

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยแรงจูงคงที่

Experimental Estimation of Hydrodynamics Coefficients of Underwater Vehicle Using Constant Towing Force

ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต¹ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²

¹สถาบันไทย-เยอรมัน

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยการออกแบบยานใต้น้ำอัตโนมัติ โดยนำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติของยานใต้น้ำ การหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ทำได้โดยออกแรงจูงคงที่กระทำในทิศทางเคลื่อนที่ของยานในแต่ละแกนสมมาตรและวัดระยะการเคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อนำมาหาความเร็วและความเร่งขณะนั้นๆ และนำค่าที่ได้คือระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ด้วยวิธี least square ในสามรูปแบบ 1) ใช้ผลตอบสนองสัมบูรณ์ 2) ใช้ผลตอบสนองช่วงเริ่มเคลื่อนที่ 3) ใช้ผลตอบสนองช่วงคงที่ การทดสอบในทิศทางเดินหน้า (แกน x) ใช้แรงจูงคงที่ 4 ค่าคือ 4.9 24.5 44.1 และ 83.3 นิวตัน ส่วนการทดสอบการหมุนรอบแกนในระนาบแนวนอน (ระนาบ xy) ใช้แรงจูงคงที่เพื่อสร้างโมเมนต์บิด 4 ค่าคือ 0.454 0.907 1.361 และ 2.269 นิวตันเมตร โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานและจำลองการตอบสนองด้วย MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบควบคุมของยานใต้น้ำได้ดีและมีความน่าเชื่อถืออีกวิธีหนึ่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ “BENBAM” สามค่าคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นจากรถ (Added mass) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสอง จะเป็น 113.2591 kg 20.1603 Ns/m 241.1425 N.(s/m)² สำหรับการเคลื่อนที่ที่เดินหน้า และ 7.9708 kg.m² 0.1192 N.s/rad และ 4.1228 N.(s/rad)² สำหรับการหมุนในแนวตั้ง

คำสำคัญ: การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ยานใต้น้ำ การประมาณค่าแบบ Least Square

Abstract

This article is part of the control design research for an underwater vehicle. The method to estimate the hydrodynamic coefficients of the underwater vehicle was proposed in this study. This method was especially important for controller design of the underwater vehicle. The process of this method was to apply a constant towing force in the direction along with each symmetry-axes of the vehicle and to measure the vehicle movement at each step in order to calculate its velocity and acceleration. The hydrodynamic coefficients was estimated from experimental data by applying the least square method for 1) total response, 2) transient response, and 3) steady-state response. With regard to the forward motion along the x axis, it was found that four values of constant towing force were 4.9 N, 24.5 N, 44.1 N, and 83.3 N, respectively. Regarding the angular motion about the z-axis, it was found that four values of constant spinning torque were 0.454 N-m, 0.907 N-m, 1.361 N-m, and 2.269 N-m, respectively. A first-order dynamic model of vehicle using estimated hydrodynamic coefficients was simulated within MATLAB/Simulink, and then the simulated results were compared with actual tests. The estimated hydrodynamic coefficients using these methods yielded accurate and reliable parameters that could be employed with the vehicle controller design. These hydrodynamic coefficients: added mass, linear damping, and quadratic damp were suitable for "BENBAM" underwater vehicle at 113.2591 kg, 20.1603 Ns/m, 241.1425 N.(s/m)² for forward motion, and 7.9708 kg.m², 0.1192 N.s/rad 4.1228 N.(s/rad)² for angular motion.

Keywords : *estimated hydrodynamic coefficient, underwater vehicle, least square estimation*

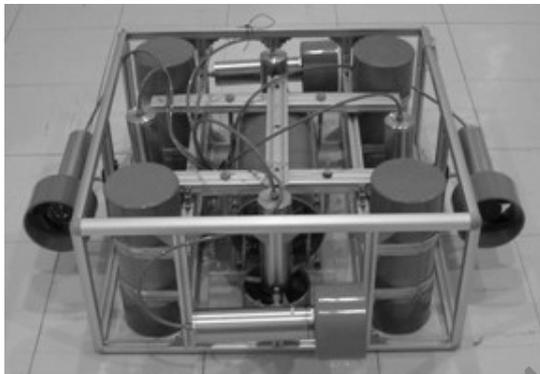
1. บทนำ

ปัจจุบัน ได้มีการนำยานใต้น้ำ (underwater vehicle) มาใช้ปฏิบัติงานใต้น้ำกันอย่างกว้างขวาง เช่น งานสำรวจตรวจสอบ เก็บตัวอย่างน้ำ และกู้ภัยเป็นต้น และการออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำนับเป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งที่มีความน่าสนใจ การออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น ออกแบบรูปร่างตามความเหมาะสมกับการใช้งาน หาค่าพารามิเตอร์ของตัวยานเพื่อประกอบการออกแบบระบบควบคุม ออกแบบระบบควบคุม ทดสอบระบบและปรับแต่งก่อนนำไปใช้งานจริง

การออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำให้ได้ผลที่ดีประการหนึ่งที่สำคัญคือต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยาน โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์นี้อาจทำได้โดยวิธีการคำนวณ ซึ่งจะเหมาะกับยานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน หรืออาจหาโดยวิธีการทดสอบประกอบการคำนวณ ซึ่งจะเหมาะกับยานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยทั้งสองวิธีก็ให้ผลแม่นยำแตกต่างกัน สำหรับบทความนี้ นำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยวิธีการทดสอบประกอบการคำนวณ ซึ่งทดลองโดยออกแรงจุดคงที่กระทำในทิศทางการเคลื่อนที่ของยานในแต่ละแกนสมมาตรและวัดระยะการเคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

เพื่อนำมาหาความเร็วและความเร่งขณะนั้นๆ และนำค่าที่ได้คือ ระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง มาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของยาน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ด้วยวิธี least square

แบบจำลองพลวัต ในรูปภาพที่ 1 แสดงยานใต้น้ำที่ได้สร้างขึ้นและจะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์



รูปภาพที่ 1 ยานใต้น้ำ BENBAM

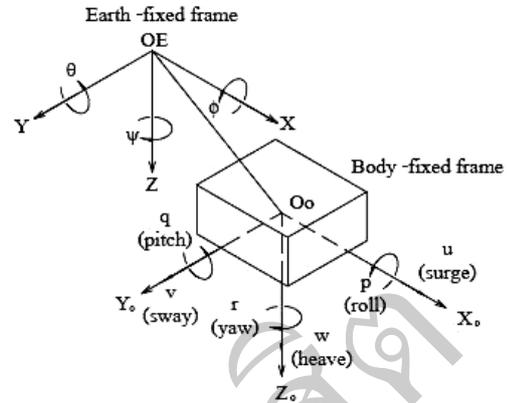
โดยมีกรอบอ้างอิง (reference frame) สำหรับ 6 องศาอิสระในการเคลื่อนที่คือบอกพิกัดตำแหน่งของตัวยาน (X, Y, Z) และมุมการหมุนใน 3 แกน (ψ , θ , ϕ) ดังรูปภาพที่ 2 โดยที่ตัวแปรสถานะ (state) ต่างๆ ของยานใต้น้ำมีดังนี้

u, v, w คือความเร็วเชิงเส้นตามแกน x, y, z

p, q, r คือความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y, z

ψ, θ, ϕ คือองศาการหันเห (yaw angle) องศาการปักและเอียง (pitch angle) และองศาการกลิ้ง (roll angle)

เมื่อพิจารณากรอบอ้างอิงที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ของยาน โดยที่ยานมีความสมมาตร (symmetry) ในทั้ง 3 แกน สำหรับยานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ แบบจำลองพลวัตสามารถเขียนได้ในสมการที่ (1) (Fossen and Thor, 1994)



รูปภาพที่ 2 ยานใต้น้ำในกรอบอ้างอิงของตัวยาน

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

โดยที่ M คือเมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) รวมกับ Added mass, $C(v)$ คือเมตริกซ์ Coriolis และ Centripetal รวมกับ Added mass, $D(v)$ คือเมตริกซ์ความหน่วงและแรงยกทาง Hydrodynamic, $g(\eta)$ คือเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง แรงลอยตัวและโมเมนต์, τ คือเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต ตัวแปรสถานะคือ $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ และยานใต้น้ำที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้ถูกออกแบบให้แรงลอยตัวมีค่าเท่ากับมวลของยานและกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวล ดังนั้นสมการที่ (1) ลดรูปได้เป็นสมการที่ (2)

$$M\dot{v} + D(v)v = \tau \quad (2)$$

สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ เมื่อพิจารณาขณะเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอนตามแกน x และเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดของอินพุต (τ) ในแต่ละแกนจะไม่เกี่ยวเนื่องกัน สมการ (2) สามารถเขียนอยู่ในตัวแปรของแกน x ได้ดังสมการที่ (3)

$$(m + m_a)\ddot{x} + (K_L + K_Q|\dot{x}|)\dot{x} = \tau_x \quad (3)$$

โดยที่ m คือมวลของยานใต้น้ำ

m_a คือ Added mass

K_L คือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้น

เส้น

K_O คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสอง

τ_x คือแรงอินพุต

\dot{x} คือความเร็วของยานตามแนวแกน $x = u$

\ddot{x} คือความเร่งของยานตามแนวแกน $x = \dot{u}$

จากสมการที่ (3) การออกแบบระบบควบคุมจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ก่อน คือ m_a , K_L และ K_O ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่าง ผิวของยานได้น้ำ กรณียานได้น้ำมีรูปร่างซับซ้อนสามารถประมาณค่าด้วยวิธีการทดสอบ

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ของยานได้น้ำ BENBAM (ดังรูปภาพที่ 1) ด้วยวิธี least square เมื่อมีแรงลุดคองที่

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์ทดสอบ

ในรูปภาพที่ 3 แสดงถึงชุดทดสอบและการติดตั้งยานได้น้ำกับชุดทดสอบ โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย (1) อ่างน้ำ, (2) รางน้ำเลื่อน, (3) Encoder, (4) PLC, (5) คอมพิวเตอร์ และ (6) ก้อนน้ำหนัก

3.2 วิธีการทดสอบและหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ตามแนวแกนกระทำโดยใช้แรงลุดคองที่ 4 ค่า คือ 4.9 , 24.5 , 44.1 และ 83.3 นิวตัน ตามลำดับกระทำกับยานได้น้ำ (ดังแสดงในรูปภาพที่ 3(ก)) และวัดค่าการตอบสนองของระยะทางการเคลื่อนที่ x ส่วนความเร็ว \dot{x} และความเร่ง \ddot{x} หาโดยใช้หลักการเชิงตัวเลขดังนี้

$$\dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (4)$$

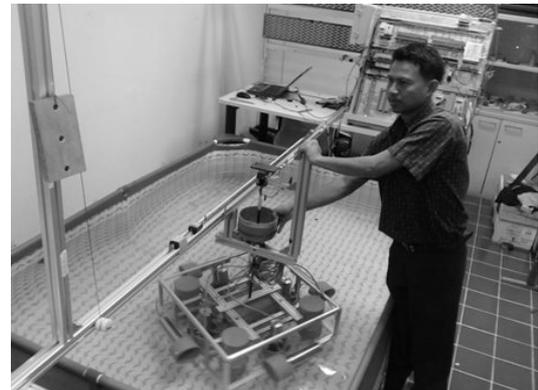
$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \quad (5)$$

โดย Δt คือช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง โดยการทดลองจะทำการสุ่มตัวอย่างตำแหน่ง x ทุกๆ 0.1 วินาที

ในการทำงานเดียวกัน การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์รอบแกนกระทำโดยใช้แรงบิดลุดคองที่ 4 ค่า คือ 0.454 , 0.907 , 1.361 และ 1.815 นิวตันเมตร ตามลำดับกระทำกับยานได้น้ำดัง



(ก) ทดสอบแรงลุดคองตามแนวแกน



(ข) ทดสอบแรงบิดลุดคองรอบแกน

รูปภาพที่ 3 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ทดสอบ และการติดตั้งยานได้น้ำ

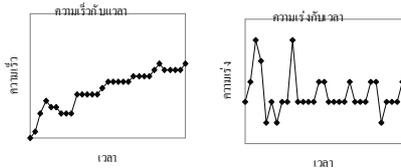
แสดงในรูปภาพที่ 3 (ข) และวัดค่าการตอบสนองของมุมหันเห ส่วนค่าอื่นๆหาโดยวิธีการเดียวกับการทดสอบตามแนวแกน และนำผลที่ได้มาประกอบการคำนวณ

เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์โดยมีแนวทางดังนี้

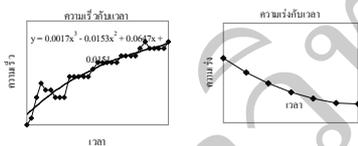
แนวทางที่ 1 หาโดยใช้ความเร็วและความเร่งที่คำนวณโดยตรงจากการทดลอง ดังรูปภาพที่ 4

แนวทางที่ 2 หาโดยใช้ความเร็วที่ได้จากการทำ curve fitting และความเร่งเป็นค่าที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของ curve fitting เทียบกับเวลา ดังรูปภาพที่ 5

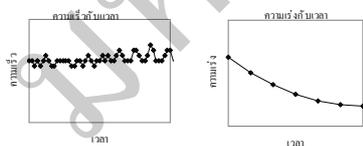
แนวทางที่ 3 หาโดยใช้ความเร็วที่สภาวะคงตัวร่วมกับความเร่งเป็นค่าที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของ curve fitting เทียบกับเวลา ดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 4 ความเร็วและความเร่งจากการทดลอง



รูปภาพที่ 5 ความเร็วและความเร่งจากอนุพันธ์ของ curve fitting



รูปภาพที่ 6 ความเร็วจากการทดสอบและความเร่งจากอนุพันธ์ของ curve fitting

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 1 กรณียานได้นำเริ่มเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง จัดรูปสมการ (3) ได้เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} + (m + m_a) \ddot{x} \quad (6)$$

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 2 ทำ curve fitting ของผลการทดลองช่วงที่ความเร็วยังไม่คงที่ โดยใช้การจำลองผลตอบสนองเป็นระบบลำดับที่ 1 (first-order system) ความสัมพันธ์ของความเร็วในทิศทาง x คือ \dot{x} กับเวลาเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\dot{x} = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

โดยที่ A คือค่า amplitude และ τ คือค่าคงที่ของเวลา ทั้งสองหาได้จากผลทดลอง และหาอนุพันธ์ของสมการ (7) เทียบกับเวลา จะได้เป็นความเร่ง \ddot{x} หรือเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\ddot{x} = \frac{d(\dot{x})}{dt} = \frac{A}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 3 กรณียานได้นำเริ่มเคลื่อนที่ความเร็วสม่ำเสมอแล้วพจน์ของความเร่ง \ddot{x} จะกลายเป็นศูนย์ จัดรูปสมการ (3) ได้เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} \quad (9)$$

และใช้สมการที่ (9) ร่วมกับสมการ (3) ที่จัดรูปใหม่คือ

$$\tau_x - K_L \dot{x} - K_Q |\dot{x}| \dot{x} = (m + m_a) \ddot{x} \quad (10)$$

จากนั้นใช้หลักการ least square (Ljung and Lennart, 1987) เพื่อประมาณหาค่า K_L, K_Q และ m_a โดยจัดรูปสมการ (6), (9) และ (10) อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็นสมการ (11), (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}_{\tau} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 & \ddot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 & \ddot{x}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i & \ddot{x}_i \end{bmatrix}_H \begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \\ m + m_a \end{bmatrix}_K + error \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}_{\tau} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}_H \begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \end{bmatrix}_K + error \quad (12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{x1} - K_L \dot{x}_1 - K_D |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \tau_{x2} - K_L \dot{x}_2 - K_D |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \tau_{xi} - K_L \dot{x}_i - K_D |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}}_{\tau} = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix}}_H \underbrace{\left[\begin{matrix} (m + m_a) \\ \vdots \\ K \end{matrix} \right]}_K + error \quad (13)$$

โดยที่ x_i , \dot{x}_i และ \ddot{x}_i คือตำแหน่ง ความเร็ว และ ความเร่งที่เวลาต่างๆกัน เมื่อ $i=1, 2, 3...$ คือจำนวนของ ตัวอย่าง (sample) จากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ และ ค่าประมาณของ K คือ \hat{K}_{LS} คำนวณได้จาก

$$\hat{K}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \tau \quad (14)$$

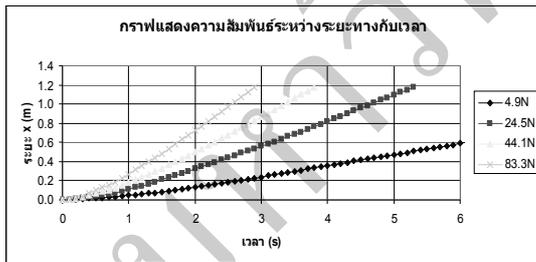
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$$\hat{\sigma}_K = \sqrt{\text{diag}(\text{cov}(\hat{K}_{LS}))} \quad (15)$$

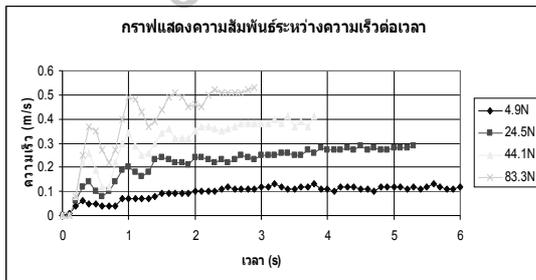
โดยที่ $\text{cov}(\hat{K}_{LS}) = \hat{\sigma}^2 (H^T H)^{-1}$

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

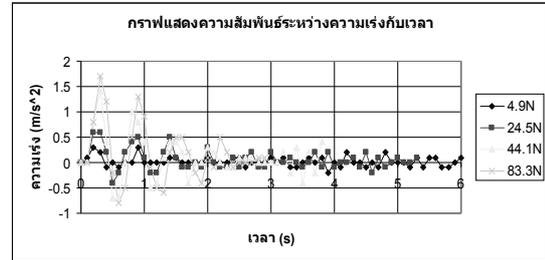
การเคลื่อนที่ที่เห็นหน้า ผลการทดลองที่ได้จาก ยานได้นำมาแสดงในรูปภาพที่ 7 ประกอบกับการคำนวณของ การเคลื่อนที่ที่เห็นหน้าตามแกน x ดังแสดงในรูปภาพที่ 8



(ก) ระยะทาง (x) กับเวลา (t)

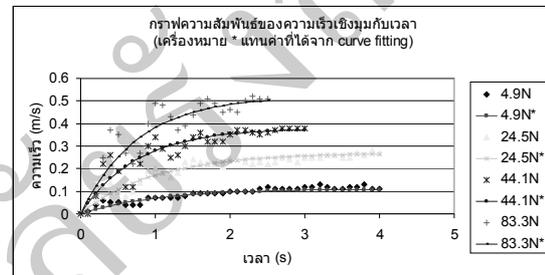


(ข) ความเร็ว (\dot{x}) กับเวลา (t)



(ค) ความเร่ง (\ddot{x}) กับเวลา (t)

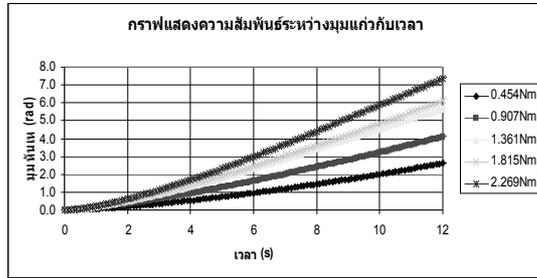
รูปภาพที่ 7 ผลการทดลองกับการคำนวณของการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวแกน x



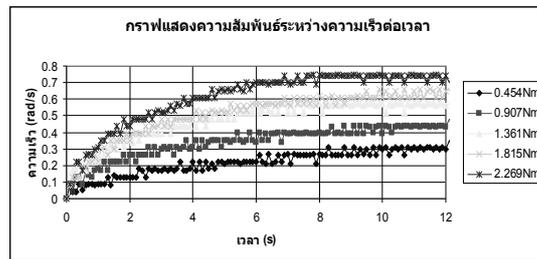
รูปภาพที่ 8 ผลตอบสนองของความเร็วในช่วง transient กับ curve fitting

เมื่อพิจารณาความเร็วชั่วขณะได้เวลาที่ ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ที่แรงกระทำเท่ากับ 4.9, 24.5, 44.1 และ 83.3 นิวตัน มีค่าประมาณเท่ากับ 4, 4, 3, 3 วินาทีตามลำดับและทำ curve fitting ของผลตอบสนอง ความเร็วในช่วง transient ได้ผลดังรูปภาพที่ 8 ผลตอบสนองความเร็วในช่วง transient สำหรับแรงกระทำ 4.9, 24.5, 44.1, 83.3 นิวตัน ได้ amplitude ของความเร็ว (A) เป็น 0.11, 0.27, 0.38, 0.51 และได้ค่าคงที่ของเวลา (τ) เป็น 1, 1, 0.75, 0.75 ตามลำดับ

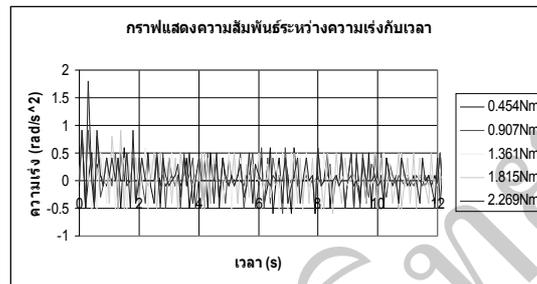
การหมุนรอบแกน ผลการทดลองที่ได้จากยาน ได้นำมาแสดงในรูปภาพที่ 9 ประกอบกับการคำนวณของ การหมุนรอบแกน z ได้ผลดังแสดงในรูปภาพที่ 10



(ก) องศาการหันเห (ψ) กับเวลา (t)

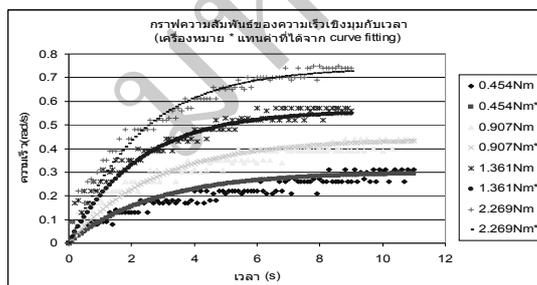


(ข) ความเร็วหันเห ($\dot{\psi}$) กับเวลา (t)



(ค) ความเร่งหันเห ($\ddot{\psi}$) กับเวลา (t)

รูปภาพที่ 9 ผลการทดลองกับการคำนวณของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน z



รูปภาพที่ 10 ผลตอบสนองของความเร็วในช่วง transient กับ curve fitting

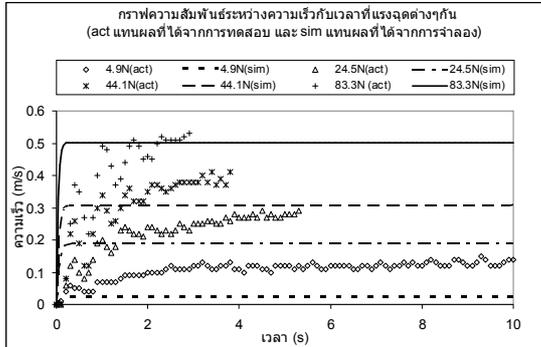
และผลการคำนวณหาความเร็วหันเหชั่วขณะตามแนวแกน z ($\dot{\psi}$) ได้เวลาที่ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่

ที่แรงบิดจุดเท่ากับ 0.454, 0.907, 1.361 และ 2.269 นิวตันเมตรโดยประมาณเท่ากับ 11, 11, 9, 9 วินาทีตามลำดับ เมื่อทำ curve fitting ของผลตอบสนองความเร็วหันเหในช่วง transient ได้ผลดังแสดงในรูปภาพที่ 10 สำหรับแรงบิด 0.454, 0.907, 1.361, 2.269 นิวตันเมตรได้ amplitude ของความเร็วหันเหเป็น 0.31, 0.44, 0.56, 0.74 และได้ค่าคงที่ของเวลาเป็น 2.75, 2.75, 2.25, 2.25 ตามลำดับ โดยผลการคำนวณตามแนวทางที่ 1, 2 และ 3 แสดงในตารางที่ 1 และนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์แทนในสมการที่ 3 และจำลองด้วย MATLAB/Simulink ได้ผลดังรูปภาพที่ 11 และ 12

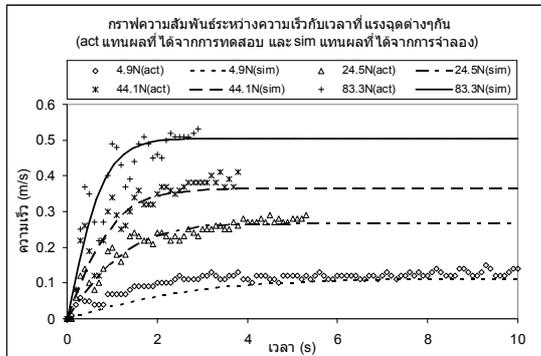
ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่คำนวณจากผลการวัดค่าในช่วง transient

เชิงเส้น	แนวทาง		
	1	2	3
$m + m_a$ [kg]	8.0907	133.2060	143.2591
K_L [N.s/m]	107.3427	8.8529	20.1603
K_Q [N.(s/m) ²]	116.3427	308.8443	241.1425

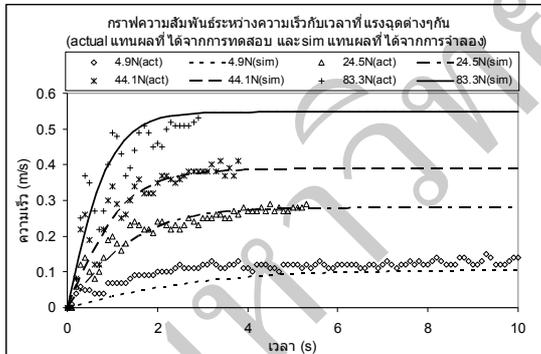
เชิงมุม	แนวทาง		
	1	2	3
I [kg.m ²]	0.0870	7.0796	7.9708
K_L [N.s/rad]	3.0057	0.4666	0.1192
K_Q [N.(s/rad) ²]	0.1486	3.4984	4.1228



(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1



(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2



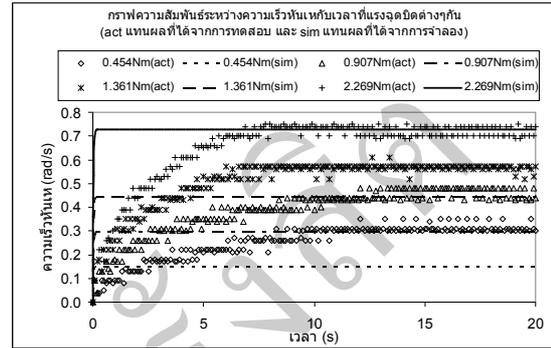
(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปภาพที่ 11 ผลจำลองที่ได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานในการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน x

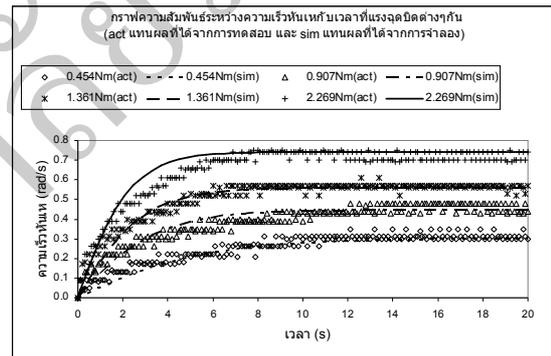
5. การอภิปรายผล

ผลการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่คำนวณได้จากทั้งสามแนวทางมาจำลองร่วมกับแบบจำลองพลวัตของยานได้น้ำแสดงดังรูปภาพที่ 11 และ 12 โดยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้ พิจารณารูปภาพ

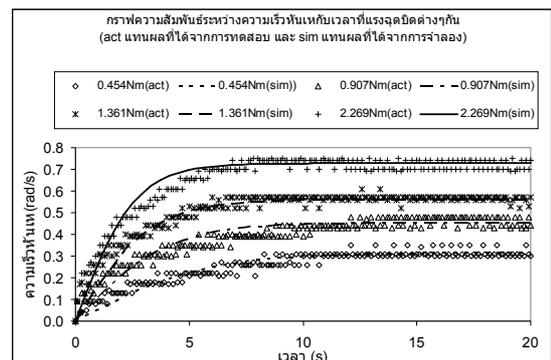
ที่ 11(ก) และ 12(ก) พบว่าผลจากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบสูงมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 1 ไม่สามารถใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบได้



(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1

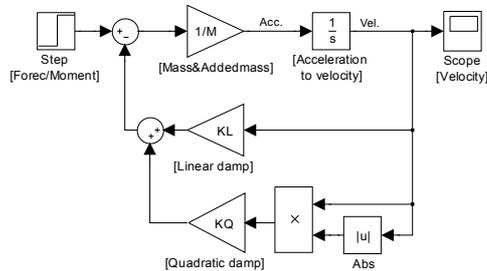


(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2



(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปภาพที่ 12 ผลจำลองที่ได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานในการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน z



รูปภาพที่ 13 แผนภาพกรอบของแบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ (สร้างจากสมการที่ (3)) ที่ใช้จำลองผลด้วย MATLAB/Simulink

ต่อมาพิจารณารูปภาพที่ 11(ข) และ 12(ข) พบว่าผลการจำลองได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 2 สามารถใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบได้ ท้ายสุดพิจารณารูปภาพที่ 11(ค) และ 12(ค) พบว่าผลการจำลองได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบมากเช่นเดียวกับในแนวทางที่ 2 แต่โดยรวมแล้ว การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ในการจำลองโดยใช้แนวทางที่ 3 โดยเฉลี่ยจะให้ผลคล้ายกับผลการทดสอบมากที่สุด ดังนั้นแนวทางที่ 3 จึงเหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ทั้งการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและเชิงมุม

6. บทสรุป

จากผลการทดสอบแรงจุดคงที่กระทำต่อยานใต้น้ำ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นและแนวเชิงมุม แสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีการในแนวทางที่ 3 โดยใช้ความเร็วที่สภาวะคงตัวและอนุพันธ์ของ curve fitting ของความเร็วเพื่อหาความเร่ง สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำที่เหมาะสมโดยค่าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นค่าประมาณระบบของยาน BENBAM ที่มีมวลเท่ากับ 30 kg สำหรับการเคลื่อนที่เดินหน้าคือ m_d, K_L, K_Q จะมีค่าเป็น 113.2591 kg,

20.1603 Ns/m, 241.1425 N.(s/m)² และสำหรับการหมุนคือ I, K_L, K_Q จะมีค่าเป็น 7.9708 kg.m², 0.1192 N.s/rad และ 4.1228 N.(s/rad)² ตามลำดับ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับทดสอบ และคุณกุ่มหลวง คำบุผา ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประกอบ และการทดสอบจนสำเร็จได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Ljung, Lennart (1987). *System identification*. New Jersey: Prentice Hall