

การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่
ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญานิพนธ์
ของ
นาวาตรี กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2553

การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่
ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ปริญญานิพนธ์
ของ
นาวาตรี กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2553
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่
ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

บทคัดย่อ

ของ

นาวาตรี กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2553

กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์. (2553). การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่ ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. ปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง.

คำสำคัญ: เรือแบบตัวเรือคู่, ความต้านทานเรือ, รูปแบบคลื่น, วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) จำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่ ด้วยวิธี Finite Volume Method หาผลเฉลยของสมการการไหลในรูปของ Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations ร่วมกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองจริง โดยผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติ พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ (S) และการเพิ่มความเพรีวของตัวเรือคู่ต่างทำให้ความต้านทานลดลง ทั้งนี้จากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน S/L ต่อความต้านทาน เมื่อ L เป็นความยาวแนวน้ำของเรือ และ S/L มีค่าระหว่าง $0.2 - 0.5$ พบว่าเมื่อ $S/L = 0.3$ เป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นได้วิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือด้วยแบบจำลอง 3 มิติ ร่วมกับแบบจำลองการไหล 2 เฟส Volume of Fluid แบบ Implicit พบว่าที่ย่านการใช้งานความเร็วสูงที่เลขฟรูดเมื่อใช้ L เป็นความยาวอ้างอิง (Fn) มีค่าระหว่าง $0.5 - 0.7$ สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่รูปแบบคลื่นที่ความลึกในการใช้งานในแม่น้ำเจ้าพระยาที่เลขฟรูดเชิงความลึก (Fn_h) มีค่าระหว่าง $0.6 - 0.7$ พบว่าเมื่อความลึกของน้ำลดลง คลื่นที่เกิดจากเรือมีความสูงเพิ่มขึ้นและเดินทางได้ไกลขึ้น ทั้งนี้คลื่นมีความสูงลดลงเมื่อเดินทางห่างออกไปจากตัวเรือ โดยคลื่นมีความสูงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งเมื่อเคลื่อนที่ห่างออกไปเป็นระยะทางประมาณ 0.8 เท่าของความยาวแนวน้ำ

ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่เบื้องต้น โดยเฉพาะการออกแบบให้เรือมีความต้านทานและความสูงของคลื่นลดลงเพื่อประหยัดพลังงานและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลเชิงปริมาณของงานวิจัยนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ประกอบกับปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในอนาคตควรจะได้มีการศึกษาการแบ่งจำนวนกริดที่มีความละเอียดมากขึ้นและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดต่อไป

ANALYSIS OF RESISTANCE AND WAVE OF CATAMARAN
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

AN ABSTRACT
BY
KITTIPOOM POOMKOKRUK

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2010

Kittipoom Poomkokruk. (2010). *Analysis of Resistance and Wave of Catamaran Using Computational Fluid Dynamics*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering).
Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Asst. Prof. Dr. Jutarat Kurujareon, Colonel Asst. Prof. Dr. Anothai Suksangpanomrung.

Keywords: Catamaran, ship resistance, wave, Computational Fluid Dynamics

In this work, an application of Computational Fluid Dynamics (CFD) technique was applied to simulate the 2 - D and 3 - D flow around a catamaran using the computer code based on the Finite Volume Method. The turbulent flow was calculated by using Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations with the standard $k - \varepsilon$ turbulent model. From the 2 - D simulation, it was found that the ship resistance was likely to decrease as the distance between the demihulls and their slenderness increased. These results agreed with previously obtained tank test data. In fact, with the range of distance – waterline length ratio between 0.2 – 0.5, the most suitable ratio was 0.3. The 3 - D model with the Volume of Fluid model for free surface calculation was then applied to simulate the 2 – phase flow around the catamaran at the speeds, in term of Froude Number (Fn), and the depths, in term of Depth Froude Number (Fn_h), experienced in the actual service in the Chaophraya River which are 0.5 – 0.7 and 0.6 – 0.7, respectively. Within such range of Fn , the ship resistance was found to decrease as the vessel's speed increased and, for the studied Fn_h , the calculated wave profiles were found to increase in heights and to progress in longer distances as the water depth decreased. The wave heights were also found to decrease as the waves traveled further away from the catamaran. In fact, the wave heights were halved when the waves reached the distance of approximately 0.8 times the waterline length.

The results of this study can be used as the guidelines for the preliminary design of a catamaran, especially when reduced resistance for energy saving and lower wave amplitudes for environment friendliness are the key design requirements. Since the results still showed some error in magnitude of the ship resistances and the wave amplitudes, together with the advanced technology in computer, further work should be conducted in order to improve the results by applying finer meshing schemes and advanced multiphase flow models.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี เป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ชุรุเจริญ ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ รวมทั้ง นาวาโท ดร.สัตยา จันทรประภา ท่านทั้งสามได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำในการจัดทำ งานวิจัยนี้ทุกขั้นตอน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ตามโครงการความร่วมมือหลักสูตร ปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สาขา วิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความรู้อันส่งคุณค่าแก่ผู้วิจัยในการศึกษาตลอดหลักสูตร

สุดท้ายนี้หากความดีหรือประโยชน์ใด ๆ ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบ ให้แก่ ภรรยาและบุตรของผู้วิจัย สำหรับกำลังใจและความเสียสละที่มีให้ตลอดการทำงานวิจัยนี้

นาวาตรี กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	6
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและ บทปรัทัศน์วรรณกรรม	7
2.1 เรือแบบตัวเรือคู่	7
2.2 ความต้านทานเรือ	8
2.3 คลื่นที่เกิดจากเรือ	11
2.4 บทปรัทัศน์วรรณกรรม	14
3 วิธีดำเนินการวิจัย	18
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	18
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	20
3.3 วิธีปริมาตรจำกัด	24
3.4 การแบ่งปริมาตรควบคุม	24
3.5 สมการพื้นฐาน	27
3.6 การดีสกรีไทเซชัน	35
3.7 วิธีประมาณค่าของสมการดีสกรีไทเซชัน	39
3.8 แบบจำลองปริมาตรของไหล	42
3.9 การหาผลเฉลย	43
3.10 เงื่อนไขขอบ	49
3.11 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน	54
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	55
4.1 แนวทางจำลองการไหลที่เหมาะสม	55
4.2 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อความต้านทาน	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
4.3 ผลกระทบของความเปรี้ยวของตัวเรื้อคู้ต่อความต้านทาน	65
4.4 ความต้านทานเรื้อแบบตัวเรื้อคู้	67
4.5 คลื่นที่เกิดจากเรื้อแบบตัวเรื้อคู้	77
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการวิจัย	87
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในอนาคต	89
5.3 การประยุกต์ผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	94
ประวัติย่อผู้วิจัย	103

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	การลู่เข้าของแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบผ่านทรงกลม	58
2	การลู่เข้าของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ผ่านทรงกลม	60
3	ความคลาดเคลื่อนของการจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ ด้วยวิธี CFD	71
4	ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกด้วยวิธี CFD	79
5	การคำนวณ Fn_h สำหรับการวิเคราะห์คลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่	80

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 คลื่นจากเรือโดยสารแบบตัวเรือเดี่ยว	1
2 เรือโดยสารแบบตัวเรือคู่	2
3 การทดลองลากเรือจำลองในอ่างน้ำ	3
4 หน้าตัดตัวเรือแบบวิกัลย์	4
5 แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่	5
6 ส่วนประกอบของเรือแบบตัวเรือคู่	7
7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทานกับความเร็ว	10
8 ระบบคลื่นทฤษฎีเคลวิน	11
9 ระบบคลื่นทฤษฎีคลื่นเฮฟลอค	13
10 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม	20
11 แบบจำลอง 2 มิติ	21
12 แบบจำลอง 3 มิติ	22
13 แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่แบบวิกัลย์	23
14 ขั้นตอนการแบ่งปริมาตรควบคุม	25
15 รูปร่างปริมาตรควบคุม	25
16 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม	26
17 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ	26
18 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ	27
19 ปริมาตรของไหลขนาดเล็ก	27
20 สมบัติการไหลแบบปั่นป่วน	29
21 ตัวแปรสำหรับการไหลแบบราบเรียบในชั้นขีดผิว	32
22 ปริมาตรควบคุมและจุดต่อ	36
23 วิธีประมาณค่าแบบ QUICK	39
24 กริดแบบเหลี่ยม	41
25 แบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme	42
26 วิธีหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา	45
27 วิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE	47
28 วิธีหาผลเฉลยแบบ PISO	48
29 เงื่อนไขขอบแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม	49

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
30 เงื่อนไขขอบแบบจำลอง 2 มิติ	50
31 เงื่อนไขขอบแบบจำลอง 3 มิติ	50
32 เงื่อนไขขอบแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือใต้แนวน้ำ	51
33 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม	55
34 การแบ่งกริดแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม	56
35 ค่า C_D ของการไหลแบบราบเรียบผ่านทรงกลม	57
36 ค่า C_D ของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านทรงกลม	59
37 แบบจำลองการไหลผ่านตัวเรือคู่ 2 มิติ	61
38 แบบจำลองตัวเรือคู่ 2 มิติ	62
39 ค่า C_D เปรียบเทียบ C_T ที่ $Rn = 3.8 \times 10^6$	63
40 ค่า C_D ที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่าง ๆ	64
41 แบบจำลองเรือที่ความเพริยของตัวเรือคู่ต่าง ๆ	66
42 ค่า C_D ที่ L/B ต่าง ๆ	67
43 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ในอ่างน้ำ	68
44 ค่า R_T ที่ Fn ต่าง ๆ	70
45 ค่า C_T ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$	72
46 แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความต้านทานแรงเสียดทาน	73
47 ค่า C_F ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$	74
48 ค่า C_R ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$	74
49 ค่า C_V ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$	75
50 ค่า C_W ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$	76
51 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn = 0.5$	78
52 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0	81
53 ความสูงของคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0	82
54 รูปแบบคลื่นที่ผิวน้ำในรูปของความดันสถิต	83
55 ระยะห่างจากตัวเรือ (z) ในการศึกษารูปแบบคลื่น	84
56 รูปแบบคลื่นที่ระยะห่างจากตัวเรือต่าง ๆ เมื่อ $Fn_h = 0.6$	85
57 รูปแบบคลื่นที่ระยะห่างจากตัวเรือต่าง ๆ เมื่อ $Fn_h = 0.7$	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คลื่นที่เกิดจากเรือโดยสารที่ให้บริการในแม่น้ำซึ่งเป็นเรือประเภทเรือแบบตัวเรือเดี่ยว (Monohull) ดังภาพประกอบ 1 ได้ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากคลื่นที่กระจายออกจากตัวเรือทำให้เกิดการพังทลายของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำ สร้างความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างซึ่งอยู่บนเส้นทางเดินเรือ นั้น ๆ ตลอดจนมีผลกระทบด้านความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้สัญจรทางน้ำ แนวทางหนึ่งในการป้องกันและบรรเทาปัญหาดังกล่าวซึ่งได้รับความนิยมในหลายประเทศ ได้แก่ การใช้เรือโดยสารลดคลื่นซึ่งออกแบบโดยใช้เรือแบบตัวเรือคู่ หรือเรือคาตามาราน (Catamaran) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 1 คลื่นจากเรือโดยสารแบบตัวเรือเดี่ยว

เรือแบบตัวเรือคู่เป็นเรือประเภทที่มีตัวเรือ 2 ลำ เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยโครงสร้างดาดฟ้าเรือที่อยู่เหนือแนวน้ำ ข้อดีของเรือประเภทนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเรือแบบตัวเรือเดี่ยวที่ระวางขับน้ำและความสามารถในการบรรทุกจำนวนคนเท่ากันแล้ว เรือแบบตัวเรือคู่สามารถออกแบบให้มีรูปทรงตัวเรือ (Hull form) ที่มีความเพรียวได้มากกว่าโดยไม่ทำให้การทรงตัวของเรือเสียไป ซึ่งตัวเรือที่เพรียวขึ้นนี้นอกจากจะช่วยลดขนาดของคลื่นที่เกิดจากเรือได้แล้วยังส่งผลให้เรือใช้กำลัง

ขับเคลื่อนน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้การมีดาดฟ้าเรือที่มีความกว้างขวางและอยู่เหนือแนวน้ำทำให้สามารถออกแบบใช้งานและจัดวางที่นั่งให้เหมาะสมกับการเป็นเรือโดยสารได้ดียิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 2 เรือโดยสารแบบตัวเรือคู่

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีเรือโดยสารแบบตัวเรือคู่ให้บริการในแม่น้ำแต่อย่างใด ดังนั้นหากจะนำเรือประเภทดังกล่าวมาใช้งานเป็นเรือโดยสารในแม่น้ำ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบเรือเพื่อให้มีความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานและเส้นทางเดินเรือ ตลอดจนระเบียบข้อบังคับด้านความเร็ว เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการลดคลื่นที่เกิดจากเรือ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ความต้านทานเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือจะใช้วิธีการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ (Towing tank test) ดังภาพประกอบ 3 เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำนายความต้านทานเรือและแสดงการไหลรอบตัวเรือได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในการบันทึกภาพและเก็บข้อมูลสำหรับใช้วิเคราะห์การไหลรอบตัวเรือ ตลอดจนต้องใช้สถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทดลองโดยเฉพาะ ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูงในการทดลอง โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งยังไม่มีสถานที่ทดลองลักษณะดังกล่าว ทำให้หากจะทำการทดลองดังกล่าวต้องดำเนินการในต่างประเทศทั้งหมด

นอกเหนือจากวิธีการทดลองลากเรือจำลองแล้ว การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์ความต้านทานเรือและการไหลรอบตัวเรือ เนื่องจากระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้ศาสตร์ทางด้าน CFD มีการพัฒนาให้มีความแม่นยำมากขึ้นจนได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรือแบบตัวเรือคู่เดียวที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายและต่อเนื่อง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองลากเรือจำลองพบว่าวิธี CFD สามารถแสดงภาพและเก็บข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์

การไหลรอบตัวเรือได้โดยไม่มีข้อจำกัด ไม่ต้องใช้สถานที่หรืออุปกรณ์ประกอบเพิ่มเติม และมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการได้ภายในประเทศ เนื่องจากมีโปรแกรม CFD ใช้งานแพร่หลายตามสถาบันการศึกษาและวิจัยในประเทศหลายแห่ง



ภาพประกอบ 3 การทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ

ที่มา: Southampton Solent University. (2009). Online

จากความเป็นมาและปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษาการจำลองการไหลรอบตัวเรือ ตลอดจนวิเคราะห์ความต้านทานของเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือของเรือแบบตัวเรือคู่ด้วยวิธี CFD ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับ มีค่าใช้จ่ายน้อย ไร้ข้อจำกัดในด้านการบันทึกข้อมูล และมีใช้งานอย่างแพร่หลายภายในประเทศ เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา เพื่อเป็นแนวทางในการนำวิธี CFD ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่ เช่น เรือโดยสารลดคลื่นแบบตัวเรือคู่สำหรับให้บริการในแม่น้ำต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

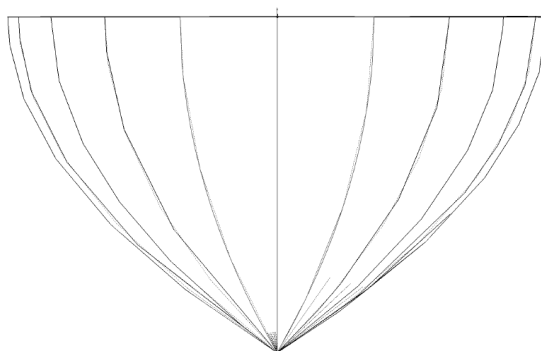
1.2.1 ศึกษาแนวทางการจำลองการไหลรอบตัวเรือด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD)

1.2.2 ศึกษาแนวทางการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่โดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเพรียวของตัวเรือคู่ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1.2.3 ศึกษาความต้านทานของเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เรือแบบตัวเรือคู่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รูปทรงตัวเรือคู่แบบวิกลีย์ (Wigley hull) ซึ่งเป็นตัวเรือที่ตัวเรือใต้แนวน้ำมีหน้าตัดรูปทรงแบบพาราโบลา (Parabolic) ดังภาพประกอบ 4 ทั้งนี้ตัวเรือดังกล่าวเป็นตัวเรือรูปทรงเรขาคณิตที่ไม่มีการใช้งานจริง แต่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยเนื่องจากไม่มีผลกระทบอันเกิดจากความแตกต่างของความดันที่หัวเรือและท้ายเรือซึ่งเกิดจากท้ายเรือตัด (Transom) ทำให้มีผลการทดลองเผยแพร่อยู่ทั่วไป



ภาพประกอบ 4 หน้าตัดตัวเรือแบบวิกลีย์ (Wigley hull)

1.3.2 แบบจำลองเรือในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองเฉพาะลำตัวเรือทั้งส่วนเหนือแนวน้ำและใต้แนวน้ำ แต่ไม่รวมโครงสร้างเหนือแนวน้ำ (Superstructure), อุปกรณ์ประกอบตัวเรือ หรือส่วนประกอบใต้แนวน้ำ เช่น เพลาใบจักร, ใบจักร และใบหางเสือใด ๆ ทั้งสิ้น

1.3.3 การศึกษากระทำเฉพาะกรณีเรือแล่นผ่านน้ำนิ่งโดยไม่รวมผลกระทบของกระแสน้ำหรือคลื่นภายนอก ตลอดจนผลกระทบจากเรือที่แล่นผ่าน เพื่อตัดองค์ประกอบอื่น ๆ ออกไป ตามขั้นตอนมาตรฐานในการคำนวณขนาดเครื่องยนต์สำหรับการขับเคลื่อนเรือ

1.3.4 วิธีการศึกษาและวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นการจำลองการไหลด้วยวิธี CFD แบบปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method หรือ FVM)

1.3.5 การศึกษาพิจารณาเฉพาะย่านการใช้งานสำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาในเขตกรุงเทพฯ ฯ ได้แก่ ความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่ความลึกระหว่าง 6.5 – 8.5 เมตร

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 รวบรวมและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการแบ่งโดเมนด้วยจำนวนกริดและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่าง ๆ เพื่อหาความละเอียดในการแบ่งกริดและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธี CFD ที่ใช้โดยการวิเคราะห์การไหลรอบแบบจำลองรูปทรงมาตรฐานและเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา

1.4.3 ออกแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ แบบ 2 มิติ โดยใช้ผลการศึกษาในข้อ 1.4.2 ดังนี้

1.4.3.1 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ ที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่าง ๆ

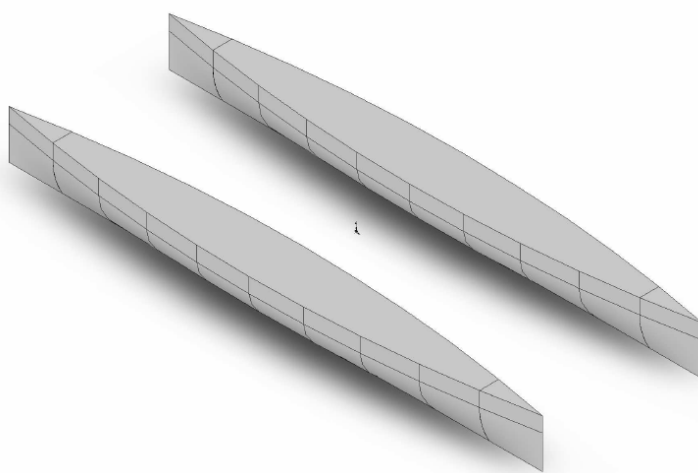
1.4.3.2 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ ที่ความเพรียต่าง ๆ

1.4.4 จำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ ตามข้อ 1.4.3 ในลักษณะการไหล 1 เฟส เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเพรียของตัวเรือคู่ต่อความต้านทานเรือ

1.4.5 ออกแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่แบบวิกัลย์ แบบ 3 มิติ โดยใช้ผลการศึกษาในข้อ 1.4.4 ดังภาพประกอบ 5

1.4.6 จำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ ตามข้อ 1.4.5 ในลักษณะการไหล 2 เฟส เพื่อวิเคราะห์ความต้านทานเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่

1.4.7 สรุปผลการจำลอง



ภาพประกอบ 5 แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.5.1 องค์ความรู้ในการจำลองการไหลรอบตัวเรือด้วยวิธี CFD สำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ความต้านทานเรือ ตลอดจนศึกษารูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ เพื่อใช้ในการออกแบบเรือเบื้องต้น (Preliminary design) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อให้ได้แบบเรือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

1.5.2 แนวทางในการออกแบบระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเพียวของตัวเรือคู่ที่ทำให้เกิดความต้านทานน้อยและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับใช้ในการพัฒนาออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่ในขั้นตอนต่อไป

1.5.3 แนวทางการวิเคราะห์ความต้านทานเรือด้วยวิธี CFD เพื่อใช้ทดแทนการทดลองลากเรือจำลองในอ่างน้ำซึ่งต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าได้ โดยใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นและความต้านทานของเรือที่มีรูปทรงต่างกัน โดยเฉพาะรูปทรงตัวเรือที่มีความซับซ้อนจนกระทั่งได้รูปทรงตัวเรือที่ตรงตามความต้องการจึงทำการทดลองลากเรือเพื่อหาความต้านทานของเรือเฉพาะแบบนั้น ๆ ต่อไป ทำให้ลดขั้นตอนในการสร้างเรือจำลองและการทดลองลากเรือซึ่งโดยปกติต้องดำเนินการทดสอบหลายครั้ง ทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

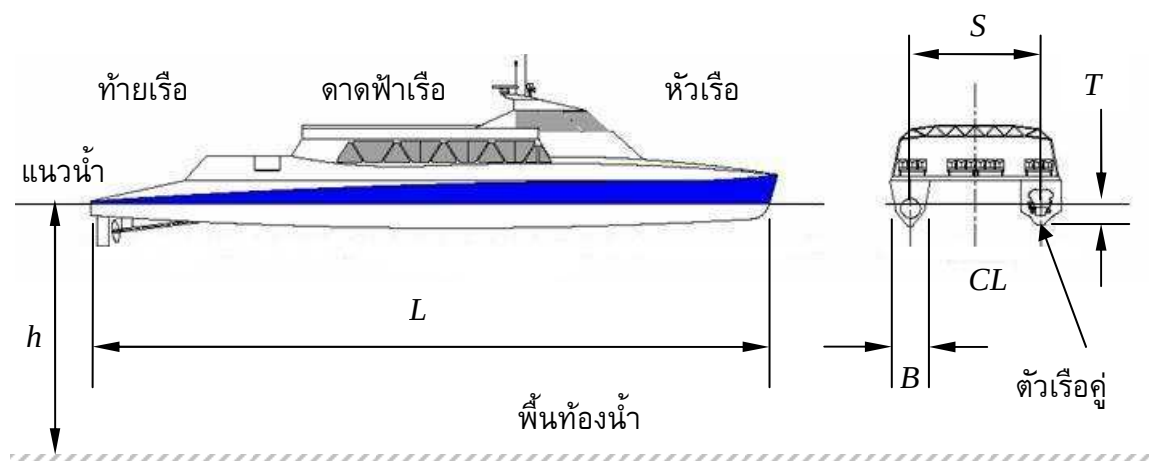
1.5.4 ข้อมูลลักษณะและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ที่ความเร็วต่าง ๆ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการกำหนดการใช้เรือ เช่น ความเร็วของเรือเมื่อนำมาใช้เป็นเรือโดยสารเพื่อลดผลกระทบของคลื่นหรือเพื่อป้องกันคลื่นที่เกิดจากเรือในรูปแบบอื่น ๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบทปรัทัศน์วรรณกรรม

2.1 เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran)

เรือแบบตัวเรือคู่เป็นเรือประเภทที่มีตัวเรือ 2 ลำ ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยโครงสร้างคาน้ำเรือ โดยตัวเรือแต่ละลำนี้เรียกว่า ตัวเรือคู่ (Demihull) ข้อดีของเรือประเภทนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเรือแบบตัวเรือเดี่ยว (Monohull) ได้แก่ การทรงตัวที่ดีกว่า มีความต้านทานลดลงเมื่อแล่นด้วยความเร็วสูง, มีพื้นที่คาน้ำกว้างกว่าทำให้สามารถออกแบบการใช้สอยได้อย่างเต็มที่ที่เหมาะสมนำมาใช้เป็นเรือโดยสาร และสามารถออกแบบตัวเรือให้มีความเพียวมากขึ้นเพื่อลดความต้านทานของเรือโดยเฉพาะที่ความเร็วสูง ทั้งนี้เรือแบบตัวเรือคู่มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ส่วนประกอบของเรือแบบตัวเรือคู่

- เมื่อ L เป็น ความยาวแนวน้ำ (Waterline length)
 B เป็น ความกว้างสุดที่กลางลำของตัวเรือคู่ (Breadth)
 S เป็น ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่จากเส้นกึ่งกลางเรือ
 T เป็น ระยะกินน้ำลึก (Draught)
 h เป็น ความลึกของน้ำ
และ CL เป็น เส้นกึ่งกลางเรือ (Center line)

2.2 ความต้านทานเรือ

ความต้านทานรวมของเรือ (Total ship resistance หรือ R_T) สามารถแบ่งองค์ประกอบได้เป็น ความต้านทานความเสียดทาน (Frictional resistance) ความต้านทานเชิงคลื่น (Wave – making resistance) ความต้านทานกระแสนวน (Eddy resistance) และความต้านทานอากาศ (Air resistance) ทั้งนี้ในการออกแบบเรือจำเป็นจะต้องทราบความต้านทานรวมของเรือเพื่อใช้ในการคำนวณขนาดเครื่องยนต์สำหรับการขับเคลื่อนเรือให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามความต้องการได้ อย่างไรก็ตามที่ประชุมนานาชาติว่าด้วยการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ (International Towing Tank Conference หรือ ITTC) ได้กำหนดแนวทางในการคำนวณหาความต้านทานเรือเชิงปฏิบัติเพื่อให้เหมาะสมกับวิธีลากเรือจำลอง โดยแบ่งองค์ประกอบความต้านทานรวมของเรือผิวน้ำเมื่อพิจารณาจากพลังงานที่เรือส่งผ่านให้น้ำ ออกเป็น 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ความต้านทานความหนืด (Viscous resistance หรือ R_V) และความต้านทานเชิงคลื่น (Wave – making resistance หรือ R_W) โดยไม่พิจารณาความต้านทานอากาศ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_T = R_V + R_W \quad (2.1)$$

ทั้งนี้ความต้านทานรวมสามารถหาค่าได้จาก

$$R_T = \frac{1}{2} \rho A_S V^2 C_T \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3), A_S เป็นพื้นที่ผิวของตัวเรือที่อยู่ใต้แนวน้ำ (m^2), V เป็น ความเร็วของเรือ (m/s) และ C_T เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม

ความต้านทานรวมที่ได้จากสมการ (2.1) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก อย่างไรก็ตามในการออกแบบจริงจะมีการคิดค่าเผื่อ (Margin) สำหรับการออกแบบรวมเพิ่มเข้าไปในผลลัพธ์ที่ได้ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมในการประมาณการกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน ซึ่งค่าเผื่อนี้จะมีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเรือและประเภทของความต้านทาน เช่น ค่าเผื่อสำหรับความต้านทานอากาศจะมีค่าประมาณ 2% – 4% ของความต้านทานรวมของเรือ เป็นต้น

นอกจากการแบ่งองค์ประกอบความต้านทานเรือตามสมการ (2.1) แล้ว เพื่อความสะดวกในทางปฏิบัติในการหาความต้านทานเรือ ยังสามารถแบ่งองค์ประกอบของความต้านทานรวมของเรือออกเป็น ความต้านทานความเสียดทาน (Frictional resistance หรือ R_F) และ ความต้านทานตกค้าง (Residual resistance หรือ R_R) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_T = R_F + R_R \quad (2.3)$$

2.2.1 ความต้านทานความหนืด

ความต้านทานความหนืดเป็นความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของน้ำ (Viscosity) ประกอบด้วยความต้านทานเนื่องจากความเค้นเฉือน (Shear stress) และความดันเชิงความหนืด (Viscous pressure)

ความเค้นเฉือนเป็นความเสียดทานของพื้นผิวตัวเรือ (Friction drag) ขณะที่ความต้านทานเนื่องจากความดันเชิงความหนืดเป็นผลมาจากความไม่สมดุลของความดันที่ท้ายเรือ โดยค่าความต้านทานความหนืดนี้มีค่าขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number หรือ Rn) ที่ใช้ L เป็นความยาวอ้างอิง ซึ่งหาค่าได้จาก

$$Rn = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.4)$$

เมื่อ μ เป็นความหนืดพลวัตของน้ำ (P.s)

ทั้งนี้เมื่อให้ C_v เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด จะสามารถคำนวณหาความต้านทานความหนืดได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_v = \frac{1}{2} \rho A_s V^2 C_v \quad (2.5)$$

ค่า C_v สามารถประมาณค่าได้จากสัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน (C_F) ของการไหลบนพื้นผิวราบเรียบและตัวประกอบรูปทรง (Form factor หรือ k) ตามมาตรฐาน ITTC 1957 Model – ship correlation line (ITTC. 1957) ดังสมการต่อไปนี้

$$C_v = (1+k) C_F \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (2.7)$$

2.2.2 ความต้านทานเชิงคลื่น

ความต้านทานเชิงคลื่นเป็นผลรวมของแรงเนื่องจากความดันที่กระทำต่อตัวเรือในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวซึ่งทำให้เกิดคลื่นที่ผิวน้ำ ทั้งนี้เมื่อให้ C_w เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น จะสามารถคำนวณหาความต้านทานเชิงคลื่นได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_w = \frac{1}{2} \rho A_s V^2 C_w \quad (2.8)$$

โดยความต้านทานนี้ไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วแต่มีค่าขึ้นอยู่กับเลขฟรูด (Froude number หรือ Fn) ที่ใช้ L เป็นความยาวอ้างอิง ซึ่งจะคำนวณได้จาก

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.9)$$

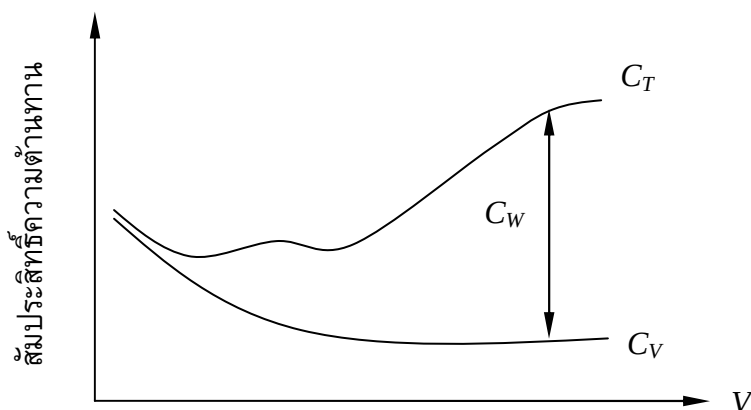
เมื่อ g เป็นความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

2.2.3 สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม

จากสมการ (2.1), (2.2), (2.5) และ (2.9) สามารถแสดงความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ (C_T) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_T = C_V + C_W \quad (2.10)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง C_T กับความเร็วของเรือสำหรับเรือความเร็วสูง เช่น เรือโดยสารในแม่น้ำ จะพบว่าความต้านทานเชิงคลื่นมีอิทธิพลต่อความต้านทานรวมของเรือมากกว่าความต้านทานความหนืด ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทานกับความเร็ว

นอกจากการแบ่งองค์ประกอบ C_T เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืดและความต้านทานเชิงคลื่นดังสมการ (2.10) แล้วนั้น เมื่อพิจารณาแยกความต้านทานความเสียดทาน (C_F) ซึ่งคำนวณหาได้ตามสมการ (2.7) ทำให้สามารถแบ่งองค์ประกอบของ C_T ออกเป็นผลรวม

ของสัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทานและสัมประสิทธิ์ความต้านทานตกค้าง (C_R) ดังสมการต่อไปนี้

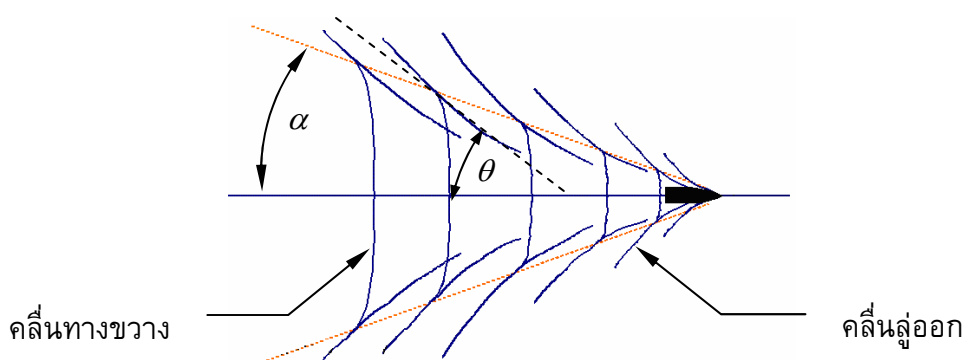
$$C_T = C_F + C_R \quad (2.11)$$

2.3 คลื่นที่เกิดจากเรือ

เมื่อเรือเคลื่อนที่ในน้ำจะก่อให้เกิดคลื่นกระจายออกจากตัวเรือ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการเกิดคลื่นได้เป็น 2 ทฤษฎี ตามความลึกของน้ำ ได้แก่ ระบบคลื่นทฤษฎีเคลวิน (Kelvin Theory) เมื่อเรือแล่นในน้ำลึก และระบบคลื่นทฤษฎีเฮฟล็อก (Havelock Theory) เมื่อเรือแล่นในน้ำตื้น

2.3.1 ระบบคลื่นทฤษฎีเคลวิน

ระบบคลื่นบนผิวน้ำเมื่อเรือแล่นในเขตน้ำลึก ประกอบด้วยคลื่นลู่ออก (Divergent wave) และคลื่นทางขวาง (Transverse wave) ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ระบบคลื่นทฤษฎีเคลวิน

คลื่นลู่ออกจะเคลื่อนที่ออกจากตัวเรือเป็นมุม θ กับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ ซึ่งมุม θ นี้เรียกว่า มุมแพร่ (Propagation angle) ขณะที่คลื่นทางขวางเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากตัวเรือในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ นอกจากนี้แนวจุดตัดของคลื่นทางขวางกับคลื่นลู่ออกจะทำมุมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือเป็นมุม α เรียกว่า มุมเขี้ยว (Cusp angle)

ทั้งนี้การเกิดคลื่นกระจายออกจากเรือทำให้เกิดชุดคลื่นที่มีลักษณะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของตัวเรือ ดังนี้

- ที่หัวเรือ เกิดชุดคลื่นลู่ออกขนาดใหญ่
- ที่กลางลำ เกิดชุดคลื่นลู่ออกจากตัวเรือทั้งสองฝั่งโดยกระจายเป็นแนวทแยงออกไปทางท้ายเรือ ทั้งนี้คลื่นที่เกิดขึ้นนี้มีความยาวค่อนข้างสั้น
- ที่ท้ายเรือ เกิดคลื่นทางขวางระหว่างชุดคลื่นลู่ออกทั้งสองฝั่งของเรือ ซึ่งคลื่นทางขวางนี้มีสันคลื่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ โดยที่ปลายของคลื่นทางขวางด้านที่ใกล้กับคลื่นลู่ออกทั้งสองฝั่งมีลักษณะโค้งออกไปทางท้ายเรือและรวมตัวกับคลื่นลู่ออก จนในที่สุดจะเหลือเพียงคลื่นลู่ออกเท่านั้นที่ยังคงมีอิทธิพลที่เด่นชัดต่อระบบคลื่น

2.3.2 ระบบคลื่นทฤษฎีเฮฟลอค

หากพิจารณาให้เรือจอดอยู่กับที่ในเขตนํ้าตื้นและให้นํ้าไหลผ่านจะพบว่านํ้าด้านล่างท้องเรือจะต้องไหลผ่านท้องเรือด้วยความเร็วสูงกว่านํ้าที่ไหลผ่านท้องเรือที่จอดอยู่ในเขตนํ้าลึก ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้ความดันบริเวณท้องเรือลดลง ส่งผลให้เรือจมนํ้ามากขึ้นและมีทริมเรือ (Trim) หรือผลต่างระหว่างระยะกึ่งนํ้าหัวเรือท้ายเรือเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เรือมีความต้านทานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในเขตนํ้าตื้นนี้ ทฤษฎีคลื่นเฮฟลอคได้ให้นิยามความเร็วของคลื่นที่ผิวนํ้า (V_C) ดังสมการต่อไปนี้

$$V_C^2 = \left(\frac{gL_w}{2\pi} \right) \tanh \left(\frac{2\pi h}{L_w} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ L_w เป็นความยาวคลื่น ทั้งนี้ที่ความลึกน้อย ๆ จะพบว่า

$$\tanh \left(\frac{2\pi h}{L_w} \right) \approx \left(\frac{2\pi h}{L_w} \right)$$

ดังนั้นสมการ (2.12) ลดรูปเป็น

$$V_C = \sqrt{gh} \quad (2.13)$$

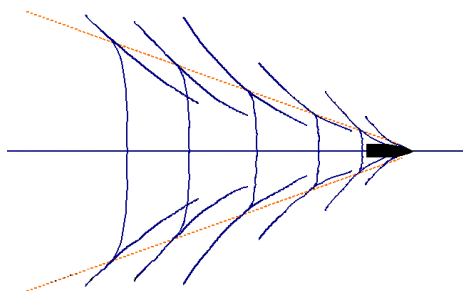
สำหรับการพิจารณาว่าเรือแล่นในเขตนํ้าตื้นหรือไม่นั้น จะใช้การพิจารณาเลขฟรูดเชิงความลึก (Depth Froude number หรือ Fn_h) ที่ใช้ความลึกของนํ้า (h) เป็นความยาวอ้างอิง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2.14)$$

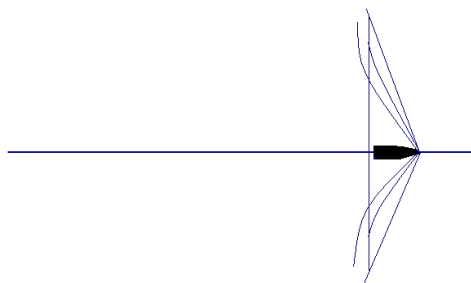
อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเขตใดเป็นเขตน้ำตื้นนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน จากการศึกษาที่ผ่านมา มีการกำหนดเขตน้ำตื้นโดยใช้การพิจารณา Fn_h ไว้ในงานวิจัยหลายชิ้น เช่น เลียร์ – แอนเดอร์เซนและคณะ กำหนดให้เป็นเขตน้ำตื้นเมื่อ $Fn_h > 0.7$ (Leer - Andersen; et al. 2000) ขณะที่แวนมาเนนและแวนออสซานเนน กำหนดให้เป็นเขตน้ำตื้นเมื่อ $Fn_h > 0.4$ (Van Manen; & Van Oossanen. 1988)

รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือและความสูงของคลื่นสำหรับกรณีเรือแล่นในเขตน้ำตื้นตาม ทฤษฎีเฮฟลอคสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะตาม Fn_h ดังภาพประกอบ 9

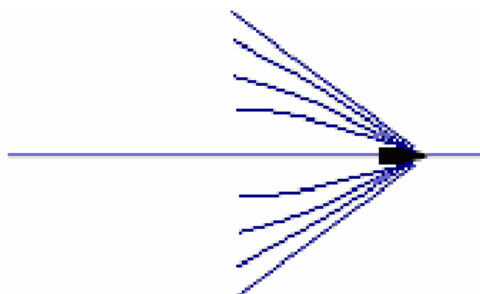
(ก) $Fn_h < 1$



(ข) $Fn_h \approx 1$



(ค) $Fn_h > 1$



ภาพประกอบ 9 ระบบคลื่นทฤษฎีเฮฟลอค

- เมื่อ $Fn_h < 1$ ระบบคลื่นประกอบด้วยคลื่นทางขวางและคลื่นลู่ออกตามทฤษฎีเคลวินและถือว่าเรือแล่นด้วยความเร็วต่ำกว่าวิกฤต (Subcritical speed) โดย $\alpha = 19^\circ 28'$ ดังภาพประกอบ 9 (ก)

- เมื่อ $Fn_h \approx 1$ หรือเมื่อ V มีค่าเข้าใกล้ $\sqrt{gh}$ จะเกิดคลื่นรบกวนซึ่งมีความเร็วเท่ากับเรือ มุมเขี้ยวจะมีค่าเข้าใกล้ 90° ขณะที่มุมแพรมีค่าเข้าใกล้ 0° ทำให้คลื่นทางขวางและคลื่นลู่ออกรวมตัวเป็นระบบคลื่นเดี่ยว คลื่นที่เกิดขึ้นจากความดันแตกต่างรอบตัวเรือจะรวมอยู่ที่สันคลื่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของเรือ ดังภาพประกอบ 9 (ข) ทั้งนี้ความเร็วที่ทำให้ $Fn_h = 1$ เรียกว่า ความเร็ววิกฤต (Critical speed)

- เมื่อ $Fn_h > 1$ ความเร็วของเรือมีค่าสูงกว่าวิกฤต (Supercritical speed) มุมเขี้ยวมีขนาดลดลง ระบบคลื่นทางขวางไม่เดินทางตามทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือและจะสลายไปจนหมดในที่สุด เมื่อ Fn_h มีค่าสูงขึ้นระบบคลื่นจะเหลือเพียงคลื่นลู่ออก คลื่นลู่ออกนี้มีลักษณะโค้งเข้าซึ่งตรงข้ามกับกรณีคลื่นลู่ออกที่ $Fn_h < 1$ ดังภาพประกอบ 9 (ค)

2.4 บทปริทัศน์วรรณกรรม

การศึกษาวิจัยเรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่นและประหยัดพลังงาน (Low wash catamaran) เริ่มได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากสังคมเริ่มให้ความสำคัญต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะปัญหาการพังทลายของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำเนื่องจากการชะล้างที่เกิดจากคลื่นที่เกิดจากเรือ สำหรับประเทศไทย นาวาโท สัตยา จันทรประภา (สัตยา จันทรประภา. 2550) ได้เสนอแนวคิดในการนำเรือแบบตัวเรือคู่มาใช้เป็นเรือโดยสารในแม่น้ำทดแทนเรือโดยสารที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพื่อลดคลื่นที่เกิดจากเรือและช่วยประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อน รวมทั้งได้เสนอแนวทางการเดินเรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่น ได้แก่ การหลีกเลี่ยงการใช้งานเรือในย่านที่ Fn_h มีค่าระหว่าง 0.8 – 1.2 และออกแบบเรือให้มีระยะห่างจากตัวเรือเมื่อวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางลำเรือไปยังขอบฝั่งต้องไม่น้อยกว่าประมาณ 1.5 เท่าของความยาวตัวเรือที่แนวน้ำ นอกจากนี้ในการออกแบบเรือประเภทนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยประกอบอื่น ๆ ด้วย ได้แก่ รูปทรงตัวเรือที่แนวน้ำและใต้แนวน้ำ ระวังชน้ำของเรือ ความเร็วเรือ ความลึกและความกว้างของแม่น้ำ

ในต่างประเทศ เลียร์ - แอนเดอร์เซนและคณะ (Leer - Andersen; et al. 2000) ได้นำเสนอผลกระทบเนื่องจากคลื่นที่เกิดจากเรือความเร็วสูง โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างผลกระทบจากความต้านทานเชิงคลื่นกับผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกที่ความเร็ว 20 - 40 นอต พบว่าที่ความเร็ว เรือแบบตัวเรือคู่มีความต้านทานเชิงคลื่นน้อยกว่าเรือแบบตัวเรือเดี่ยว แต่วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถระบุความสูงของคลื่นได้

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานและคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ นั้น อินเซลและมอลล์แลนด์ (Insel; & Molland. 1991) ได้ทำการทดลองลากเรือจำลองแบบตัวเรือคู่

แบบความเร็วสูง (High speed catamaran) และแบบวิกัลยี่ในถังลากเรือเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน S/L และ L/B สำหรับค่า Fn_h ระหว่าง 0.2 – 1.0 พบว่าความต้านทานความหนืดมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วน L/B เนื่องจากการแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือ แต่ไม่ขึ้นกับความเร็วและระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ โดยที่ความเร็วต่ำ ๆ อัตราส่วน L/B มีผลต่อความต้านทานเชิงคลื่นเนื่องจากการแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือ

คูเซอร์และคณะ (Couser; et.al. 1997) ได้ทำการทดลองลากเรือจำลองแบบตัวเรือคู่ความเร็วสูงในถังลากเรือเพื่อศึกษาองค์ประกอบของความต้านทานรวมของเรือ ผลการทดลองพบว่าความต้านทานความหนืดมีอิทธิพลต่อความต้านทานรวมของเรือมากกว่าความต้านทานเชิงคลื่น นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังได้นำเสนอค่า Form factor ที่เหมาะสมสำหรับตัวเรือที่มีท้องเรือโค้ง (Round bilge) และท้ายเรือตัด (Transom stern) สำหรับใช้ในการคำนวณ C_v ในสมการ (2.6) ต่อมา อุทามะและมอลล์แลนด์ (Utama; & Molland. 2001) ได้ทำการศึกษาความต้านทานความหนืดของเรือแบบตัวเรือคู่ โดยการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขพบว่าอิทธิพลของการแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือคู่มีผลต่อความต้านทานความหนืดน้อยมาก

นาวาโท สัตยา จันทรประภาและคณะ (Chandrababha; et al. 2004) ได้ทำการศึกษาคลื่นที่เกิดจากเรือและความต้านทานของเรือแบบตัวเรือคู่ความเร็วสูงในเขตน้ำตื้น โดยทำการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ พบว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวแนวน้ำต่อระวางขับน้ำ ($L/\nabla^{1/3}$) มีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานเชิงคลื่นรวมทั้งความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือมีค่าลดลง ขณะที่เมื่อ S/L มีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานเชิงคลื่นมีค่าลดลง แต่ความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือ (Wash wave) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในกรณีที่เรือแล่นในเขตน้ำตื้นพบว่า เมื่อความลึกของน้ำลดลง ความต้านทานเรือจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเรือควรจะแล่นที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็ววิกฤต โดยความเร็วที่เหมาะสมควรเป็นความเร็วที่ทำให้ $Fn_h < 0.8$ นอกจากนี้ที่ความเร็ววิกฤต ความต้านทานรวมของเรือตลอดจนความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการแพร่กระจายของคลื่นเกือบจะทั้งหมดตั้งฉากกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือ

มอแรส, วาสโคนเซลโลส และลาตอเร (Moraes; Vasconcellos; & Latorre. 2004) ได้ศึกษาความต้านทานเชิงคลื่นและความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ความเร็วสูงที่มีรูปทรงตัวเรือและระยะห่างระหว่างตัวเรือต่าง ๆ โดยการคำนวณทางทฤษฎีและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SHIPFLOW ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจากการจำลองการไหลแบบ Potential flow พบว่าที่อัตราส่วน $S/L_{wl} > 0.6$ การแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือคู่มีผลกระทบน้อย ทำให้สามารถคำนวณความต้านทานเชิงคลื่นโดยพิจารณาตัวเรือแยกจากกันได้ และรูปทรงของตัวเรือไม่มีผลกระทบต่อความต้านทานเชิงคลื่นมากนัก นอกจากนี้การแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือคู่มีค่าสูงสุดเมื่อ $Fn = 0.5$ และ 0.4 สำหรับเขตน้ำลึกและเขตน้ำตื้นตามลำดับ ขณะที่เมื่อ $Fn \approx 0.5$ ความต้านทานเชิงคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ลดลง ขณะที่ในเขตน้ำตื้นการแทรกสอด

ของคลื่นมีค่าเป็นลบเมื่อ $Fn > 0.7$ และท้ายที่สุดพบว่าระยะห่างระหว่างตัวเรือและความลึกของน้ำมีผลกระทบต่อความต้านทานเชิงคลื่นอย่างมาก

ทาราฟเดอร์และซุซูกิ (Taraferder; & Suzuki. 2007) ได้ศึกษาการไหลรอบเรือแบบตัวเรือคู่แบบวิกิลีที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่าง ๆ โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข Potential - based boundary element method พบว่าขนาดของคลื่นที่เกิดด้านในระหว่างตัวเรือคู่มีค่าสูงกว่าด้านนอกอย่างมากซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกสอดของคลื่น อย่างไรก็ตามที่ความเร็วสูง คลื่นแทรกสอดนี้จะมีค่าน้อยมากหาก $S/L \geq 0.4$ และเสนอให้ใช้ค่า $S/L = 0.4$ ในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่เพื่อลดคลื่นแทรกสอด

ในส่วนของแบบรูปทรงตัวเรือแบบตัวเรือคู่ นั้น ในอดีตมักจะมุ่งเน้นให้เรือสามารถทำความเร็วได้สูงและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา รูปทรงตัวเรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่นและประหยัดพลังงานได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นและได้มีการศึกษาวิจัยอย่างมากมาย เช่น สตั้มโบม, ฟ็อกซ์ และอีเลียต (Stumbo; Fox; & Elliot. 1999) ได้นำเสนอผลการสำรวจคลื่นชะล้างจากเรือแบบต่าง ๆ รวมทั้งเรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่น พบว่าเรือทุกแบบที่ได้ทำการสำรวจจะเกิดคลื่นชะล้างสูงสุดเมื่อ Fn มีค่าระหว่าง 0.45 – 0.58 ทั้งนี้เรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่นจะไม่ใช้เรือที่มีความสูงคลื่นต่ำสุดภายในช่วงดังกล่าวแต่เป็นเรือที่มีความสูงของคลื่นเฉลี่ยต่ำสุด นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการออกแบบเรือให้เกิดคลื่นน้อยที่สุดโดยการลดความยาวแนวน้ำและการเพิ่มค่า L/B อย่างไรก็ตามหากต้องการรักษาระวางขับน้ำให้คงที่จะทำให้เรือต้องกินน้ำลึกเพิ่มขึ้นนั่นหมายถึงความต้านทานความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่ลดคลื่นจำเป็นจะต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ด้วยความระมัดระวัง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเรือแบบตัวเรือเดี่ยวที่ระวางขับน้ำเท่ากันแล้วพบว่าเรือแบบตัวเรือคู่มีความต้านทานเชิงคลื่นและขนาดของคลื่นชะล้างน้อยกว่า อย่างไรก็ตามวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น แม้จะนิยมนำใช้ในการวิเคราะห์การเกิดคลื่นและการไหลรอบตัวเรือแต่ก็เป็น การจำลองการไหลซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงความหนืดแต่อย่างใด

ในส่วนของการนำวิธี CFD มาประยุกต์ใช้ในการจำลองการไหลรอบตัวเรืออย่างกว้างขวาง เช่น อาร์มสตรอง (Amrstrong. 1995) ได้ใช้วิธี CFD แบบ Finite Volume Method (FVM) มาวิเคราะห์ความต้านทานความหนืดของเรือแบบตัวเรือคู่ประเภทความเร็วสูงโดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ พบว่าการกระจายของความดันรอบตัวเรือสอดคล้องกับผลการทดลองแต่ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy หรือ k) มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ ขณะที่ ธอร์นฮิลล์และคณะ (Thornhill; et al. 2003) ได้ประยุกต์ใช้วิธี CFD แบบ FVM มาวิเคราะห์ความต้านทานเรือที่สภาวะการลอยตัวต่าง ๆ ของเรือแบบ Planing craft พบว่าแม้จะเป็นการคำนวณหาสภาวะคงตัวของเรือ (Steady state calculation) แต่เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริง จำเป็นจะต้องใช้วิธีคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Time dependent scheme)

สำหรับการคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำนั้น ได้มีการนำแบบจำลอง Volume of Fluid (VOF) มาใช้ในการจำลองการไหลรอบตัวเรือและวิเคราะห์รูปแบบคลื่นหลายงานวิจัยด้วยกัน เช่น การศึกษาผลกระทบของผนังถังลากเรือต่อการคำนวณความต้านทานเรือจำลองในการทดลองลากเรือ โดยใช้วิธี CFD สำหรับการไหลแบบไม่มีความหนืดของ कुमारและสุบรามานิเยน (Kumar; & Subramanian. 2007) และการศึกษาการไหลแบบไม่มีความหนืดรอบตัวเรือสินค้าในเขตน้ำตื้นของ ทาแบคเซก (Tabaczek. 2008) ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น ได้แสดงรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง VOF สามารถใช้จำลองการเกิดคลื่นได้อย่างเหมาะสม

อย่างไรก็ตามจากการสำรวจงานวิจัยจนถึงปัจจุบันยังไม่ปรากฏว่ามีงานวิจัยที่นำวิธี CFD มาวิเคราะห์รูปแบบคลื่นและความต้านทานของเรือแบบตัวเรือคู่ โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบมีความหนืดร่วมกับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวน้ำแต่อย่างใด นอกจากนี้เงื่อนไขขอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังคงมีบางบริเวณที่ไม่แสดงสภาวะตามความเป็นจริง ตลอดจนในการศึกษาที่ผ่านมาต่างมีขนาดและสภาวะขอบเขต เช่น ความลึกของน้ำและระยะทางจากตัวเรือถึงริมฝั่งที่แตกต่างกัน ซึ่งต่างก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานเชิงคลื่นและการเกิดคลื่นโดยเฉพาะกับเรือแบบตัวเรือคู่ แสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้ในการนำวิธี CFD มาจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ยังคงเปิดกว้างสำหรับการวิจัยค้นคว้าเพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำที่สุด ตลอดจนแบบตัวเรือคู่ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดขนาดของคลื่นที่เกิดจากเรือต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาจำลองการไหล และคำนวณหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขปริมาตรจำกัด (Finite volume method หรือ FVM) ตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาแนวทางการจำลองการไหลที่เหมาะสม

การศึกษาเริ่มด้วยการจำลองการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ผ่านทรงกลมที่จำนวนกริตต่าง ๆ แล้วเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient หรือ C_D) ที่คำนวณได้กับผลการทดลองที่มีเผยแพร่เพื่อทดสอบโปรแกรม CFD และหาการแบ่งกริตที่เหมาะสมเนื่องจากทรงกลมเป็นรูปทรงมาตรฐานที่มีผลการทดลองเผยแพร่ทั่วไป

จากนั้นนำการแบ่งกริตที่เหมาะสมมาใช้กับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ผ่านทรงกลม เนื่องจากในความเป็นจริงการไหลรอบตัวเรือจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้ศึกษา ได้แก่ แบบจำลอง $k-\epsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ เนื่องจากเป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 สมการ ที่มีความเหมาะสมกับขนาดหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากนั้นเปรียบเทียบ C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองกับผลการทดลองที่มีเผยแพร่เพื่อหาแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3.1.2 ศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อความต้านทาน

ในขั้นตอนนี้ใช้แบบจำลองการไหลผ่านตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 2 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อสัมประสิทธิ์ความต้านทาน C_D ในรูปของอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างตัวเรือต่อความยาวแนวน้ำ (S/L) เพื่อให้ผลการศึกษาที่ได้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปเทียบกับเรือแบบตัวเรือคู่ขนาดอื่น ๆ ได้

การศึกษาเริ่มด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ (C_T) ที่ได้จากการทดลองที่เผยแพร่ จากนั้นทำการจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 2 มิติที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือในรูปของอัตราส่วน S/L ต่าง ๆ ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยใช้การแบ่งกริตและแบบจำลองการไหลที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.1.1 จากนั้นคำนวณหา C_D และวิเคราะห์ผลกระทบของ S/L ต่อความต้านทานเรือในรูปของ C_D เพื่อหาระยะห่างระหว่างตัวเรือที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาขั้นตอนต่อไป

3.1.3 ศึกษาผลกระทบของความเพียวของตัวเรือคู่ต่อความต้านทาน

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเพียวของตัวเรือคู่ต่อสัมประสิทธิ์ความต้านทาน C_D โดยความเพียวอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความยาวแนวน้ำต่อความกว้างสุดที่แนวน้ำ (L/B) เพื่อให้ผลการศึกษาที่ได้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปเทียบกับเรือแบบตัวเรือคู่ขนาดอื่น ๆ ได้

แบบจำลองที่ใช้ในขั้นตอนนี้เป็นแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองในข้อ 3.1.2 และใช้ระยะห่างระหว่างตัวเรือที่เหมาะสมในรูปของอัตราส่วน S/L ที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.1.2 มาทำการศึกษาผลกระทบของ L/B ต่อ C_D ที่ความเร็วสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้สำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำ เพื่อหาความเพียวของตัวเรือคู่ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ต่อไป

3.1.4 วิเคราะห์ความต้านทานเรือแบบตัวเรือคู่

การวิเคราะห์ความต้านทานเรือแบบตัวเรือคู่เริ่มด้วยการสร้างแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ 3 มิติ ทั้งแบบการไหล 2 เฟส และ 1 เฟส โดยใช้การแบ่งกริด, แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน, ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ และความเพียวของตัวเรือคู่ที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ผ่านมา

จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองนี้ด้วยการคำนวณความต้านทานรวมของเรือ (R_T) และเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีเผยแพร่ จากนั้นทำการศึกษาความต้านทานเรือแบบตัวเรือคู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่าง ๆ ได้แก่ C_T, C_V, C_W, C_F และ C_R ในช่วงความเร็วใช้งานของเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยา

3.1.5 การวิเคราะห์รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่

เนื่องจากความลึกของเส้นทางเดินเรือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่เมื่อแล่นในน้ำนิ่ง โดยใช้แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 3 มิติแบบการไหล 2 เฟส ที่ใช้ในการศึกษาตามข้อ 3.1.4

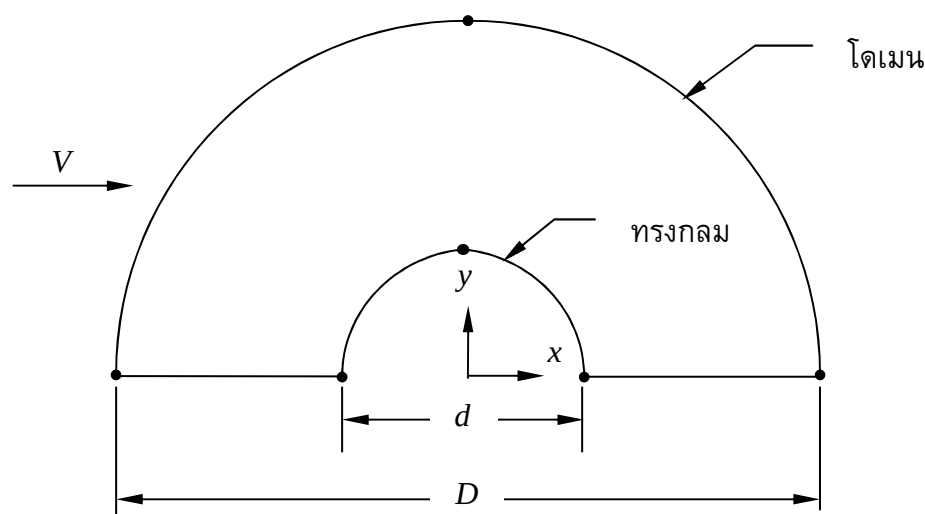
การศึกษาเริ่มด้วยการทดสอบรูปแบบคลื่นที่คำนวณได้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อระยะกินน้ำลึก (H_w/T) เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีเผยแพร่ จากนั้นวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นที่ความลึกต่าง ๆ ของเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของคลื่นที่ระยะห่างจากตัวเรือ

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม, แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ และแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ โดยแต่ละแบบจำลองมีรายละเอียด ดังนี้

3.2.1 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลมถูกนำมาใช้ศึกษาเพื่อหารูปแบบการแบ่งกิริตและแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยขั้นต่อไป เนื่องจากทรงกลมเป็นรูปทรงสมมาตร ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการคำนวณในงานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลอง 2 มิติ ประกอบด้วยรูปครึ่งวงกลมเล็กภายในรูปครึ่งวงกลมใหญ่ โดยวงกลมเล็กแทนทรงกลมและวงกลมใหญ่เป็นโดเมนของแบบจำลอง ดังภาพประกอบ 10 โดยทรงกลมมีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ยาว 0.1 เมตร และโดเมนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ยาว 10 เมตร คิดเป็น 100 เท่าของทรงกลมเพื่อลดผลกระทบของผนังต่อการไหลบริเวณใกล้ทรงกลม



ภาพประกอบ 10 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

การคำนวณหา C_D กระทำที่เลขเรย์โนลด์ส์ (Re_d) ต่าง ๆ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$Re_d = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (3.1)$$

เมื่อ V เป็นความเร็วคงที่การไหลเข้า (m/s), ρ เป็นความหนาแน่นของน้ำ (kg/m³) และ μ เป็นความหนืดพลวัตของน้ำ (P.s) โดยความต้านทานจะศึกษาในรูปของสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient หรือ C_D) ซึ่งหาได้จาก

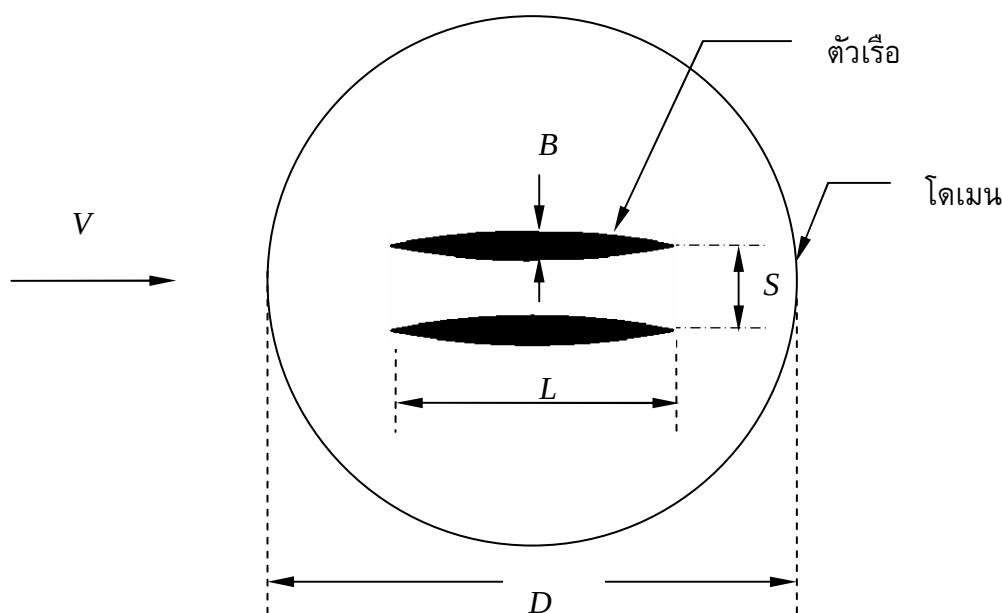
$$C_D = \frac{1}{2} \frac{F_D}{\rho A_C V^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ F_D เป็นแรงจุด (N) และ A_C เป็นพื้นที่อ้างอิง (m²)

3.2.2 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ

แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิตินี้ ใช้ในการศึกษาผลกระทบต่อความต้านทานของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ในรูปของอัตราส่วน S/L และความเพียวของตัวในรูปของอัตราส่วน L/B ทั้งนี้แบบจำลองมีรายละเอียดดังภาพประกอบ 11

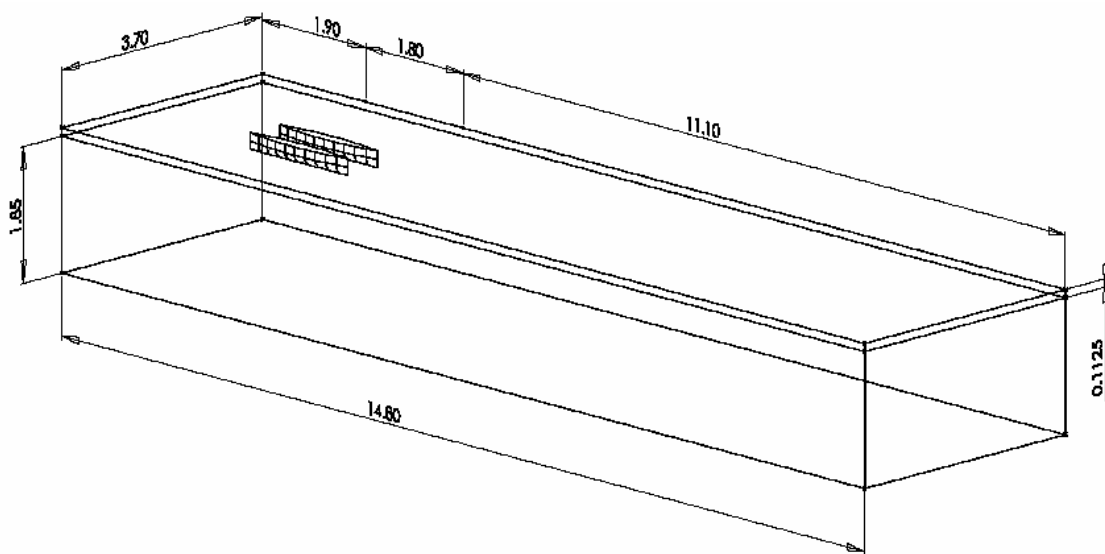
แบบจำลองประกอบด้วย รูปทรงตัวเรือคู่ ณ แนวน้ำ อยู่ในโดเมนวงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ยาว 10 เมตร เพื่อลดผลกระทบจากผนังข้างเคียง ทั้งนี้แบบจำลองนี้จะเป็นการจำลองตัวเรือคู่ทั้งสองข้าง เนื่องจากถึงแม้เรือจะสมมาตรที่กึ่งกลางระหว่างตัวเรือคู่ทั้งสอง แต่ในความเป็นจริงการไหลภายในช่องว่างระหว่างตัวเรือคู่จะเกิด การแทรกสอดของคลื่นที่เกิดจากตัวเรือคู่ซึ่งส่งผลกระทบท่อความต้านทานเชิงคลื่น



ภาพประกอบ 11 แบบจำลอง 2 มิติ

3.2.3 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ

แบบจำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่แบบ 3 มิติที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นการจำลองการทดลองลากเรือในถังลากเรือ (Towing tank test) โดยแบบจำลองประกอบด้วยตัวเรือคู่ภายในอ่างน้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งมีการจำลองทั้งส่วนที่เป็นน้ำและอากาศ ดังภาพประกอบ 12 ทั้งนี้แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ ตลอดจนความกว้างของถังลากเรือและความลึกของน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเท่ากับที่ใช้ในการทดลองลากเรือในถังลากเรือในงานวิจัยของอินเซล (Insel. 1990) เพื่อประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับผลการทดลอง

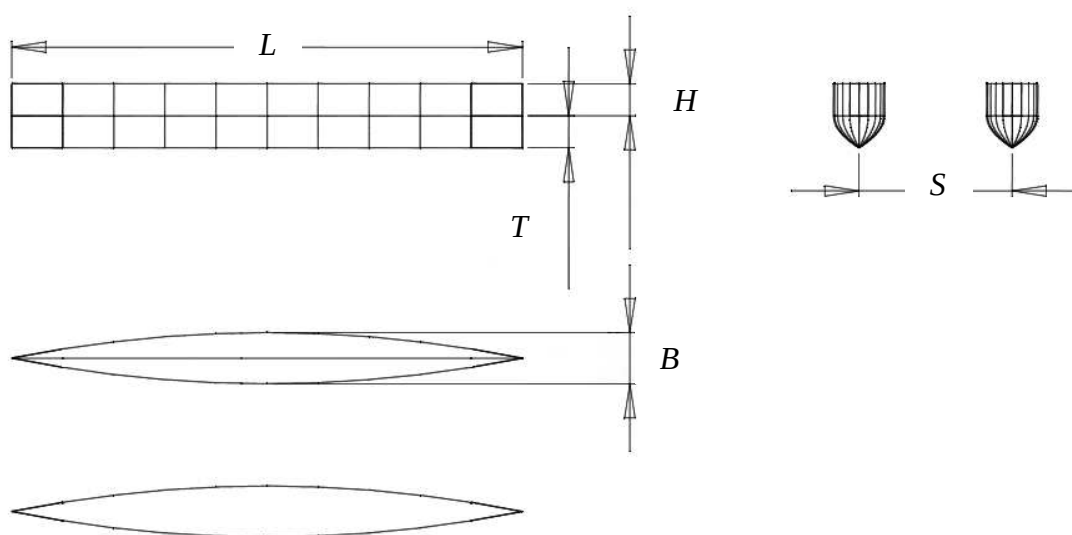


ภาพประกอบ 12 แบบจำลอง 3 มิติ (หน่วย: เมตร)

รูปทรงตัวเรือใต้แนวน้ำของแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีรูปทรงเรขาคณิตแบบพาราโบลา (Parabolic) เรียกว่ารูปทรงตัวเรือแบบวิกลีย์ (Wigley hull) ดังภาพประกอบ 13 ซึ่งตัวเรือดังกล่าวมีความสมมาตรทำให้ไม่มีผลกระทบอันเกิดจากความแตกต่างของความดันที่หัวเรือและท้ายเรือซึ่งเกิดจากท้ายเรือตัด (Transom stern)

แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่มีขนาด/ระยะตามภาพประกอบ 13 ดังนี้ $L = 1.80$ เมตร, $B = 0.18$ เมตร, $T = 0.1125$ เมตร และ $H = 0.1125$ เมตร ขณะที่ S จะเปลี่ยนแปลงไปตามการศึกษาในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ 0.36 เมตร, 0.54 เมตร, 0.72 เมตร และ 0.90 เมตร สำหรับตัวเรือเหนือแนวน้ำนั้นถูกจำลองขึ้นเพื่อรองรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวน้ำ โดยมีขนาดพื้นที่หน้าตัดแนวระนาบเท่ากับพื้นที่หน้าตัดระนาบที่แนวน้ำ (Waterplane) ของเรือรูปทรงวิกลีย์ และสูงเท่ากับระยะกินน้ำลึกเนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่น

ต่อระยะกินน้ำลึกมีค่าน้อยกว่า 1 ทั้งนี้แบบจำลองเรือนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งซึ่งในความเป็นจริงเมื่อเรือแล่นในน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะกินน้ำลึกที่หัวเรือและท้ายเรือซึ่งเรียกว่า ทริมเรือ (Trim)



ภาพประกอบ 13 แบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่แบบวิกิลีย์

แบบจำลองถังลากเรือในงานวิจัยนี้กว้าง 3.70 เมตร สูง 1.1625 เมตร และยาว 14.80 เมตร โดยความสูงแบ่งเป็น ส่วนที่เป็นอากาศสูง 0.1125 เมตร เท่ากับความสูงของตัวเรือเหนือแนวน้ำ และส่วนที่เป็นน้ำลึก 1.85 เมตร สำหรับความยาวของอ่างน้ำจะมีความยาวน้อยกว่าความยาวจริงเนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดและจำนวนกริดของโดเมน ทั้งนี้ความยาวแบ่งเป็นส่วนต้นน้ำยาว 2.10 เมตร (จากทางเข้าถึงหัวเรือ) และส่วนปลายน้ำยาว 11.10 เมตร (จากท้ายเรือถึงทางออก)

จากทฤษฎีไฮเฟล็ค ที่ $Fn_h < 1$ มุมเขี้ยวมีขนาด $\alpha = 19^\circ 28'$ (Van Manen; & Van Oossanen. 1988) สามารถคำนวณระยะทางที่เคลื่อนจากหัวเรือเดินทางไปถึงผนังของอ่างน้ำ (z) ได้ดังนี้

$$z = \frac{b}{\tan \alpha} = \frac{(1.85 - 0.27)}{\tan 19^\circ 28'} = 4.51 \text{ เมตร}$$

เมื่อ b เป็นความกว้างจากกึ่งกลางตัวเรือคู่ (CL) ถึงผนังอ่างน้ำ ซึ่งจากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า ส่วนปลายน้ำมีความยาวมากกว่า z (11.10 เมตร > 4.51 เมตร) ดังนั้นส่วนปลายน้ำจึงมีความยาวเพียงพอสำหรับการเดินทางของระบบคลื่นที่เกิดจากเรือ

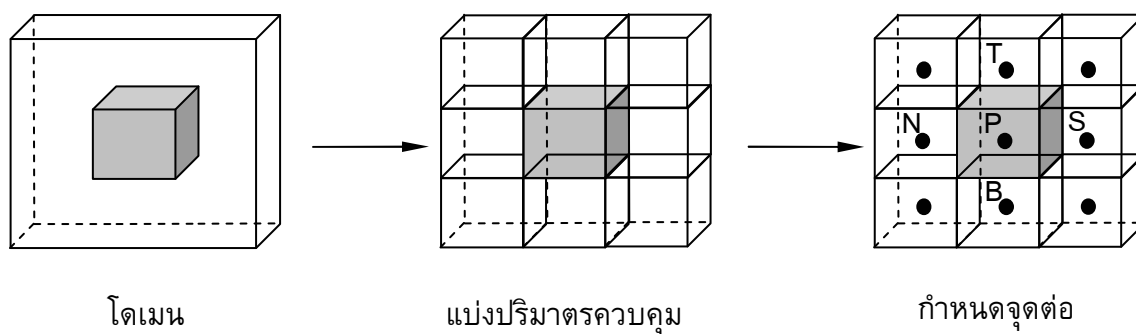
3.3 วิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method)

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่เรียกว่า วิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume method หรือ FVM) มาทำการหาผลเฉลยของสมการบังคับการไหล (Governing equations) และสมการสมบัติการไหลอื่น ๆ (Flow properties) ที่เกี่ยวข้อง โดยในการศึกษาวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่น ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) สำหรับการไหลที่มีความหนืด ร่วมกับแบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of fluid หรือ VOF) สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ และทำการหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method) ทั้งนี้วิธี FVM มีขั้นตอนที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

- การแบ่งปริมาตรควบคุม – โดยการแบ่งโดเมนของแบบจำลองเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) หรือเซลล์ (Cell) ย่อย ๆ
- การดิสครีไทเซชัน (Discretization) - เป็นการหาปริพันธ์ (Integration) ของสมการพื้นฐานและสมการสมบัติการไหลอื่น ๆ ของแต่ละปริมาตรควบคุมและแปลงให้อยู่ในรูปของสมการทางพีชคณิต
- การหาผลเฉลย – โดยการประมาณค่า (Interpolation) และการคำนวณซ้ำ (Iteration) จนได้คำตอบซึ่งมีผลลู่เข้า (Convergence) ของค่าตกค้าง (Residual) สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ยอมรับ

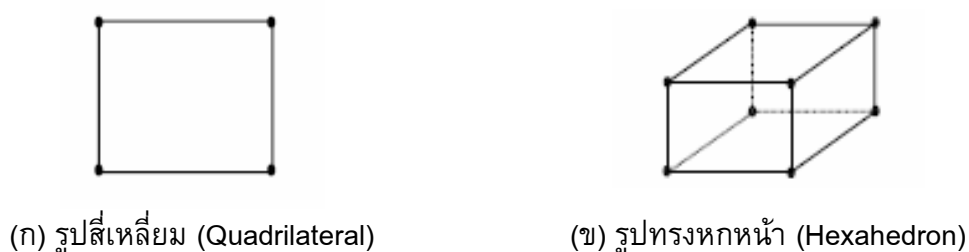
3.4 การแบ่งปริมาตรควบคุม

โดเมนของการไหลในแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรย่อย ๆ เรียกว่า ปริมาตรควบคุม (Control volume) หรือเซลล์ (Cell) และกำหนดให้จุดกึ่งกลางของปริมาตรควบคุม ได้แก่ T, S, B N และ P เป็นจุดต่อ (Node) สำหรับการคำนวณ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ขั้นตอนการแบ่งปริมาตรควบคุม

เนื่องจากในขั้นตอนการศึกษาความต้านทานและรูปแบบคลื่นด้วยแบบจำลองการไหลรอบเรือแบบตัวเรือคู่ 3 มิติ จะใช้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit ซึ่งกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของสัดส่วนปริมาตรในแต่ละเซลล์จะบรรจุด้วยน้ำหรืออากาศอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการตั้งค่าเริ่มต้นดังกล่าวจึงได้แบ่งปริมาตรควบคุมด้วยกริดรูปทรงหกหน้า (Hexahedron) สำหรับแบบจำลอง 3 มิติ และเพื่อให้สอดคล้องกันในงานวิจัยนี้จึงใช้กริดรูปสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) สำหรับแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งมีลักษณะเป็นดังภาพประกอบ 15 ทั้งนี้การแบ่งกริดของแบบจำลองทั้งสองแบบใช้การแบ่งกริดเชิงโครงสร้างปกติ (Structured grid) แบบ Map scheme เพื่อความสะดวกในการสร้างกริดและหลีกเลี่ยงการแบ่งกริดक्रमแนวน้ำซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการกำหนดค่าเริ่มต้นของสัดส่วนปริมาตรในแบบจำลอง VOF

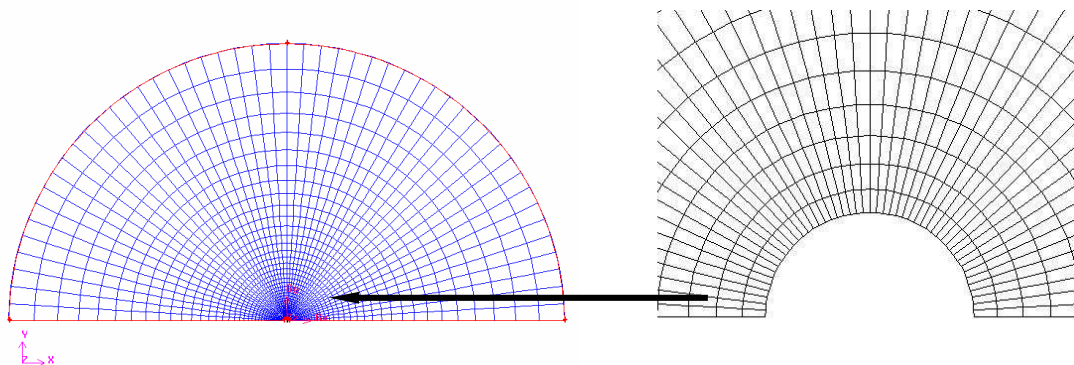


ภาพประกอบ 15 รูปร่างปริมาตรควบคุม

3.4.1 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

โดเมนของแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลมถูกแบ่งกริดด้วยรูปสี่เหลี่ยมแบบโครงสร้างปกติ โดยกริดจะมีความละเอียดมากที่บริเวณใกล้ผิวทรงกลมและค่อย ๆ หยาบมากขึ้น

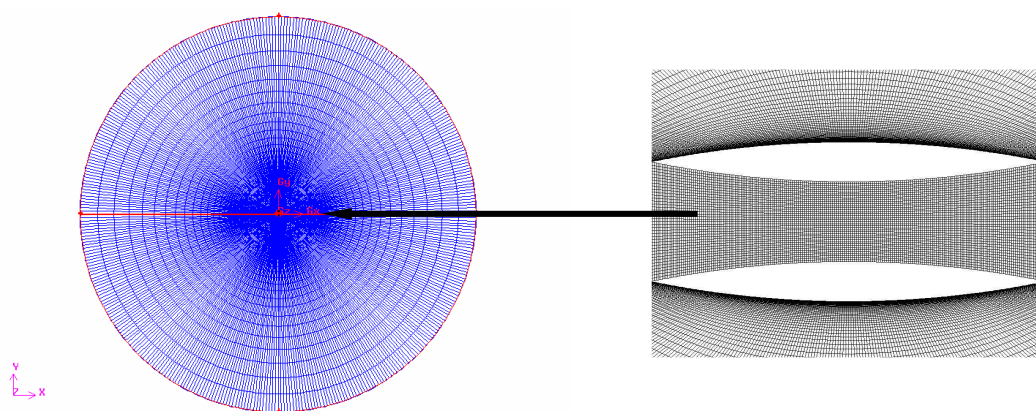
เมื่อห่างจากทรงกลมออกไปโดยการเพิ่มขนาดของกริดด้วยอัตรา Successive ratio เท่ากับ 1.1 ดังภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

3.4.2 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ

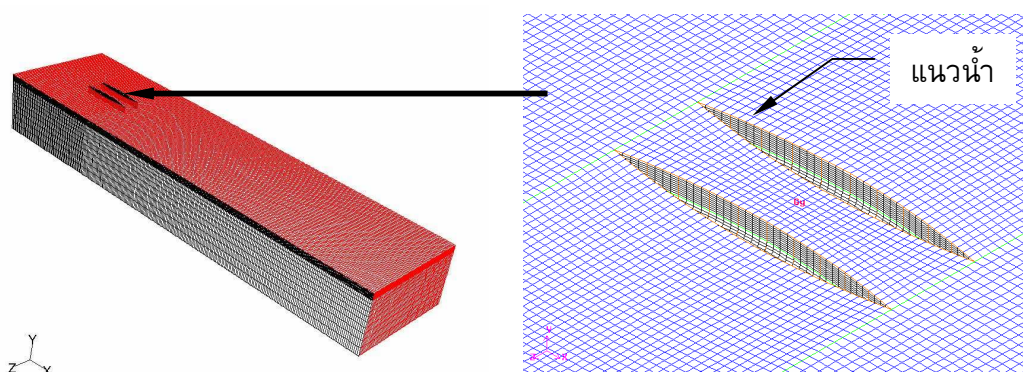
โดเมนของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ ถูกแบ่งกริดด้วยรูปสี่เหลี่ยมแบบโครงสร้างปกติ โดยกริดมีความละเอียดมากบริเวณตัวเรือ โดยการแบ่งลำตัวเรือเป็น 200 ส่วน จากนั้นให้กริดค่อย ๆ หยาบขึ้นเมื่อห่างออกไปจากตัวเรือโดยการเพิ่มขนาดของกริดด้วยอัตรา Successive ratio เท่ากับ 1.1 ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ

3.4.3 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ

โดเมนของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ ถูกแบ่งกริดด้วยรูปทรงหกหน้าแบบ โครงสร้างปกติ ดังภาพประกอบ 18 โดยกริดบริเวณสูงและต่ำกว่าแนวน้ำ 0.1125 เมตร มีความละเอียดมากที่สุด ด้วยการแบ่งเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กันในแนวดิ่งและแบ่งเป็น 200 ส่วนเท่า ๆ กันตามลำตัวเรือในแนวระนาบ ทำให้แต่ละระดับน้ำมีความละเอียดเท่ากัน เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดคลื่นซึ่งต้องการศึกษา จากนั้นให้ขนาดของกริดค่อย ๆ หยาบขึ้นเมื่อต่ำลงไปจากท้องเรือโดยการเพิ่มขนาดของกริดด้วยอัตราส่วน Successive ration เท่ากับ 1.1

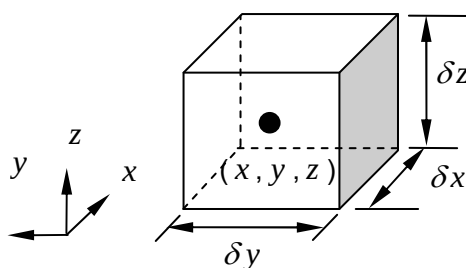


ภาพประกอบ 18 การแบ่งกริดของแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ

3.5 สมการพื้นฐาน

3.5.1 สมการบังคับการไหล (Governing Equations)

พิจารณาปริมาตรของไหลขนาดเล็กมาก ๆ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ปริมาตรของไหลขนาดเล็ก

เมื่อกำหนดให้การไหลรอบตัวเรือเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและมีสมบัติการไหลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ดังนั้นสมการบังคับการไหลในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) สำหรับปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ จะประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการโมเมนตัมหรือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

เมื่อเวกเตอร์ความเร็ว $\mathbf{u} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ จะได้สมการความต่อเนื่องเป็น

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.3)$$

และ สมการนาเวียร์ - สโตกส์;

โมเมนตัมในแนวแกน x ;
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \quad (3.4 \text{ ก})$$

โมเมนตัมในแนวแกน y ;
$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) \quad (3.4 \text{ ข})$$

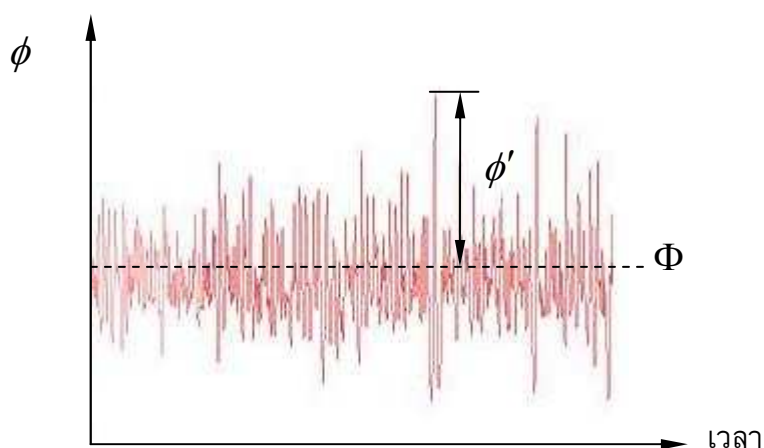
โมเมนตัมในแนวแกน z ;
$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{w} \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{w}) - \rho g \quad (3.4 \text{ ค})$$

เมื่อ p เป็นความดันสถิต(P) และ g เป็นความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

3.5.2 สมการการไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน วิธีค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ส (Reynolds average) กำหนดให้สมบัติการไหล ณ เวลาใด ๆ (ϕ) ประกอบด้วย ส่วนค่าเฉลี่ย (Mean component, Φ) และส่วนความปั่นป่วนที่แปรผันตามเวลา (Fluctuating component, ϕ') ดังภาพประกอบ 20 โดยความสัมพันธ์ของสมบัติการไหลสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\phi = \Phi + \phi' \quad (3.5)$$



ภาพประกอบ 20 สมบัติการไหลแบบปั่นป่วน

แทน ϕ ในสมการ (3.5) ด้วยความดันและความเร็วจะได้

ความดัน;
$$p = P + p' \quad (3.6)$$

ความเร็ว;
$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' \quad (3.7)$$

ซึ่งมีส่วนประกอบความเร็ว ดังนี้

แนวแกน x;
$$u = U + u' \quad (3.7 \text{ ก})$$

แนวแกน y;
$$v = V + v' \quad (3.7 \text{ ข})$$

แนวแกน z;
$$w = W + w' \quad (3.7 \text{ ค})$$

เมื่อแทน (3.6) ใน (3.3) จะได้สมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลเฉลี่ย เป็น

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3.8)$$

แทน (3.6) และ (3.7) ในสมการ (3.4 ก) - (3.4 ค) จะได้สมการเรย์โนลด์ส์ (Reynolds equation) หรือ สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ส์นาเวียร์ - สโตกส์ (Reynolds - Averaged Navier - Stokes equation หรือ RANS) ดังนี้

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(U) + \nabla \cdot (\rho U \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot [\mu(\nabla U)] + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \quad (3.9 \text{ ก})$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(V) + \nabla \cdot (\rho V \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot [\mu(\nabla V)] + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{v'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \quad (3.9 \text{ ข})$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(W) + \nabla \cdot (\rho W \mathbf{U}) = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot [\mu(\nabla W)] \\ & + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{w'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{w'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'w'})}{\partial z} \right] - \rho g \end{aligned} \quad (3.9 \text{ ค})$$

ทั้งนี้พจน์ความเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds stresses) $(-\rho \overline{u'u'})$, $(\rho \overline{u'v'})$, $(\rho \overline{u'w'})$, $(\rho \overline{v'v'})$, $(\rho \overline{v'w'})$ และ $(\rho \overline{w'w'})$ สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ในพิกัดคาร์เทเซียน (Cartesian tensor) $\rho \overline{u'_i u'_j}$ โดยให้ i และ j มีค่าเป็น 1, 2 หรือ 3 ดังนี้

- i หรือ $j = 1$ เป็นความเร็วตามแกน x
- i หรือ $j = 2$ เป็นความเร็วตามแกน y
- i หรือ $j = 3$ เป็นความเร็วตามแกน z

สมมติฐานบาสซิเนสก์ (Boussinesq hypothesis) แสดงความเค้นเรย์โนลด์สในรูปของความเร็วเฉลี่ย ดังนี้

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.10)$$

เมื่อ μ_t เป็นความหนืดของความปั่นป่วน (Turbulent viscosity) และ k เป็นพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy) โดยสามารถคำนวณหาค่า μ_t และ k ได้จากการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งในงานวิจัยจะได้ทำการศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ สำหรับนำไปใช้กับแบบจำลองการไหลขั้นต่อไป

3.5.3 แบบจำลอง $k-\varepsilon$

ในแบบจำลอง $k-\varepsilon$ นี้ เมื่อให้ ε เป็น อัตราการสลายตัว (Dissipation rate) และ C_μ เป็นค่าคงที่ จะสามารถหาค่า μ_t ในสมการ (3.10) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

โดยสมการ Transportation equation สำหรับ k และ ε เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.13)$$

เมื่อ G_k เป็นการเกิดพลังงานจลน์เนื่องจากความชันเฉลี่ยของความเร็ว ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการตามสมมติฐานเบาสซิเนสค์ได้ดังนี้

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.13 ก)$$

เมื่อ S เป็นเทนเซอร์อัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean rate of strain tensor) ซึ่งหาได้จาก

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.13 ข)$$

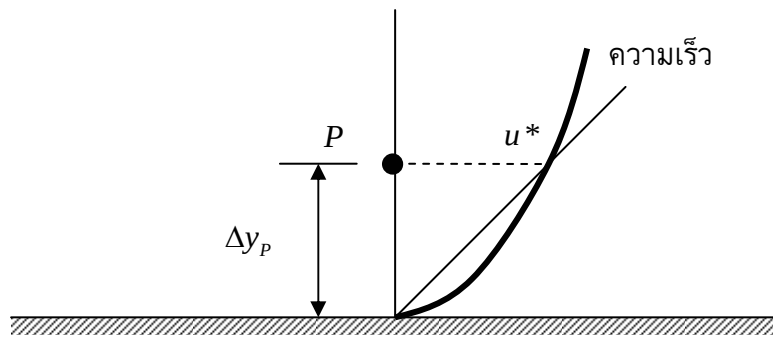
ในงานวิจัยนี้ ให้ค่าคงที่ต่าง ๆ มีค่าดังนี้ $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ และ $\sigma_\varepsilon = 1.3$ (Versteeg HK; & Malalasekera W. 1995)

ค่าแรงเฉือน (Shear force หรือ F_s) ที่ผนังของปริมาตรควบคุมสามารถคำนวณหาค่าได้ตามย่านการไหล ดังนี้

- ย่านการไหลแบบราบเรียบในชั้นซับลัมินาร์ (Laminar sub – layer);

$$F_s = -\tau_w A_{cell} = -\mu \frac{u^*}{\Delta y_p} A_{cell} \quad (3.14)$$

เมื่อตัวแปรต่าง ๆ ใน (3.14) หาค่าได้ตามภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ตัวแปรสำหรับการไหลแบบราบเรียบในชั้นขีดผิว

- ย่านการไหลแบบปั่นป่วน;

$$F_s = -\tau_w A_{cell} = -\left(\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \frac{u^*}{u^+}\right) A_{cell} \quad (3.15)$$

เมื่อ u^* เป็นความเร็วที่จุดต่อ และ A_{cell} เป็นพื้นที่บริเวณหนึ่งของปริมาตรควบคุม

3.5.4 แบบจำลอง $k-\omega$

ในแบบจำลอง $k-\omega$ นี้ เมื่อให้ ω เป็นอัตราการสลายตัวจำเพาะ (Specific dissipation rate) จะสามารถหาค่า μ_t ในสมการ (3.10) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.16)$$

เนื่องจากการไหลในงานวิจัยนี้เลขเรย์โนลด์ส์มีค่าสูงมาก จึงให้สัมประสิทธิ์ $\alpha^* = 1$ (Versteeg; & Malalasekera. 1995)

สมการ Transportation equation ของ $k - \omega$ มีรูปเป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (3.18)$$

เมื่อ G_ω เป็นการเกิดอัตราการสลายตัวจำเพาะ, Γ_k เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของ k , Γ_ω เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ω , Y_k เป็นการสลายตัวของ k เนื่องจากการไหลปั่นป่วน และ Y_ω เป็นการสลายตัวของ ω เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{แบบจำลอง } \Gamma_k; \quad \Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.19)$$

$$\text{แบบจำลอง } \Gamma_\omega; \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.20)$$

เมื่อ σ_k และ σ_ω เป็นเลขพรานด์ (Prandtl number) สำหรับ k และ ω ตามลำดับ

$$\text{แบบจำลอง } G_k; \quad G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.21)$$

$$\text{แบบจำลอง } G_\omega; \quad G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (3.22)$$

โดยให้ $\alpha = 1$ เนื่องจากการไหลในงานวิจัยนี้เลขเรย์โนลด์ส์มีค่าสูงมาก (Versteeg; & Malalasekera. 1995)

$$\text{แบบจำลอง } Y_k; \quad Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (3.23)$$

$$\text{เมื่อ} \quad f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & x_k \leq 0 \\ \frac{1+680x_k^2}{1+400x_k^2} & x_k > 0 \end{cases} \quad \text{และ} \quad x_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

เนื่องจากการไหลในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ที่มีเลขเรย์โนลด์ส์สูงมาก ดังนั้นจึงให้ $\beta^* = \beta_i^* = \beta_\infty^* = 0.09$ (Versteeg; & Malalasekera. 1995)

$$\text{แบบจำลอง } Y_\omega; \quad Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (3.24)$$

$$\text{เมื่อ} \quad f_\beta = \frac{1+70x_\omega}{1+80x_\omega} \quad (3.25 \text{ ก})$$

$$x_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \right| \quad (3.25 \text{ ข})$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.25 \text{ ค})$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.25 \text{ ง})$$

$$\text{และ} \quad \beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right] \quad (3.25 \text{ จ})$$

เมื่อ $F(M_t)$ เป็นการปรับแก้ฟังก์ชันค่าการอัดตัวได้ (Compressibility) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases}$$

เมื่อ $M_t^2 = \frac{2k}{a^2} \quad \text{และ} \quad a = \sqrt{\gamma RT}$

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $M_{t0} = 0.25$, $\zeta^* = 1.5$, $\sigma_k = 2.0$ และ $\sigma_\omega = 2.0$ (Versteeg; & Malalasekera. 1995)

ค่า ω บริเวณผนัง (ω_w) สามารถการประมาณค่าได้จากสมการ

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (3.26)$$

โดย ω^+ มีค่าขึ้นอยู่กับย่านการไหล ดังนี้

- ย่านการไหลแบบราบเรียบในชั้นขีดผิว;

$$\omega^+ = \min \left(\omega_w^+, \frac{6}{\beta_\infty^* (y^+)^2} \right) \quad (3.27)$$

เมื่อ $\omega_w^+ = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^+} & k_s^+ \geq 25 \end{cases}$ และ $k_s^+ = \max\left(1.0, \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right)$

- ย่านการไหลแบบปั่นป่วน;

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+} \quad (3.28)$$

ดังนั้นที่ผนังของแต่ละเซลล์;

$$\omega = \frac{u^*}{\sqrt{\beta_\infty^*} ky} \quad (3.29)$$

3.6 การดิสครีไทเซชัน (Discretization)

การดิสครีไทเซชันเป็นการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่มีความต่อเนื่องไปเป็นสมการพีชคณิตที่ไม่มีความต่อเนื่องซึ่งอยู่ในรูปการบวก ลบ คูณ หาร เพื่อให้สามารถหาผลเฉลยได้สะดวกขึ้น

จากสมการ (3.3) และ (3.4 ก) - (3.4 ค) สามารถเขียนสมการ Transportation equation ของสมบัติการไหล ϕ ได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_A + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{u})}_B = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_C + \underbrace{S_\phi}_D \quad (3.30)$$

เมื่อ Γ เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่, S_ϕ เป็นแหล่งกำเนิดของ ϕ และ $\nabla \phi$ เป็นความชันของ ϕ

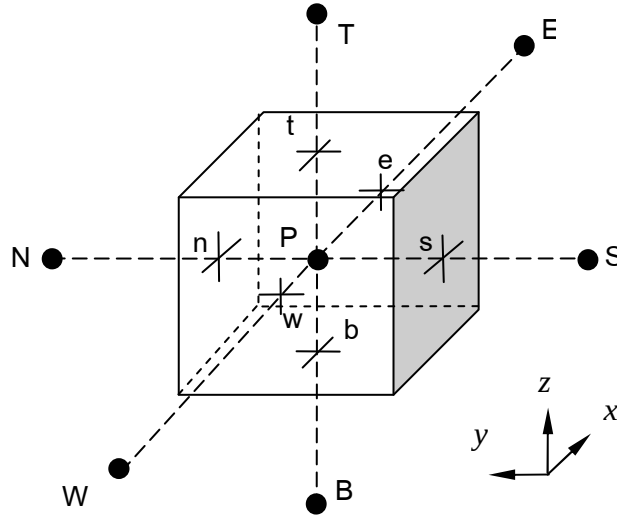
ทั้งนี้แต่ละพจน์แสดงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการไหลเนื่องจากลักษณะการถ่ายทอดต่าง ๆ ดังนี้ A เป็นพจน์อัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate of change), B เป็นพจน์การพา (Convection), C เป็นพจน์การแพร่ (Diffusion) และ D เป็นพจน์แหล่งกำเนิด (Source)

ทั้งนี้สำหรับปริมาตรควบคุม (CV) ที่มีพื้นที่ผิว A จะสามารถแสดงปริพันธ์ของสมการ (3.30) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \int_{CV} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) dt \right) dV + \int_{\Delta t}^{t+\Delta t} \left(\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dA \right) dt \\
&= \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_{CV} S_\phi dV \right) dt \quad (3.31)
\end{aligned}$$

3.6.1 สมการดิสครีไทเซชันของพจน์การแพร่และแหล่งกำเนิด

พิจารณาปริมาตรควบคุมใด ๆ ที่มี P เป็นจุดต่อ และ N, S, W, E, T และ B เป็นจุดต่อของปริมาตรควบคุมใกล้เคียงทั้งหกด้านรอบตัว และ n, s, w, e, t และ b เป็นผนังของปริมาตรควบคุมทั้งหกด้าน ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 ปริมาตรควบคุมและจุดต่อ

ที่สภาวะสถานะคงตัว ปริพันธ์ของพจน์การแพร่และพจน์แหล่งกำเนิดในสมการ (3.31) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการดิสครีไทเซชัน เมื่อ $\bar{S}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแหล่งกำเนิดได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \\
& + \left[\Gamma_t A_t \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t - \Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b \right] + \bar{S} \Delta V \quad (3.32)
\end{aligned}$$

ใช้การประมาณค่าวิธีผลต่างกลางอันดับที่สอง (Second - order central - difference scheme) สำหรับพจน์ $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ ที่หนึ่งปริมาตรควบคุมแต่ละด้าน ดังนั้นพจน์ (3.32) จะเป็น

$$\begin{aligned} & \left[\Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x} - \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x} \right] \\ & + \left[\Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y} - \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y} \right] \\ & + \left[\Gamma_t A_t \frac{(\phi_T - \phi_P)}{\delta z} - \Gamma_b A_b \frac{(\phi_P - \phi_B)}{\delta z} \right] + S_u + S_p \phi_P \quad (3.33) \end{aligned}$$

เมื่อ $\phi_P, \phi_W, \phi_E, \phi_N, \phi_S, \phi_T$ และ ϕ_B เป็นสมบัติการไหลที่จุดต่อ ซึ่งเมื่อแทนค่าฟลักซ์ของการแพร่ (Diffusive flux หรือ D_{face}) ในพจน์ (3.33) ด้วย $D_{face} = \left(\frac{\Gamma A}{\delta x} \right)_{face}$ จะได้

$$\begin{aligned} & [D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)] \\ & + [D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S)] \\ & + [D_t (\phi_T - \phi_P) - D_b (\phi_P - \phi_B)] + S_u + S_p \phi_P \quad (3.34) \end{aligned}$$

3.6.2 สมการดิสกรีไทเซชันของพจน์การพา

ที่สถานะคงตัว ปริพันธ์ของพจน์การพาในสมการ (3.31) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการดิสกรีไทเซชัน ได้ดังนี้

$$[(\rho \phi A u)_e - (\rho \phi A u)_w] + [(\rho \phi A v)_n - (\rho \phi A v)_s] + [(\rho \phi A w)_t - (\rho \phi A w)_b] \quad (3.35)$$

แทนค่าฟลักซ์การพา (Convection flux) ด้วย $F_{face} = (\rho u A)_{face}$ ในพจน์ (3.35) จะได้

$$[(F_e \phi_e) - (F_w \phi_w)] + [(F_n \phi_n) - (F_s \phi_s)] + [(F_t \phi_t) - (F_b \phi_b)] \quad (3.36)$$

ทั้งนี้สมมติการไหลที่ผนังของปริมาตรควบคุม $\phi_w, \phi_e, \phi_n, \phi_s, \phi_t$ และ ϕ_b ในสมการ (3.36) สามารถคำนวณหาค่าได้ด้วยวิธีประมาณค่าหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีประมาณค่าแบบ QUICK ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพัฒนามาให้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับแบบจำลอง VOF

3.6.3 สมการดิสครีไทเซชันของพจน์อัตราการเปลี่ยนแปลง

จากปริพันธ์ของพจน์อัตราการเปลี่ยนแปลงในสมการ (3.31) ใช้การประมาณค่าวิธีผลต่างย้อนหลังอันดับที่หนึ่ง (First – order backward difference scheme) ซึ่งให้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) = \frac{(\rho\phi)_P - (\rho\phi)_P^0}{\Delta t} \quad (3.37)$$

เมื่อ a_P^0 เป็นสัมประสิทธิ์ที่เวลา t และ a_{node} เป็นสัมประสิทธิ์ที่เวลา $t + \Delta t$ ดังนั้นที่จุด P จะได้สมการดิสครีไทเซชันสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

$$\int_{CV} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dt \right) dV = (\rho\phi_P - \rho\phi_P^0) \Delta V \quad (3.38)$$

สำหรับสมการดิสครีไทเซชันของปริพันธ์ของพจน์การพา, การแพร่ และแหล่งกำเนิดเทียบกับเวลา สามารถแสดงในรูปทั่วไปได้โดยใช้ค่าสมมติการไหลที่เวลา $t + \Delta t$ เรียกว่าการหาปริพันธ์เชิงปริยาย (Implicit time integration) ดังนี้

$$\int_t^{t+\Delta t} f(\phi) dt = [f(\phi)]^{t+\Delta t} \Delta t \quad (3.39)$$

เมื่อรวมสมการดิสครีไทเซชัน (3.34), (3.36), (3.38) และ (3.39) ดังนั้นสมการ (3.31) จะสามารถแปลงเป็นสมการดิสครีไทเซชันซึ่งมีรูปทั่วไปได้ ดังนี้

$$a_P \phi_P = a_P^0 \phi_P^0 + a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_B \phi_B + a_T \phi_T + S_u \quad (3.40)$$

เมื่อ

$$a_P = a_P^0 + a_W + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T + \Delta F - S_P$$

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta V}{\Delta t}$$

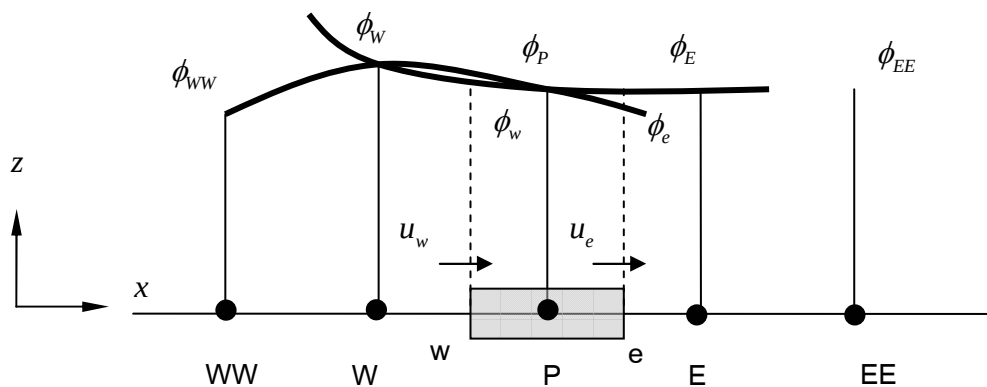
และ $\bar{S}\Delta V = S_u + S_p\phi_p$

เมื่อ ΔF เป็นผลต่างของสัมประสิทธิ์การพา ทั้งนี้สัมประสิทธิ์ a สามารถหาค่าได้จากวิธีประมาณค่าในช่วง (Interpolation) แบบต่าง ๆ ดังจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

3.7 วิธีประมาณค่าของสมการดิสครีไทเซชัน

3.7.1 วิธีประมาณค่าแบบ QUICK

พจน์การพาในสมการดิสครีไทเซชันในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีประมาณค่าแบบ QUICK หรือ Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics เนื่องจากเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้กับแบบจำลอง VOF และให้ผลที่ดีกว่าวิธีประมาณค่าด้วยวิธีผลต่างต้นลม (Upwind scheme) สำหรับสมบัตการไหลอื่น ๆ เมื่อแบบจำลองเป็นรูปทรงหกหน้า โดยสมบัตการไหลที่ผนังของปริมาตรควบคุมถูกคำนวณหาจากฟังก์ชันกำลังสองที่ผ่านระหว่างจุดต่อทั้งสองด้านของผนังและจุดต่อที่อยู่ต้นลม ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 วิธีประมาณค่าแบบ QUICK

สำหรับปริมาตรควบคุมแบบ 1 มิติ สามารถหาค่าสมบัตการไหล ณ จุดต่อได้จากสมการดิสครีไทเซชันต่อไปนี้

$$a_p\phi_p = a_w\phi_w + a_e\phi_e + a_{ww}\phi_{ww} + a_{ee}\phi_{ee} \quad (3.41)$$

เมื่อ

$$a_p = a_w + a_e + a_{ww} + a_{ee} + (F_e - F_w)$$

$$a_w = D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e + \frac{3}{8}(1-\alpha_w)F_w$$

$$a_e = D_e - \frac{3}{8}\alpha_e F_e - \frac{6}{8}(1-\alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1-\alpha_w)F_w$$

$$a_{ww} = -\frac{1}{8}\alpha_w F_w$$

และ

$$a_{ee} = \frac{1}{8}(1-\alpha_e)F_e$$

โดย

$$\alpha_w = 1 \text{ เมื่อ } F_w > 0 \quad \text{และ} \quad \alpha_w = 0 \text{ เมื่อ } F_w < 0$$

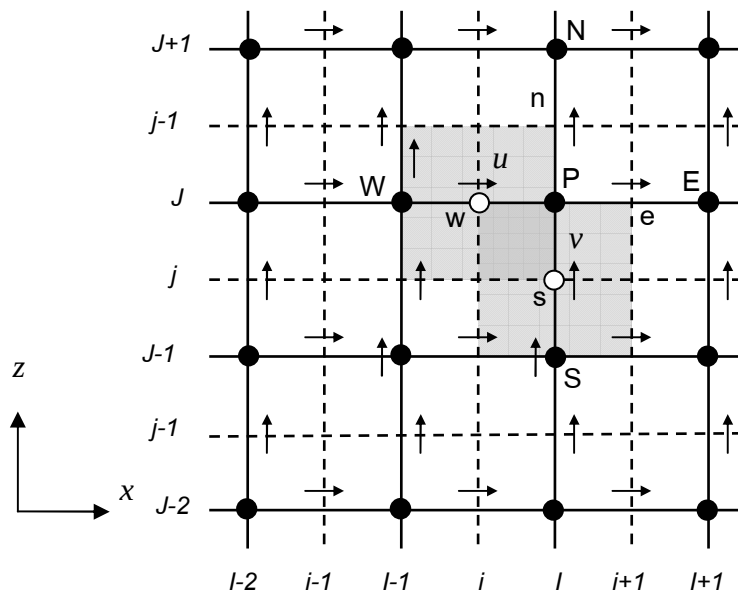
หรือ

$$\alpha_e = 1 \text{ เมื่อ } F_e > 0 \quad \text{และ} \quad \alpha_e = 0 \text{ เมื่อ } F_e < 0$$

3.7.2 วิธีประมาณค่าแบบ PRESTO!

เนื่องจากระเบียบวิธี FVM เก็บค่าของสมบัติการไหลต่าง ๆ ไว้ที่จุดต่อ ประกอบกับลักษณะการไหลรอบตัวเรือมีความโค้งมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ การหาผลเฉลยความเร็วในแนวแกนต่าง ๆ ในสมการโมเมนตัมจะประมาณค่าความดันที่ผนังของปริมาตรควบคุมด้วยวิธีประมาณค่าในช่วง (Interpolation) ด้วยวิธีประมาณค่าแบบ PRESTO! หรือ Pressure Staggering Option ซึ่งเป็นวิธีประมาณค่าที่ออกแบบมาสำหรับการไหลที่มีความโค้งมากซึ่งสอดคล้องกับการไหลผ่านตัวเรือ

ในวิธี PRESTO! นี้ ปริมาตรควบคุมในแต่ละแนวแกนจะถูกสร้างเหลี่ยมออกมาจากปริมาตรควบคุมปกติ เรียกว่า กริดแบบเหลื่อม (Staggered grid) ดังภาพประกอบ 24 ซึ่งในวิธีนี้เมื่อกริดถูกสร้างล้อมรอบผนังของปริมาตรควบคุมเดิม ความดันจะถูกคำนวณหาค่าที่จุดต่อปกติแต่ความเร็วจะถูกคำนวณหาค่าที่ผนังของปริมาตรควบคุม



ภาพประกอบ 24 กริดแบบเหลี่ยม

จากภาพประกอบ 24 จุดต่อที่เก็บค่าความดัน (p) จะอยู่บนผนังของปริมาตรควบคุม ดังนั้นความชันของความดันเพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วในแนวแกนต่าง ๆ สามารถหาได้ ดังนี้

ความเร็ว u ;
$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_P - p_W}{\delta x_u} \quad (3.42)$$

ความเร็ว v ;
$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_P - p_S}{\delta y_v} \quad (3.43)$$

และในลักษณะเดียวกันสำหรับปริมาตรควบคุม 3 มิติ จะได้

ความเร็ว w ;
$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_P - p_T}{\delta z_w} \quad (3.44)$$

เมื่อ δx_u , δy_v และ δz_w เป็นความกว้างของปริมาตรควบคุมสำหรับความเร็ว u , v และ w ตามลำดับ

3.8 แบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of Fluid, VOF)

ในแบบจำลอง 3 มิติ ใช้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวน้ำ โดยโดเมนของแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรย่อย ๆ เรียกว่าปริมาตรควบคุม โดยผลเฉลยของสมบัติการไหลของน้ำและอากาศในแต่ละปริมาตรควบคุม จะถูกคำนวณหาผลเฉลยของชุดสมการเพียงชุดเดียวสำหรับทั้งน้ำและอากาศ จากนั้นจะใช้สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของ น้ำ หรือ อากาศ ในปริมาตรควบคุมนั้น ๆ มาคำนวณหาสมบัติการไหลของทั้งน้ำและอากาศที่ต้องการ ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยตามสัดส่วนปริมาตรของน้ำหรืออากาศในปริมาตรควบคุมนั้น ๆ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ อากาศ เป็นเฟสปฐมภูมิ (Primary phase) และ น้ำ เป็นเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase)

3.8.1 สมการสัดส่วนปริมาตร (Volume Fraction Equation)

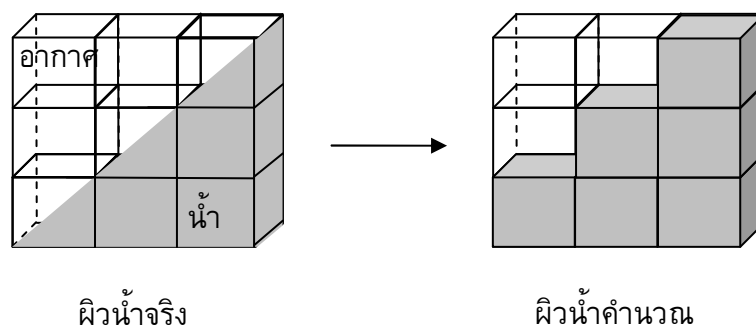
สัดส่วนปริมาตรของน้ำ (α_{water}) ในปริมาตรควบคุมใด ๆ สามารถหาได้จากสมการความต่อเนื่องของสัดส่วนปริมาตร ดังนี้

$$\frac{\partial \alpha_{water}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_{water} = 0 \quad (3.45)$$

โดยสัดส่วนปริมาตรอากาศ (α_{air}) จะคำนวณภายใต้เงื่อนไขควบคุมต่อไปนี้

$$\alpha_{water} + \alpha_{air} = 1 \quad (3.46)$$

ทั้งนี้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme จะให้ปริมาตรควบคุมหนึ่งมีเพียงน้ำหรืออากาศอยู่ภายในปริมาตรควบคุมนั้น ๆ เท่านั้น กล่าวคือในแต่ละปริมาตรควบคุมค่าสัดส่วนปริมาตรจะเป็น $\alpha_{water} = 0$ หรือ $\alpha_{water} = 1$ เท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme

3.8.2 สมบัติการไหล (Flow Properties)

การหาผลเฉลยของสมการของสมบัติการไหลสำหรับน้ำและอากาศตลอดทั้งโดเมนในงานวิจัยนี้ใช้สมบัติการไหลที่หาได้จากการคำนวณร่วมกัน ได้แก่ k , ε และ ω ในสมการ Transportation equation ของการไหลแบบปั่นป่วน และสนามความเร็วในสมการ RANS แต่สมบัติการไหลจะมีค่าเป็นไปตามสัดส่วนปริมาตรของน้ำและอากาศในปริมาตรควบคุมนั้น

ในการวิจัยนี้จะทำการติดตามเฟสทุติยภูมิซึ่งคือน้ำ ดังนั้นในแต่ละปริมาตรควบคุมสมบัติการไหล ϕ สำหรับน้ำและอากาศ สามารถคำนวณหาค่าได้ตามสมการ ดังนี้

$$\phi = \alpha_{water} \phi_{water} + (1 - \alpha_{water}) \phi_{air} \quad (3.47)$$

เมื่อ ϕ_{water} เป็นสมบัติการไหลของน้ำ และ ϕ_{air} เป็นสมบัติการไหลของอากาศ

3.8.3 การประมาณค่าในช่วงบริเวณรอยต่อของน้ำและอากาศ

ฟลักซ์ของปริมาตรควบคุมในโดเมนทั้งหมดรวมทั้งบริเวณรอยต่อของน้ำและอากาศสามารถหาค่าได้โดยการประมาณค่าในช่วงด้วยวิธีผลต่างอันตะ (Finite difference) ดังสมการ (3.48) และหาผลเฉลยของสมการเชิงขนสั่งด้วยวิธีทำซ้ำ (Iteration) สำหรับแต่ละสัดส่วนปริมาตรของน้ำในแต่ละชั้นเวลา

$$\frac{\alpha_{water}^{n+1} - \alpha_{water}^n}{\Delta t} V + \sum_f (U_f^{n+1} \alpha_{water,f}^{n+1}) = 0 \quad (3.48)$$

เมื่อ $n+1$ เป็นดัชนีของชั้นเวลาปัจจุบัน, n เป็นดัชนีของชั้นเวลาที่ผ่านมา, $\alpha_{water,f}$ เป็นสัดส่วนปริมาตรของน้ำที่ผนังปริมาตรควบคุม, V เป็นปริมาตรของปริมาตรควบคุม และ U_f เป็นฟลักซ์ปริมาตรที่ผนังปริมาตรควบคุมในทิศทางตั้งฉากกับผนังนั้น

3.9 การหาผลเฉลย

เมื่อพิจารณาสมการดิสครีไทเซชันของทุกปริมาตรควบคุมในโดเมนรวมกันแล้ว ทำการจัดสมการดิสครีไทเซชันของสมการ Transportation ทั้งหมดในรูปของเมทริกซ์เบาเลขศูนย์ (Sparse matrix) ของสัมประสิทธิ์ในสมการดิสครีไทเซชัน จากนั้นหาผลเฉลยเพื่อหาค่าล่าสุดของสมบัติของการไหลที่ต้องการ โดยใช้วิธีหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method)

3.9.1 วิธีหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method)

การหาผลเฉลยวิธีเชิงตัวเลขแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method) เป็นการหาผลเฉลยของสมการกำกับการไหลและสมการสมบัติการไหลในปริมาตรควบคุมแยกออกจากกันตามลำดับ และทำการคำนวณด้วยวิธีทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลเฉลยลู่เข้า (Convergent solution) แต่ในรอบของวิธีทำซ้ำประกอบด้วยขั้นตอน ดังภาพประกอบ 26 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ก.) ปรับสมบัติการไหลใหม่โดยใช้ผลเฉลยล่าสุด ในกรณีการคำนวณครั้งแรก สมบัติการไหลจะใช้ค่าที่ตั้งไว้ในเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition)

ข.) แก้สมการโมเมนตัมสำหรับ v , u และ w ตามลำดับ โดยใช้ค่าล่าสุดของความดันและฟลักซ์ของมวลที่ผนังปริมาตรควบคุม เพื่อปรับสมบัติของสนามความเร็วใหม่

ค.) เนื่องจากความเร็วที่คำนวณได้จากขั้นตอน ข.) อาจไม่สอดคล้องกับกฎความต่อเนื่อง ณ จุดนั้น ๆ ดังนั้นในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะหาผลเฉลยของสมการแก้ไขความดัน (Pressure correction equation) เพื่อปรับแก้สนามความดัน สนามความเร็ว และฟลักซ์ของมวลที่ผนังปริมาตรควบคุมให้เป็นไปตามกฎความต่อเนื่อง ทั้งนี้สมการแก้ไขความดันหาได้จากสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมแบบเชิงเส้น

ง.) หาผลเฉลยของสมการ VOF และสมการแบบจำลองการไหลปั่นป่วน โดยใช้สมบัติการไหลล่าสุดจากขั้นตอนที่ผ่านมา

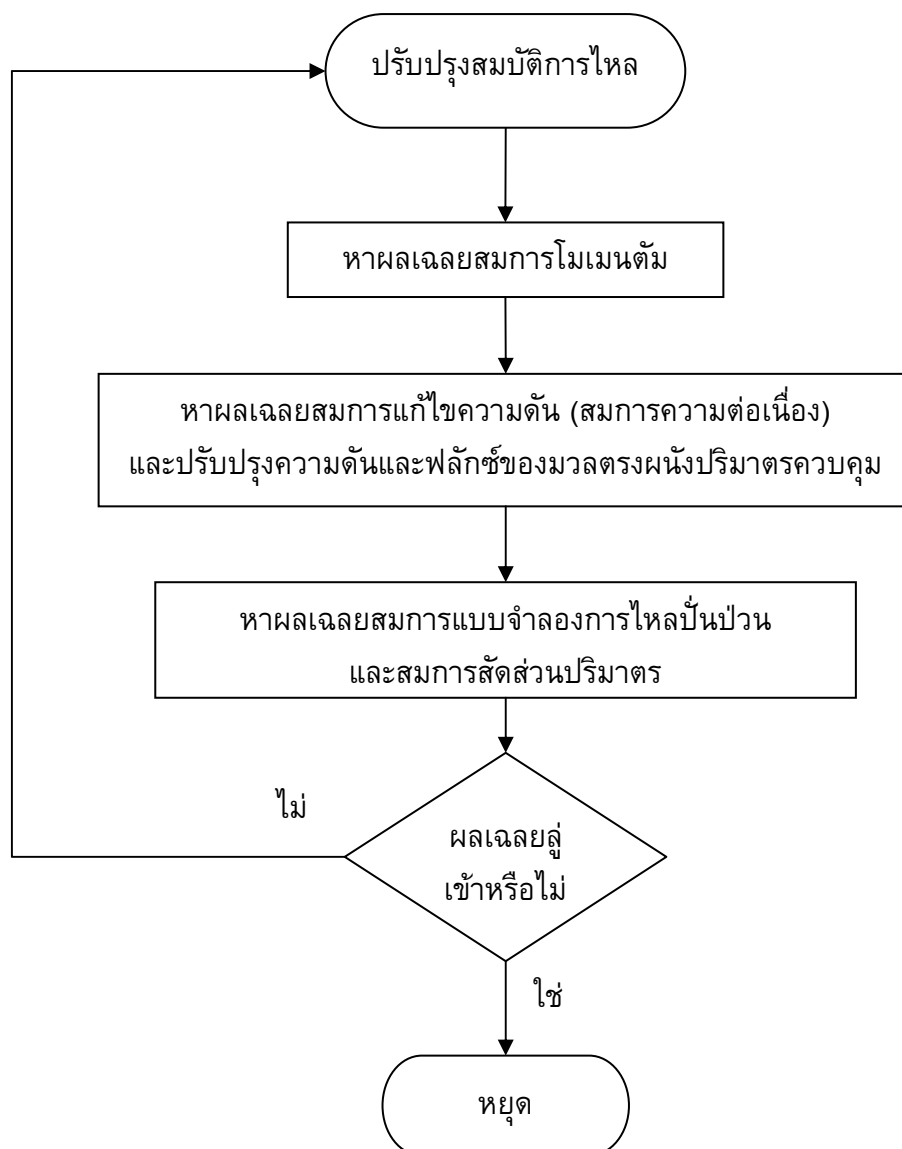
จ.) ตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย

ข.) กลับสู่ขั้นตอน ก.) และคำนวณซ้ำต่อไปจนกว่าผลเฉลยจะมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์การลู่เข้า

เนื่องจากการไหลในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ดังนั้นความหนาแน่นจึงมีค่าคงที่และไม่มีสมการเชื่อมความสัมพันธ์กับความดัน ในขณะที่ความเร็วเป็นตัวแปรที่ไม่รู้ค่าล่วงหน้า จึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงระหว่างความดันและความเร็วในสนามการไหลเพื่อให้ความเร็วที่ได้จากสมการโมเมนตัมสอดคล้องกับความเร็วที่ได้ในสมการความต่อเนื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการหาผลเฉลย 2 วิธีด้วยกันได้แก่

- วิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure - Linked Equation) เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีหาผลเฉลยมาตรฐานสำหรับการคำนวณแบบสถานะคงตัว (Steady state calculation) และ

- วิธีหาผลเฉลยแบบ PISO (Pressure – Implicit with Splitting of Operators) เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ถูกออกแบบสำหรับการคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Time dependent calculation) เพื่อหาผลเฉลยเข้าสู่สถานะคงตัวที่แต่ละขั้นเวลา (Time step)



ภาพประกอบ 26 วิธีหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา

3.9.2 วิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE

วิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE เป็นวิธีประมาณค่าและแก้ไขค่าความดันบนกริดแบบเหลี่ยมด้วยวิธีทำซ้ำ ซึ่งมีกระบวนการคำนวณดังภาพประกอบ 27 โดยเริ่มต้นการคำนวณด้วยการตั้งค่าเริ่มต้นของ ความดัน (p^*), ความเร็ว (u^*, v^*, w^*) และ สมบัติการไหล (ϕ^*) จากนั้นจะหาผลเฉลยสมการต่าง ๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 หาผลเฉลยสมการดิสครีไทเซชันของสมการโมเมนต์
- ขั้นที่ 2 หาผลเฉลยสมการแก้ไขความดัน
- ขั้นที่ 3 แก้ไขความดันและความเร็ว

- ขั้นที่ 4 หาผลเฉลยสมการดิสครีไทเซชันของสมการเชิงขงอื่น ๆ

สุดท้ายจะตรวจสอบว่าผลเฉลยมีค่าลู่เข้าหรือไม่ หากผลเฉลยยังไม่ลู่เข้าก็จะตั้งค่า $p^* = p$, $u^* = u$, $v^* = v$, $w^* = w$ และ $\phi^* = \phi$ จากนั้นจะคำนวณซ้ำใหม่อีกครั้งจนผลเฉลยลู่เข้า

3.9.3 วิธีหาผลเฉลยแบบ PISO

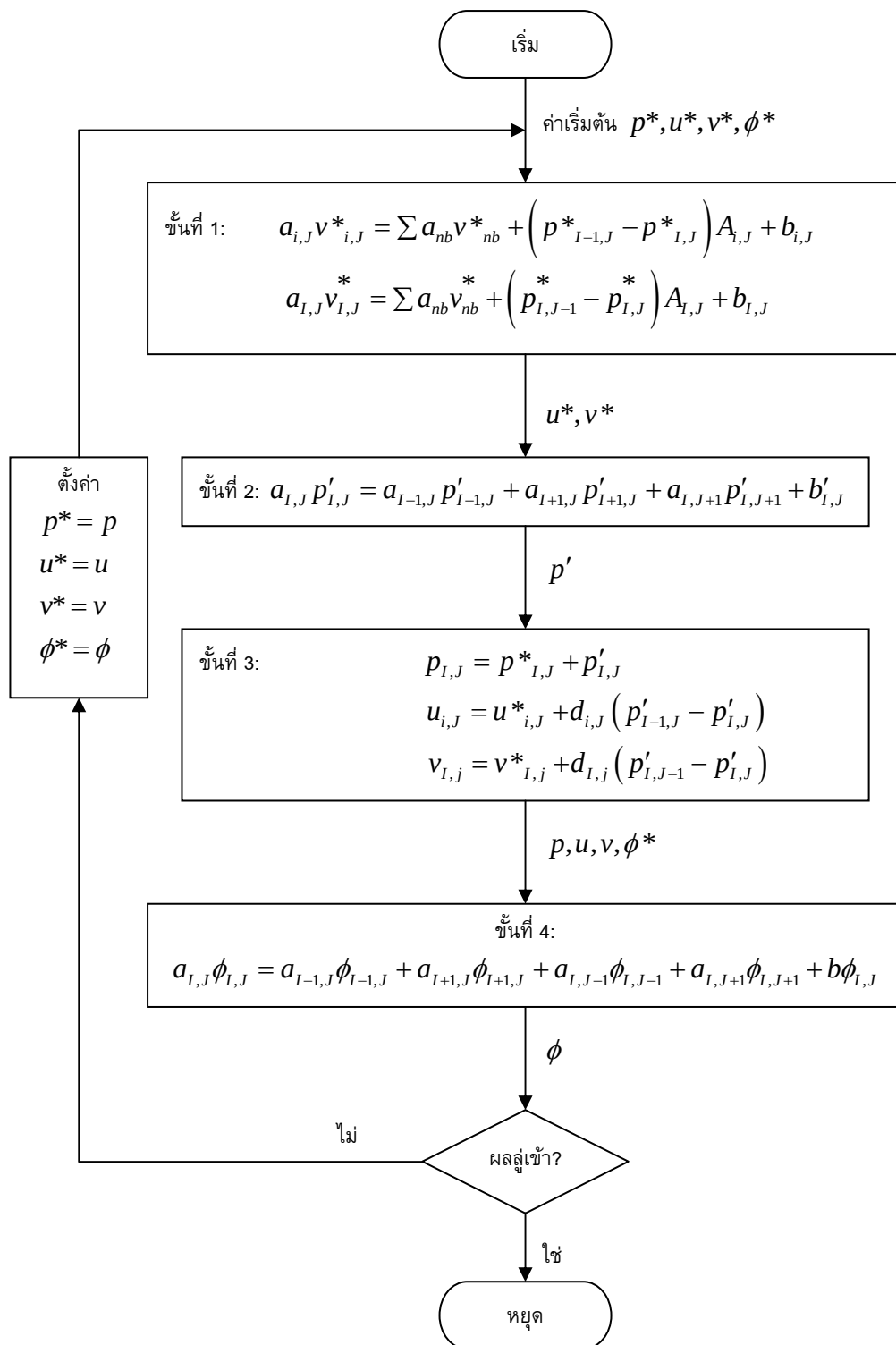
วิธีหาผลเฉลยแบบ PISO เป็นวิธีการประมาณค่าและแก้ไขค่าความดันบนกริดแบบเหลื่อมด้วยวิธีทำซ้ำ ซึ่งมีกระบวนการคำนวณ ดังภาพประกอบ 28 โดยเริ่มต้นการคำนวณด้วยการตั้งค่าเริ่มต้นของ $p^*, u^*, v^*, w^*, \phi^*$ จากนั้นจะหาผลเฉลยสมการต่าง ๆ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 หาผลเฉลยสมการดิสครีไทเซชันของสมการโมเมตัม
- ขั้นที่ 2 หาผลเฉลยสมการแก้ไขความดัน
- ขั้นที่ 3 แก้ไขความดันและความเร็ว
- ขั้นที่ 4 หาผลเฉลยสมการแก้ไขความดันครั้งที่สอง
- ขั้นที่ 5 แก้ไขความดันและความเร็ว และตั้งค่า $p = p^{***}$, $u = u^{***}$, $v = v^{***}$

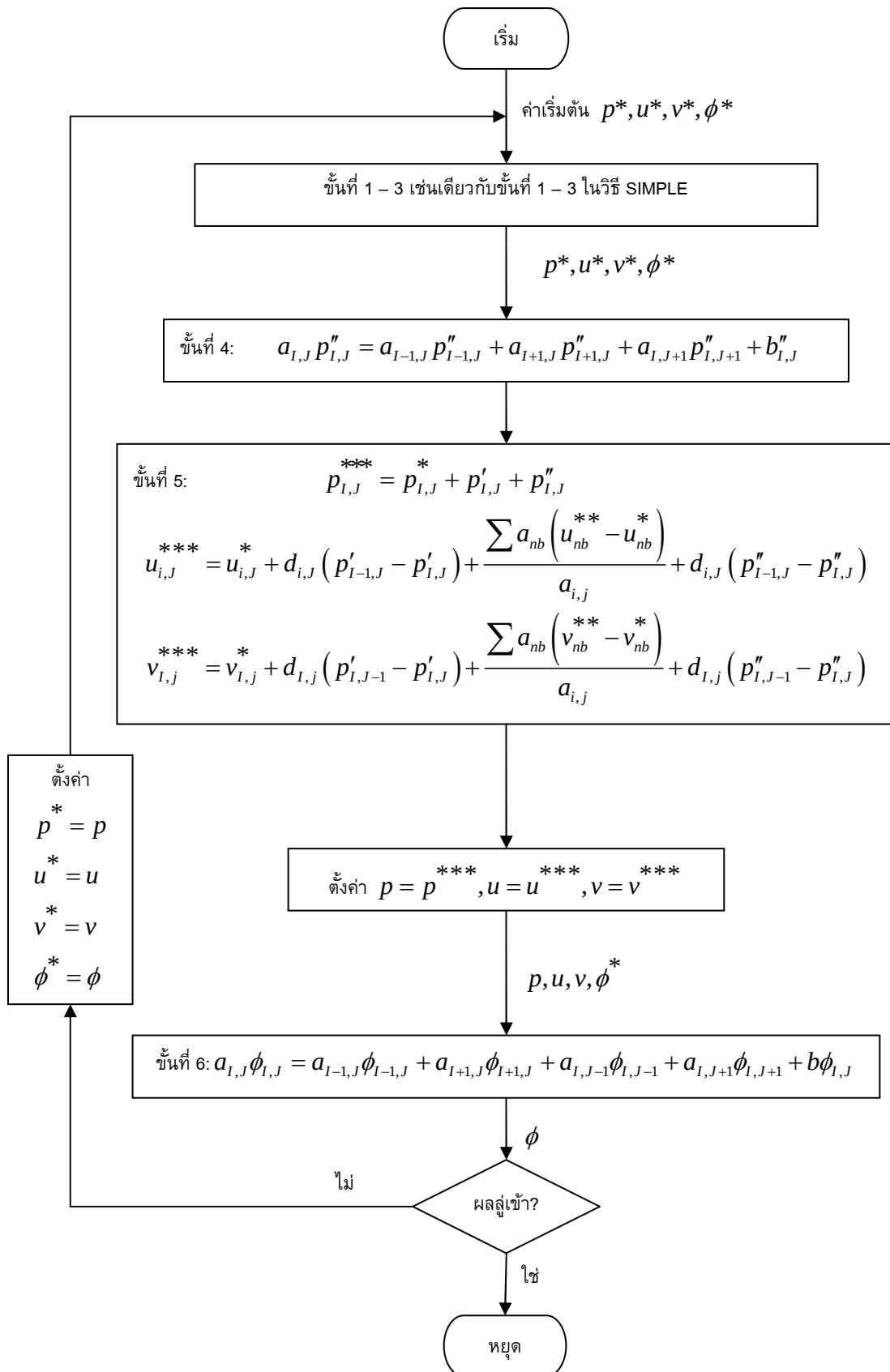
และ $w = w^{***}$

- ขั้นที่ 6 หาผลเฉลยสมการดิสครีไทเซชันของสมการเชิงขงอื่น ๆ

สุดท้ายจะตรวจสอบว่าผลเฉลยมีค่าลู่เข้าหรือไม่ ถ้าผลเฉลยไม่ลู่เข้าจะตั้งค่าต่อไปนี้ $p^* = p$, $u^* = u$, $v^* = v$, $w^* = w$ และ $\phi^* = \phi$ และคำนวณซ้ำใหม่ต่อไปเรื่อย ๆ จนผลเฉลยลู่เข้า ทั้งนี้ขั้นที่ 1 – 3 เป็นขั้นตอนเดียวกับในวิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE



ภาพประกอบ 27 วิธีหาผลเฉลยแบบ SIMPLE



ภาพประกอบ 28 วิธีหาผลเฉลยแบบ PISO

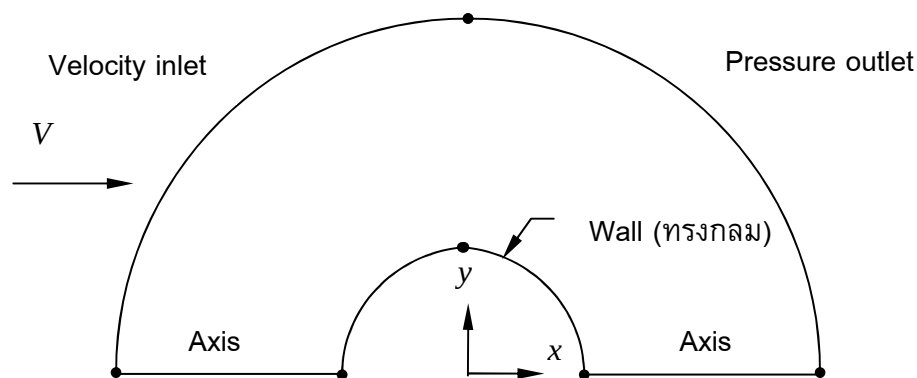
3.10 เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)

แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ จะกำหนดเงื่อนไขขอบแตกต่างกันเพื่อให้เหมาะสมต่อการศึกษานั้น ๆ จากนั้นไปจะได้กล่าวถึงเงื่อนไขขอบของแต่ละแบบจำลองและรายละเอียดของเงื่อนไขขอบแต่ละเงื่อนไขต่อไป

3.10.1 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

แบบจำลองมีเงื่อนไขขอบต้นน้ำเป็น Velocity inlet ซึ่งมีความเร็วคงที่ V , เงื่อนไขขอบปลายน้ำ เป็น Pressure outlet มีความดันบรรยากาศ $P_{gauge} = 0$, เงื่อนไขขอบผิวทรงกลมเล็กเป็น Stationary wall แบบ No slip condition มีความเร็วที่ผิวเป็นศูนย์ และเงื่อนไขขอบด้านล่างเป็น Axis สำหรับประมาณค่าสำหรับทรงกลม ดังภาพประกอบ 29

เนื่องจากเลขเรย์โนลด์ส์ที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นความยาวอ้างอิง (Re_d) แปรผันตามความเร็วและเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่แปรผกผันกับความหนืดของไหล ดังนั้นหากจำลองการไหลด้วยของไหลที่มีความหนืดน้อยจะสามารถเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) น้อยกว่า โดยเฉพาะการไหลแบบปั่นป่วน จึงให้ของไหลเป็นอากาศ



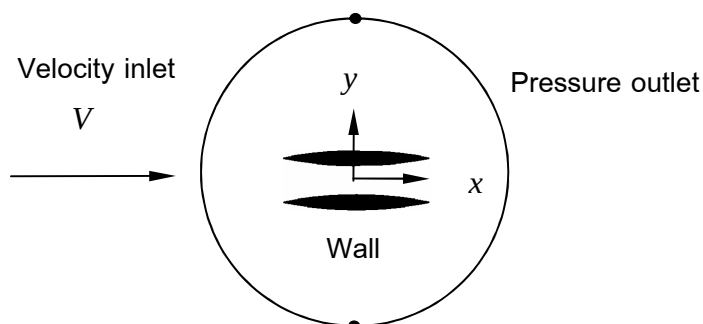
ภาพประกอบ 29 เงื่อนไขขอบแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

3.10.2 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ

แบบจำลอง 2 มิติ มีโดเมนเป็นรูปวงกลมซึ่งกำหนดให้ครึ่งวงกลมส่วนหนึ่งเป็นทางเข้าหรือต้นน้ำ (Upstream) และครึ่งวงกลมอีกด้านหนึ่งเป็นทางออกหรือปลายน้ำ (Downstream) ด้วยมีเงื่อนไขขอบต้นน้ำ แบบ Velocity inlet เงื่อนไขขอบปลายน้ำ เป็นแบบ Pressure

outlet และเงื่อนไขขอบตัวเรือเป็นแบบ Stationary wall แบบ No slip condition นั่นคือความเร็วที่ผิวตัวเรือจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังภาพประกอบ 30

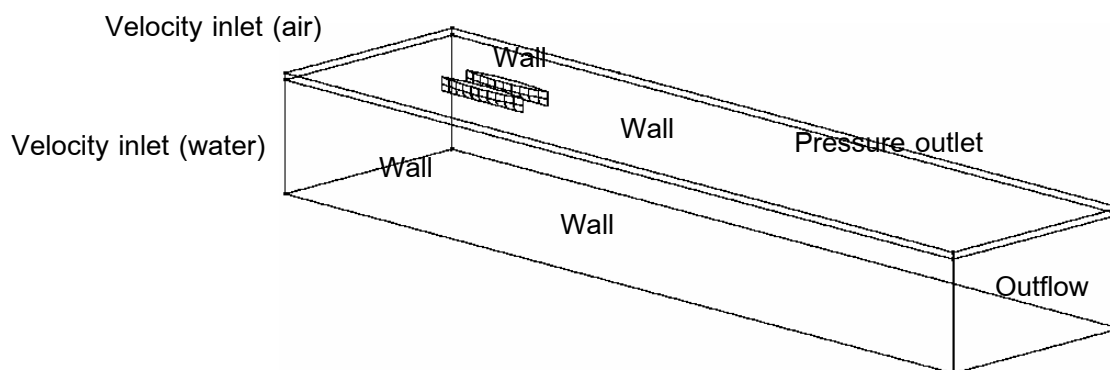
ทั้งนี้กำหนดให้ของไหลเป็นอากาศ เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อจำลองการไหลที่ Rn เดียวกันทำให้สามารถจำลองการไหลที่ความเร็วสูงได้ ช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ เช่นเดียวกับแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลมโดยให้อากาศไหลผ่านทางเข้าด้วยความเร็วคงที่ V แบบความเร็วคงที่ (Uniform flow)



ภาพประกอบ 30 เงื่อนไขขอบแบบจำลอง 2 มิติ

3.10.3 แบบจำลอง 3 มิติ การไหล 2 เฟส

ในการจำลองนี้จะให้เรืออยู่กับที่ แต่ให้น้ำ, พื้น และผนังเคลื่อนที่สัมผัสกับเรือ เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของเรือในน้ำนิ่ง โดยมีเงื่อนไขขอบดังภาพประกอบ 31

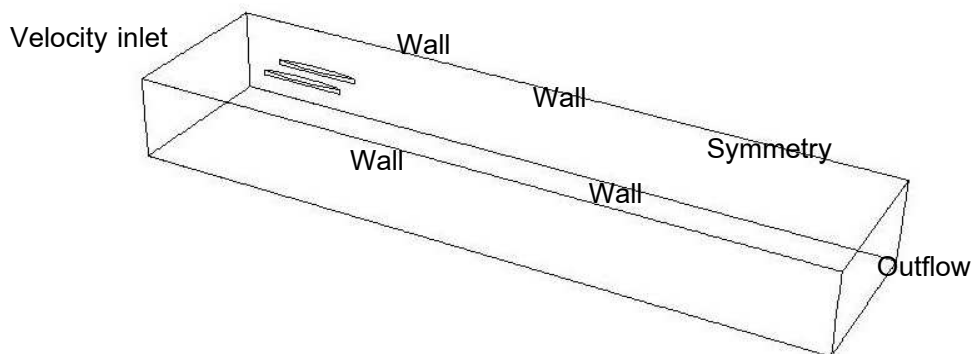


ภาพประกอบ 31 เงื่อนไขขอบแบบจำลอง 3 มิติ

เงื่อนไขขอบต้นน้ำจะให้ทิศทางเข้า 2 ส่วนได้แก่ ทางเข้าของน้ำและอากาศ ส่วนผิวของตัวเรือเป็น Wall แบบที่ความเร็วที่ผิวเท่ากับศูนย์ (Stationary wall with no slip condition) ขณะที่ผนังทั้งสองด้านของอ่างน้ำเป็น Wall แบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของการไหล ด้านบนของอ่างน้ำกำหนดให้เป็นแบบ Pressure outlet เพื่อให้อากาศสามารถไหลออกได้โดยอิสระ และเงื่อนไขขอบปลายน้ำเป็น Outflow

3.10.4 แบบจำลอง 3 มิติ การไหล 1 เฟส

ในการทดลองหาแรงเสียดทานของตัวเรือใต้แนวน้ำโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างตัวเรือใต้แนวน้ำจำลอง 2 ชุด แล้วนำมาประกบกัน จากนั้นนำไปวางในอุโมงค์ลมเพื่อทำการทดลองหาความต้านทาน ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาองค์ประกอบความต้านทานความเสียดทานจึงได้จำลองการไหลดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองตามข้อ 3.10.3 แต่น้ำส่วนที่เป็นอากาศออกและเปลี่ยนเงื่อนไขขอบของผิวน้ำเป็น Symmetry เพื่อการจัดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากคลื่นที่ผิวน้ำในการศึกษาความต้านทานแรงเสียดทาน ขณะที่ตัวเรือ ผนังทั้งสองข้าง และพื้น มีเงื่อนไขแบบ Stationary wall ทั้งนี้เงื่อนไขขอบต้นน้ำและปลายน้ำยังคงเหมือนเดิมแต่ไม่มีทางเข้าของอากาศ รายละเอียดดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 เงื่อนไขขอบแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือใต้แนวน้ำ

3.10.5 เงื่อนไขขอบ Velocity Inlet

ในเงื่อนไขขอบแบบ Velocity inlet ของไหลจะไหลเข้าโดเมนด้วยความเร็วคงที่ และมีทิศทางตามความยาวของตัวเรือ โดยใช้ความเร็วที่กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นมาคำนวณหาอัตราการไหลและฟลักซ์ของโมเมนตัมตลอดทั้งโดเมน ทั้งนี้ในแบบจำลอง 3 มิติ น้ำและอากาศจะถูกแบ่งทางเข้าแยกออกจากกัน

สำหรับอัตราการไหลของมวล ($\dot{m}$) ผ่านปริมาตรควบคุมที่ติดกับเงื่อนไขขอบจะคำนวณจากความเร็วในแนวตั้งฉากกับผนังของปริมาตรควบคุม ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{m} = \int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (3.49)$$

สมบัติการไหลในแบบจำลองการไหล $k-\varepsilon$ ที่เงื่อนไขขอบต้นน้ำ ในงานวิจัยนี้จะใช้การตั้งความเข้มการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence intensity หรือ I) และความยาวสัดส่วนของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence length scale หรือ ℓ) ดังนี้

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} \quad (3.50)$$

และ $\ell = 0.07L \quad (3.51)$

เมื่อ L เป็นความยาวอ้างอิง ทั้งนี้ จาโชวสกี (Jachowski. 2008) ได้ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในการจำลองการไหลผ่านเรือสินค้า พบว่า $I = 2\%$ ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองจริง ขณะที่สมบัติการไหลของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\omega$ ที่เงื่อนไขขอบต้นน้ำจะกำหนดค่าตั้งต้นเป็น 1 ทั้งสองค่า

3.10.6 เงื่อนไขขอบ Outflow

เนื่องจากในการศึกษาจะจำลองความยาวของอ่างน้ำให้เพียงพอต่อการเดินทางของคลื่นที่เกิดจากเรือ ดังนั้นเงื่อนไขที่ปลายน้ำจะไม่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขต้นน้ำ จึงกำหนดให้เงื่อนไขขอบปลายน้ำเป็นแบบ Outflow ซึ่งในเงื่อนไขขอบนี้ ฟลักซ์การแพร่ตามทิศทางการไหลสำหรับสมบัติการไหลใด ๆ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้สมบัติการไหลดังกล่าวจะนำมาใช้ในการประมาณค่าภายในแบบจำลองด้วยวิธีประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) โดยอยู่บนสมมุติฐานที่เป็นการไหลแบบสภาวะสถานะคงตัวตามทิศทางการไหล (Fully developed flow) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด ณ ทางออก นอกจากนี้ในเงื่อนไขนี้จะมีการปรับแก้ความต่อเนื่องของมวลด้วย

3.10.7 เงื่อนไขขอบ Moving Wall

กำหนดให้พื้นผิวของเรือ, พื้น และผนังด้านข้าง ของแบบจำลองเป็นเงื่อนไขขอบแบบ Wall เนื่องจากเป็นการไหลที่มีความหนืด ดังนั้นเงื่อนไขขอบที่ผนังและตัวเรือจึงกำหนดให้ของไหลมีความเร็วสัมผัสกับขอบผนัง (No slip condition) โดยค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) จะประมาณค่าจากสมบัติของของไหลที่อยู่ติดกับขอบผนัง ทั้งนี้ให้ผนังมีความเร็วตามทิศทางการไหล

เท่ากับความเร็วของเงื่อนไขขอบต้นน้ำ (Moving wall) โดยแทนความเร็วในสมการ (3.14), (3.15), (3.26) และ (3.29) ด้วยความเร็วสัมผัสเมื่อ u_{wall} เป็นความเร็วของผนัง ดังนี้

$$u^* = u^* - u_{wall} \quad (3.52)$$

3.10.8 เงื่อนไขขอบ Stationary Wall

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ กำหนดให้พื้นผิวของแบบจำลองเรือเป็นเงื่อนไขขอบแบบ Wall และเนื่องจากเป็นการไหลที่มีความหนืด ดังนั้นเงื่อนไขขอบที่ตัวเรือจึงกำหนดให้ของไหลมีความเร็วเป็นศูนย์ (No slip condition) โดยค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) จะประมาณค่าจากสมบัติของการไหลที่อยู่ติดกับขอบผนังนั้น

3.10.9 เงื่อนไขขอบ Pressure Outlet

เงื่อนไขขอบแบบ Pressure outlet ถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขปลายน้ำในแบบจำลอง 2 มิติ และเป็นเงื่อนไขบรรยากาศของแบบจำลอง 3 มิติ โดยในเงื่อนไขขอบนี้จะกำหนดความดันที่ทางออกเป็นความดันเกจ (Gauge pressure) โดยมีค่าสัมผัสกับความดันปฏิบัติการ (Operating pressure) สำหรับการคำนวณจะใช้วิธีประมาณค่านอกช่วงจากภายในขอบเขตปัญหา โดยความดันเริ่มต้นจะถูกนำมาใช้หาความดันสถิต (Static pressure, p_s) จากสมการต่อไปนี้

$$p_s = (\rho - \rho_0) |\mathbf{g}| (\hat{\mathbf{g}} \cdot (\mathbf{b} - \mathbf{a})) \quad (3.53)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของไหลผสมในปริมาตรควบคุม, ρ_0 เป็นความหนาแน่นอ้างอิง, $\mathbf{b}$ เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางผนังของปริมาตรควบคุม, $\mathbf{a}$ เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของจุดบนผิวหน้า, $\mathbf{g}$ เป็นเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง, $|\mathbf{g}|$ เป็นขนาดของเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง และ $\hat{\mathbf{g}}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแรงโน้มถ่วง

ทั้งนี้ในแบบจำลอง 3 มิติ ที่ทางออกจะระบุสัดส่วนของปริมาตรสำหรับเฟสทุติยภูมิหรือน้ำ โดยในกรณีที่มีการไหลย้อน (Backflow) ความดันเกจจะถูกนำมาใช้เป็นการรวม (Total pressure) และมีทิศทางตั้งฉากกับขอบของปัญหา

3.10.10 เงื่อนไขขอบ Symmetry

เงื่อนไขขอบ Symmetry นี้ กำหนดให้ไม่มีฟลักซ์ของสมบัติการไหลใด ๆ ไหลผ่านขอบนี้และเนื่องจากไม่มีฟลักซ์ของพจน์การพาไหลผ่านทำให้ไม่มีความเร็วตั้งฉากกับพื้นผิวขอบนี้ในลักษณะเดียวกันเมื่อไม่มีฟลักซ์ของพจน์การแพร่ผ่าน ทำให้ไม่มีความชันของสมบัติการไหลใน

แนวตั้งฉากแต่อย่างใด นอกจากนี้เมื่อไม่มีความเค้นเฉือน (Shear stress) ทำให้เงื่อนไขขอบนี้จะเป็นเสมือนเงื่อนไขขอบ Wall แบบมีความเร็วเท่ากับของไหลที่ผ่าน

3.11 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Uncertainty Analysis)

ที่ประชุมการลากเรือจำลองในอ่งน้ำนานาชาติ (ITTC. 1999) ได้ตกลงกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation error หรือ δ_s) เป็นผลต่างของค่าที่คำนวณได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (S) และค่าจริงจากการลากเรือจำลอง (T) ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\delta_s = S - T \quad (3.54)$$

เมื่อ δ_s ประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนแบบจำลอง (δ_{SM}) และความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข (δ_{SN}) ดังนี้

$$\delta_s = \delta_{SM} + \delta_{SN} \quad (3.55)$$

โดย δ_{SN} คำนวณค่าได้จากค่าประมาณพร้อมเครื่องหมาย (δ_{SN}^*) และความคลาดเคลื่อนในการประมาณ (ε_{SN})

$$\delta_{SN} = \delta_{SN}^* + \varepsilon_{SN} \quad (3.56)$$

บทที่ 4

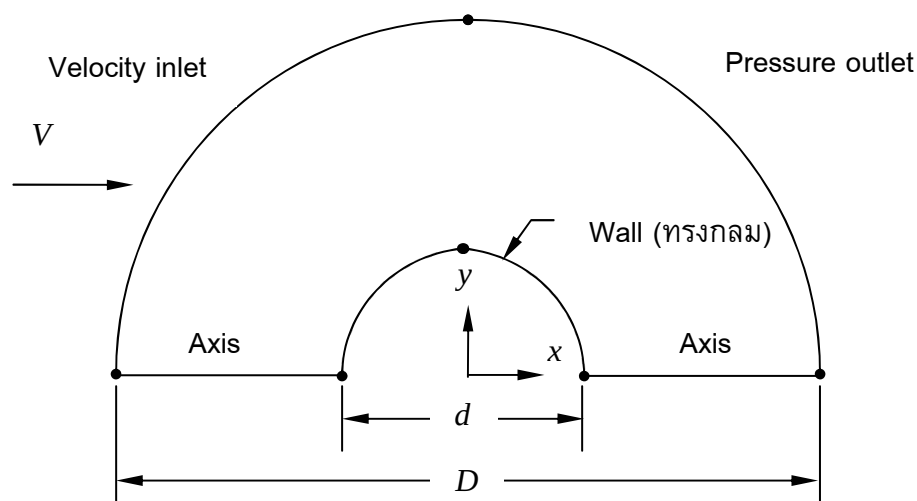
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 แนวทางการจำลองการไหลที่เหมาะสม

4.1.1 แบบจำลอง

ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลมแบบ 2 มิติ เมื่อ $d = 0.1$ เมตร และ $D = 10$ เมตร ดังภาพประกอบ 33 โดยมีเงื่อนไขขอบ ดังนี้

- เงื่อนไขขอบต้นน้ำ เป็น Velocity inlet มีความเร็วคงที่ V
- เงื่อนไขขอบปลายน้ำ เป็น Pressure outlet มีความดันบรรยากาศ $P_{gauge} = 0$
- เงื่อนไขขอบผิวทรงกลม เป็น Stationary wall แบบ No slip condition
- เงื่อนไขขอบด้านล่าง เป็น Axis



ภาพประกอบ 33 แบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

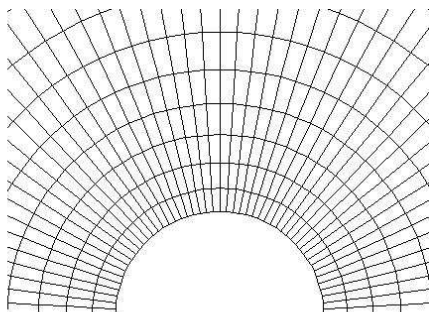
4.1.2 การทดสอบการแบ่งกริด

แบบจำลองตามข้อ 4.1.1 ถูกแบ่งกริดด้วยความละเอียดต่าง ๆ กัน 3 แบบ ได้แก่ จำนวนกริด 2,400 เซลล์, 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ โดยใช้กริดรูปสี่เหลี่ยมแบบโครงสร้าง

ปกติ ดังภาพประกอบ 34 จากนั้นทำการจำลองการไหลแบบราบเรียบผ่านทรงกลมทั้ง 3 แบบ ที่ค่า Re_d ระหว่าง $10^{-1} - 10^5$ และคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (C_D) โดยมีเงื่อนไขการคำนวณทาง CFD ดังนี้

- คำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัว (Steady state calculation)
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน – ความเร็ว (Pressure – velocity coupling) ใช้วิธีการ

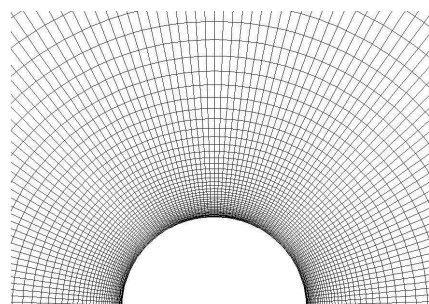
หาผลเฉลย SIMPLE



(ก) 2,400 เซลล์

พื้นที่เซลล์น้อยสุด: 4.93×10^{-6} ตร.ม.

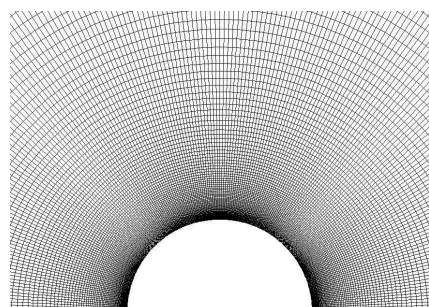
พื้นที่เซลล์มากที่สุด: 2.20 ตร.ม.



(ข) 8,000 เซลล์

พื้นที่เซลล์น้อยสุด: 3.80×10^{-7} ตร.ม.

พื้นที่เซลล์มากที่สุด: 2.15 ตร.ม.



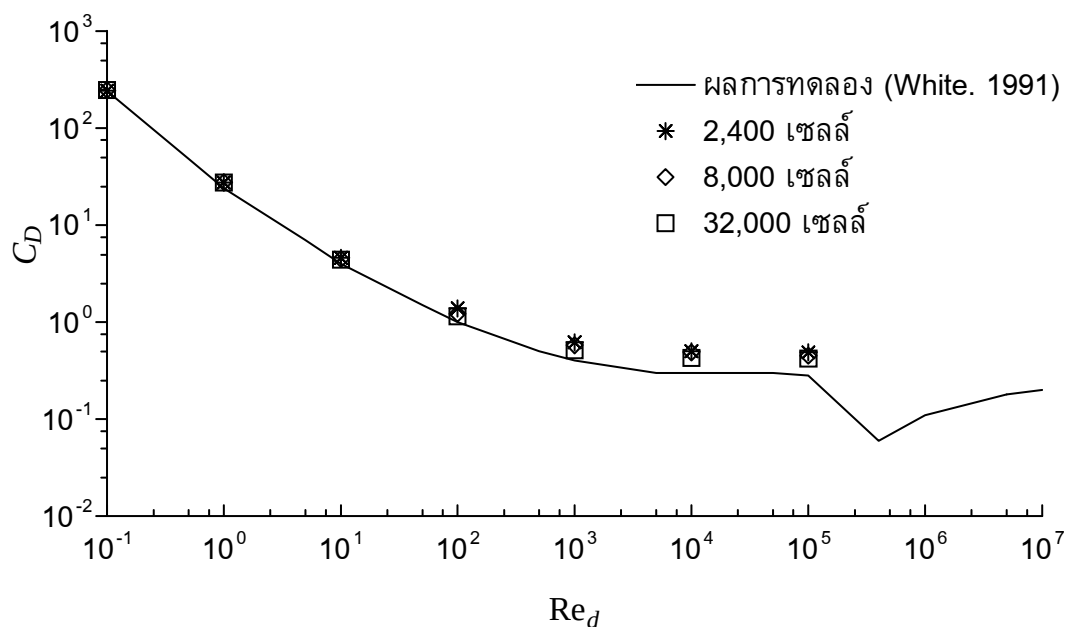
(ค) 32,000 เซลล์

พื้นที่เซลล์น้อยสุด: 7.93×10^{-8} ตร.ม.

พื้นที่เซลล์มากที่สุด: 1.15 ตร.ม.

ภาพประกอบ 34 การแบ่งกริดแบบจำลองการไหลผ่านทรงกลม

ทั้งนี้ มีผลการคำนวณค่า C_D ของแบบจำลองข้างต้นเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (White. 1991) เป็นไปตามภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 ค่า C_D ของการไหลแบบราบเรียบผ่านทรงกลม

จากภาพประกอบ 35 พบว่าที่ค่า Re_d ระหว่าง $10^{-1} - 10^5$ นั้น C_D ที่คำนวณได้จากการแบ่งกริดทั้งสามแบบต่างมีค่าลดลงเมื่อ Re_d เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลอง แต่แบบจำลองทั้งสามต่างให้ค่า C_D มากกว่าผลการทดลอง โดยแบบจำลองการแบ่งกริด 2,400 เซลล์ให้ค่า C_D มากกว่าผลการทดลองเล็กน้อย เมื่อ $Re_d < 10^2$ แต่เมื่อ $Re_d > 10^2$ พบว่า C_D ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าผลการทดลองมากขึ้น ขณะที่ภายในช่วง Re_d ที่ทำการศึกษา แบบจำลองการแบ่งกริด 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ ให้ค่า C_D ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่า ดังนั้นการแบ่งกริดละเอียด (32,000 เซลล์) ให้ค่า C_D ใกล้ผลการทดลองมากที่สุด ถัดมาได้แก่การแบ่งกริดปานกลาง (8,000 เซลล์) และการแบ่งกริดหยาบ (2,400 เซลล์) ให้ผลต่างจากการทดลองมากที่สุด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการแบ่งกริดให้มีความละเอียดมากหรือมีจำนวนเซลล์มากทำให้ค่า C_D ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้น

ที่ Re_d ต่ำ ๆ ค่า C_D ของแบบจำลองทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการไหลแบบราบเรียบทำให้ความละเอียดของปริมาตรควบคุมมีผลต่อการคำนวณน้อย ขณะที่ความแตกต่างของ C_D ที่เกิดขึ้นเมื่อ Re_d สูง ๆ อาจเป็นผลมาจากการไหลเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวทรงกลมและเข้าสู่ย่านเปลี่ยนผ่าน (Transition zone) ก่อนเป็นการไหลปั่นป่วน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

การไหลบริเวณใกล้ชั้นขีตผิวขึ้น ดังนั้นหากบริเวณใกล้ผิวของทรงกลมมีความละเอียดของปริมาตรควบคุมเท่าใดก็จะมีจุดต่อคำนวณสำหรับสมบัติการไหลมากขึ้น ส่งผลให้ผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงค่าที่แท้จริงมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการลู่เข้าของการคำนวณหาผลเฉลยของการแบ่งกริดจำนวน 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ ในรูปของจำนวนการทำซ้ำ (Iterations) เมื่อ Residuals ของการคำนวณมีค่าน้อยกว่า 10^{-8} ดังตาราง 1 พบว่า C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่แบบจำลองการแบ่งกริด 32,000 เซลล์ มีจำนวนการคำนวณซ้ำมากกว่าถึง 2 – 3 เท่า ตัวอย่างเช่น ที่ $Re_d = 10^{-1}$ ผลเฉลยลู่เข้าหลังผ่านการคำนวณแบบทำซ้ำจำนวน 7,950 รอบ และ 26,296 รอบ สำหรับการแบ่งกริดจำนวน 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ ตามลำดับ แสดงว่าการแบ่งกริดจำนวน 8,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณนานกว่า

ตาราง 1 การลู่เข้าของแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบผ่านทรงกลม

Re_d	จำนวนกริด 2,400 เซลล์		จำนวนกริด 8,000 เซลล์		จำนวนกริด 32,000 เซลล์	
	C_D	Iterations	C_D	Iterations	C_D	Iterations
10^{-1}	243.11	2,648	246.76	7,950	246.24	26,297
10^0	27.46	1,341	27.70	4,356	27.48	14,553
10^1	4.60	420	4.48	1,512	4.38	5,154
10^2	1.39	157	1.22	644	1.15	1,846
10^3	6.19	127	0.58	415	0.51	1,142
10^4	4.99	124	0.48	347	0.43	936
10^5	4.87	124	0.45	382	0.42	646

หมายเหตุ: ผลลู่เข้าเมื่อ Residuals $< 10^{-8}$

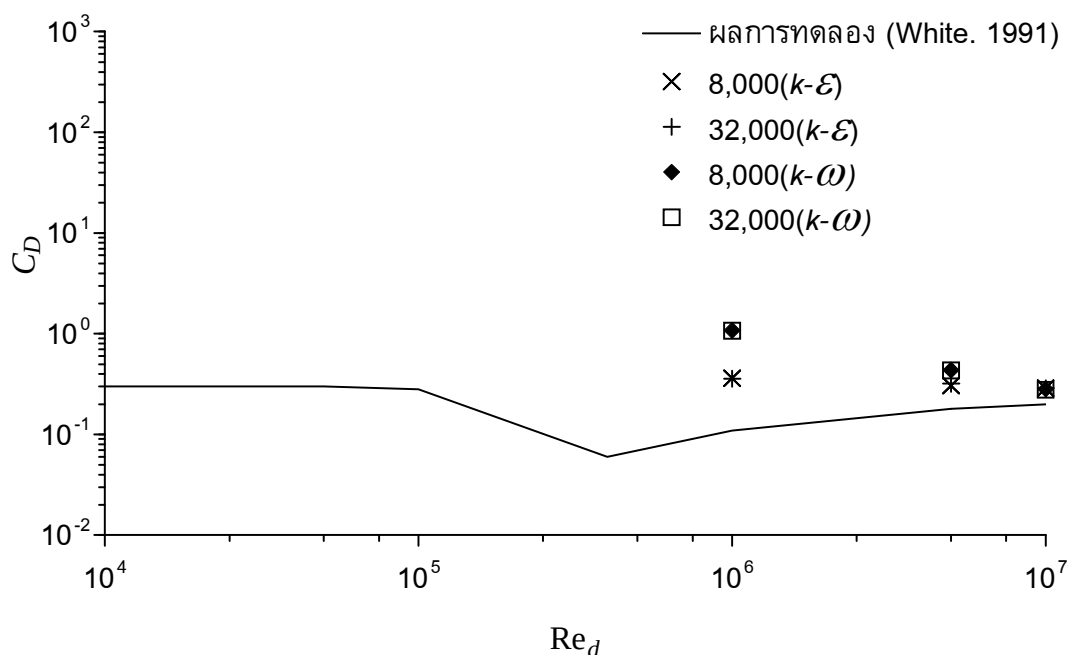
ผลการคำนวณ C_D ในขั้นตอนนี้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม CFD ที่ใช้สามารถจำลองการไหลได้ใกล้เคียงความเป็นจริง เมื่อพิจารณาความแม่นยำของ C_D และระยะเวลาในการคำนวณ จึงเลือกแบบจำลองเฉพาะการแบ่งกริด 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในขั้นตอนต่อไป

4.1.3 การทดสอบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ โดยจำลองการไหลผ่านทรงกลมตามข้อ 4.1.1 ที่ย่านการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_d = 10^6 - 10^7$) สำหรับการแบ่งกริด 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ จากนั้นคำนวณหาค่า C_D โดยมีเงื่อนไขในการคำนวณทาง CFD ดังนี้

- คำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัว
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- ค่า $k-\varepsilon$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- ค่า $k-\omega$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน - ความเร็ว ใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE

ผลการคำนวณ C_D เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีเผยแพร่ (White. 1991) เป็นไปดังภาพประกอบ 36 ซึ่งพบว่าแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนทั้ง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ ต่างให้ค่า C_D มากกว่าผลการทดลองแต่มีแนวโน้มในการให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นเมื่อ Re_d สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบค่า C_D กับผลการทดลองที่ $Re_d > 1 \times 10^7$ ได้ เนื่องจากไม่พบว่ามีผลการทดลองเผยแพร่แต่อย่างใด



ภาพประกอบ 36 ค่า C_D ของการไหลแบบปั่นป่วนผ่านทรงกลม

นอกจากนี้ที่ Re_d ระหว่าง $1 \times 10^6 - 5 \times 10^6$ แบบจำลอง $k-\omega$ ให้ค่า C_D ที่คลาดเคลื่อนจากผลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ อย่างชัดเจน ขณะที่เมื่อ $Re_d = 1 \times 10^7$ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนทั้งสองให้ค่า C_D ใกล้เคียงกัน

ความแตกต่างของ C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองการไหลปั่นป่วนทั้งสองนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากแบบจำลอง $k-\omega$ เป็นแบบจำลองที่ใช้การประมาณค่าตลอดทั้งโดเมนจนถึงจุดต่อของเซลล์ที่ชั้นขีดผิวของแบบจำลอง ดังนั้นการแบ่งกริดในบริเวณชั้นขีดผิวของแบบจำลองจะต้องมีความละเอียดมาก ๆ จึงจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ขณะที่แบบจำลอง $k-\varepsilon$ จะใช้การคำนวณแบบ Wall function ในการคำนวณการไหลบริเวณชั้นขีดผิว ทำให้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ไม่จำเป็นต้องแบ่งกริดให้มีความละเอียดมากเท่ากับแบบจำลอง $k-\omega$ แสดงให้เห็นว่าในช่วง Re_d ที่ศึกษานี้แบบจำลองมีการแบ่งกริดที่ไม่ละเอียดเพียงพอสำหรับการใช้แบบจำลอง $k-\omega$

เมื่อพิจารณาการลู่เข้าของผลเฉลยของการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$ สำหรับการแบ่งกริด 8,000 เซลล์ และ 32,000 เซลล์ ดังตาราง 2 พบว่า C_D ที่คำนวณได้จากการแบ่งกริดทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่แบบจำลองการแบ่งกริด 32,000 เซลล์ มีจำนวนการคำนวณซ้ำมากกว่าประมาณ 2 – 3 เท่า แสดงว่าแบบจำลองการแบ่งกริด 32,000 เซลล์ ใช้เวลาในการคำนวณนานกว่าการแบ่งกริด 8,000 เซลล์

ตาราง 2 การลู่เข้าของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ผ่านทรงกลม

Re_d	จำนวนกริด 8,000 เซลล์		จำนวนกริด 32,000 เซลล์	
	C_D	Iterations	C_D	Iterations
1×10^6	0.36	729	0.36	2,778
5×10^6	0.31	361	0.32	2,456
1×10^7	0.29	602	0.29	2,233

หมายเหตุ: ผลลู่เข้าเมื่อ $Residuals < 10^{-8}$

ดังนั้นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้ ได้แก่ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ โดยมีแนวทางการแบ่งกริดเช่นเดียวกับแบบจำลองการแบ่งกริด 8,000 เซลล์ นั่นคือพื้นที่หน้าตัดของเซลล์หรือปริมาตรควบคุมมีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 4×10^{-7} ตารางเมตร และมีขนาดใหญ่สุดประมาณ 2 ตารางเมตร เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ ทั้งนี้ Re_d ที่ทำการศึกษา

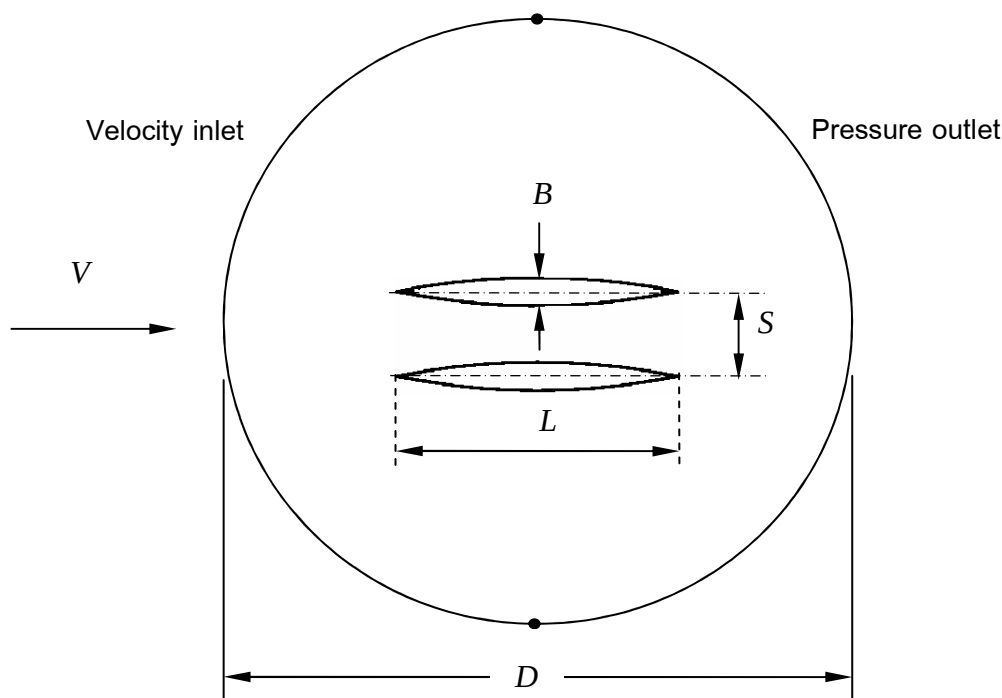
ในขั้นตอนนี้มีค่าเทียบเท่ากับเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลรอบเรือแบบตัวเรือคู่ (Rn) ที่จะทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดย Rn มีค่าอยู่ในช่วง $7 \times 10^5 - 1 \times 10^7$ (เทียบเท่ากับค่า Fn ในช่วง $0.1 - 1.0$) ซึ่งจัดเป็นย่านที่ Rn มีค่าสูง

4.2 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อความต้านทาน

4.2.1 แบบจำลอง

แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ 2 มิติที่ใช้ศึกษาในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วยรูปหน้าตัดตัวเรือคู่แบบวิกิลีย์ ณ แวน้ำ ซึ่งมีค่าความเพริยวในรูปของอัตราส่วนความยาวแนวน้ำต่อความกว้างสุดที่แนวน้ำ (L/B) เท่ากับ 10 โดย $L = 1.8$ เมตร, $B = 0.18$ เมตร และ $D = 10$ เมตร ดังภาพประกอบ 37 และมีเงื่อนไขขอบ ดังนี้

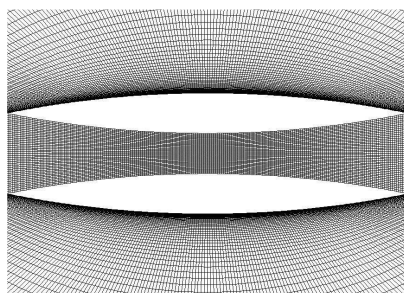
- เงื่อนไขขอบต้นน้ำ เป็น Velocity inlet
- เงื่อนไขขอบปลายน้ำ เป็น Pressure outlet มีความดันบรรยากาศ $P_{gauge} = 0$
- เงื่อนไขขอบผิวตัวเรือ เป็น Stationary wall แบบ No slip condition มีความเร็วที่ผิวเป็นศูนย์



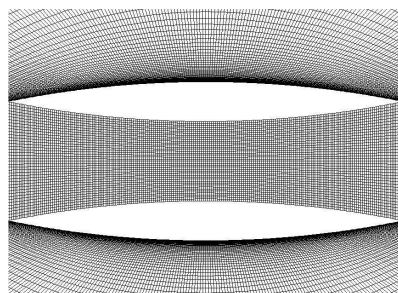
ภาพประกอบ 37 แบบจำลองการไหลผ่านตัวเรือคู่ 2 มิติ

4.2.2 ผลกระทบของ S/L ต่อ C_D

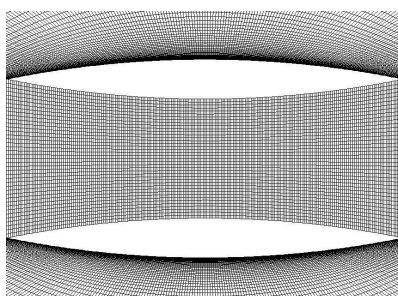
ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ที่ทำการศึกษาในขั้นตอนนี้จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อความยาวแนวหน้า (S/L) โดยการศึกษาเริ่มด้วยการออกแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ ที่มีอัตราส่วน $S/L = 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 ด้วยลักษณะการแบ่งกริดที่ได้จากการศึกษาในข้อ 4.1.2 ดังภาพประกอบ 38



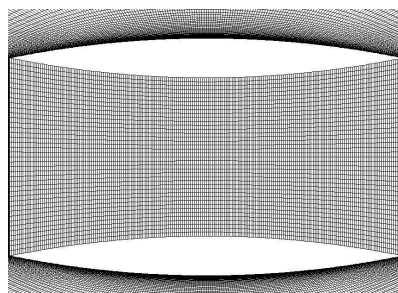
(ก) $S/L = 0.2$



(ข) $S/L = 0.3$



(ค) $S/L = 0.4$



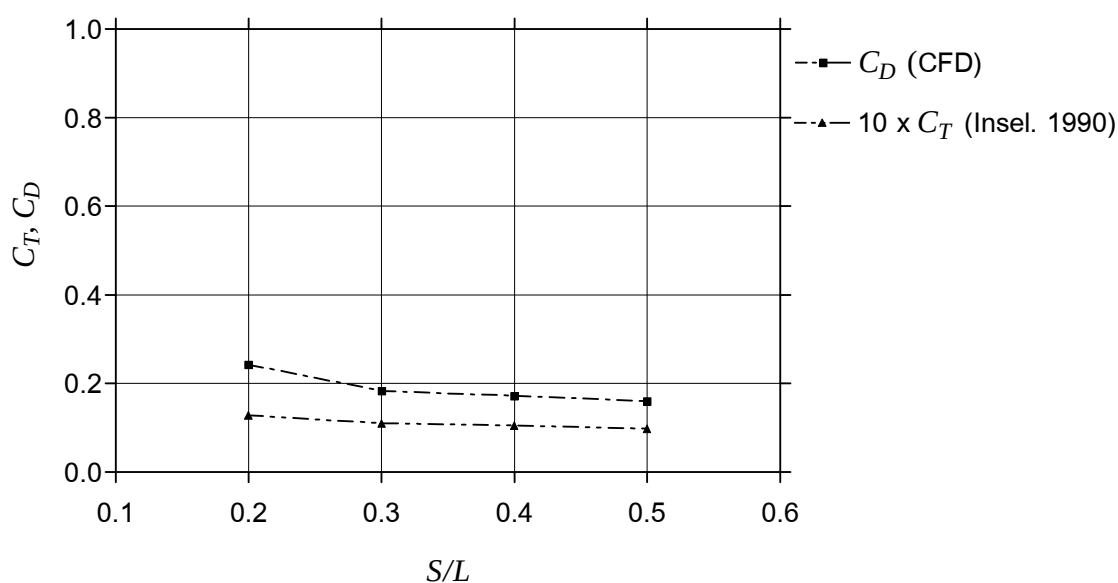
(ง) $S/L = 0.5$

ภาพประกอบ 38 แบบจำลองตัวเรือคู่ 2 มิติ ($L/B = 10$)

จากนั้นทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ และคำนวณสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient หรือ C_D) ซึ่งมีเงื่อนไขในการคำนวณ CFD ดังนี้

- คำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัว
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- ค่า $k-\varepsilon$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน – ความเร็ว ใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE

ทั้งนี้มีการเปรียบเทียบระหว่าง C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม (C_T) ของเรือแบบตัวเรือคู่รูปทรงวงรีจากการทดลองลากเรือจำลองในอ่างน้ำของอินเซล (Insel. 1990) ที่ $Rn = 3.8 \times 10^6$ (ความเร็วเทียบเท่าที่ $Fn = 0.5$) สำหรับอัตราส่วน S/L ต่าง ๆ เป็นไปดังภาพประกอบ 39

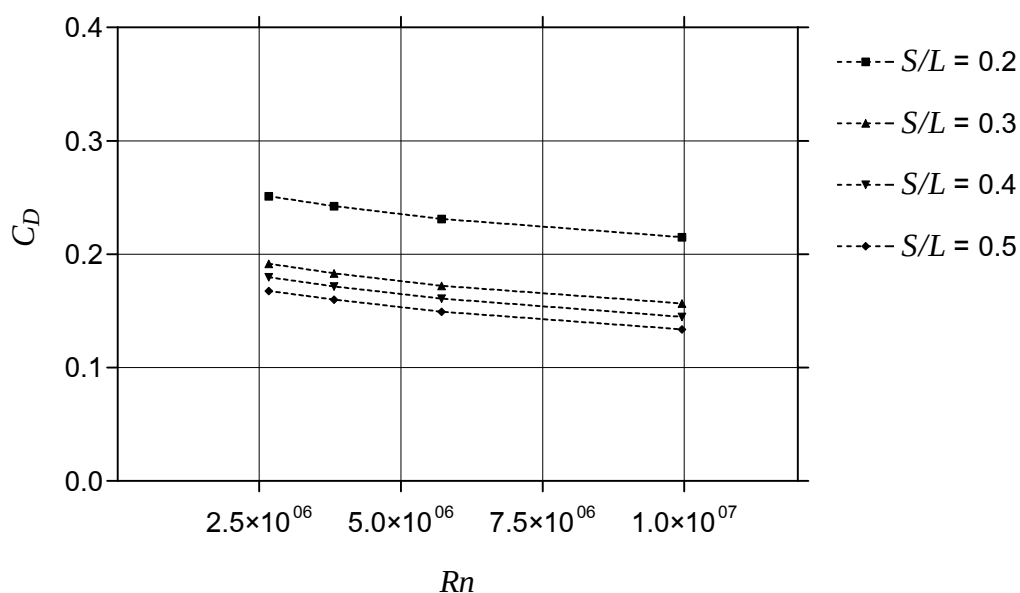


ภาพประกอบ 39 ค่า C_D เปรียบเทียบ C_T ที่ $Rn = 3.8 \times 10^6$ ($L/B = 10$)

จากภาพประกอบ 39 พบว่า C_D มีค่ามากกว่า C_T กว่า 10 เท่า ซึ่งความแตกต่างของ C_D และ C_T นี้อาจเป็นผลมาจากแบบจำลองที่ใช้เป็นเพียงแบบจำลอง 2 มิติ และ C_D ที่คำนวณได้เป็นเพียงค่า Drag coefficient ซึ่งไม่สามารถใช้ในการทำนายความต้านทานที่แท้จริงของเรือซึ่งมีรูปทรง 3 มิติได้

อย่างไรก็ตามทั้ง C_D และ C_T ต่างมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน S/L เพิ่มขึ้นในลักษณะ และอัตราที่สอดคล้องกัน แสดงว่ารูปทรงตัวเรือ ณ แนวน้ำมีผลกระทบโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ โดยเมื่อเรือมีระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองตัวเรือคู่ 2 มิติที่ใช้ในขั้นตอนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่กับสัมประสิทธิ์ความต้านทานเรือในขั้นตอนต่อไปได้

ขั้นตอนต่อไปจึงทำการจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่สำหรับอัตราส่วน $S/L = 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 ตามลำดับ ที่ความเร็วต่าง ๆ ในรูปของ Rn ระหว่าง $2.5 \times 10^6 - 1.0 \times 10^7$ ซึ่งมีความเร็วเทียบเท่ากับ $Fn = 0.35 - 1.32$ ทั้งนี้มีผลการคำนวณ C_D เป็นไปดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 ค่า C_D ที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่าง ๆ ($L/B = 10$)

จากภาพประกอบ 40 พบว่า สำหรับอัตราส่วน S/L ทุกค่าในช่วงที่ศึกษานั้น เมื่อ Rn เพิ่มขึ้น C_D มีค่าลดลง ดังนั้นในช่วง $Rn = 2.5 \times 10^6 - 1.0 \times 10^7$ ที่ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่เดียวกันสัมประสิทธิ์ความต้านทานของเรือแบบตัวเรือคู่มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาที่ Rn เท่ากัน พบว่าเมื่ออัตราส่วน S/L เพิ่มขึ้น C_D มีค่าลดลง โดย C_D ที่อัตราส่วน $S/L = 0.3$ มีค่าน้อยกว่าที่อัตราส่วน $S/L = 0.2$ อย่างชัดเจน ขณะที่ C_D สำหรับอัตราส่วน S/L อื่น ๆ ได้แก่ 0.3, 0.4 และ 0.5 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของ C_D นี้เป็นผลเนื่องมาจากการแทรกสอดของการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างตัวเรือคู่ กล่าวคือเมื่อ

ตัวเรืออยู่ใกล้กันมากการแทรกสอดจะมีผลทำให้เกิดความปั่นป่วนการไหลมากขึ้น ทำให้ C_D เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามแม้จากการศึกษานี้จะพบว่าที่อัตราส่วน $S/L = 0.5$ มีค่า C_D น้อยที่สุด แต่เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของดาดฟ้าเรือจะพบว่ายิ่งตัวเรืออยู่ใกล้กันมากเพียงใดก็จะง่ายต่อการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างดาดฟ้าเรือ ดังนั้นระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ที่อัตราส่วน $S/L = 0.3$ จึงมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วน $S/L = 0.3$ มีค่า C_D น้อยกว่าที่อัตราส่วน $S/L = 0.2$ อย่างชัดเจน แต่มากกว่าที่อัตราส่วน $S/L = 0.4$ และ 0.5 เพียงเล็กน้อย และจะสะดวกต่อการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างดาดฟ้ามากกว่าที่อัตราส่วน $S/L = 0.4$ และ 0.5 ทั้งนี้จึงใช้อัตราส่วน $S/L = 0.3$ หรือระยะห่างจากแนวกกลางลำของตัวเรือคู่เท่ากับ 5.4 เมตร ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.3 ผลกระทบของความเพรียวของตัวเรือคู่ต่อความต้านทาน

4.3.1 แบบจำลอง

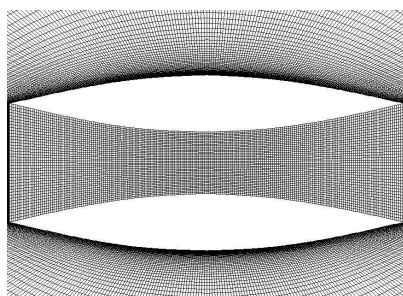
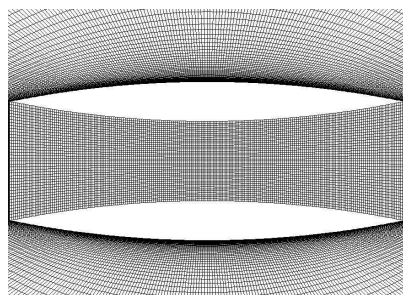
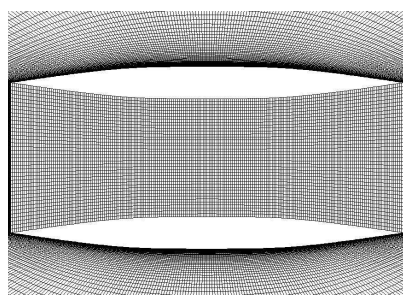
ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ 2 มิติเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1 ที่อัตราส่วน $S/L = 0.3$ แต่ทำการเปลี่ยนแปลงความเพรียวของตัวเรือในรูปของอัตราส่วนความยาวแนวน้ำต่อความกว้างสุดที่แนวน้ำ (L/B) จำนวน 3 แบบ ได้แก่ $L/B = 7, 10$ และ 12 ดังภาพประกอบ 41

สำหรับการออกแบบความเพรียวของตัวเรือคู่นั้นกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความกว้างสุดที่กลางลำแต่ให้ความยาวแนวน้ำคงที่เพื่อให้อัตราส่วน S/L คงที่ นอกจากนี้ยังคงรักษาความโค้งมนของตัวเรือไว้เพื่อให้ตัวเรือมีความเพรียวลม (Streamline) ทั้งนี้ในการศึกษานี้กำหนดให้ตัวเรือรูปทรงวงรีซึ่งมีอัตราส่วน $L/B = 10$ เป็นค่ากลางของความเพรียว ดังนั้น $L/B = 7$ จึงแทนตัวเรือแบบเพรียวน้อย และ $L/B = 12$ แทนตัวเรือแบบเพรียวมาก

4.3.2 ผลกระทบของ L/B ต่อ C_D

ทำการจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ที่ความเพรียวทั้ง 3 แบบข้างต้น ที่ความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในรูปของ $Rn = 3.8 \times 10^6$ โดยมีเงื่อนไขในการคำนวณ CFD ดังนี้

- คำนวณแบบสถานะสถานะคงตัว
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- ค่า $k-\epsilon$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน – ความเร็ว ใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE

(ก) $L/B = 7$ (ข) $L/B = 10$ (ค) $L/B = 12$

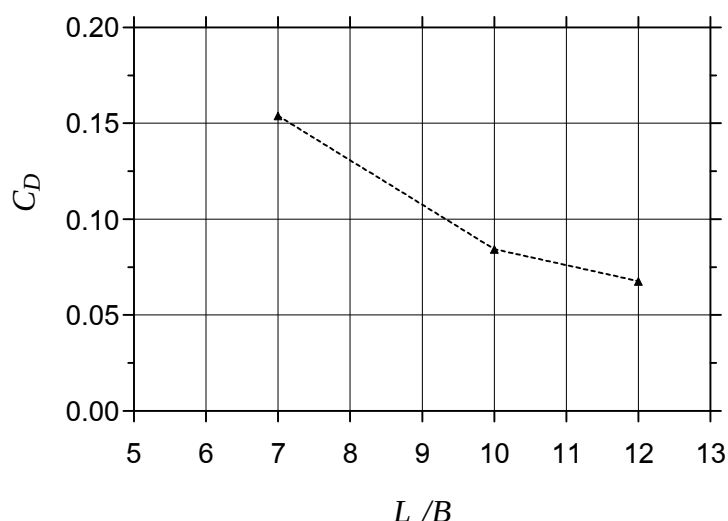
ภาพประกอบ 41 แบบจำลองเรือที่ความเพียวของตัวเรือคู่ต่าง ๆ ($S/L = 0.3$)

ทั้งนี้มีการคำนวณค่า C_D สำหรับตัวเรือคู่ที่มีอัตราส่วน $L/B = 7, 10$ และ 12 เป็นไปดังภาพประกอบ 42

จากภาพประกอบ 42 พบว่าเมื่ออัตราส่วน L/B เพิ่มขึ้น C_D มีค่าลดลง โดย C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่มีอัตราส่วน $L/B = 10$ มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองอัตราส่วน $L/B = 7$ อย่างชัดเจน แต่มีค่า C_D มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองอัตราส่วน $L/B = 12$ เพียงเล็กน้อย

จากผลการศึกษาในข้อ 4.2.2 ที่พบว่า C_D ที่คำนวณได้จากแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 2 มิติมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับ C_T ที่คำนวณได้จากการทดลองจริง และสามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความต้านทานได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อตัวเรือคู่มีความเพียวมากขึ้น สัมประสิทธิ์ความต้านทานเรือมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการ

ที่ตัวเรือคู่มีความเพรียวมากทำให้ตัวเรือคู่มีลักษณะลู่ลม (Streamline) และช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานลง



ภาพประกอบ 42 ค่า C_D ที่ L/B ต่าง ๆ ($S/L = 0.3$ และ $Rn = 3.8 \times 10^6$)

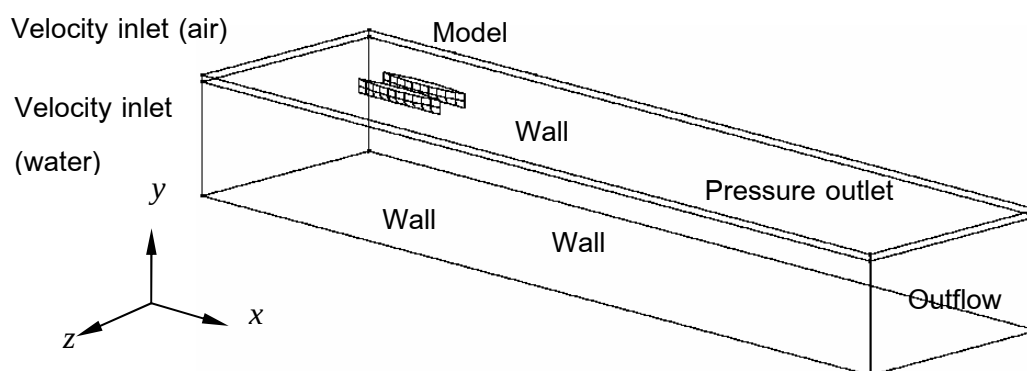
อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นแบบจำลอง 2 มิติ ทำให้ค่า C_D ที่คำนวณได้จึงสามารถใช้อ้างอิงในเชิงคุณภาพได้เท่านั้น ประกอบกับตัวเรือแบบวิกิลีมีผลการทดลองที่เผยแพร่สามารถนำมาอ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธี CFD ดังนั้นจึงจะใช้ความเพรียวที่อัตราส่วน $L/B = 10$ ในการออกแบบจำลองการไหลผ่านตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 3 มิติสำหรับการศึกษาขั้นต่อไป

4.4 ความต้านทานเรือแบบตัวเรือคู่

4.4.1 แบบจำลอง

แบบจำลองการไหลรอบเรือแบบตัวเรือคู่ 3 มิติในการศึกษานี้มีระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเพรียวของตัวเรือคู่เป็นไปตามผลการศึกษาจากข้อ 4.2 และ 4.3 นั่นคือ ตัวเรือเป็นรูปทรงแบบวิกิลี ($L/B = 10$) และมีระยะห่างระหว่างตัวเรือ 0.54 เมตร ($S/L = 0.3$) ดังภาพประกอบ 43 โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองเป็นไปตามข้อ 3.10.3 และเป็นการจำลองการไหลแบบ 2 เฟส (น้ำและอากาศ) ซึ่งมีเงื่อนไขขอบ ดังนี้

- เงื่อนไขขอบทางเข้า (น้ำ) เป็น Velocity inlet มีความเร็วคงที่ V ในแนวแกน x
- เงื่อนไขขอบทางเข้า (อากาศ) เป็น Velocity inlet มีความเร็วคงที่ V ในแนวแกน x
- เงื่อนไขขอบบรรยากาศ เป็น Pressure outlet ที่ $P_{gauge} = 0$
- เงื่อนไขขอบทางออก เป็น Outflow
- เงื่อนไขขอบผิวตัวเรือ เป็น Stationary wall แบบ No slip condition มีความเร็วที่ผิวเป็นศูนย์
- เงื่อนไขขอบพื้นและผนังอ่าง เป็น Moving wall มีความเร็วคงที่ V
- การเปลี่ยนแปลงของผิวน้ำใช้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit โดยให้อากาศเป็นเฟสปฐมภูมิ และน้ำเป็นเฟสทุติยภูมิ



ภาพประกอบ 43 แบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู้ในอ่างน้ำ

สำหรับการแบ่งกริดพบว่าความละเอียดตามผลการศึกษาในข้อ 4.1 ซึ่งมีพื้นที่เซลล์น้อยสุดเท่ากับ 3.80×10^{-7} ตารางเมตร นั้น ไม่สามารถนำมาใช้กับแบบจำลอง 3 มิตินี้ได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการความละเอียดของระนาบผิวน้ำซึ่งมีพื้นที่กว้าง (3.70 เมตร x 1.1625 เมตร) ทำให้จำนวนปริมาตรควบคุมมีมากกว่า 1,000,000 เซลล์ ส่งผลให้คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ไม่สามารถคำนวณได้ (รายละเอียดคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์เป็นไปตาม ภาคผนวก ค) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากริดที่ผิวซึ่งยอมรับได้สำหรับการศึกษาความต้านทานของวัตถุขนาด 1 ตัน อยู่ที่ 0.05 เมตร x 0.05 เมตร ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้การแบ่งกริดขนาดดังกล่าว โดยแบบจำลองนี้มีการแบ่งกริดเป็นจำนวน 588,000 เซลล์

4.4.2 การทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองตามข้อ 4.4.1 ดำเนินการโดยจำลองการไหลแบบปั่นป่วนรอบตัวเรือคู่ 3 มิติแบบ 2 เฟส และคำนวณความต้านทานรวมของเรือ (R_T) ที่ $Fn = 0.10 - 0.75$ อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่า Residuals ของสมบัติการไหลต่าง ๆ จากการคำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัว (Steady state scheme) มีค่าสูงเข้ามามากกว่า 10^{-3} ประกอบกับเป็นการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเริ่มต้นการคำนวณด้วยการคำนวณแบบสภาวะคงตัวจนกระทั่งค่า Residuals มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการคำนวณซ้ำต่อไป จากนั้นทำการคำนวณต่อด้วยวิธีการคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Time dependent calculation) ซึ่งพบว่าทำให้ Residuals มีค่าลดลงน้อยกว่า 10^{-3} โดยใช้ Time step = 0.1 วินาที และแต่ละ Time step ทำการคำนวณซ้ำ (Iteration) ไม่เกิน 20 รอบ โดยทำการคำนวณแบบแปรผันตามเวลาไม่น้อยกว่า 3 รอบการไหลผ่านตัวเรือหรือคิดเป็นเวลาไม่น้อยกว่า $\frac{3L}{V}$ วินาที

ทั้งนี้เมื่อเงื่อนไขทาง CFD ในการคำนวณ ดังนี้

- คำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัวและแบบแปรผันตามเวลา
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- $k - \varepsilon$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน - ความเร็ว ในการคำนวณแบบสภาวะสถานะคงตัว

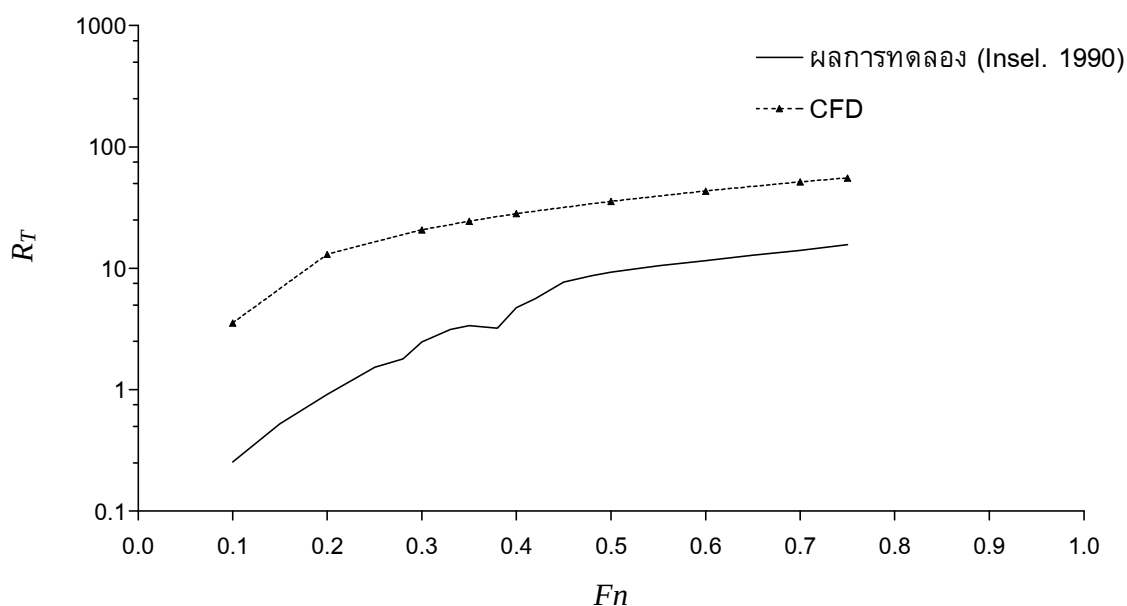
ใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE

- การตรวจสอบความดัน - ความเร็ว ในการคำนวณแบบแปรผันตามเวลา

วิธีการหาผลเฉลย PISO

ผลการคำนวณ R_T จากการจำลองการไหลข้างต้นเปรียบเทียบกับ R_T ที่คำนวณได้จากผลการทดลองลากเรือในถังลากเรือในงานวิจัยของอินเซล (Insel. 1990) ซึ่งเป็นการทดลองลากแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่รูปทรงวงรีแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวเรือคู่ในแนวตั้ง มีผลเป็นไปดังภาพประกอบ 44

จากภาพประกอบ 44 พบว่าเมื่อ Fn เพิ่มขึ้น R_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดลอง โดยที่ค่า Fn ต่ำ ๆ ($Fn = 0.1 - 0.4$) พบว่า R_T ที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่าผลการทดลองค่อนข้างมาก แต่ความแตกต่างนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อ Fn มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าที่ความเร็วสูงแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ 3 มิติแบบ 2 เฟส ที่ใช้ศึกษาในขั้นตอนนี้สามารถจำลองการไหลได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากกว่าที่ความเร็วต่ำ ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ C_T ตามหลักเกณฑ์ของ ITTC (ITTC. 1999) เป็นไปตามตาราง 3



ภาพประกอบ 44 ค่า R_T ที่ Fn ต่าง ๆ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

จากตาราง 3 พบว่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ Fn ต่ำ หรือความเร็วเรือต่ำ มีค่าสูงมาก แต่ความคลาดเคลื่อนค่อย ๆ ลดลงเมื่อ Fn หรือความเร็วเรือเพิ่มขึ้น โดยที่ในย่านความเร็วสูง ($Fn \geq 0.5$) ความต้านทานรวมของเรือ (R_T) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองลากเรือในถังลากเรือของอินเซล

ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่า R_T ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากการแบ่งกริดที่บริเวณใกล้ตัวเรือคู่และแนวน้ำ ตลอดจนขนาด Time step ที่มีความละเอียดไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามการกำหนดความละเอียดของการแบ่งกริดและ Time step ให้มีความละเอียดมากกว่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยความคุณลักษณะและความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังเช่นที่ได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อพิจารณาย่านความเร็วของเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยา (ไม่เกิน 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง) ที่ใช้ในการศึกษาขั้นต่อไปซึ่งเทียบเท่ากับเลขฟรูดเชิงความยาวแนวน้ำ (Fn) ระหว่าง 0.5 – 0.7 นั้น พบว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่ในย่านการใช้งานสำหรับแม่น้ำเจ้าพระยาได้

ตาราง 3 ความคลาดเคลื่อนของการจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ ด้วยวิธี CFD

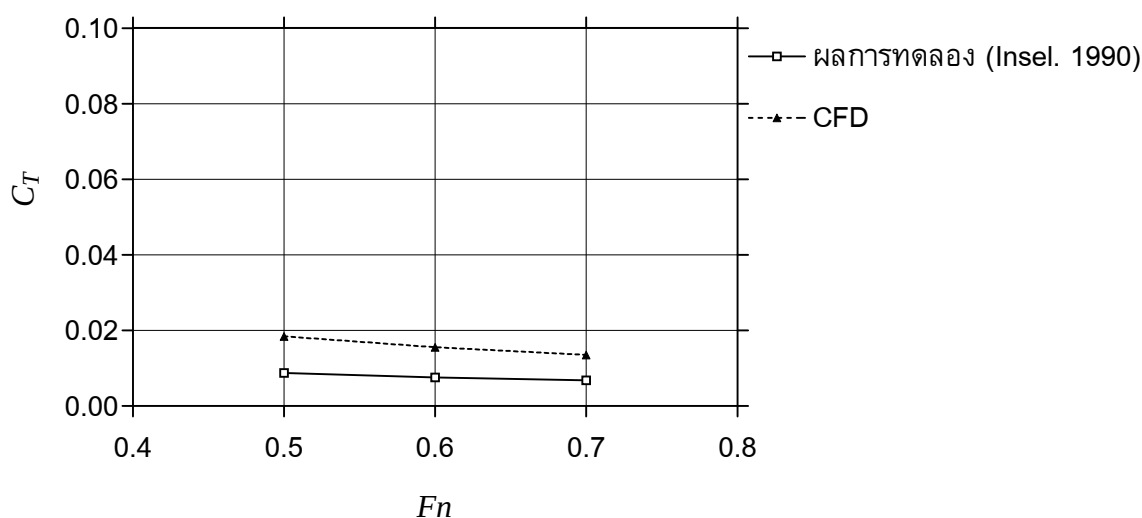
Fn	C_T		ค่าความคลาดเคลื่อน (S-T)	% ความคลาดเคลื่อน
	CFD (S)	ผลการทดลอง* (T)		
0.10	0.0408	0.0060	0.0348	3.48
0.20	0.0376	0.0058	0.0318	3.18
0.30	0.0265	0.0065	0.0200	2.00
0.35	0.0257	0.0065	0.0192	1.92
0.40	0.0203	0.0070	0.0133	1.33
0.50	0.0164	0.0108	0.0056	0.56
0.60	0.0138	0.0085	0.0053	0.53
0.70	0.0121	0.0075	0.0046	0.46
0.75	0.0102	0.0070	0.0032	0.32

*ผลการทดลองลากเรือแบบตัวเรือคู่รูปทรงวงรีในถังลากเรือของอินเซล (Insel. 1990)

4.4.3 ความต้านทานเรือแบบตัวเรือคู่

เมื่อพิจารณาความเร็วการเดินทางเรือโดยสารในแม่น้ำลำคลองในเขตกรุงเทพฯ ฯ ของกรมเจ้าท่า ที่กำหนดให้ใช้ความเร็วได้ไม่เกิน 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งเทียบเท่ากับเลขฟรูดเชิงความยาวแนวน้ำ (Fn) ของแบบจำลองในข้อ 4.4.2 ประมาณ 0.5 – 0.7 ประกอบกับที่ความเร็วสูงมาก ๆ เรือจะเกิดการยกตัวขึ้นในแนวตั้งด้วยแรง Hydrodynamic แต่แบบจำลองในการศึกษานี้กำหนดให้เรืออยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ดังนั้นจึงนำแบบจำลองนี้มาใช้วิเคราะห์ความต้านทานเรือเฉพาะในย่านการใช้งานสำหรับเรือโดยสารความเร็วสูงในแม่น้ำ นั่นคือ $Fn = 0.5 - 0.7$

จากความต้านทานรวมของเรือ (R_T) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองในข้อ 4.4.2 สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ (C_T) ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ได้ดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 ค่า C_T ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

จากภาพประกอบ 45 พบว่าในช่วงความเร็วที่ศึกษา C_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงเมื่อ Fn เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอินเซล (Insel. 1990) ซึ่งเป็นการทดลองลากแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู้ในถังลากเรือโดยบังคับไม่ให้เรือมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง พบว่าค่า C_T จากทั้งสองวิธีลดลงเมื่อ Fn เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน โดย C_T ที่ Fn เท่ากับ 0.6 และ 0.7 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าในย่านความเร็วสูงเรือแบบตัวเรือคู้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นเรือโดยสารความเร็วสูงเนื่องจากมีค่า C_T ลดลงเมื่อมีความเร็วเพิ่มขึ้น

ในขั้นตอนต่อไปได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของ C_T ในรูปของสัมประสิทธิ์ความต้านทานอื่น ๆ ดังนี้

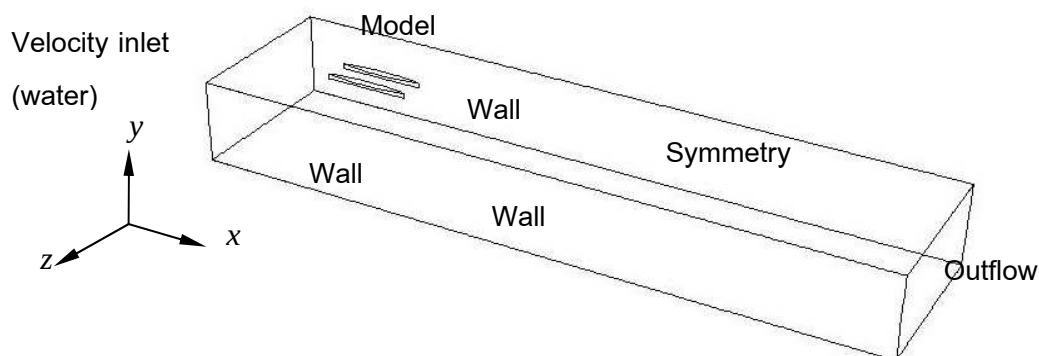
- สัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน (C_F) และสัมประสิทธิ์ความต้านทานตกค้าง (C_R)
- สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (C_V) และสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (C_W)

4.4.4 ความต้านทานความเสียดทานและความต้านทานตกค้าง

ในขั้นตอนนี้ได้ออกแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือคู้ 3 มิติแบบ 1 เฟส โดยดัดแปลงแบบจำลองในข้อ 4.4.3 แต่ไม่พิจารณาส่วนที่เป็นอากาศ ดังภาพประกอบ 46 มาทำการวิเคราะห์ความต้านทานความเสียดทานของเรือแบบตัวเรือคู้ ทั้งนี้แบบจำลองนี้มีเงื่อนไขขอบ ดังนี้

- เงื่อนไขขอบทางเข้า (น้ำ) เป็น Velocity inlet มีความเร็วคงที่ V ในแนวแกน x

- เงื่อนไขขอบผิวน้ำ เป็น Symmetry
- เงื่อนไขขอบทางออก เป็น Outflow
- เงื่อนไขขอบผิวตัวเรือ, พื้น และผนังอ่าง เป็น Stationary wall แบบ No slip condition มีความเร็วที่ผิวเป็นศูนย์



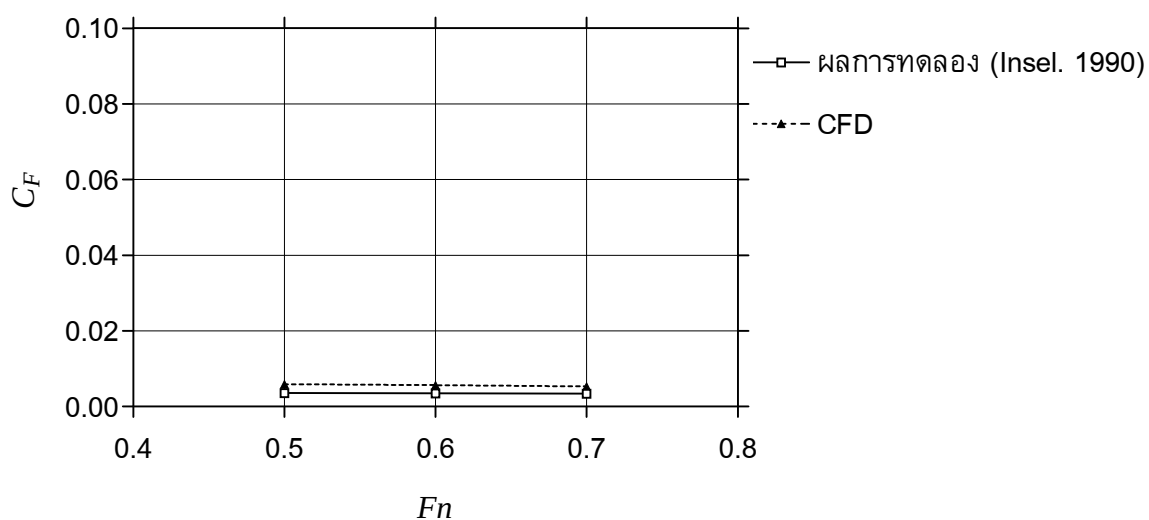
ภาพประกอบ 46 แบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความต้านทานแรงเสียดทาน

ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่มีความหนืดที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ โดยมีเงื่อนไขทาง CFD ดังนี้

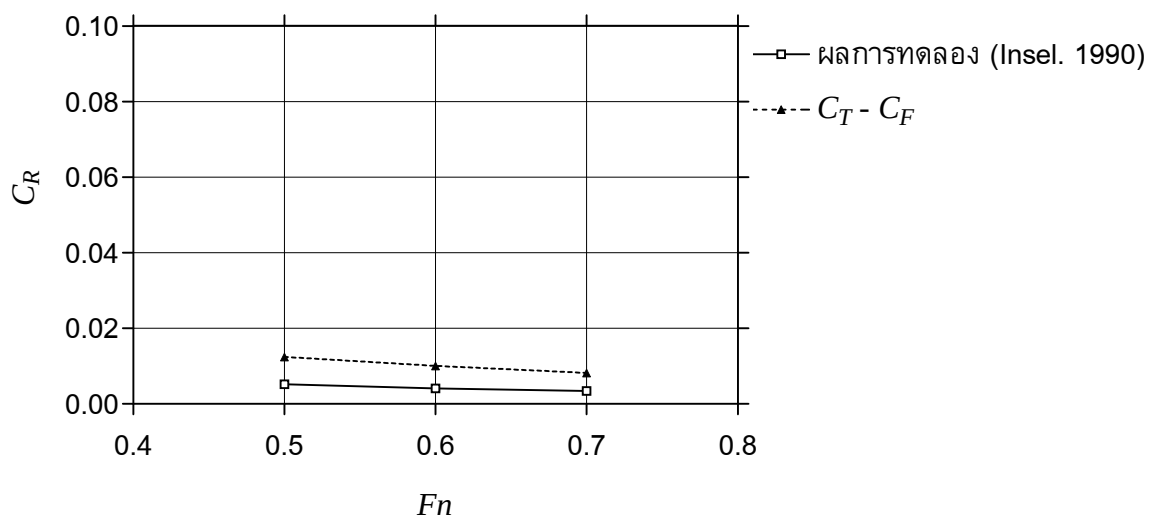
- คำนวณแบบสถานะคงตัวและแบบแปรผันตามเวลา
- ความดัน ใช้วิธีประมาณค่า PRESTO!
- โมเมนตัม ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- $k - \epsilon$ ใช้วิธีประมาณค่า QUICK
- การตรวจสอบความดัน - ความเร็ว ในการคำนวณแบบสถานะคงตัว ใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE
- การตรวจสอบความดัน - ความเร็ว ในการคำนวณแบบแปรผันตามเวลา ใช้วิธีการหาผลเฉลย PISO

จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน (C_F) โดยคำนวณจากความดันสัมผัสในแนวสัมผัสกับพื้นผิวตัวเรือคู่ (Tangential pressure) จากนั้นคำนวณสัมประสิทธิ์ความต้านทานตกค้าง (C_R) จากความสัมพันธ์ $C_R = C_T - C_F$ (ITTC. 1957) โดยใช้ค่า C_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองในข้อ 4.4.3 ทั้งนี้มีผลการคำนวณ C_F และ C_R เปรียบเทียบกับค่าที่

คำนวณได้จากผลการทดลองลากแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ในถังลากเรือในงานวิจัยของอินเซล (Insel. 1990) ดังภาพประกอบ 47 และ 48 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 47 ค่า C_F ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)



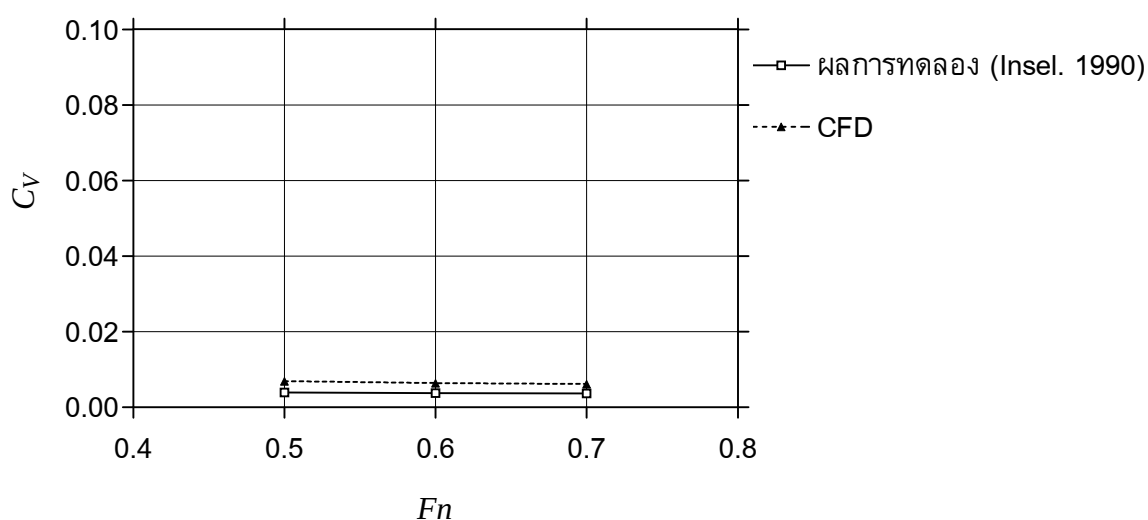
ภาพประกอบ 48 ค่า C_R ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

จากภาพประกอบ 47 จะเห็นได้ว่าในช่วง $Fn = 0.5 - 0.7$ ที่ศึกษานี้ เมื่อ Fn มีค่าเพิ่มขึ้น C_F มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าในย่านความเร็วสูงนี้ การเปลี่ยนแปลงความเร็วจะไม่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน

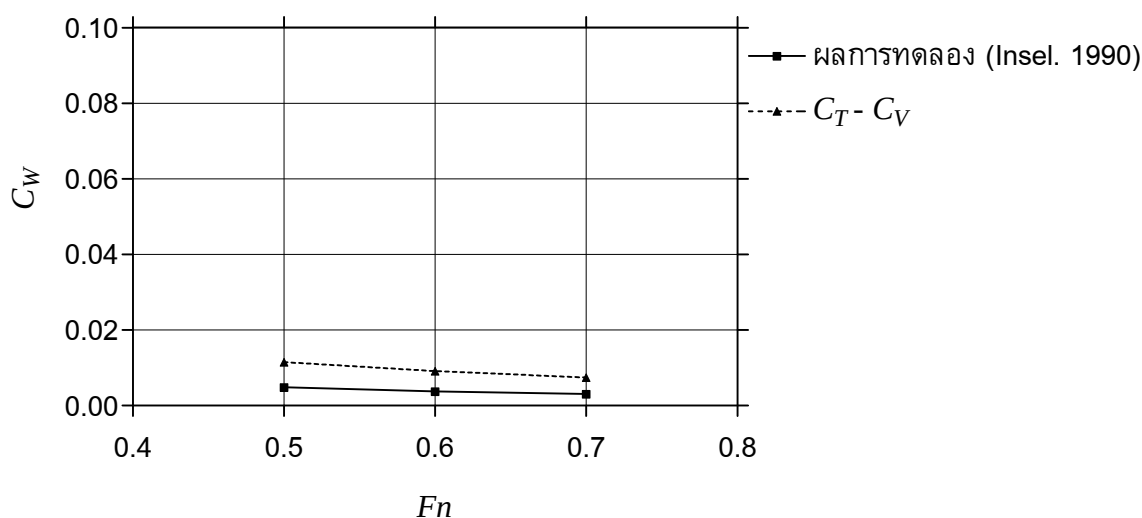
จากภาพประกอบ 48 สำหรับในช่วง Fn ที่ทำการศึกษานี้ ค่า C_R ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ Fn เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วสูงนี้สัมประสิทธิ์ความต้านทานตกค้างหรือผลรวมของสัมประสิทธิ์ความต้านทานอื่น ๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น และสัมประสิทธิ์ความต้านทานความดัน มีค่าลดลงเมื่อเร็วมีความเร็วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือลดลงไปด้วย

4.4.5 ความต้านทานความหนืดและความต้านทานเชิงคลื่น

จากการจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ 3 มิติ แบบ 1 เฟส ในข้อ 4.4.4 นั้น สามารถวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (C_V) ได้ด้วยการคำนวณแรงลัพธ์ที่เกิดจากความดันในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal pressure) และในแนวสัมผัสกับพื้นผิว (Tangential pressure) จากนั้นคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (C_W) จากความสัมพันธ์ $C_W = C_T - C_V$ (ITTC. 1957) โดยใช้ค่า C_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและเงื่อนไข CFD ตามข้อ 4.4.3 ทั้งนี้มีผลการคำนวณ C_V และ C_W เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากผลการทดลองลากแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ในถังลากเรือในงานวิจัยของอินเซล (Insel. 1990) เป็นไปดังภาพประกอบ 49 และ 50 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 49 ค่า C_V ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)



ภาพประกอบ 50 ค่า C_w ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

จากภาพประกอบ 49 ในช่วง $Fn = 0.5 - 0.7$ พบว่า C_V มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่แม้ว่า Fn จะเพิ่มขึ้นก็ตามสอดคล้องกับผลการทดลอง แสดงว่าที่ความเร็วสูง C_V ไม่แปรผันตามความเร็ว ขณะที่จากภาพประกอบ 50 ในช่วงการศึกษาเดียวกัน พบว่า C_w มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ Fn เพิ่มขึ้น แสดงว่าในย่านความเร็วสูงนี้ C_w แปรผันตามความเร็วโดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_w จะลดลง

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณ C_T , C_F , C_R , C_V และ C_w ที่ได้จากแบบจำลอง CFD ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ แล้ว จะเห็นได้ว่าที่ย่านความเร็วสูงนี้ C_T ของเรือแบบตัวเรือคู่มีค่าลดลง โดยองค์ประกอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง C_T นี้ได้แก่ C_w เนื่องจากมีค่าลดลงเมื่อ Fn หรือความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่ C_V ซึ่งรวม C_F ไว้ด้วยนั้น แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ความเร็วย่านนี้เลย

แสดงว่าในย่านความเร็วสูงนี้ ความต้านทานเชิงคลื่นเป็นปัจจัยหลักในความต้านทานรวมของเรือแบบตัวเรือคู่ ดังนั้นการออกแบบตัวเรือคู่ที่ทำให้เกิดคลื่นที่มีขนาดลดลงย่อมทำให้ความต้านทานรวมของเรือลดลงตามไปด้วย ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะได้ศึกษารูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ที่มีความลึกต่าง ๆ เมื่อแล่นตามเส้นทางเดินเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาในเขตกรุงเทพฯ ฯ ต่อไป

4.5 คลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่

เนื่องจากความลึกของเส้นทางเดินเรือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ ประกอบกับเส้นทางเดินเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยามีความลึกประมาณ 6.5 – 8.5 เมตร คิดเป็นเลขฟรูดเชิงความลึก (F_{n_h}) ระหว่าง 0.6 – 0.7 ซึ่งจัดเป็นเขตน้ำตื้น (Van Manen; & Van Oossanen. 1988) ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะได้ทำการศึกษารูปแบบของคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ เมื่อแล่นในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนรอบตัวเรือ 3 มิติ แบบ 2 เฟส เช่นเดียวกับแบบจำลองในข้อ 4.4.1 และเงื่อนไขการคำนวณตามข้อ 4.4.2

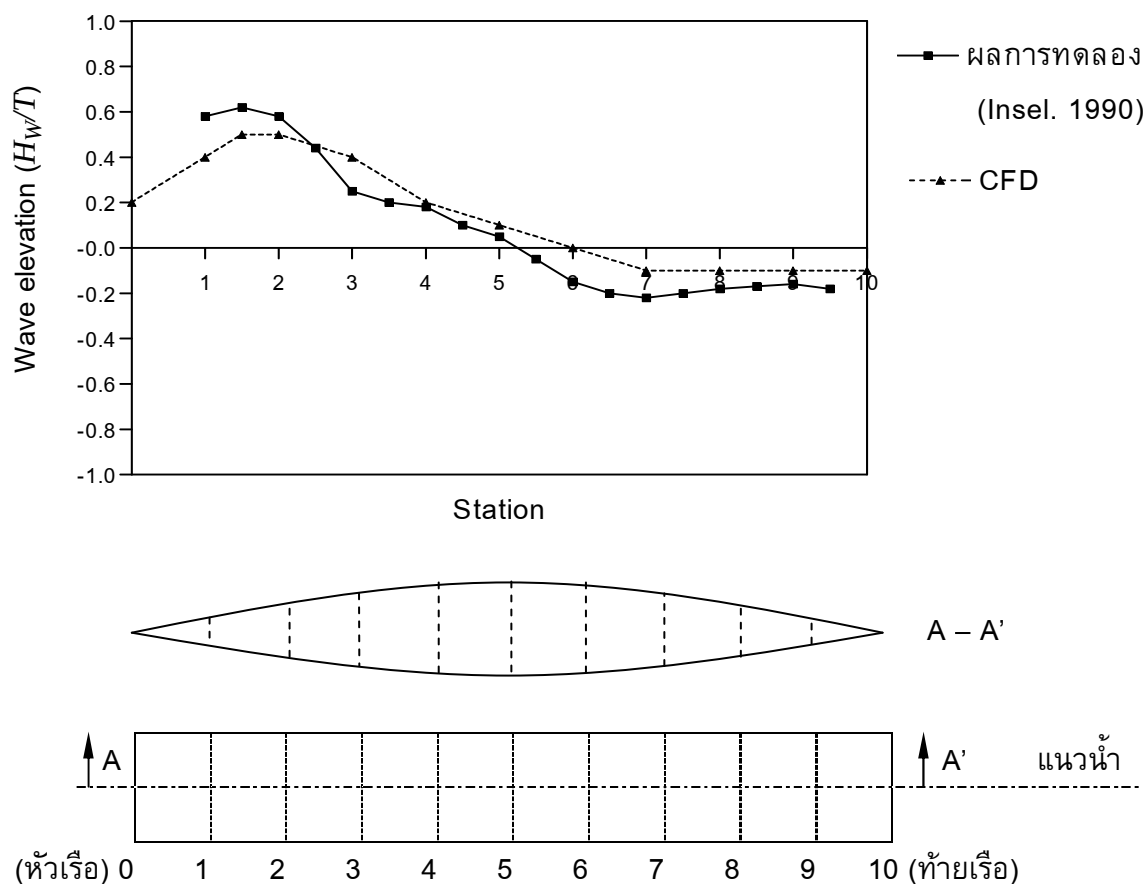
4.5.1 การทดสอบแบบจำลอง

ก่อนการศึกษารูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ที่ความลึกตามเส้นทางเดินเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยานั้น ได้ทำการทดสอบการใช้แบบจำลอง 4.4.1 ในการวิเคราะห์รูปแบบคลื่น โดยการเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับผลการทดลองของอินเซล (Insel. 1990) ที่เลขฟรูดที่ใช้ความยาวแนวน้ำเป็นความยาวอ้างอิง (F_n) เท่ากับ 0.5 ทั้งนี้การทดลองของอินเซลที่ใช้เปรียบเทียบเป็นการทดลองลากแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่รูปทรงวงรีในถังลากเรือโดยจำกัดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ของเรือในแนวตั้งแต่อย่างใด

ความสูงของคลื่นที่ทำการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ถูกวัดในรูปของอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นจากแนวน้ำต่อระยะกินน้ำลึกของเรือ (H_w/T) ซึ่งความสูงของคลื่นนี้สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนปริมาตรของน้ำ (Volume fraction of water) ในแต่ละปริมาตรควบคุมหรือเซลล์ในแบบจำลอง Volume of Fluid (VOF) แบบ Implicit โดยการวัดความสูงของคลื่นในแต่ละตำแหน่งที่สนใจ (หรือ station ในกรณีของตัวเรือคู่) ในการวิจัยนี้ใช้การคำนวณความสูงจนถึงเซลล์ที่มีค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำเป็นศูนย์

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกที่คำนวณได้จากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดลองของอินเซล (Insel. 1990) เป็นไปดังภาพประกอบ 51 เมื่อแบ่งตัวเรือทางข้างออกเป็น 10 ส่วนตามความยาวเรียกว่า Station โดย station 0 หมายถึงหัวเรือ และ station 10 หมายถึงท้ายเรือ

จากภาพประกอบ 51 พบว่ารูปแบบคลื่นที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือ เมื่อน้ำไหลผ่านหัวเรือ (หรือเรือแล่นผ่านตัดน้ำในความเป็นจริง) น้ำจะถูกยกตัวสูงขึ้นจากระดับแนวน้ำ ($H_w/T = 0$) จนเกิดสันคลื่นที่ประมาณ Station 2 จากนั้นคลื่นจะลดต่ำลงและเกิดท้องคลื่นเมื่อผ่านกึ่งกลางลำเรือ (Station 5) และมีความลึกจากแนวน้ำเกือบคงที่เมื่อผ่านท้ายเรือ (station 10) ขณะที่รูปแบบคลื่นจากผลการทดลองพบว่าท้องคลื่นจะมีความลึกลดลงเมื่อเดินทางผ่านไปทางท้ายเรือ



ภาพประกอบ 51 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn = 0.5$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

ในด้านขนาดความสูงและความลึกของคลื่น พบว่าคลื่นที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความสูงและความลึกน้อยกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ซึ่งการใช้ค่าเฉลี่ยของการไหลในแบบจำลองนี้อาจส่งผลต่อการปั่นป่วนของการไหลด้วย นอกจากนี้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit ที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้การกำหนดอัตราส่วนปริมาตรของแต่ละเซลล์เป็นเซลล์ที่บรรจุน้ำหรืออากาศเต็มเซลล์นั้นและทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อเก็บเป็นค่าที่ Node สำหรับการคำนวณต่อไป ทำให้การแบ่งกริดที่บริเวณผิวน้ำจำเป็นต้องมีความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก แสดงว่าการแบ่งกริดอาจมีความละเอียดไม่เพียงพอที่จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของคลื่นนี้ได้ อย่างไรก็ตามความละเอียดในการแบ่งกริดถูกจำกัดด้วยความสามารถในการประมวลผลตลอดจนหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้

ทั้งนี้ความสูงของสันคลื่นที่หัวเรือและท้องคลื่นที่ท้ายเรือมีขนาดน้อยกว่าผลการทดลองเล็กน้อย (15%) ดังผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตามตารางที่ 4

ตาราง 4 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกด้วยวิธี CFD

Station	H/T		ค่าความคลาดเคลื่อน (S-T)	% ความคลาดเคลื่อน
	CFD (S)	ผลการทดลอง* (T)		
0	0.2	-	-	-
1	0.4	0.58	-0.18	-18%
2	0.5	0.58	-0.08	-8%
3	0.4	0.25	0.15	15%
4	0.2	0.18	0.02	2%
5	-0.1	0.05	-0.15	-15%
6	0	-0.15	0.15	15%
7	-0.1	-0.22	0.12	12%
8	-0.1	-0.18	0.08	8%
9	-0.1	-0.16	0.06	6%
10	-0.1	-	-	-

*ผลการทดลองลากเรือแบบตัวเรือคู่รูปทรงวงรีในถังลากเรือของอินเซล (Insel. 1990)

4.5.2 รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษารูปแบบคลื่นที่ความเร็วได้ความเร็ววิกฤตที่สอดคล้องกับความเร็วสูงสุดของเรือ (20 กิโลเมตร/ชั่วโมง หรือ 5.56 เมตร/วินาที) และความลึกของน้ำ (6.5 – 8.5 เมตร) สำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยา นั่นคือที่เลขฟรูดเชิงความลึก Fn_h เท่ากับ 0.6 และ 0.7 โดยใช้แบบจำลองและเงื่อนไขการคำนวณทาง CFD ตามข้อ 4.4.1 แต่ให้ความลึกคงที่ ($h = 1.85$ เมตร) และเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวแกน x (V) ของเรือเพื่อให้ได้ Fn_h ในย่านที่ศึกษา นอกเหนือจากการจำลองการไหลที่ค่า Fn_h ดังกล่าวแล้ว ยังได้จำลองการไหลที่ความเร็ววิกฤต ($Fn_h = 1.0$) เพื่อใช้อ้างอิงการเปลี่ยนแปลงของคลื่นระหว่างการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดการคำนวณ Fn_h สำหรับแบบจำลอง ดังตาราง 5

ตาราง 5 การคำนวณ Fn_h สำหรับการวิเคราะห์คลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่

$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}}$	เรือโดยสารจริง		แบบจำลอง CFD	
	h (เมตร)	V (เมตร/วินาที)	h (เมตร)	V (เมตร/วินาที)
0.6	8.50	5.56	1.85	2.56
0.7	6.50	5.56	1.85	2.98
1.0	-	-	1.85	4.26

เมื่อพิจารณาสัดส่วนปริมาตรของน้ำในแบบจำลอง สามารถแสดงรูปแบบคลื่นและความสูงของคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกที่ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0 ดังภาพประกอบ 52 และ 53 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 52 พบว่ารูปแบบคลื่นที่ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0 มีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือ เมื่อน้ำไหลผ่านหัวเรือ น้ำจะถูกยกตัวสูงขึ้นจากระดับแนวน้ำจนเกิดเป็นสันคลื่น จากนั้นระดับน้ำจะลดต่ำลงและเกิดเป็นท้องคลื่นเมื่อผ่านกึ่งกลางลำเรือ และคลื่นจะค่อย ๆ สูงขึ้นเมื่อผ่านท้ายเรือ

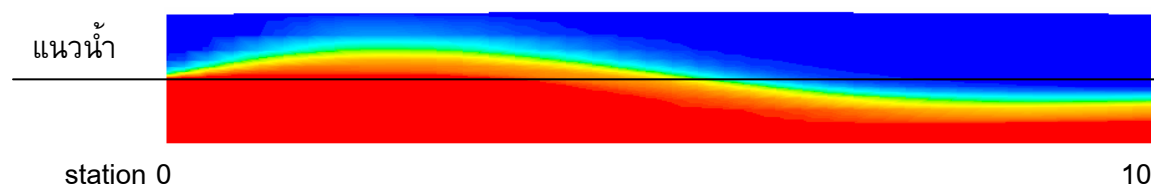
เมื่อพิจารณาจากความสูงของคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกตามภาพประกอบ 53 พบว่าคลื่นที่ความเร็ววิกฤต ($Fn_h = 1.0$) มีค่า H_w/T สูงกว่าความเร็วใต้วิกฤต ($Fn = 0.6$ และ 0.7) โดยคลื่นที่ $Fn_h = 1.0$ มีความสูงมากที่สุดและคลื่นที่เกิดที่ $Fn_h = 0.6$ มีความสูงน้อยที่สุด

ที่ความลึกของเส้นทางเดินเรือในรูปของ $Fn_h = 0.6$ และ 0.7 เมื่อพิจารณาคลื่นที่เกิดที่พบว่าคลื่นที่เกิดจากแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการเกิดคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกคล้ายกัน แต่ที่ตำแหน่ง station เดียวกัน คลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ มีความสูงมากกว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.6$

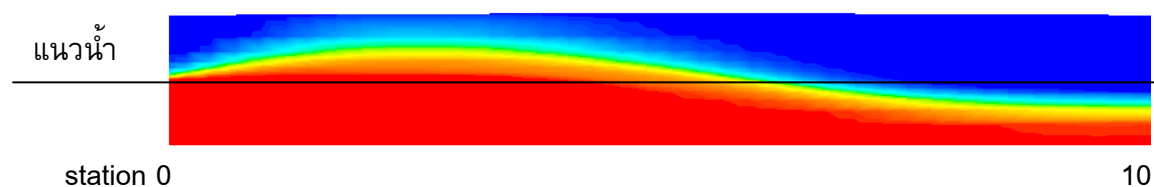
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจุดที่คลื่นตัดกับระดับผิวน้ำ ($h = 0$) จะพบว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ ยังเดินทางได้ไกลกว่า ที่ $Fn_h = 0.6$ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาในแง่ความลึกของเส้นทางเดินเรือ พบว่าความลึกมีผลต่อความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ โดยเมื่อเรือแล่นในน้ำตื้นจะมีคลื่นที่สูงกว่า

ผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chandrababha; et al. 2004) ซึ่งกล่าวว่าที่ความเร็ววิกฤตคลื่นจะมีความสูงมากกว่าคลื่นที่เกิดที่ความเร็วใต้วิกฤต ดังนั้นถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ความสูงของคลื่นด้วยแบบจำลอง CFD ที่ใช้ในการวิจัยนี้จะไม่สามารถทำนายความสูงของคลื่นได้อย่างแม่นยำแต่มีผลสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา ทำให้แบบจำลองนี้มีความ

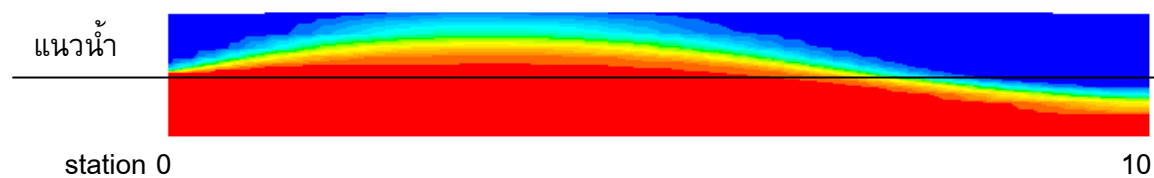
เหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ในการศึกษาขั้นต่อไป



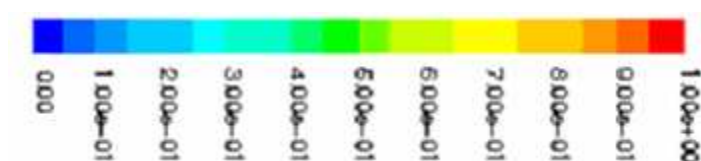
(ก) $Fn_h = 0.6$



(ข) $Fn_h = 0.7$

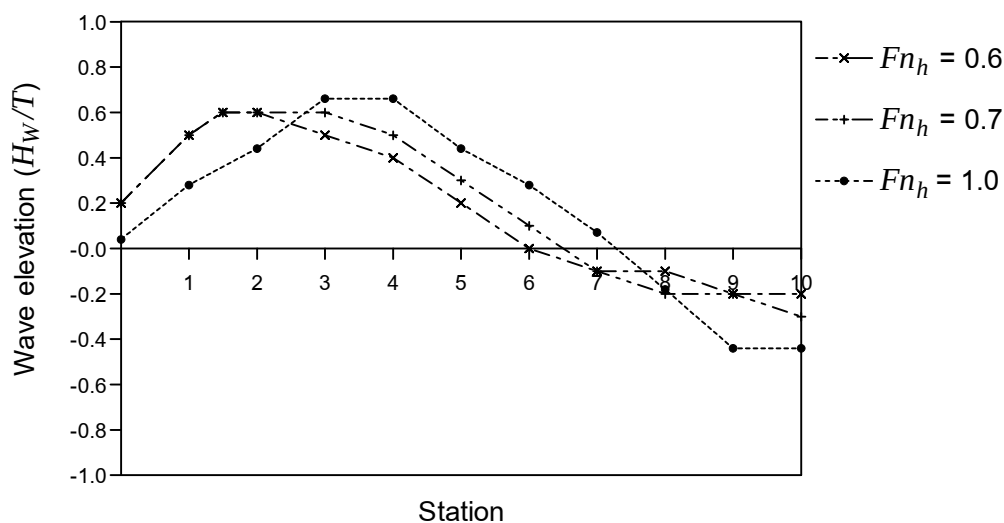


(ค) $Fn_h = 1.0$



สัดส่วนปริมาตรของน้ำในเซลล์

ภาพประกอบ 52 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0
($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

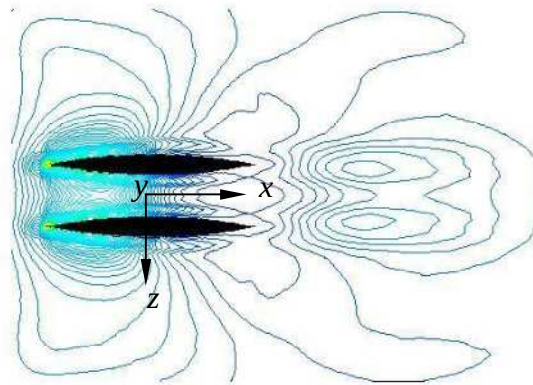
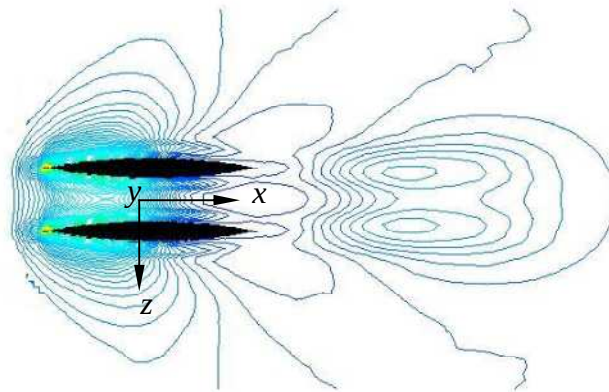
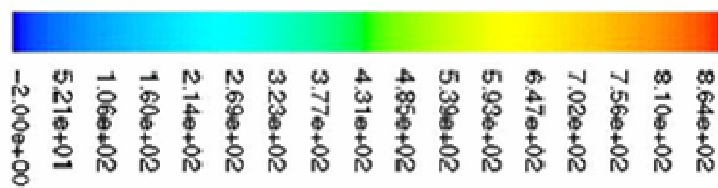


ภาพประกอบ 53 ความสูงของคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn_h = 0.6, 0.7$ และ 1.0
($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

นอกจากรูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์รูปแบบของระบบคลื่นที่ผิวน้ำที่ Fn_h เท่ากับ 0.6 และ 0.7 โดยการพิจารณาความดันสถิต (Static pressure) ที่แนวระดับท้องเรือ ($y = -0.1125$ เมตร) เนื่องจากความดันสถิตแปรผันตามความสูงของน้ำจากแนวระดับนี้ ดังภาพประกอบ 54

จากภาพประกอบ 54 พบว่าที่ $Fn_h = 0.7$ ระบบคลื่นที่เกิดจากเรือทั้งชุดคลื่นที่หัวเรือกลางลำ และท้ายเรือ ต่างเดินทางไปได้ไกลกว่าคลื่นที่เกิดจากเรือที่ $Fn_h = 0.6$ แต่ระบบคลื่นที่กระจายออกจากหัวเรือที่ $Fn_h = 0.6$ กระจายออกไปด้านข้างมากกว่าที่ $Fn_h = 0.7$ และเนื่องจาก Fn_h แปรผกผันกับความลึกของน้ำ สรุปได้ว่าเมื่อเรือแบบตัวเรือคู่แล่นด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะเกิดคลื่นกระจายออกจากตัวเรือไกลขึ้นไปทางท้ายเรือเมื่อเรือแล่นในเขตน้ำที่ตื้นกว่า

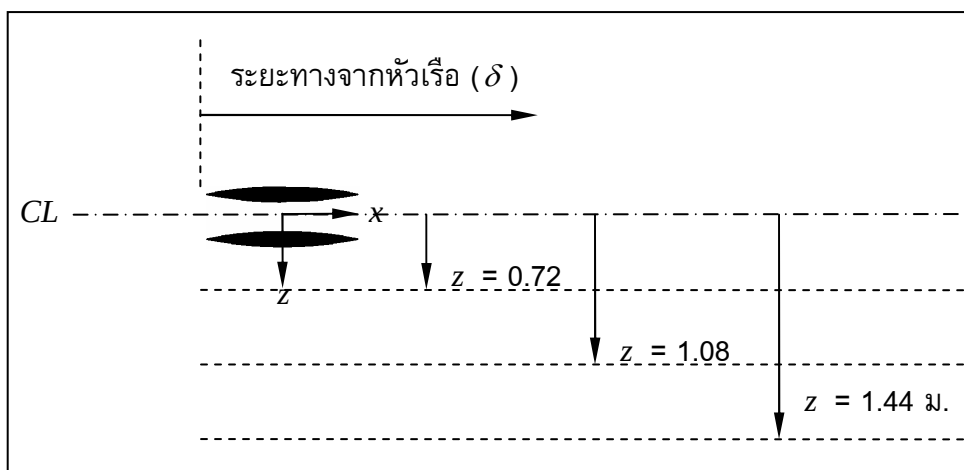
นอกจากนี้ที่ความลึกทั้งสอง ยังพบว่าพื้นที่ระหว่างตัวเรือคู่มีความหนาแน่นของคลื่นสูง โดยที่หัวเรือมีความดันสถิตสูงที่สุด เมื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวเรือกับผนังอ่างจะพบว่าระบบคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองนี้ไม่แสดงลักษณะคลื่นที่สะท้อนจากผนัง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้ มีระยะห่างเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบของผนังต่อคลื่นที่เกิดจาก

(ก) $Fn_h = 0.6$ (ข) $Fn_h = 0.7$ 

(Pascal)

ภาพประกอบ 54 รูปแบบคลื่นที่ผิวน้ำในรูปของความดันสถิต ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

การศึกษาต่อไปเป็นการวิเคราะห์รูปแบบของระบบคลื่นที่ผิวน้ำ ในระนาบ $x - y$ ห่างจากกึ่งกลางเรือแบบตัวเรือคู่เป็นระยะทางจากกึ่งกลางตัวเรือ (z) เท่ากับ $0.4L$, $0.6L$ และ $0.8L$ (0.72 เมตร, 1.08 เมตร และ 1.44 เมตร) ดังภาพประกอบ 55

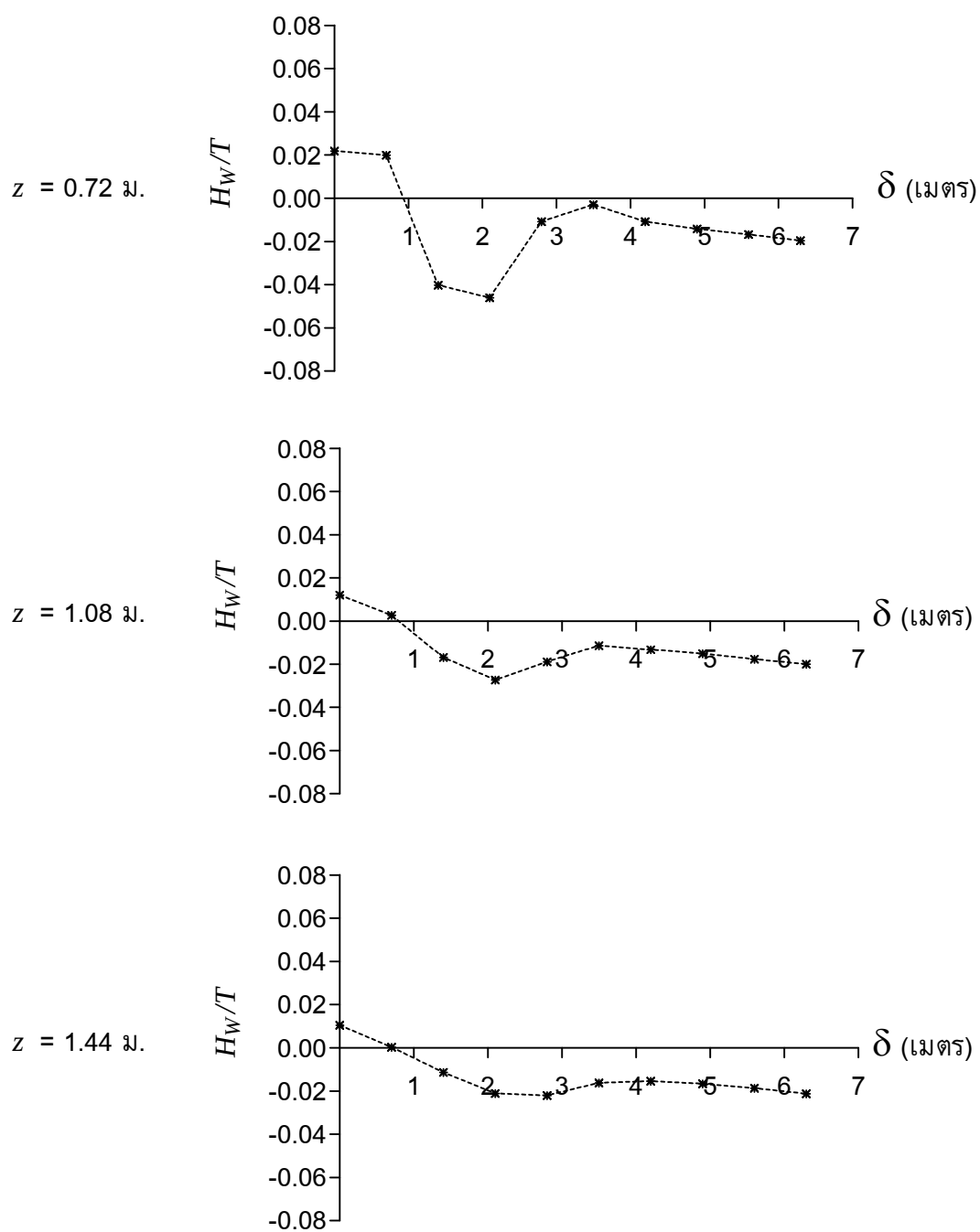


ภาพประกอบ 55 ระยะห่างจากตัวเรือ (z) ในการศึกษาารูปแบบคลื่น

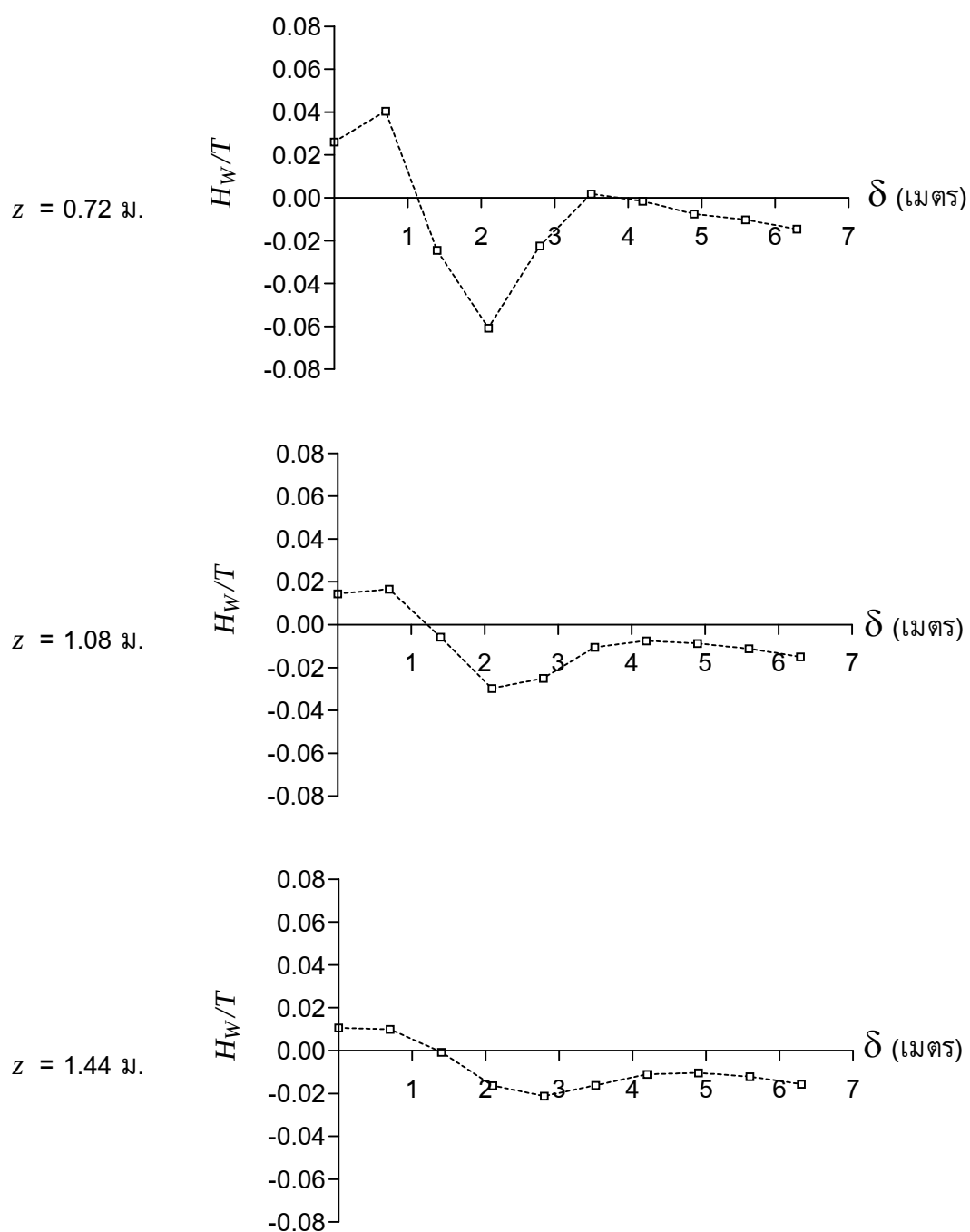
โดยมีผลการวิเคราะห์รูปแบบของระบบคลื่นในรูปของ H_w / T ตามทิศทางการแล่นของเรือจากหัวเรือถึงปลายน้ำของแบบจำลอง ดังภาพประกอบ 56 และ 57

จากภาพประกอบ 56 และ 57 พบว่าที่ $Fn_h = 0.6$ และ 0.7 คลื่นมีความสูงของสันคลื่นและความลึกของท้องคลื่นลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเดินทางห่างออกไปจากตัวเรือ โดยความสูงของคลื่นมีค่าลดลงประมาณ 50% เมื่อเดินทางห่างจากตัวเรือเป็นระยะทาง $0.8L$ (1.44 เมตร)

อย่างไรก็ตามรูปแบบคลื่นที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง CFD ที่ใช้ในการวิจัยนี้ พบว่าระดับน้ำด้านท้ายเรือจะไม่คืนสู่ระดับแนวน้ำเริ่มต้น ($h = 0$) ซึ่งในความเป็นจริงระดับน้ำท้ายเรือควรจะคืนสู่ระดับแนวน้ำเริ่มต้น ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากการแบ่งกริดที่บริเวณผิวน้ำมีความละเอียดไม่เพียงพอสำหรับแบบจำลอง VOF แบบ Implicit ทำให้ประมาณค่าความสูงของคลื่นในแบบจำลองไม่เป็นไปตามความเป็นจริง เนื่องจากแบบจำลอง VOF แบบ Implicit นี้ ใช้การกำหนดอัตราส่วนปริมาตรของแต่ละเซลล์เป็นบรรจุน้ำหรืออากาศเต็มเซลล์เท่านั้น และทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อเก็บเป็นค่าที่ Node สำหรับการคำนวณต่อไปดังได้กล่าวมาแล้วในขั้นตอนการศึกษาที่ผ่านมา



ภาพประกอบ 56 รูปแบบคลื่นที่ระยะห่างจากตัวเรือต่าง ๆ เมื่อ $Fn_h = 0.6$



ภาพประกอบ 57 รูปแบบคลื่นที่ระยะห่างจากตัวเรือต่าง ๆ เมื่อ $Fn_h = 0.7$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาแนวทางการจำลองการไหลรอบตัวเรือด้วยวิธี CFD

จากการศึกษาพบว่าสามารถจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบตัวเรือคู่ได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยแบบจำลอง 2 มิติแม้จะไม่สามารถระบุค่าที่แท้จริงได้ แต่สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (C_D) ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง 2 มิติ มีความสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ (C_T) ทำให้แบบจำลอง 2 มิตินี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเร็วของตัวเรือคู่ต่อความต้านทานของเรือได้ ทั้งนี้การแบ่งกริดที่เหมาะสมในแง่ของข้อจำกัดด้านคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณสำหรับการหา (C_D) ได้แก่ การแบ่งกริดรูปสี่เหลี่ยมแบบโครงสร้างปกติ (Structured grid) ที่มีพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุมเล็กที่สุดประมาณ 4×10^{-7} ตารางเมตร ส่วนแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่เหมาะสมกับการแบ่งกริดข้างต้นได้แก่ แบบจำลอง $k-\varepsilon$ และใช้การคำนวณแบบสถานะคงตัว (Steady state scheme) ในการหาผลเฉลยที่การลู่เข้าของ Residuals น้อยกว่า 10^{-8}

สำหรับแบบจำลอง 3 มิติ สามารถใช้ในการศึกษาความต้านทาน, สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ และสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความต้านทานของเรือ ตลอดจนรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ โดยเป็นการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 เฟส ประกอบด้วยน้ำและอากาศ ด้วยแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ร่วมกับแบบจำลอง Volume of Fluid (VOF) แบบ Implicit ทั้งนี้การแบ่งกริดที่เหมาะสมในการคำนวณได้แก่กริดทรงหกหน้าแบบโครงสร้างปกติที่มีพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรควบคุมขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 2.5×10^{-3} ตารางเมตร ในการคำนวณหาผลเฉลยจำเป็นต้องใช้การคำนวณแบบสถานะคงตัวร่วมกับการคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Time dependent calculation) โดยใช้ขนาดขั้นเวลาเท่ากับ 0.1 วินาที ที่การลู่เข้าของ Residuals น้อยกว่า 10^{-4}

5.1.2 การศึกษาแนวทางการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่โดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่และความเร็วของตัวเรือคู่ด้วยวิธี CFD

การศึกษาระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ในรูปของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ต่อความยาวแนวหน้า (S/L) และความเร็วของตัวเรือคู่ในรูปของอัตราส่วนความยาวแนวหน้าต่อความกว้างสุดที่แนวหน้า (L/B) ด้วยแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 2 มิติ พบว่าระยะห่าง

ระหว่างตัวเรือคู่และความเพรียวของตัวเรือคู่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (C_D) โดยความต้านทานของเรือมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน S/L เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อัตราส่วน S/L ที่เหมาะสมทั้งในด้านลดความต้านทานและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างคาน้ำในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่ในช่วง $S/L = 0.2 - 0.5$ ได้แก่ $S/L = 0.3$

เช่นเดียวกับความเพรียวของตัวเรือ ซึ่งพบว่าในช่วง $L/B = 7 - 12$ เมื่ออัตราส่วน L/B เพิ่มขึ้นความต้านทานของเรือมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นจึงควรออกแบบตัวเรือคู่ให้มีความเพรียวมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

5.1.3 การศึกษาความต้านทานของเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ด้วยวิธี CFD

จากการจำลองการไหลรอบตัวเรือคู่ 3 มิติ ทั้งแบบ 2 เฟส และแบบ 1 เฟส พบว่าความต้านทานของเรือ (R_T) เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเรือในรูปของเลขฟรูดที่ใช้ความยาวแนวน้ำเป็นความยาวอ้างอิง (Fn) เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ (C_T) ในช่วง $Fn = 0.5 - 0.7$ ซึ่งเป็นย่านความเร็วที่อนุญาตให้ใช้สำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาในเขตกรุงเทพฯ พบว่า C_T มีค่าลดลงเมื่อความเร็วสูงขึ้น โดยสัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน (C_F) และสัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (C_V) ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็ว ขณะที่สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (C_W) มีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในย่านความเร็วสูงนี้ C_T มีค่าขึ้นอยู่กับ C_W ดังนั้นการใช้เรือที่ความเร็วสูงสามารถออกแบบเรือให้มี C_T ลดลงได้หากออกแบบให้เรือมี C_W ลดลง

เมื่อพิจารณาความลึกของเส้นทางเดินเรือสำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาในรูปของเลขฟรูดเชิงความลึก (Fn_h) ระหว่าง $0.6 - 0.7$ พบว่าเส้นทางดังกล่าวจัดเป็นเขตน้ำตื้น เมื่อศึกษารูปแบบคลื่นที่ความเร็วคงที่พบว่าขนาดของสันคลื่นมีความสูงเพิ่มขึ้นและเดินทางได้ไกลกว่าเมื่อ Fn_h เพิ่มขึ้นหรือความลึกลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าคลื่นจะค่อย ๆ ลดความสูงลงเมื่อเดินทางห่างออกไปจากตัวเรือ โดยขนาดของคลื่นลดลงประมาณ 50% สำหรับระยะทางห่างจากกึ่งกลางระหว่างตัวเรือคู่ 0.8 เท่าของความยาวแนวน้ำ ดังนั้นในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่สำหรับใช้งานในย่านความเร็วสูงควรมีการพิจารณาความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือเนื่องจากความลึกของน้ำประกอบด้วย

ทั้งนี้แบบจำลองการไหล 3 มิติที่ใช้ในการศึกษานี้ยังไม่สามารถให้ผลในด้านขนาดของความต้านทานและสัมประสิทธิ์ความต้านทาน รวมทั้งความสูงของคลื่นได้อย่างแม่นยำ แต่สามารถแสดงแนวโน้มได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่มีเผยแพร่และทฤษฎีจึงสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือเบื้องต้นในการออกแบบเรือได้

5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในอนาคต

เนื่องจากผลเชิงปริมาณของงานวิจัยนี้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ประกอบกับคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อให้ได้แบบจำลองทาง CFD ที่ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ดังนี้

5.2.1 การแบ่งจำนวนกริดที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือ 3 มิติ แบบ 2 เฟส ที่ใช้แบบจำลอง VOF แบบ Implicit ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ โดยมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดของรูปทรงหกเหลี่ยมที่ใช้ในการแบ่งกริดน้อยกว่า 2.5×10^{-3} ตารางเมตร

5.2.2 การใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนชั้นสูง เช่น แบบจำลองการไหลปั่นป่วน Reynolds Stress Model (RSM)

5.2.3 การใช้แบบจำลอง VOF ชั้นสูง เช่น Euler Explicit หรือ Geo-Reconstruct ร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงในการจำลองการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ

5.2.4 การใช้คอมพิวเตอร์ที่มีระบบประมวลผลที่มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำที่เหมาะสม เช่น การใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลแบบคู่ขนาน

5.2.5 การจำลองการไหลกับเรือแบบตัวเรือคู่ตามรูปทรงที่ใช้จริง เช่น ตัวเรือคู่แบบอสมมาตร (Asymmetric hull configuration) หรือตัวเรือคู่แบบท้ายตัด (Transom stern) เป็นต้น

5.3 การประยุกต์ผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

5.3.1 นำแบบจำลองการไหลรอบตัวเรือด้วยวิธี CFD ไปใช้ในการออกแบบเรือเบื้องต้น (Preliminary design) เพื่อศึกษา วิเคราะห์ และทำนายความต้านทานของเรือ นำไปสู่แบบเรือที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการทดลองลากเรือจำลองในอ่างน้ำ

5.3.2 การนำข้อมูลระยะห่างระหว่างตัวเรือ ความเพียวของตัวเรือ ความต้านทานรวม และความสัมพันธ์ของรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือกับความเร็วและความลึกของน้ำไปใช้ในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่เพื่อใช้งานต่อไป โดยเฉพาะการออกแบบเรือโดยสารแบบลดคลื่นบนพื้นฐานของเรือแบบตัวเรือคู่ในแม่น้ำเจ้าพระยา

5.3.3 ประยุกต์ใช้ในการศึกษารูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ ทั้งจากการเปลี่ยนความเร็วหรือ ความลึกของเส้นทาง ตลอดจนศึกษาลักษณะของคลื่นที่เกิดจากเรือในบริเวณที่สนใจ เช่น บริเวณริมฝั่งแม่น้ำ เป็นต้น เพื่อออกแบบแนวทางในการกำหนดเส้นทางเดินเรือเพื่อประหยัดพลังงานและลดคลื่น

5.3.4 ประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้ในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบเปิด (Open channel) สำหรับการไหลอื่น ๆ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวน้ำ เช่น การไหลของน้ำในฝายกั้นน้ำ เป็นต้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมเจ้าท่า. ประกาศกรมเจ้าท่า ที่ 324/2536 เรื่องกำหนดความเร็วการเดินทางเรือในคลองแสนแสบ.
- ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 110 ตอนที่ 159 หน้า 14. 12 ตุลาคม 2536.
- สัตยา จันทรประภา. (2550, มกราคม). เรือโดยสารลดคลื่นเพื่อการประหยัดพลังงาน (*Low wash waterbus*). วารสารกรมอุทกหารเรือ. ฉบับพิเศษ : 83 - 90.
- อนันต์ สดับพจน์. (2010). การนำร่อง เล่ม ๒ การนำร่องในเขตท่าเรือกรุงเทพ ฯ. สืบค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2553, จาก <http://www.marinethai.com>
- Armstrong, N. (1995). *An Investigation into the Form Factor of High Speed Light Craft*. First AMECRC Postgraduate Student Conference. Australia.
- Chandrababha, S.; et al. (2547). *An Experimental Investigation into Wash Wave and Resistance of High Speed Displacement Craft in Shallow Water*. ใน เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18. ขอนแก่น.
- Couser, P. R.; et al. (1997). *Calm Water Powering Predictions for High-speed Catamarans*, Fast'97, Australia.
- Fluent User's Guide Version 6.0*. (2001). Fluent Inc. USA.
- Gambit Tutorial Guide*. (1998). Fluent Inc. USA.
- Insel, M. (1990). *An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans*, [Ph.D. thesis]. Department of Ship Science, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Southampton. Southampton, UK, 378p.
- Insel, M.; & Molland, A. F. (1991). *An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans*. Proceeding of Meeting of the Royal Institution of Naval Architects. London.
- International Towing Tank Conference. (1957). *Proceedings of the 8th ITTC*, Madrid, Spain. Canal de Experiencias Hidrodinamias, El Pardo, Madrid, Spain.
- International Towing Tank Conference. (1999). *ITTC Quality Manual 4.9 – 04 – 02 – 01; CFD General Uncertainty Analysis in CFD Examples for Resistance and Flow*. 22nd International Towing Tank Conference.
- International Towing Tank Conference. (2002). *ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5 – 02 – 02 – 01; Testing and Extrapolation Methods Resistance: Resistance Test*. 23rd International Towing Tank Conference

- Jachowski, J. (2007). *Assessment of ship squat in shallow water using CFD*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Volume VIII; 27 – 36.
- Kumar, M.; & Subramanian, V.A. (2007). *A numerical and Experiment Study on Tank Wall Influences in Drag Estimation*. Ocean Engineering. Volume 34, January 2007. 192 – 205.
- Leer-Anderson, M.; et al. (2000). *Wash Waves – Problems and Solutions*, Proceedings of The Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting.
- Moraes, H. B.; Vasconcellos, J. M.; & Latorre, R. G. (2004). *Wave Resistance for High-Speed Catamarans*. Ocean Engineering. Volume 31; 2253 – 2282.
- Patankar, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. 1st Edition. Hemisphere, Washington D.C., USA, 197p.
- Rawson, K. J.; & Tupper, E. C. (1994). *Basic Ship Theory Volume I & II*. 4th Edition. Longman Scientific & Technical, Essex, England. 696p.
- Southampton Solent University. (2009). BEng (Hons) Yacht and Powercraft Design (Full Time) Course Overview. Retrieved October 8, 2009, from http://www.solent.ac.uk/courses/undergraduate/yacht_and_powercraft_design_beng/course_details.aspx
- Stumbo, S.; Fox, K.; & Elliott, L. (1999). *Hull Form Considerations in the Design of Low Wake Wash Catamarans*. Proceedings of Society of Naval Architects and Marine Engineers. USA.
- Tabaczek, T. (2008). *Computation of Flow around Inland Waterway Vessel in Shallow Water*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Volume VIII; 97 – 105.
- Tarafder, M. S.; & Suzuki, K. (2007). *Computation of Wave-making Resistance of a Catamaran in Deep Water Using a Potential-based Panel Method*. Ocean Engineering. Volume 34; 1892 – 1900.
- Thornhill, E.; et al. (2003). *Planing Hull Performance Evaluation Using a General Purpose CFD Code*, Proceedings of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Utama, I. K. A. P.; & Molland, A. F. (2001). *Experimental and Numerical Investigations into Catamaran Viscous Resistance*. Proceedings of Sixth International Conference on Fast Sea Transportation. Southampton University. England; 295-306.
- Van Manen, J. D.; & Van Oossanen, P. (1988). *Chapter V Resistance*. In *Principles of Naval Architecture, Volume III*. Lewis EV, editor. pp 1 – 125. 1st Edition. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. USA.

Versteeg, H. K.; & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 1st Edition. Longman Scientific & Technical, Essex, England. 255p.

White, F. M. (1991). *Viscous Fluid Flow*. 2nd Edition. McGraw-Hill, Inc. Singapore.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวเรือแบบวิกเลีย (Wigley Hull)

ตัวเรือคู่ของแบบจำลองที่ใช้ในการวิจัยนี้มีรูปทรงแบบวิกเลีย (Wigley hull) ซึ่งมีรูปทรงแบบพาราโบลา (Parabolic) ดังภาพประกอบ ก ซึ่งมีมิติของตัวเรือมีขนาดเป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้

$$z = \pm \frac{1}{2} b (1 - 4x^2) + \left(1 - \frac{y^2}{d^2} \right)$$

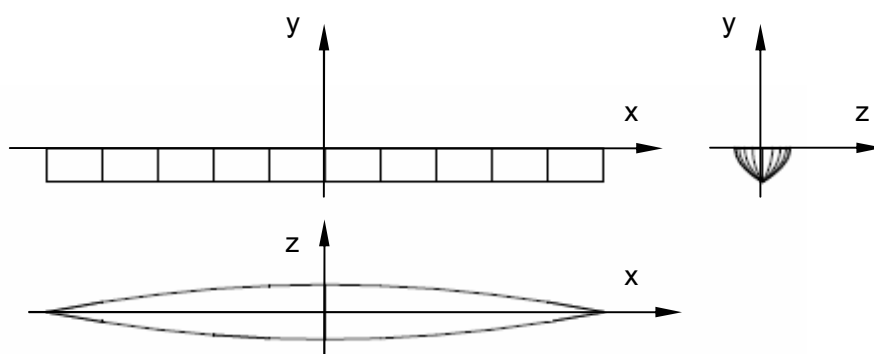
เมื่อ x เป็น ความยาวของเรือ และ $-\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2}$

y เป็น ความลึกของเรือ และ $-d \leq y \leq 0$

z เป็น ความกว้างของเรือ

$b = \frac{B}{L_{wl}}$ เมื่อ B เป็นความกว้างสุดที่กลางลำเรือ และ L_{wl} เป็นความยาวเรือที่แนวน้ำ

$d = \frac{T}{L}$ เมื่อ T เป็นระยะกินน้ำลึก



ภาพประกอบ ก ตัวเรือแบบวิกเลีย (Wigley hull)

ภาคผนวก ข

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

$\vec{A}$	=	เวกเตอร์พื้นที่ผิวของปริมาตรควบคุม
$\vec{A}_f$	=	เวกเตอร์พื้นที่ผิว f
A_0	=	ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$
A_S	=	ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ $k-\varepsilon$
A_S	=	พื้นที่ผิวตัวเรือใต้แนวน้ำ
a_{nb}	=	สัมประสิทธิ์เชิงเส้นของปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรควบคุมใกล้เคียง
a_p	=	สัมประสิทธิ์เชิงเส้นของปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรควบคุม
$\overline{a_p}$	=	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมการโมเมนตัม
$\vec{a}$	=	จุดใด ๆ บนผิวน้ำ
B	=	ความกว้างสุดที่กลางลำเรือ (Breadth)
$\vec{b}$	=	เวกเตอร์ตำแหน่งจุดกึ่งกลางผืนปริมาตรควบคุม
C_F	=	สัมประสิทธิ์ความต้านทานความเสียดทาน
C_T	=	สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ
C_V	=	สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด
C_W	=	สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น
d_f	=	ฟังก์ชันของค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมการโมเมนตัม
Fn	=	เลขฟรูด (Froude number)
Fn_h	=	เลขฟรูดเนื่องจากความลึกของน้ำ
f	=	ค่าที่ผืนของปริมาตรควบคุม
G_b	=	ค่าคงที่การเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
G_k	=	ค่าคงที่การเกิดพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเนื่องจากค่าเฉลี่ยความชัน ความเร็ว
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s^2
$\vec{g}$	=	เวกเตอร์แรงโน้มถ่วง
$\hat{g}$	=	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแรงโน้มถ่วง
h	=	ความลึกของน้ำ

H	=	ความสูงของตัวเรือเหนือแนวน้ำ
H_w	=	ความสูงของคลื่น
I	=	เทนเซอร์หนึ่งหน่วย
I	=	ความเข้มการไหลแบบปั่นป่วน
I_C	=	ผลต่างกลาง
J_f	=	ฟลักซ์ของมวลที่ผนัง
$\hat{J}_f$	=	ค่าที่ที่อิทธิพลต่อความเร็วในปริมาตรควบคุม
k	=	ตัวคุณรูปทรง (Form factor)
k	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy)
ℓ	=	ความยาวสัดส่วนการไหลแบบปั่นป่วน
L	=	ความยาวตัวเรือที่ระดับแนวน้ำ
L_w	=	ความยาวคลื่น
L'_w	=	ความยาวคลื่นลู่ออก
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลของมวล, kg/s
N_{faces}	=	จำนวนผิวที่อยู่รอบปริมาตรควบคุม
p	=	ความดันสถิต, N/m ²
p_S	=	ความดันสถิต, N/m ²
p^*	=	ความดัน, N/m ²
p'	=	ความดันขดเซย์ในปริมาตรควบคุม
p_f	=	ความดันผนังปริมาตรควบคุม
p_P	=	ความดันภายในปริมาตรควบคุมด้านหนึ่งของผนังปริมาตรควบคุม
p_W	=	ความดันภายในปริมาตรควบคุมด้านหนึ่งของผนังปริมาตรควบคุม
Re	=	เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number)
Re_d	=	เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับทรงกลม
Re_l	=	เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับแผ่นเรียบ
Rn	=	เลขเรย์โนลด์ส์สำหรับตัวเรือ
R_T	=	ความต้านทานรวมของเรือ
R_V	=	ความต้านทานความหนืด
R_w	=	ความต้านทานเชิงคลื่น
S	=	ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ของเรือแบบตัวเรือคู่
S	=	มอดุลัสของเทนเซอร์อัตราเฉื่อยความเครียด
S_ϕ	=	แหล่งกำเนิดของปริมาณสเกลาร์ต่อหน่วยปริมาตร
U_f	=	ฟลักซ์ที่ผ่านผนังตามทิศทางความเร็วตั้งฉาก

u	=	ความเร็วในแนวแกน x
V	=	ความเร็วเรือ, m/s
V	=	ปริมาตรควบคุม
V_C	=	ความเร็วของคลื่นที่ผิวหน้า, m/s
v	=	ความเร็วในแนวแกน y
w	=	ความเร็วในแนวแกน z

สัญลักษณ์ภาษากรีก

α	=	มุมเขี้ยว หรือมุมที่จุดตัดของคลื่นทางขวางและคลื่นลู่ออก (Cusp angle)
α_{air}	=	สัดส่วนปริมาตรของอากาศ
α_{water}	=	สัดส่วนปริมาตรของน้ำ
β	=	มุมระหว่างแนวตั้งฉากของสันคลื่นลู่ออกกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ
δ_S	=	ค่าคลาดเคลื่อนการจำลอง
δ_{SM}	=	ค่าคลาดเคลื่อนแบบจำลอง
δ_{SN}	=	ค่าคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข
ε	=	อัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน (Turbulence dissipation rate)
ε_{SN}	=	ค่าคลาดเคลื่อนในการประมาณ
ϕ	=	สมบัติของไหลหรือปริมาณสเกลาร์
ϕ'	=	ส่วนความปั่นป่วน
Φ	=	ส่วนค่าเฉลี่ยคงตัว
ϕ_f	=	ค่าของปริมาณสเกลาร์ที่ผ่านผิวของปริมาตรควบคุม
$\tilde{\phi}_f$	=	ค่าเฉลี่ยปริมาณสเกลาร์ที่ผิวจากค่าเฉลี่ยของปริมาณสเกลาร์
ϕ_{nb}	=	ค่าของปริมาณสเกลาร์ที่ปริมาตรควบคุมใกล้เคียง
θ	=	มุมแพร่ หรือมุมสัมพัทธ์ระหว่างการแพร่ของคลื่นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ (Propagation angle)
σ_k	=	เลขพรานด์ทิล (Prandtl number) ของความปั่นป่วนสำหรับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
σ_ε	=	เลขพรานด์ทิล (Prandtl number) ของความปั่นป่วนสำหรับอัตราการสูญเสียของความปั่นป่วน
μ	=	ความหนืดเชิงจลน์
μ_t	=	ความหนืดเชิงจลน์ของความปั่นป่วน
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m ³

ρ_0	=	ความหนาแน่นอ้างอิง
τ	=	เทนเซอร์ความเค้น
$\vec{v}$	=	เวกเตอร์ความเร็ว
v_n	=	ความเร็วตั้งฉาก
ω_k	=	เป็นความเร็วเชิงมุม, rad/s
Γ_ϕ	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของของปริมาณสเกลาร์
$\overline{\Omega_{ij}}$	=	เทนเซอร์อัตราเฉลี่ยของการหมุน

ภาคผนวก ค
คุณลักษณะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย

หน่วยประมวลผล:	Intel® Pentium® M Processor 715 (1.5 GHz 2MB L2 cache) Intel 855GM chipset
หน่วยความจำ RAM:	2 GB DDR Memory (PC2700)
หน่วยแสดงผล:	Intel® Extreme® Graphics 2.DVMT
หน่วยความจำ:	40 GB HDD (4200 RPM)

ภาคผนวก ง

นิยามศัพท์เฉพาะ

- คลื่นที่เกิดจากเรือ (Wake)** หมายถึง คลื่นที่กระจายออกไปจากตัวเรือเมื่อแล่นผ่านน้ำนิ่ง
- ความต้านทานรวม (Total resistance)** หมายถึง ความต้านทานของเรือซึ่งเกิดจาก ความต้านทานเชิงคลื่น (Wave - making resistance) และความต้านทาน ความหนืด (Viscous resistance)
- ความยาวแนวหน้า (Waterline length)** หมายถึง ความยาวของเรือเมื่อวัดที่ระดับแนวน้ำ ปกติ
- ความเร็ววิกฤต (Critical velocity)** หมายถึง ความเร็วที่ทำให้เลขฟรูดเชิงความลึกมีค่า เท่ากับหนึ่ง
- ตัวประกอบรูปทรงตัวเรือ (Form factor)** หมายถึง ค่าคงที่ ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่า ความต้านทานความหนืดของเรือจากความต้านทานพื้นผิวของการไหลผ่านพื้นผิว เรียบ
- ตัวเรือคู่ (Demihull)** หมายถึง ตัวเรือข้างใดข้างหนึ่งของเรือแบบตัวเรือคู่
- ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ (S)** หมายถึง ระยะระหว่างตัวเรือแต่ละข้างของเรือแบบ ตัวเรือคู่ โดยวัดจากแกว่งกลางลำเรือของตัวเรือคู่แต่ละข้าง
- ระวางขับน้ำ (Displacement)** หมายถึง น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยเรือ ใช้ในการวัด ขนาดของเรือ
- รูปทรงตัวเรือ (Hull form)** หมายถึง รูปทรงตัวเรือที่อยู่ใต้ระดับแนวน้ำ
- เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran)** หมายถึง เรือที่มีลำตัวเรือคู่ มีดาดฟ้าเรือเชื่อมต่อระหว่าง ลำตัวเรือเดี่ยวแต่ละข้าง
- เรือแบบตัวเรือเดี่ยว (Monohull)** หมายถึง เรือที่มีลำตัวเดี่ยว เป็นเรือที่ใช้งานทั่วไป
- เรือแบบ Planing craft** หมายถึง เรือประเภทที่เมื่อแล่นด้วยความเร็วสูงแล้วตัวเรือส่วนหัว จะลอยขึ้นเหนือผิวน้ำทำให้ระวางขับน้ำและพื้นที่ผิวใต้น้ำลดลง ตัวอย่างเช่น เรือหางยาว
- เลขฟรูด (Froude number หรือ F_n)** หมายถึงเลขฟรูดที่ใช้ความยาวแนวหน้าเป็น ความยาวอ้างอิง
- เลขฟรูดเชิงความลึก (Depth Froude number หรือ F_{n_h})** หมายถึง เลขฟรูดที่ใช้ค่า ความลึกของน้ำเป็นความยาวอ้างอิง

เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) Re_d หมายถึง เลขเรย์โนลด์สที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นความยาวอ้างอิง

เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) Rn หมายถึง เลขเรย์โนลด์สที่ใช้ความยาวแนวหน้าเป็นความยาวอ้างอิง

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นาวาตรี กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์
วันเดือนปีเกิด	28 ตุลาคม พ.ศ.2517
สถานที่เกิด	จังหวัด นครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 70/191 หมู่ 3 หมู่บ้านกฤษดานคร 19 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นายช่างแผนกวางแผนซ่อมเรือ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	แผนกวางแผนซ่อมเรือ กองแผนงานฝ่ายเรือ กรมแผนการช่าง กรมอุทกหารเรือ
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2537 มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนเตรียมทหาร พ.ศ.2538 การศึกษาระดับ A-Level จาก Educare College, Manchester, UK พ.ศ.2541 Bachelor Degree in Engineering (Naval Architecture and Ocean Engineering) จาก University College London, London, UK พ.ศ.2553 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ