แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกใช้ในการประมาณค่าสำหรับตัวแปร  $\phi$  ที่ผิวเซลล์ของเทอมการพา (Convection) ในสมการควบคุม วิธีการประมาณค่าใช้พื้นฐานของค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) อันดับสองร่วมกับการประมาณค่าส่วนกลาง จากภาพประกอบ 6 พิจารณาที่พื้นผิว e ถ้าการไหลเริ่มจากทางด้านซ้ายมือ ไปยังขวามือ สามารถหาค่าของ  $\phi$  ที่ e ได้ดังสมการที่ (24)



ภาพประกอบ 6 ปริมาตรควบคุมในหนึ่งมิติ

$$\phi_e = \theta \left[ \frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[ \frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_w \right] \quad (24)$$

โดยที่  $\theta = 1$  จะได้ให้ค่าประมาณที่จุดศูนย์กลางอันดับสองและเมื่อ  $\theta = 0$  จะได้ให้ค่าที่ด้านต้นลมอันดับสอง ในการคำนวณยุคแรกๆ นิยมใช้  $\theta = 1/8$

ข้อดีของ QUICK คือให้ผลการคำนวณสำหรับแบบจำลองที่เป็น Structure Grid ได้แม่นยำ

#### 2.4.3.3 แบบแผนวิธี PRESTO

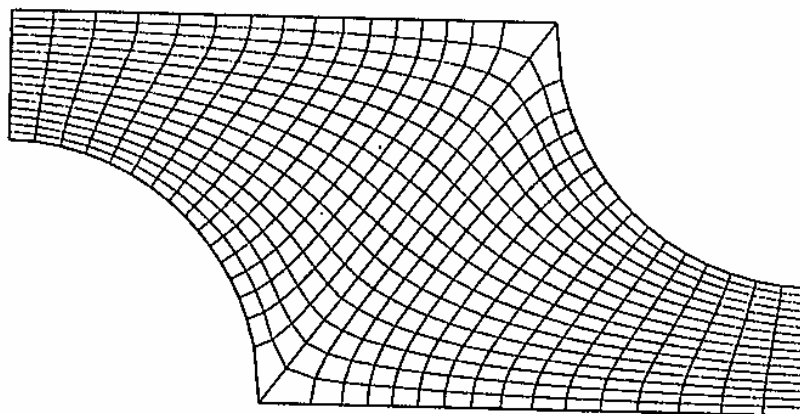
PRESTO นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการไหลที่ค่า Rayleigh-Number สูงๆ หรือการไหลแบบหมุนที่ความเร็วสูง หรือการไหลที่มีตัวกลางเป็นวัสดุพรุน เป็นต้น ซึ่งจะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำมากขึ้น

#### 2.4.4 กริด (Grid)

กริดคือตัวแทนย่อยๆ ของแบบจำลองที่ถูกคำนวณผ่านสมการควบคุม ดังนั้นลักษณะการจัดเรียงและชนิดของกริดของแบบจำลองนั้นๆ จึงส่งผลกระทบต่อระยะเวลา ค่าใช้จ่าย และความแม่นยำในการคำนวณ การจัดเรียงตัวของกริดสามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้[13]

กริดเรียงตัวแบบโครงสร้าง (Structure Grid หรือ Regular Grid)

คือกริดที่มีการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างและมีระเบียบแบบแผน สังกะยไต่ได้จากลายเส้นของกริด จะไม่มีการลากตัดผ่านตัวเองและจะลากตัดผ่านเส้นอื่นๆ เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงกริดชนิดเรียงตัวแบบโครงสร้าง[13]

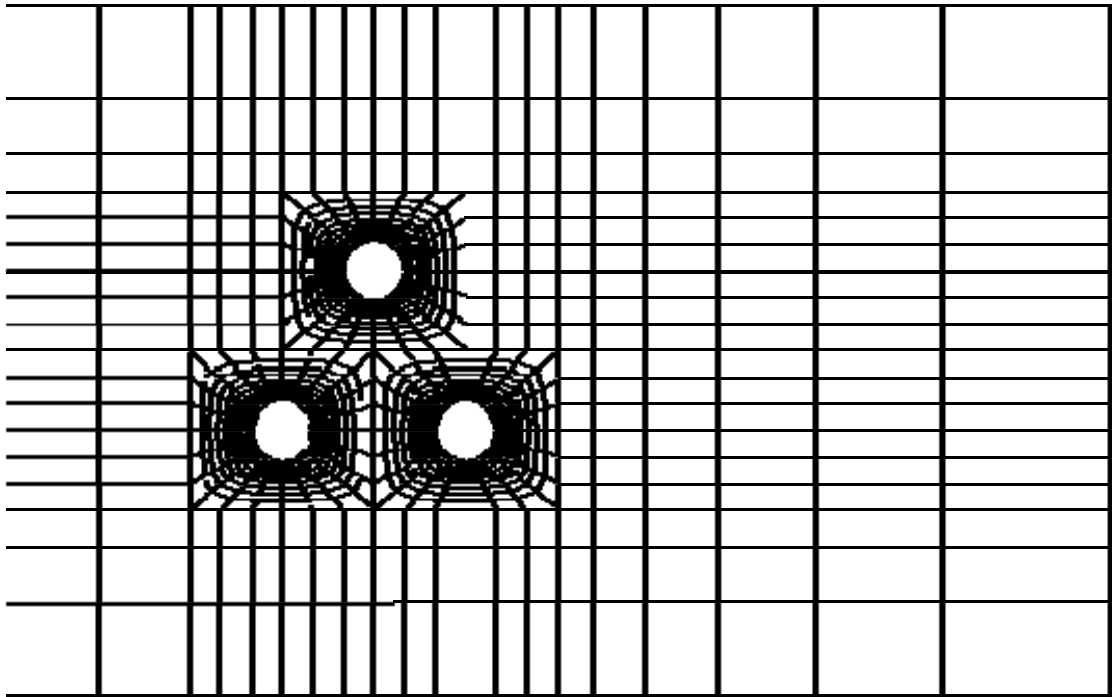
จากรูปแบบโครงสร้างนี้เองทำให้ง่ายต่อการคำนวณในรูปแบบของเมตริกซ์ (Matrix) โดยที่แต่ละจุดสามารถอ้างอิงจากพิกัดฉากได้โดยง่าย แต่ข้อดีของกริดแบบโครงสร้างก็คือสามารถใช้กับรูปทรงที่เป็นเรขาคณิตเท่านั้น และยังยากต่อการควบคุมการกระจายความหนาแน่นของกริดในบางพื้นที่ที่ต้องการความถูกต้องในการคำนวณมากขึ้น ผลที่ได้อาจจะทำให้เซลล์บางจุดมีรูปร่างที่ไม่ดีเช่น บางแคบ แต่มีความยาวมาก ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณคลาดเคลื่อนได้ง่าย

#### กริดเรียงตัวแบบโครงสร้างกลุ่ม (Block Structure Grid)

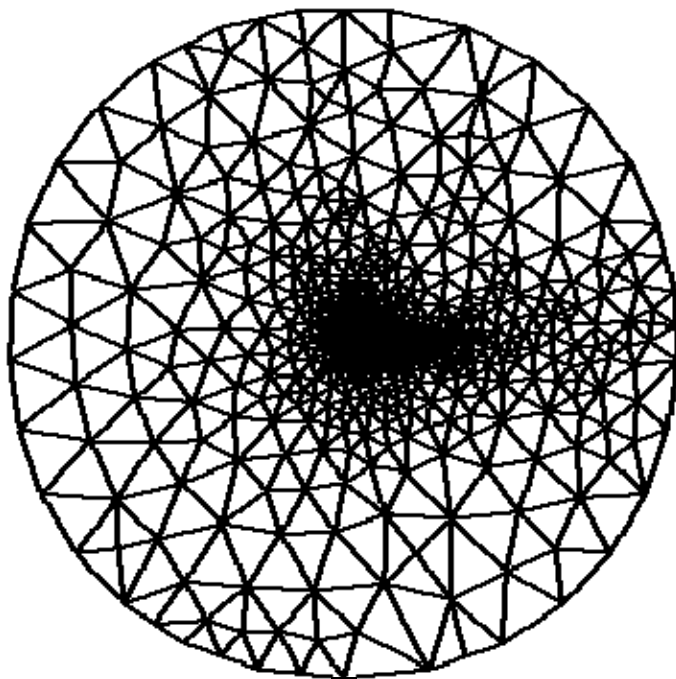
รูปแบบจะคล้ายกับกริดแบบโครงสร้าง แต่ได้ทำการปรับปรุงข้อดีให้สามารถใช้กับรูปทรงที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้นได้ ด้วยวิธีการแบ่งแบบจำลองออกเป็นปริมาตรย่อยๆตามลักษณะรูปร่างของแบบจำลองหรือตามการกระจายความละเอียดของกริดที่ต้องการ หลังจากนั้นที่แต่ละปริมาตรย่อยๆนั้นจะถูกแบ่งย่อยเป็นปริมาตรควบคุมอีกครั้งโดยใช้หลักการของกริดแบบโครงสร้างนั่นเอง ดังแสดงในภาพประกอบ 8

#### กริดชนิดเรียงตัวแบบไร้รูปแบบ (Unstructured Grid)

ในกรณีที่รูปทรงของแบบจำลองมีความซับซ้อนมาก จนไม่สามารถใช้กริดแบบโครงสร้างหรือกริดแบบโครงสร้างกลุ่มได้ นิยมใช้กริดที่ไร้รูปแบบในการเรียงตัวในการสร้างแบบจำลองขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 8 แสดงกริดชนิดเรียงตัวแบบโครงสร้างกลุ่ม[12]



ภาพประกอบ 9 แสดงกริดชนิดเรียงตัวแบบไร้รูปแบบ[12]

จะเห็นได้ไม่มีข้อจำกัดของรูปร่างของแต่ละเซลล์และการจัดเรียงตัว ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกรูปร่างของแบบจำลอง แต่ด้วยเหตุนี้เองรูปแบบของเมตริกซ์จะมีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้การคำนวณต้องใช้กระบวนการและระยะเวลามากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเรื่องปกติที่แบบจำลองที่สร้างโดยใช้การเรียงตัวของกริดชนิดนี้จะใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนานกว่า

#### คุณภาพของเมช (Mesh Quality)

คุณภาพของเมช มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแม่นยำและเสถียรภาพในการคำนวณ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพได้แก่ การกระจายตัวของโหนด (Node) ความต่อเนื่องและการทำมุมระหว่างกริด

#### ความหนาแน่นของโหนด (Node Density)

ปรากฏการณ์การไหลที่สำคัญจะเกิดเฉพาะบางบริเวณของแบบจำลองเท่านั้น ดังนั้นการสร้างแบบจำลองที่กระจายความหนาแน่นของกริด เฉพาะบริเวณดังกล่าวจะช่วยให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สำหรับการไหลที่บริเวณขีดผนัง เพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น มีข้อกำหนดสำหรับการความหนาแน่นของเซลล์ที่บริเวณของเซลล์ดังสมการที่ (25)

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{v_x}} \leq 1 \quad (25)$$

เมื่อ  $y_p$  = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของเซลล์แรกกับผนัง

$u_\infty$  = ความเร็วของของไหลที่ต้นน้ำ

$v$  = ค่าคงที่ความหนืดของของไหล

$x$  = ระยะห่างจากผนังไปยังจุดใดๆที่ทำการคำนวณในแนวเดียวกับผนัง

สมการดังกล่าวอ้างอิงจาก Blasius Solution สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ผ่านแผ่นเรียบที่มุมปะทะเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาแน่นของโหนด ส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณและความเร็วในการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์เช่นกัน

#### ความต่อเนื่อง (Smoothness)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดอย่างทันทีทันใดระหว่างเซลล์ ที่อยู่ติดกันอาจส่งผลกระทบต่อผลต่างระหว่างสมการควบคุมในรูปอนุพันธ์และสมการที่ถูกดิสครีตแล้วเรียกผลต่างนี้ว่า Truncation Errors ในทางปฏิบัติ จะพยายามควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างให้ค่อยๆเป็นค่อยๆไป

#### รูปร่างของเซลล์ (Cell Shape)

รูปร่างของเซลล์รวมถึงการทำมุม (Skewness) ระหว่างเซลล์ และอัตราส่วนระหว่างด้าน (Aspect Ratio) ของเซลล์ ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ โดยการทำมุมระหว่างเซลล์ หมายถึงความแตกต่างระหว่างรูปร่างของเซลล์ระหว่างเซลล์นั้นๆกับเซลล์มาตรฐานที่มีปริมาตรเท่ากัน ความแตกต่างยิ่งมากยิ่งทำให้ความแม่นยำและเสถียรภาพในการคำนวณลดลง เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนระหว่างด้านของเซลล์ที่จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณ ในการสร้างแบบจำลองนิยามรักษาให้อัตราส่วนระหว่างด้านไม่เกิน 5:1

### 2.4.5 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยวิธีเชิงการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล

นอกจากการทดสอบความถูกต้องเทียบกับงานวิจัยอ้างอิงดังที่ได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.4.1 แล้ว จำเป็นต้องทดสอบแบบจำลองทางทฤษฎีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลด้วยเพื่อให้แบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น การทดสอบดังกล่าวมีดังนี้

#### 2.4.5.1 ความเหมือน (Consistency)

หมายถึงความเหมือนระหว่างสมการบังคับกับสมการสมการพีชคณิต ที่ได้ผ่านกระบวนการดิสครีตไม่ว่าจะเป็นระยะกริดหรือค่าขั้นเวลา (Time Step) ผลต่างระหว่างสมการทั้งสองก็คือค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการดิสครีตสมการควบคุมหรือ Truncation Error นั่นเอง โดยจะกล่าวว่

สมการมีความเหมือนกันก็ต่อเมื่อ Truncation Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อระยะห่างระหว่างกริดและค่า  
 ้้นเวลามีค่าเข้าใกล้ศูนย์

#### 2.4.5.2 เสถียรภาพ (Stability)

หมายถึงเสถียรภาพของกระบวนการคำนวณ โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องไม่ทำ  
 ้ให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการคำนวณ ซึ่งเสถียรภาพจะทำให้มั่นใจว่าผลลัพธ์  
 จากการคำนวณมีความถูกต้อง

#### 2.4.5.3 การลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence)

ผลการคำนวณจะมีคุณสมบัติลู่เข้าก็ต่อเมื่อ ผลเฉลยของการคำนวณมีแนวโน้มมีค่าเข้าใกล้  
 ้กับสมการแม่นยำเมื่อระยะห่างระหว่างกริดมีแนวโน้มมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

#### 2.4.5.4 การอนุรักษ์ (Conservation)

เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณอยู่บนกฎของการอนุรักษ์ ดังนั้นกระบวนการคำนวณเชิง  
 ้ตัวเลขทั้งหมดก็ต้องเป็นไปตามกฎนี้ด้วย

#### 2.4.5.5 ขอบเขตจำกัด (Boundedness)

ผลที่ได้จากการคำนวณต้องอยู่ในขอบเขตที่จำกัด เช่นในทางกายภาพ สมบัติของความ  
 ้หนาแน่น พลังงานจลน์ ค่าความปั่นป่วน ต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ หรือจำนวน ความเข้มข้น ควรจะต้อง  
 ้มีค่าอยู่ระหว่าง 0% ถึง 100% เป็นต้น

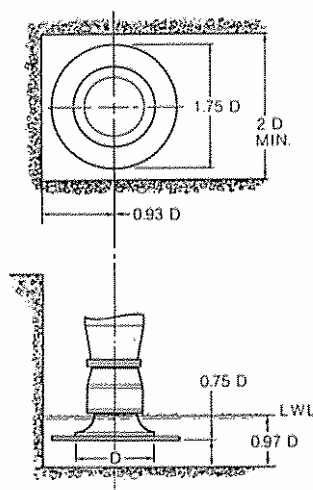
#### 2.4.5.6 ความแม่นยำ (Accuracy)

หมายถึงไม่ว่ากระบวนการคำนวณจะดำเนินไปกี่ครั้งก็ตาม ผลการคำนวณที่ได้จะต้องไม่  
 ้แตกต่างกันไปจากเดิม

## 2.5 วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่ใช้ในปัจจุบัน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และเป็นการปูพื้นฐานความรู้ในเบื้องต้นของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิดของเบรกเกอร์ที่มีใช้ในปัจจุบัน ข้อดี ข้อด้อยและลักษณะการนำไปใช้พอสมควร เนื่องด้วยชื่อของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ทั้งหมดเป็นภาษาอังกฤษและผู้แต่งเห็นว่าเป็นชื่อที่รู้จักกันดีในวงการดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความสับสนจากการแปลเป็นภาษาไทย จึงขอใช้ชื่อเป็นภาษาอังกฤษในการกล่าวถึง วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดต่างๆมีดังนี้[14]

### 2.5.1 Suction Umbrella



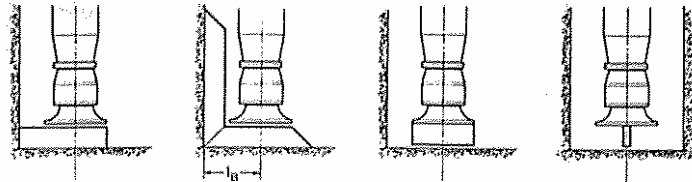
ภาพประกอบ 10 Suction Umbrella[14]

วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดนี้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางยังผล (Effective Diameter) ของท่อดูด ทำให้สามารถลดระยะที่ท่อสูบน้ำจะต้องจุ่มลงไปใต้น้ำให้น้อยลง ซึ่งนิยมใช้ในกรณีที่สูบน้ำตื้น วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเกิดของวอร์เทกซ์ผิวน้ำโดยเฉพาะ

### 2.5.2 Vertical Splitter

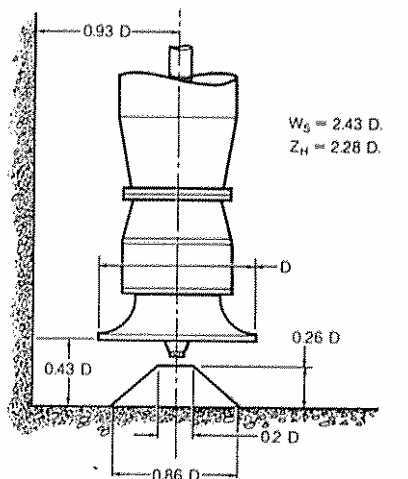
ถูกออกแบบมาใช้ในการป้องกันวอร์เทกซ์ใต้น้ำ อันเนื่องมาจากความเร็วของการไหลที่มากเกินไปหรือมีการกวนการไหล (Disturbance) ที่ใต้น้ำ เช่น ตะแกรงดักขยะ เป็นต้น โดยตัวเบรกเกอร์จะช่วยลดความเร็วของการไหลและสลายผลของการกวนที่ใต้น้ำลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงโดยติดตั้งเบรกเกอร์ไว้ที่ผนังด้านหลังของบ่อสูบในกรณีที่ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากผนังมากเกินไป ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดวอร์เทกซ์ประการหนึ่ง ข้อควรระวังคือเบรกเกอร์ชนิดนี้ไม่มีผลต่อการเพิ่ม-ลดระยะ

จุ่มของท่อ (Submergence) และยังไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในบ่อที่มีการไหลขวางตัดกันและกัน (Cross Flow) เช่นการไหลที่มีท่อสูบน้ำหลายเครื่องและไม่ได้ติดตั้งแผ่นกั้นระหว่างท่อสูบน้ำ



ภาพประกอบ 11 Vertical Splitter[14]

### 2.5.3 Suction Cone



ภาพประกอบ 12 Suction Cone[14]

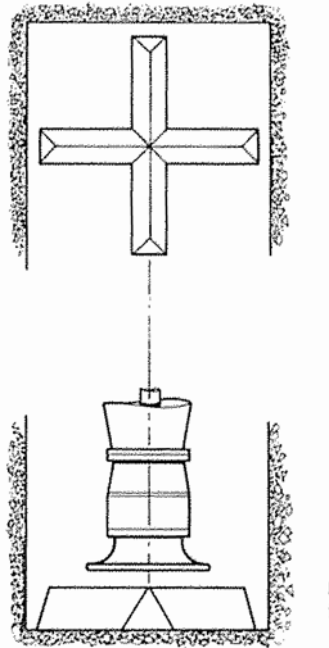
อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับ Vertical Splitter แต่มีข้อดีที่สามารถใช้ในการไหลที่มีการไหลขวางตัดกันได้

### 2.5.4 Cruciform

หรือ X-Shape เบรกเกอร์ทำหน้าที่เพิ่มความเป็นระเบียบของการไหลของน้ำที่เข้าสู่ปากท่อสูบน้ำ นิยมใช้ในกรณีที่ท่อสูบน้ำมีความยาวน้อยและมีการกวนที่ต้นน้ำ ส่วนการเลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสามารถทำได้เพียงวิธีเดียวคือการทดสอบกับแบบจำลองเท่านั้น

### 2.5.5 Suction Elbow

ใช้ในกรณีที่ต้องการลดความเร็วของน้ำก่อนเข้าสู่ปากท่อสูบน้ำ แต่มีข้อควรระวังในการเลือกใช้งานเนื่องจาก อุปกรณ์ชนิดนี้มีผลต่อการสูญเสียทางพลศาสตร์การไหล



ภาพประกอบ 13 Cruciform[14]

### 2.5.6 Perforated Plates-Vertical and Horizontal

ในห้องทดสอบการไหลนิยมใช้ตะแกรงติดตั้งในบ่อสูบน้ำทั้งในแนวระดับหรือแนวตั้ง เพื่อลดความปั่นป่วนของการไหลในบ่อสูบลง วัตถุประสงค์เพื่อป้องกันวอร์เทกซ์ผิวน้ำ

### 2.5.7 Baffle Wall

ในบางครั้งที่การไหลของน้ำในบ่อไม่สมดุลง กล่าวคือมีความเร็วของการไหลที่ผิวน้ำมากกว่าใต้น้ำ วอร์เทกซ์ก็ยังสามารถก่อตัวได้ที่ต้นน้ำถึงแม้ว่าความลึกของท่อสูบน้ำจะถูกออกแบบให้ได้ตามมาตรฐานแล้วก็ตาม การแก้ไขทำได้โดยติดตั้ง Baffle Wall เพื่อช่วยยับยั้งความเร็วดังกล่าวให้น้อยลง

### 2.5.8 Floating Rafts

อาจนับได้ว่าเป็นวิธีการป้องกันวอร์เทกซ์ชนิดแรกๆ โดยการวางแพลอยที่ผิวน้ำเพื่อป้องกันวอร์เทกซ์ที่ผิวน้ำ และจะป้องกันได้ผลเมื่อขนาดของแพใหญ่เพียงพอ ในบางครั้งวอร์เทกซ์อาจย้ายที่มาเกิดที่ขอบของแพทำให้ต้องมีการเพิ่มขนาดของแพจนกว่าจะสามารถแก้ไขได้

### 2.5.9 Ventilated Dividing Walls

เมื่อมีท่อสูบน้ำมากกว่า 1 ท่อในบ่อสูบน้ำและต้องมีการทำงานพร้อมกัน การติดตั้ง Dividing Wall เป็นวิธีการหนึ่งที่แก้ปัญหาไหลขวางตัดกันในบ่อสูบน้ำนั้นได้

### 2.5.10 Corner Fillets

เป็นที่ทราบกันดีว่าวอร์เทกซ์มักจะเกิดที่บริเวณมุมของบ่อสูบน้ำด้านหลังท่อสูบน้ำ ดังนั้นการปิดพื้นที่นี้โดยการลบมุมออกจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่นิยมใช้ในการป้องกันการก่อตัวของวอร์เทกซ์ แทนการขยายความกว้างของบ่อสูบน้ำซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่า อย่างไรก็ตามก็มีข้อควรระวังในการใช้กับบ่อสูบน้ำที่มีการไหลขวางตัดกัน

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

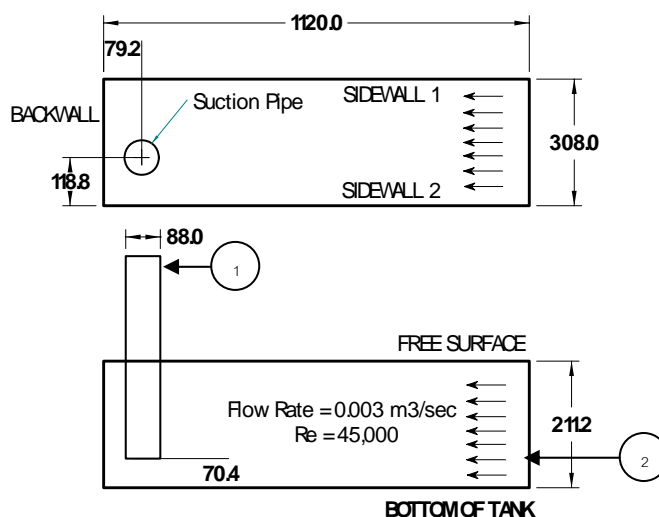
#### 3.1 สมมติฐานในการวิจัย

ตัวแปรความกว้าง และความสูงของเบรกเกอร์มีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการป้องกันวอร์เทกซ์ได้น้ำของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

#### 3.2 แบบจำลองท่อสูบน้ำ

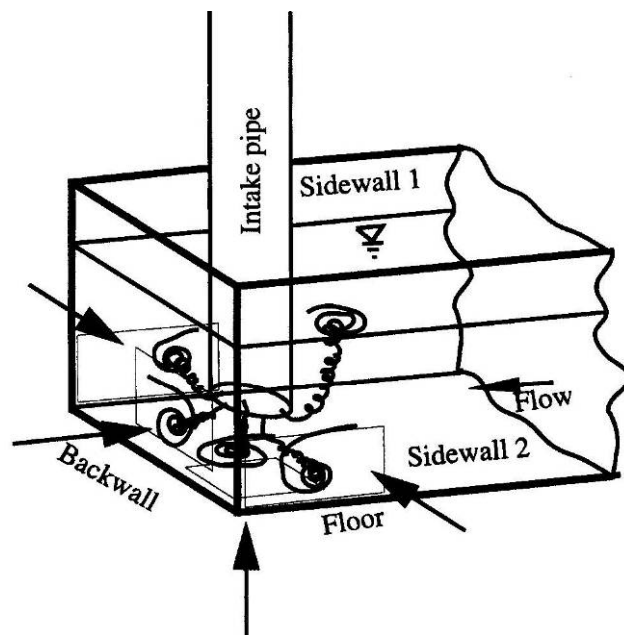
##### 3.2.1 แบบจำลองก่อนการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

ท่อสูบน้ำจำลองของ Rajendran และคณะ [4] เป็นแบบที่นำมาใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ โดยมีขนาดกว้าง 0.38 เมตร ยาว 1.2 เมตรและสูง 0.46 เมตร ปากท่อมีท่อสูบน้ำซึ่งต่อกับเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 88 มิลลิเมตรและน้ำไหลเข้าท่อสูบน้ำด้วยอัตรา 0.003 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 รูปร่างและขนาดของท่อสูบน้ำจำลอง

ท่อสูบน้ำจำลองของ Rajendran และคณะ [4] สามารถสร้างวอร์เทกซ์ที่ระนาบต่างๆของท่อได้มากถึง 5 ตำแหน่งด้วยกัน โดย 3 ตำแหน่งเกิดที่ผนังรอบท่อสูบน้ำ และ 2 ตำแหน่งที่เหลือเกิดที่พื้นท่อและผิวน้ำดังแสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 แสดงตำแหน่งของวอร์เท็กซ์ที่ระนาบต่างๆของบ่อสูบ

ผลการคำนวณที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ Rajendran และคณะ [4] ได้ตัดระนาบขนานกับผนังของบ่อสูบน้ำที่ระยะห่างหนึ่งๆ และนำข้อมูลที่ปรากฏบนระนาบดังกล่าวมาใช้ในการแสดงผล ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการคำนวณของงานวิจัยนี้ได้จึงแสดงผลการคำนวณที่ระนาบเดียวกัน ระนาบดังกล่าวประกอบด้วย

- พื้นบ่อสูบน้ำ แสดงวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นบ่อสูบน้ำ ได้จากการตัดระนาบขนานกับพื้นบ่อที่ระยะ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสูบน้ำ
- ผนังบ่อสูบน้ำ 1 แสดงวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นที่ผนังบ่อสูบน้ำ ได้จากการตัดระนาบขนานกับผนังบ่อ 1 ที่ระยะ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสูบน้ำ
- ผนังบ่อสูบน้ำ 2 แสดงวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นที่ผนังบ่อสูบน้ำ ได้จากการตัดระนาบขนานกับผนังบ่อ 2 ที่ระยะ 0.15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสูบน้ำ
- ผนังหลังบ่อสูบน้ำ แสดงวอร์เท็กซ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นบ่อสูบน้ำ ได้จากการตัดระนาบขนานกับผนังหลังบ่อที่ระยะ 0.23 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อสูบน้ำ

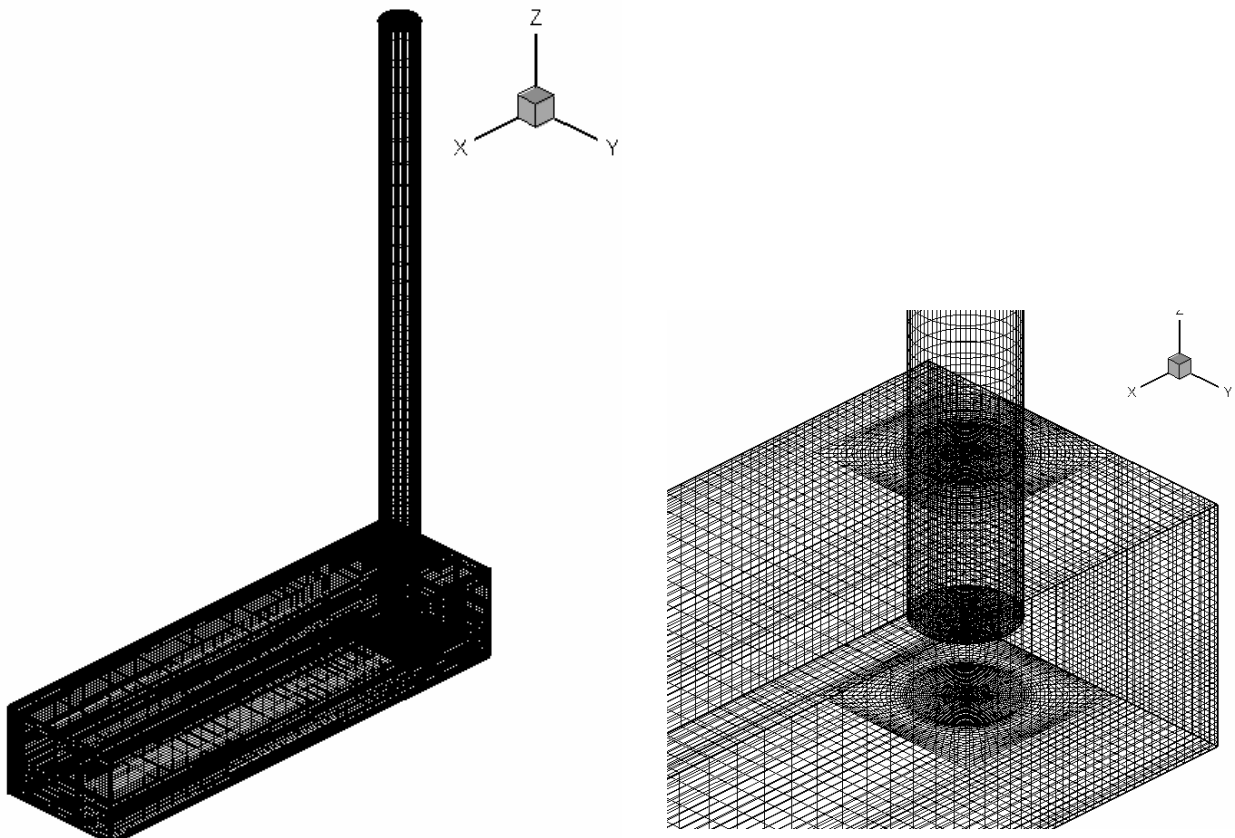
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่างานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับวอร์เท็กซ์ที่เกิดใต้น้ำเท่านั้น ดังนั้นผลการคำนวณที่ระนาบ 0.16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากผิวน้ำจึงไม่แสดง ณ ที่นี้

ค่าเรย์โนลด์ส์คำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อสูบน้ำมีค่า 45000 ค่าฟรูดและเวเบอร์มีค่า 0.55 และ 325 ตามลำดับ

จากขนาดของบ่อสูบตามที่แสดงใน ภาพประกอบ 14 ถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Gambit เวอร์ชัน 2.0.4 ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของกริดที่ใช้เป็นชนิดโครงสร้างกลุ่ม โดยเน้นความละเอียดของกริดเฉพาะบริเวณผนังรอบๆ ท่อสูบน้ำและบริเวณท่อสูบน้ำจากนั้นความละเอียดค่อยๆ น้อยลงเป็นสัดส่วนไปยังบริเวณที่เหลือ ทั้งนี้เพื่อให้จำนวนกริดรวมที่ได้ไม่มากเกินไปอันอาจทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรคอมพิวเตอร์ และยังทำให้ระยะเวลาในการคำนวณยาวนานขึ้น จากวิธีการดังกล่าวได้จำนวนกริดรวมเท่ากับ 578,025 กริด ประกอบด้วยกริดที่เล็กสุดขนาด  $1.25e-10$  ลูกบาศก์เมตร และกริดขนาดที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $1.84e-06$  ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่แบบจำลองคอมพิวเตอร์ของ Rajendran มีจำนวนกริดเท่ากับ 550,000 กริด โดยจำนวนกริดดังกล่าวผ่านการทดสอบความถูกต้องของผลการคำนวณต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของกริดแล้ว ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มคลาดเคลื่อนเมื่อปริมาณกริดน้อยลง แต่ในขณะเดียวกันปริมาณกริดที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ได้ทำให้ผลการคำนวณที่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากนักซึ่งจะได้แสดงถึงผลของการทดสอบดังกล่าวไว้ในบทที่ 4

### 3.2.2 แบบจำลองหลังติดตั้งวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์

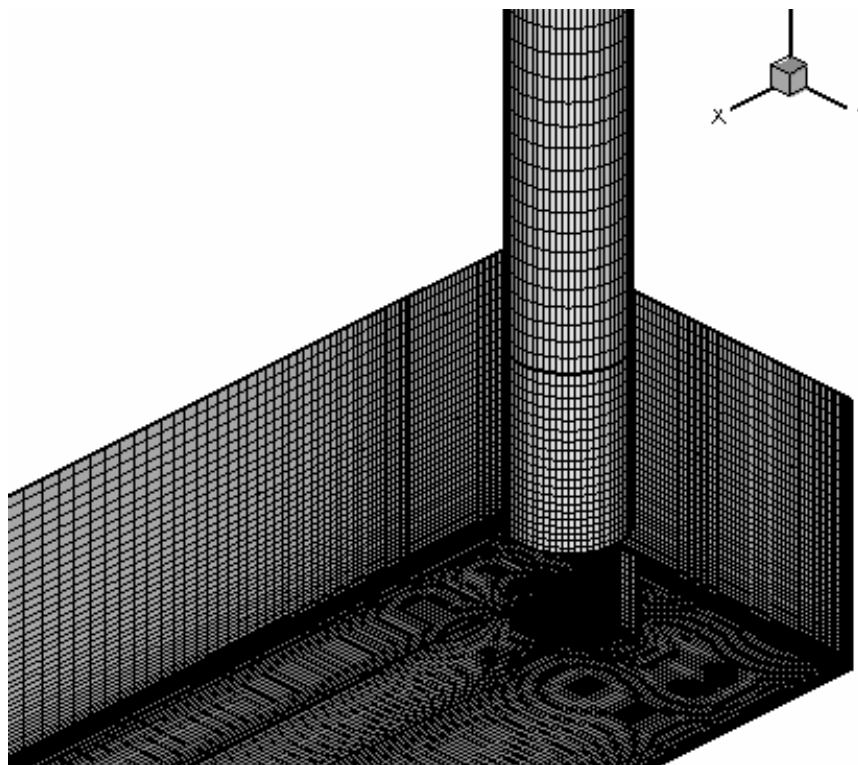
แบบจำลองในหัวข้อที่ 3.2.1 เป็นเสมือนต้นแบบของงานวิจัยครั้งนี้ โดยหลังจากที่แบบจำลองได้รับการตรวจสอบว่าอยู่ในเงื่อนไขที่ถูกต้อง และสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองในห้องทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการปรับปรุงโดยการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันวอร์เท็กซ์หรือวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์ในบ่อสูบน้ำเพื่อศึกษาถึงผลของการป้องกันวอร์เท็กซ์ที่แต่ละระนาบ อย่างไรก็ตามมีตัวแปรมากมายที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการป้องกันวอร์เท็กซ์ได้แก่ ตำแหน่งที่ติดตั้ง ขนาดความกว้าง ความยาวและความหนา รูปร่าง และมุมที่กระทำต่อทิศทางการไหล นอกจากนี้รูปร่างและตำแหน่งของท่อสูบน้ำยังส่งผลกระทบต่อผลโดยตรงด้วยเช่นกัน ในทางปฏิบัติจึงเป็นไปได้ที่จะพยายามหาข้อสรุปถึงผลกระทบของตัวแปรทั้งหมดต่อความสามารถในการป้องกันวอร์เท็กซ์



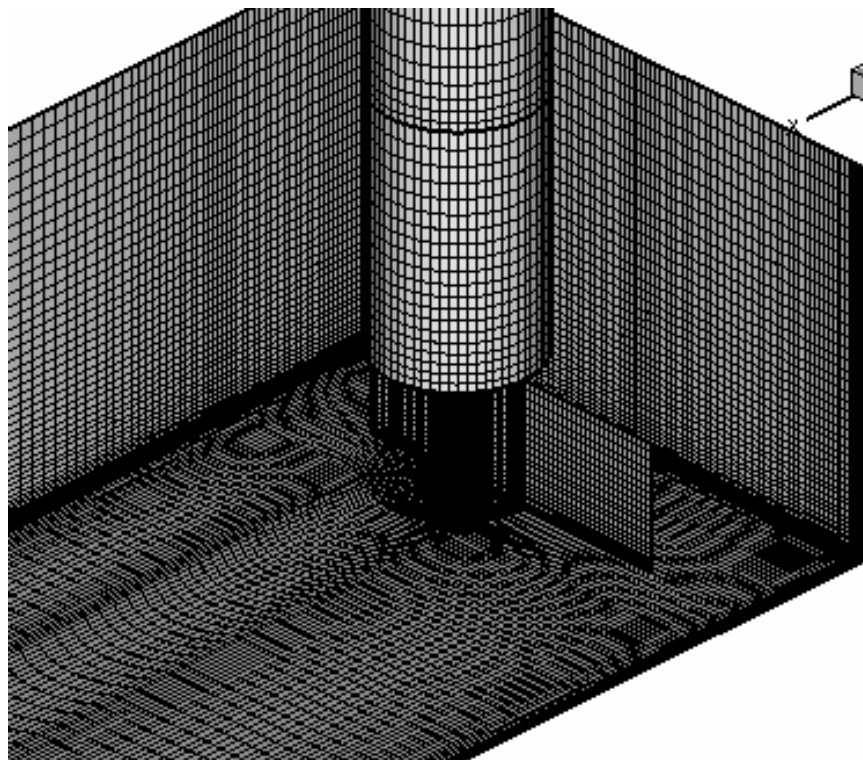
ภาพประกอบ 16 แบบจำลองโดยโปรแกรม Gambit

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา จึงเลือกตัวแปรความกว้างและความยาวของเบรกเกอร์รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามาใช้ในการทำวิจัย โดยเบรกเกอร์ดังกล่าวถูกติดตั้งขวางทางการไหลของน้ำ ด้านหนึ่งยึดติดกับพื้นบ่อสูบน้ำ และเพิ่มขนาดอีกสามด้านที่เหลือ ดังแสดงในภาพประกอบ 17 ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองได้กำหนดให้ความหนาของเบรกเกอร์เป็นผนังบางทั้งนี้เพื่อให้การสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้ง่ายขึ้น

การเพิ่มขนาดของเบรกเกอร์ทำโดย กรณีที่ 1 ขยายความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์จากจุดศูนย์กลางความกว้างของบ่อออกไปทางด้านข้างของผนังบ่อทั้งสองด้านและกรณีที่ 2 เพิ่มความสูงของเบรกเกอร์จากพื้นบ่อไปประจวบกับปากท่อสูบน้ำ

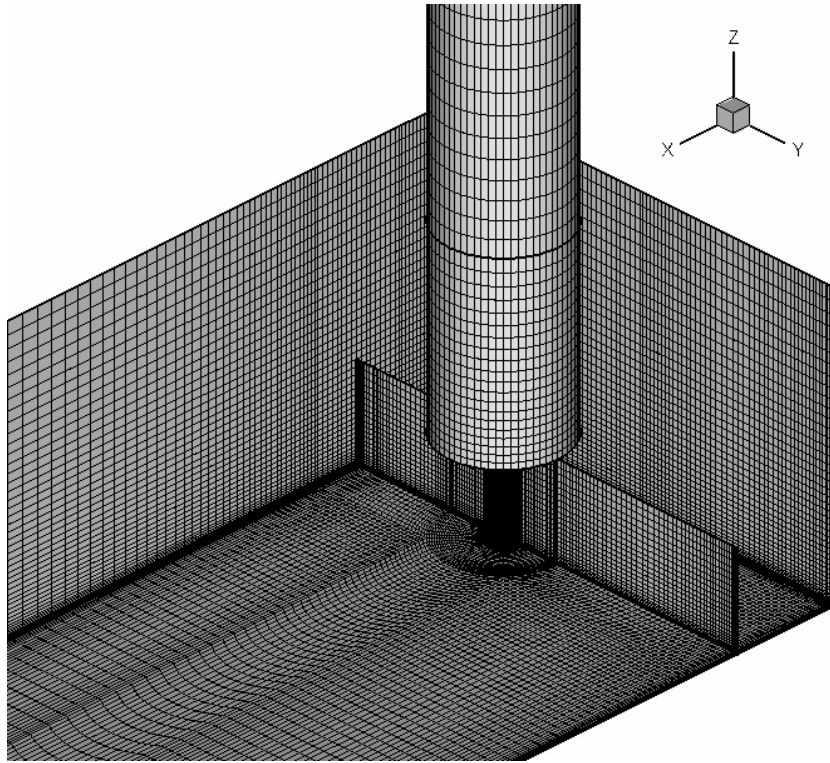


กรณีที่ 1.1 W=61.6 mm



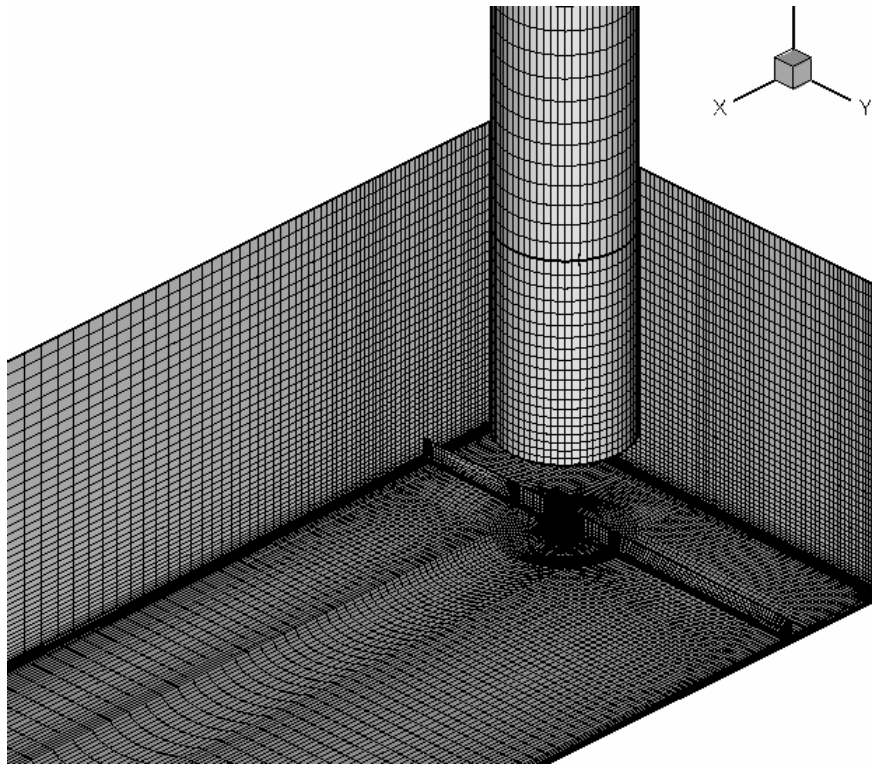
กรณีที่ 1.2 W=184.8 mm

ภาพประกอบ 17 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อติดตั้งวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์ขนาดต่างๆ

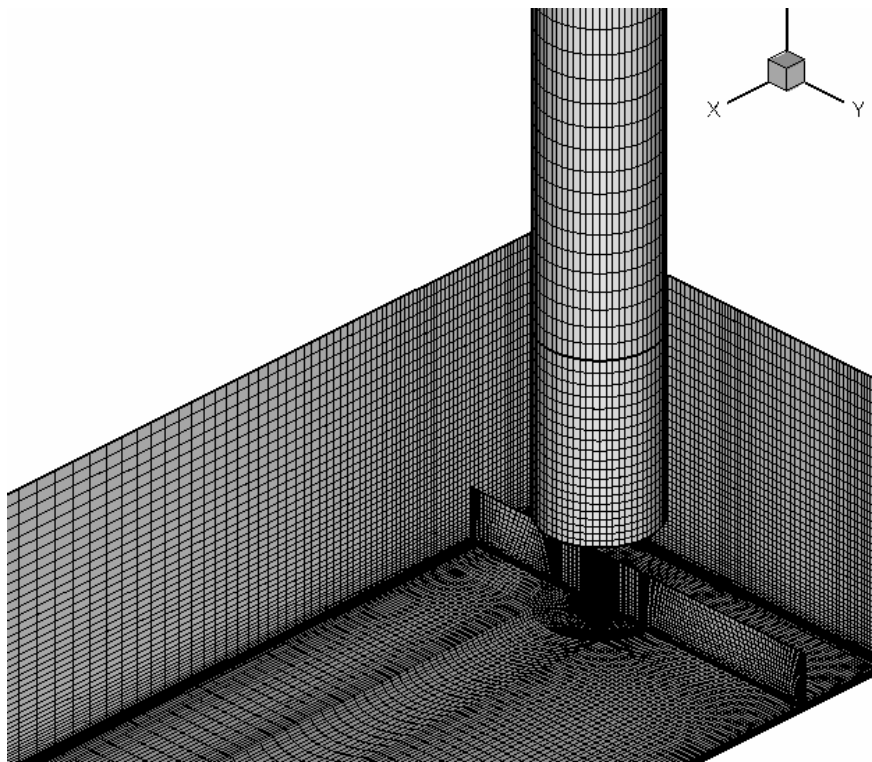


กรณีที่ 1.3 W=308 mm

ภาพประกอบ 17 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อติดตั้งวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์ขนาดต่างๆ(ต่อ)

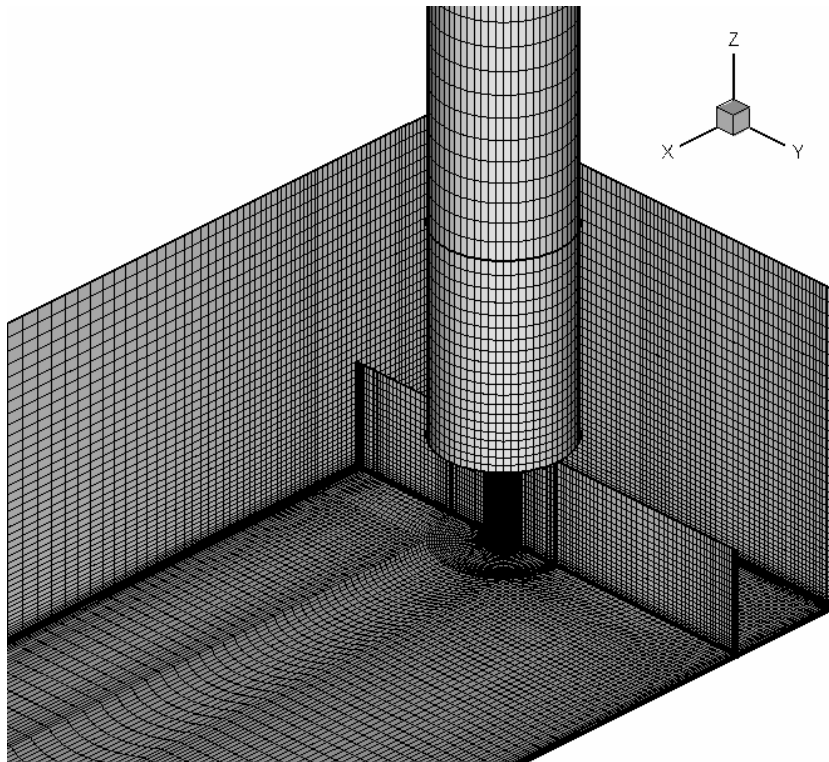


กรณีที่ 2.1 H=14.1 mm



กรณีที่ 2.2 H=42.2 mm

ภาพประกอบ 17 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อติดตั้งวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์ขนาดต่างๆ(ต่อ)



กรณีที่ 2.3 H=70.4 mm

ภาพประกอบ 17 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อติดตั้งวอร์เท็กซ์เบรกเกอร์ขนาดต่างๆ(ต่อ)

### 3.3 การคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการดำเนินการวิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Fluent Version 5.5 ในการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณบนพื้นฐานของวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงปริมาตร (Finite Volume Based Method)

#### 3.3.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT

ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้สำหรับโปรแกรมได้แสดงดังต่อไปนี้

1. Solver	Segregated
2. Formulation	Implicit
3. Space	3D
4. Time	Unsteady
5. Velocity Formulation	Absolute
6. Unsteady Formulation	1 <sup>st</sup> Order Implicit
7. Turbulent Model	RNG

8. Near Wall Treatment	Enhance Wall Treatment	
9. Model Constant	1. $C_{\mu} = 0.0845$ 2. $C_1-\epsilon = 1.42$ 3. $C_2-\epsilon = 1.68$	
10. Water Density	998.2 kg/m <sup>3</sup>	
11. Viscosity	0.001003 kg/m s	
12. Under Relaxation Factors	1. Pressure	= 0.3
	2. Density	= 1.0
	3. Body Force	= 1.0
	4. Momentum	= 0.7
13. Discretization	Pressure	PRESTO
	Pressure Velocity Coupling	SIMPLEC
	Momentum	QUICK
	Turbulence Kinetic	2 <sup>nd</sup> Order
	Energy	Upwind
14. Time Step	0.05 วินาที	
15. Max Iteration / Time Step	50 Iteration	
16. Convergence Criteria (Residual)	Continuity	0.00018
	x-Velocity	1e-05
	y-Velocity	1e-05
	z-Velocity	1e-05
	k	1e-05

โปรแกรมคำนวณบนเงื่อนไขของการไหลที่ไม่คงตัว (Unsteady Flow) และใช้ k- $\epsilon$  เป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วน

### 3.3.2 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

สิ่งสำคัญในการคำนวณที่ถูกต้องคือการป้อนเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองก่อนการคำนวณซึ่งถือเป็นเรื่องที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนพอสมควร แต่นับว่าเป็นข้อได้เปรียบของโปรแกรม FLUENT ที่ทำให้เรื่องนี้น่าง่ายขึ้น โดยการกำหนดค่าของทางน้ำเข้าและออกเท่านั้น ส่วนที่เหลือของบ่อจะถูกกำหนดเป็นผนังและน้ำโดยอัตโนมัติ จากภาพประกอบ 14

- 1 กำหนดเป็น Velocity Inlet ที่ความเร็ว 0.0461 เมตรต่อวินาที
- 2 กำหนดเป็น Pressure Outlet โดยกำหนด Gauge Pressure เท่ากับศูนย์และมีค่าคงที่

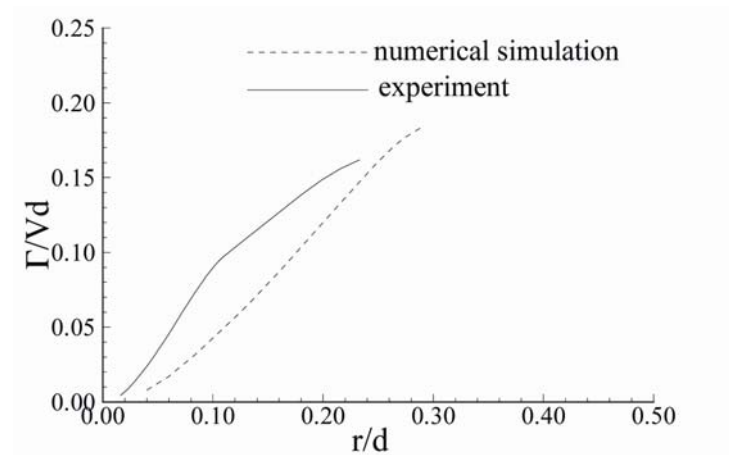
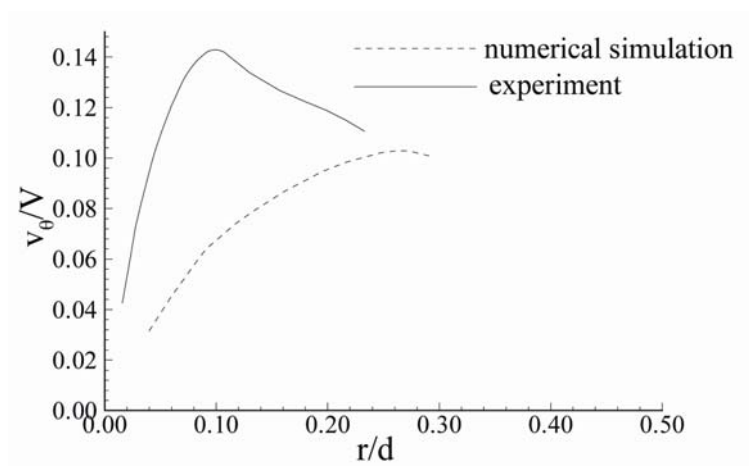
## 3.4 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ถึงแม้การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล จะให้ความสะดวกในการลดเวลาและค่าใช้จ่าย แต่ผลลัพธ์ที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นประกอบกับการคำนวณได้ใช้วิธีการลองผิด-ลองถูก (Trial and Error) ในการแทนที่ค่าตัวแปรในสมการ ดังนั้นก่อนที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในเงื่อนไขอื่นๆ ต้องมีการทดสอบถึงความถูกต้องของแบบจำลองรวมถึงวิธีการที่ใช้ในการคำนวณก่อน ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังต่อไปนี้

### 3.4.1 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเทียบกับงานวิจัยอ้างอิง

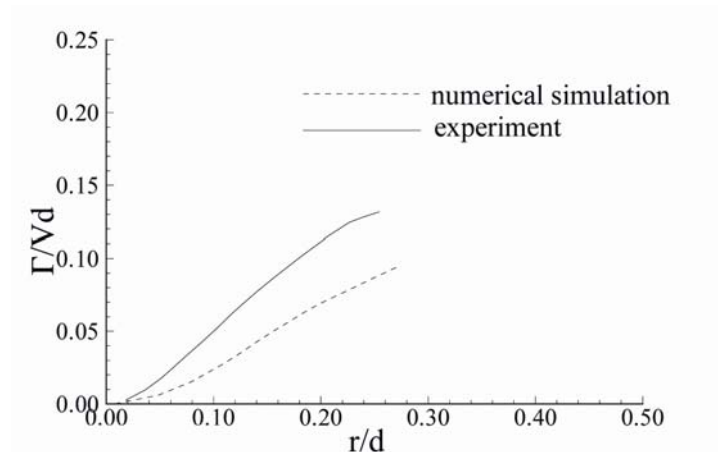
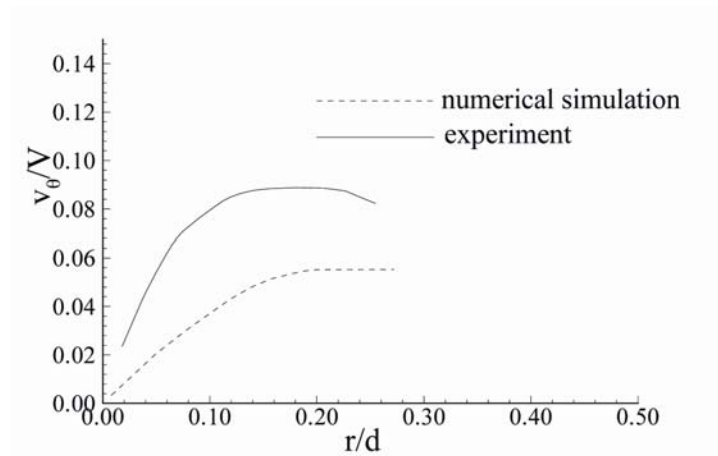
ในงานวิจัยของ Rajendran ได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเซอร์คิวเลชันและความเร็วในแนวสัมผัสหรือก็คือ ในแนวที่ตั้งฉากกับรัศมีการหมุนนั่นเอง ที่ตำแหน่งต่างๆจากจุดศูนย์กลางของวอร์เทกซ์ที่ระนาบต่างๆ ของบ่อสูบน้ำดังแสดงในภาพประกอบ 18 โดยได้เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล ตัวแปรดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย ดังนี้

เซอร์คิวเลชันแสดงในเทอมของ  $\frac{\Gamma}{Vd}$  และ ความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนแสดงในเทอมของ  $\frac{v_\theta}{V}$  โดยทั้งสองเทอมเปรียบเทียบกับ  $\frac{r}{d}$  ซึ่งเป็นระยะแนวแกนรัศมีจากจุดศูนย์กลางของวอร์เทกซ์



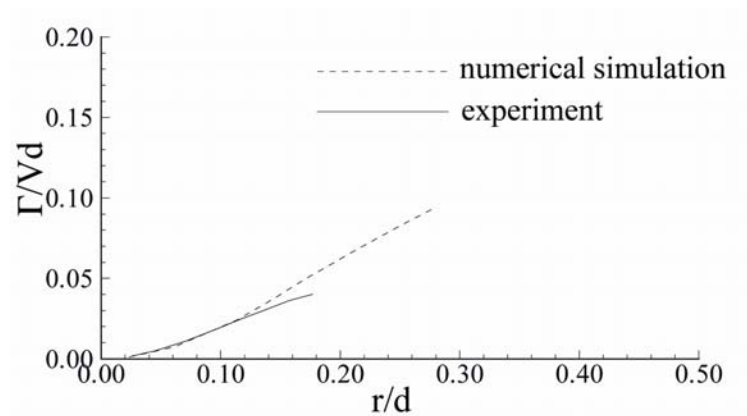
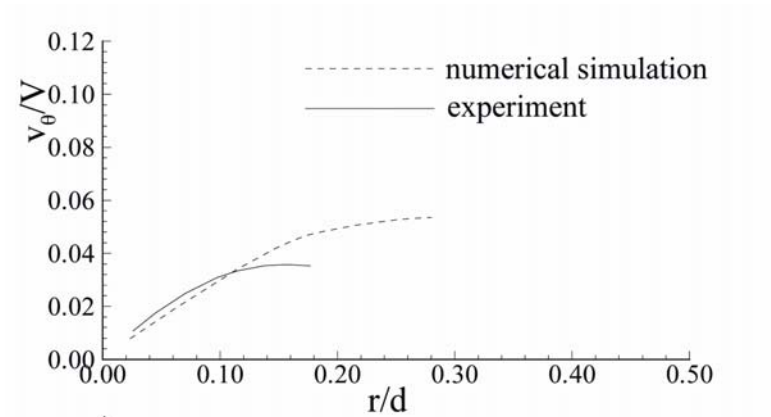
a) Floor Vortex

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับรัศมีการหมุนของวอร์เทกซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Rajendran[4]



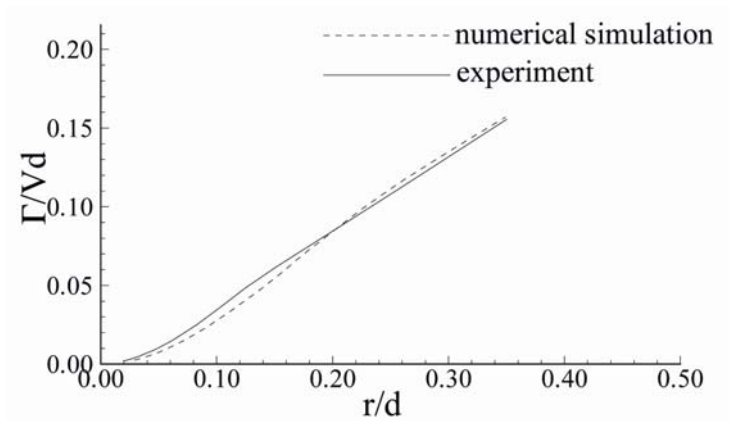
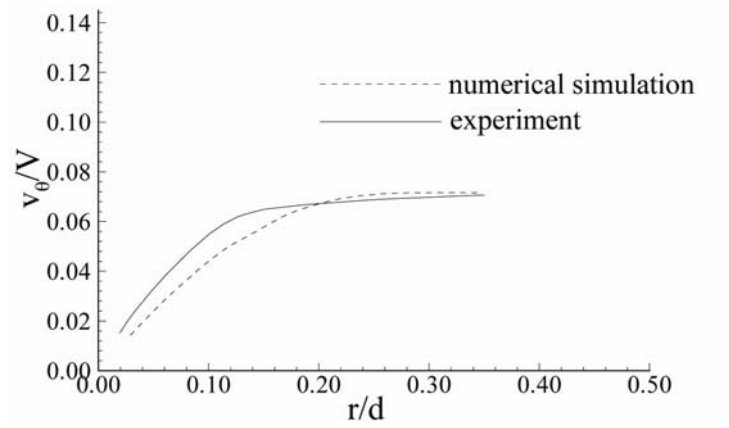
b) Backwall Vortex

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับรัศมีการหมุนของวอร์เทกซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Rajendran[4](ต่อ)



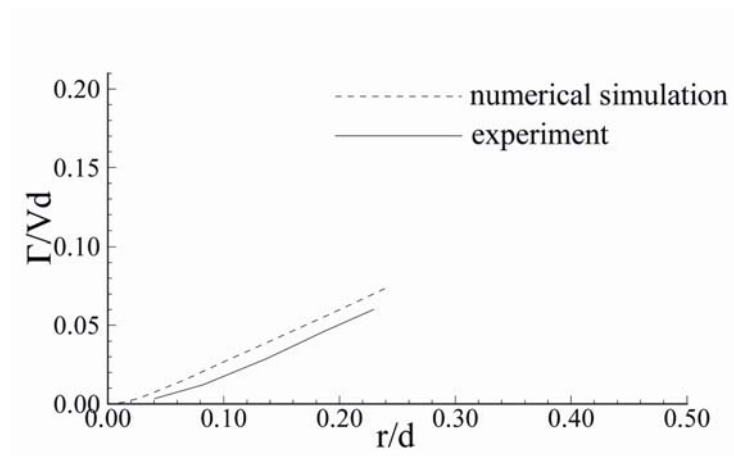
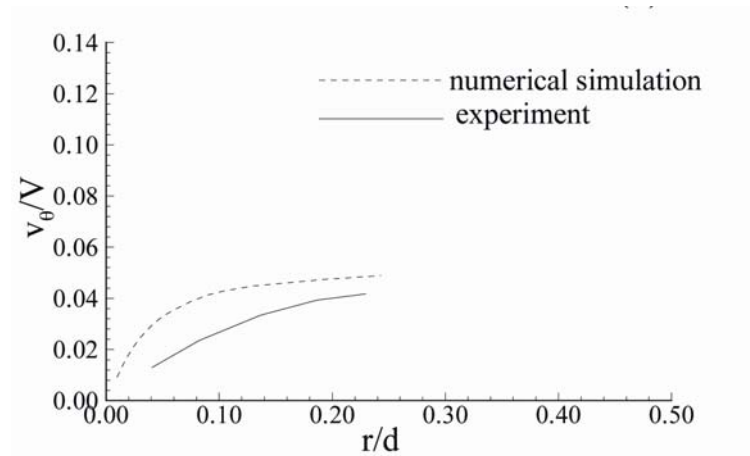
c) Sidewall 1 Vortex

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับรัศมีการหมุนของวอร์เท็กซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Rajendran[4](ต่อ)



d) Sidewall 2 Vortex

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับรัศมีการหมุนของวอร์เท็กซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Rajendran[4](ต่อ)



e) Free Surface Vortex

ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงการหมุนวนและความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนเทียบกับรัศมีการหมุนของวอร์เทกซ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Rajendran[4](ต่อ)

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองบ่อสูบน้ำเดียวกัน ฉะนั้นเพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น ผลการคำนวณที่ได้จึงถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Rajedran ก่อนการเพิ่มวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

#### 3.4.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกริด

เพื่อเป็นข้อพิสูจน์ว่าความละเอียดของกริดที่ใช้ในกับแบบจำลองเพียงพอ ดังนั้นการทดสอบความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณต่อความละเอียดกริดจึงมีความสำคัญ และเพื่อไม่ให้แบบจำลองมีความละเอียดของกริดมากเกินไปจนเกินความจำเป็นอันจะทำให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์ช้าลง

แบบจำลองถูกสร้างขึ้นที่ความละเอียดต่างกันสามชุดคือ ละเอียดน้อย (300,636) ละเอียดปานกลาง (578,025) และละเอียดมาก (838,374) โดยชุดที่ละเอียดปานกลางจะมีความละเอียดใกล้เคียงกับ Rajedran และจะเป็นชุดที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ ผลการคำนวณจากแบบจำลองทั้งสามถูกนำมาเปรียบเทียบ โดยยึดผลการทดลองที่มีความละเอียดปานกลางเป็นเกณฑ์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ผ่านการพิสูจน์ความถูกต้องมาแล้ว ดังแสดงในไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2

## บทที่ 4

### ผลการคำนวณ

#### 4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

##### 4.1.1 การทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

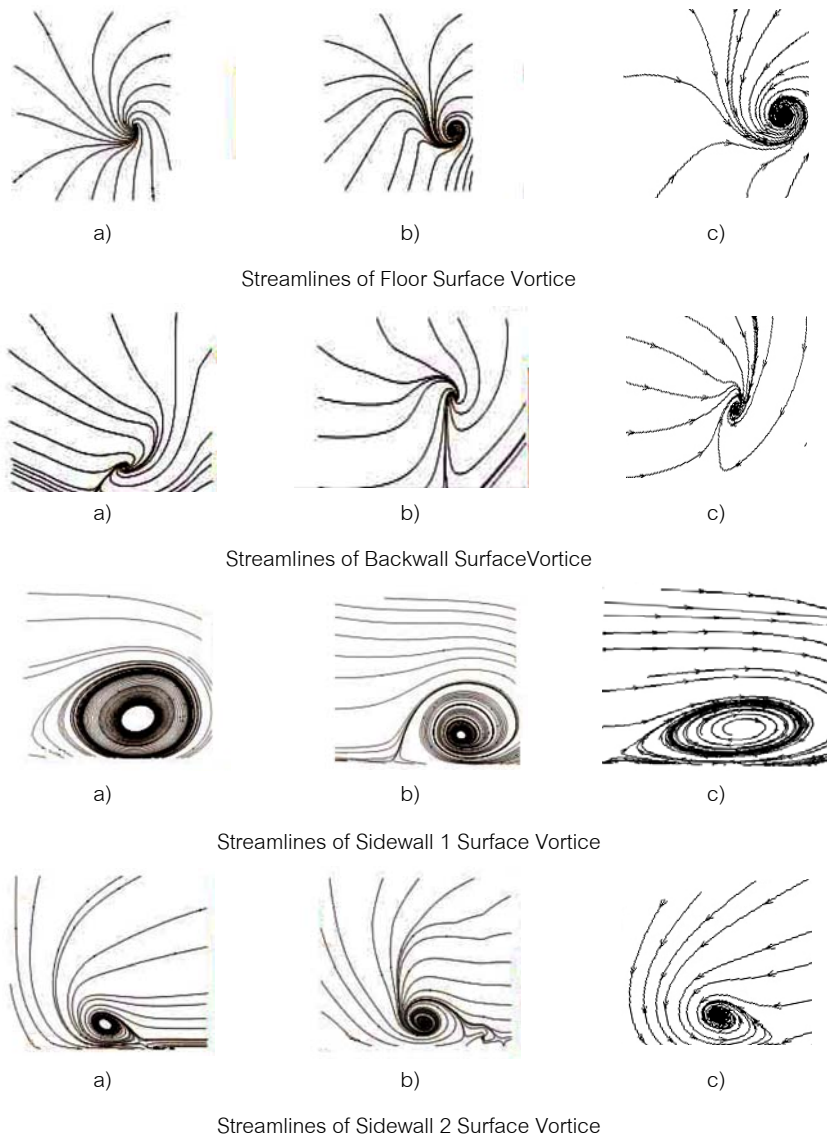
การคำนวณเริ่มลู่อเข้าที่รอบการคำนวณประมาณ 17,500 รอบ และจากการเปรียบเทียบเส้นสายธารการไหล (Streamline) พบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Rajendran ดังแสดงในภาพประกอบ 19 รูป a) และ b) เป็นเส้นสายธารการไหลที่ได้จากการคำนวณและทดลองของ Rajendran ตามลำดับ และรูป c) เป็นเส้นสายธารการไหลที่คำนวณได้ของงานวิจัยนี้ โดยสังเกตได้จากทิศทางการหมุนของวอร์เทกซ์ที่แต่ละระนาบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ภาพประกอบ 19 สามารถเปรียบเทียบได้เฉพาะความคล้ายคลึงของรูปร่างและทิศทางเท่านั้น จึงต้องอาศัยการเปรียบเทียบในเชิงปริมาณเพิ่มเติม

ภาพประกอบ 20 เป็นเปรียบเทียบผลการคำนวณ ในรูปของตัวแปรไร้หน่วยระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมี (Tangential Velocity) และเซอร์คิวเลชันเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์

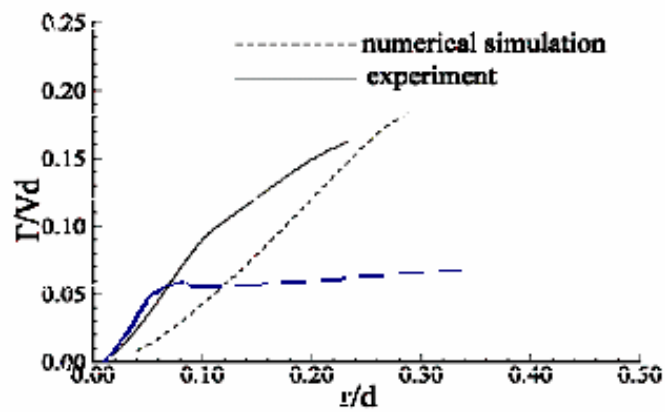
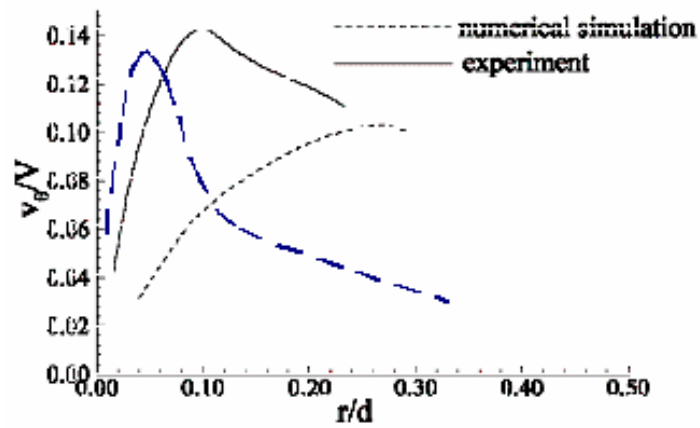
พื้นป้อ หรือภาพประกอบ 20 a) ค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุนวน มีแนวโน้มการเพิ่มและลดลงสอดคล้องกันกับ Rajendran และคณะ[4] โดยเฉพาะที่บริเวณจุดศูนย์กลางการหมุนของวอร์เทกซ์ แต่พบว่าที่รัศมีที่ใหญ่ขึ้นหรือยิ่งไกลจากจุดศูนย์กลางการหมุนมากขึ้น ผลการคำนวณจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเช่นกัน

ผนังด้านหลังป้อสูบ ภาพประกอบ 20 b) ให้ผลการคำนวณที่คล้ายคลึงกับที่ได้ของระนาบพื้นป้อ กล่าวคือ ยิ่งไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางการหมุนของวอร์เทกซ์เท่าไร ผลการคำนวณยังมีความคลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัด

ผนังข้างป้อ 1 หรือภาพประกอบ 20 c) และ d) ผลการคำนวณเป็นไปอย่างสอดคล้องกันดี เช่นเดียวกับระนาบอื่นๆ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนที่ระยะห่างจากรัศมีการหมุน

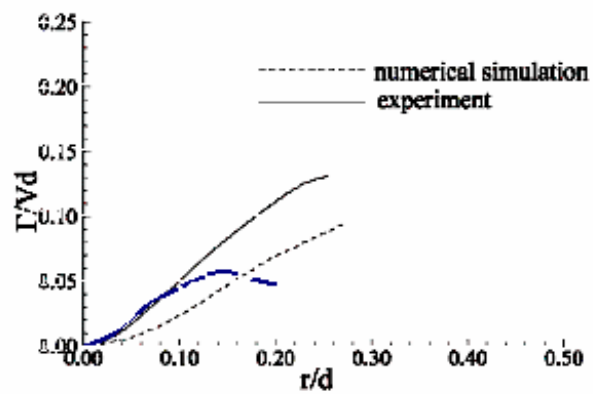
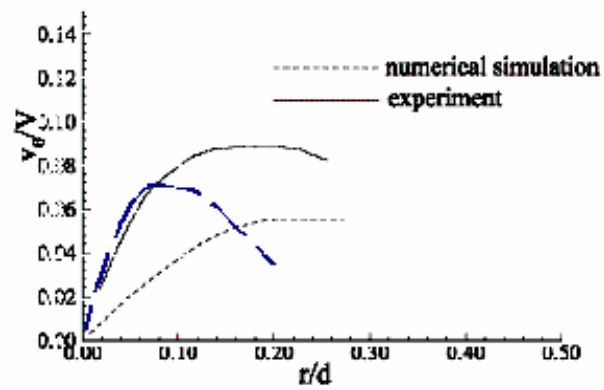


ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลกับแบบจำลองของ Rajendran, รูป a) แสดงผลที่ได้จากการคำนวณของ Rajendran รูป b) แสดงผลที่ได้จากการทดลองของ Rajendran และ รูป C) แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้



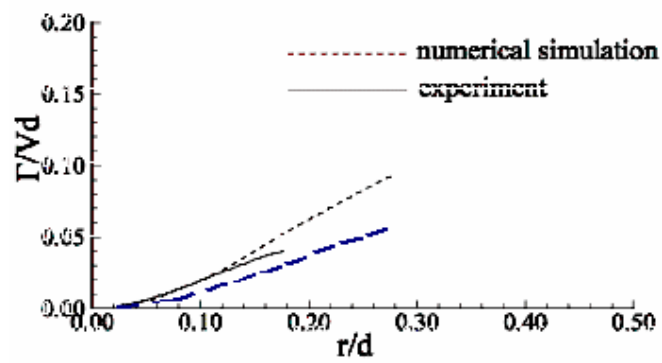
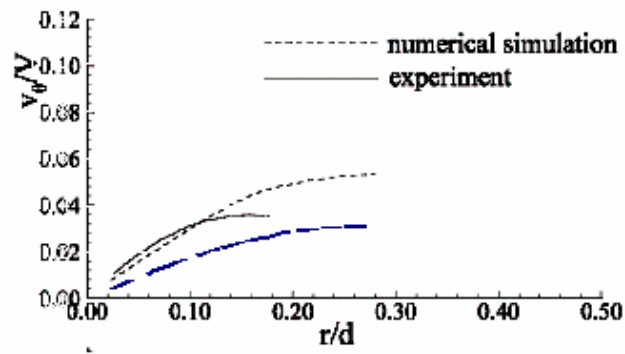
a) Floor surface vortice

ภาพประกอบ 20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุนวนที่รัศมีการหมุนต่างๆ



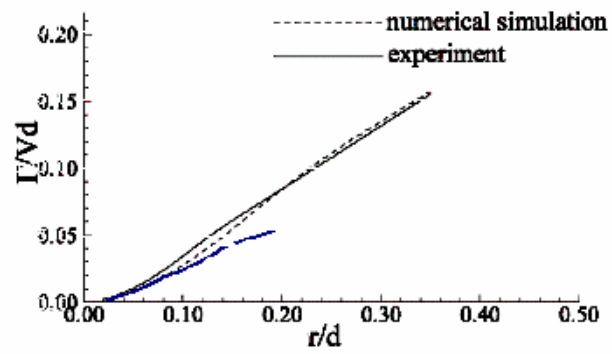
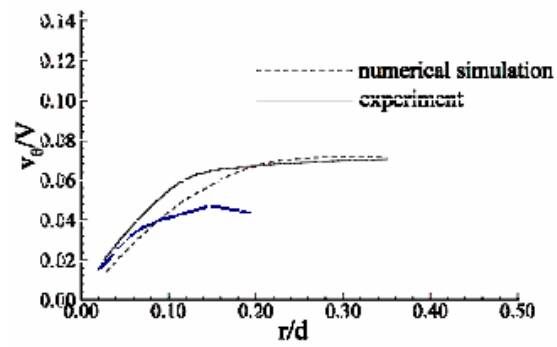
b) Back wall surface vortice

ภาพประกอบ 20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุนวนที่รัศมีการหมุนต่างๆ(ต่อ)



c) Sidewall 1 surface vortice

ภาพประกอบ 20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุนวนที่รัศมีการหมุนต่างๆ(ต่อ)



d) Sidewall 2 surface vortice

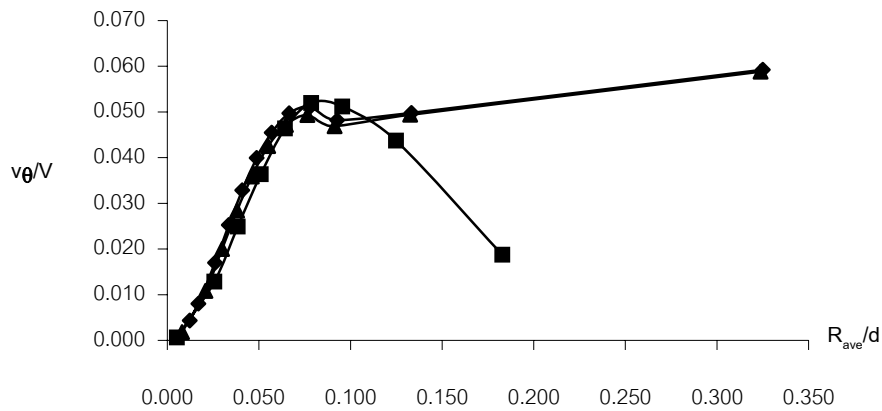
ภาพประกอบ 20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมีการหมุนและการหมุนวนที่รัศมีการหมุนต่างๆ(ต่อ)

#### 4.1.2 การทดสอบความถูกต้องต่อความละเอียดของกริด (Grid Dependency)

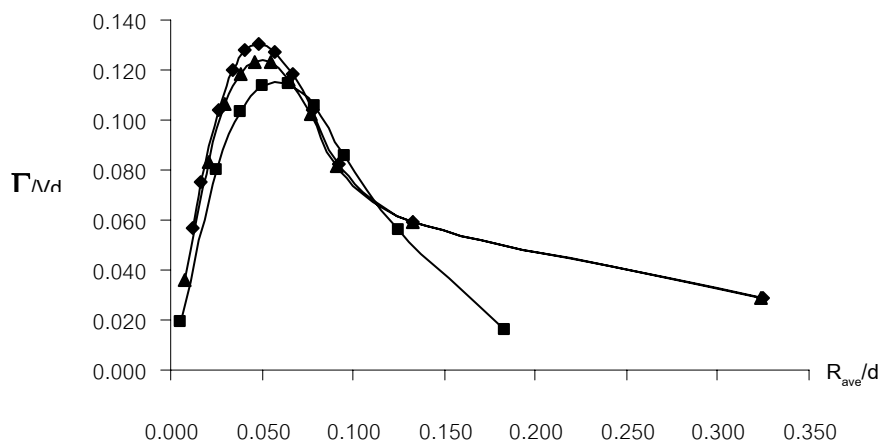
ในภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณกริดให้มากขึ้นจากเดิม ก็ไม่ทำให้ผลของการคำนวณแตกต่างกันไป ในรูปเปรียบเทียบแบบจำลองที่ความละเอียด สามระดับคือ 1) หยาบ มีจำนวนกริดเท่ากับ 300,636 กริด 2) ปานกลาง มีจำนวนกริดเท่ากับ 578,025 กริด และ 3) ละเอียดมาก มีจำนวนกริดเท่ากับ 838,374 กริด โดยที่แบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความละเอียดอยู่ที่ระดับปานกลาง

เปรียบเทียบจากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนกริดหยาบให้ผลคลาดเคลื่อนไปจากแบบจำลองที่ความละเอียดปานกลางมาก โดยเฉพาะที่ฝั่งบ่อ 1 ไม่ปรากฏวอร์เทกซ์ให้เห็น ในขณะที่แบบจำลองความละเอียดปานกลางและละเอียดมากให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกันด้วยดีโดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

อย่างไรก็ตามที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางการหมุน ผลของการคำนวณของแบบจำลองมีความแตกต่างกันมาก โดยที่ระนาบพื้นบ่อให้ความแตกต่างมากถึง 300 เปอร์เซ็นต์ โดย Shibata[6] ให้เหตุผลของความผิดพลาดของการคำนวณที่จุดศูนย์กลางการหมุนไว้ว่า เป็นผลอันเนื่องมาจากขนาดของกริดที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของแกนอากาศมากๆ นั่นเองและความคลาดเคลื่อนดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อไปยังกริดข้างเคียงแต่อย่างจะมีผลน้อยลงที่รัศมีของวอร์เทกซ์ที่ใหญ่ขึ้น



1 a)

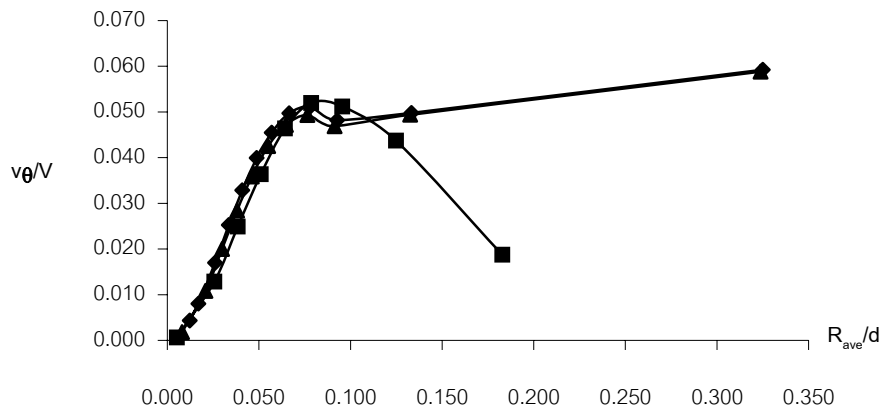


2 a)

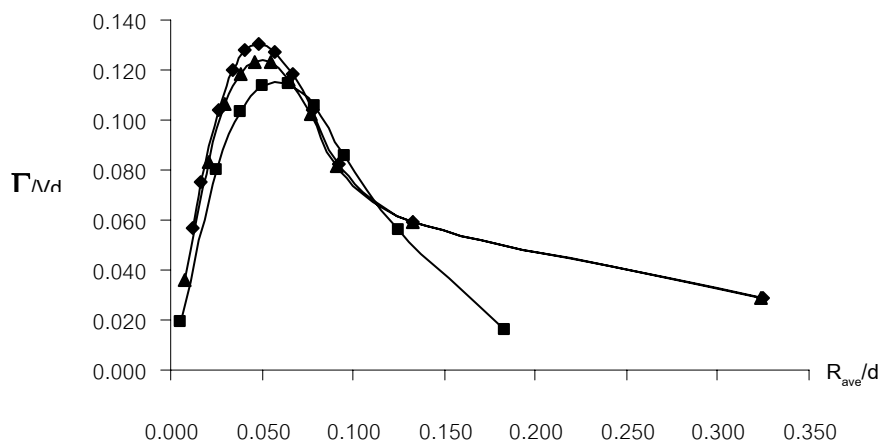
a) Floor surface vortice

■ ปริมาณกริตน้อย      ◆ ปริมาณกริตขนาดกลาง      ▲ ปริมาณกริตมาก

ภาพประกอบ 21 กราฟเปรียบเทียบผลของความละเอียดของกริตต่อความถูกต้องของการคำนวณ โดยแสดงค่าเซอร์คิวเลชัน และค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับการหมุนเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



1 b)

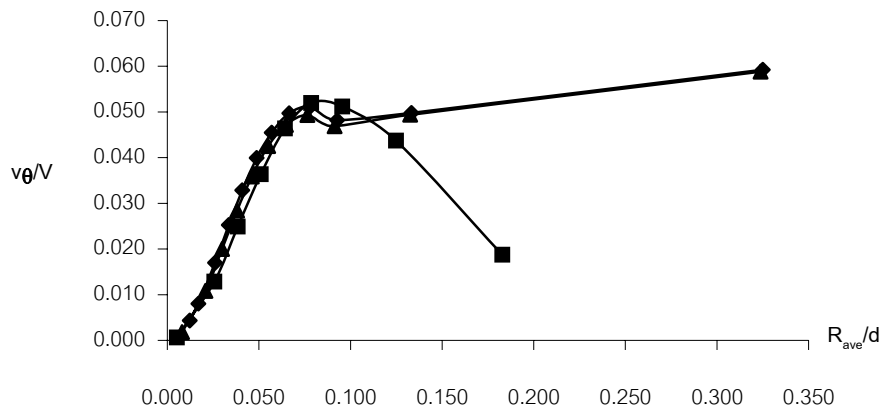


2 b)

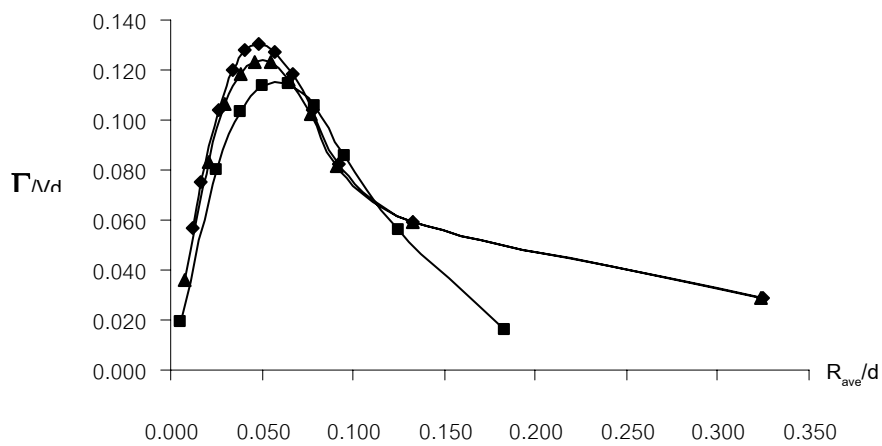
b) Back wall surface vortice

ปริมาณกริตน้อย
  ปริมาณกริตขนาดกลาง
  ปริมาณกริตมาก

ภาพประกอบ 21 กราฟเปรียบเทียบผลของความละเอียดของกริตต่อความถูกต้องของการคำนวณ โดยแสดงค่าเซอร์คิวเลชัน และค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับการหมุนเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ(ต่อ)



1 c)



2 c)

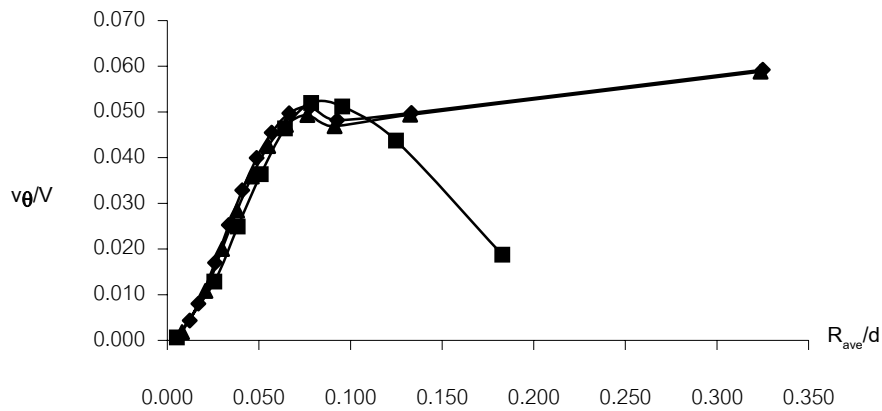
c) Sidewall 1 surface vortice

■ ปริมาณกริตน้อย

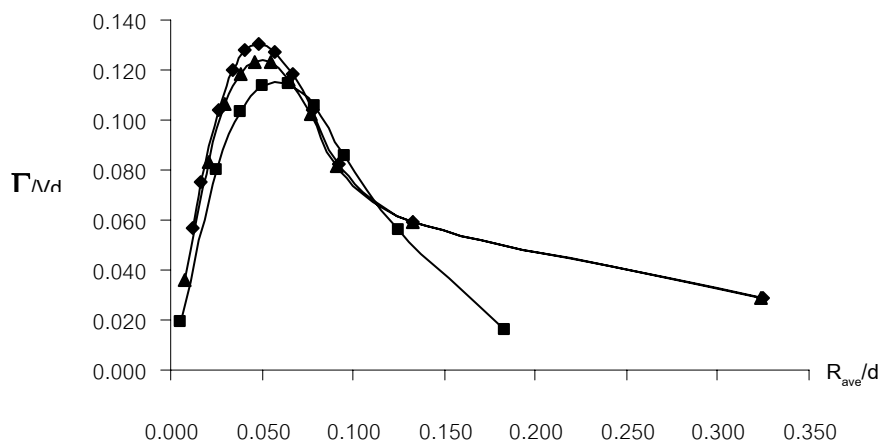
◆ ปริมาณกริตขนาดกลาง

▲ ปริมาณกริตมาก

ภาพประกอบ 21 กราฟเปรียบเทียบผลของความละเอียดของกริตต่อความถูกต้องของการคำนวณ โดยแสดงค่าเซอร์คิวเลชัน และค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับการหมุนเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ(ต่อ)



1 d)



2 d)

d) Sidewall 2 surface vortice

■ ปริมาณกิริตน้อย

◆ ปริมาณกิริตขนาดกลาง

▲ ปริมาณกิริตมาก

ภาพประกอบ 21 กราฟเปรียบเทียบผลของความละเอียดของกิริตต่อความถูกต้องของการคำนวณ โดยแสดงค่าเซอร์คิวเลชัน และค่าของความเร็วในแนวตั้งฉากกับการหมุนเทียบกับรัศมีของวอร์เทกซ์ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ(ต่อ)

## 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อได้รับการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

ตามที่แสดงในหัวข้อ 4.1 ผลการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับแบบจำลองอ้างอิง ถึงแม้จะมีความคลาดเคลื่อนบ้างเมื่อรัศมีการหมุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถเข้าสู่กระบวนการเพิ่มวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ได้ ผลการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

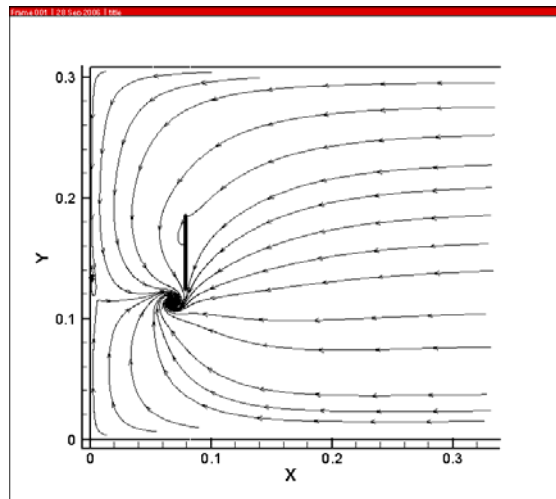
### 4.2.1 ผลการคำนวณโดยการเปลี่ยนตัวแปรความกว้าง

ภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นถึงเส้นสายธารการไหลที่เบรกเกอร์ขนาดความกว้างต่างๆ ที่แต่ละระนาบของบ่อสูบน้ำ

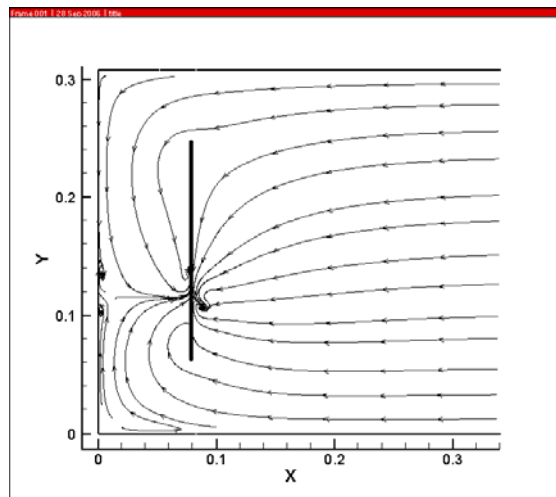
พื้นบ่อ แสดงในรูป 1.1a) ถึง 1.3a) พบว่าการเพิ่มความกว้างของเบรกเกอร์จนเต็มพื้นที่หน้าตัดของบ่อสูบน้ำทำให้เกิดวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นอีกหลายจุด ในขณะที่อีกสองกรณีที่เหลือมีวอร์เทกซ์เพียงจุดเดียวเท่านั้น คือที่ตำแหน่งใต้ท่อสูบน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของวอร์เทกซ์แต่ละจุดโดยการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์ที่รัศมีการหมุนต่างๆ ในภาพประกอบ 23 กลับพบว่าความแข็งแรงของวอร์เทกซ์กรณีที่ 1.3 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ ดังนั้นการเพิ่มความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์จนเต็มความกว้างของบ่อสูบน้ำสามารถช่วยป้องกันวอร์เทกซ์ที่ระนาบนี้ได้เป็นอย่างดี

ผนังด้านหลัง แสดงในรูป 1.1b) ถึง 1.3b) เช่นเดียวกันกับพื้นบ่อ กล่าวคือ กรณีที่ 1.1 และ 1.2 ช่วยลดความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ลงได้เป็นอย่างดี ยกเว้นกรณีที่ 1.3 ที่ทำให้จำนวนของวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของวอร์เทกซ์แล้วพบว่ากรณีที่ 1.3 ให้ค่าสูงสุดและสูงกว่าเมื่อไม่ได้ติดตั้งเบรกเกอร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกรณีที่ พื้นที่บริเวณผนังหลังบ่อเกิดความไม่สมดุลย์ของน้ำที่ไหลเข้ามาแทนที่น้ำที่ถูกสูบ อันเนื่องมาจากการขัดขวางการไหลโดยตัววอร์เทกซ์เบรกเกอร์นั่นเอง

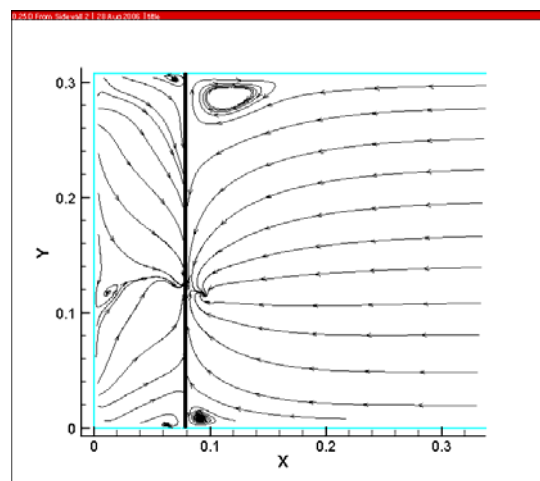
ผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำด้านที่ 1 และ 2 แสดงในรูป 1.1c) ถึง 1.3c) และ 1.1d) ถึง 1.3d) ตามลำดับ พบว่าวอร์เทกซ์ในกรณีที่ 1.1 และ 1.2 สามารถถูกกำจัดไปได้โดยสิ้นเชิง แต่กรณีที่ 1.3 กลับทวีความรุนแรงของวอร์เทกซ์ให้มากขึ้น



1.1 a)



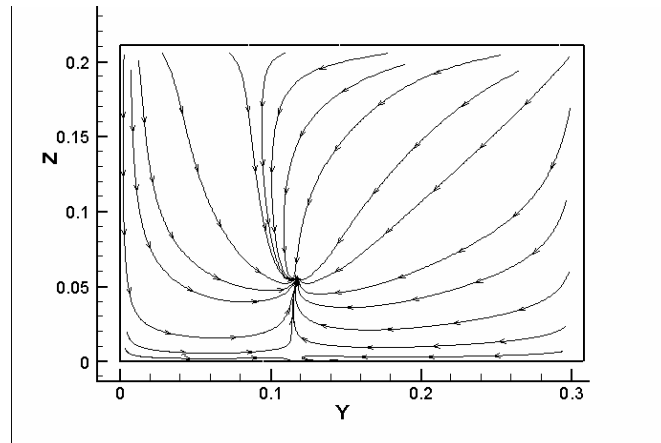
1.2 a)



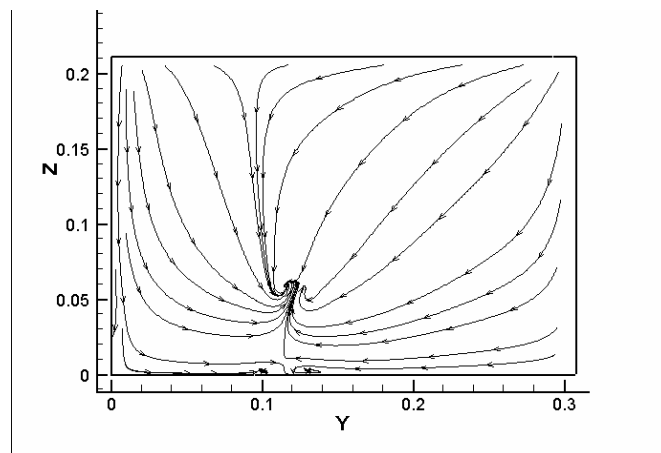
1.3 a)

ระยะ 0.25d จากพื้นบ่อสูบน้ำ

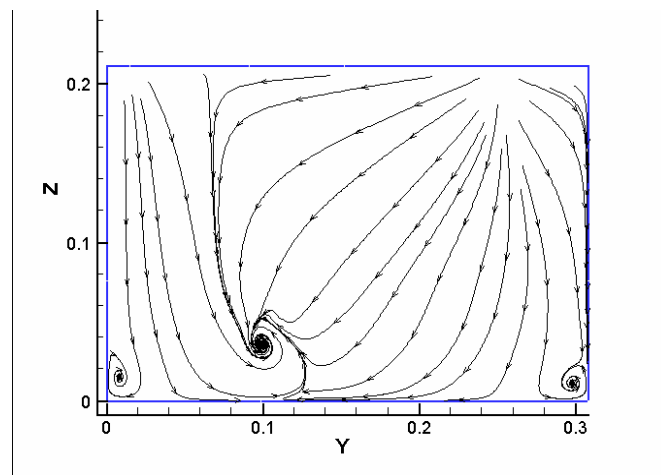
ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของเบรกเกอร์



1.1 b)



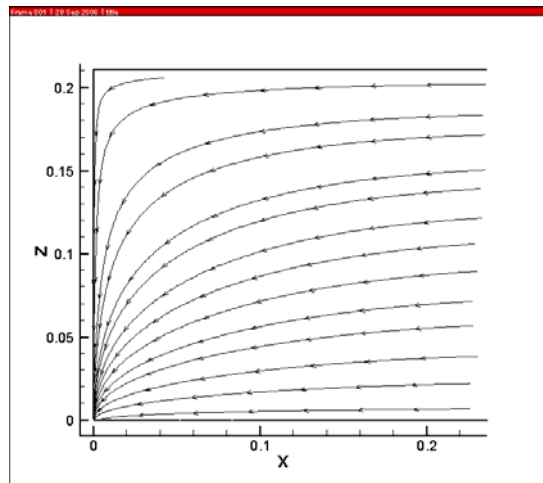
1.2 b)



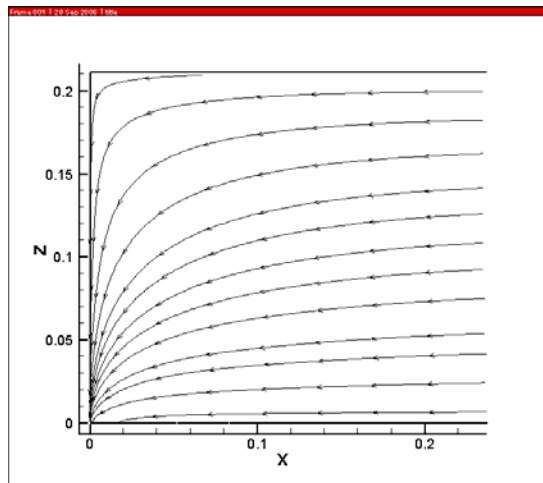
1.3 b)

ระยะ 0.23d จากผนังหลังปอดสูบน้ำ

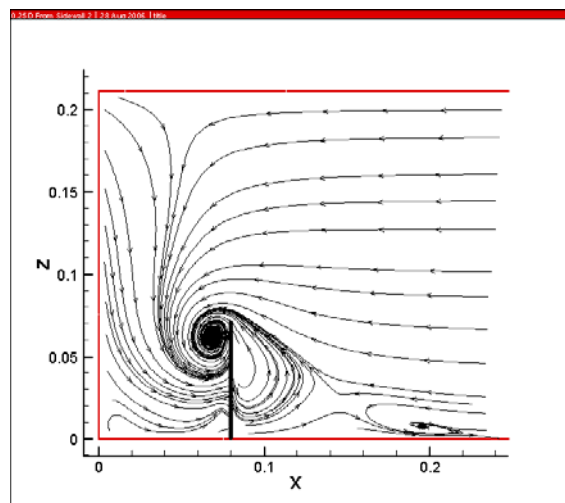
ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของเบรกเกอร์(ต่อ)



1.1 c)



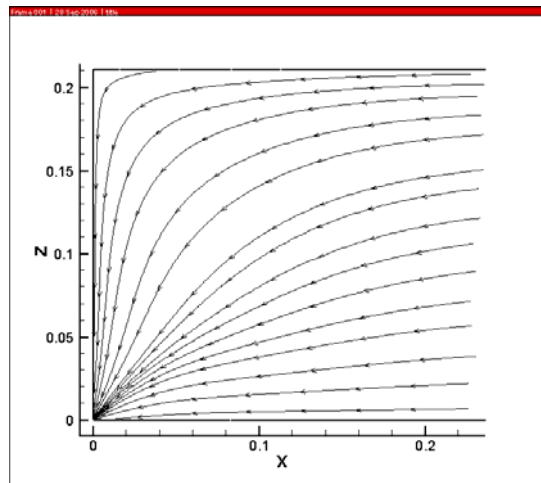
1.2 c)



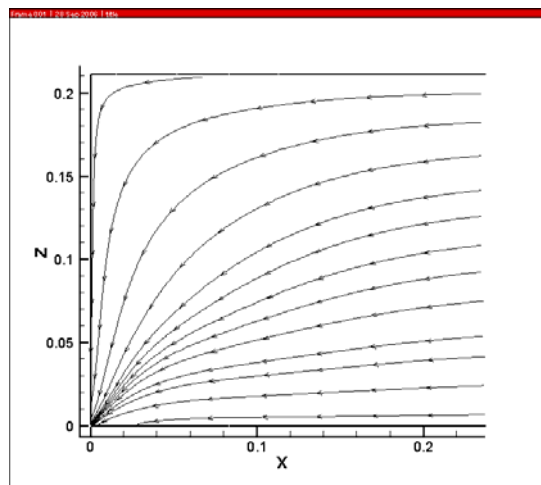
1.3 c)

ระยะ 0.15d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 1

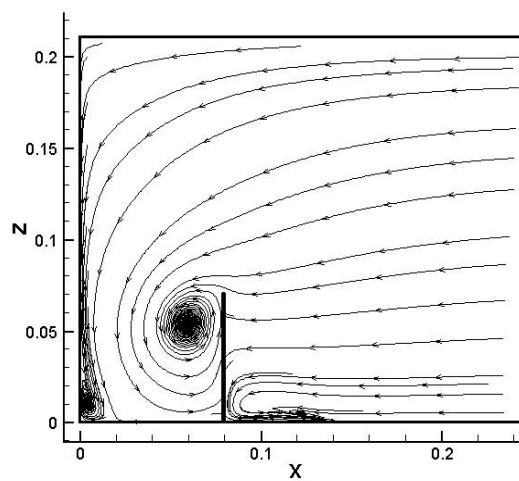
ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของเบรกเกอร์(ต่อ)



1.1 d)



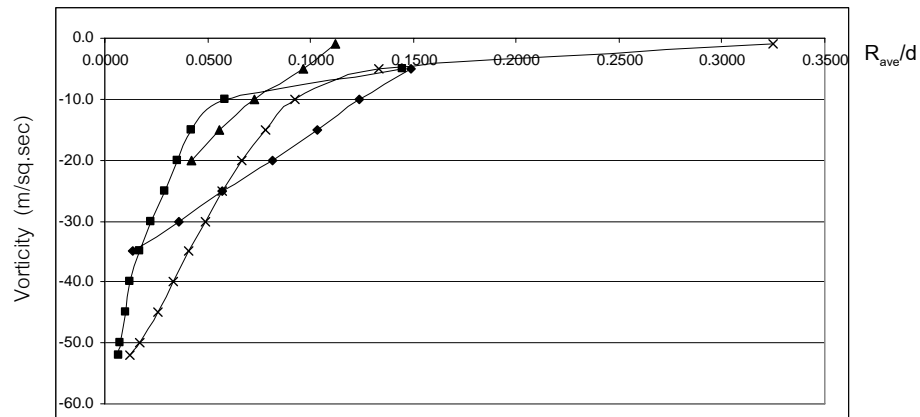
1.2 d)



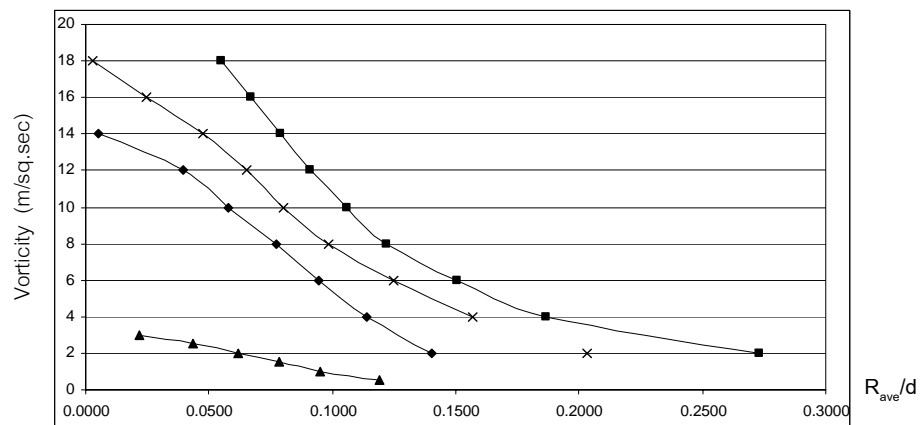
1.3 d)

ระยะ 0.25d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 2

ภาพประกอบ 22 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของเบรกเกอร์(ต่อ)



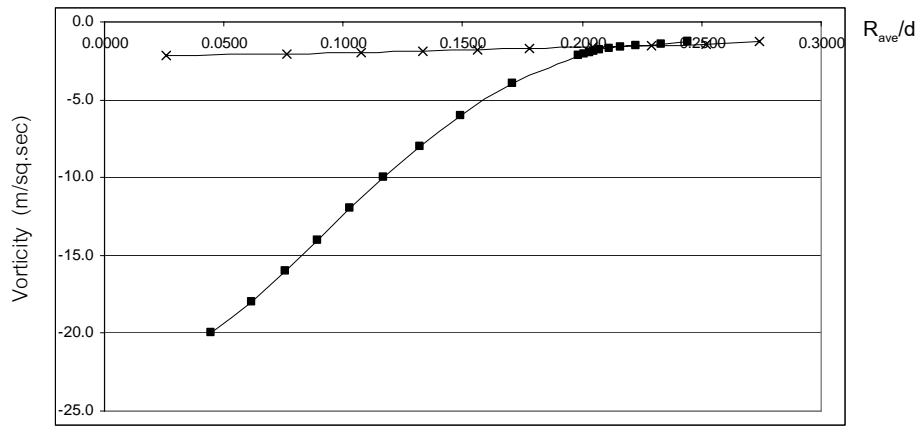
ระยะ 0.25d จากพื้นบ่อสูบน้ำ



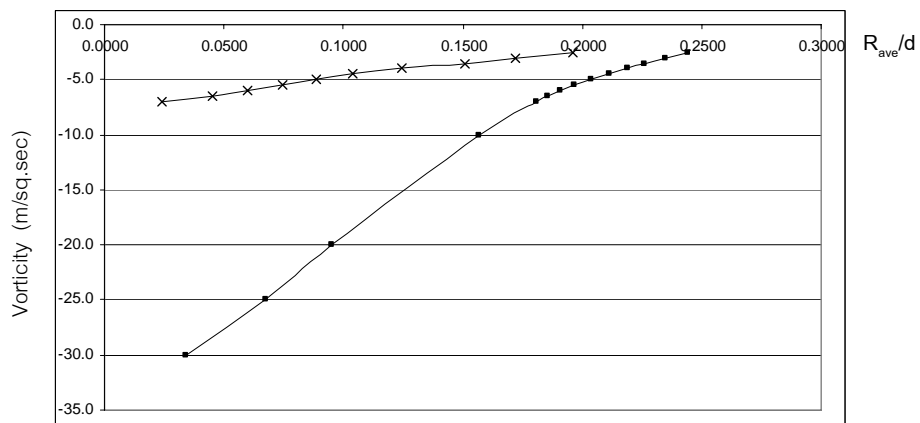
ระยะ 0.23d จากผนังหลังบ่อสูบน้ำ

- x— Validated Model
- ♦— Case 1.2 (medium)
- ▲— Case 1.1 (min)
- Case 1.3 (max)

ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ต่างๆ เมื่อแกนนอนคือ  $R_{ave}/d$  และแกนแนวตั้งคือ Vorticity (m/sq. sec)



ระยะ 0.15d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 1



ระยะ 0.25d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 2

- x- Validated Model
- Case 1.1 (min)
- ◆- Case 1.2 (medium)
- Case 1.3 (max)

ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ต่างๆ เมื่อแกนนอนคือ  $R_{ave}/d$  และแกนแนวตั้งคือ Vorticity (m/sq. sec)(ต่อ)

#### 4.2.2 ผลการคำนวณโดยการเปลี่ยนตัวแปรความสูง

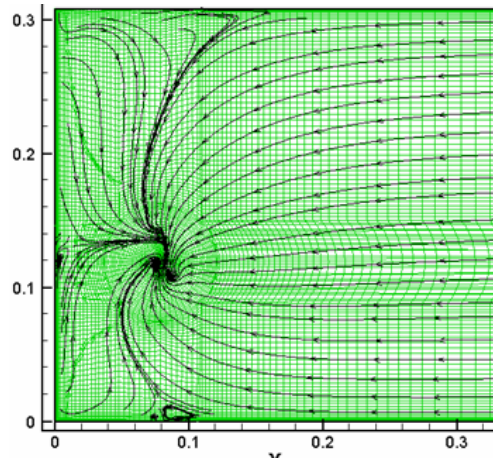
ความสูงของเบรกเกอร์ถูกเพิ่มขึ้นเท่ากับช่องว่างระหว่างพื้นบ่อ และปากท่อสูบน้ำซึ่งเป็นขนาดความสูงที่มากที่สุดที่จะเพิ่มได้ ผลการคำนวณแสดงเป็นเส้นสายธารการไหล และกราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงได้ดังภาพประกอบ 24 และ 25 ตามลำดับ

พื้นบ่อ แสดงในรูป a) พบว่าหลังจากที่ได้ติดตั้งเบรกเกอร์ไปแล้วจำนวนวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นและเพิ่มมากที่สุด ณ กรณีที่ 2.3 เมื่อตรวจสอบความแข็งแรงทั้งสามกรณีให้วอร์เทกซ์อ่อนกำลังลงได้ โดยที่ 2.1 ลดความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ได้มากที่สุดและตามด้วย 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

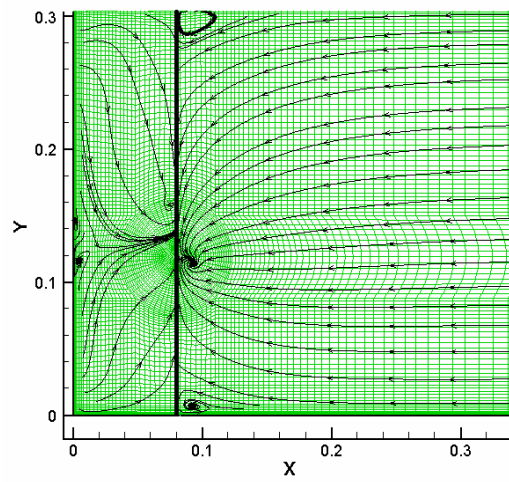
ผนังด้านหลัง แสดงในรูป b) การเพิ่มเบรกเกอร์ไม่ได้ทำให้จำนวนวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้น และความสูงของวอร์เทกซ์ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนเช่นกัน อย่างไรก็ตามเปรียบเทียบความแข็งแรงของวอร์เทกซ์พบว่า การเพิ่มเบรกเกอร์กลับเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวอร์เทกซ์เดิมที่มีอยู่แล้ว และนอกจากพบว่าความแข็งแรงแปรผันตามตัวแปรความสูง

ผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำด้านที่ 1 แสดงในรูป c) การเพิ่มเบรกเกอร์ทำให้จำนวนวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เดียวกันความแข็งแรงก็ทวีกำลังเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่ 2.1 ที่ทำให้วอร์เทกซ์อ่อนกำลังลงแต่ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

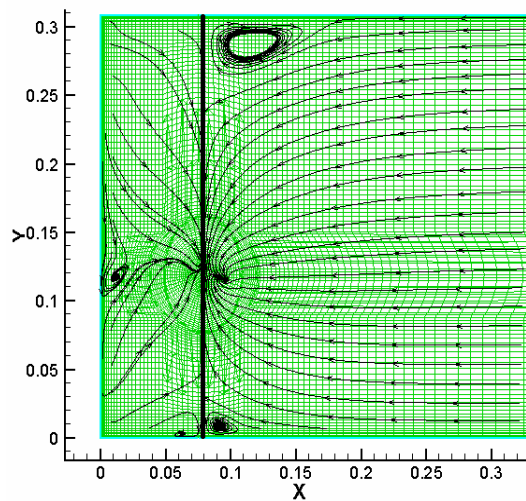
ผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำด้านที่ 2 แสดงในรูป d) การเพิ่มเบรกเกอร์ไม่ได้ช่วยในการป้องกันวอร์เทกซ์ ในระนาบนี้ได้เลย กลับเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนและความแข็งแรงให้กับวอร์เทกซ์อีกด้วย



2.1 a)



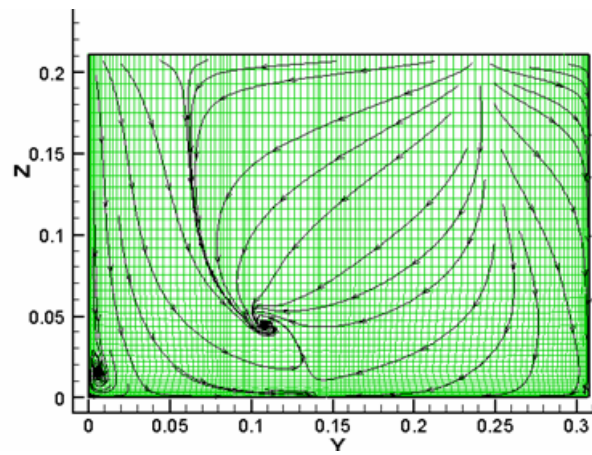
2.2 a)



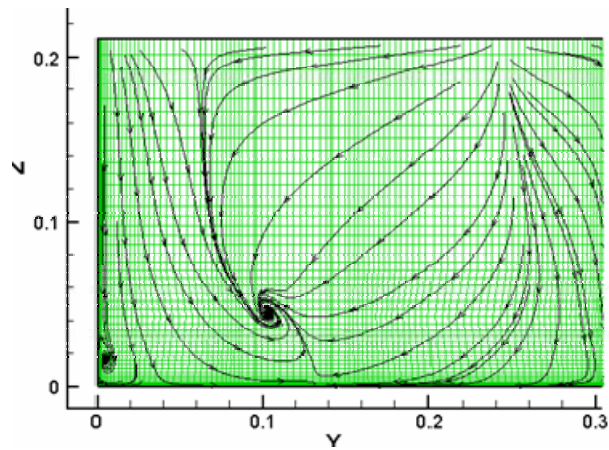
2.3 a)

ระยะ 0.25d จากพื้นบ่อสูบน้ำ

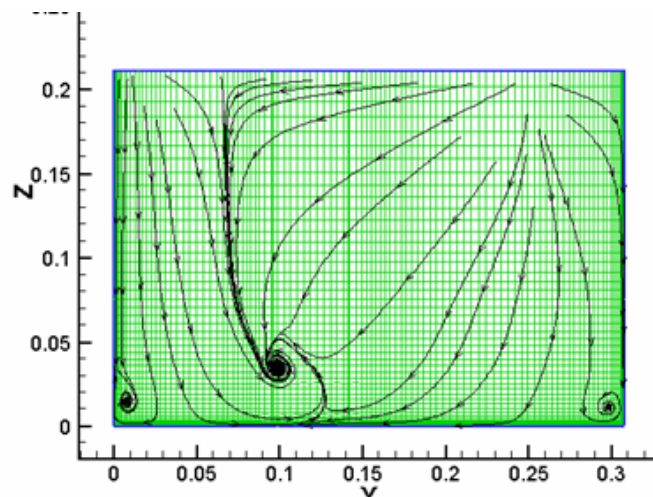
ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของเบรกเกอร์



2.1 b)



2.2 b)

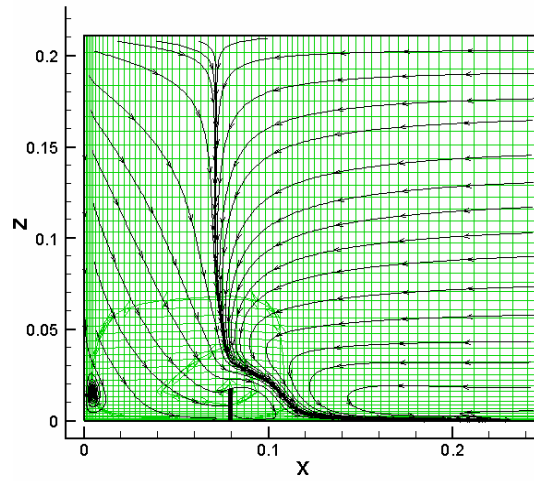


2.3 b)

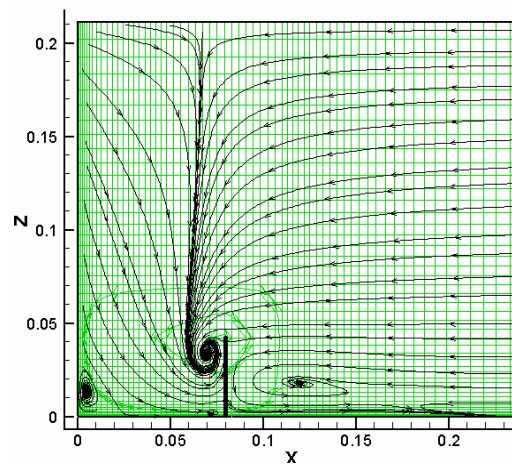
ระยะ 0.23d จากผนังหลังบ่อสูบน้ำ

ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของเบรกเกอร์

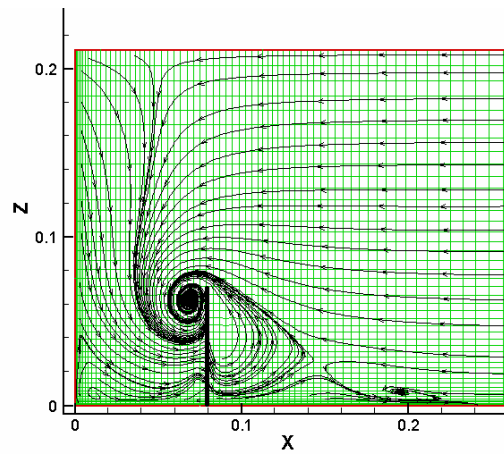
(ต่อ)



2.1 c)



2.2 c)

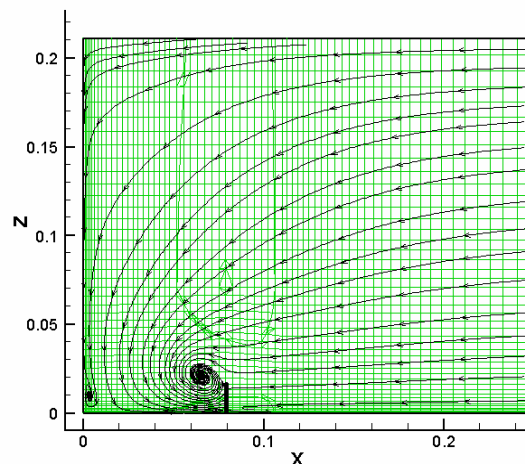


2.3 c)

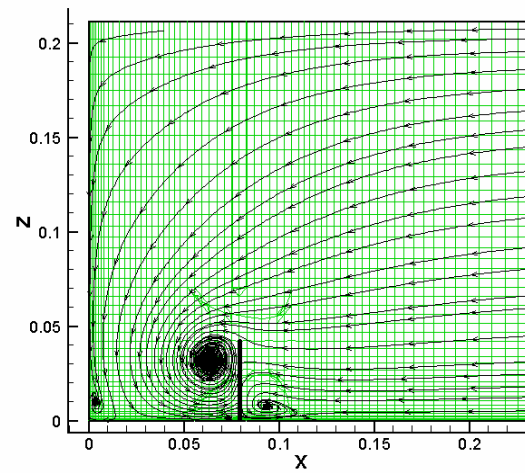
ระยะ 0.15d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 1

ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของเบรกเกอร์

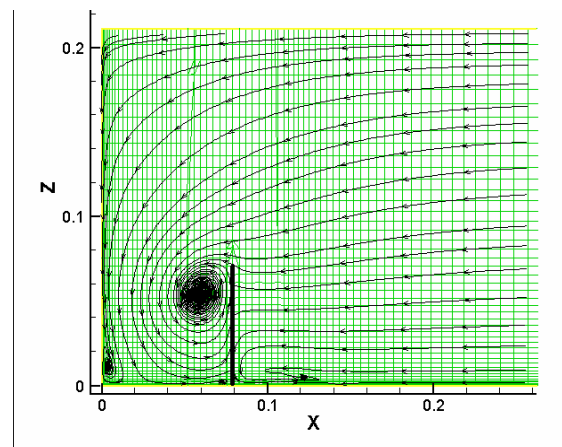
(ต่อ)



2.1 d)



2.2 d)

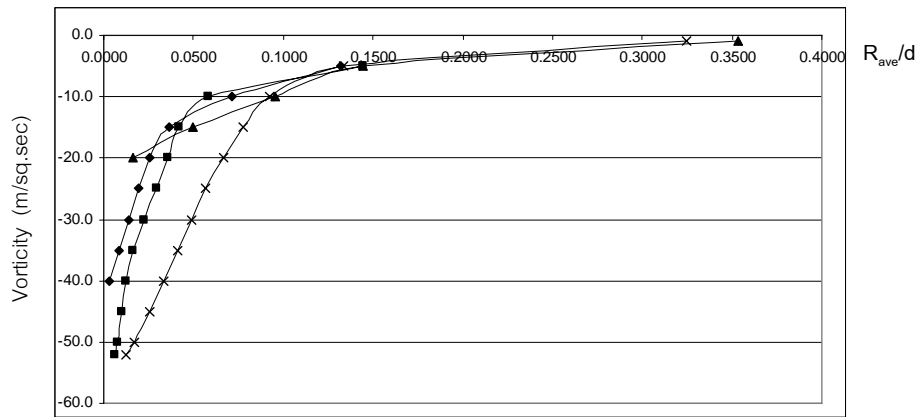


2.3 d)

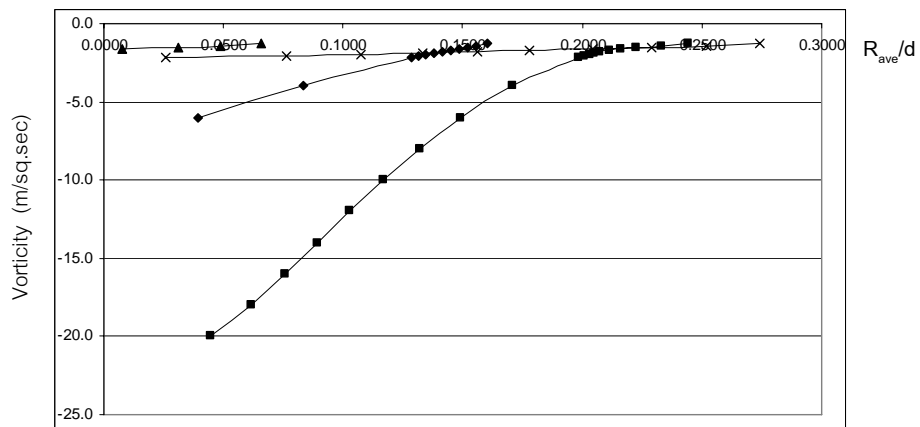
ระยะ 0.25d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 2

ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นสายธารการไหลของการไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของเบรกเกอร์

(ต่อ)



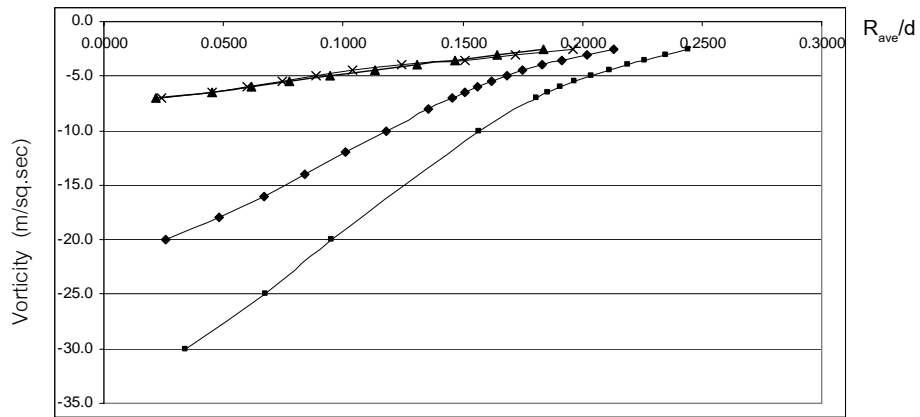
ระยะ 0.25d จากพื้นบ่อสูบน้ำ



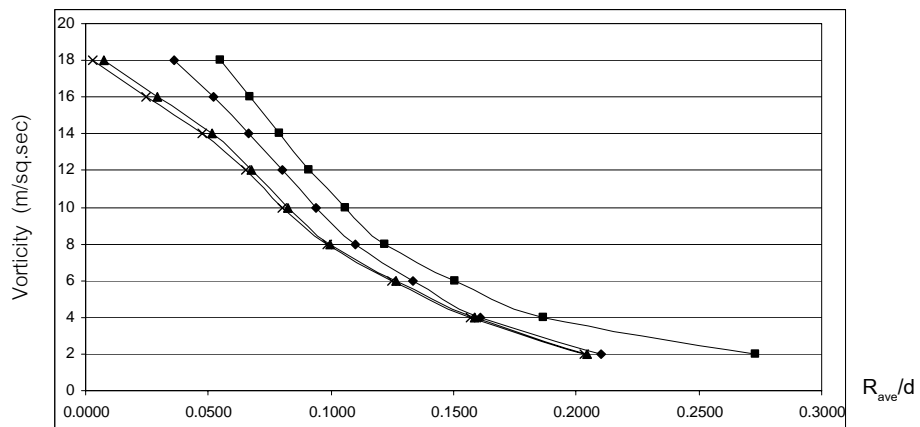
ระยะ 0.23d จากผนังหลังบ่อสูบน้ำ

- x- Validated Model
- ▲- Case 2.1 (min)
- ◆- Case 2.2 (medium)
- Case 2.3 (max)

ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความสูงของวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์ต่างๆ เมื่อแกนนอนคือ  $R_{ave}/d$  และแกนแนวตั้งคือ Vorticity (m/sq. sec)



ระยะ 0.15d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 1



ระยะ 0.25d จากผนังด้านข้างบ่อสูบน้ำ 2

- x— Validated Model      —▲— Case 2.1 (min)
- ◆— Case 2.2 (medium)    —■— Case 2.3 (max)

ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างวอร์เทกซ์และรัศมีเฉลี่ย ที่ความสูงของวอร์เทกซ์  
เบรกเกอร์ต่างๆ เมื่อแกนนอนคือ  $R_{ave}/d$  และแกนแนวตั้งคือ Vorticity (m/sq. sec)(ต่อ)

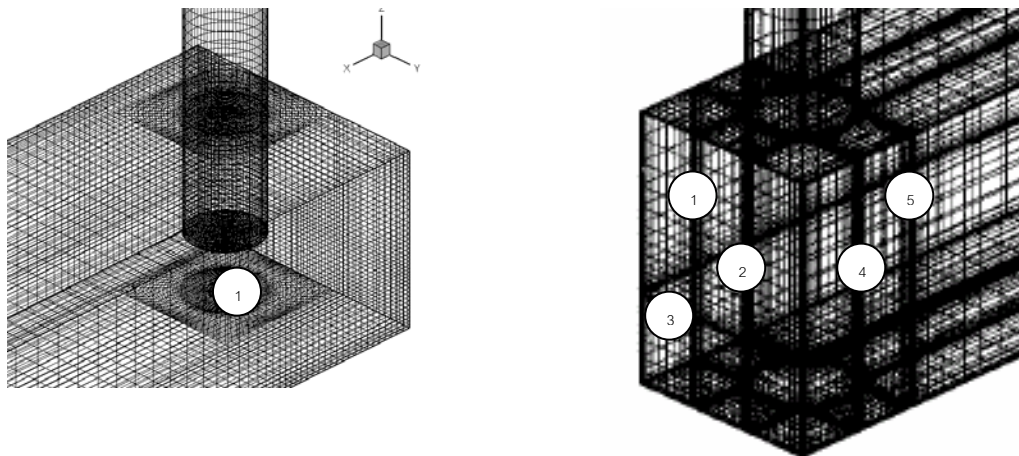
## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการคำนวณ

#### 5.1 แบบจำลองก่อนการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

##### 5.1.1 การเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

จากผลการเปรียบเทียบดังแสดงในภาพประกอบ 20 การคำนวณให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองไปบ้างแต่ก็ยังคงให้ความสอดคล้องกับผลการคำนวณของ Rajendran และคณะ[4] ส่วนเหตุของความคลาดเคลื่อนสันนิษฐานได้จากความแตกต่างของขนาดของกริด ณ บริเวณที่เกิดวอร์เทกซ์นั่นเอง ถึงแม้ปริมาณกริดของงานวิจัยนี้และ Rajendran และคณะ[4] จะใกล้เคียงกันก็ตาม แต่ทว่าวิธีการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของกริดกลับไม่เหมือนกัน โดยที่งานวิจัยนี้ใช้บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางตามความยาวของท่อเป็นเส้นกำเนิดของกริด และค่อยๆขยายขนาดของกริดด้วยอัตราส่วนที่คงที่หนึ่งๆออกไปยังพื้นที่รอบๆจนถึงผนังของบ่อสูบน้ำ ดังนั้นบริเวณผนังบ่อสูบน้ำจึงมีขนาดของกริดที่ใหญ่กว่าบริเวณท่อบสูบน้ำนั่นเอง โดยเฉพาะผนังบ่อ 1 ซึ่งอยู่ห่างจากท่อบสูบน้ำมากที่สุด แต่จากแบบจำลองของ Rajendran และคณะ[4] พบว่าได้ใช้เส้นกำเนิดของกริดถึง 4 เส้นด้วยกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 26 ดังนั้นผนังบ่อทั้ง 4 ด้านยังคงให้ขนาดของกริดที่ไม่แตกต่างจากจุดกำเนิดมากนัก จึงเป็นเหตุที่ทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไป



ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบจุดกำเนิดของกริด ซ้ายแสดงจุดกำเนิดของกริดของงานวิจัยนี้ ขวาแสดงจุดกำเนิดของกริดของ Rajendran และคณะ[4]

ส่วนการเพิ่มความละเอียดของกริดที่จุดใดจุดหนึ่งโดยเฉพาะ ในบ่อในลักษณะที่ไม่สมมาตร หรือไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมทางเรขาคณิตนั้นย่อมทำให้กริดในบริเวณอื่นๆของบ่อสูบน้ำได้รับผลกระทบด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างกริดแบบกลุ่มต้องเสียไป ซึ่งจำเป็นต้องรักษาไว้เพื่อความง่ายในการเพิ่มเบรกเกอร์ในอนาคต ถึงแม้กริดชนิดโครงสร้างไร้รูปแบบ จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ แต่การจะรักษาให้กริดมีโครงสร้างที่เหมือนเดิมหลังจากการเพิ่มเบรกเกอร์ทำได้ยากยิ่งกว่า การที่โครงสร้างกริดเปลี่ยนไปเสมือนกับแบบจำลองนั้นแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง จำเป็นต้องทำการพิสูจน์ความถูกต้องใหม่ และในกรณีนี้ไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากไม่มีข้อมูลจากผลการทดลองของบ่อสูบน้ำที่ติดตั้งเบรกเกอร์มาใช้ในการเปรียบเทียบนั่นเอง

#### 5.1.2 การทดสอบความถูกต้องต่อความละเอียดของกริด

ผลของการเพิ่มปริมาณกริดให้มากขึ้นเพื่อตรวจสอบผลการคำนวณต่อปัจจัยความละเอียดของกริดพิสูจน์ว่าปริมาณกริดที่ความละเอียดขนาดกลางสามารถให้ผลการคำนวณที่ยอมรับได้ ซึ่งให้ค่าความแตกต่างของการคำนวณเทียบกับแบบจำลองที่มีกริดละเอียดกว่ามีค่าน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จากผลดังกล่าวสามารถลดเวลาในการคำนวณได้มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ยังคงรักษาระดับความถูกต้องของการคำนวณได้เป็นอย่างดี

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ผลของแกนอากาศทำให้การคำนวณที่จุดศูนย์กลางของวอร์เท็กซ์ผิดพลาด สิ่งสำคัญประการหนึ่งคือสมการที่ใช้ในการคำนวณการไหลสำหรับงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการไหลแบบ Single Phase โดยที่ของไหลเฉพาะเจาะจงเป็นน้ำเท่านั้น แต่ในเงื่อนไขของการไหลจริงนั้นกลับแตกต่างโดยสิ้นเชิง เนื่องจากที่แกนกลางของวอร์เท็กซ์เป็นอากาศ ทำให้สมการดังกล่าวไม่สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง ประกอบกับผิวสัมผัสระหว่างแกนอากาศและน้ำถือเป็นการไหลแบบ Two Phase สมมุติฐานของสมการดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้ได้เช่นเดียวกัน และสิ่งสำคัญที่สุดคือเรื่องของความละเอียดของกริดที่มีขนาดใหญ่กว่าแกนของอากาศมากจึงเป็นเรื่องยากที่จะให้ผลของการคำนวณที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามงานวิจัยไม่ได้มุ่งเน้นการศึกษาที่ปรากฏการณ์การไหลที่จุดศูนย์กลางของวอร์เท็กซ์ แต่สนใจเพียงการก่อตัวของวอร์เท็กซ์ที่เงื่อนไขบ่อต่างๆ และความแข็งแรงของวอร์เท็กซ์หลังจากที่ได้ติดตั้งเบรกเกอร์ลงไปแล้วเท่านั้น จึงไม่ทำให้ปัญหาทั้งสามข้อดังกล่าวกระทบความน่าเชื่อถือของการคำนวณที่ได้

## 5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อได้รับการติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

การเพิ่มวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ในบ่อสูบน้ำสามารถช่วยให้วอร์เทกซ์อ่อนกำลังลงได้ แต่อย่างไรก็ตามตามวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่ติดตั้งลงไปอาจช่วยป้องกันไม่ได้ทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันอาจจะทวีความรุนแรงของวอร์เทกซ์ที่มีอยู่แล้วให้มากขึ้น และยังเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มจำนวนของวอร์เทกซ์อีกด้วย ในทางปฏิบัติจึงพบเห็นการใช้งานของวอร์เทกซ์ที่มีรูปทรงซับซ้อน หรือหลายชนิดร่วมกันในบ่อสูบน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของผู้ออกแบบในการเลือกใช้เบรกเกอร์ และนี่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์การไหลของบ่อสูบน้ำนั้นๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการป้องกันวอร์เทกซ์ แต่เนื่องด้วยผลที่ได้จากการคำนวณให้ค่าที่ประมาณการเท่านั้นเพราะกระบวนการคำนวณยังให้ผลของความผิดพลาดเสมอประกอบกับข้อจำกัดของทรัพยากรคอมพิวเตอร์จึงส่งผลกระทบต่อความละเอียดของกริดของแบบจำลองนั้นๆ ดังนั้นบ่อสูบน้ำใดที่มีความสำคัญและ/หรือมูลค่าในการก่อสร้างสูง มักจะเริ่มต้นจากการใช้ CFD ในการหารูปแบบของบ่อสูบน้ำที่เหมาะสมในเบื้องต้นก่อน หลังจากนั้นจึงทำการสร้างบ่อสูบน้ำจริงในขนาดย่อส่วนเพื่อจำลองการไหลจริงอันเป็นการยืนยันความถูกต้องที่ได้จาก CFD ก่อนการนำไปสู่การสร้างบ่อสูบน้ำจริงในขนาดจริง

ความกว้างและความสูงของเบรกเกอร์เป็นตัวแปรที่สำคัญประการหนึ่งในการช่วยลดกำลังหรือป้องกันวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ในบ่อสูบน้ำ ผลของการคำนวณได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 5.2.1 การเปลี่ยนตัวแปรความกว้าง

ความกว้างของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์มีผลต่อความสามารถในการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำอย่างเห็นได้ชัด จากภาพประกอบ 23 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ที่แต่ละระนาบของผนังบ่อ

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าความกว้างแปรผันตามกับความความแข็งแรงและจำนวนของวอร์เทกซ์ กล่าวคือการเพิ่มความกว้างจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและจำนวนให้กับวอร์เทกซ์

อย่างไรก็ตาม ที่ความกว้างไม่มากนัก เบรกเกอร์สามารถช่วยลดหรือทำให้วอร์เทกซ์เดิมอ่อนกำลังลงได้ดีจนกระทั่งสูญหายไปอย่างสิ้นเชิงในบางระนาบของบ่อ แต่เมื่อเพิ่มความกว้างถึงค่าค่าหนึ่ง การติดตั้งวอร์เทกซ์กลับไม่มีประโยชน์ใดๆในแง่ของการป้องกันเลย และถ้ายังคงเพิ่มความกว้างให้มากขึ้นเบรกเกอร์ที่เพิ่มลงไปจะช่วยกระตุ้นให้เกิดวอร์เทกซ์ที่ตำแหน่งอื่นๆและอาจเพิ่มความแข็งแรงให้กับวอร์เทกซ์ที่มีอยู่แล้วให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะหาจุดที่เหมาะสม

(Optimization) ของความกว้างสำหรับบ่อสูบน้ำหนึ่งเนื่องด้วยความหลากหลายของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง  
นั่นเอง

### 5.2.2 การเปลี่ยนตัวแปรความสูง

จากภาพประกอบ 24 แสดงให้เห็นว่าความสูงของเบรกเกอร์แปรผันตามกับจำนวนวอร์เทกซ์ก  
กล่าวคือยิ่งเพิ่มความสูงมากขึ้นเท่าใดยิ่งเป็นการเพิ่มจำนวนวอร์เทกซ์ให้มากขึ้นเท่านั้น ถึงแม้ว่าในกรณี  
นี้วอร์เทกซ์ที่เกิดขึ้นใหม่จะมีความแข็งแรงไม่มากนัก แต่ก็ยังเป็นข้อที่ต้องนำมาพิจารณาให้ถี่ถ้วนเมื่อมี  
การเปลี่ยนเงื่อนไขของการไหลออกไป เช่นการเพิ่มความเร็วของการสูบน้ำ เป็นต้น

ด้านผลกระทบต่อความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ พบว่าการเพิ่มเบรกเกอร์ในบ่อสูบน้ำช่วยลด  
กำลังของวอร์เทกซ์ลงได้ในบางระนาบของผนังบ่อเท่านั้น จากภาพประกอบ 25 จะเห็นว่ามีเฉพาะที่พื้น  
บ่อเท่านั้นที่วอร์เทกซ์ลดกำลังลง ในขณะที่ระนาบอื่นๆไม่ได้ช่วยมากนัก อย่างไรก็ตามพบว่ามี  
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของเบรกเกอร์ต่อกำลังของวอร์เทกซ์ที่เปลี่ยนไป นั่นคือ การลดความ  
สูงสามารถช่วยทำให้วอร์เทกซ์อ่อนกำลังลงได้ และเช่นเดียวกันกับการเพิ่มความกว้าง ย่อมมีจุดที่  
เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การป้องกันวอร์เทกซ์มีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าการจะหาจุด  
เหมาะสมดังกล่าวเป็นไปได้ยากเนื่องด้วยความหลากหลายของตัวแปรนั่นเอง

## 5.3 สรุป

ถึงแม้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหลจะช่วยเอื้ออำนวยในการ  
ตัดสินใจเลือกใช้เบรกเกอร์ที่เหมาะสมแล้วก็ตาม ในบางครั้งการสร้างแบบทดลองจริงในขนาดย่อส่วน  
ก็มีความจำเป็นด้วยเช่นกันโดยเฉพาะเมื่อบ่อสูบน้ำนั้นมีความสำคัญหรือมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่  
สูงมาก เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ดังที่ได้แสดงไว้แล้วว่าปัจจัยในการป้องกันวอร์เทกซ์ในบ่อสูบน้ำมีความหลากหลายมาก การ  
จะหาข้อสรุปที่ชัดเจนของตัวแปรแต่ละตัวต่อการเพิ่มหรือลดลงของจำนวนและความแข็งแรงของวอร์  
เทกซ์จึงเป็นเรื่องที่ยากและ/หรืออาจทำไม่ได้เลย อาจเป็นเหตุผลประการหนึ่งที่ไม่มีคู่มือหรือมาตรฐาน  
ในการออกแบบวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่สมบูรณ์ โดยเฉพาะเมื่อบ่อสูบน้ำนั้นๆมีรูปทรงที่ไม่เป็นเรขาคณิต

ข้อสังเกตประการหนึ่งคือถึงแม้การเพิ่มเบรกเกอร์จะทำให้จำนวนวอร์เทกซ์เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่  
ความแข็งแรงของวอร์เทกซ์ที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจไม่มีผลใดๆที่กระทบต่อระบบสูบน้ำ บนเงื่อนไขการไหล  
เดียวกัน ทั้งนี้จากผลการคำนวณที่ได้พบว่าความแข็งแรงที่พบมีค่าน้อยกว่าวอร์เทกซ์ดั้งเดิมมากจึง  
อาจเรียกได้ว่าเป็นเพียงการหมุนที่ต้นน้ำเท่านั้น ฉะนั้นที่เงื่อนไขของการไหลเดิม วอร์เทกซ์เหล่านั้นอาจ

ละไว้ได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึง แต่ทว่าเมื่อใดก็ตามที่มีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของการไหลไป เช่นการเพิ่มอัตราการสูบน้ำ วอร์เทกซ์เหล่านี้อาจมีความสำคัญขึ้นมา ดังนั้นประสิทธิภาพในการป้องกันวอร์เทกซ์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนวอร์เทกซ์ที่ลดลงมากกว่าจำนวนที่เพิ่มขึ้น

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

### 5.4.1 ข้อเสนอแนะทั่วไปสำหรับการออกแบบวอร์เทกซ์เบรกเกอร์

วอร์เทกซ์เบรกเกอร์ที่นำมาใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเพียงชนิดหนึ่งในอีกหลายๆชนิดถูกนำมาใช้ในบ่อสูบน้ำเท่านั้น จึงเป็นไปได้ที่ผลจากการคำนวณจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบบ่อสูบน้ำได้ทั้งหมด ดังนั้นต้องนำข้อมูลไปใช้ด้วยความรอบครอบโดยเฉพาะเมื่อระบบของบ่อสูบน้ำแตกต่างไปจากที่ระบุไว้ในงานวิจัยนี้

ตัวแปรหนึ่งที่ผู้ทำวิจัยไม่ได้กล่าวถึงคือความหนาของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์ ถึงแม้ความหนาจะมีความสำคัญต่อผลกระทบของการไหล แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความหนาของเบรกเกอร์เป็นลำดับสำคัญ เพราะการเลือกความหนาที่น้อยเกินไปอาจไม่สามารถต้านทานแรงดันของน้ำที่เกิดจากเครื่องสูบน้ำได้ ผลที่ตามมาคือเบรกเกอร์ได้รับความเสียหายและอาจรุนแรงไปถึงทำให้โครงสร้างของบ่อสูบน้ำตลอดจนเครื่องสูบน้ำได้รับความเสียหายตามลำดับ

### 5.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต

ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการไหลของน้ำในบ่อสูบน้ำหนึ่งๆมีมากกว่าความกว้างและความสูงตัวแปรอื่นๆที่สำคัญได้แก่ ตำแหน่งที่ติดตั้ง ชนิดของวอร์เทกซ์เบรกเกอร์หรือรูปร่างของเบรกเกอร์ที่นำมาใช้ ซึ่งล้วนแต่เป็นหัวข้อที่น่าสนใจสำหรับการทำวิจัยต่อไป

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

1. Igor J. Karassik, Joseph P. Messina, Paul Dopfer, Charles C. Heald, **Pump Handbook**, 3<sup>rd</sup> Edition, McGrall-Hill Companies, Inc., 2001. pp. 10.3 -10.55
2. G. S. Constantinescu, V. C. Patel, **Numerical Model for Simulation of Pump Intake Flow and Vortices**, Journal of Hydraulic Engineering, February 1998, pp. 123-134.
3. G. S. Constantinescu, V. C. Patel, **Role of Turbulence Model in Prediction of Pump-Bay Vortices**, Journal of Hydraulic Engineering, May 2000, pp. 387-391.
4. V. P. Rajendran, S. G. Constantinescu, and V. C. Patel, **Experimental Validation of Numerical Model of Flow in Pump-Intake Bays**, Journal of Hydraulic Engineering, November 1999, pp. 1119-1125.
5. Matahel Ansar, Tatsuaki Nakato, George Constantinescu, **Numerical Simulation of Inviscid Three-Dimensional Flows at Single and Dual Pump Intakes**, Journal of Hydraulic Reaserch, Vol. 40, 2002, no.4, pp. 461-470.
6. Takanori Shibata, Ryuichiro Iwano, Takahida Nagahara, Tomoyoshi Okamura, **A Numerical Method for Predicting the Cavitation Inception of a Submerged Vortex in Pump Sumps**, (Online), Available: <http://web.tsuchi.hitachi-hic.jp/hicweb/pdf/pump001.pdf>. Retrieved December 15, 2004.
7. Takahida Nagahara, Tadashi Sato, Tomoyoshi Okamura, **Effect of the Submerged Vortex Cavitation Occurred in Pump Suction Intake on Hydraulic Forces of Mixed Flow Pump Impeller**, (Online), Available:<http://web.tsuchi.hitachi-hic.jp/hicweb/pdf/pump003.pdf>., Retrieved December 15, 2004.
8. Ryuichiro Iwano, Takanori Shibata, Takahide Nagahara, Tomoyoshi Ohamura, **Numerical Prediction Method of a Submerged Vortex and Its Application to the Flow in Pump Sumps with and without a Baffle Plate**, (Online), Available:<http://web.tsuchi.hitachi-hic.jp/hicweb/pdf/pump005.pdf>., Retrieved December 15, 2004.
9. Deborah I. Bauer, Tatsuaki Nakato, Matahel Ansar, **Vortex Suppression in Multiple-Pump Sumps**, (Online), Available: <http://www.pubs.asce.org/WWWdisplay.cgi?9703815>, Retrieved December 15, 2004.

10. Andrew E. Johansson, Philip S. Stacy, Dean K White, **Advancements in Hydraulic Modeling of Cooling Water Intakes in Power Plants**, (Online), Available: <http://www.aldenlab.com/index.cfm/handlers?GID=14&ContentID=180>, Retrieved December 15, 2004.
11. Joseph B. Franzini, E. John Finnemore, **Fluid Mechanics with Engineering Application, International Edition**, McGraw-Hill Companies. Inc., 1997. P 654- 661
12. Fluent Inc., **Fluent 6.1 User's Guide Volume 1-3 (Computer Program)**, Fluent Inc., Centerra Resource Park 10 Cavendish Court Lebanon, NH 03766, February 2003
13. J. H. Ferziger, M. Peric, **Computational Methods for Fluid Dynamics**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996, pp. 25-38 and 67-84.
14. John, L. Dicmas, **Vertical Turbine, Mixed Flow, and Propeller Pump**, McGraw-Hill Book Company, 1987, pp. 177-211.
15. H. K Versteeg, W. Malalasekera, **An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method**, Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited. 1995.,

ภาคผนวก

ก. ผลการพิจารณาตอบรับงานวิจัยในงานสัมมนาทางวิชาการ ณ โรงเรียนนายร้อย  
พระจุลจอมเกล้า



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.ร.จปร. (โทร.๖๒๓๐๕)

ที่ กท๐๔๖๐.๒(สภาอาจารย์) / ๔๘ วันที่ ๑๖ ก.ย. ๕๕

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความจากผลงานวิจัย


เรียน นายวิรุณ ไสอินทร์

ตามที่ท่านได้เสนอบทความเรื่อง The Study of Vortex Prevention in Sump with Vortex Breaker by Computational fluid Dynamics เข้าร่วมในงานสัมมนาทางวิชาการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.ร.จปร. ในวันอังคารที่ ๑๐ ต.ค.๕๕ นั้น คณะอนุกรรมการได้พิจารณาแล้วเห็นควรดำเนินการดังนี้

- รับบทความของท่าน ลงตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมบทความและขอให้นำเสนอในงานสัมมนา หากไม่มานำเสนอจะไม่นำลงตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมบทความ

สภาอาจารย์ฯ ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งที่ท่านได้กรุณาส่งบทความเข้าร่วมงานสัมมนาทางวิชาการในครั้งนี้

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

พ.อ. 

(สุกโชค สัมปตตะวนิช)

ผอ.กวก.สกศ.ร.ร.จปร.

ประธานคณะกรรมการคัดเลือกบทความทางวิชาการ

# THE STUDY OF VORTEX PREVENTION IN SUMP WITH VORTEX BREAKER

## BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Wiroon So-in<sup>1</sup> Jutarat Kurujareon<sup>2</sup> Lt.Col. Anotai Suksangpanomrung<sup>3</sup>

Jointed Post Graduated Program (SWU-CRMA)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University (Ongkarug Campus), Rungsit-Nakhonnayok Rd., Ongkarak, Nakhonnayok 26120

E-mail: [wiroon\\_so@yahoo.com](mailto:wiroon_so@yahoo.com)<sup>1</sup>, [jutaratk@swu.ac.th](mailto:jutaratk@swu.ac.th)<sup>2</sup>, [asuksang@crma.ac.th](mailto:asuksang@crma.ac.th)<sup>3</sup>

### Abstract

The flow characteristic in sump with suction pipe was numerically studied utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) technique based on a finite volume method (FVM). The Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS) equation with two-layer k- $\epsilon$  model was solved unsteadily through out the numerical model. It was found that our numerical results agreed well with the experimental results conducted by [4].

Moreover, in our studied, a simple geometry vortex breaker was added at the bottom of sump for the purpose of preventing the vortex. And it was observed that only floor surface plane that vortex was weakening, the other three planes along the sump walls gave a greater strength with additional small vortexes surrounding the breaker.

**Keywords:** sump, submerged vortex, vortex breaker, CFD

### 1. Introduction

In the designing of water sump process, one of the most important things that must bring into the consideration is the occurrence of the cavitations since they are directly harmful to the pumping system. They reduce the efficiency and the operating life of the pump by hydraulically impacting to the pump impeller and casing[1], and in addition, the cavitations also cause the structure vibration and the noise through out the building.

Cavitations could be classified into two types as the way they were inception, 1) Free surface vortex and 2) Submerged

vortex. The latter is the major concerns since they are more complicated in the occurrence and prevention. Thus vortex breakers are often used to prevent both type of vortex. Due to the various applications and actual site conditions, many types [2] of vortex breakers are provided. However, there are not much the studies of the flow characteristics in such applications. Only a few studies of the following researches were conducted.

Constantinescu[3] developed the numerical model to simulate three dimensional flow field in the pump intake bay. The model was solved by RANS with the two-layer k- $\epsilon$  model in curvilinear coordinate. The near wall flow was also taken into account to this turbulent model which is important for prediction of the wall attached submerged vortex. The numerical model was approximately 550,000 of grid points and was tested for the grid dependency with lower resolution to 220,000 with no difference more than 4%. The calculation also continued on Reynold's number of 20,000 and 60,000 for on the coarse and fine grid, respectively.

Rajendran [4] conducted the laboratory sump to validate his numerical model. The flow properties in the sump were measured by PIV and the result was compared to the numerical model calculated by using CFD. The model of the Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS) equation was solved with two-layer k- $\epsilon$  model at steady state condition. The results came out agree well with experimental one. This experimental model of the sump without vortex breaker will

also be used as a validation for our investigation before adding the vortex breaker in the sump.

Constantinescu[5] had compared the two type of turbulent models for their roles and the influence of wall roughness on the prediction of location, size, and strength of different type of vortices. The  $k-\epsilon$  and  $k-\omega$  model were used and their result were similar in shape and size but gave a different in strength and location which depended on the near-wall flow treatment. The roughness of the wall was weakening the strength of vortices which may be use as one of vortex suppression.

Ansar[6] also conducted the laboratory model with single and dual pump and compared the results with the numerical model. The cross flow and no cross flow case were taken into account in both experimental and numerical model.

The goal of our research was to study the flow pattern and phenomenon such as the change of streamline, the strength of each vortex, and quantity of vortex before and after the breaker was installed. Therefore, there was unnecessary to use the complicated shape and installation location of the breaker.

## 2. Experimental and Numerical Models

As previously mentioned, the model of Rajendran[4] was use to validated the numerical model, the sump is 308 mm. in width, 1120 mm. in length, and 211.2 mm. in height, the suction pipe is 88 mm. in diameter and was placed eccentric to the sump to make the imbalance of the incoming flow. Inlet velocity is  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$  and placed at the far end of the sump wall. The Reynolds based on pipe diameter and the average inlet velocity in pipe was 45,000 and the Frude (F) and the Weber (W) Number were 0.55 and 325, respectively. This model could produce one-free surface and four-submerged vortex along the walls bounded the suction pipe as shown in figure 1 but since the free surface vortex was not much complicated in prevention, this research was focused only the submerged one, therefore, the comparison of free surface

vortices was not shown here.

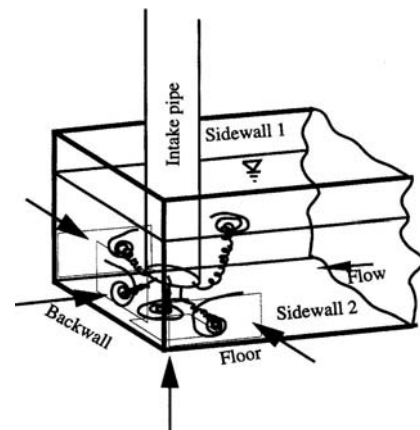


Figure 1. Vortice in the sump[4]

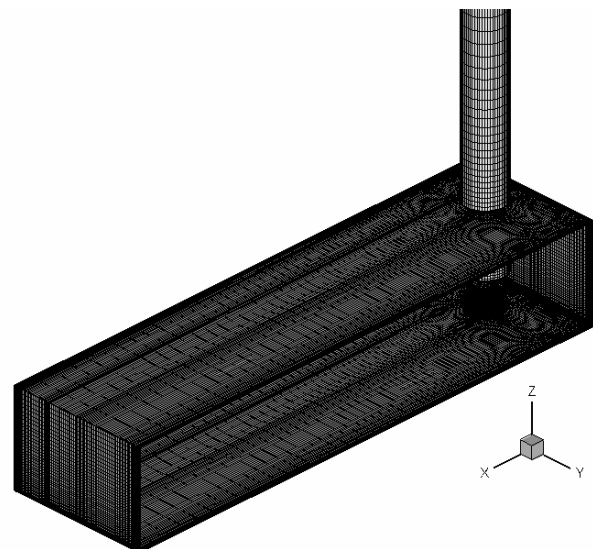


Figure 2. Computational Grid

The numerical were carried out on a structured grid of 578,000 points as shown in Figure 2. RANS and RNG  $k-\epsilon$  Model (Enhance Near-Wall Treatment) were solved in 3D with implicit and unsteady condition.

Finally, a vortex breaker was added into the model of sump pump at the bottom of the sump as shown in figure 3. The flow condition used for this model was the same as the model of the previous one.

Breaker was rectangular with the same width as sump. The height of 70.4 mm was used (Which is exactly equal to

the gap between sump bottom and the inlet of suction pipe). The thickness of the breaker was assumed to be infinity thin.

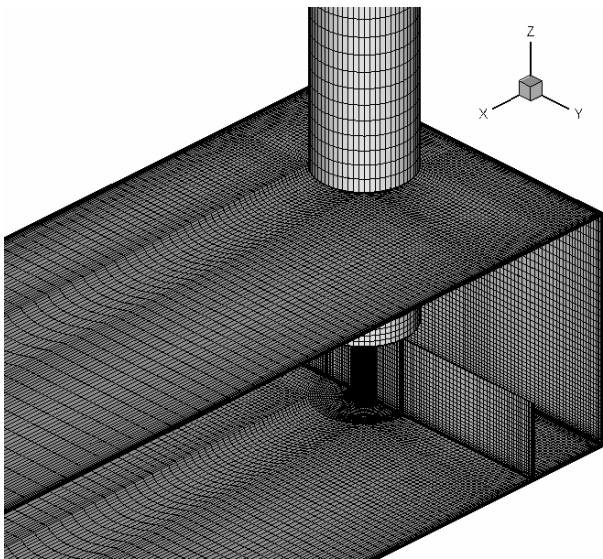


Figure 3. Computational Grid showing Vortex Breaker on the Sump Bottom

The model also was tested for the Grid dependency with a higher and lower resolution of the cell. The results were compared for the location, strength, and the size of vortex.

### 3. Numerical Results

The numerical results are presented by cutting the plane at some distance parallel to each sump wall and denoted as 1), Floor surface, 2). Backwall Surface, 3). Sidewall 1 Surface, and 4). Sidewalls 2 Surface, the distance from the wall, respectively, were;

- Floor Surface =  $0.25d$  from Floor
- Backwall Surface =  $0.23d$  from backwall
- Sidewall 1 Surface =  $0.25d$  from sidewall 2
- Sidewall 2 Surface =  $0.15d$  from sidewall 1

#### 3.1 Comparison with Referenced Paper

The streamlines are shown in figure 4 comparing between the experimental and the numerical model. Circulation

directions are not different but the location is still in doubt since the referenced paper did not exactly show the location of each vortex at each plane of sump wall.

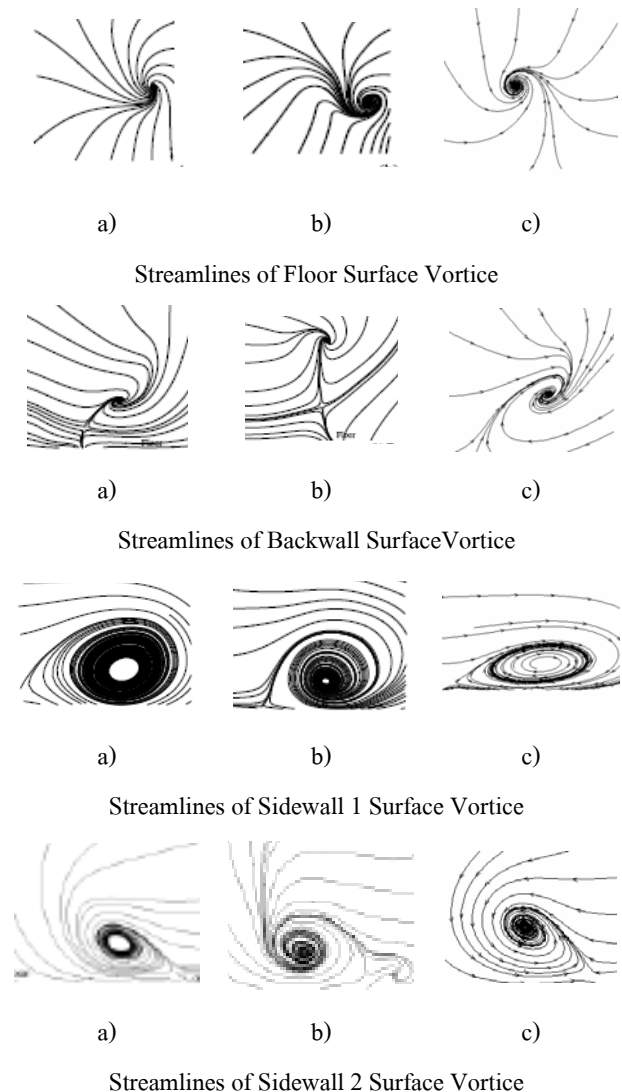


Figure 4. Streamline comparison; a) Numerical Model of referenced paper, b) Experimental model of referenced paper, c) Numerical model of this paper

As the streamline only do show the graphical comparison, hence, the numerical points of view are required. Figure 5 illustrates the results of calculation compared with the referenced paper, the calculation are presented in the dimensionless parameter as  $r/d$ ,  $V_\theta/V$ , and  $\Gamma/Vd$

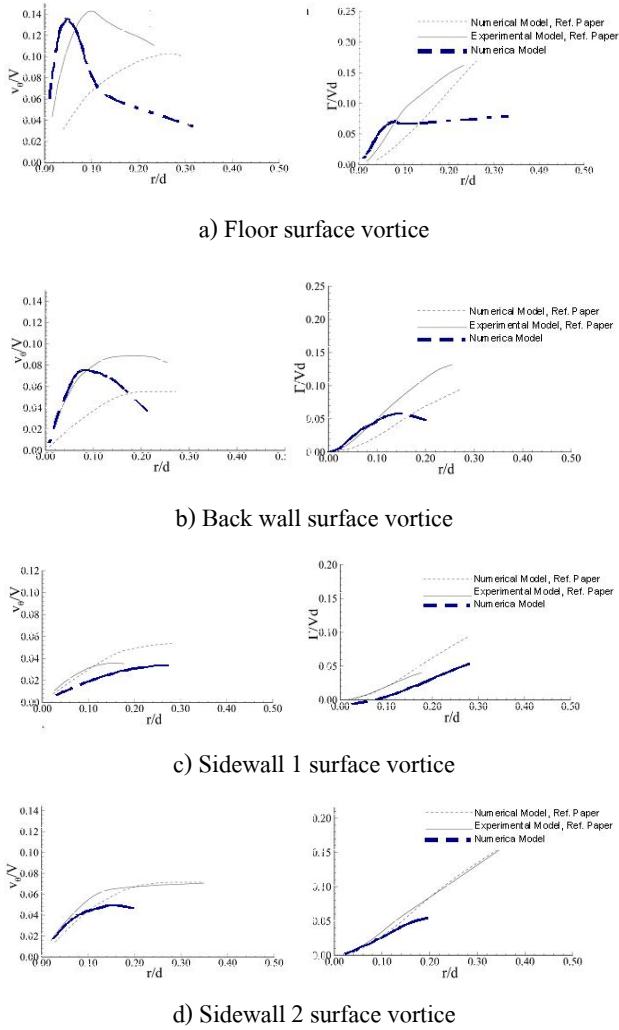


Figure 5. Tangential and circulation comparison

The numerical results of the overall data yields the same trend as experimental results. However, the calculation results are closed only at the small radius of vortices. At larger radius, the tangential velocity and the circulation are drop steeply but there are sufficient for this study.

### 3.2 Numerical Results of Sump with Vortex Breaker

After the vortex breaker has been added to the sump, there are some changes of flow pattern especially at the plane of floor surface, sidewall 1 surface, and sidewall 2 surface. This caused by the change of sump geometry with the additional breaker. However at the back wall surface, there are not much changed of the flow pattern, as shown in figure 6.

At the floor surface plane, there are 4 additional vortices observed close to the breaker and the sump wall. However, the strength of these vortices is not much grater. While the vortex at the same location where breaker has not been install is weaker as shown in Figure 7

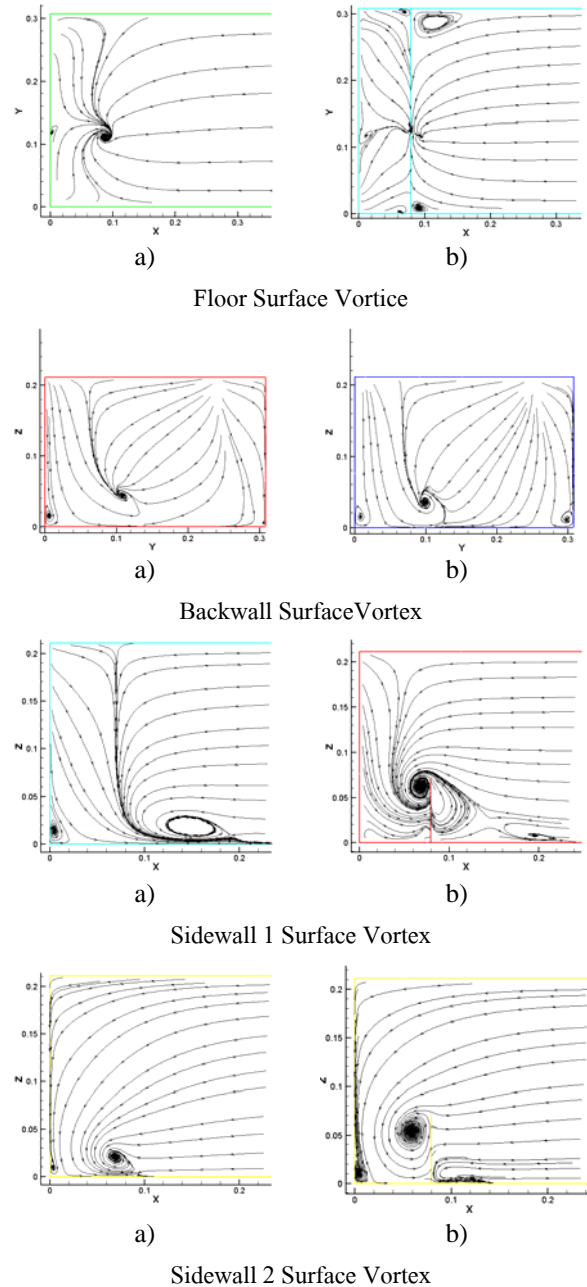


Figure 6. Streamline comparison; a) Without breaker, b) With breaker

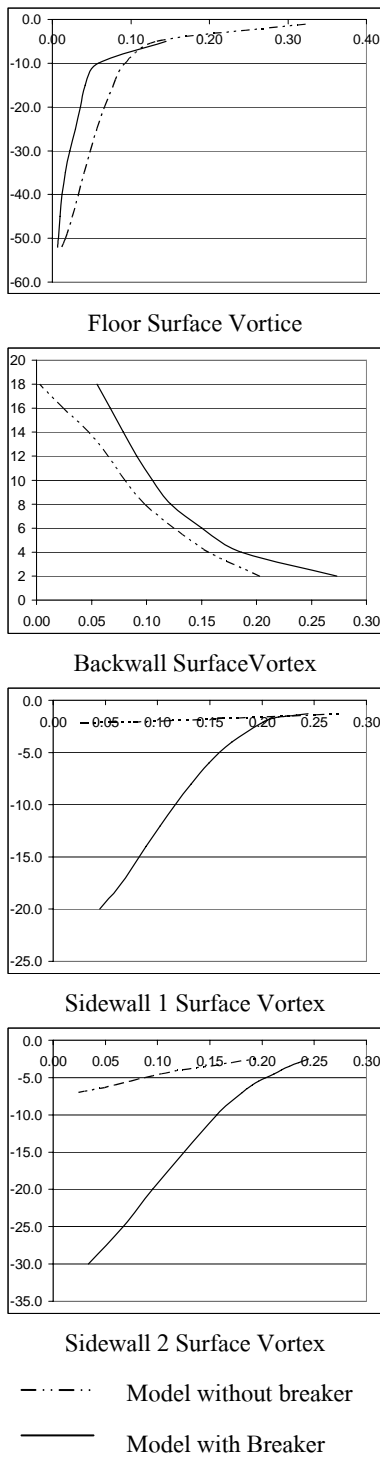


Figure 7. Plotting of Vorticity against the radius (r/d)

At sidewall 1 and 2, breaker produces additional vortex in front of the breaker. It is shown in Figure 7 that the strength of vortex at the same locations where the breaker has not been placed is stronger. This indicates that such type of breaker is not applicable to prevent vortex in these two planes.

At the back wall plane, although the flow pattern does not change too much, but the breaker gives a greater strength of vortex as occurred at sidewall 1 and sidewall 2.

**4. Conclusion**

The calculation results revealed that numerical model gave the deviated flow data from the experimentation. Nevertheless, they were in the same trend and direction especially at the small radius of vortices which the calculation was significantly close to the experimental. This is a cheap and fast way in designing of sump which will give the designers a preliminary conclusion before the real sump with true or smaller scale is constructing.

The breaker that added in the sump did not help in prevention for all of the vortexes. On the other hand, the small strength of vortexes were generated around the breaker at some plane. These vortexes, with the flow conditions such as inlet velocity is not change, may not be accounted if they are not creating the air core.

To prevent the vortex in the sump, it requires more than just a simple geometry of vortex breaker since the phenomenon of submerged vortex are too complicated and many times the site condition are totally different from what had been specify in the any Handbooks. Therefore, a careful calculation must be taken since it directly effected on the cost and construction time.

The simulation results were given only for the vortex breaker that had a fixed dimension in length, width, and height. As previously mentioned, the vortex at some planes such as backwall and sidewall could not be eliminated. On the other hand, there is stronger vortex strength occurred in this vicinity. It is interesting that such parameters have an influence on the vortex prevention or not. Hence it might be the subjects for the next stage of this research area.

## References

- [1] Takahida Nagahara, Toshiyuki Sato, Tomoyoshi Okamura, “Effect of the submerged Vortex Cavitation Occurred in Pump Suction Intake on Hydraulic Forces of Mixed Flow Pump Impeller”, (Online), Available: [http://cav2001.library.caltech.edu/358/00/b8\\_006\\_nagahara.pdf#search=%22Effect%20of%20the%20submerged%20Vortex%20Cavitation%20Occurred%20in%20Pump%20Suction%20Intake%20on%20Hydraulic%20Forces%20of%20Mixed%20Flow%20Pump%20Impeller%22](http://cav2001.library.caltech.edu/358/00/b8_006_nagahara.pdf#search=%22Effect%20of%20the%20submerged%20Vortex%20Cavitation%20Occurred%20in%20Pump%20Suction%20Intake%20on%20Hydraulic%20Forces%20of%20Mixed%20Flow%20Pump%20Impeller%22). Retrieved December 15, 2004.
- [2] John, L. Dicmas, Vertical Turbine, Mixed Flow, and Propeller Pump, McGraw-Hill Book Company, 1987, pp. 177-211.
- [3] G. S. Constantinescu, V. C. Patel, “Numerical Model for Simulation of Pump Intake Flow and Vortices”, Journal of Hydraulic Engineering, February 1998, pp. 123-134.
- [4] V. P. Rajendran, S. G. Constantinescu, and V. C. Patel, “Experimental Validation of Numerical Model of Flow in Pump-Intake Bays”, Journal of Hydraulic Engineering, November 1999, pp. 1119-1125.
- [5] G. S. Constantinescu, V. C. Patel, “Role of Turbulence Model in Prediction of Pump-Bay Vortices”, Journal of Hydraulic Engineering, May 2000, pp. 387-391.
- [6] Matahel Ansar, Tatsuaki Nakato, George Constantinescu, “Numerical Simulation of Inviscid Three-Dimensional Flows at Single and Dual Pump Intakes”, Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, 2002, no.4, pp. 461-470.

## Notation

The following symbols are used in this paper:

- $r$  = radial distance from vortex center [m]  
 $d$  = Suction pipe diameter [m]  
 $V_{\theta}$  = tangential velocity [m/s]  
 $V$  = average velocity in intake pipe [m/s]  
 $\Gamma$  = circulation [ $m^2/s$ ]

## ข. รายงานการคำนวณโดยโปรแกรม Fluent

เนื้อหาของภาคผนวกในส่วนนี้แสดงไว้ในแผ่น CD-ROM ที่แนบมาพร้อมกันนี้

ค. ผลการคำนวณค่าตัวแปรไร้หน่วย Circulation, ความเร็วในแนวตั้งฉากกับรัศมี และที่รัศมีของวอร์เทกซ์ต่างๆ

ตารางที่ 1 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองที่ความละเอียดของกริดต่างๆ ที่ ระบายพื้นบ่อ

Floor Surface										% Error	
Medium Grid			Coarse Grid			Fine Grid				Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
										min=-50.89249	
Z-Vorticity	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
-52.0	0.0122	0.0043	0.0565442								
-50.0	0.0169	0.0080	0.0754534				0.0080	0.0018	0.0358414	-343.1882	-110.5204
-45.0	0.0260	0.0170	0.1042393				0.0207	0.0108	0.0831514	-57.1533	-25.3608
-40.0	0.0335	0.0252	0.1197015	0.0053	0.0006	0.0189901	0.0299	0.0200	0.1066382	-26.0009	-12.2501
-35.0	0.0409	0.0329	0.1277964	0.0256	0.0129	0.0799935	0.0380	0.0284	0.1187792	-15.7593	-7.5915
-30.0	0.0487	0.0399	0.1303636	0.0384	0.0249	0.1029491	0.0462	0.0358	0.1235746	-11.2895	-5.4938
-25.0	0.0569	0.0454	0.1270031	0.0509	0.0364	0.113656	0.0551	0.0425	0.122868	-6.8443	-3.3655
-20.0	0.0665	0.0497	0.1187845	0.0643	0.0464	0.114768	0.0648	0.0471	0.1157022	-5.3989	-2.6640
-15.0	0.0780	0.0511	0.1043675	0.0786	0.0520	0.1052274	0.0766	0.0493	0.1024833	-3.7109	-1.8386
-10.0	0.0927	0.0482	0.0827293	0.0955	0.0512	0.0852366	0.0914	0.0468	0.0815388	-2.9414	-1.4600
-5.0	0.1332	0.0498	0.0594574	0.1248	0.0437	0.0556963	0.1326	0.0493	0.0591861	-0.9190	-0.4585
-1.0	0.3250	0.0592	0.0290043	0.1828	0.0187	0.0163126	0.3237	0.0588	0.0288934	-0.7687	-0.3836

ตารางที่ 2 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองที่ความละเอียดของกริดต่างๆ ที่ ระบายผนังหลังบ่อ

BackWall										% Error	
Medium Grid			Coarse Grid			Fine Grid				Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
										max=19.226753	
Z-Vorticity	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
2.0	0.2034	0.0464	0.0363154	0.1670	0.0313	0.0298179	0.2010	0.0453	0.0358705	-2.4962	-1.2404
4.0	0.1569	0.0552	0.0559964	0.1394	0.0436	0.0497498	0.1560	0.0546	0.0557083	-1.0370	-0.5172
6.0	0.1250	0.0526	0.0669483	0.1162	0.0455	0.0622493	0.1253	0.0529	0.0671026	0.4593	0.2299
8.0	0.0985	0.0436	0.0703479	0.0960	0.0413	0.0685217	0.0993	0.0443	0.0709066	1.5699	0.7880
10.0	0.0804	0.0363	0.0717707	0.0750	0.0316	0.0669756	0.0832	0.0388	0.0742486	6.5632	3.3373
12.0	0.0651	0.0286	0.0697511	0.0539	0.0195	0.0576877	0.0681	0.0313	0.0729731	8.6357	4.4153
14.0	0.0475	0.0177	0.0593654	0.0199	0.0031	0.0248743	0.0536	0.0226	0.067033	21.5687	11.4386
16.0	0.0245	0.0054	0.0349292	0.0000	0.0000	0	0.0364	0.0119	0.0519406	54.7765	32.7516
18.0	0.0030	0.0001	0.0047805	0.0000	0.0000	0	0.0134	0.0018	0.0215671	95.0868	77.8343

ตารางที่ 3 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองที่ความละเอียดของกริดต่างๆ ที่ ระบายผนังข้างบ่อ 1

Sidewall 1										% Error	
Medium Grid			Coarse Grid			Fine Grid				Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
										Max=-2.2196991	
Y-Vorticity	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
-2.2	0.0255	0.0008	0.0050155	0.0000	0.0000	0	0.0170	0.0004	0.0033325	-126.5082	-50.5019
-2.1	0.0763	0.0069	0.0143045	0.0000	0.0000	0	0.0748	0.0066	0.0140214	-4.0790	-2.0191
-2.0	0.1073	0.0129	0.0191446	0.0000	0.0000	0	0.1071	0.0129	0.0191254	-0.2019	-0.1009
-1.9	0.1331	0.0189	0.0225737	0.0000	0.0000	0	0.1333	0.0189	0.0226024	0.2538	0.1270
-1.8	0.1561	0.0246	0.0250789	0.0000	0.0000	0	0.1560	0.0246	0.0250543	-0.1960	-0.0980
-1.7	0.1781	0.0302	0.0270151	0.0000	0.0000	0	0.1774	0.0300	0.0269188	-0.7167	-0.3577
-1.6	0.2046	0.0376	0.0292107	0.0000	0.0000	0	0.2010	0.0363	0.0287069	-3.5407	-1.7550
-1.5	0.2287	0.0440	0.0306189	0.0000	0.0000	0	0.2273	0.0435	0.0304332	-1.2241	-0.6102
-1.4	0.2516	0.0497	0.0314332	0.0000	0.0000	0	0.2510	0.0495	0.0313614	-0.4586	-0.2290
-1.3	0.2742	0.0548	0.0318116	0.0000	0.0000	0	0.2727	0.0542	0.0316358	-1.1148	-0.5559

ตารางที่ 4 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองที่ความละเอียดของกริดต่างๆ ที่ ระบายผนังข้างบ่อ 2

BackWall

BackWall										% Error	
Medium Grid			Coarse Grid				Fine Grid				
										max=19.226753	
Z-Vorticity	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	R <sub>ave</sub> /d	Circulation/Vd Cal	V <sub>g</sub> /V	Circulation/Vd	V <sub>g</sub> /V
2.0	0.2034	0.0464	0.0363154	0.1670	0.0313	0.0298179	0.2010	0.0453	0.0358705	-2.4962	-1.2404
4.0	0.1569	0.0552	0.0559964	0.1394	0.0436	0.0497498	0.1560	0.0546	0.0557083	-1.0370	-0.5172
6.0	0.1250	0.0526	0.0669483	0.1162	0.0455	0.0622493	0.1253	0.0529	0.0671026	0.4593	0.2299
8.0	0.0985	0.0436	0.0703479	0.0960	0.0413	0.0685217	0.0993	0.0443	0.0709066	1.5699	0.7880
10.0	0.0804	0.0363	0.0717707	0.0750	0.0316	0.0669756	0.0832	0.0388	0.0742486	6.5632	3.3373
12.0	0.0651	0.0286	0.0697511	0.0539	0.0195	0.0576877	0.0681	0.0313	0.0729731	8.6357	4.4153
14.0	0.0475	0.0177	0.0593654	0.0199	0.0031	0.0248743	0.0536	0.0226	0.067033	21.5687	11.4386
16.0	0.0245	0.0054	0.0349292	0.0000	0.0000	0	0.0364	0.0119	0.0519406	54.7765	32.7516
18.0	0.0030	0.0001	0.0047805	0.0000	0.0000	0	0.0134	0.0018	0.0215671	95.0868	77.8343

ตารางที่ 5 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์กรณีที่ 1.1 ถึง 1.3 ที่ระนาบพื้นบ่อ

Floor Surface

Z-Vorticity	Validated Model			Case 1.1 (min=-33.310719)			Case 1.2 (min=-37.14481)			Case 1.3 (Max=-56.269)		
	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-52.0	3.6128E-06	0.0011	0.0122							1.0319E-06	0.0006	0.0065
-50.0	6.9582E-06	0.0015	0.0169							1.3802E-06	0.0007	0.0075
-45.0	1.6395E-05	0.0023	0.0260							2.3816E-06	0.0009	0.0099
-40.0	2.7363E-05	0.0030	0.0335							3.7817E-06	0.0011	0.0125
-35.0	4.0736E-05	0.0036	0.0409				4.6787E-06	0.0012	0.0139	6.7706E-06	0.0015	0.0167
-30.0	5.7696E-05	0.0043	0.0487	6.8515E-06			3.2080E-05	0.0032	0.0363	1.2021E-05	0.0020	0.0222
-25.0	7.8855E-05	0.0050	0.0569	2.2014E-05			7.9159E-05	0.0050	0.0570	2.0980E-05	0.0026	0.0294
-20.0	1.0778E-04	0.0059	0.0665	4.3389E-05	0.0037	0.0422	1.6153E-04	0.0072	0.0815	3.0835E-05	0.0031	0.0356
-15.0	1.4792E-04	0.0069	0.0780	7.5084E-05	0.0049	0.0555	2.5870E-04	0.0091	0.1031	4.2521E-05	0.0037	0.0418
-10.0	2.0912E-04	0.0082	0.0927	1.2816E-04	0.0064	0.0726	3.7098E-04	0.0109	0.1235	8.2925E-05	0.0051	0.0584
-5.0	4.3207E-04	0.0117	0.1332	2.2631E-04	0.0085	0.0964	5.4032E-04	0.0131	0.1490	5.0990E-04	0.0127	0.1447
-1.0	2.5704E-03	0.0286	0.3250	3.0555E-04	0.0099	0.1120						

ตารางที่ 6 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์กรณีที่ 1.1 ถึง 1.3 ที่ระนาบผนังผลังบ่อ

Back Wall

Z-Vorticity	Validated Model			Case 1.1 (max=3.4032254)			Case 1.2 (max=14.312435)			Case 1.3 (Max=24.254)		
	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
0.5				0.000345442	0.0105	0.1191						
1.0				0.000220687	0.0084	0.0952						
1.5				0.000149145	0.0069	0.0783						
2.0	1.0074E-03	0.0179	0.2034	9.3337E-05	0.0054	0.0619	4.7961E-04	0.0124	0.1404	1.8137E-03	0.0240	0.2730
2.5				4.5949E-05	0.0038	0.0435						
3.0				1.1760E-05	0.0019	0.0220						
4.0	5.9880E-04	0.0138	0.1569				3.1493E-04	0.0100	0.1138	8.4658E-04	0.0164	0.1865
6.0	3.8041E-04	0.0110	0.1250				2.1839E-04	0.0083	0.0947	5.5177E-04	0.0133	0.1506
8.0	2.3627E-04	0.0087	0.0985				1.4580E-04	0.0068	0.0774	3.6286E-04	0.0107	0.1221
10.0	1.5739E-04	0.0071	0.0804				8.1451E-05	0.0051	0.0579	2.7186E-04	0.0093	0.1057
12.0	1.0323E-04	0.0057	0.0651				3.7528E-05	0.0035	0.0393	2.0223E-04	0.0080	0.0912
14.0	5.4940E-05	0.0042	0.0475				5.9483E-07	0.0004	0.0049	1.5151E-04	0.0069	0.0789
16.0	1.4562E-05	0.0022	0.0245							1.0985E-04	0.0059	0.0672
18.0	2.1552E-07	0.0003	0.0030							7.3963E-05	0.0049	0.0551

ตารางที่ 7 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์กรณีที่ 1.1 ถึง 1.3 ที่ระนาบผนังข้างบ่อ 1

Side Wall 1

Z-Vorticity	Validated Model			Case 1.1			Case 1.2			Case 1.3 (Min=-22.23)		
	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-20.0										4.8791E-05	0.0039	0.0448
-18.0										9.3062E-05	0.0054	0.0618
-16.0										1.3973E-04	0.0067	0.0758
-14.0										1.9278E-04	0.0078	0.0890
-12.0										2.5581E-04	0.0090	0.1025
-10.0										3.3214E-04	0.0103	0.1168
-8.0										4.2494E-04	0.0116	0.1321
-6.0										5.4058E-04	0.0131	0.1490
-4.0										7.1269E-04	0.0151	0.1711
-2.2	1.5880E-05	0.0022	0.0255							9.6077E-04	0.0175	0.1987
-2.1	1.4177E-04	0.0067	0.0763							9.8075E-04	0.0177	0.2007
-2.0	2.7997E-04	0.0094	0.1073							1.0016E-03	0.0179	0.2029
-1.9	4.3130E-04	0.0117	0.1331							1.0234E-03	0.0180	0.2051
-1.8	5.9313E-04	0.0137	0.1561							1.0462E-03	0.0182	0.2073
-1.7	7.7160E-04	0.0157	0.1781							1.0857E-03	0.0186	0.2112
-1.6	1.0184E-03	0.0180	0.2046							1.1366E-03	0.0190	0.2161
-1.5	1.2731E-03	0.0201	0.2287							1.2074E-03	0.0196	0.2227
-1.4	1.5403E-03	0.0221	0.2516							1.3230E-03	0.0205	0.2331
-1.3	1.8296E-03	0.0241	0.2742							1.4486E-03	0.0215	0.2440

ตารางที่ 8 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์กรณี 1.1 ถึง 1.3 ที่ระนาบผนังข้างบ่อ 2

Side Wall 2

Z-Vorticity	Validated Model			Case 1.1			Case 1.2			Case 1.3 (Min=-31.64)		
	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-30.0										2.8127E-05	0.0030	0.0340
-25.0										1.1005E-04	0.0059	0.0672
-20.0										2.2076E-04	0.0084	0.0952
-10.0										5.9608E-04	0.0138	0.1565
-7.0	1.4371E-05	0.0021	0.0243							7.9698E-04	0.0159	0.1810
-6.5	4.9458E-05	0.0040	0.0451							8.3819E-04	0.0163	0.1856
-6.0	8.8028E-05	0.0053	0.0601							8.8527E-04	0.0168	0.1907
-5.5	1.3522E-04	0.0066	0.0745							9.3960E-04	0.0173	0.1965
-5.0	1.9054E-04	0.0078	0.0885							1.0078E-03	0.0179	0.2035
-4.5	2.6265E-04	0.0091	0.1039							1.0864E-03	0.0186	0.2113
-4.0	3.7616E-04	0.0109	0.1243							1.1643E-03	0.0192	0.2187
-3.5	5.5312E-04	0.0133	0.1508							1.2457E-03	0.0199	0.2262
-3.0	7.2074E-04	0.0151	0.1721							1.3434E-03	0.0207	0.2349
-2.5	9.3305E-04	0.0172	0.1958							1.4540E-03	0.0215	0.2444

ตารางที่ 9 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์กรณี 2.1 ถึง 2.3 ที่ระนาบพื้นบ่อ

Floor Surface

Z-Vorticity	Validated Model			Case 2.1			Case 2.2			Case 2.3 (Max=56.269)		
	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m2)	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-52.0	3.6128E-06	0.0011	0.0122							1.0319E-06	0.0006	0.0065
-50.0	6.9582E-06	0.0015	0.0169							1.3802E-06	0.0007	0.0075
-45.0	1.6395E-05	0.0023	0.0260							2.3816E-06	0.0009	0.0099
-40.0	2.7363E-05	0.0030	0.0335				2.5006E-07	0.0003	0.0032	3.7817E-06	0.0011	0.0125
-35.0	4.0736E-05	0.0036	0.0409				1.8547E-06	0.0008	0.0087	6.7706E-06	0.0015	0.0167
-30.0	5.7696E-05	0.0043	0.0487				4.7933E-06	0.0012	0.0140	1.2021E-05	0.0020	0.0222
-25.0	7.8855E-05	0.0050	0.0569				8.9763E-06	0.0017	0.0192	2.0980E-05	0.0026	0.0294
-20.0	1.0778E-04	0.0059	0.0665	6.7605E-06	0.0015	0.0167	1.6158E-05	0.0023	0.0258	3.0835E-05	0.0031	0.0356
-15.0	1.4792E-04	0.0069	0.0780	6.0437E-05	0.0044	0.0498	3.2780E-05	0.0032	0.0367	4.2521E-05	0.0037	0.0418
-10.0	2.0912E-04	0.0082	0.0927	2.2220E-04	0.0084	0.0955	1.2454E-04	0.0063	0.0715	8.2925E-05	0.0051	0.0584
-5.0	4.3207E-04	0.0117	0.1332	5.0838E-04	0.0127	0.1445	4.2519E-04	0.0116	0.1322	5.0990E-04	0.0127	0.1447
-1.0	2.5704E-03	0.0286	0.3250	3.0387E-03	0.0311	0.3533						

ตารางที่ 10 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์เบรกเกอร์กรณี 2.1 ถึง 2.3 ที่ระนาบผนังผลบ่อ

Back Wall

Z-Vorticity	Validated Model			Case 2.1			Case 2.2			Case 2.3 (Max=24.254)		
	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
2.0	1.0074E-03	0.0179	0.2034	1.0160E-03	0.0180	0.2043	1.0768E-03	0.0185	0.2103	1.8137E-03	0.0240	0.2730
4.0	5.9880E-04	0.0138	0.1569	6.1285E-04	0.0140	0.1587	6.2796E-04	0.0141	0.1606	8.4658E-04	0.0164	0.1865
6.0	3.8041E-04	0.0110	0.1250	3.9023E-04	0.0111	0.1266	4.3378E-04	0.0117	0.1335	5.5177E-04	0.0133	0.1506
8.0	2.3627E-04	0.0087	0.0985	2.4228E-04	0.0088	0.0998	2.9456E-04	0.0097	0.1100	3.6286E-04	0.0107	0.1221
10.0	1.5739E-04	0.0071	0.0804	1.6657E-04	0.0073	0.0827	2.1491E-04	0.0083	0.0940	2.7186E-04	0.0093	0.1057
12.0	1.0323E-04	0.0057	0.0651	1.1091E-04	0.0059	0.0675	1.5589E-04	0.0070	0.0800	2.0223E-04	0.0080	0.0912
14.0	5.4940E-05	0.0042	0.0475	6.4005E-05	0.0045	0.0513	1.0783E-04	0.0059	0.0666	1.5151E-04	0.0069	0.0789
16.0	1.4562E-05	0.0022	0.0245	2.0844E-05	0.0026	0.0293	6.6405E-05	0.0046	0.0522	1.0985E-04	0.0059	0.0672
18.0	2.1552E-07	0.0003	0.0030	1.2886E-06	0.0006	0.0072	3.1550E-05	0.0032	0.0360	7.3963E-05	0.0049	0.0551

ตารางที่ 11 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์กรณี 2.1 ถึง 2.3 ที่ระนาบผนังข้างบ่อ 1

Side Wall 1

Z-Vorticity	Validated Model			Case 2.1			Case 2.2			Case 2.3 (Min=-22.23)		
	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-20.0										4.8791E-05	0.0039	0.0448
-18.0										9.3062E-05	0.0054	0.0618
-16.0										1.3973E-04	0.0067	0.0758
-14.0										1.9278E-04	0.0078	0.0890
-12.0										2.5561E-04	0.0090	0.1025
-10.0										3.3214E-04	0.0103	0.1168
-8.0										4.2494E-04	0.0116	0.1321
-6.0							3.7424E-05	0.0035	0.0392	5.4058E-04	0.0131	0.1490
-4.0							1.7024E-04	0.0074	0.0836	7.1269E-04	0.0151	0.1711
-2.2	1.5880E-05	0.0022	0.0255				4.0161E-04	0.0113	0.1285	9.6077E-04	0.0175	0.1987
-2.1	1.4177E-04	0.0067	0.0763				4.2075E-04	0.0116	0.1315	9.8075E-04	0.0177	0.2007
-2.0	2.7997E-04	0.0094	0.1073				4.4142E-04	0.0119	0.1347	1.0016E-03	0.0179	0.2029
-1.9	4.3130E-04	0.0117	0.1331				4.6331E-04	0.0121	0.1380	1.0234E-03	0.0180	0.2051
-1.8	5.9313E-04	0.0137	0.1561				4.8640E-04	0.0124	0.1414	1.0462E-03	0.0182	0.2073
-1.7	7.7160E-04	0.0157	0.1781				5.1072E-04	0.0127	0.1449	1.0857E-03	0.0186	0.2112
-1.6	1.0184E-03	0.0180	0.2046	1.4363E-06	0.0007	0.0077	5.3604E-04	0.0131	0.1484	1.1366E-03	0.0190	0.2161
-1.5	1.2731E-03	0.0201	0.2287	2.3991E-05	0.0028	0.0314	5.6273E-04	0.0134	0.1521	1.2074E-03	0.0196	0.2227
-1.4	1.5403E-03	0.0221	0.2516	5.8400E-05	0.0043	0.0490	5.9088E-04	0.0137	0.1558	1.3230E-03	0.0205	0.2331
-1.3	1.8296E-03	0.0241	0.2742	1.0492E-04	0.0058	0.0657	6.2628E-04	0.0141	0.1604	1.4486E-03	0.0215	0.2440

ตารางที่ 12 ค. แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังติดตั้งวอร์เทกซ์ เบรกเกอร์กรณี 2.1 ถึง 2.3 ที่ระนาบผนังข้างบ่อ 2

Side Wall 2

Z-Vorticity	Validated Model			Case 2.1			Case 2.2			Case 2.3 (Min=-31.64)		
	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d	Area (m <sup>2</sup> )	R <sub>ave</sub> (m)	R <sub>ave</sub> /d
-30.0										2.8127E-05	0.0030	0.0340
-25.0										1.1005E-04	0.0059	0.0672
-20.0							1.6015E-05	0.0023	0.0257	2.2076E-04	0.0084	0.0952
-18.0							5.5926E-05	0.0042	0.0479			
-16.0							1.0867E-04	0.0059	0.0668			
-14.0							1.7068E-04	0.0074	0.0837			
-12.0							2.4734E-04	0.0089	0.1008			
-10.0							3.3911E-04	0.0104	0.1180	5.9608E-04	0.0138	0.1565
-8.0							4.4843E-04	0.0119	0.1357			
-7.0	1.4371E-05	0.0021	0.0243	1.1608E-05	0.0019	0.0218	5.1599E-04	0.0128	0.1456	7.9698E-04	0.0159	0.1810
-6.5	4.9458E-05	0.0040	0.0451	4.9634E-05	0.0040	0.0452	5.5295E-04	0.0133	0.1507	8.3819E-04	0.0163	0.1856
-6.0	8.8028E-05	0.0053	0.0601	9.3300E-05	0.0054	0.0619	5.9485E-04	0.0138	0.1563	8.8527E-04	0.0168	0.1907
-5.5	1.3522E-04	0.0066	0.0745	1.4536E-04	0.0068	0.0773	6.3953E-04	0.0143	0.1621	9.3960E-04	0.0173	0.1965
-5.0	1.9054E-04	0.0078	0.0885	2.1682E-04	0.0083	0.0944	6.8942E-04	0.0148	0.1683	1.0078E-03	0.0179	0.2035
-4.5	2.6265E-04	0.0091	0.1039	3.1271E-04	0.0100	0.1134	7.4720E-04	0.0154	0.1752	1.0864E-03	0.0186	0.2113
-4.0	3.7616E-04	0.0109	0.1243	4.1859E-04	0.0115	0.1311	8.1513E-04	0.0161	0.1830	1.1643E-03	0.0192	0.2187
-3.5	5.5312E-04	0.0133	0.1508	5.2517E-04	0.0129	0.1469	8.9268E-04	0.0169	0.1915	1.2457E-03	0.0199	0.2262
-3.0	7.2074E-04	0.0151	0.1721	6.5573E-04	0.0144	0.1641	9.9070E-04	0.0178	0.2018	1.3434E-03	0.0207	0.2349
-2.5	9.3305E-04	0.0172	0.1958	8.2375E-04	0.0162	0.1840	1.1070E-03	0.0188	0.2133	1.4540E-03	0.0215	0.2444



## ข. รายงานการคำนวณโดยโปรแกรม Fluent

### 1 ข. แบบจำลองเปรียบเทียบขนาดความละเอียด 300,636

FLUENT		
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)		
Release: 6.0.12		
Title:		
Models		
-----		
Model	Settings	
-----		
Space	3D	
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit	
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model	
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment	
RNG Differential Viscosity Model	Disabled	
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled	
Heat Transfer	Disabled	
Solidification and Melting	Disabled	
Species Transport	Disabled	
Coupled Dispersed Phase	Disabled	
Pollutants	Disabled	
Soot	Disabled	
Boundary Conditions		
-----		
Zones		
name	id	type
-----		
fluid.13	2	fluid
pressure-outlet-13	13	pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	16	wall
breaker-invisible	3	interior
velocity_inlet.12	4	velocity-inlet
side-wall-near	5	wall
side-wall-far	6	wall
back-wall-surface	7	wall
bottom-surface	8	wall
pipe-under-water	9	wall
pipe-upper	10	wall

```

section-pipe-inlet      11 interior
upper-surface          12 symmetry
pipe-inlet             14 interior
pipe-section-upper-surface 15 interior
default-interior       17 interior

```

#### Boundary Conditions

fluid.13

Condition	Value
-----	
Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0

Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

## pressure-outlet-13

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

## pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1

X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-invisible

Condition	Value
-----	

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	0.0049999999
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	4.9999999e-06
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no

Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0

Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0

X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

section-pipe-inlet

Condition Value  
-----

upper-surface

Condition Value  
-----

pipe-inlet

Condition Value  
-----

pipe-section-upper-surface

Condition Value  
-----

default-interior

Condition Value  
-----

Solver Controls

-----

Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

#### Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

#### Unsteady Calculation Parameters

-----

Time Step (s) 0.050000001

Max. Iterations Per Time Step 50

#### Relaxation

Variable Relaxation Factor

-----

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.69999999

Turbulence Kinetic Energy 0.80000001

Turbulence Dissipation Rate 0.80000001

Turbulent Viscosity 1

#### Linear Solver

Variable Solver Termination Residual Reduction

Type Criterion Tolerance

-----

Pressure V-Cycle 0.1

X-Momentum Flexible 0.1 0.7

Y-Momentum Flexible 0.1 0.7

Z-Momentum Flexible 0.1 0.7

Turbulence Kinetic Energy Flexible 0.1 0.7

Turbulence Dissipation Rate Flexible 0.1 0.7

#### Discretization Scheme

Variable Scheme

-----

Pressure PRESTO!  
 Pressure-Velocity Coupling PISO  
 Momentum QUICK  
 Turbulence Kinetic Energy Second Order Upwind  
 Turbulence Dissipation Rate Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

#### Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	4182
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	K	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	K	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0

Degrees of Freedom	constant	0
Material: aluminum (solid)		
Property	Units	Method Value(s)
-----		
Density	kg/m3	constant 2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant 871
Thermal Conductivity	W/m-k	constant 202.4

## 2 ข. แบบจำลองเปรียบเทียบขนาดความละเอียด 578,025

FLUENT	
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)	
Release: 6.0.12	
Title:	
Models	
-----	
Model	Settings
-----	
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled
Boundary Conditions	
-----	
Zones	
name	id type
-----	
fluid.13	2 fluid
pressure-outlet-12	12 pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	15 wall
velocity_inlet.12	3 velocity-inlet

side-wall-near	4	wall
side-wall-far	5	wall
back-wall-surface	6	wall
bottom-surface	7	wall
pipe-under-water	8	wall
pipe-upper	9	wall
section-pipe-inlet	10	interior
upper-surface	11	symmetry
pipe-inlet	13	interior
pipe-section-upper-surface	14	interior
default-interior	16	interior

## Boundary Conditions

fluid.13

Condition	Value
-----------	-------

---

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1

Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

pressure-outlet-12

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	0.00039999999
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0

X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	0.00049999997
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes

Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0

X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no

Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
section-pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
upper-surface	
Condition	Value
-----	
pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
pipe-section-upper-surface	
Condition	Value
-----	
default-interior	
Condition	Value
-----	
Solver Controls	
-----	

## Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

## Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

## Unsteady Calculation Parameters

-----

Time Step (s) 0.050000001

Max. Iterations Per Time Step 50

## Relaxation

Variable Relaxation Factor

-----

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.69999999

Turbulence Kinetic Energy 0.80000001

Turbulence Dissipation Rate 0.80000001

Turbulent Viscosity 1

## Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
----------	-------------	-----------------------	------------------------------

-----

Pressure V-Cycle 0.1

X-Momentum Flexible 0.1 0.7

Y-Momentum Flexible 0.1 0.7

Z-Momentum Flexible 0.1 0.7

Turbulence Kinetic Energy Flexible 0.1 0.7

Turbulence Dissipation Rate Flexible 0.1 0.7

## Discretization Scheme

Variable Scheme

```

-----
Pressure          PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling  SIMPLC
Momentum         QUICK
Turbulence Kinetic Energy  Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate  Second Order Upwind

```

#### Solution Limits

```

Quantity          Limit
-----
Minimum Absolute Pressure  1
Maximum Absolute Pressure  5000000
Minimum Temperature       1
Maximum Temperature       5000
Minimum Turb. Kinetic Energy  1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate  1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio  100000

```

#### Material Properties

Material: aluminum (solid)

```

Property          Units  Method  Value(s)
-----
Density           kg/m3  constant  2719
Cp (Specific Heat)  j/kg-k  constant  871
Thermal Conductivity  w/m-k  constant  202.4

```

Material: air (fluid)

```

Property          Units  Method  Value(s)
-----
Density           kg/m3  constant  1.225
Cp (Specific Heat)  j/kg-k  constant  1006.43
Thermal Conductivity  w/m-k  constant  0.0242
Viscosity         kg/m-s  constant  1.7894e-05
Molecular Weight   kg/kgmol  constant  28.966
L-J Characteristic Length  angstrom  constant  3.711
L-J Energy Parameter  k      constant  78.6
Thermal Expansion Coefficient  1/k    constant  0
Degrees of Freedom          constant  0

```

Material: water-liquid (fluid)

```

Property          Units  Method  Value(s)

```

```

-----
Density          kg/m3   constant 998.20001
Cp (Specific Heat)  j/kg-k   constant 4182
Thermal Conductivity  w/m-k   constant 0.6
Viscosity         kg/m-s   constant 0.001003
Molecular Weight    kg/kgmol constant 18.0152
L-J Characteristic Length  angstrom constant 0
L-J Energy Parameter  k        constant 0
Thermal Expansion Coefficient  1/k     constant 0
Degrees of Freedom          constant 0

```

### 3 ข. แบบจำลองเปรียบเทียบขนาดความละเอียด 838,374

```

FLUENT
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)
Release: 6.0.12
Title:

Models
-----

Model          Settings
-----
Space          3D
Time           Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous        RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option Disabled
Heat Transfer  Disabled
Solidification and Melting Disabled
Species Transport Disabled
Coupled Dispersed Phase Disabled
Pollutants     Disabled
Soot           Disabled

Boundary Conditions
-----

Zones

name          id type
-----
fluid.13      2  fluid
pressure-outlet-12  12  pressure-outlet
pipe-under-water-shadow  15  wall

```

velocity_inlet.12	3	velocity-inlet
side-wall-near	4	wall
side-wall-far	5	wall
back-wall-surface	6	wall
bottom-surface	7	wall
pipe-under-water	8	wall
pipe-upper	9	wall
section-pipe-inlet	10	interior
upper-surface	11	symmetry
pipe-inlet	13	interior
pipe-section-upper-surface	14	interior
default-interior	16	interior

## Boundary Conditions

fluid.13

Condition	Value
-----------	-------

---

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0

Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

## pressure-outlet-12

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	0.00039999999
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

## pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0

Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	0.00049999997
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0

Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0

Z-component of shear stress 0

back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0

Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes

Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

section-pipe-inlet

Condition Value

-----

upper-surface

Condition Value

-----

pipe-inlet

Condition Value

-----

pipe-section-upper-surface

Condition Value

-----

default-interior

Condition Value

-----

Solver Controls

-----

## Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

## Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

## Unsteady Calculation Parameters

-----

Time Step (s) 0.0099999998

Max. Iterations Per Time Step 40

## Relaxation

Variable Relaxation Factor

-----

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.69999999

Turbulence Kinetic Energy 0.80000001

Turbulence Dissipation Rate 0.80000001

Turbulent Viscosity 1

## Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
----------	-------------	-----------------------	------------------------------

-----

Pressure V-Cycle 0.1

X-Momentum Flexible 0.1 0.7

Y-Momentum Flexible 0.1 0.7

Z-Momentum Flexible 0.1 0.7

Turbulence Kinetic Energy Flexible 0.1 0.7

Turbulence Dissipation Rate Flexible 0.1 0.7

## Discretization Scheme

Variable	Scheme
-----	
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLEC
Momentum	Second Order Upwind
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind
Solution Limits	
Quantity	Limit
-----	
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000
Material Properties	
-----	
Material: water-liquid (fluid)	
Property	Units Method Value(s)
-----	
Density	kg/m3 constant 998.2
Cp (Specific Heat)	j/kg-k constant 4182
Thermal Conductivity	w/m-k constant 0.6
Viscosity	kg/m-s constant 0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol constant 18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom constant 0
L-J Energy Parameter	k constant 0
Thermal Expansion Coefficient	1/k constant 0
Degrees of Freedom	constant 0
Material: air (fluid)	
Property	Units Method Value(s)
-----	
Density	kg/m3 constant 1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k constant 1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k constant 0.0242
Viscosity	kg/m-s constant 1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol constant 28.966
L-J Characteristic Length	angstrom constant 3.711

L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Material: aluminum (solid)			
Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	202.4

#### 4 ข. แบบจำลองกรณีศึกษาที่ 1.1 (อ้างอิงจากรูปที่ 3.4)

FLUENT	
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)	
Release: 6.0.12	
Title:	
Models	
-----	
Model	Settings
-----	
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled
Boundary Conditions	
-----	
Zones	
-----	
name	id type
-----	
fluid.16	2 fluid
pressure-outlet-14	14 pressure-outlet

pipe-under-water-shadow	19	wall
breaker-shadow	17	wall
breaker-invisible	3	interior
breaker	4	wall
velocity_inlet.12	5	velocity-inlet
side-wall-near	6	wall
side-wall-far	7	wall
back-wall-surface	8	wall
bottom-surface	9	wall
pipe-under-water	10	wall
pipe-upper	11	wall
section-pipe-inlet	12	interior
upper-surface	13	symmetry
pipe-inlet	15	interior
pipe-section-upper-surface	16	interior
default-interior	18	interior

## Boundary Conditions

fluid.16

Condition	Value
-----------	-------

---

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no

X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

pressure-outlet-14

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0

Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-invisible

Condition	Value
-----	

breaker

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0

Y-Coordinate of Axis Origin 0  
 Z-Coordinate of Axis Origin 0  
 Angular velocity 0  
 Turbulence Specification Method 3  
 Turb. Kinetic Energy 1  
 Turb. Dissipation Rate 1  
 Turbulence Intensity 4.9999999e-06  
 Turbulence Length Scale 1  
 Hydraulic Diameter 0.001  
 Turbulent Viscosity Ratio 10

## side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes

Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0

X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

section-pipe-inlet

Condition	Value
-----	

upper-surface

Condition	Value
-----	

pipe-inlet

Condition Value

-----

pipe-section-upper-surface

Condition Value

-----

default-interior

Condition Value

-----

Solver Controls

-----

Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

Unsteady Calculation Parameters

-----

Time Step (s) 0.050000001

Max. Iterations Per Time Step 50

Relaxation

Variable Relaxation Factor

-----

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.69999999

Turbulence Kinetic Energy 0.8000001  
 Turbulence Dissipation Rate 0.8000001  
 Turbulent Viscosity 1

#### Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

#### Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	PISO
Momentum	QUICK
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

#### Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	4182

Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Material: air (fluid)			
Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Material: aluminum (solid)			
Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

### 5 ข. แบบจำลองกรณีศึกษาที่ 1.2 (อ้างอิงจากรูปที่ 3.4)

FLUENT	
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)	
Release: 6.0.12	
Title:	
Models	
-----	
Model	Settings
-----	
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled

Heat Transfer            Disabled  
Solidification and Melting    Disabled  
Species Transport            Disabled  
Coupled Dispersed Phase      Disabled  
Pollutants                  Disabled  
Soot                          Disabled

#### Boundary Conditions

-----

#### Zones

name	id	type
fluid.16	2	fluid
pressure-outlet-14	14	pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	19	wall
breaker-shadow	17	wall
interior	3	interior
breaker	4	wall
velocity_inlet.12	5	velocity-inlet
side-wall-near	6	wall
side-wall-far	7	wall
back-wall-surface	8	wall
bottom-surface	9	wall
pipe-under-water	10	wall
pipe-upper	11	wall
section-pipe-inlet	12	interior
upper-surface	13	symmetry
pipe-inlet	15	interior
pipe-section-upper-surface	16	interior
default-interior	18	interior

#### Boundary Conditions

fluid.16

Condition	Value
Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no

-----

Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1
pressure-outlet-14	
Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1

Backflow Hydraulic Diameter 0.003

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0

Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

interior

Condition	Value
-----------	-------

-----

breaker

Condition	Value
-----------	-------

-----

Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	4.9999999e-06
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0

Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
pipe-upper	
Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0

X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

section-pipe-inlet

Condition Value

-----

upper-surface

Condition Value

-----

pipe-inlet

Condition Value

-----

pipe-section-upper-surface

Condition Value

-----

default-interior

Condition Value

-----

Solver Controls

-----

Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

## Unsteady Calculation Parameters

-----  
 Time Step (s)            0.050000001  
 Max. Iterations Per Time Step 50

## Relaxation

Variable	Relaxation Factor
-----	
Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999
Turbulence Kinetic Energy	0.80000001
Turbulence Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1

## Linear Solver

Variable	Solver		Termination		Residual Reduction	
	Type	Criterion	Tolerance			
-----						
Pressure	V-Cycle	0.1				
X-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7		
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7		
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.1	0.7		
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.1	0.7		
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.1	0.7		

## Discretization Scheme

Variable	Scheme
-----	
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	PISO
Momentum	QUICK
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind

## Solution Limits

Quantity	Limit
-----	
Minimum Absolute Pressure	1

Maximum Absolute Pressure 5000000  
 Minimum Temperature 1  
 Maximum Temperature 5000  
 Minimum Turb. Kinetic Energy 1e-14  
 Minimum Turb. Dissipation Rate 1e-20  
 Maximum Turb. Viscosity Ratio 100000

#### Material Properties

-----

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	202.4

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	4182
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

## 6 ข. แบบจำลองกรณี 1.3 และ 2.3 (อ้างอิงจากรูปที่ 3.4)

FLUENT  
 Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)

Release: 6.0.12

Title:

Models

-----

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

-----

Zones

name	id	type
fluid.13	2	fluid
pressure-outlet-13	13	pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	18	wall
breaker-shadow	16	wall
breaker	3	wall
velocity_inlet.12	4	velocity-inlet
side-wall-near	5	wall
side-wall-far	6	wall
back-wall-surface	7	wall
bottom-surface	8	wall
pipe-under-water	9	wall
pipe-upper	10	wall
section-pipe-inlet	11	interior
upper-surface	12	symmetry
pipe-inlet	14	interior
pipe-section-upper-surface	15	interior
default-interior	17	interior

## Boundary Conditions

fluid.13

Condition	Value
-----------	-------

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0

C1 Coefficient for Power-Law 0

Porosity 1

pressure-outlet-13

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
breaker	
Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0

X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	4.9999999e-06
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
bottom-surface	
Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0

X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0

Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
section-pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
upper-surface	
Condition	Value
-----	
pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
pipe-section-upper-surface	
Condition	Value
-----	
default-interior	
Condition	Value
-----	
Solver Controls	
-----	
Equations	
Equation	Solved

-----  
 Flow      yes  
 Turbulence   yes

#### Numerics

Numeric            Enabled  
 -----

Absolute Velocity Formulation   yes

#### Unsteady Calculation Parameters

-----  
 Time Step (s)            0.050000001  
 Max. Iterations Per Time Step   50

#### Relaxation

Variable	Relaxation Factor
-----	
Pressure	0.30000001
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.69999999
Turbulence Kinetic Energy	0.80000001
Turbulence Dissipation Rate	0.80000001
Turbulent Viscosity	1

#### Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
-----			
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

#### Discretization Scheme

Variable	Scheme
-----	
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	PISO

Momentum QUICK  
 Turbulence Kinetic Energy Second Order Upwind  
 Turbulence Dissipation Rate Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

#### Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	4182
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	K	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	K	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	871
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	202.4

## 7 ข. แบบจำลองที่ 2.1 (อ้างอิงจากรูปที่ 3.4)

FLUENT

Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)

Release: 6.0.12

Title:

Models

-----

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

-----

Zones

name	id	type
fluid.16	2	fluid
pressure-outlet-13	13	pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	18	wall
breaker-shadow	16	wall
breaker	3	wall
velocity_inlet.12	4	velocity-inlet
side-wall-near	5	wall
side-wall-far	6	wall

back-wall-surface	7	wall
bottom-surface	8	wall
pipe-under-water	9	wall
pipe-upper	10	wall
section-pipe-inlet	11	interior
upper-surface	12	symmetry
pipe-inlet	14	interior
pipe-section-upper-surface	15	interior
default-interior	17	interior

## Boundary Conditions

fluid.16

Condition	Value
-----------	-------

---

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1
Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1

Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

## pressure-outlet-13

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

## pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0

Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## breaker-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## breaker

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
-----	
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0
Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	4.9999999e-06
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0

Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## bottom-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1

Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0
section-pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
upper-surface	
Condition	Value
-----	
pipe-inlet	
Condition	Value
-----	
pipe-section-upper-surface	
Condition	Value
-----	
default-interior	

Condition	Value		
-----			
Solver Controls			
-----			
Equations			
Equation	Solved		
-----			
Flow	yes		
Turbulence	yes		
Numerics			
Numeric	Enabled		
-----			
Absolute Velocity Formulation	yes		
Unsteady Calculation Parameters			
-----			
Time Step (s)	0.050000001		
Max. Iterations Per Time Step	50		
Relaxation			
Variable	Relaxation Factor		
-----			
Pressure	0.30000001		
Density	1		
Body Forces	1		
Momentum	0.69999999		
Turbulence Kinetic Energy	0.80000001		
Turbulence Dissipation Rate	0.80000001		
Turbulent Viscosity	1		
Linear Solver			
Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
-----			
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7

Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

#### Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	PISO
Momentum	QUICK
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

#### Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	4182
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	K	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
----------	-------	--------	----------

Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Material: aluminum (solid)			
Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	W/m-k	constant	202.4

### 8 ข. แบบจำลองกรณีที่ 2.2 (อ้างอิงจากรูปที่ 3.4)

FLUENT	
Version: 3d, segregated, mgke, unsteady (3d, segregated, RNG k-epsilon, unsteady)	
Release: 6.0.12	
Title:	
Models	
-----	
Model	Settings
-----	
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	RNG k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
RNG Differential Viscosity Model	Disabled
RNG Swirl Dominated Flow Option	Disabled
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled
Boundary Conditions	
-----	
Zones	

name	id	type
fluid.13	2	fluid
pressure-outlet-13	13	pressure-outlet
pipe-under-water-shadow	18	wall
breaker-shadow	16	wall
breaker	3	wall
velocity_inlet.12	4	velocity-inlet
side-wall-near	5	wall
side-wall-far	6	wall
back-wall-surface	7	wall
bottom-surface	8	wall
pipe-under-water	9	wall
pipe-upper	10	wall
section-pipe-inlet	11	interior
upper-surface	12	symmetry
pipe-inlet	14	interior
pipe-section-upper-surface	15	interior
default-interior	17	interior

## Boundary Conditions

fluid.13

Condition	Value
Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1

Material Name	water-liquid
Specify source terms?	no
Source Terms	((mass (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (x-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-momentum (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Specify fixed values?	no
Local Coordinate System for Fixed Velocities	no
Fixed Values	((x-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (y-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (z-velocity (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (k (inactive . #f) (constant . 0) (profile )) (epsilon (inactive . #f) (constant . 0) (profile )))
Motion Type	0
X-Velocity Of Zone	0
Y-Velocity Of Zone	0
Z-Velocity Of Zone	0
Rotation speed	0
X-Origin of Rotation-Axis	0
Y-Origin of Rotation-Axis	0
Z-Origin of Rotation-Axis	0
X-Component of Rotation-Axis	0
Y-Component of Rotation-Axis	0
Z-Component of Rotation-Axis	1

Laminar zone?	no
Porous zone?	no
Conical porous zone?	no
X-Component of Direction-1 Vector	1
Y-Component of Direction-1 Vector	1
Z-Component of Direction-1 Vector	1
X-Component of Direction-2 Vector	0
Y-Component of Direction-2 Vector	1
Z-Component of Direction-2 Vector	0
X-Coordinate of Point on Cone Axis	1
Y-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Z-Coordinate of Point on Cone Axis	0
Half Angle of Cone Relative to its Axis	0
Direction-1 Viscous Resistance	0
Direction-2 Viscous Resistance	0
Direction-3 Viscous Resistance	0
Direction-1 Inertial Resistance	0
Direction-2 Inertial Resistance	0
Direction-3 Inertial Resistance	0
C0 Coefficient for Power-Law	0
C1 Coefficient for Power-Law	0
Porosity	1

pressure-outlet-13

Condition	Value
-----	
Gauge Pressure	0
Radial Equilibrium Pressure Distribution	no
Turbulence Specification Method	3
Backflow Turb. Kinetic Energy	1
Backflow Turb. Dissipation Rate	1
Backflow Turbulence Intensity	4e-06
Backflow Turbulence Length Scale	1
Backflow Hydraulic Diameter	0.003
Backflow Turbulent Viscosity Ratio	10

pipe-under-water-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0

X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker-shadow

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

breaker

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

velocity\_inlet.12

Condition	Value
Velocity Specification Method	2
Reference Frame	0
Velocity Magnitude	0.046118651
Coordinate System	0
X-Velocity	0
Y-Velocity	0
Z-Velocity	0
X-Component of Flow Direction	1
Y-Component of Flow Direction	0
Z-Component of Flow Direction	0
X-Component of Axis Direction	1
Y-Component of Axis Direction	0
Z-Component of Axis Direction	0
X-Coordinate of Axis Origin	0
Y-Coordinate of Axis Origin	0
Z-Coordinate of Axis Origin	0

Angular velocity	0
Turbulence Specification Method	3
Turb. Kinetic Energy	1
Turb. Dissipation Rate	1
Turbulence Intensity	4.9999999e-06
Turbulence Length Scale	1
Hydraulic Diameter	0.001
Turbulent Viscosity Ratio	10

## side-wall-near

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

## side-wall-far

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0

X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

back-wall-surface

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

bottom-surface

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-under-water

Condition	Value
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0

Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

pipe-upper

Condition	Value
-----	
Enable shell conduction?	no
Wall Motion	0
Shear Boundary Condition	0
Define wall motion relative to adjacent cell zone?	yes
Apply a rotational velocity to this wall?	no
Velocity Magnitude	0
X-Component of Wall Translation	1
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Define wall velocity components?	no
X-Component of Wall Translation	0
Y-Component of Wall Translation	0
Z-Component of Wall Translation	0
Rotation Speed	0
X-Position of Rotation-Axis Origin	0
Y-Position of Rotation-Axis Origin	0
Z-Position of Rotation-Axis Origin	0
X-Component of Rotation-Axis Direction	0
Y-Component of Rotation-Axis Direction	0
Z-Component of Rotation-Axis Direction	1
X-component of shear stress	0
Y-component of shear stress	0
Z-component of shear stress	0

section-pipe-inlet

Condition	Value
-----	

upper-surface

Condition	Value
-----	

pipe-inlet

Condition Value

-----

pipe-section-upper-surface

Condition Value

-----

default-interior

Condition Value

-----

Solver Controls

-----

Equations

Equation Solved

-----

Flow yes

Turbulence yes

Numerics

Numeric Enabled

-----

Absolute Velocity Formulation yes

Unsteady Calculation Parameters

-----

Time Step (s) 0.050000001

Max. Iterations Per Time Step 50

Relaxation

Variable Relaxation Factor

-----

Pressure 0.30000001

Density 1

Body Forces 1

Momentum 0.69999999

Turbulence Kinetic Energy 0.80000001

Turbulence Dissipation Rate 0.80000001

Turbulent Viscosity 1

#### Linear Solver

Variable	Solver Type	Termination Criterion	Residual Reduction Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Turbulence Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7

#### Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	PRESTO!
Pressure-Velocity Coupling	PISO
Momentum	QUICK
Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5000000
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

#### Material Properties

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	4182
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003

Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	0
L-J Energy Parameter	k	constant	0
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m <sup>3</sup>	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายวิรุฬห์ ไสอินทร์
วันเดือนปีเกิด	16 มิถุนายน 2520
สถานที่เกิด	ชุมพร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	134 หมู่ที่ 10 ต.ปากน้ำ อ.เมือง จ.ชุมพร 86120

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2536	มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนศรียามักย์ จังหวัดชุมพร
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนศรียามักย์ จังหวัดชุมพร
พ.ศ. 2543	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
พ.ศ. 2550	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ