

ต้นแบบยานสำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ

A Prototype of an Autonomous Underwater Vehicle

อนุพนธ์ พิมพ์ชวย อรรถการ จันทร์ศศิธร ฤทธิชัย ปะติปะ ภัคพงศ์ จันทเปรมจิตต์ และ ปารีชา รัตนศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Anuphon Pimchuai Attakarn Jansasithorn Rittichai Patipa Pakpong Jantapremjit and Pareecha Rattanasiri

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131, Thailand

บทคัดย่อ

เอกสารฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ และการสร้างยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนายานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติที่สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ต่อไป โดยการออกแบบโครงสร้างภายนอกของยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติใช้ทฤษฎีภาชนะความดันผนังบางและทฤษฎีแรงลอยตัว และใช้ทฤษฎีแรงต้านการเคลื่อนที่ในการออกแบบชุดขับเคลื่อนในแนวตั้งและแนวระดับ สำหรับการระบุตำแหน่ง ส่วนการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติใช้ความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ของระนาบอ้างอิง การทดสอบยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติพบว่ายานต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า - ถอยหลัง เคลื่อนที่ขึ้น - ลง และเคลื่อนที่หมุนรอบแกน Z ได้

Abstract

This paper presents a design and a fabrication of a small prototype of an autonomous underwater vehicle (AUV). The benefits of this study are a guide principle and a start on the development in the field of underwater vehicles. An AUV's hull is designed by using theory of thin - wall pressure vessel and theory of buoyancy force and theory of drag force is addressed in order to obtaining horizontal and vertical thruster specifications. Kinematic modeling provides vehicle's post and its velocity. A prototype that has been tested can move forward - backward, up - down and rotate about Z axis.

1. บทนำ

ในอดีตการสำรวจระบบนิเวศวิทยาของสิ่งมีชีวิตใต้ทะเล การค้นหาทรัพยากรใต้ทะเล การตรวจสอบและซ่อมบำรุงอุปกรณ์หรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่ใต้ทะเลเหล่านี้จะให้นักประดาน้ำเป็นผู้ลงไปสำรวจ ในบางครั้งอาจเกิดอันตรายกับผู้ที่ลงไปสำรวจ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นสิ่งที่จะช่วยให้การสำรวจใต้น้ำมีความสะดวกมากขึ้น สิ่งนั้นก็คือนานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) ในปัจจุบันมีการนำยานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยนำยานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติมาใช้ประโยชน์ในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ เช่นการบันทึก

ภาพสภาพแวดล้อม การวัดค่าต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังปฏิบัติการใต้น้ำได้ยาวนานกว่ามนุษย์ และสามารถดำน้ำลงในระดับลึกกว่าที่มนุษย์จะสามารถดำน้ำลงไปได้อีกด้วย

ในการสร้างยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการสร้าง คือ งานวิจัยของ Venice [1] ซึ่งสร้างยานสำรวจใต้น้ำที่มีชื่อว่า Micro Hunters ที่มีน้ำหนักประมาณ 7 กรัม ถึง 700 กรัม ซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ และยังศึกษางานวิจัยของ Pike [2] ซึ่งสร้างยานสำรวจใต้น้ำที่มีชื่อว่า BPAUV เพื่อใช้ในการสำรวจทรัพยากรโดยมีน้ำหนัก 360 กิโลกรัม ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1.67 เมตร/วินาที และสามารถลงไปสำรวจใต้น้ำได้ลึก 300 เมตร

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษามาจะนำมาเป็นแนวทางในการสร้างยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ ซึ่งต่อไปในบทความนี้จะใช้คำว่ายานต้นแบบ โดยจะออกแบบ จากนั้นจะสร้างและทดสอบการทำงานของยานต้นแบบ โดยยานต้นแบบที่สร้างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 เมตร ยาว 0.46 เมตร สามารถดำน้ำได้ที่มีความลึก 1.5 เมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 0.2 เมตร/วินาที สามารถทำงานใต้น้ำได้ 30 นาที ซึ่งยานต้นแบบที่สร้างแสดงดังรูปที่ 1 โดยโครงงานนี้จะ เป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนายานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติที่จะสามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ในอนาคต

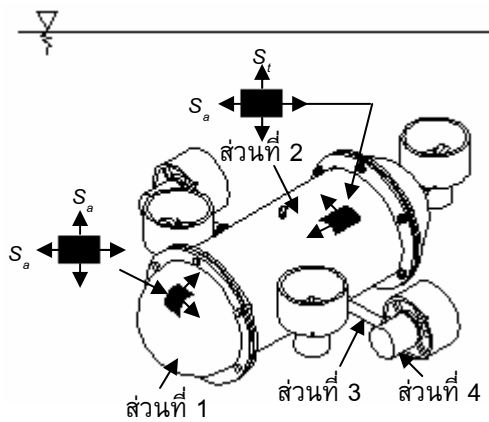


รูปที่ 1 ยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ

2. การคำนวณโครงสร้าง

เนื่องจากโครงสร้างของยานต้นแบบทำด้วยท่อพีวีซี ที่อัตราส่วนรัศมีภายนอกต่อความหนาของโครงสร้างมีค่ามากกว่า 10 จึงใช้ทฤษฎีภาชนะความดันผนังบาง (Thin – walled pressure vessels) ในการออกแบบโครงสร้างภายนอกของยานต้นแบบ โดยให้แรงที่กระทำกับยานต้นแบบกระจายสม่ำเสมอรอบตัวยานต้นแบบ ที่ตำแหน่งความลึกจากผิวน้ำ (h) เท่ากับ 1.5 เมตร ซึ่งเป็นความลึกสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบ โดยความดันที่กระทำกับยานต้นแบบนั้นคำนวณได้จากสมการ $P = \rho gh$ [3] เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (998 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตร/วินาที²) ดังนั้นค่าความดันที่มากที่สุดที่กระทำกับตัวยานต้นแบบมีค่าเท่ากับ 14,685.57 นิวตัน/ตารางเมตร

ความดันที่กระทำกับยานต้นแบบจะทำให้เกิดความเค้นในแนวเส้นรอบวง (S_t) และความเค้นในแนวแกน (S_a) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความเค้นในแนวเส้นรอบวงและความเค้นในแนวแกน

Ger and Timoshenko [4] นิยามความเค้นในแนวเส้นรอบวงและแนวแกนว่ามีค่า $\frac{P}{t} r$ และ $\frac{P}{2t} r$ ตามลำดับ เมื่อ r และ t คือรัศมีภายในและความหนาของโครงสร้างยานต้นแบบ (เมตร) เมื่อคำนวณความเค้นในแนวเส้นรอบวงและความเค้นในแนวแกน โดยใช้ค่าความปลอดภัย (Safety factor) เท่ากับ 3 ได้ผลการคำนวณดังตาราง 1 จะทำให้ได้ว่าโครงสร้างแต่ละส่วนของยานต้นแบบดังในรูปที่ 2 มีขนาดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ความเค้นในแนวเส้นรอบวงและความเค้นในแนวแกน

โครงสร้าง	วัสดุ	ผลการคำนวณ	
		S_t (Mpa)	S_a (Mpa)
ส่วนที่ 1	อะคริลิก	-	0.22
ส่วนที่ 2	พีวีซี	0.44	0.22
ส่วนที่ 3	พีวีซี	0.07	0.03
ส่วนที่ 4	พีวีซี	0.14	0.07

ตารางที่ 2 ขนาดโครงสร้างของยานต้นแบบ

โครงสร้าง	ขนาด	
	ϕ (m)	t (m)
ส่วนที่ 1	0.15	0.005
ส่วนที่ 2	0.15	0.005
ส่วนที่ 3	0.012	0.0026
ส่วนที่ 4	0.046	0.005

3. การคำนวณหาน้ำหนักของยานต้นแบบ

การสร้างยานต้นแบบ จะออกแบบให้ยานต้นแบบมีชิ้นส่วนลอยอยู่ในผิวน้ำ 0.01 เมตร ในสภาวะปกติเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนให้ยานต้นแบบจมลงในน้ำ และหากเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับยานต้นแบบเช่น แบตเตอรี่หมด ยานต้นแบบก็สามารถที่จะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำได้เอง

จากผลของการคำนวณปริมาตรของยานต้นแบบที่จมอยู่ในน้ำ เมื่อพิจารณาให้ยานต้นแบบมีชิ้นส่วนลอยอยู่ในผิวน้ำ พบว่ามีค่าเท่ากับ 9.38×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นแรงลอยตัวที่กระทำกับยานต้นแบบ (F_{B1}) มีค่า 91.83 นิวตัน โดยแรงลอยตัวในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของยานต้นแบบ ดังนั้นยานต้นแบบต้องมีมวลเท่ากับ 9.36 กิโลกรัม จากนั้นคำนวณหาแรงลอยตัวที่กระทำกับยานต้นแบบ เมื่อพิจารณาให้ยานต้นแบบจมทั้งหมด (F_{B2}) ซึ่งจากผลของการคำนวณปริมาตรของยานต้นแบบที่จมอยู่ในน้ำ เมื่อพิจารณาให้ยานต้นแบบยานต้นแบบจมทั้งหมด พบว่ามีค่าเท่ากับ 9.4×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร จึงได้ว่า F_{B2} มีค่า 92.03 นิวตัน โดยทั้ง 2 กรณีต้องพิจารณาสมดุลการลอยตัวของยานต้นแบบ ซึ่งจากการพิจารณาพบว่า ยานต้นแบบสามารถที่จะลอยตัวอยู่ในสภาวะสมดุลเสถียร (Stable Equilibrium) ได้

4. การออกแบบชุดขับเคลื่อน

การออกแบบชุดขับเคลื่อนนั้นจะต้องคำนวณแรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบ T (นิวตัน) เพื่อนำมาหาค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อน T_p (วัตต์) และเลือกขนาดของชุดใบพัดขับเคลื่อนต่อไป

ค่าของแรงขับเคลื่อนที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวระดับและแรงขับเคลื่อนที่ต้องใช้ในแนวตั้งคำนวณได้จากสมการ $T = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$

[5] และสมการ $T = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D + (F_{B1} - F_{B2})$ ตามลำดับ เมื่อ V คือ

ความเร็วที่มากที่สุดของยานต้นแบบ A คือพื้นที่ของยานต้นแบบที่ฉายลงมาตั้งฉากกับระนาบที่สัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งในแนวระดับและแนวตั้ง มีค่า 0.001 และ 0.0055 ตารางเมตร ตามลำดับ จากขนาดของยานต้นแบบและค่าความหนืดของน้ำที่มีค่า 0.001 นิวตัน.วินาที/ตารางเมตร สามารถคำนวณเรย์โนลด์เบอร์ (Re_D) ได้เท่ากับ 31,936 ซึ่งนำค่าเรย์โนลด์เบอร์ไปหาค่า C_D จะได้ว่ามีค่าเท่ากับ 1.3 [5]

กำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนยานต้นแบบสามารถคำนวณได้จากสมการ $T_p = TV$ (6) โดยแรงและกำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนในแนวระดับและแนวดิ่งแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณแรงขับเคลื่อนและกำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อน

ทิศการเคลื่อนที่	แรงขับเคลื่อน (N)	กำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อน	
		W	hp
แนวระดับ	2.69	0.54	7.28×10^{-4}
แนวดิ่ง	1.64	0.33	4.45×10^{-4}

จากค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนของยานต้นแบบจะเลือกใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีกำลัง 2.4 วัตต์ (ขนาด 12 โวลต์ 200 มิลลิแอมแปร์) จำนวน 5 ตัว และแหล่งจ่ายพลังงานเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 9.6 โวลต์ 2500 มิลลิแอมแปร์

5. การควบคุมยานต้นแบบ

การควบคุมการทำงานของยานต้นแบบใช้บอร์ดเรียนรู้อินเทลไมโครคอนโทรลเลอร์ (68HC11) ซึ่งผู้ใช้นั้นสามารถที่จะป้อนโปรแกรมผ่านพอร์ตเชื่อมโยกับคอมพิวเตอร์ภายนอก ซึ่งการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบ ประกอบด้วยโปรแกรม 2 ชุด คือโปรแกรมคำนวณความเร็วและโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังนี้

5.1 โปรแกรมคำนวณความเร็ว

การควบคุมการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบ สามารถที่จะทำโดยระบุตำแหน่งอ้างอิง ตำแหน่งปลายทาง ทิศทางที่ใช้การเคลื่อนที่ และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบลงในโปรแกรมคำนวณความเร็ว ซึ่งโปรแกรมคำนวณความเร็วจะใช้เวลาสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคกลมในระนาบอ้างอิง 3 มิติ จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณ และ

แสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบ เพื่อที่จะนำไปใช้ในโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป ในส่วนของโปรแกรมคำนวณความเร็วประกอบด้วย สมการกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานต้นแบบซึ่งเขียนเป็นสมการทั่วไปคือ

$$\begin{bmatrix} {}^A_B V_i \\ {}^A_B \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(R) & 0 \\ 0 & J_2(R) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^A_B P \\ {}^A_B R \end{bmatrix}$$

เมื่อ ${}^A_B V_i$ = ความเร็วเชิงเส้นของยานต้นแบบในระนาบอ้างอิง {B} เทียบกับระนาบ {A} ณ ลำดับ i ใด ๆ

${}^A_B \omega_i$ = ความเร็วเชิงมุมของยานต้นแบบในระนาบอ้างอิง {B} เทียบกับระนาบ {A} ณ ลำดับ i ใด ๆ

${}^A_B P$ = อัตราเร็วเชิงเส้นของยานต้นแบบในระนาบอ้างอิง {B}

เทียบกับระนาบ {A} ณ ลำดับ i ใด ๆ

${}^A_B R$ = อัตราเร็วเชิงมุมของยานต้นแบบในระนาบอ้างอิง {B}

เทียบกับระนาบ {A} ณ ลำดับ i ใด ๆ

$J_1(R)$ และ $J_2(R)$ = จาคอเบียนเมตริกซ์ความเร็วของยานต้นแบบ

5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์

จากค่าความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณความเร็วแล้ว จะนำค่าที่ได้ป้อนในโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรมอินเตอร์แอคทีฟ - ซี จากนั้นโหลดโปรแกรมลงไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วสั่งให้ยานต้นแบบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

6. การทดสอบการเคลื่อนที่

ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ คือ ทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้นพื้นฐาน และทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานต้นแบบดังนี้

6.1 ทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้นพื้นฐาน

การทดสอบการเคลื่อนที่ขึ้นพื้นฐาน จะทำการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังข้างหน้า – ถอยหลัง เคลื่อนที่ขึ้น – ลง และทดสอบการหมุนรอบแกน Z ตามลำดับ โดยจากการทดสอบพบว่า ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ขึ้น – ลงของยานต้นแบบมีค่า 0.064 เมตร/วินาที และ 0.075 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี 67.95 และ 62.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปยังข้างหน้า – ถอยหลังของยานต้นแบบมีค่า 0.154 เมตร/วินาที และ 0.117 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี 23.05 และ 41.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วเชิงมุมของการหมุนรอบแกน Z ในทิศทวนและตามเข็มนาฬิกาของยานต้นแบบ มีค่า 34.22 องศา/วินาที และ 58.06 องศา/วินาที ตามลำดับ ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี 68.21 และ 58.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบพบว่าระบบพลังงานสำรองที่ใช้ สามารถรองรับการทำงานของยานต้นแบบเป็นเวลา 30 นาที อย่างต่อเนื่อง

6.2 ทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานต้นแบบ

จากการทดสอบพบว่า การเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยสำหรับแนวแกน X Y และ Z เท่ากับ 32.83, 45.52 และ 4.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

7. สรุป

โครงการนี้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบของยานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ เพื่อเป็นแนวทางที่จะใช้ในการศึกษา และพัฒนายานสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ ที่จะสามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมจริงได้ โดยมีรายละเอียดของโครงการดังนี้

การออกแบบโครงสร้างภายนอก และการคำนวณน้ำหนักของยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ ใช้ทฤษฎีภาษาความดันผนังบางและทฤษฎีแรงลอยตัว ตามลำดับ จากการคำนวณพบว่ายานต้นแบบสำรวจ

ได้น้ำอัดโนมิตีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 เมตร ยาว 0.46 เมตร มีน้ำหนักประมาณ 9.4 กิโลกรัม และใช้ทฤษฎีแรงต้านการเคลื่อนที่ ออกแบบชุดขับเคลื่อนในแนวดิ่งและแนวระดับ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ยานต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงเส้นสูงสุดที่ 0.15 เมตร/วินาที และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดที่ 58.06 องศา/วินาที สามารถทำการสำรวจใต้น้ำด้วยความลึกสูงสุดที่ 1.5 เมตร โดยตัวยานต้นแบบมีหน่วยประมวลผลกลางควบคุมการเคลื่อนที่ และมีระบบพลังงานสำรองที่สามารถใช้งานได้เป็นเวลา 30 นาที อย่างต่อเนื่อง

จากการทดสอบพบว่า ยานต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เคลื่อนที่ถอยหลัง เคลื่อนที่ขึ้น เคลื่อนที่ลง และเคลื่อนที่หมุนรอบแกน Z ได้ ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังของยานต้นแบบมีความคลาดเคลื่อนจากความเร็วทางทฤษฎี 23.05 และ 41.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความคลาดเคลื่อน 67.95 และ 62.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการเคลื่อนที่หมุนรอบแกน Z ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา มีความคลาดเคลื่อนจากความเร็วทางทฤษฎี 58.06 และ 68.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานต้นแบบพบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสำหรับแนวแกน X Y และ Z มีค่าเฉลี่ยที่ 32.83, 45.52 และ 4.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สาเหตุความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากอำนาจน้ำที่ทำการทดสอบมีคลื่น ซึ่งแตกต่างจากสมมุติฐานในตอนต้นที่ออกแบบให้ยานต้นแบบทำงานในน้ำนิ่ง และนอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการออกแบบที่ไม่ได้พิจารณาถึงพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ของยานต้นแบบนั้นเกิดค่าความคลาดเคลื่อน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Venice A. S. [2002] “Micro Hunters” [Online] Available: [http://update.se-ed. Com /176/ auv.htm](http://update.se-ed.Com /176/ auv.htm)
- [2] Pike, J. [2002] “BPAUV” [Online] Available: <http://www.globalsecurity.org/intell/systems/ bpauv-specs.htm, 28/6/2547>.
- [3] Tasos, C. *Applied Fluid Mechanics*. New Jersey : P T R Prentice - Hall, 1994.
- [4] Ger, M. J. and Timoshenko, P. S. *Mechanics of Materials*. 3rd ed. Singapore : Chapman & Hall, 1991.
- [5] Agrawal, S. K. *Fluid Mechanic and Machinery*. New Delhi : McGraw - Hill, 1997.
- [6] วิศิษฐ์ จาตุรमान และขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2535.