

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่
ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล**
**The Analysis of Resistance and Wave of Catamaran
Using Computational Fluid Dynamics**

กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์¹, สัตยา จันทระประภา², จุฑารัตน์ คุรุเจริญ³ และ โอนทัย สุขแสงพนมรุ่ง^{4,*}

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
² กองออกแบบต่อเรือ กรมแผนการช่าง กรมอุทกหารเรือ แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ ๙ 10700
⁴ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า อ.เมือง จ.นครนายก 26001
* ติดต่อ: E-mail: asuksang1@yahoo.com โทรศัพท์, โทรสาร: 037 393 487

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) วิธี Finite Volume Method จำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran) เพื่อวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือในย่านการใช้งานสำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยา ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเลขฟรูดเชิงความยาวแนวหน้า (Fn) มีค่า 0.5 – 0.7 สัมประสิทธิ์ความต้านทานเรือ (C_T) มีค่าลดลงและสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (C_W) มีค่าลดลง ขณะที่สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (C_V) มีค่าคงที่ เมื่อเลขฟรูดเชิงความลึกของน้ำ (Fn_h) เท่ากับ 0.6 – 0.7 พบว่าคลื่นมีความสูงเพิ่มขึ้นและเดินทางได้ไกลขึ้นเมื่อความลึกของน้ำลดลง งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่เบื้องต้นเพื่อให้ได้เรือที่ประหยัดพลังงานและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากคลื่นที่เกิดจากเรือ อย่างไรก็ตามในอนาคตควรจะได้มีการศึกษาการแบ่งกริดที่เหมาะสมตลอดจนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดต่อไป

คำสำคัญ: วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล, เรือแบบตัวเรือคู่, ความต้านทานเรือ, รูปแบบคลื่น, เรือโดยสาร

Abstract

This study was performed to analyse total resistance and wave profile of a catamaran using Computational Fluid Dynamics - the Finite Volume Method. The work was conducted within the operating conditions of the waterbus service in the Chaophraya River, Bangkok, Thailand. The total resistance was analysed at different operating speeds with the corresponding waterline Froude number (Fn) equal to 0.5 – 0.7. Within the study range, the calculated total resistance coefficient (C_T) and wave – making resistance coefficient (C_W) was found to decrease as Fn decreased. While the viscous resistance coefficient (C_V) was almost unchanged. The waves generated when the catamaran sails through calm water was then analysed at the depth Froude number (Fn_h) between 0.6 - 0.7 corresponding to the

maximum and minimum route depths. It was found that the calculated wave profiles increased as the depth decreased. The waves generated in shallow water also travelled in longer distance than those generated in deeper water. The study has shown that the method developed here could be practically applied in the preliminary design of actual catamarans where energy - saving and environment – friendliness are the key design. However, further study with finer meshing and more advanced mathematical models should be conducted in order to achieve more accurate results.

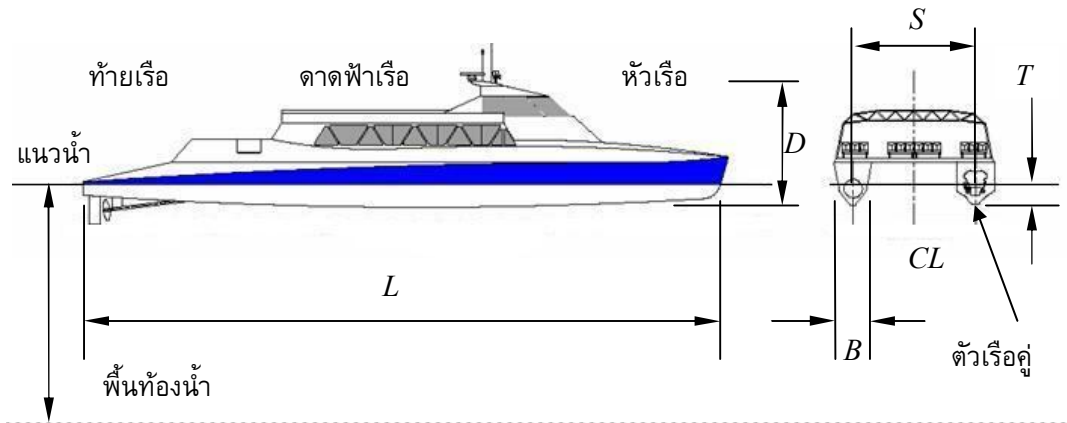
Keywords: Computational Fluid Dynamics, catamaran, total resistance, wave profile, waterbus.

1. บทนำ

เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran) เป็นเรือประเภทที่มีตัวเรือ 2 ลำ เชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างดาดฟ้าเรือ ดังรูปที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบกับเรือแบบตัวเรือเดี่ยว (Monohull) ที่ระวางขับน้ำเท่ากันแล้ว เรือแบบตัวเรือคู่สามารถออกแบบรูปทรงตัวเรือ (Hull form) ให้มีความ

เพรียวได้มากกว่า ส่งผลให้ความต้านทานของเรือลดลงโดยไม่ทำให้การทรงตัวของเรือเสียไป เรือประเภทนี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเรือโดยสารลดคลื่นและประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะเรือโดยสารในแม่น้ำ เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งปัจจุบันประสบปัญหาการพังทลายของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำเนื่องจากคลื่นที่เกิดจากเรือ [1]



รูปที่ 1 เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran)

การศึกษารวบรวมองค์ประกอบความต้านทานของเรือแบบตัวเรือคู่ โดยการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ (Towing tank test) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ได้มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย เช่น Insel และ Molland [2] พบว่าความต้านทานความหนืด (Viscous resistance) มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วของเรือแต่ไม่ขึ้นกับความเร็วและระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ ขณะที่ Couser และคณะ [3] แสดงให้เห็นว่าสำหรับเรือแบบตัวเรือคู่ประเภทความเร็วสูงที่มี

ตัวเรือเพรียว ความต้านทานความหนืดมีค่ามากกว่าความต้านทานเชิงคลื่น (Wave – making resistance) ต่อมา Utama และ Molland [4] พบว่าอิทธิพลของการแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือคู่มีผลต่อความต้านทานความหนืดเพียงเล็กน้อย

นอกเหนือจากการวิธีทดลองข้างต้นแล้ว การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้จำลองการไหลผ่านเรือ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายและใช้

เวลาน้อยกว่า ประกอบกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้การคำนวณและการบันทึกข้อมูลด้วยวิธี CFD มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาทิเช่น Armstrong [5] ได้ใช้วิธี CFD แบบปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method หรือ FVM) จำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่ประเภทความเร็วสูง พบว่าการกระจายของความดันรอบตัวเรือสอดคล้องกับผลการทดลอง ขณะที่ Thornhill และคณะ [6] ได้ใช้วิธี FVM วิเคราะห์ความต้านทานของเรือประเภท Planing craft ซึ่งพบว่าแม้การวิเคราะห์จะเป็นการคำนวณหาสภาวะคงตัวของเรือ แต่เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับความ เป็นจริงจำเป็นจะต้องใช้วิธีคำนวณแบบแปรผันตามเวลา ทั้งนี้งานวิจัยทั้งสองเป็นการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยไม่รวมการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ

สำหรับการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นด้วยวิธี CFD นั้น ได้มีงานวิจัยที่นำแบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of Fluid หรือ VOF) มาใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ เช่น การศึกษาการไหลแบบไม่มีความหนืดรอบตัวเรือสินค้าในเขตน้ำตื้นของ Tabaczek [7]

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธี CFD แบบ FVM ที่พิจารณาการไหลแบบมีความหนืด ประกอบกับเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำ มาวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ เพื่อเป็นแนวทางในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้น (Preliminary design) เรือโดยสารแบบตัวเรือคู่สำหรับใช้งานในแม่น้ำ โดยทำการศึกษาเฉพาะเส้นทางของเรือโดยสารที่ให้บริการในแม่น้ำเจ้าพระยาในเขต กรุงเทพฯ ฯ เมื่อความเร็วสูงสุดไม่เกิน 20 กิโลเมตร/ ชั่วโมง ที่ความลึกต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 6.5 เมตร และ 8.5 เมตร ตามลำดับ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความต้านทานเรือ

ความต้านทานรวมของเรือ (Total ship resistance หรือ R_T) สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ C_T เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม (Total ship resistance coefficient), ρ เป็นความหนาแน่นของน้ำ, A เป็นพื้นที่ผิวของตัวเรือใต้แนวน้ำ, V เป็นความเร็วของเรือในทิศทางการเคลื่อนที่

ในทางปฏิบัติ ที่ประชุม International Towing Tank Conference [8] ได้แบ่งองค์ประกอบหลักของ C_T ออกเป็น

$$C_T = C_V + C_W \quad (2)$$

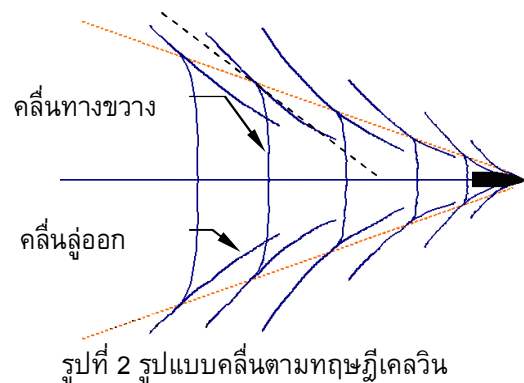
เมื่อ C_V เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (Viscous resistance coefficient) และ C_W เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (Wave – making resistance coefficient) ทั้งนี้ความต้านทานเชิงคลื่นมีค่าขึ้นอยู่กับเลขฟรูด (Froude number หรือ Fn) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

เมื่อ L เป็นความยาวแนวน้ำ และ g เป็นค่าคงที่อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

2.2 ระบบคลื่นที่เกิดจากเรือแล่นในน้ำลึก

ทฤษฎีเคลวิน (Kelvin Theory) [9] ระบุว่าเมื่อเรือแล่นในน้ำลึก ระบบคลื่นบนผิวน้ำจะประกอบด้วยคลื่นลู่ออก (Divergent waves) และคลื่นทางขวาง (Transverse waves) ดังรูปที่ 2



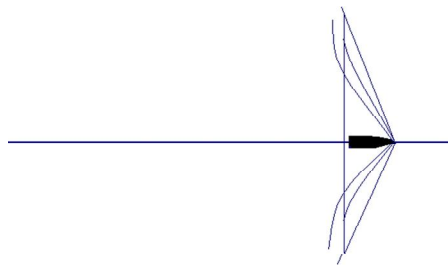
2.3 ระบบคลื่นที่เกิดจากเรือแล่นในน้ำตื้น

ทฤษฎีเฮฟลอค (Havelock Theory) [9] ระบุว่าเมื่อเรือแล่นในน้ำตื้น คลื่นที่เกิดจากตัวเรือจะมีรูปแบบ

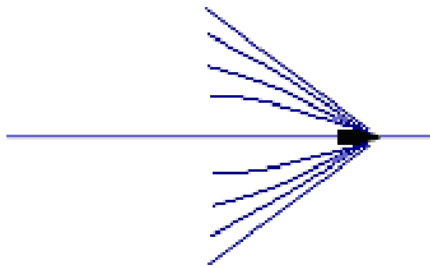
ขึ้นอยู่กับเลขฟรูดเชิงความลึก (Fn_h) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

เมื่อ h เป็นความลึกของน้ำ และความเร็วที่ทำให้ $V = \sqrt{gh}$ เรียกว่าความเร็ววิกฤต โดยที่ความเร็วได้วิกฤตคลื่นจะมีรูปแบบคลื่นตามทฤษฎีเคลวิน ขณะที่ความเร็ววิกฤตและเหนือวิกฤตระบบคลื่นจะมีรูปแบบแตกต่างจากระบบคลื่นตามทฤษฎีเคลวิน ดังรูปที่ 3



(ก) ความเร็ววิกฤต



(ข) ความเร็วเหนือวิกฤต

รูปที่ 3 รูปแบบคลื่นตามทฤษฎีเฮฟลอค

3. วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากการหาความต้านทานของเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือโดยปกติจะใช้วิธีการทดลองลากเรือแบบตัวเรือคู่ผ่านน้ำนิ่งในถังลากเรือ ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบ 2 เฟส ด้วยวิธีเชิงตัวเลข FVM โดยกำหนดให้น้ำและอากาศไหลผ่านเรือซึ่งอยู่กับที่ และไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

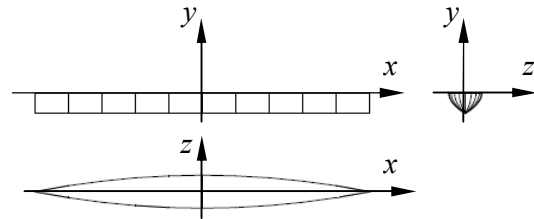
3.1 วิธีเชิงตัวเลข

วิธีเชิงตัวเลข FVM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เริ่มด้วยการแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นปริมาตรควบคุม

(Control volume) หรือเซลล์ (Cell) ย่อย ๆ จากนั้นทำการดิสครีไทเซชัน (Discretization) สมการบังคับการไหลแบบปั่นป่วน (Governing equations) โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) แบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน สำหรับการไหลที่มีความหนืดร่วมกับแบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume of fluid หรือ VOF) แบบ Implicit scheme สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำและสมบัติการไหลอื่น ๆ ของแต่ละปริมาตรควบคุม สุดท้ายทำการหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method) [10]

3.2 แบบจำลอง

แบบจำลองประกอบด้วยแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ในถังลากเรือ โดยรูปทรงตัวเรือใต้แนวน้ำของแบบจำลองตัวเรือคู่ที่ใช้ในงานวิจัยมีรูปทรงแบบวิกเลีย (Wigley hull) ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรูปทรงแบบ Parabolic ที่มีความสมมาตรตามความยาวเรือเพื่อลดปัญหาจากความแตกต่างของความดันที่หัวเรือและท้ายเรือซึ่งเกิดกับรูปทรงเรือจริงที่มีท้ายตัด

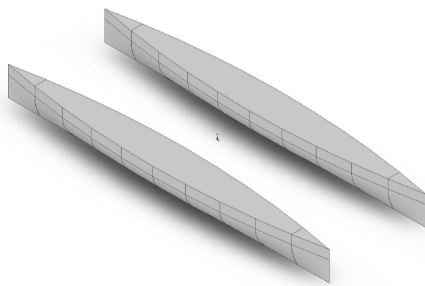


รูปที่ 4 ตัวเรือแบบวิกเลีย

ทั้งนี้ตัวเรือแบบวิกเลียมีมิติและรูปทรงเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

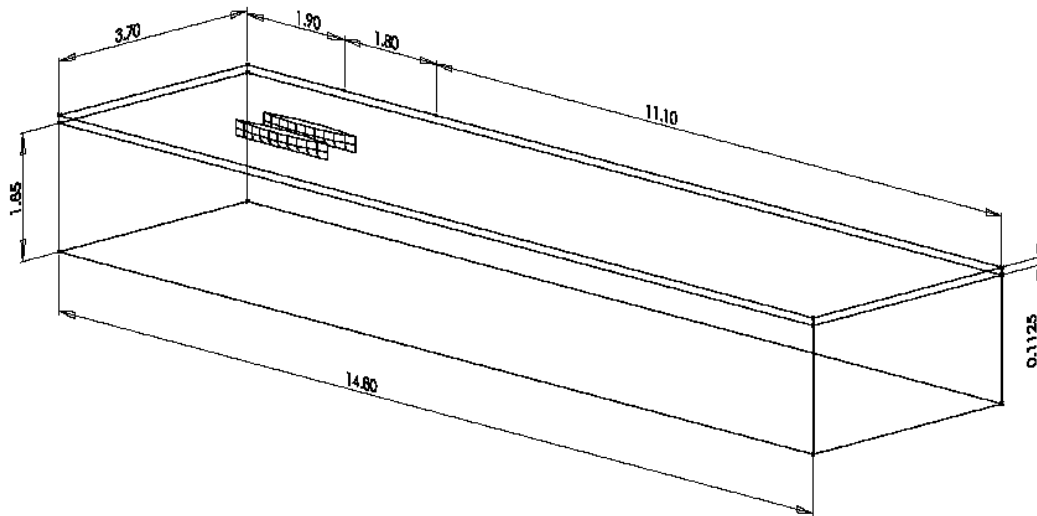
$$z = \pm \frac{1}{2} \frac{B}{L} (1 - 4x^2) + \left(1 - \frac{y^2}{(T/L)^2} \right) \quad (5)$$

เมื่อ $L = 1.8$ เมตร, $B = 0.18$ เมตร, $T = 0.1125$ เมตร $D = 0.225$ เมตร และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ (S) เท่ากับ 0.54 เมตร เนื่องจากระยะห่างดังกล่าวมีความต้านทานเรือน้อยขณะที่มีความเหมาะสมในเชิงความแข็งแรงของโครงสร้างคาน้ำเรือระหว่างตัวเรือคู่ [11] ดังรูปที่ 5



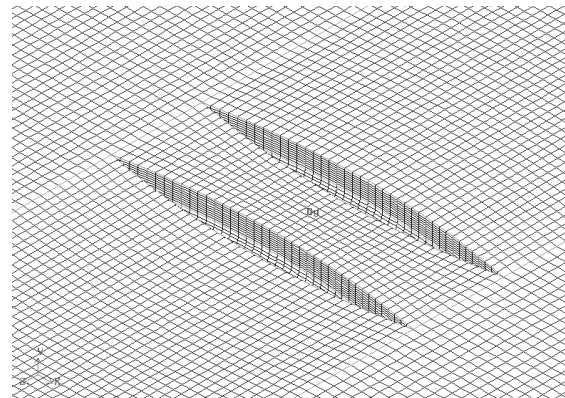
รูปที่ 5 แบบจำลองตัวเรือคู่

แบบจำลองถังลากเรือมีขนาดและรูปทรงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Insel และ Molland [2] โดยเป็นแบบจำลองเฉพาะตัวเรือคู่ซึ่งรวมทั้งตัวเรือเหนือและใต้แนวน้ำ แต่ไม่รวมโครงสร้างดาดฟ้าเรือและแกงเรือ (Superstructure) เพื่อประโยชน์ในการตรวจสอบโปรแกรม ยกเว้นส่วนบรรยากาศและความยาวของถังเนื่องจากข้อจำกัดด้านการแบ่งกริดของโดเมน โดยมีขนาดเป็นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โดเมนแบบจำลอง

การแบ่งกริดสำหรับงานวิจัยนี้ใช้รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) เชิงโครงสร้างปกติ (Structured grid) แบบ Map scheme เพื่อหลีกเลี่ยงการแบ่งกริดคร่อมแนวน้ำซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการกำหนดค่าเริ่มต้นของสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ในแบบจำลอง VOF โดยปริมาตรควบคุมมีความละเอียดมากที่สุดบริเวณผิวตัวเรือและผิวน้ำ จากนั้นการแบ่งกริดจะหยาบขึ้นเมื่อห่างออกไป ดังรูปที่ 7 โดยมีจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งสิ้น 588,000 เซลล์



รูปที่ 7 การแบ่งกริด

3.3 สมการพื้นฐาน

กำหนดให้การไหลรอบตัวเรือเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และมีสมบัติการไหลเท่ากันทุกทิศทาง

จากวิธี Reynolds Average สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน กำหนดให้สมบัติการไหล ณ เวลาใด ๆ (ϕ) ประกอบด้วย ส่วนค่าเฉลี่ย (Φ) และส่วนความปั่นป่วน (ϕ') ดังสมการ

$$\phi = \Phi + \phi' \quad (6)$$

ดังนั้นสมการบังคับการไหลในพิกัด Cartesian ที่ต้องคำนวณหาผลเฉลยในงานวิจัยนี้ จึงประกอบด้วย

- สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (7)$$

เมื่อ $\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}'$ และ $\mathbf{u} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$

- สมการ Reynolds - Averaged Navier - Stokes equation (RANS) ในแกน x, y, z

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(U) + \nabla \cdot (\rho U \mathbf{U}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot [\mu(\nabla U)] \\ &+ \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (8-ก)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(V) + \nabla \cdot (\rho V \mathbf{U}) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot [\mu(\nabla V)] \\ &+ \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (8-ข)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(W) + \nabla \cdot (\rho W \mathbf{U}) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot [\mu(\nabla W)] \\ &+ \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'w'})}{\partial z} \right] - \rho g \end{aligned} \quad (8-ค)$$

3.4 แบบจำลองปริมาตรของไหล VOF

เมื่อกำหนดให้อากาศเป็นเฟสปฐมภูมิ (Primary phase) และน้ำเป็นเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) สามารถคำนวณสัดส่วนปริมาตรของน้ำ (α_{water}) และอากาศ (α_{air}) ในปริมาตรควบคุมใด ๆ ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial \alpha_{water}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_{water} = 0 \quad (9)$$

เมื่อ

$$\alpha_{water} + \alpha_{air} = 1 \quad (10)$$

สมบัติการไหลของน้ำ (ϕ_{water}) และอากาศ (ϕ_{air}) ตลอดจนตัวแปรต่าง ๆ ในการหาผลเฉลยสมการ (7) และ (8-ก) – (8-ข) คำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \alpha_{water} \phi_{water} + (1 - \alpha_{water}) \phi_{air} \quad (11)$$

3.5 เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions)

แบบจำลองมีเงื่อนไขขอบเป็นไปดังรูปที่ 8 โดยให้อากาศและน้ำไหลเข้าด้วยความเร็วคงที่ที่เทียบเท่ากับความเร็วของเรือ ขณะที่ผนังถังและพื้น เคลื่อนที่ตามความเร็วของเรือ แต่ผนังของแบบจำลองเป็นแบบ Non-slip บริเวณผิวน้ำใช้แบบจำลอง VOF เงื่อนไขบรรยากาศให้มีความดันเกจเป็นศูนย์ สุดท้ายทางออกกำหนดให้มีระยะห่างจากตัวเรือเพียงพอที่การไหลจะพัฒนาเต็มที่

3.6 เงื่อนไขทาง CFD

- หาผลเฉลยโดยใช้วิธีการหาผลเฉลย SIMPLE [11] ในการตรวจสอบความดัน - ความเร็ว
- คำนวณแบบสถานะคงตัว (Steady state calculation) ที่ Convergent criteria ของ Residual = 10^{-4} จากนั้นคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Time dependent calculation) [11] ที่ Time step เท่ากับ 0.1 วินาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า $3L/V$ วินาที
- สมการโมเมนตัม, แบบจำลอง $k-\epsilon$ และ α_{water} ใช้วิธีประมาณค่า QUICK [11]
- ความดันใช้วิธีประมาณค่า PRESTO! [12]

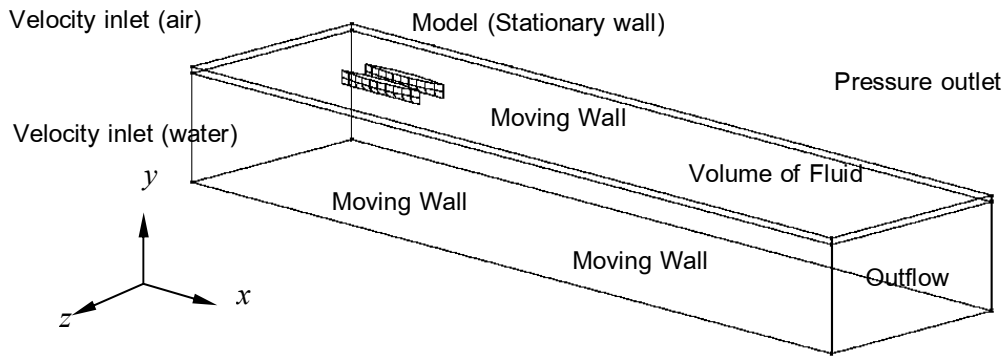
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ

เมื่อพิจารณาความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง พบว่าย่านความเร็วดังกล่าวจัดเป็นย่านความเร็วสูง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความต้านทานของเรือในรูปของ C_T ที่ความเร็วเทียบเท่ากับ $Fn = 0.5 - 0.7$ โดยผลการคำนวณ C_T จากแบบจำลองในข้อ 3.5 เป็นไปดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 พบว่าที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น C_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [2] พบว่าค่า C_T จากทั้งสองวิธีลดลงในลักษณะเดียวกันโดยเมื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในย่าน Fn ที่ทำการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีค่าคงที่ประมาณ 0.5 เท่าของผลการทดลอง

นอกจากนี้ C_T ที่ $Fn = 0.6 - 0.7$ มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเรือแบบตัวเรือคู่มิความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นเรือโดยสารความเร็วสูงเนื่องจากที่ความเร็วสูง ๆ เรือจะมีค่า C_T ลดลงและเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_T มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

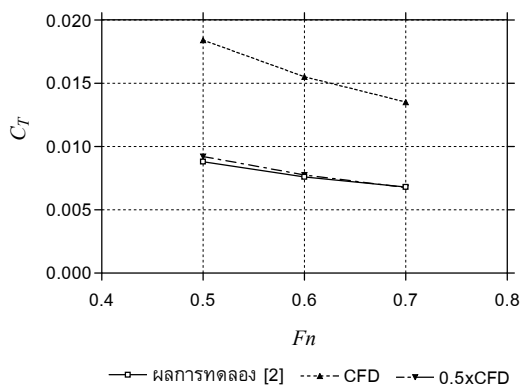


รูปที่ 8 แบบจำลองการไหล 2 เฟส

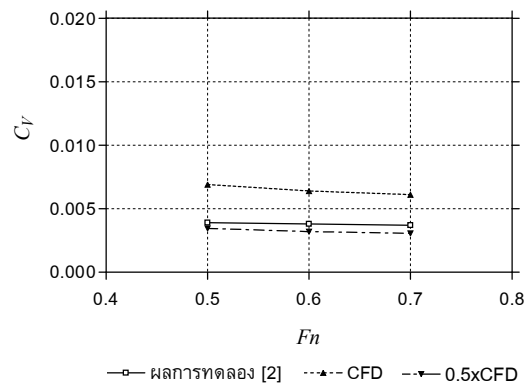
สำหรับค่าที่แตกต่างกันนี้อาจจะเป็นผลมาจากการแบ่งกริดบริเวณใกล้แนวน้ำมีความละเอียดไม่เพียงพอเนื่องจากแบบจำลอง Implicit VOF จะให้ปริมาตรควบคุมมีค่าปริมาตรสัดส่วนของน้ำเป็น 1 หรือ 0 เท่านั้น ตลอดจนแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k-\epsilon$ แบบมาตรฐานใช้ Wall function ในการหาผลเฉลยบริเวณใกล้ผิวตัวเรือซึ่งอาจทำให้เกิดการประมาณค่าเกินความจริงได้

4.2 สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด และสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น

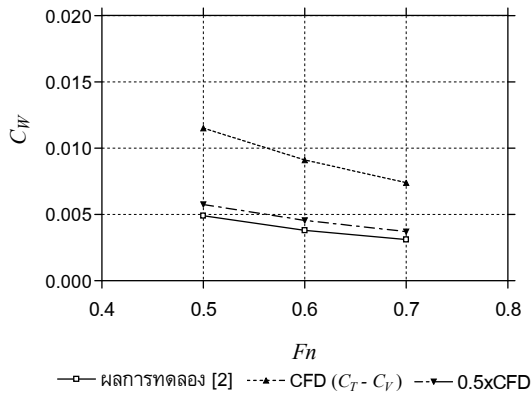
จากการจำลองการไหลในข้อ 3.5 นั้น สามารถหาค่า C_V ได้โดยการคำนวณแรงลัพธ์ที่เกิดจากความดันในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal pressure) และในแนวสัมผัสกับพื้นผิว (Tangential pressure) จากนั้นคำนวณหา C_W จากสมการ (2) โดยมีผลการคำนวณเป็นไปดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 C_T ที่ $S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$



รูปที่ 10 C_T ที่ $S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$

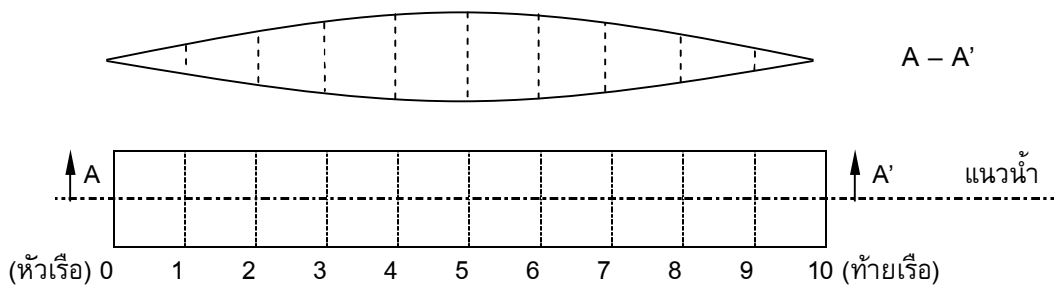
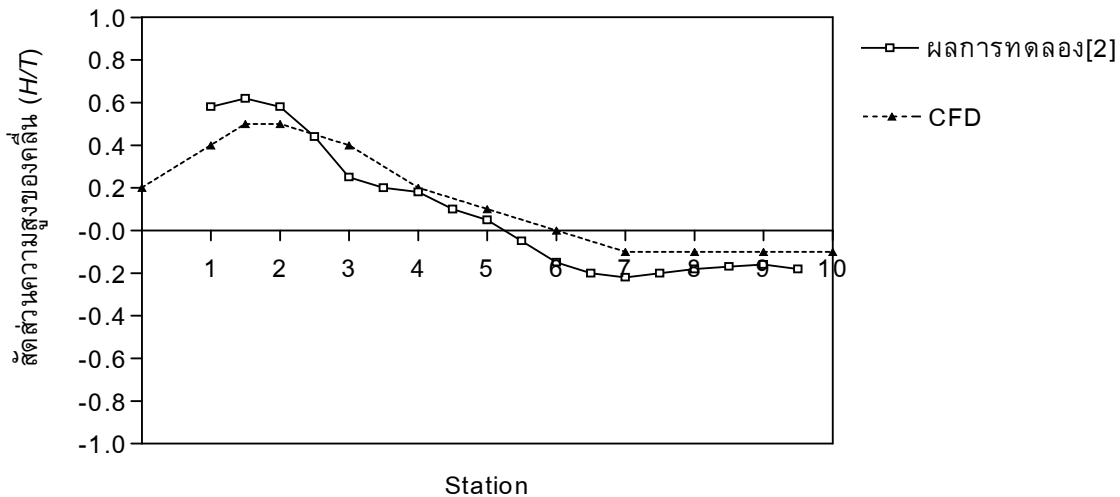


รูปที่ 11 C_w ที่ $S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$

จากรูปที่ 10 ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ พบว่า C_v มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลอง [2] และจากการที่ Fn มีค่าแปรผันตามความเร็ว แสดงว่าที่ความเร็วสูง C_v มีค่าเกือบคงที่และไม่แปรผันตามความเร็ว

ขณะที่จากรูปที่ 11 จะเห็นว่า C_w มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น แสดงว่าที่ความเร็วสูง C_w แปรผันตามความเร็วโดย นั่นคือเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_w จะลดลง โดยเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในผลการทดลองในรูปที่ 10 และ 11 พบว่าเป็นค่าคงที่ประมาณ 0.5 เท่าของผลการทดลองเช่นเดียวกับผลการวิจัยในข้อ 4.1

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ย่านความเร็วสูงนี้ความต้านทานเชิงคลื่นมีอิทธิพลต่อความต้านทานรวมของเรือมากกว่าความต้านทานความหนืด ดังนั้นการลดการเกิดคลื่นจะทำให้ความต้านทานรวมของเรือลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 12 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn = 0.5$ ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

4.3 รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ

การจำลองการเกิดคลื่นแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ที่ $Fn = 0.5$ เพื่อตรวจสอบโปรแกรม และที่ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ ซึ่งเทียบเท่าการเดินเรือโดยสารในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ในเส้นทางที่มีความลึกระหว่าง 6.5 - 8.5 เมตร ซึ่งจัดเป็นเขตน้ำตื้น [13]

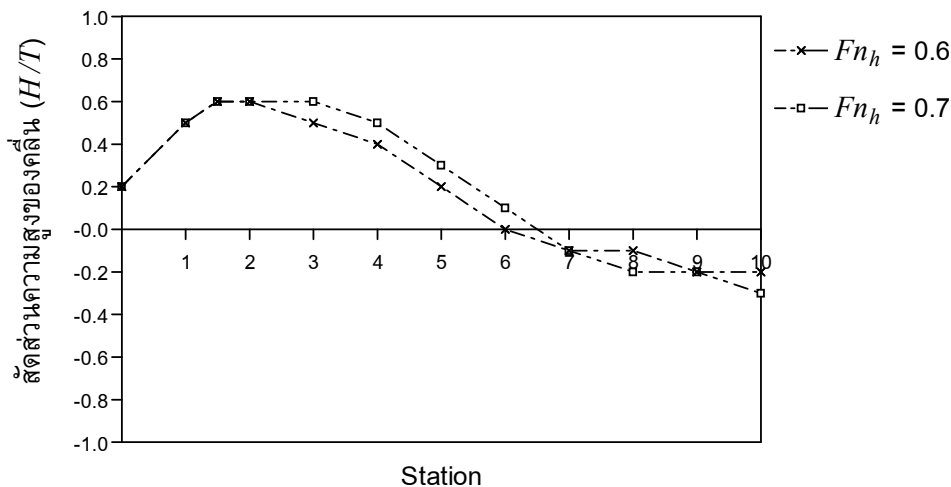
ผลการจำลองรูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกตามตำแหน่งทางยาวของเรือ (Station) ที่ $Fn = 0.5$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง [2] เป็นดังรูปที่ 12 ทั้งนี้ความสูงของคลื่นในฉบับนี้ที่กในรูปของอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อระยะกินน้ำลึก (H/T) ซึ่งความสูงของคลื่นนี้คำนวณได้จาก α_{water} ในแต่ละปริมาตรควบคุม โดยการวัดความสูงของคลื่นในแต่ละ station ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้การคำนวณความสูงจนถึงเซลล์ที่ $\alpha_{water} = 0$

จากรูปที่ 12 เมื่อแบ่งตัวเรือตามความยาวออกเป็น Station จำนวน 10 Station โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กันเท่ากับ $L/10$ หรือ 0.18 เมตร พบว่ารูปแบบคลื่นจากแบบจำลองมีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือเมื่อเรือแล่นผ่านตัดน้ำ น้ำจะถูกยกตัวสูงขึ้นจากระดับแนวน้ำ ($H/T = 0$) จนเกิดสัน

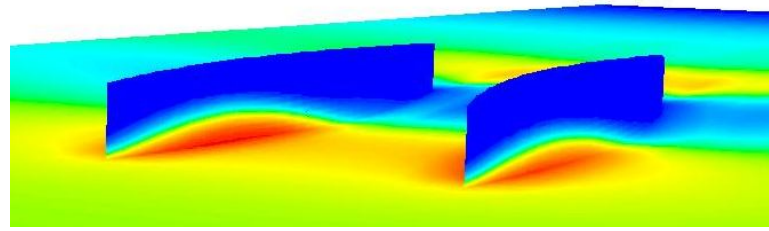
คลื่นที่ประมาณ Station 2 หรือ $2L/10$ จากนั้นคลื่นจะลดต่ำลงและเกิดท้องคลื่นเมื่อผ่านกึ่งกลางลำเรือ และมีความลึกจากแนวน้ำเกือบคงที่เมื่อผ่านท้ายเรือ ทั้งนี้คลื่นจากแบบจำลองมีความสูงและความลึกน้อยกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากการใช้ค่าเฉลี่ยของการไหลในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ แบบมาตรฐาน ทำให้รูปแบบคลื่นมีแนวโน้มจะเข้าหาระดับแนวน้ำ

นอกจากนี้เนื่องจากแบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme ได้กำหนดให้แต่ละเซลล์มีค่า α_{water} หรือ $\alpha_{air} = 1$ จากนั้นทำการประมาณค่าในช่วงเก็บเป็นค่าไว้ที่ Node สำหรับการคำนวณ ทำให้การแบ่งกริดที่บริเวณผิวน้ำจำเป็นต้องมีความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงของคลื่นนี้ได้ ทั้งนี้ความสูงของสันคลื่นที่หัวเรือและท้องคลื่นที่ท้ายเรือมีขนาดน้อยกว่าผลการทดลองประมาณ 15%

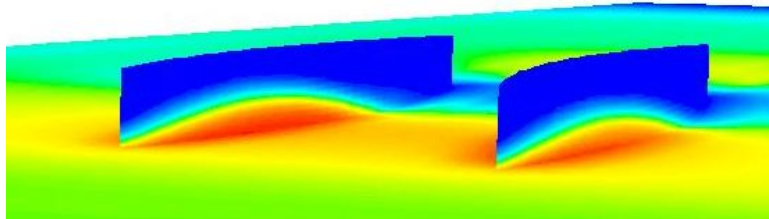
รูปแบบคลื่นที่ตัวเรือคู่ด้านนอกสำหรับ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ ในรูปของสัดส่วน H/T เมื่อแบ่งตัวเรือตามความยาวออกเป็น 10 Station ดังเช่นรูปที่ 12 พบว่ามีผลเป็นดังรูปที่ 13



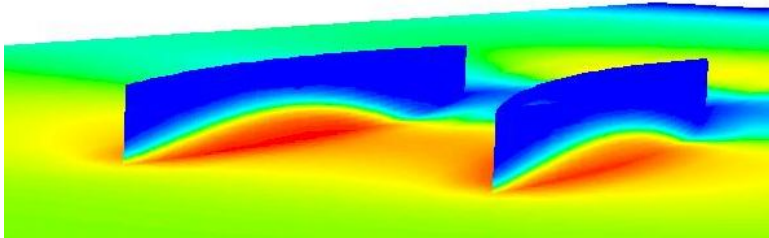
รูปที่ 13 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอก เมื่อ $Fn_h = 0.6$ และ 0.7 ($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)



(ก) $Fn_h = 0.5$



(ข) $Fn_h = 0.6$



(ค) $Fn_h = 0.7$

รูปที่ 14 รูปแบบคลื่น 3 มิติ

จากรูปที่ 13 พบว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ มีค่า H/T โดยเฉลี่ยสูงกว่าที่ $Fn_h = 0.6$ นอกจากนี้ยังพบว่าพบคลื่นที่เกิดจากแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการเกิดคลื่นตามตัวเรือด้านนอกคล้ายกัน แต่ที่ตำแหน่ง station เดียวกัน คลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ มีความสูงมากกว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.6$ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจุดที่คลื่นตัดกับระดับผิวน้ำ ($h = 0$) พบว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ เดินทางได้ไกลกว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.6$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาในแง่ความลึกของเส้นทางเดินเรือ พบว่าความลึกมีผลต่อความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ โดยเมื่อเรือแล่นในน้ำตื้นจะมีคลื่นที่สูงกว่า ทั้งนี้รูปแบบคลื่นที่ Fn_h ทั้งสามค่าข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14

5.สรุปผล

- ที่ย่านความเร็วสูงที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ ค่า C_T ของเรือแบบตัวเรือคู่ที่ได้จากแบบจำลอง CFD ในงานวิจัยนี้มีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบความต้านทาน C_W มีค่าลดลง ในขณะที่ C_V ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของแรงเนื่องจากความหนืดของของไหลในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสกับผิวตัวเรือมีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นแบบจำลอง CFD ที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงสามารถนำมาใช้ศึกษารูปแบบของตัวเรือคู่ที่ทำให้ค่า C_W ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ C_T ลดลงตามไปด้วย โดยค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนที่คงที่ประมาณ 0.5 เท่า

- ที่ย่านความลึกเมื่อเรือโดยสารแบบตัวเรือคู่แล่นด้วยความเร็วสูงสุดตามกฎหมาย ที่ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ พบว่าเส้นทางการเดินเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาใน

เขตกรุงเทพ ฯ จัดเป็นเขตน้ำตื้น ดังนั้นความลึกจึงมีผลต่อความสูงของคลื่นซึ่งจากแบบจำลอง CFD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าโดยเมื่อเรือแบบตัวเรือคู่แล่นในน้ำตื้นจะมีคลื่นที่สูงกว่าเมื่อแล่นในน้ำลึก

- แบบจำลอง CFD ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ที่ใช้งานจริงในย่านความเร็วสูงได้

- เพื่อให้ผลที่ได้จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ผลที่แม่นยำมากขึ้น ควรจะได้มีการศึกษาวิจัยในด้านการแบ่งกริดที่เหมาะสมตลอดจนการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

6.กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในการสนับสนุนโปรแกรมสำหรับการทำวิจัยนี้จนสำเร็จ ลุล่วงเป็นอย่างดี

7.สัญลักษณ์

- A เป็น พื้นที่ผิวของตัวเรือใต้แนวน้ำ
- B เป็น ความกว้างสุดที่กลางลำของตัวเรือ
- CL เป็น เส้นกึ่งกลางเรือ
- C_T เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม
- C_V เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด
- C_W เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น
- D เป็น ความสูงของเรือวัดจากท้องเรือ
- Fn เป็น เลขฟรูดเชิงความยาวแนวน้ำ
- Fn_h เป็น เลขฟรูดเชิงลึก
- H เป็น ความสูงของคลื่น
- h เป็น ความลึกของน้ำ
- L เป็น ความยาวแนวน้ำ
- R_T เป็น ความต้านทานรวมของเรือ
- S เป็น ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่
- T เป็น ระยะกินน้ำลึก
- V เป็น ความเร็วของเรือในทิศทางการเคลื่อนที่
- ρ เป็น ความหนาแน่นของน้ำ

8.เอกสารอ้างอิง

[1] สัตยา จันทรประภา. (2550). เรือโดยสารลดคลื่นเพื่อการประหยัดพลังงาน (Low wash waterbus). *วารสารกรรมอยู่ทหารเรือ*. ฉบับพิเศษ มกราคม 2550, หน้า 83 - 90.

[2] Insel, M., and 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.

[3] Couser, P. R., and et al. (1997). Calm Water Powering Predictions for High-speed Catamarans, *Fast'97*, Australia.

[4] Utama, I. K. A. P. and Molland, A. F. (2001). Experimental and Numerical Investigations into Catamaran Viscous Resistance. *Proceedings of Sixth International Conference on Fast Sea Transportation*. Southampton University. England; pp. 295-306.

[5] Armstrong, N. (1995). An Investigation into the Form Factor of High Speed Light Craft. *First AMECRC Postgraduate Student Conference*. Australia.

[6] Thornhill, E., and et al. (2003). Planing Hull Performance Evaluation Using a General Purpose CFD Code, *Proceedings of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics*.

[7] Tabaczek, T. (2008). Computation of Flow around Inland Waterway Vessel in Shallow Water. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Volume VIII; pp. 97 – 105.

[8] International Towing Tank Conference. (1957). Skin Friction and Turbulence Simulation. *Proceedings of the 8th ITTC*, Madrid, Spain. Canal de Experiencias Hidrodinamicas, El Pardo, Madrid, Spain.

[9] Van Manen, J. D., and Van Oossanen, P. (1988). Chapter V Resistance. *Principles of Naval Architecture, Volume III*. Lewis, EV. editor. 1st printing. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. USA. pp. 1 – 125.

[10] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 1st printing. Longman Group Ltd, England.

[11] กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์ และคณะ. (2553). การศึกษาผลกระทบของระยะห่างและความเพรียวของเรือแบบตัวเรือคู่ต่อความต้านทานเรือด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. การประชุมสัมมนาทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครั้งที่ 3. พัทยา จ.ชลบุรี.

[12] Patankar, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. 1st edition. Hemisphere, Washington D.C., USA.

[13] Leer-Anderson, M.; et al. (2000). Wash Waves – Problems and Solutions, *Proceedings of the Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting*.