

## การประเมินพฤติกรรมการจมและลอยตัวสำหรับยานใต้น้ำไร้คนขับ ของราชนาวีไทย

### Estimation of the Royal Thai Navy Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Sinking and Floating Performance Behavior

ปองวิทย์ ศิริโพธิ์<sup>1</sup> วีรวัฒน์ วงษ์ดนตรี<sup>2</sup> อธิศ จงสันติสุข<sup>1</sup> อมรเทพ แพทย์เจริญ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup>กรมอุทหาเรือ กองทัพเรือ ถนนอรุณอมรินทร์ บางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร

E-mail: fengpws@ku.ac.th

Pongwit Siribodhi<sup>1</sup> Weerawat Wongdontri<sup>2</sup> Atis Jongsuntisuk<sup>1</sup> Amorntep Patcharoen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Paholyothin Rd, Lodyao Jatujuk Bangkok.

<sup>2</sup> Naval Dockyard Department Aroonammarin Rd,

Bangkoknoi Bangkok Thailand.

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพฤติกรรมการจม และการลอยตัวของยานใต้น้ำไร้คนขับของราชนาวีไทย ข้อมูลและตัวแปรที่ศึกษาได้มา จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับยานลำน้ำในลำดับต่อไป การศึกษาครั้งนี้จำกัดขอบเขตเฉพาะการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของยาน ในลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้น(ลอยตัวขึ้น)-ลง(ต่ำลง) ในแนวตั้งเท่านั้น การวิเคราะห์ที่ใช้ทฤษฎีทางพลศาสตร์และกลศาสตร์ของของไหล ประกอบด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและการทดลอง ผลของการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ยานใต้น้ำที่มีขนาดความกว้าง 0.45 เมตร ความยาว 3.10 เมตร ความสูง 0.40 เมตร สามารถดำลงที่ความลึกที่ออกแบบไว้ที่ 30 เมตรได้ภายในเวลา 250 วินาที ในทางกลับกันในการลอยตัวเมื่อถึงความดันสูงภายในยานที่มีความดันเฉลี่ยที่ 5 บาร์ ถูกเปิดออกที่ความลึก 30 เมตร ยานลำน้ำสามารถลอยขึ้นสู่น้ำได้ใช้เวลา 93 วินาที

**คำหลัก** การจมและการลอยตัว ยานใต้น้ำ เป้าฝึกปราบเรือดำน้ำ

#### Abstract

This research attempts to understand a sinking and a floating behavior of an unmanned underwater vehicle (UUV) of The Royal Thai Navy. The data and parameters obtained from this study will be applied in designing and

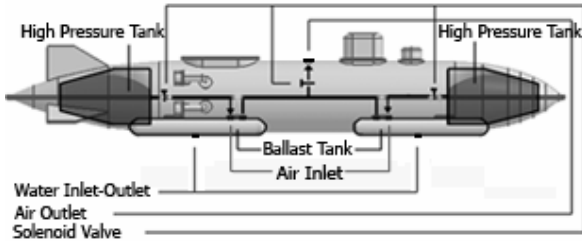
building an automatic control system for a next generation of this vehicle. A scope of the research is intended to do an investigation on the behavior of the vehicle in a going up (floating) and going down (sinking) movement in vertical only. The study has used the theory of dynamics and the mechanics of fluid, including a numerical and an experimental technique. The analyses results conclude that this UUV that has 0.45 meter in width, 3.10 meter in length, and 0.40 meter in height, can go down at the design depth of 30 meter within 250 seconds. Conversely, in the float stage, when a pressure in a high pressure tank in a vehicle that has the average pressure of 5 bar was relieved at the vehicle depth of 30 meter, the vehicle can go up to the surface within 93 seconds.

**Keywords:** Sinking and Floating, Underwater Vehicle, Submarine

#### 1. บทนำ

กองทัพเรือมีความต้องการยานใต้น้ำไร้คนขับ สำหรับการฝึกปราบเรือดำน้ำที่เรียกว่า"เป้าฝึกปราบเรือดำน้ำ" เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงได้เกิดเป็นโครงการเป้าฝึกปราบเรือดำน้ำขั้นที่หนึ่งซึ่งได้มีการวิจัยออกแบบและสร้างเป้าฝึกฯ ขึ้นมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เป้าฝึกปราบเรือดำน้ำขั้นที่หนึ่งนั้นยังไม่มีระบบควบคุมตัวแบบอัตโนมัติ หลังจากโครงการขั้นที่ 1 จบลงกระทรวงกลาโหมได้อนุมัติให้กองทัพเรือทำการ

วิจัยต่อยอด โดยใช้ประสบการณ์จากเป่าฝักปราบเรือดำน้ำขั้นที่หนึ่งมาพัฒนาออกแบบใหม่ เป็นเป่าฝักปราบเรือดำน้ำขั้นที่สองหรือยานใต้น้ำไร้คนขับ ในโครงการเป่าฝักปราบเรือดำน้ำขั้นที่สองซึ่งในส่วนของควบคุม ได้ออกแบบให้มีระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องรู้ถึงพฤติกรรมและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม เพื่อให้การปฏิบัติงานของยานใต้น้ำไร้คนขับมีพฤติกรรมตามความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งสิ่งที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการจมการลอยตัวของยานใต้น้ำไร้คนขับในลักษณะต่างๆ นั้น คือการควบคุมเปลี่ยนแปลงมวลภายในถังอับเฉา

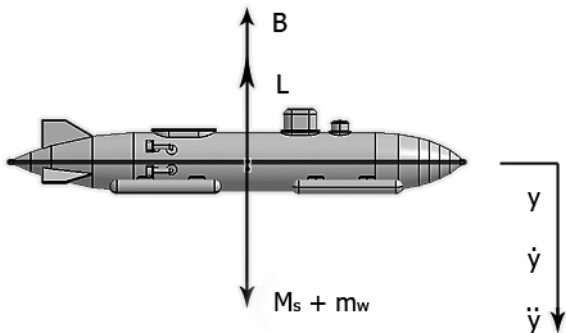


รูปที่ 1 แสดงส่วนควบคุมพฤติกรรมของยาน ซึ่งประกอบด้วยถังเก็บอากาศความดันสูง ถังอับเฉา(Ballast Tank) วาล์ว ระบบท่อและทางเข้า-ออกของ น้ำและอากาศ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรม

การจมและลอยตัว ของยานใต้น้ำไร้คนขับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิจัยนี้ ได้เขียนขึ้นโดยใช้หลักการเคลื่อนที่พื้นฐานของยานตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพอิสระของยานใต้น้ำไร้คนขับ ขณะจมตัว

โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะได้สมการควบคุมพฤติกรรมการจมตัวดังนี้

$$(M_s + m_w)g - B - L = (M_s + m_w)\ddot{y} \tag{1}$$

สำหรับสมการควบคุมพฤติกรรมการลอยตัวเป็นดังนี้

$$-(M_s + m_w)g + B - L = (M_s + m_w)\ddot{y} \tag{2}$$

พารามิเตอร์ที่ปรากฏในสมการ (1) และ (2) นั้นพารามิเตอร์บางค่าสามารถกำหนดค่าแน่นอนได้นั้นคือ  $M_s$ ,  $g$ ,  $B$  โดยที่

$M_s$  คือมวลของโครงสร้างยานใต้น้ำมีค่าคงที่ = 325 kg

$g$  คือค่าคงตัวความเร่งของโลก = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$B$  คือแรงลอยตัวมีค่าสูงสุดเมื่อยานอยู่ใต้น้ำทั้งลำ = 3274.82 N

สำหรับค่าที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอนคือ  $m_w$ ,  $L$ ,  $\dot{y}$  โดยที่

$m_w$  คือมวลของน้ำในถังอับเฉา ค่านี้จะได้มาจากการออกแบบซึ่งหมายถึงการออกแบบท่อวาล์วขนาดทางเข้า-ออกของน้ำ และอากาศที่ถังอับเฉารวมถึงระยะเวลาของการเปิด-ปิดวาล์วดังกล่าว เพื่อให้ น้ำและอากาศไหลเข้าหรือออกจากถังอับเฉา ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปของเวลา

$L$  คือแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากแรงต้านทางชลศาสตร์พลศาสตร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรูปร่าง(A) ความเร็วของยาน( $\dot{y}$ ) แรงเสียดทานที่ผิว และความหนาแน่นของน้ำ( $\rho$ ) ในแต่ละความลึก

$\ddot{y}$  คือความเร่งของยาน ในแนวตั้ง เป็นคำตอบของสมการ จะเห็นว่า  $m_w$  และ  $L$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญ เพราะความเที่ยงตรงของคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ที่กล่าวขึ้นอยู่กัพารามิเตอร์สองตัวนี้ รวมถึงการออกแบบพฤติกรรม ให้เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆ จะได้มาจากการควบคุม พารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้ด้วย

2. วิธีการประเมินค่าพารามิเตอร์ ที่ใช้อธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำไร้คนขับ

ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินพฤติกรรมมีสองค่าตามที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ  $L$  และ  $m_w$  ซึ่งจะบรรยายวิธีการประเมินค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยละเอียดดังต่อไปนี้

3.1  $L$  แรงต้านการเคลื่อนที่ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วยาน รูปร่าง ความหนาแน่นของน้ำ และแรงเสียดทานที่ผิว ตามทฤษฎีทางอากาศพลศาสตร์  $L$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L \dot{y}^2 A \tag{3}$$

โดยที่  $A$  คือพื้นที่ฉายในแนวตั้งของยาน = 1.202 m<sup>2</sup>

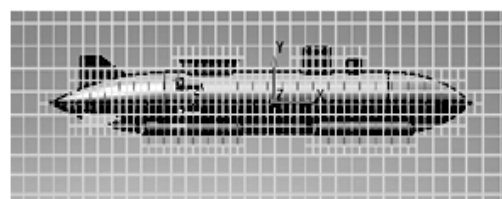
$\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำ เป็นฟังก์ชันของความลึก  $y$  แต่เนื่องจาก ค่าความหนาแน่น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ระดับความลึก 0 – 100 m เพราะฉะนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ย  $\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$  [1]

$\dot{y}$  คือความเร็วของยาน เป็นผลลัพธ์ของสมการที่ (3)

$C_L$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน ประกอบด้วยแรงต้านที่มาจากรูปทรง และแรงต้านที่มาจากแรงเสียดทานที่ผิว

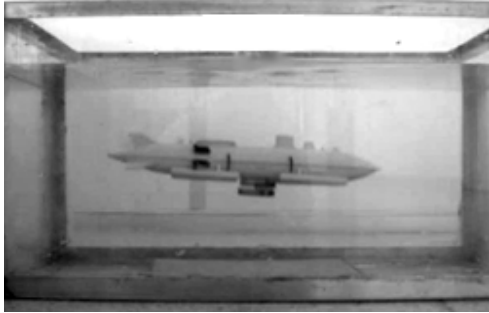
$$C_L = C_{L,body} + C_{L,friction} \tag{4}$$

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาง Finite Difference/Computational fluid Dynamic (CFD) สำหรับการจมสรุปได้ว่า



รูปที่ 3 แสดงการ Mesh ในวิธีการทาง CFD เพื่อหาค่า  $C_L$

$C_{L,body}$  ที่ได้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาง CFD นั้นเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มาจากรูปทรง แต่ในความเป็นจริง แรงต้านยังเป็นผลมาจากความเสียดทานที่ผิวด้วย เพราะฉะนั้นจึงมีการทดสอบแบบจำลองยานใต้น้ำขนาดย่อส่วน (1:8) เพื่อหาค่าดังกล่าว จากการทดสอบและแก้สมการจะได้  $C_L$  ของแรงต้านที่รวมความเสียดทานที่ผิว ซึ่งทำให้การทำนายพฤติกรรมมีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 4 การทดสอบแบบจำลองย่อส่วน (1:8) เพื่อหาค่า  $C_L$

การวิเคราะห์ด้วยวิธีทาง CFD และการทดสอบดังกล่าวทำให้ได้ว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มาจากแรงเสียดทานที่ผิวหาได้จาก

$$C_{L,friction} = C_L - C_{L,body} \quad (5)$$

การศึกษาครั้งนี้พบว่ากรณีจมตัว

$$C_L = 1.468, C_{L,body} = 1.373, C_{L,friction} = 0.095$$

กรณีลอยตัว

$$C_L = 1.154, C_{L,body} = 1.059, C_{L,friction} = 0.095$$

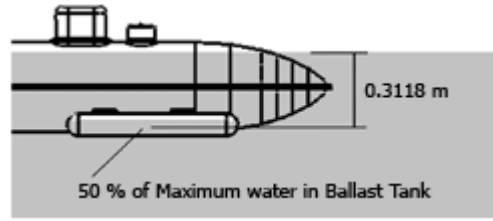
3.2  $m_w$  มวลของน้ำในถังอับเฉานั้นประกอบด้วยมวลน้ำที่ไหลเข้าถังอับเฉา และมวลของน้ำที่ไหลออกจากถังอับเฉาอันเนื่องมาจากถูกอากาศจากถังอากาศความดันสูงเข้ามาแทนที่ ประเมินค่าด้วยการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหลโดยที่

$$m_w = m_{in} - m_{out} \quad (6)$$

3.2.1  $m_{in}$  มวลน้ำที่ไหลเข้าถังอับเฉาที่เวลาต่างๆ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการจม จะเห็นว่าการไหลเข้าของน้ำจะเกิดขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อม 2 ช่วงคือช่วงแรก รูทางออกของอากาศที่อยู่ด้านบนสุดของตัวยานและยังไม่จมน้ำ ช่วงที่สอง รูดังกล่าว จมน้ำแล้วจะได้ว่า

$$m_{in} = m_{in,phase\_1} + m_{in,phase\_2} \quad (7)$$

เมื่อ  $m_{in,phase1}$  คือมวลของน้ำที่ไหลเข้าขณะรูทางออกของอากาศที่ด้านบนสุดของตัวยานยังไม่จมน้ำและ ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและตรวจสอบผล ด้วยการทดลองบนแบบจำลองอย่างง่าย ได้ว่า อัตราการไหลเข้าตามทฤษฎี มีค่าเป็นดังนี้



รูปที่ 5

$$v_{in\_phase\_1} = \sqrt{2 \times g \times h_{av}}$$

$$v_{in\_phase\_1} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3118} = 2.473 \quad m^2 / s$$

$$Q_{in\_phase\_1} = A_{inlet} v_{in\_phase\_1} = 4.856 \times 10^{-5} \quad m^3 / s$$

ในความเป็นจริงอัตราการไหลเข้าจะมีการสูญเสียเมื่อของไหล ไหลผ่านไอริฟิสซึ่งจะค่าสัมประสิทธิ์ Discharge Coefficient ดังนี้

$$C_d = 0.5959 \quad [2]$$

ได้ว่า  $Q_{actual} = C_d Q_{ideal} = 0.5959 \times 4.856 \times 10^{-5} \quad m^3 / s$

$$m_{in,phase\_1} = \rho Q_{actual} = 0.0296 \quad kg / s \text{ ต่อ } 1 \text{ ถังอับเฉา}$$

$$m_{in,phase\_1} = \int m dt$$

ทำให้ได้ว่ามวลที่ไหลเข้าถังอับเฉา (รวม 4 ถัง) ในรูปของเวลาเป็นดังนี้

$$m_{in,phase\_1} = 4 \times 0.0296 t \quad kg \quad (8)$$

สำหรับการไหลเข้าในช่วงที่รูทางออกของอากาศจมน้ำแล้ว มวลที่ไหลเข้าถังอับเฉาจากการทดลองที่ถังอับเฉา เป็นดังนี้

$$m_{in,phase\_2} = 4(-5.73 \times 10^{-5} t^2 + 0.0302 t) \quad kg \quad (9)$$

เนื่องจากข้อจำกัดทางอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองนี้ จึงมีการกำหนดให้ถังอับเฉาไม่มีการเคลื่อนที่ลง จากการทดลองพบว่าน้ำสามารถเข้าไปได้เต็มที่ 3.75 kg ต่อถังอับเฉาหนึ่งถัง คิดเป็นเวลา 200 วินาที เพราะฉะนั้นสมการ (9) จึงเป็นจริงในช่วง เป็นระยะเวลา 200 วินาทีเท่านั้น

3.2.2  $m_{out}$  จากการทดลองวัด  $m_{out}$  มวลของน้ำที่ไหลออกซึ่งถูกอากาศจากถังเก็บอากาศความดันสูงไหลออกจากถังอับเฉา แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 9 และค่า  $m_{out}$  เป็นชุดข้อมูลดังนี้

ความดันแตกต่าง ( $\Delta p$ ) สมการควบคุมปริมาณมวลไหลออก

$$4.0 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.9442 \Delta t^2 + 2.6264 \Delta t) \quad (10)$$

$$3.5 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.2577 \Delta t^2 + 2.8857 \Delta t) \quad (11)$$

$$3.0 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.2685 \Delta t^2 + 2.4524 \Delta t) \quad (12)$$

$$2.5 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.2790 \Delta t^2 + 1.9817 \Delta t) \quad (13)$$

$$2.0 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.2045 \Delta t^2 + 1.6932 \Delta t) \quad (14)$$

$$1.0 \text{ bar} : m_{out} = 2 \times (0.1356 \Delta t^2 + 0.849 \Delta t) \quad (15)$$

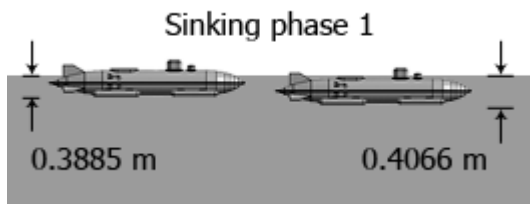
โดยที่  $\Delta t$  คือระยะเวลาในการเปิดวาล์วถังเก็บอากาศความดันสูง ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ที่ 0.2, 0.4, 0.6, และ 1 วินาที ส่วน  $\Delta p$  คือ ความดันเกจ แตกต่างระหว่างภายในถังเก็บอากาศและที่สิ่งแวดล้อม (ความดันของน้ำที่ระดับความลึก) ขณะตำแหน่งความลึกนั้นๆ

#### 4. พฤติกรรมการจมตัวและลอยตัวจากการ

##### วิเคราะห์

##### 4.1 การจมตัว

การจมตัวนั้นจะแบ่งเป็น 3 ช่วง(Phase) คือช่วงที่ 1 อยู่ในสภาวะเริ่มต้น ไม่มีน้ำในถังอับเฉา และเริ่มจมจนมิดลำช่วงนี้แรงลอยตัวจะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเพราะปริมาตรส่วนที่จมน้ำมีค่ามากขึ้นและจะมากจนกระทั่งคงที่ที่ค่าหนึ่งเมื่อยานจมจนมิดลำ



รูปที่ 6 การจมของยานในช่วงที่ 1

เมื่อสภาวะเริ่มต้นที่ ส่วนล่างสุดของยานจะจมลงไปใต้น้ำ 0.3885 m ขณะนี้ยานจะมีแรงลอยตัวเท่ากับน้ำหนักโครงสร้างของยานคือ 3188.25 N (325 kg) ดังรูปที่ 6 และเมื่อจมมิดลำจะมีแรงลอยตัว 3274.82 N สำหรับในช่วงที่ 1 นี้ การไหลเข้าของมวลน้ำจะเป็นดังสมการ (8) คือ

$$m_{in,phase\_1} = 4 \times 0.0296t \quad kg$$

จากผลต่างของแรงลอยตัว และน้ำหนักโครงสร้างขณะเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ  $3274.82 - 3188.25 = 86.57N$  ทำให้ได้ว่า ต้องใช้เวลา 74.5 วินาที ที่ น้ำหนักของน้ำที่ไหลเข้ามาในถังอับเฉาจะเป็น 8.82 kg (86.57 N)

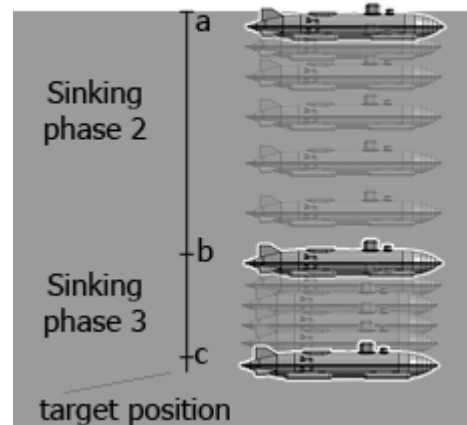
สำหรับช่วงที่ 2 จะเป็นช่วงที่ยานมีสภาวะเริ่มต้นสมดุล นั่นคือ น้ำหนัก และแรงลอยตัวของยานมีค่าเท่ากันแรงลัพธ์ตั้งกล่าวมีค่าเป็น 0 และยังมีกรปล่อยให้น้ำไหลเข้าถังอับเฉาต่อไป เป็นเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้พฤติกรรมการจมต่างๆ ซึ่งการไหลเข้าของมวลน้ำจะเป็นไปตามสมการที่ (9) คือ

$$m_{in,phase\_2} = 4(-5.73 \times 10^{-5}t^2 + 0.0302t) \quad kg$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงในสมการ (1) แล้วได้ว่า ในช่วงนี้ยานจะจมลงภายใต้สมการควบคุมดังนี้

$$g - \frac{B + \frac{1}{2} \rho \dot{y}^2 AC_L}{(M_s + m_{in,phase\_1} + m_{in,phase\_2})} = \ddot{y} \quad (16)$$

- โดยที่
- $g = 9.81 \quad m/s^2$
  - $B = 3274.82 \quad N$
  - $\rho = 1026 \quad kg/m^3$
  - $A = 1.202 \quad m^2$
  - $C_L = 1.468$
  - $M_s = 325 \quad kg$
  - $m_{in,phase\_1} = 8.82 \quad kg$
  - $m_{in,phase\_2} = 4(-5.73 \times 10^{-5}t^2 + 0.0302t) \quad kg$



รูปที่ 7 การจมของยานในช่วงที่ 2 และ 3

สำหรับในช่วงที่ 3 นั้นเริ่มจากตำแหน่ง b และไปจบที่ตำแหน่ง c ดังรูปที่ 7 ซึ่งตำแหน่ง b คือตำแหน่งที่เริ่มมีการลดมวลรวมของระบบโดยการอัดอากาศเข้าไปแทนที่น้ำในถังอับเฉา เพื่อให้น้ำหนักมีค่าลดลง ทำให้ผลต่างระหว่าง น้ำหนักและแรงลอยตัวมีค่าลดลง และส่งผลให้ความเร็วลดลง ซึ่งการอัดอากาศนี้จะทำกี่ครั้ง ขึ้นอยู่กับการออกแบบการปฏิบัติงาน และสุดท้ายที่ตำแหน่ง c ซึ่งเป็นตำแหน่งเป้าหมายในการปฏิบัติงานของยาน จากผลของการอัดอากาศใต้น้ำออกทำให้แรงลอยตัวและน้ำหนักรวมของระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้น้ำหนักอยู่ในสภาวะสมดุลไม่จมลงไปมากกว่านั้น และในช่วงที่ 3 มีสมการควบคุมดังนี้

$$-g + \frac{B - \frac{1}{2} \rho \dot{y}^2 AC_L}{(M_s + m_{in,phase\_1} + m_{in,phase\_2} - m_{out,sink})} = \ddot{y} \quad (17)$$

โดยที่  $m_{out,sink}$  คือมวลที่ไหลออกเนื่องจากถูกอากาศแทนที่ในกระบวนการจมตัว

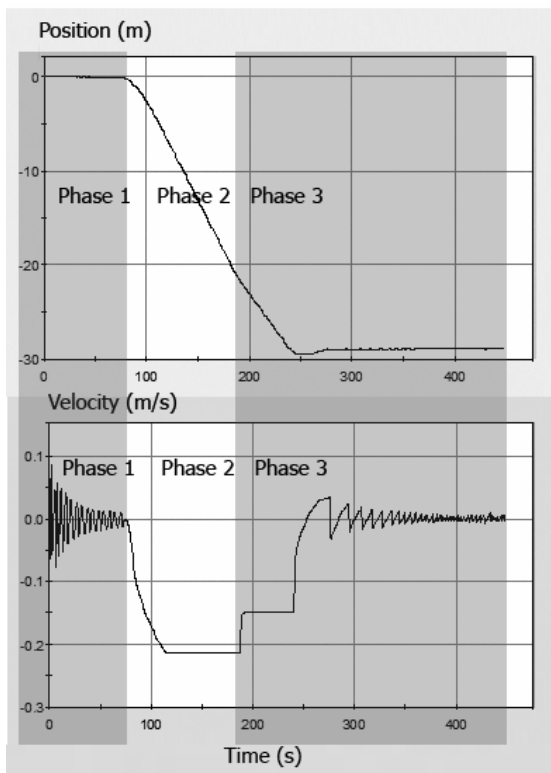
กรณีศึกษาการปฏิบัติงาน ตำแหน่งความลึกเป้าหมาย 30 m

- เงื่อนไขการปฏิบัติงาน
  1. จมลงด้วยมวลของน้ำในถังอับเฉา 13.18 kg ซึ่งมีค่าประมาณ 75% ของมวลในถังอับเฉาสูงสุด
  2. อัดอากาศครั้งแรกที่ 70% ของความลึกเป้าหมายและอัดครั้งที่สอง ที่ก่อนถึงความลึกเป้าหมาย 1 m
- การจมช่วงที่ 1
  1. เปิดวาล์วให้น้ำเข้าถังอับเฉา ตั้งแต่เวลา  $t = 0$  s ถึง  $t = 74.5$  s
  2. เมื่อสิ้นสุดช่วงที่ 1 ยานจะจมอยู่ที่ใต้วงน้ำ 0.4066 m
- การจมช่วงที่ 2
  1. เปิดวาล์วให้น้ำเข้าต่อเนื่อง ตั้งแต่  $t = 74.5$  s ถึง  $t = 113.4$  s
- การจมช่วงที่ 3
  1. เริ่มที่ตำแหน่ง 21 m (70% ของความลึกเป้าหมาย)
  2. อัดอากาศแทนที่น้ำ ที่เวลา  $t = 187$  s ด้วยขนาด  $\Delta t = 0.6$  s
  3. เมื่อยานจมมาถึงตำแหน่ง 29 m (ก่อนถึงความลึกเป้าหมาย 1 m)
  4. และอัดอากาศแทนที่น้ำอีกครั้ง ที่เวลา  $t = 240$  s ด้วยขนาด  $\Delta t = 0.6$  s เพื่อให้ น้ำหนักรวมและ แรงลอยตัวมีค่าเท่ากัน

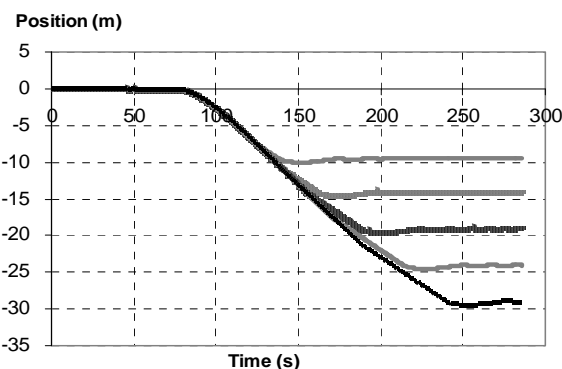
จะได้ว่าใช้เวลาทั้งสิ้น 250 s ยานจะไปลอยตัวสมดุลอยู่ที่ 29.5 m ซึ่งในความเป็นจริงยาน จะจมมากกว่านี้เล็กน้อยเนื่องจากขณะที่มวลน้ำไหลออกนั้นต้องใช้เวลาน้อย แต่ในการวิเคราะห์สมมติให้การไหลออกเป็นแบบทันทีทันใด

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 8 ในส่วนของความเร็วในช่วงที่ 1 ที่ยานยังไม่จมน้ำ กราฟความเร็วจะสั่นกลับไปมาและจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆในช่วงที่ 2 ที่ยานจมลงมิดลำแล้ว จนความเร็วคงที่ที่ 0.214 m/s ที่เวลา 115 s ในช่วงที่ 3 มีการอัดอากาศความดันสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลของระบบ ความเร็วจึงลดลงถึงกราฟ และไปสู่อัตรา 0 m/s ลอยตัวเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 250 s

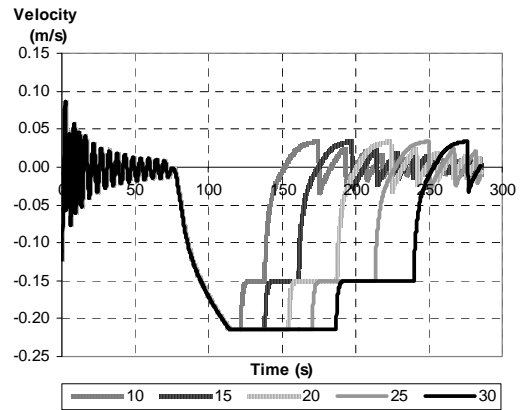
สำหรับรูปที่ 9, 10 แสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ ในกรณีที่ยานกำหนดให้มีความลึกเป้าหมายเป็น 10 m, 15 m, 20 m, และ 30 m



รูปที่ 8 กราฟแสดงผล การจมที่มีตำแหน่งความลึกเป้าหมาย 30 m



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งความลึกที่จมในความลึกเป้าหมาย 10m,15m,20m,25m,30m และเวลา



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการจมไปที่ตำแหน่งความลึกเป้าหมาย10m, 15m, 20m, 25m, 30m และเวลา

4.2 การลอยตัว

การลอยตัว จะกระทำเมื่อเลิกภารกิจคือลอยตัวขึ้นจากระดับความลึกนั้นๆกลับสู่น้ำ โดยการลอยตัวนั้นทำโดยอัดอากาศเข้าไปแทนที่น้ำในถังอับเฉา ให้น้ำหนักรวมของระบบมีค่าน้อยกว่าแรงลอยตัวยานจะลอยขึ้นสู่น้ำ โดยสมการควบคุมการเคลื่อนที่ จากสมการ (2) จะได้ว่า

$$-g + \frac{B - \frac{1}{2} \rho \dot{y}^2 AC_L}{(M_s + m_{in, phase\_1} + m_{in, phase\_2} - m_{out, sink} - m_{out, float})} = \ddot{y} \tag{18}$$

ปริมาณมวลที่ไหลออก เนื่องจากถูกแทนที่ด้วยอากาศจากถังเก็บอากาศความดันสูง  $m_{out, float}$  นั้น เป็นฟังก์ชันของความดันของถังเก็บอากาศ และระยะเวลาการเปิดวาล์วถึงเก็บอากาศ  $\Delta t$  ความดันของถังเก็บอากาศเป็นความดันที่เหลือจากการใช้อากาศในกระบวนการจมซึ่ง สามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta t = 0.2s; \Delta p = 4 \times 10^{-5} k^2 - 0.0218k + 3.8695 \tag{19}$$

$$\Delta t = 0.4s; \Delta p = 0.0003k^2 - 0.0624k + 3.9182 \tag{20}$$

$$\Delta t = 0.6s; \Delta p = 0.0010k^2 - 0.1070k + 3.9352 \tag{21}$$

$$\Delta t = 1.0s; \Delta p = 0.0032k^2 - 0.1963k + 3.9667 \tag{22}$$

ค่า k คือจำนวนครั้งที่อัดอากาศซึ่งเป็นค่าจากการทดสอบอัดอากาศหาได้จากตารางที่ 1 และค่า n ในตารางที่ 1 คือ จำนวนครั้งที่เปิดวาล์ว อัดอากาศแทนที่น้ำในถังอับเฉา ณ  $\Delta p$  นั้นๆในการปฏิบัติงาน เมื่อแทนค่า k ลงในสมการใดระหว่าง (19) - (22) แล้วจะได้  $\Delta p$  ที่เหลืออยู่ในถัง จากนั้นนำ  $\Delta p$  ที่ได้ ไปหาค่ามวลที่ไหลออกจากถังอับเฉา โดยพิจารณา รูปที่ 12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง

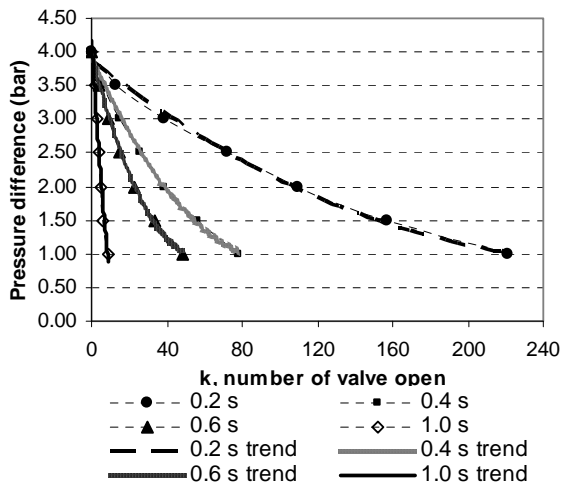
$\Delta P$ เริ่มต้น	$\Delta t = 0.2s$		$\Delta t = 0.4s$		$\Delta t = 0.6s$		$\Delta t = 1s$	
	k	n	k	n	k	n	k	n
4.0	n	1-13	n	1-6	n	1-4	n	1-2
3.5	n+13	1-26	n+6	1-9	n+4	1-5	n+2	1-3
3.0	n+39	1-33	n+15	1-11	n+9	1-6	n+5	1-4
2.5	n+72	1-38	n+26	1-13	n+15	1-8	n+9	1-5
2.0	n+110	1-47	n+39	1-17	n+23	1-11	n+14	1-6
1.5	n+158	1-64	n+56	1-22	n+34	1-14	n+20	1-9

ตารางที่ 1 สำหรับหาค่า k

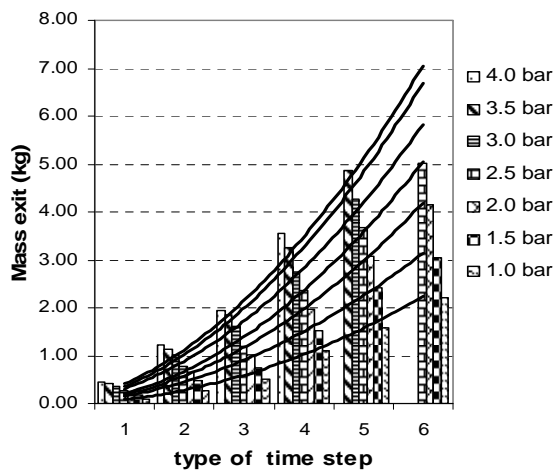
จากรูปที่ 12 เขียนเป็นสมการได้ตามสมการ (10) - (15) และ ข้อมูลในแกน x (type of time step) มีความหมายดังนี้

Type of time step	time step ( $\Delta t$ )
1	0.2 s
2	0.4 s
3	0.6 s
4	1.0 s
5	1.5 s
6	2.0 s

การใช้งานอยู่ในช่วง type 1-4 เท่านั้น



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความดันแก๊สภายในถังเก็บอากาศ-สภาวะแวดล้อมกับจำนวนครั้งที่เปิดวาล์วไอน้ำ



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำที่ไหลออกกับชนิดของ  $\Delta t$  ที่ผลต่างความดัน  $\Delta p$  ต่างๆโดยใช้ถังเก็บอากาศความดันสูง 1 ถึง

ในการปฏิบัติงาน การลอยตัวจะมีสองลักษณะคือการลอยตัวจากตำแหน่งปฏิบัติการสู่น้ำ และลอยตัวไปยังตำแหน่งความลึกใดๆ

## 5. สรุป

จากการวิเคราะห์ ทำให้ได้พฤติกรรมของยานใต้น้ำตามที่ออกแบบกระบวนการทำงานของระบบควบคุม ดังประกอบไปด้วย ถังอับเฉา ถังเก็บอากาศความดันสูง และระบบท่อ วาล์ว ในท้ายสุดนั้นกระบวนการต่างๆ สำหรับการควบคุมยานให้ปฏิบัติงานตามพฤติกรรมที่ออกแบบไว้สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวลา และความลึกที่จะเป็นผลตอบสนองจากอุปกรณ์วัดได้ ซึ่งจะนำไปพัฒนาเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติในลำดับต่อไป จากตัวอย่างของกรณีศึกษา สามารถออกแบบให้ยานจมไปที่ความลึกเป้าหมายได้โดยใช้เวลาประมาณ 250 วินาที และลอยตัวจากความลึกดังกล่าวสู่น้ำได้โดยใช้เวลาประมาณ 93 วินาที

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Johnson, Roberta . " simple density-depth ocean water profile." The Windows to the Universe\_ 7 Nov 2003. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). 7 Sep 2007 <[http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Water/images/density\\_depth\\_jpg\\_image.html&edu=high](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Water/images/density_depth_jpg_image.html&edu=high)>.
- [2] Yunus A., Cengel. and John M. CimBALA. 2006. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications. McGraw-Hill, Singapore
- [3] วีรวัฒน์ วงษ์ดนตรี, ปองวิทย์ ศิริโพธิ์, สุรศักดิ์ ศรีอรุณ. 2543 "โครงการการวิจัยเพื่อสร้างต้นแบบยานใต้น้ำสำหรับการฝึกปราบเรือดำน้ำ".เสนอกองทัพอเรือ
- [4] ศิระ ผลพอดน, อธิธิ ทองประเสริฐ. 2545. โครงการการวิเคราะห์และออกแบบยานใต้น้ำขนาดเล็ก เสนอ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์การบินและอวกาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [5] ดำรงค์ วรณทิพยากร, ธันว วลีเกียรติกุล, ศิรพงษ์ สุขแก้ว, สุขอนันต์ จันทศิริ, กนกวรรณ กาญจนชุมพล. 2544. โครงการการออกแบบและสร้างช่องการไหลของน้ำเพื่อพัฒนาเป้าฝึกปราบเรือดำน้ำของกองทัพอเรือ เสนอ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์การบินและอวกาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] วีรวัฒน์ วงษ์ดนตรี, สุรศักดิ์ ศรีอรุณ, ปองวิทย์ ศิริโพธิ์. 2546. โครงการวิจัยและพัฒนาเป้าฝึกปราบเรือดำน้ำ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ปราจีนบุรี, ประเทศไทย, 15-17 ตุลาคม 2546