

การวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นของเรือแบบตัวเรือคู่

ด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

The Analysis of Resistance and Wave of Catamaran Using Computational Fluid Dynamics

กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์¹, สัตยา จันทระภา¹ และ อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง^{2,*}

¹ กองออกแบบต่อเรือ กรมแผนการช่าง กรมอุทการเรือ แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ ๑ 10700

² กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า อ.เมือง จ.นครนายก 26001

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) วิธี Finite Volume Method จำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran) เพื่อวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือในย่านการใช้งานสำหรับเรือโดยสารในแม่น้ำ ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเลขฟรูดเชิงความยาวแนวน้ำ (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 พบว่าคลื่นมีความสูงเพิ่มขึ้นและเดินทางได้ไกลขึ้นเมื่อความลึกของน้ำที่ลดลง งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเรือแบบตัวเรือคู่เบื้องต้นเพื่อให้ได้เรือที่ประหยัดพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากคลื่นที่เกิดจากเรือ อย่างไรก็ตามในอนาคตควรจะได้มีการศึกษาการแบ่งกริดที่เหมาะสมตลอดจนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดต่อไป

คำหลัก: วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล, เรือแบบตัวเรือคู่, ความต้านทานเรือ, รูปแบบคลื่น, เรือโดยสาร

Abstract

This study was performed to analyse the 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. 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) were found to decrease as the Fn decreased. While the viscous resistance coefficient (C_V) was almost unchanged. The waves generated when the catamaran sailed through calm water were 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, a further study with finer meshing and more advanced mathematical models should be conducted in order to achieve more accurate results.

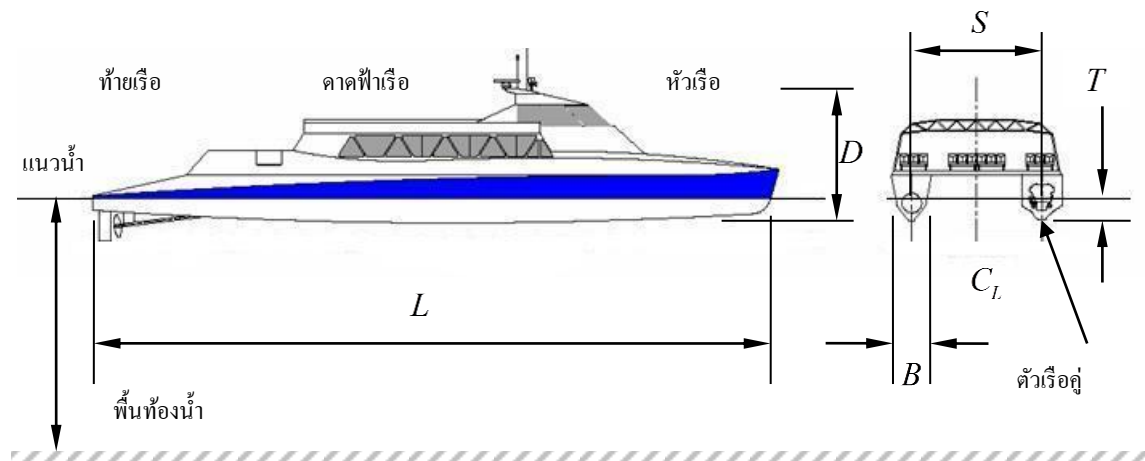
Keywords: Computational Fluid Dynamics, catamaran, total resistance, wave profile, waterbus

1. บทนำ

เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran) เป็นเรือประเภทที่มีตัวเรือ 2 ลำ เชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างคาน้ำเรือค้ำรูปที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับเรือแบบตัวเรือเดี่ยว (Monohull) ที่ระวางขับน้ำเท่ากันแล้ว เรือแบบตัวเรือคู่สามารถออกแบบรูปร่างตัวเรือ (Hull form) ให้มีความเพียวได้

มากกว่า ส่งผลให้ความต้านทานของเรือลดลงโดยไม่ทำให้การทรงตัวของเรือเสียไป เรือประเภทนี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเรือโดยสารลดคลื่นและประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะเรือโดยสารในแม่น้ำ เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งปัจจุบันประสบปัญหาการพังทลายของพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำเนื่องจากคลื่นที่เกิดจากเรือ [1]

*ผู้ติดต่อ: E-mail: asuksangl@yahoo.com โทรศัพท์, โทรสาร: 037 393 487



รูปที่ 1 เรือแบบตัวเรือคู่ (Catamaran)

การศึกษาองค์ประกอบความต้านทานของเรือแบบตัวเรือคู่ โดยการทดลองลากเรือจำลองในถังลากเรือ (Towing tank test) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ได้มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย เช่น Insel และ Molland [2] พบว่าความต้านทานความหนืด (Viscous resistance) มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วของเรือแต่ไม่ขึ้นกับความเร็วและระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่ ขณะที่ Couser และคณะ [3] แสดงให้เห็นว่า สำหรับเรือแบบตัวเรือคู่ประเภทความเร็วสูงที่มีตัวเรือเพริช ความต้านทานความหนืดมีค่ามากกว่าความต้านทานเชิงคลื่น (Wave-making resistance) ต่อมา Utama และ Molland [4] พบว่าอิทธิพลของการแทรกสอดของคลื่นระหว่างตัวเรือคู่มีผลต่อความต้านทานความหนืดเพียงเล็กน้อย

นอกเหนือจากการวิธีทดลองข้างต้นแล้ว การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้จำลองการไหลผ่านเรือ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายและใช้เวลาน้อย ประกอบกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้การคำนวณและการแสดงผล มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาทิเช่น Armstrong [5] ได้ใช้วิธี CFD แบบปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method หรือ FVM) จำลองการไหลผ่านเรือแบบตัวเรือคู่ประเภทความเร็วสูง พบว่าการกระจายของความดันรอบตัวเรือสอดคล้องกับผลการทดลอง ขณะที่ Thornhill และคณะ [6] ได้ใช้วิธี FVM วิเคราะห์ความต้านทานของเรือประเภท Planing craft ซึ่งพบว่าแม้ว่าการวิเคราะห์จะเป็นการคำนวณในสภาวะคงตัว (Steady flow) แต่เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริงจำเป็นต้องใช้วิธีคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Transient) ทั้งนี้งานวิจัยทั้งสองเป็นการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนโดยไม่รวมการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้า สำหรับการวิเคราะห์รูปแบบคลื่นด้วยวิธี CFD นั้น ได้มีงานวิจัยที่นำแบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume Of Fluid หรือ VOF) มาใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้า เช่น การศึกษาการไหลแบบไม่มีความหนืดรอบตัวเรือสินค้าในเขตนํ้าตื้นของ Tabaczek [7]

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลแบบปริมาตรจำกัด ที่พิจารณาการไหลแบบมีความหนืดประกอบกับการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้า มาวิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเบื้องต้น (Preliminary design) สำหรับเรือโดยสารแบบตัวเรือคู่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแม่น้ำ ด้วยเงื่อนไขของความเร็วสูงสุดไม่เกิน 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

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

โดยที่ C_T คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเรือรวม (Total ship resistance coefficient) ในทางปฏิบัติจากที่ประชุม International Towing Tank Conference [8] สามารถแบ่งองค์ประกอบหลักของ C_T ออกเป็น

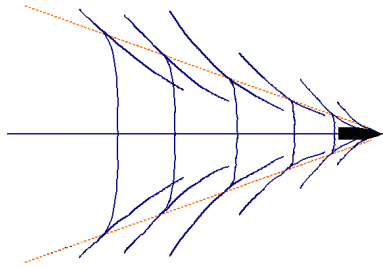
$$C_T = C_V + C_W \quad (2)$$

โดยที่ C_V คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด (Viscous resistance coefficient) และ C_W คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น (Wave-making resistance coefficient) ทั้งนี้ความต้านทานเชิงคลื่นมีค่าขึ้นอยู่กับเลขฟรูด (Froude number หรือ Fn) ซึ่งหาค่าได้จาก

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

2.2 ระบบคลื่นที่เกิดจากเรือแล่นในน้ำลึก

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



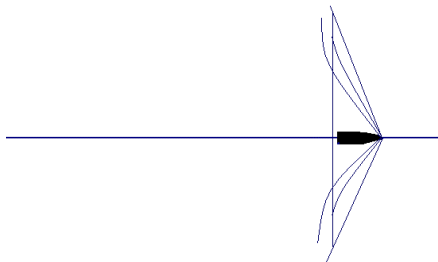
รูปที่ 2 รูปแบบคลื่นตามทฤษฎีเคลวิน [9]

2.3 ระบบคลื่นที่เกิดจากเรือแล่นในน้ำตื้น

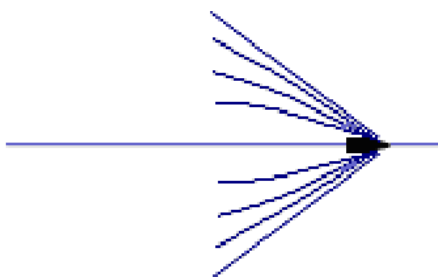
ทฤษฎีเฮฟล็อก (Havelock Theory) [9] ระบุว่าเมื่อเรือแล่นในน้ำตื้น คลื่นที่เกิดจากตัวเรือจะมีรูปแบบ ขึ้นอยู่กับเลขฟรูดเชิงความลึก (Fn_h) ซึ่งคำนวณได้จาก

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

โดยที่ h เป็นความลึกของน้ำ และความเร็วที่ทำให้ $V = \sqrt{gh}$ เรียกว่าความเร็ววิกฤต (Critical velocity) โดยที่ความเร็วได้วิกฤตคลื่นจะมีรูปแบบคลื่นตามทฤษฎีเคลวิน ขณะที่ความเร็ววิกฤตและเหนือวิกฤต ระบบคลื่นจะมีรูปแบบแตกต่างจากระบบคลื่นตามทฤษฎีเคลวิน ดังรูปที่ 3



(ก) ความเร็ววิกฤต



(ข) ความเร็วเหนือวิกฤต

รูปที่ 3 รูปแบบคลื่นตามทฤษฎีเฮฟล็อก [9]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากการหาความต้านทานของเรือและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือโดยปกติจะใช้วิธีการทดลองลากเรือแบบตัวเรือคู่ผ่านน้ำนิ่งในถังลากเรือ ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อจำลองการไหลรอบตัวเรือแบบ 2 เฟส ด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยกำหนดให้น้ำและอากาศไหลผ่านเรือซึ่งอยู่กับที่และไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

3.1 ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

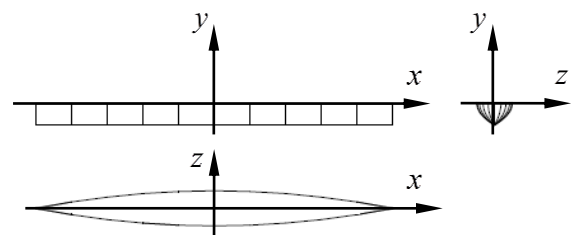
วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบปริมาตรจำกัด ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เริ่มด้วยการแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) หรือเซลล์ (Cell) ย่อย ๆ จากนั้นทำการดิสครีไทเซชัน (Discretization) สมการบังคับการไหล (Governing equations) โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) แบบ $k-\epsilon$ มาตรฐาน สำหรับการไหลที่มีความหนืด ร่วมกับแบบจำลองปริมาตรของไหล (Volume Of Fluid หรือ VOF) แบบ Implicit scheme สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ผิวน้ำและสมการการไหลอื่น ๆ ของแต่ละปริมาตรควบคุม สุดท้ายทำการหาผลเฉลยแบบแยกพิจารณา (Segregated solution method) [10]

3.2 แบบจำลอง

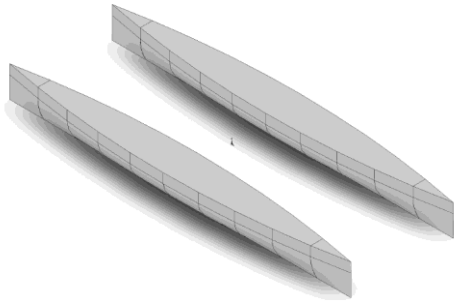
แบบจำลองประกอบด้วยแบบจำลองเรือแบบตัวเรือคู่ในถังลากเรือ โดยรูปทรงตัวเรือได้แก่แนวหน้าของแบบจำลองตัวเรือคู่ที่ใช้ในงานวิจัยมีรูปทรงแบบวิกิลี (Wigley hull) ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรูปทรงแบบ Parabolic ที่มีความสมมาตรตามความยาวเรือเพื่อลดปัญหาจากความแตกต่างของความดันที่หัวเรือและท้ายเรือซึ่งเกิดกับรูปทรงเรือจริงที่มีท้ายตัด ทั้งนี้ตัวเรือแบบวิกิลีมีมิติและรูปทรงเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

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

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



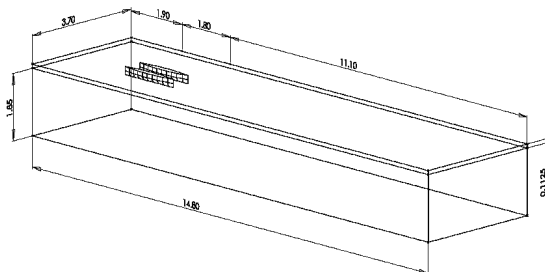
รูปที่ 4 ตัวเรือแบบวิกิลี



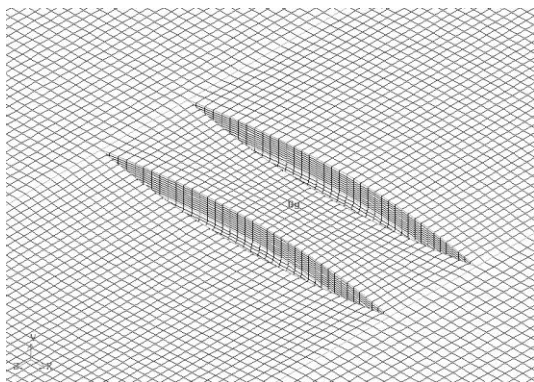
รูปที่ 5 แบบจำลองตัวเรือคู่

แบบจำลองถังลากเรือมีขนาดและรูปทรงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Insel และ Molland [2] โดยเป็นแบบจำลองเฉพาะตัวเรือคู่ซึ่งรวมทั้งตัวเรือเหนือและใต้แนวน้ำ แต่ไม่รวมโครงสร้างคาน้ำเรือและกึ่งเรือ (Superstructure) เพื่อประโยชน์ในการตรวจสอบโปรแกรม ยกเว้น ส่วนบรรยากาศและความยาวของถังเนื่องจากข้อจำกัดด้านการแบ่งกริดของโดเมน โดยมีขนาดเป็นดังรูปที่ 6

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



รูปที่ 6 โดเมนแบบจำลอง (หน่วยเป็นเมตร)



รูปที่ 7 การแบ่งกริด

3.3 สมการพื้นฐาน

กำหนดให้การไหลรอบตัวเรือเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และมีสมบัติการไหลเท่ากันทุกทิศทาง ด้วยวิธีการ Reynolds Average สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน กำหนดให้คุณสมบัติการไหล ณ เวลาใด ๆ (ϕ) ประกอบด้วย ส่วนค่าเฉลี่ย (Φ) และส่วนความปั่นป่วน (ϕ') ดังสมการ

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

กำหนดให้ $\mathbf{u}$ เป็นเวกเตอร์ความเร็วที่ไหลในพิกัดฉาก ($\mathbf{u} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$) โดยที่ $\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}'$ สมการควบคุมการไหลสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

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

สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (RANS) + Eddy viscosity hypothesis

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{u})] + \mathbf{S}_m \quad (8)$$

โดยที่ $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ และ $\mathbf{S}_m$ คือ source term

สมการ $k - \varepsilon$ สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (เทอม μ_t)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

ค่าคงที่

$$C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\varepsilon = 1.00, \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \text{ และ } C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad [10]$$

3.4 แบบจำลองปริมาตรของไหล VOF

เมื่อกำหนดให้อากาศเป็นเฟสปฐมภูมิ (Primary phase) และน้ำเป็นเฟสทุติยภูมิ (Secondary phase) เราสามารถคำนวณสัดส่วนปริมาตรของน้ำ (α_{water}) และอากาศ (α_{air}) ในปริมาตรควบคุมใด ๆ ได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$\frac{\partial \alpha_{water}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_{water} = 0 \quad (11)$$

เมื่อ

$$\alpha_{water} + \alpha_{air} = 1 \quad (12)$$

คุณสมบัติของการไหลใดๆ ของน้ำ (ϕ_{water}) และอากาศ (ϕ_{air}) ตลอดจนตัวแปรต่าง ๆ ในการหาผลเฉลยสมการ (7) และ (8) คำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \alpha_{water} \phi_{water} + (1 - \alpha_{water}) \phi_{air} \quad (13)$$

3.5 เงื่อนไขขอบ

แบบจำลองมีเงื่อนไขขอบเป็นไปตามรูปที่ 8 โดยให้อากาศและน้ำไหลเข้าด้วยความเร็วคงที่ที่เทียบเท่ากับความเร็วของเรือที่เคลื่อนที่ ขณะที่ผนังของถังและพื้นเคลื่อนที่ตามความเร็วของเรือ แต่ผนังของแบบจำลองเรือเป็นแบบ Non-slip บริเวณผิวน้ำใช้แบบจำลอง VOF เงื่อนไขขอบร่ายอากาศให้มีความดันคงเป็นศูนย์ บริเวณทางออกกำหนดให้มีระยะห่างจากตัวเรือเพียงพอที่จะกำหนดให้เป็นการไหลพัฒนาอย่างสมบูรณ์

3.6 เงื่อนไขการคำนวณเชิงตัวเลข

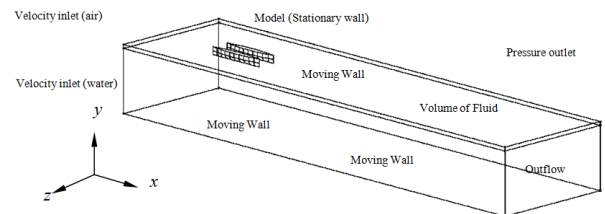
- ผลเฉลยใช้วิธีการแบบ SIMPLE [11] ในการตรวจสอบความดัน-ความเร็ว
- คำนวณแบบสถานะคงตัว (Steady state calculation) ที่ Convergent criteria ของ Residual = 10^{-4} จากนั้นคำนวณแบบแปรผันตามเวลา (Transient calculation) [11] ที่ Time step เท่ากับ 0.1 วินาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า $3L/V$ วินาที
- สมการโมเมนตัม, แบบจำลอง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

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

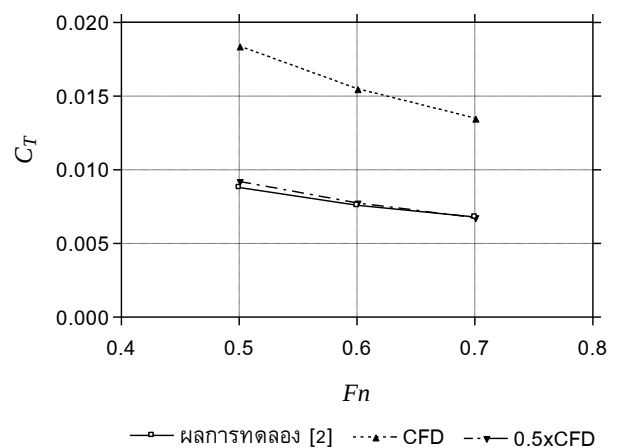
4.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวมของเรือ

เมื่อพิจารณาความเร็ว 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง พบว่าย่านความเร็วดังกล่าวจัดเป็นย่านความเร็วสูง ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความต้านทานของเรือในรูปของ C_T ที่ความเร็วเทียบเท่ากับ $Fn = 0.5 - 0.7$ โดยผลการคำนวณ C_T จากแบบจำลองเป็นไปตามรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น C_T ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง [2] พบว่าค่า C_T จากทั้งสองวิธีลดลงในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในย่าน Fn ที่ทำการศึกษาพบว่าความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีค่าคงที่ประมาณ 0.5 เท่าของผลการทดลอง นอกจากนี้ C_T ที่ $Fn = 0.6 - 0.7$ มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเรือแบบตัวเรือคูมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นเรือโดยสารความเร็วสูงเนื่องจากที่ความเร็วสูง ๆ เรือจะมีค่า C_T ลดลงและเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_T มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

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



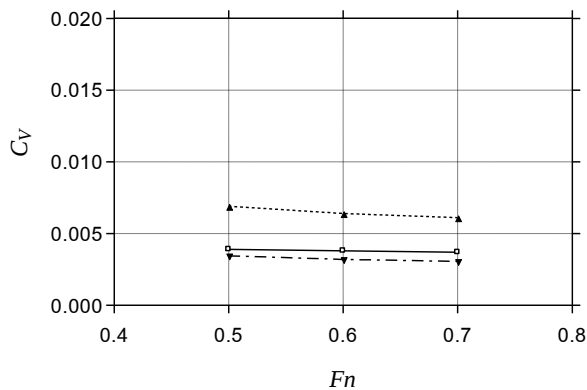
รูปที่ 8 แบบจำลองการไหล 2 เฟส



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

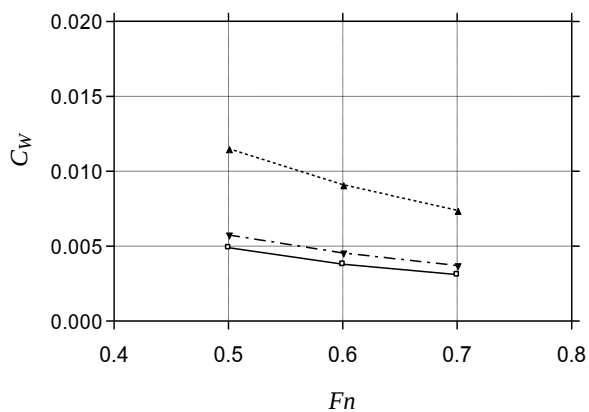
4.2 สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืดและสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น

จากการจำลองการไหล เราสามารถหาค่า C_V ได้โดยการคำนวณแรงลัพธ์ที่เกิดจากค่าความดันในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (Normal pressure) และในแนวสัมผัสกับพื้นผิว (Tangential pressure) จากนั้นก็สามารถคำนวณหา C_W ได้จากสมการที่ (2) โดยมีผลการคำนวณเป็นไปตามรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ จากรูปที่ 10 ที่ $Fn = 0.5 - 0.7$ พบว่า C_V มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลอง [2] และจากการที่ Fn มีค่าแปรผันตามความเร็ว แสดงว่าที่ความเร็วสูง C_V มีค่าเกือบคงที่และไม่แปรผันตามความเร็ว



—○— ผลการทดลอง [2] ...▲... CFD --▼-- 0.5xCFD

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



—○— ผลการทดลอง [2] ...▲... CFD ($C_T - C_V$) --▼-- 0.5xCFD

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

ขณะที่จากรูปที่ 11 จะเห็นว่า C_W มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อ Fn เพิ่มขึ้น แสดงว่าที่ความเร็วสูง C_W แปรผันตามความเร็วโดยกล่าวคือ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น C_W จะลดลง โดยเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยแบบจำลองในผลการทดลองในรูปที่ 10 และ 11 พบว่าเป็นค่าคงที่ประมาณ 0.5 เท่าของผลการทดลองเช่นเดียวกับผลที่ได้ในข้อ 4.1 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ย่านความเร็วสูงนี้ ความต้านทานเชิงคลื่นมีอิทธิพลต่อความต้านทานรวมของเรือมากกว่าความต้านทานความหนืด ดังนั้นการลดการเกิดคลื่นจะทำให้ความต้านทานรวมของเรือลดลงตามไปด้วย

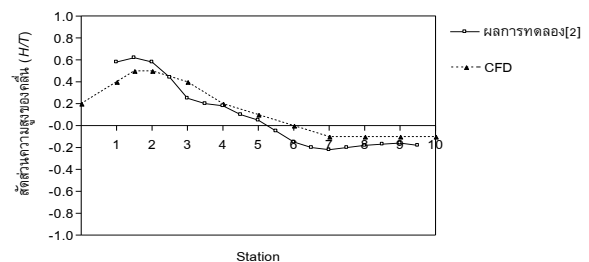
4.3 รูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือ

การจำลองการเกิดคลื่นแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ $Fn = 0.5$ เพื่อเป็นการตรวจสอบโปรแกรม และกรณีที่ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ ซึ่งเทียบเท่าการเดินเรือโดยสารในแม่น้ำที่ความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ในเส้นทางที่มีความลึกระหว่าง 6.5 - 8.5 เมตร ซึ่งจัดเป็นเขตน้ำตื้น [13] ผลการจำลองรูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกตามตำแหน่งทางยาวของเรือ (Station) ที่ $Fn = 0.5$ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง [2] เป็นดังรูปที่ 12 ทั้งนี้ความสูงของคลื่นในอุทกบัณฑิตใน

รูปของอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อระยะกินน้ำลึก (H/T) ซึ่งความสูงของคลื่นนี้คำนวณได้จาก α_{water} ในแต่ละปริมาตรควบคุม โดยการวัดความสูงของคลื่นในแต่ละ Station ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้การคำนวณความสูงจนถึงเซลล์ที่ $\alpha_{water} = 0$

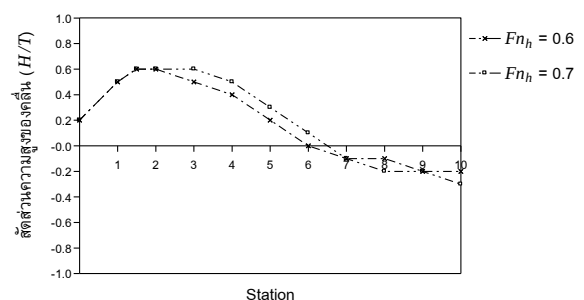
จากรูปที่ 12 เมื่อแบ่งตัวเรือตามความยาวออกเป็น Station จำนวน 10 Station โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กันเท่ากับ $L/10$ หรือ 0.18 เมตร พบว่ารูปแบบคลื่นจากแบบจำลองมีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดลอง กล่าวคือเมื่อเรือแล่นผ่านตื้น น้ำจะถูกยกตัวสูงขึ้นจากระดับแนวน้ำ ($H/T = 0$) จนเกิดสันคลื่นที่ประมาณ Station 2 หรือ $2L/10$ จากนั้นคลื่นจะลดต่ำลงและเกิดท้องคลื่นเมื่อผ่านกึ่งกลางลำเรือ และมีความลึกจากแนวน้ำเกือบคงที่เมื่อผ่านท้ายเรือ ทั้งนี้คลื่นจากแบบจำลองมีความสูงและความลึกน้อยกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้ อาจจะเป็นผลมาจากการใช้ค่าเฉลี่ยของการไหลในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ แบบมาตรฐาน ทำให้รูปแบบคลื่นมีแนวโน้มจะเข้าหาระดับแนวน้ำ

นอกจากนี้เนื่องจากแบบจำลอง VOF แบบ Implicit scheme ได้กำหนดให้แต่ละเซลล์มีค่า α_{water} หรือ $\alpha_{air} = 1$ จากนั้นทำการประมาณค่าในช่วง และทำการเก็บเป็นค่าไว้ที่ Node สำหรับการคำนวณ ทำให้การแบ่งกริดที่บริเวณผิวน้ำจำเป็นต้องมีความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงของคลื่นนี้ได้ ทั้งนี้ความสูงของสันคลื่นที่หัวเรือและท้องคลื่นที่ท้ายเรือมีขนาดน้อยกว่าผลการทดลองประมาณ 15% รูปแบบคลื่นที่ตัวเรือด้านนอกสำหรับกรณีที่ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ ในรูปของสัดส่วน H/T เมื่อแบ่งตัวเรือตามความยาวออกเป็น 10 Stations ดังเช่นรูปที่ 12 พบว่ามีผลเป็นดังรูปที่ 13



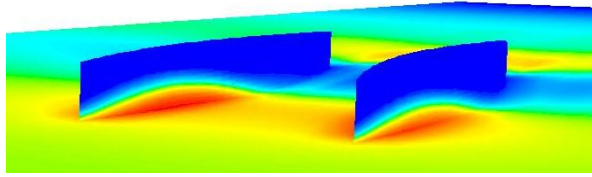
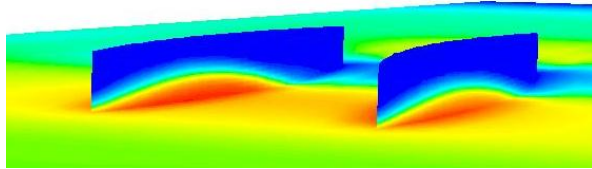
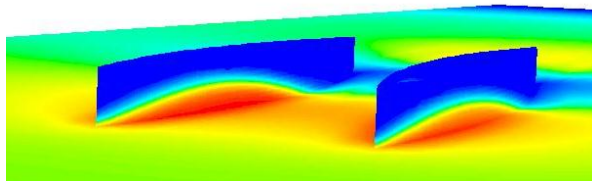
รูปที่ 12 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกที่ $Fn = 0.5$

($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)



รูปที่ 13 รูปแบบคลื่นตามตัวเรือคู่ด้านนอกที่ $Fn = 0.6 - 0.7$

($S/L = 0.3$ และ $L/B = 10$)

(ก) $Fn_h = 0.5$ (ข) $Fn_h = 0.6$ (ค) $Fn_h = 0.7$

จากรูปที่ 13 พบว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ มีค่า H/T โดยเฉลี่ยสูงกว่าที่ $Fn_h = 0.6$ นอกจากนี้ยังพบว่าพบว่าคลื่นที่เกิดจากแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการเกิดคลื่นตามตัวเรือด้านนอกคล้ายกัน แต่ที่ตำแหน่ง Station เดียวกัน คลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ มีความสูงมากกว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.6$ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจุดที่คลื่นตัดกับระดับผิวน้ำ ($h = 0$) พบว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.7$ เดินทางได้ไกลกว่าคลื่นที่ $Fn_h = 0.6$ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาในแง่ความลึกของเส้นทางเดินเรือพบว่าความลึกมีผลต่อความสูงของคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ 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 ซึ่งเป็นผลลัพท์ของแรงเนื่องจากความหนืดของของไหลในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสกับผิวตัวเรือมีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นแบบจำลอง CFD ที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงสามารถนำมาใช้ศึกษา รูปแบบของตัวเรือคู่ที่ทำให้ค่า C_W ลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ C_T ลดลงตามไปด้วย โดยค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนที่คงที่ประมาณ 0.5 เท่า

- ที่ย่านความลึกเมื่อเรือโดยสารแบบตัวเรือคู่แล่นด้วยความเร็วสูงสุดตามกฎหมายที่ $Fn_h = 0.6 - 0.7$ พบว่าเส้นทางเดินเรือในแม่น้ำซึ่งจัดเป็นเขตน้ำตื้น ดังนั้นความลึกจึงมีผลต่อความสูง

ของคลื่นซึ่งจากแบบจำลอง CFD ที่ใช้งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าโดยเมื่อเรือแบบตัวเรือคู่แล่นในน้ำตื้นจะมีคลื่นที่สูงกว่าเมื่อแล่นในน้ำลึก

- แบบจำลอง CFD ที่ประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้วิเคราะห์ความต้านทานและรูปแบบคลื่นที่เกิดจากเรือแบบตัวเรือคู่ที่ใช้งานจริงในย่านความเร็วสูงได้

- เพื่อให้ผลที่ได้จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ผลที่แม่นยำมากขึ้น ควรจะได้มีการศึกษาวิจัยในด้านการแบ่งกริดที่เหมาะสม ตลอดจนการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในการสนับสนุนโปรแกรม CFD-ACE + สำหรับการสนับสนุนในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

7. สัญลักษณ์

A เป็น พื้นที่ผิวของตัวเรือใต้แนวน้ำ

B เป็น ความกว้างสุดที่กลางลำของตัวเรือ

C_L เป็น เส้นกึ่งกลางเรือ

C_T เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานรวม

C_V เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานความหนืด

C_W เป็น สัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงคลื่น

D เป็น ความสูงของเรือวัดจากท้องเรือ

Fn เป็น เลขฟรูดเชิงความยาวแนวน้ำ

Fn_h เป็น เลขฟรูดเชิงความลึกของน้ำ

H เป็น ความสูงของคลื่น

h เป็น ความลึกของน้ำ

L เป็น ความยาวแนวน้ำ

R_T เป็น ความต้านทานรวมของเรือ

S เป็น ระยะห่างระหว่างตัวเรือคู่

T เป็น ระยะกินน้ำลึก

V เป็น ความเร็วของเรือในทิศทางเคลื่อนที่

ρ เป็น ความหนาแน่นของน้ำ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สัตยา จันทรประภา. 2550. เรือโดยสารลดคลื่นเพื่อการประหยัดพลังงาน (Low wash waterbus). วารสารกรมอุทกหารเรือ. ฉบับพิเศษ มกราคม 2550, : 83 - 90.
- [2] Insel, M., Molland, A.F., 1991. An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans. In: Proceeding of Meeting of the Royal Institution of Naval Architects, London.

- [3] Couser, P.R., et al., 1997. Calm Water Powering Predictions for High-speed Catamarans. *Fast*, Vol. 97.
- [4] Utama, I.K.A.P., Molland, A.F., 2001. Experimental and Numerical Investigations into Catamaran Viscous Resistance. In: *Proceedings of the 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. In: *Proceedings of the First AMECRC Postgraduate Student Conference*, Australia.
- [6] Thornhill, E., et al. 2003. Planing Hull Performance Evaluation Using a General Purpose CFD Code. In: *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*, Vol. VIII, pp. 97 – 105.
- [8] International Towing Tank Conference. 1957. Skin Friction and Turbulence Simulation. In: *Proceedings of the 8th ITTC*, Madrid, Spain. Canal de Experiencias Hidrodinámicas, El Pardo, Madrid, Spain.
- [9] Van Manen, J.D., Van Oossanen, P., 1988. Chapter V Resistance. *Principles of Naval Architecture*, Vol. III, Lewis, EV, editor. 1st printing, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, USA, pp. 1 – 125.
- [10] Versteeg, H.K., Malalasekera, W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 1st edition. Longman Group Ltd, England.
- [11] กิตติภูมิ ภูมิโคกรักษ์ และคณะ. 2553. การศึกษาผลกระทบของระยะห่างและความเร็วของเรือแบบตัวเรือคู่ต่อความต้านทานเรือด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. การประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลภาคตะวันออก 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, In: *Proceedings of the Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting*.