

ISSN : 2408-235X

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Volume 8 | Number 2 | July - December 2022

บทความวิจัย

วงจรตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป
A PID controller circuit using commercially available devices

อิทธิพงษ์ ชัยสาธิตน์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง

การลดความต้านทานเรือโดยใช้ฟอยล์ EPPLER 874

Reduction of Ship Resistance using EPPLER 874 Foil

อัครชัย เอี่ยมพรสิน วลีพรรณ กันเนื่อง*

และ จารุพันธ์ หุยมสมตน



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

เจ้าของ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ที่ปรึกษา

ดร.ฉัททวุฒิ พิษผล

บรรณาธิการ

รศ.ดร.วีระพันธ์ คิวทองสุข (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

กองบรรณาธิการ

รศ.ดร.วีระพันธ์	คิวทองสุข	กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)
ดร.ภาณุวัฒน์	แตระกุล	กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)
ผศ.จิรัชิต์	บรรจงศิริ	กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)
พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทวาลย์		กรรมการ (ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า)
รศ.ดร.สมบัติ	ทิฆทรัพย์	กรรมการ (มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย)
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิชรรม	กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ)
รศ.ดร.ปิยะบุตร	วานิชพงษ์พันธุ์	กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

กรรมการบริหาร

รศ.ประสิทธิ์	สุขเสริม	ผศ.ดร.สมเกียรติ	เพียงพรานทอง
ผศ.ดร.ณัฐ	โธนาทรัพย์	ผศ.วราธร	แก้วแสง
ผศ.วีระพงษ์	กาญจนวงศ์กุล	ผศ.เสรี	ชื่นอารมณ์
ผศ.พรนิภา	บริบูรณ์สุขศรี	นายวฐา	ขงสมิทธิ์
นายมานิตย์	ธิมาทา		

ฝ่ายพัฒนา ดูแลและปรับปรุงเว็บไซต์

นางสาวรุ่งทิวา	ลังกาพันธ์	นายระพี	วาทะศรีศิลป์
นางสาวจิราภรณ์	ปรากฏ		

ฝ่ายเลขานุการ

นางสาวชুমกฤษ	แย้มรู้การ	นางณัฐภาวี	จิระภาพันท์
--------------	------------	------------	-------------

จัดพิมพ์โดย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ที่ติดต่อ วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 โทร 0-2807-4500-27 ต่อ 404

เว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th อีเมล SAUJournalST@sau.ac.th

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหกรรม อาชีวอนามัยและความปลอดภัย วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเกษตร
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างนักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความวิจัยที่น่าสนใจ และมีคุณค่าทางวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้เกิดองค์ความรู้ใหม่แก่นักวิจัยของมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

ขอบเขต

เป็นเอกสารเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ (บทความวิชาการปริทรรศน์ บทความวิชาการเทคนิค บทความวิชาการพิเศษ) ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระการเผยแพร่

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม ของทุกปี

ข้อคิดเห็นในบทความของวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

Objectives

The main objectives of this journal are:

1. to publish research articles and academic articles in science and technology, Journal focus are Electrical Engineering, Electronics and communication Engineering, Computer Science, Computer Engineering, Civil Engineering, Mechanical Engineering, Industrial Engineering, Occupational Health and Safety, Environment Engineering and Agricultural Engineering;
2. to become a center for exchanging innovations in science and technology among researchers and interested persons;
3. to become a collection of interesting and valuable research papers and articles;
4. to promote and encourage Southeast Asia University researchers and interested persons to develop innovations.

Scope

To publish research articles and academic articles (Review articles, Technical article, Special Articles) in science and technology.

Schedule

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two issues annually. The first volume is published between January and June and the second is published July and December in each year.

Comments on the article of the SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is a personal opinion of the author. Editors boards may not necessarily agree.

บทบรรณาธิการ

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2565 ปัจจุบันเป็นวารสารที่ได้รับรองให้อยู่ในฐานข้อมูลของ TCI 2

จากผลการดำเนินงานของวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจทั้งหมด 2 บทความ เป็นบทความวิจัย ได้แก่ เรื่อง “วงจรตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป” และ เรื่อง “การลดความต้านทานเรือโดยใช้ฟอยล์ EPPLER 874” ซึ่งกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับความรู้จากงานวิจัยต่าง ๆ ในวารสารเล่มนี้เป็นอย่างมาก

และในนามของ กองบรรณาธิการวารสาร ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ประเมินบทความทุกท่าน ที่ยอมเสียสละเวลาอันมีค่าช่วยกลั่นกรองงานวิจัยให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น รวมถึงคณาจารย์ นักศึกษา บุคคลทั่ว ๆ ไปทุกท่าน ที่ให้ความสนใจส่งบทความเพื่อเข้าสู่ขบวนการพิจารณาคุณภาพเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ทำให้กองบรรณาธิการทุกท่านมีกำลังใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาวารสารฯ ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
วงจรถ้าควบคุมพีไอดีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป A PID controller circuit using commercially available devices อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง	1
การลดความต้านทานเรือโดยใช้ฟอยล์ EPPLER 874 Reduction of Ship Resistance using EPPLER 874 Foil ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน วลีพรรณ กันเนื่อง* และ จารุพันธ์ หนูสมตน	10

วงจรถวลคุมพีไอดีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไป

A PID controller circuit using commercially available devices

อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง

Ittipong Chaisayun and Somkiat Piangprantong

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ผู้นิพนธ์ประสานงาน Email: ittipong@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 กรกฎาคม 2565 / วันที่แก้ไขบทความ: 19 พฤศจิกายน 2565 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 3 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ บทความนี้เป็นการออกแบบวงจรถวลคุมพีไอดีโดยใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส วงจรถวลคุมพีไอดีนี้มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไป และสามารถปรับค่าเกนซ์ K_p , K_i , K_d ได้อย่างอิสระ การวิเคราะห์วงจรถวลคุมพีไอดีด้วยคณิตศาสตร์เช่น ความไวและ ผลของความไม่เป็นอุดมคติของโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสพบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อ พารามิเตอร์ K_p , K_i , K_d มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลการทดสอบวงจรถวลคุมพีไอดีด้วย LTspice พบว่าวงจรถวลคุมพีไอดีสามารถปรับค่า K_p , K_i , K_d ได้อย่างอิสระ ขณะที่วงจรถวลคุมพีไอดีใช้แรงดันไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ นอกจากนี้ ตัวควบคุมพีไอดีได้นำไปทดสอบทำงานร่วมกับพลาเน็ตอันดับสามแบบวงรอบปิด ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LTspice เปรียบเทียบกับ MATLAB พบว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน

คำสำคัญ: วงจรถวลคุมพีไอดี, โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส, วงจรขยายป้อนกลับ

Abstract In this paper, a PID controller employing current feedback operational amplifier (CFOA) is designed. The advantage of proposed circuit are independently adjustable parameters (K_p , K_i , K_d) and commercially available used devices. Mathematical analyses like sensitivities and the effects of the non-ideal of CFOA find that the active and passive element sensitivities are equal to unity in magnitude. Simulation results using LTspice are shown that the parameters (K_p , K_i , K_d) can be independently adjusted and the power consumption of PID controller circuit 0.4 W at ± 15 V supply voltages. In addition, this PID circuit is demonstrated on a close loop system with the third order plant. The simulation results using LTspice are compared with that using MATLAB. It found that both results are consistent.

Keywords: PID controller circuit, current feedback op-amp, feedback amplifier

1. บทนำ

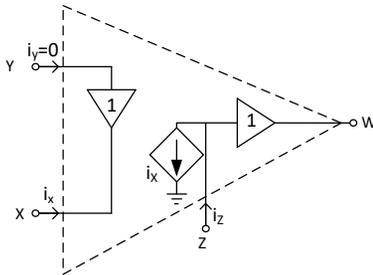
ตัวควบคุมหรือตัวชดเชยที่มีใช้ในระบบควบคุมทำหน้าที่ให้ระบบมีผลการตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุดคือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-derivative: PID) ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมแบบพีไอดี มีความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และราคาถูก[1] ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบการปรับสัดส่วน สัญญาณ องค์ประกอบการอินทิเกรตสัญญาณและ องค์ประกอบการอนุพันธ์สัญญาณ เมื่อนำทั้งสามส่วนประกอบนี้มารวมเข้าด้วยกันจะทำให้สามารถปรับแต่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันนี้ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีส่วนใหญ่จะเป็นแบบดิจิทัล[1] เพราะมีข้อดีคือมีความยืดหยุ่นและความเชื่อถือสูง แต่ตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก[2-3]ยังมีข้อดีกว่าในเรื่องความเร็วในการตอบสนองที่เร็วกว่าและ ถ้านำตัวควบคุมไปสร้างเป็นวงจรรวม ตัวควบคุมแบบแอนะล็อกจะใช้พื้นที่น้อยกว่าและบริโภคกำลังไฟน้อยกว่า เมื่อไม่นานมานี้ก็มีการรวมตัวควบคุมทั้งดิจิทัลและแอนะล็อกให้ทำงานด้วยกันเพื่อจะได้รับจุดเด่นของทั้งคู่[4] เดิมทีการสร้างตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อกจะใช้โอปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ แต่ด้วยข้อจำกัดของโอปแอมป์ป้อนกลับแรงดัน ในเรื่องความถี่ตอบสนองและอัตราสลับ (Slew Rate) ที่ต่ำ จึงได้มีการนำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แอกทีฟที่ทันสมัย เช่น งานวิจัย[5] ใช้วงจรรายพานกระแสรุ่นสองจำนวน 8 ตัว งานวิจัย[6] ใช้วงจรรอปแอมป์ป้อนกลับกระแสจำนวน 6 ตัว งานวิจัย[7] ใช้วงจรรขยายความนำจำนวน 8 ตัวและงานวิจัย[8-9] ใช้วงจรรขยายผลต่างกระแสจำนวน 4 ตัว และ 2 ตามลำดับ โดยงานวิจัย[5-7] มีข้อดีคือ ใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไปและเกณฑ์ K_p , K_i , K_d สามารถปรับค่า

ได้อย่างอิสระแต่ข้อด้อยคือใช้อุปกรณ์แบบแอกทีฟจำนวนมากทำให้วงจรมีขนาดที่ใหญ่และกินกำลังไฟฟ้าที่สูง ขณะที่งานวิจัย[8-9] มีข้อดีคือเกณฑ์ K_p , K_i , K_d สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระ ข้อด้อยคือวงจรรขยายผลต่างกระแส ยังไม่มีขายในท้องตลาดแต่ก็สามารถสร้างขึ้นมาได้โดยใช้ โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส 2 ตัว [9] เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดี[10] ที่มีข้อเด่นคือใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแสที่หาซื้อได้ทั่วไปเพียง 2 ตัวและสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้อย่างอิสระ สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่มีข้อดีเหมือนกับงานวิจัย[10] เพราะ โครงสร้างวงจรถูกถ่ายโอนโดยงานวิจัย[10] ออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี ต่อกับตัวควบคุมแบบไอ ขณะบทความนี้ได้ ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ต่อกับตัวควบคุมแบบดี นอกจากนี้จากตัวควบคุมพีไอดีที่ผ่านมา[5-8]พบว่า ส่วนมากยังไม่ถูกทดสอบกับพลาเน็ต และ[5-10]ยังไม่ถูกเปรียบเทียบกับผลของทดสอบของโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างทั่วไปในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ในบทความนี้ได้ ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบแอนะล็อก โดยใช้โอปแอมป์ป้อนกลับกระแส (Current Feedback Operational Amplifier: CFOA หรือ CFA) ซึ่งมีข้อดีกว่าโอปแอมป์ป้อนกลับแรงดันในหลายเรื่อง เช่น ตอบสนองความถี่และอัตราสลับที่สูงกว่า เป็นต้น และโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสยังเป็นที่ยอมรับมากกว่าวงจรรขยายความนำเพราะโอปแอมป์ป้อนกลับกระแส มีอินพุตและเอาต์พุตที่รับสัญญาณได้ทั้งกระแสและแรงดัน และที่สำคัญคือโอปแอมป์ป้อนกลับกระแสเป็นอุปกรณ์ที่ราคาไม่แพงและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

2. หลักการทำงาน

2.1 ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส(CFA) ประกอบด้วยวงจรตามแรงดัน ของวงจรและวงจรตามกระแส 1 วงจรตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 1 ขา y เป็นอินพุตแรงดันที่มีอิมพีแดนซ์สูงของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส ทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่ ขา x ขณะที่ ขา x ยังเป็นอินพุตกระแสด้วยที่ทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแสที่ให้เอาต์พุตเป็นกระแสที่ ขา z และ ที่ขา z นี้ยังทำหน้าที่เป็นอินพุตของวงจรตามแรงดันที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่ ขา w ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขาต่างๆเป็นดังนี้

$$i_y = 0, i_x = i_z, v_x = v_y, v_w = v_z \quad (1)$$

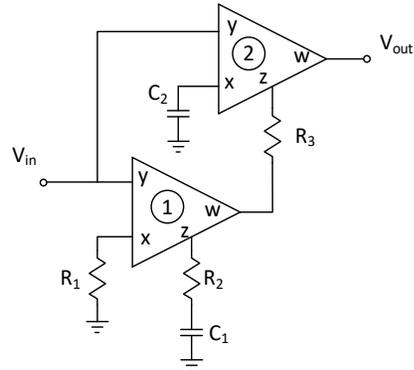
2.2 วงจรตัวควบคุม พีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี(PID controller)[1]มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมดังนี้

$$T(s) = \frac{V_o}{V_i} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \quad (2)$$

เมื่อ K_p คืออัตราขยายขององค์ประกอบพี K_i คืออัตราขยายขององค์ประกอบไอ K_D คืออัตราขยายของ

องค์ประกอบดี บทความนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดีที่มีโครงสร้างวงจรที่คล้ายกันกับงานวิจัย[10] โดยบทความ[10] ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี ต่อกับตัวควบคุมแบบไอ ขณะที่ในบทความนี้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ต่อกับตัวควบคุมแบบดี ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรตัวควบคุมพีไอดีโหมดแรงดัน

วงจรตัวควบคุมพีไอดีนี้ใช้ ออปแอมป์ป้อนกลับกระแส เพียง 2 ตัวเท่านั้น โดยที่ CFOA_1 R_1 R_2 และ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอ ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต และแรงดันเอาต์พุต v_{w1} แสดงได้ดังนี้

$$v_{w1} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} \right) v_{in} \quad (3)$$

ขณะที่ CFOA_2 R_3 และ C_1 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมดี ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตและแรงดันที่ตกคร่อม R_3 แสดงได้ดังนี้

$$v_{R3} = sC_2R_3v_{in} \quad (4)$$

และแรงดันเอาต์พุตของวงจร v_{out} เกิดจาก $v_{w1}+v_{R3}$ และฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุมพีไอดีในรูปที่ 2 คือ

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_3 \right) \quad (5)$$

พารามิเตอร์ K_p, K_i, K_D คือ

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

$$K_i = \frac{1}{R_1C_1} \quad (7)$$

$$K_D = C_2R_3 \quad (8)$$

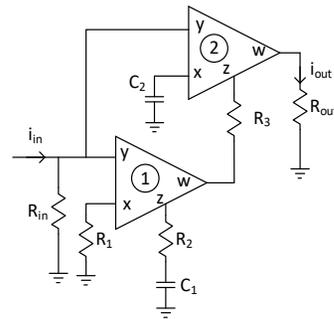
จากสมการที่ (5) - (7) จะเห็นว่าอัตราขยายของตัวควบคุมสามารถปรับได้โดยอิสระจากกัน โดยอัตราขยายขององค์ประกอบที่ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_2 อัตราขยายขององค์ประกอบไอ สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย C_1 และอัตราขยายขององค์ประกอบดี สามารถปรับอย่างอิสระได้ด้วย R_3 และ C_2 จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าความไว (Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ K_p, K_i, K_D ต่อค่า R และ C ต่างๆ ได้ดังนี้

$$S_{R_2}^{K_p} = -S_{R_1}^{K_p} = 1 \quad (9)$$

$$S_{R_1, C_1}^{K_i} = -1 \quad (10)$$

$$S_{R_3, C_2}^{K_D} = 1 \quad (11)$$

วงจรตัวควบคุม พีไอดี ในรูปที่ 2 ทำงานในโหมดแรงดัน (สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเป็นแรงดัน) สามารถถูกดัดแปลงให้เป็น วงจรตัวควบคุม พีไอดี ที่ทำงานในโหมดกระแส (สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเป็นกระแส) ได้ดังในรูปที่ 3 โดยเพิ่ม R_{in} และ R_{out} เพื่อทำหน้าที่แปลงกระแสเป็นแรงดัน และแปลงแรงดันเป็นกระแส ตามลำดับ



รูปที่ 3 วงจรตัวควบคุม พีไอดี โหมดกระแส

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุม พีไอดี โหมดกระแส แสดงได้ดังนี้

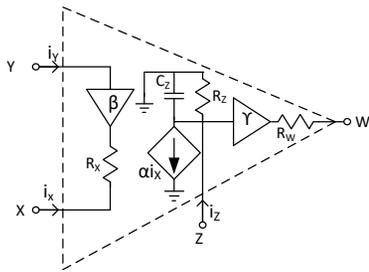
$$\frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{out}} \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{sR_1C_1} + sC_2R_3 \right) \quad (12)$$

พารามิเตอร์ K_p, K_i, K_D สามารถปรับได้เช่นเดียวกับตัวควบคุมพีไอดี โหมดแรงดันในรูปที่ 2

2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

การวิเคราะห์ห้วงจรที่เสนอก่อนหน้านี้มีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่ว่าค่าความต้านทานอินพุต y และ z เป็นอนันต์ขณะที่ความต้านทานอินพุต x และ w เป็นศูนย์ และตัวเก็บประจุภายในโหนดต่างๆ ไม่ถูกคิด แต่ในทางปฏิบัติ ผลของความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสดังกล่าวจะส่งผลต่อการทำงานของวงจรตัวควบคุมอย่างแน่นอน และเพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าวเราจะใช้แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ป้อนกลับกระแสแบบไม่เป็นอุดมคติ ประกอบด้วย ความต้านทานที่โหนด $Y (R_y)$ ความต้านทานที่โหนด $X (R_x)$ ความต้านทานโหนด $W (R_w)$ ความต้านทานโหนด $Z (R_z)$ และตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โหนด $Z (C_z)$ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โหนด $Y (C_y)$ โดยทั่วไปค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส เช่น AD844 มีค่าดังนี้ $R_y=10M\Omega$ $R_x=50\Omega$ $R_w=15\Omega$ $R_z=3M\Omega$ $C_y=2 pF$ และ $C_z=4.5 pF$ [10] แต่

เนื่องจากความต้านทาน R_Y มีค่าสูง มากและตัวเก็บประจุไฟฟ้า C_Y ก็มีค่าน้อยทำให้สามารถตัดทิ้งได้นอกจากนี้ ค่าอัตราขยาย Y, β และ α ที่ผ่านมาในการวิเคราะห์วงจรถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ หนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวนี้สามารถเทียบเบนจากหนึ่งได้ ทำให้แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสแบบไม่เป็นอุดมคติสามารถแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสในทางปฏิบัติ

ออปแอมป์ย้อนกลับกระแสในทางปฏิบัติจะมีสมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่โหนดต่างๆ ดังนี้ $i_y = 0, i_x = \alpha i_z, v_x = \beta v_y, v_w = \gamma v_z$ เมื่อ Y, β และ α เป็นค่าส่งผ่านของแรงดันและกระแสที่สามารถเทียบเบนจากหนึ่งได้ เมื่อมีการพิจารณาความผิดพลาดนี้และผลเฉลยของความต้านทานไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าภายใน สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรตัวควบคุม พีโอดีและอัตราขยายของแต่ละองค์ประกอบได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(\frac{\gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 R_2}{R_1} + \frac{\gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1}{s R_1 C_1} + s \gamma_2 \alpha_2 \beta_2 C_2 R_3 \right) \quad (13)$$

$$K_P = \gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

$$K_I = \gamma_1 \gamma_2 \alpha_1 \beta_1 \frac{1}{R_1 C_1} \quad (15)$$

$$K_D = \gamma_2 \alpha_2 \beta_2 C_2 R_3 \quad (16)$$

จากสมการที่ 14-16 พบว่าค่าอัตราขยายที่ไม่เป็นอุดมคติ Y, β และ α ของออปแอมป์ย้อนกลับกระแสต่างๆจะส่งผลโดยตรงกับค่าพารามิเตอร์ $K_p, K_i,$

K_D และสามารถคำนวณหาค่าความไว(Sensitivity) ของค่าพารามิเตอร์ K_p, K_i, K_D ต่อค่า R, C, Y, β และ α ต่างๆ ได้ดังนี้

$$S_{R_2, \gamma_1 \gamma_2, \alpha_1 \beta_2}^{K_P} = -S_{R_1}^{K_P} = 1 \quad (17)$$

$$S_{\gamma_1 \gamma_2, \alpha_1 \beta_1}^{K_I} = -S_{R_1, C_1}^{K_I} = 1 \quad (18)$$

$$S_{R_3, C_2 \gamma_2, \alpha_2 \beta_2}^{K_D} = 1 \quad (19)$$

จากสมการ(9)-(11) และ (17)-(19)พบว่าค่าความไวของอุปกรณ์ต่างๆ ต่อ พารามิเตอร์ K_p, K_i, K_D มีค่าขนาดเท่ากับ 1 ผลกระทบของตัวเก็บประจุภายในสามารถละเลยได้ โดยการออกแบบให้ตัวเก็บประจุที่ใช้ (C_1 และ C_2) ในวงจรพีโอดี มีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุภายในซึ่งจะทำให้เกิดขั้ว(pole)ที่ไม่มีนัยสำคัญ สำหรับความต้านทานโหนดต่างๆของ CFOA นำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อตัวควบคุมพีโอดีที่เสนอ และ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมพีโอดี ที่เกิดจากการใช้แบบจำลองในรูปที่ 4 ทำให้สมการที่ (5) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

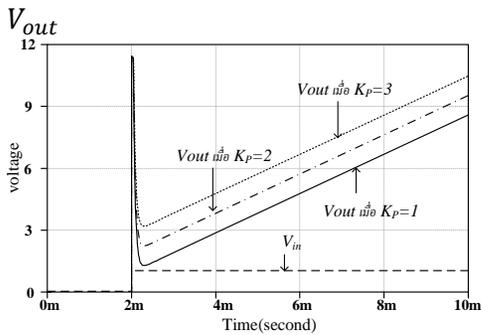
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \left[\frac{R_2}{R_1 + R_{x1}} + \frac{1}{s C_1 (R_1 + R_{x1})} \right] \frac{\frac{C_1}{C_1 + C_{z1}}}{\left[\frac{s C_1 C_{z1} R_2}{C_1 + C_{z1}} + 1 \right]} \frac{s C_2 (R_3 + R_{w1})}{[s C_2 R_{x2} + 1][s C_{z2} (R_3 + R_{w1}) + 1]} \quad (20)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (5) กับ สมการ (20)พบว่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i มีการเปลี่ยนแปลงจากผลของ R_{x1} และพารามิเตอร์ K_D มีการเปลี่ยนแปลงจากผลของ R_{w1} นอกจากนี้องค์ประกอบพีโอ มีขั้ว (pole)เพิ่มมา 1 ตัว และองค์ประกอบดีมีขั้ว(pole)เพิ่มมา 2 ตัว ซึ่งการเพิ่มมาของขั้ว(pole)จะส่งผลให้เอาต์พุตมีการตอบสนองที่ช้าลง

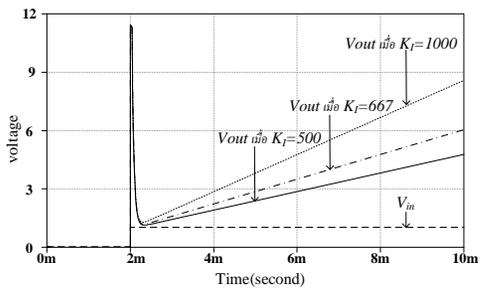
3. ผลการจำลองการทำงานโดยใช้ LTspice

เพื่อตรวจสอบผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี วงจรควบคุม พีโอดี ในรูปที่ 3 ได้ถูกนำมาจำลองการทำงานด้วย โปรแกรม LTspice สำหรับวงจรออปแอมป์

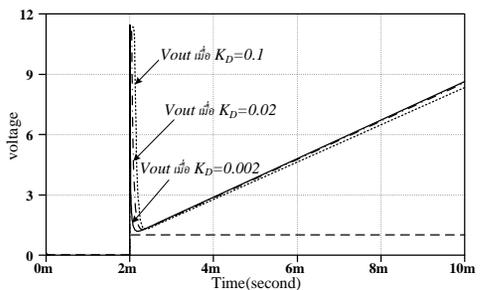
ป้อนกลับกระแสในรูปที่ 1) ใช้แบบจำลอง (ก)1(Macro-Model) ของ AD จาก 844 Analog Devices ในการทดสอบนี้ใช้ไฟเลี้ยง $\pm 15V$ และเพื่อเห็นภาพการปรับค่าของเกน K_p , K_i , K_D ได้อย่างชัดเจน จึงกำหนดค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ $C_1 = 1\mu F$, $C_2 = 1\mu F$, $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$ และ $R_3 = 20k\Omega$ ซึ่งจะทำได้ค่า $K_p = 1$, $K_i = 1000$ และ $K_D = 0.02$ ในการทดสอบพบว่า วงจรควบคุมพีไอดีนี้บริโภคนำไฟฟ้า 0.4 วัตต์ และการทดสอบผลตอบสนองในโดเมนเวลาโดยจะป้อนอินพุต V_{in} เป็นสัญญาณขั้นบันไดขนาด 1 โวลต์และวัดแรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 5 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_p มีค่าต่างๆ



รูปที่ 6 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_i มีค่าต่างๆ

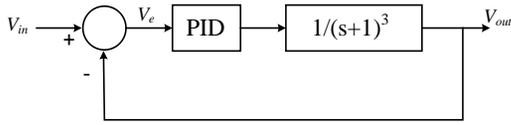


รูปที่ 7 เอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อ K_D มีค่าต่างๆ

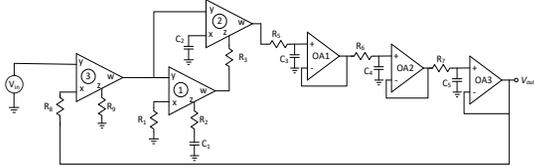
รูปที่ 5 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_i และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ค่า K_p เปลี่ยนแปลงตามนี้คือ 1, 2 และ 3 โดยการปรับค่า R_2 เป็น $1k\Omega$, $2k\Omega$ และ $3k\Omega$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะเป็นแปรผันตรงกับค่า K_p รูปที่ 6 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อให้ K_p และ K_D มีค่าคงที่ ขณะที่ K_i เปลี่ยนแปลงตามนี้ 500, 667 และ 1000 โดยการปรับค่า C_1 เป็น $2\mu F$, $1.5\mu F$ และ $1\mu F$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_i และรูปที่ 7 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่อ K_i และ K_p มีค่าคงที่ ขณะที่ K_D เปลี่ยนแปลงตามนี้ 0.01, 0.02 และ 0.002 โดยการปรับค่า R_3 เป็น $100k\Omega$, $20k\Omega$ และ $2k\Omega$ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดี จะมีการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงตามค่า K_D

4. การประยุกต์ใช้งานของตัวควบคุมพีไอดี

ในหัวข้อนี้เป็นการนำตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบมาทดสอบกับพลาตันต์อันดับสามซึ่งถือว่าเป็นพลาตันต์ที่ควบคุมได้ยากเพราะอันดับของพลาตันต์สูงว่า ซีโรของตัวควบคุมพีไอดี [12] โดยจะทดสอบในโดเมนเวลา บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ แสดงในรูป 8 (ก) วงจรที่ใช้จำลองการทำงานของตัวควบคุม พีไอดี กับพลาตันต์ แสดงในรูป 8(ข) ในการทดสอบนี้จะใช้พลาตันต์อันดับสามที่สร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับแรงดันแบบอูคมคติ(OA1-OA3) เพราะต้องการให้มีคุณสมบัติตามสมการ (21) ขณะที่ตัวเปรียบเทียบแรงดัน(CFOA_3)และตัวควบคุมพีไอดี (CFOA_1 และ CFOA_2) จะสร้างจากออปแอมป์ป้อนกลับกระแส(AD844)



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ระบบควบคุมป้อนกลับ

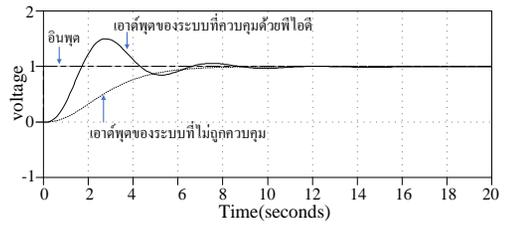
(ก) บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ

(ข) การแทนบล็อกไดอะแกรมด้วยวงจร

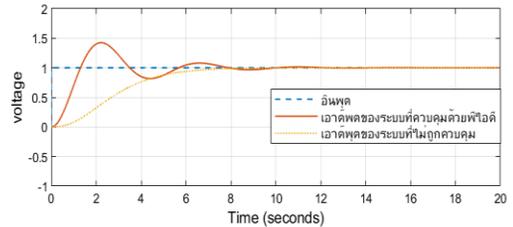
พลาตอันฉบับสามในรูปที่ 8 ประกอบด้วย OA1-OA3 R_5 - R_7 และ C_3 - C_5 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$T(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad (21)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของระบบในรูป 8 ด้วยวิธีการของ Ziegler และ Nichols [1],[9] จะได้ค่า $K_p = 4.8$, $K_I = 2.67$ และ $K_D = 2.11$ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในตัวควบคุมพีไอดีมีค่าต่างๆ ดังนี้ $C_1 = 37.5 \mu F$, $C_2 = 10 \mu F$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 48 \text{ k}\Omega$ และ $R_3 = 211 \text{ k}\Omega$ สำหรับระบบอันดับสามใช้ค่า $C_4 = C_5 = C_6 = 100 \mu F$, $R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega$ และวงจรลบสัญญาณแรงดันขึ้นบันไดขนาด 1 V ผลการทดสอบของระบบก่อนการควบคุมเปรียบเทียบกับระบบที่ควบคุมด้วยพีไอดีแสดงในรูปที่ 9



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 เอาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดี ($K_p = 4.8$, $K_I = 2.67$ และ $K_D = 2.11$)

(ก) ผลการทดสอบด้วย LTspice

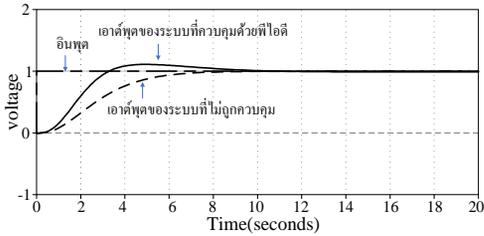
(ข) ผลการทดสอบด้วย MATLAB

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTspice และ MATLAB ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดี มีผลลัพธ์ที่คล้ายกัน โดยได้เปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแสดงในตารางที่ 1

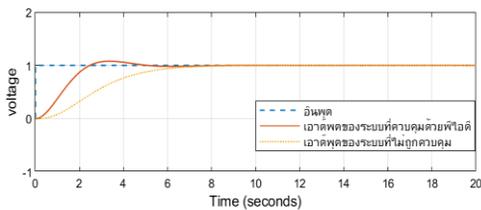
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปที่ 9

ข้อกำหนดของการตอบสนอง	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTspice	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย MATLAB	เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม
rise time	1.7 s	1.3 s	4.2 s
peak time	2.8 s	2.2 s	>14 s
settling time	10.9 s	9.5 s	7.5 s
overshoot	50.0 %	42.0 %	0.0 %

เมื่อลองปรับค่าเกณฑ์ต่างๆใหม่ดังนี้ $K_p = 2.17, K_i = 0.85$ และ $K_D = 1.91$ โดยใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ในตัวควบคุมพีไอดี มีค่าต่างๆ ดังนี้ $C_1 = 117 \mu F, C_2 = 10 \mu F, R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 21.7 \text{ k}\Omega$ และ $R_3 = 191 \text{ k}\Omega$



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 เาต์พุตของระบบก่อนและหลังการควบคุมด้วยพีไอดี ($K_p = 2.17, K_i = 0.85$ และ $K_D = 1.91$)

(ก) ผลการทดสอบด้วย LTspice

(ข) ผลการทดสอบด้วย MATLAB

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTspice และ MATLAB ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดีมีผลลัพธ์ที่คล้ายกัน โดยได้เปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมกับระบบที่ไม่มีการควบคุมแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปแบบที่ 10

ข้อกำหนดของการตอบสนอง	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTspice	เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย MATLAB	ระบบที่ไม่มีการควบคุม
rise time	3.3 s	2.5 s	4.2 s
peak time	4.9 s	3.3 s	>14 s
settling time	10.7 s	6.6 s	7.5 s
overshoot	11.0 %	7.8 %	0.0 %

ในรูปที่ 9 และ 10 เอาต์พุตของพลานต์หรือระบบที่ไม่ถูกควบคุมมีผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง LTspice และ MATLAB เพราะระบบอันดับสามที่ใช้ใน LTspice (ใช้โอปแอมป์ในอุดมคติ) และ MATLAB มีสมการที่เหมือนกันคือสมการ(21) ขณะที่เอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมด้วยพีไอดี ที่ทดสอบด้วย LTspice มีรูปร่างคล้ายกับ ที่ทดสอบด้วย MATLAB โดยต่างกันที่ การใช้ LTspice จะให้ผลของเวลาขึ้น (rise time) เวลาขนาดสูงสุด (peak time) และเวลาเข้าที่ (settling time) มีค่าต่ำกว่า การใช้ MATLAB ทั้งนี้เพราะ MATLAB ใช้ตัวควบคุมพีไอดีตามสมการ(5) ขณะที่ LTspice ใช้ตัวควบคุมพีไอดี (ที่คิดผลของความต้านทานและความจุไฟฟ้าภายในโอปแอมป์ป้อนกลับกระแส) ตามสมการ(20) โดยจะเห็นว่า มีขั้ว (pole) ที่เพิ่มขึ้นมา 3 ตัวซึ่งจะส่งผลทำให้เอาต์พุตช้าหลังกว่าการใช้ MATLAB และเมื่อเปรียบเทียบเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุมที่ทดสอบด้วย LTspice และ MATLAB กับ เอาต์พุตของระบบที่ไม่มีการควบคุม พบว่า ระบบที่ถูกควบคุม ที่ทดสอบด้วย LTspice และ MATLAB มีเวลาขึ้น (rise time) ที่เร็วกว่า และมีการพุ่งเกิน (overshoot) ขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุม ไม่มีการพุ่งเกิน

5. สรุป

บทความนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้ออปแอมป์ป้อนกลับกระแสเพียง 2 ตัว ผลการจำลองการทำงานสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี คืออัตราขยายของตัวควบคุม (K_p , K_i และ K_d) สามารถปรับได้อย่างอิสระ ในการประยุกต์ใช้งาน ได้นำตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบมาทดสอบกับพลาตันต์อันดับสาม และได้เปรียบการทดสอบโดยใช้ LTspice กับ MATLAB ซึ่งให้ผลที่คล้ายกัน โดยการใช้ LTspice จะให้ผลที่มีการหน่วงเวลาหรือเกิดล่าช้าหลังกว่าการใช้ MATLAB ผลของความแตกต่างนี้เกิดจากความไม่แน่นอนของออปแอมป์ป้อนกลับกระแส

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Astrom, and T. Haggglund, PID Controllers: Theory Design and Tuning, North Carolina: Instrument Society of America, 1995.
- [2] L Jia, D Wang, J Fu, YF Liu, PC Sen, "A novel analog implementation of capacitor charge balance controller with a practical extreme voltage detector," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 IEEE, 245-252
- [3] K. Jang, J.-M. Choi, C. Park, J. Choi, "A voltage-mode DC-DC converter with enhanced transient responses," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 20-23 May 2012
- [4] M. Huang and Y. Lu, "An analog-proportional digital-integral multi-loop digital LDO with fast response, improved PSR and zero minimum load current," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. (CICC), Apr. 2019, pp. 1-4.
- [5] C. Erdal, H. Kuntman, and S. Kafali, "A current controller conveyor- based proportion- integral- Derivative (PID) controller," Istanbul university eng. Journal of electrical & electronics, vol. 4, no. 2, pp. 1243-1248, 2004.
- [6] C. Erdal, "A new current-feedback-amplifiers (CFAs) based proportional- integral- derivative (PID) Controller realization and calculating optimum parameter tolerances," Pakistan Journal of Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 56-59, 2002.
- [7] C. Erdal, A. Toker, and C. Acar, "OTA-C based Proportional- Integral- Derivative Controller and calculating optimum parameter tolerances," Turkish J. Elect. Enging Comput. Sci., Elektrik, 9(2) (2001), 189-198.
- [8] Ali Ümit Keskin, "Design of a pid controller circuit employing CDBAa," Int. J. Electr. Eng. Educ. 43(1),48-56(2006)
- [9] สมเกียรติ เพียงพรานทอง และ อธิพงษ์ ชัยสาขัณห์, "การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วงจรรขยายบัฟเฟอร์ของผลต่างกระแส," หน้า95-100, การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, 24-25, มิถุนายน 2565.
- [10] Z. Gülru, C. Taşkıran, H. Sedef & F. Anda, "A New PID Controller Circuit Design Using CFOAs," Circuits Syst Signal Process 40, 1166-1182 (2021)
- [11] Analog Devices, "Linear products data book", Norwood, Ma, 1990.
- [12] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order System," Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Japan, 13 Dec. 1996, pp. 2513-2518

การลดความต้านทานเรือโดยใช้ฟอยล์ EPPLER 874

Reduction of Ship Resistance using EPPLER 874 Foil

ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน วลีพรรณ กันเนื่อง* และ จารุพันธ์ หนูสมตน

ภาควิชาวิศวกรรมทางทะเล คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

199 หมู่ 6 ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

ผู้นิพนธ์ประสานงาน : walephan.g@ku.th

วันที่รับบทความ: 27 ตุลาคม 2565 / วันที่แก้ไขบทความ: ครั้งที่ 1: 5 ธันวาคม 2565 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 14 ธันวาคม 2565

วันที่แก้ไขบทความ: ครั้งที่ 2: 13 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความต้านทานเรือ โดยการประยุกต์ใช้ไฮโดรฟอยล์ติดตั้งใต้ท้องเรือ ใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตเพื่อออกแบบเรือโมเดลที่มีอัตราส่วนของมิติขนาดเท่ากับ 3.2 เรือโมเดลใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของฟอยล์ เพื่อยืนยันว่าเมื่อขยายอัตราส่วนกับเรือจริงแล้ว แรงยกที่ได้มีค่ามากกว่า น้ำหนักเรือจริง เมื่อทำการทดสอบเรือโมเดลกับฟอยล์ 3 แบบ ได้แก่ EPPLER874 NACA63209 และ NACA4412 พบว่า ฟอยล์ EPPLER874 ที่มุมปะทะ 12° ให้ค่าอัตราเร็วเรือโมเดลได้ดีที่สุด จึงเลือกใช้ฟอยล์ EPPLER874 ในการสร้างเรือไฮโดรฟอยล์ ซึ่งเรือที่ออกแบบมีน้ำหนักรวมทั้งหมด 260 กิโลกรัม ฟอยล์ทำด้วยไฟเบอร์กลาส ด้านหัวเรือเป็นฟอยล์รูปตัววีมีขนาดความยาวคอร์ด 0.2 เมตร ด้านท้ายเรือใช้ฟอยล์รูปสี่เหลี่ยมคางหมู ความยาวคอร์ด 0.3 เมตร ผลทดสอบพบว่า ควรติดตั้งฟอยล์ที่มุมปะทะ 12° จะทำให้ได้แรงยกอย่างมีเสถียรภาพทั้งทางตรงและเลี้ยว เมื่อเปรียบเทียบกับเรือไฮโดรฟอยล์ EPPLER874 กับเรือแบบไม่ติดฟอยล์ พบว่า เรือไฮโดรฟอยล์มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.65 แต่การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 48.37

คำสำคัญ : เรือไฮโดรฟอยล์, EPPLER874, แรงยก, ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต

Abstract: The purpose of this research is to reduce ship resistance of the boat by using hydrofoils under the hull. The geometric similarity theory was applied to design a model with a dimension ratio of 3.2. The model boat was built to confirm that when it was extended by this dimension ratio, the hydrofoil could provide a higher lift force than the actual load. The experiment results of the model on three types of hydrofoil; EPPLER874, NACA63209, and NACA4412; showed that EPPLER874 with the attack angle of 12° provided the best model speed. Therefore, EPPLER874 foil was selected to build the hydrofoil boat. The overall load of the boat with hydrofoil is 260 kg. EPPLER874 hydrofoils made of fiberglass. The bow foil is V-shape with the chord length of 0.2 m. The stern foil is trapezoid-shaped with the chord length of 0.3 m. The experiment results have shown that 12° of hydrofoil attack angle maintains the stable lift force when moving forward and turning circle. In the comparison of the EPPLER874 hydrofoil boat with the non-foil boat,

it has been found that the speed of the hydrofoil boat increased by 15.65%, whereas the fuel consumption is reduced by 48.37%.

Keywords: Hydrofoil boats, EPPLER874, Lift force, geometrical similarity

1. บทนำ

เรือแล่นได้ต้องใช้แรงขับเคลื่อนจากกำลังเครื่องยนต์ให้ชนะความต้านทานเรือซึ่งเกิดจากความเสียดทานของน้ำ และความต้านทานคลื่น โดยกำลังขับเคลื่อนของเรือประมาณ 60% ขึ้นไป ถูกใช้ไปในการเอาชนะค่าความต้านทานเรือ ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่ของเรือ สามารถทำได้ด้วยการลดความต้านทานเรือลง โดยความต้านทานเรือเป็นส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวเปียกของเปลือกเรือ วิธีการลดความต้านทานเรื่อนั้น ต้องไม่ให้มีผลต่อความปลอดภัยในการใช้เรือ ขนาดของเรือ สิ่งแวดล้อม และมลภาวะทางทะเล วิธีที่นิยมใช้ เช่น วิธีการทาสีเคลือบผิวเปลือกเรือ วิธีนี้จะช่วยลดความหยาบของผิวเปลือกเรือ และช่วยลดการเกาะของเฟรียง ส่งผลให้แรงเสียดทานของผิวเปลือกเรือลดลง [1-2] มีการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า บัล-บัส เบบัว (Bulbous bow) [3-4] เพื่อลดความต้านทานเรือ โดยการลดคลื่น (Transverse wave) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเรือ Latorre [5] ค้นพบการลดความต้านทานเรือโดยทำให้เกิดชั้น หรือช่องว่างของอากาศ โดยการอัดอากาศบริเวณท้ายเรือ (Air lubrication technique) การทำให้เกิดชั้นของอากาศส่งผลให้แรงต้านลดลง Mäkiharju และคณะ [6] ได้วิเคราะห์การใช้พลังงานของเรือที่มีขนาดใหญ่ โดยทำการวิเคราะห์เรือบรรทุกสินค้าที่มีขนาดมิติเสมือนกับเรือ M/V American Spirit พบว่า การใช้อากาศเคลือบผิวเปลือกเรือจะประหยัดพลังงานได้ร้อยละ 10~20 โดย He และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลของจำนวน เครื่องอัดอากาศ ตำแหน่งของการวาง และปริมาตรของอากาศที่เหมาะสมที่สุดใน

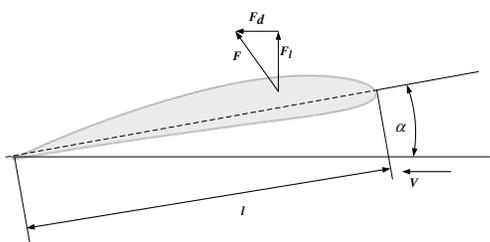
การลดแรงต้านของเรือ โดย Jang และคณะ [8] แสดงผลการทดสอบการเกิดขึ้นของอากาศว่าสามารถช่วยลดกำลังสุทธิลงโดยทำการจำลองในถังลากเรือ Cucinotta และคณะ [9] นำเสนอผลของชั้นของอากาศ พิจารณาอัตราการไหลของอากาศที่ค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแบบที่ไม่มีอากาศ นอกจากนี้ Wang และคณะ [10] ได้ศึกษาการลดความต้านทานเรือโดยการทำให้เกิดฟองอากาศ (Gas lubrication with bubbles) Tanaka และคณะ [11] แสดงผลการทดสอบการลดความต้านทานในเรือจำลองโดยทำการอัดฟองอากาศภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการลดความต้านทานเรือคือ การใช้แผ่นฟอยล์ โดย Kumagai และคณะ [12] ใช้แผ่นไฮโดรฟอยล์เพื่อการผลิตฟองอากาศเคลือบที่ผิวเปลือกเรือซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 5~15 Beckmann และคณะ [13] ทำการทดสอบการใช้เวฟฟอยล์ (Wavefoil) โดยติดตั้งที่หัวเรือจำลอง พบว่าเวฟฟอยล์ช่วยลดความต้านทานเรือได้ร้อยละ 9~17 การลดความต้านทานเรือสำหรับเรือขนาดเล็กนิยมใช้แผ่นไฮโดรฟอยล์ติดตั้งที่หัวเรือ และท้ายเรือ เพื่อให้เกิดแรงยก ตามหลักการของกลศาสตร์ของไหล ทำให้เรือยกตัวขึ้นจากผิวน้ำ จึงลดพื้นที่ผิวเปียก และลดความต้านทานเรือลง ช่วยให้เรือแล่นได้เร็วขึ้น และประหยัดพลังงาน ตัวอย่าง เช่น Budiyanto และคณะ [14] ติดตั้งฟอยล์ ชนิด NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) ที่ตำแหน่งด้านท้ายของเรือลาดตระเวนเพื่อให้เกิดแรงยกจากการทดลอง และการจำลองด้วยวิธี CFD (Computational Fluid Dynamics) พบว่า การทดสอบที่ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) เท่ากับ 1.1 การติดฟอยล์

ท้ายเรือ ช่วยทำให้ความต้านทานเรือลดได้มากถึงร้อยละ 22.3 และร้อยละ 23.3 ตามลำดับ

ตัวอย่างเรือไฮโดรฟอยล์ เช่น USS Aquila ของกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา หรือ Voskhod เรือขนส่งผู้โดยสารของยูเครน เป็นต้น ในประเทศไทยยังไม่ปรากฏชัดเจนเกี่ยวกับการนำแผ่นไฮโดรฟอยล์มาใช้ งานผู้วิจัยสังเกตเห็นคุณสมบัติของแผ่นไฮโดรฟอยล์ ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้อย่างมาก ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่แพง โดยการนำมาประยุกต์ใช้กับเรือทำได้ไม่ยาก และยังเป็น การช่วยลดการใช้พลังงาน ช่วยลดภาวะโลกร้อน รวมถึงช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บทความนี้จะนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้ฟอยล์กับเรือ เพื่อลดความต้านทานเรือ

2. ทฤษฎี

เรือไฮโดรฟอยล์ เป็นเรือที่ติดตั้งแผ่นไฮโดรฟอยล์รูปทรงคล้ายปีกเครื่องบินไว้ที่ใต้ท้องเรือ ซึ่งมีลักษณะด้านหน้าหนา ด้านบนมีความโค้ง ด้านใต้ปีกแบนราบ และเรียวแหลมที่ด้านหลัง เมื่อน้ำไหลผ่านฟอยล์ น้ำที่เคลื่อนที่ไปทางด้านบนของฟอยล์จึงมีอัตราเร็วมากกว่าด้านล่าง ทำให้ความดันด้านบนต่ำกว่า ด้านใต้ของฟอยล์ ซึ่งเป็นไปตามสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation) ส่งผลให้มีแรงยก (F_l , Lift force) และแรงดูด (F_d , Drag force) กระทำต่อฟอยล์ ผลรวมของเวกเตอร์แรงทั้งสองที่กระทำต่อฟอยล์ได้เป็นแรง F ดังแสดงในรูปที่ (1)



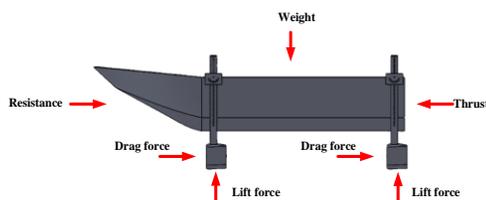
รูปที่ 1 แรงที่กระทำต่อฟอยล์

แรงยกและแรงดูดที่กระทำต่อฟอยล์ เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ จากสมการที่ (1) แรงยกจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของของไหล น้ำมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศจึงสร้างแรงยกได้ดีกว่าอากาศ แต่ฟอยล์ต้องแข็งแรงมากขึ้นด้วย

$$F_l = C_l \frac{1}{2} \rho AV^2 \quad (1)$$

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho AV^2 \quad (2)$$

รูปที่ 2 แสดงแรงที่กระทำต่อเรือ แรงผลัก (Thrust force) ที่เกิดจากใบจักรผลักเรือให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า แรงต้านทานเรือ (Ship resistance) เกิดจากความต้านทานระหว่างตัวเรือกับน้ำ เนื่องจากความเสียดทานของน้ำ และความต้านทานของคลื่นน้ำและลม ฟอยล์ติดตั้งอยู่ใต้ท้องเรือตรงหัวเรือและท้ายเรือ เมื่อน้ำไหลผ่านฟอยล์ จะเกิดแรงยก (Lift force) และแรงดูด (Drag force) ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ถ้าแรงยกจากฟอยล์มีขนาดมากพอที่จะยกตัวเรือให้ลอยขึ้น จะทำให้ตัวเรือจมในน้ำได้น้อยลง และส่งผลให้แรงต้านทานเรือลดลงด้วย จะทำให้เรือเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ง่ายขึ้น งานวิจัยนี้จะไม่คำนึงถึงแรงลอยตัว เนื่องจากตั้งสมมติฐานว่า เรือถูกยกขึ้นพื้นผิวน้ำด้วยแรงยกจากฟอยล์



รูปที่ 2 แรงที่กระทำต่อเรือ

ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกฟอยล์ 3 รูปแบบ ได้แก่ NACA4412 NACA63209 และ EPPLER874 ซึ่งมี

รูปทรงแตกต่างกันดังรูปที่ 3-5 ตามลำดับ [15] งานวิจัยนี้ฟอยล์ทั้งสามแบบมีความยาวคอर्ड 7 เซนติเมตร



รูปที่ 3 ฟอยล์แบบ NACA4412



รูปที่ 4 ฟอยล์แบบ NACA63209



รูปที่ 5 ฟอยล์แบบ EPPLER874

3. การออกแบบและสร้างเรือ

เรือมีขนาดความยาวตลอดลำ 2.88 เมตร ความกว้าง 1 เมตร ใช้เครื่องยนต์ขนาด 9.8 แรงม้า อัตราเร็วรอบเครื่อง 5,000 รอบ/นาที น้ำหนักตัวเรือ 60 กิโลกรัม เครื่องยนต์ 40 กิโลกรัม พวงมาลัย 20 กิโลกรัม บรรจุผู้โดยสารได้ 2 คนหนักรวม 140 กิโลกรัม รวมน้ำหนักทั้งหมด 260 กิโลกรัม หรือ 2,550 นิวตัน เพื่อยืนยันว่า ฟอยล์สามารถทำให้เรือหนัก 260 กิโลกรัม ยกตัวขึ้นได้ จึงได้ทดสอบกับโมเดลขนาดเล็กก่อน โดยมีขั้นตอนออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างเรือโมเดลขนาดเล็กโดยใช้ทฤษฎีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต (Geometrical similarity) โดยกำหนดอัตราส่วนของมิติระหว่างขนาดของเรือจริงต่อขนาดของเรือโมเดลต้องมีค่าเท่ากันตามสมการ (3) ซึ่งผลการคำนวณเมื่อใช้อัตราส่วนของมิติขนาด $\lambda = 3.2$ แสดงในตารางที่ (1)

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} \quad (3)$$

ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณทฤษฎีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตเมื่อใช้อัตราส่วนของมิติขนาด $\lambda = 3.2$

	ความสัมพันธ์	เรือจริง	เรือโมเดล
ความยาวตลอดลำ	$L_m = \frac{L_s}{\lambda}$	2.88 m	0.9 m
ความกว้าง	$B_m = \frac{B_s}{\lambda}$	1 m	0.3 m
ความเร็ว	$V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}}$	5 m/s	2.8 m/s
น้ำหนักเรือ	$w_m = w_s \left(\frac{1}{\lambda}\right)^3$	260 kg	8 kg

ดังนั้น เรือโมเดลมีความยาวตลอดลำ 0.9 เมตร ความกว้าง 0.3 เมตร ทดสอบที่อัตราเร็ว 2.8 เมตร/วินาที ต้องใช้ก้อนน้ำหนักถ่วงให้ได้น้ำหนักรวมเท่ากับ 8 กิโลกรัม ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยคลื่นวิทยุบังคับ เรือโมเดลใช้ทดสอบฟอยล์ 3 ชนิด ได้แก่ NACA4412 NACA63209 และ EPPLER874 ใช้ฟอยล์ที่มีความยาวคอर्ड 0.07 เมตร ด้านหัวเรือใช้ฟอยล์รูปทรงตัววีตามท้องเรือ เพื่อให้เรือสามารถปรับระดับความสูงจากผิวน้ำได้เอง เพราะเมื่อฟอยล์จมลงไปใต้น้ำ จะเกิดแรงยกเพิ่มขึ้นทำให้หัวเรือยกตัวสูงขึ้นได้ง่าย และเมื่อเรือยกตัวเหนือผิวน้ำมากเกินไป แรงยกจะลดลงทำให้เรือลดระดับต่ำลงเอง เรือจึงยังยกตัวได้ขณะเดี่ยวหรือวิ่งเป็นทางโค้ง ส่วนด้านท้ายเรือใช้ฟอยล์รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากท้ายเรือมีน้ำหนักจากเครื่องยนต์ เรือโมเดลและฟอยล์ทำด้วยไฟเบอร์กลาส และประมาณการค่าพื้นที่ระนาบของฟอยล์สองอันเท่ากับ $2 \times 0.07 \times 0.3 = 0.042$ ตารางเมตร ประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของฟอยล์ จากสมการที่ (1) ได้ $C_l = 0.4767$ ตามที่แสดงใน (4)

$$C_l = \frac{8 \times 9.81}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 2.8^2 \times 0.042} = 0.4767 \quad (4)$$

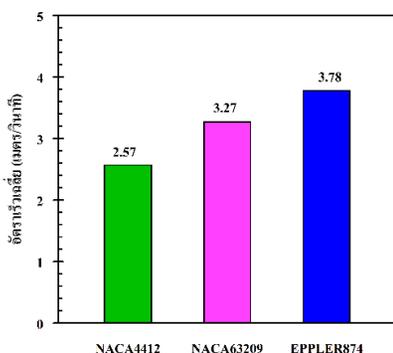


รูปที่ 6 เรือ โมเดลบังคับ

ด้านหัวเรือคิฟอยล์รูปทรงตัววี (รูปซ้าย)

ด้านท้ายเรือคิฟอยล์รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู (รูปขวา)

เนื่องจากมุมปะทะมีผลต่อแรงยก ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบหาค่ามุมปะทะที่ 3° 6° และ 12° พบว่า เรือยกตัวได้ดีที่มุมปะทะ 12° จึงเลือกทดสอบฟอยล์ ทั้งสามชนิดกับเรือ โมเดลบังคับวิทยุด้วยมุมปะทะ 12° ทำการทดสอบให้เรือวิ่งเป็นระยะทาง 30 เมตร จับเวลาที่ ใช้เพื่อคำนวณหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ย ทำการทดสอบซ้ำ ๆ หลาย ๆ ครั้ง ผลการทดสอบได้อัตราเร็วเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของเรือที่ติดตั้งฟอยล์ทั้งสามชนิดที่มุมปะทะ 12°

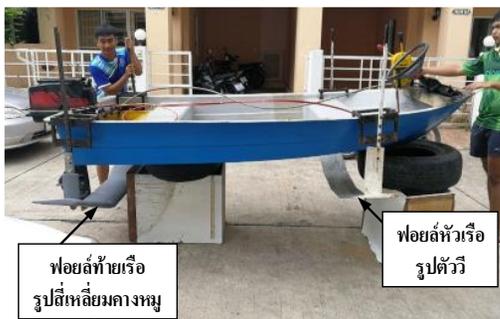
ผลการทดสอบ บ่งชี้ว่าเรือ โมเดลจำลองคิฟอยล์ EPPLER874 มีอัตราเร็วเฉลี่ย 3.78 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยสูงกว่าฟอยล์อีกสองประเภท จึงเลือกใช้ฟอยล์ชนิด EPPLER874 สำหรับใช้กับเรือจริง

ขั้นตอนที่ 2 เลือกใช้ฟอยล์ EPPLER874 ทำด้วยไฟเบอร์กลาสกับเรือจริง โดยฟอยล์ของเรือ โมเดลถูกขยายขนาดสำหรับเรือจริงตามทฤษฎีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต เรือ โมเดลใช้ฟอยล์ที่มีความยาวคอर्ड 0.07 เมตร ดังนั้นฟอยล์ของเรือจริงต้องมีความกว้างคอर्डเท่ากับ $3.2 \times 0.07 = 0.224$ เมตร และความยาวเท่ากับ ความกว้างของเรือคือ 1 เมตร โดยติดตั้งฟอยล์หน้าและหลังรวมกัน 2 อัน อัตราเร็วเรือจริงกำหนดค่าออกแบบไว้ที่ 5 เมตร/วินาที โดยใช้สมการที่ (1) คำนวณแรงยกของฟอยล์ได้ 2,670 นิวตัน ดังแสดงในสมการที่ (5) ซึ่งมีค่ามากกว่าน้ำหนักเรือ

$$F_l = 0.4767 \times \frac{1}{2} \times 1000 \times 5^2 \times (2 \times 0.224 \times 1) = 2670N \quad (5)$$

จากการทดสอบฟอยล์ EPPLER874 กับเรือจริง พบว่า ขณะที่เรือแล่นจะมีทริมหายมาก จึงได้ปรับเปลี่ยนความยาวคอर्डของฟอยล์ ดังนี้ ด้านหัวเรือใช้ฟอยล์รูปตัววีตามท้องเรือมีขนาดความยาวคอर्डเพียง 0.2 เมตร ลดลงจากค่าออกแบบที่ 0.224 เมตร เพราะไม่ต้องการให้ด้านหัวเรือยกตัวมาก ส่วนด้านท้ายเรือใช้ฟอยล์แบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยเพิ่มความยาวคอर्डจาก 0.224 เมตร เป็น 0.3 เมตร เพราะน้ำหนักเครื่องยนต์อยู่ด้านท้ายเรือ ใช้สมการที่ (1) ประมาณค่าแรงยกที่กระทำต่อฟอยล์ได้เท่ากับ 2,979 นิวตัน ดังแสดงในสมการที่ (6) จากนั้นติดตั้งระบบพวงมาลัยเพื่อบังคับทิศทางเรือได้สะดวกขึ้น

$$F_l = 0.4767 \times \frac{1}{2} \times 1000 \times 5^2 \times ((0.2 \times 1) + (0.3 \times 1)) = 2979N \quad (6)$$



รูปที่ 8 เรือไฮโดรฟอยล์ EPPLER874

4 ผลการทดสอบเรือ

4.1 การทดสอบหาค่ามุมปะทะที่เหมาะสมของเรือ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของฟอยล์ $C_l = 0.4767$ เป็นค่าออกแบบที่ประเมินจากการทดสอบเรือโมเดล เพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่าฟอยล์สามารถยกเรือขึ้นได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะขึ้นกับมุมปะทะ ดังนั้นในการใช้ฟอยล์กับเรือจริงจำเป็นต้องทดสอบหาค่ามุมปะทะที่เหมาะสมกับเรือ ด้วยการให้เรือวิ่งเป็นทางตรง โดยทดสอบที่มุมปะทะ 3° ถึง 14° เปรียบเทียบผลของค่ามุมปะทะต่อการแล่นของเรือ ดังนี้

ทดสอบมุมปะทะ 3° เรือยังไม่ยกตัว ด้วยน้ำหนักของเครื่องที่ติดตั้งอยู่ด้านท้าย เรือจึงมีทริมท้ายกรณีนี้เรือจะยังไม่เกิดการยกตัว และฟอยล์จะจมอยู่ในน้ำทั้งอัน



รูปที่ 9 องศามุมปะทะฟอยล์ 3°

ทดสอบมุมปะทะ 12° เมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ เรือจะยกตัวขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ

ต่อเนื่องยาวนานทั้งทางตรงและทางโค้ง ดังนั้นมุมปะทะ 12° เป็นมุมที่เหมาะสม



รูปที่ 10 องศามุมปะทะฟอยล์ที่ 12°



รูปที่ 11 องศามุมปะทะฟอยล์ที่ 14°

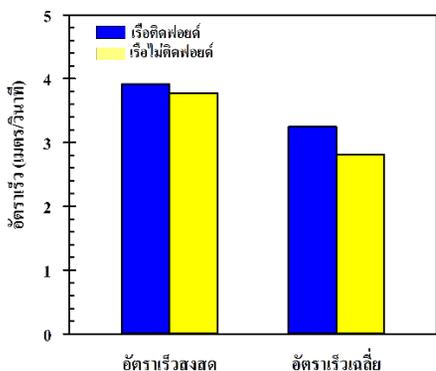
ทดสอบมุมปะทะ 14° เป็นค่ามุมปะทะสูงสุดที่ทำให้เรือยกตัวขึ้นได้ เรือยกตัวขึ้นได้สูงแต่ไม่มั่นคง และถ้ามุมปะทะมากกว่านี้ การยกตัวของเรือจะล้มเหลว แสดงว่า ถ้าเพิ่มมุมปะทะเกินกว่า 14° แรงยกจะลดลง

4.2 ทดสอบหาอัตราเร็วของเรือ และการบริโภคน้ำมัน

เชื้อเพลิง

ทำการทดสอบที่ระยะทาง 1,000 เมตร โดยใช้แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์ เพื่อวัดค่าอัตราเร็วสูงสุดของเรือ และอัตราเร็วเฉลี่ยที่เรือแล่นในระยะทาง 1,000 เมตร ทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ได้ค่าอัตราเร็วเรือไฮโดรฟอยล์เปรียบเทียบกับเรือที่ไม่ติดฟอยล์ แสดงดังรูปที่ 12 อัตราเร็วสูงสุดของเรือที่ไม่ติดฟอยล์ เท่ากับ 3.78 เมตร/วินาที อัตราเร็วสูงสุดของเรือไฮโดรฟอยล์

เท่ากับ 3.92 เมตร/วินาที หรือเร็วขึ้นร้อยละ 3.70 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วเฉลี่ยของเรือ พบว่าเรือไม่ติดพอยล์มีอัตราเร็วเฉลี่ย 2.81 เมตร/วินาที เมื่อติดพอยล์ ทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของเรือ เท่ากับ 3.25 เมตร/วินาที หรือเร็วขึ้นร้อยละ 15.65



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วของเรือไฮโดรฟอยล์กับเรือที่ไม่ได้ติดพอยล์

ถังบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร จุน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 1.257 ลิตร เมื่อเรือแล่นได้ 1,000 เมตร วัดระดับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงไป เพื่อหาปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง ผลการทดสอบเรือที่ติดพอยล์เปรียบเทียบกับเรือที่ไม่ติดพอยล์ แสดงในตารางที่ 3 การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงจาก 0.614 ลิตร/กิโลเมตร เหลือเพียง 0.317 ลิตร/กิโลเมตร เรือไฮโดรฟอยล์บริโภคน้ำมันลดลงร้อยละ 48.37 เมื่อเทียบกับเรือที่ไม่ติดพอยล์

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาอัตราเร็วเฉลี่ยของเรือ และปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง

ประเภทเรือ	อัตราเร็วเรือเฉลี่ย (เมตร/วินาที)	ปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/กิโลเมตร)
เรือไม่ติดพอยล์	2.81	0.614
เรือติดพอยล์	3.25	0.317

เป้าหมายที่ใช้ในการออกแบบ คืออัตราเร็วเรือ 5 เมตร/วินาที แต่อัตราเร็วที่เรือแล่นได้จริง คือ 3.25 เมตร/วินาที ทั้งนี้คาดคะเนว่าน่าจะมีสาเหตุสองประการ คือ 1) การลดความยาวคอร์ดด้านหัวเรือลงเพื่อรักษาเสถียรภาพของเรือ ไม่ให้เซิดหน้ามากเกินไป และ 2) สภาวะของคลื่นน้ำและลมในวันทดสอบ อย่างไรก็ตาม เรือไฮโดรฟอยล์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีอย่างมีเสถียรภาพ แผ่นพอยล์ช่วยยกตัวเรือขึ้นได้ จึงทำให้พื้นที่ผิวเปียกของเรือ หรือพื้นที่เปลือกเรือที่จมอยู่ในน้ำน้อยลง ความต้านทานเรือจึงลดลง ซึ่งส่งผลทำให้เรือแล่นได้เร็วขึ้น และมีการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการลดความต้านทานเรือ โดยการใส่แผ่นไฮโดรฟอยล์เพื่อยกตัวเรือขึ้นจากน้ำ ขณะที่เรือเคลื่อนที่ วิธีการทดสอบพอยล์ได้ใช้เรือโมเดล ซึ่งย่อขนาดจากเรือจริงโดยใช้อัตราส่วนของมิติขนาดเท่ากับ 3.2 ทดสอบกับพอยล์ 3 ชนิด ได้แก่ NACA4412 NACA63209 และ EPPLER874 ผลการทดลอง พบว่าพอยล์ EPPLER874 ที่มีความยาวคอร์ด 7 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการยกตัวเรือได้ดี และให้ค่าอัตราเร็วได้ดี จึงเลือกใช้พอยล์ EPPLER874 กับเรือจริงเรือไฮโดรฟอยล์มีขนาดความยาวตลอดลำ 2.88 เมตร ความกว้าง 1 เมตร ใช้เครื่องยนต์ 9.8 แรงม้า ติดตั้งพอยล์ EPPLER874 ทำมุมปะทะ 12° เมื่อเปรียบเทียบกับเรือลำเดียวกันที่ไม่ติดตั้งพอยล์ พบว่า อัตราเร็วเรือไฮโดรฟอยล์มีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.65 และการบริโภค น้ำมันเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 48.37

6. สัญลักษณ์

- A คือ พื้นที่ระนาบของพอยล์ (m²)
- C_l คือ สัมประสิทธิ์ของแรงยก (Lift Coefficient)
- C_d คือ สัมประสิทธิ์ของแรงดูด (Drag Coefficient)

- F_i คือ แรงยกที่กระทำต่อฟอยล์ (N)
 F_d คือ แรงดัดที่กระทำต่อฟอยล์ (N)
 l คือ ความยาวคอร์ด (m)
 L_s คือ ความยาวของเรือจริง (m)
 L_m คือ ความยาวของเรือโมเดล (m)
 B_s คือ ความกว้างของเรือจริง (m)
 B_m คือ ความกว้างของเรือจำลอง (m)
 T_s คือ ความลึกของเรือจริง (m)
 T_m คือ ความลึกของเรือจำลอง (m)
 V คือ อัตราเร็วของน้ำที่ไหลผ่านฟอยล์ (m/s)
 α คือ มุมปะทะของฟอยล์ (degree)
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 λ คือ อัตราส่วนของมิถิขนาด

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะพาณิชย์นาวินานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่เอื้อเฟื้อกำลังคน วัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. D. Chambers, K. R. Stokes, F. C. Walsh and R. J. K. Wood, "Modern approaches to marine antifouling coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201 no. 6, pp. 3642-3652, 2006.
- [2] H. Yang, J. Sun, Y. Yang, L. Chen, H. Gao, and H. Sun, "Study on the effect of marine biofouling for the ship resistance," in *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, 20-23 Sept. 2021, pp. 1-7, 2021.
- [3] A. M. Kracht, "Design of bulbous bows," *SNAME Transactions*, vol. 86, pp.197-217, 1978.
- [4] L. Jie, Z. Bao-Ji, and X. Ning, "Research on Design Optimization of High-Speed Ship Bulbous Bow Based on Nelder-Mead Algorithm," *Journal of Ship Production and Design*, vol. 38, no. 01, pp. 28-38, 2022.
- [5] R. Latorre, "Ship hull drag reduction using bottom air injection," *Ocean Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 161-175, 1997.
- [6] S. A. Mäkihärju, M. Perlin, and S. L. Ceccio, "On the energy economics of air lubrication drag reduction," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 412-422, 2012.
- [7] Z. He, T. Sun, L. Zou, Y. Jiang, and L. Duan, "Ventilated cavity flows behind a backward facing step with a combination computational fluid dynamics and Error Back Propagation algorithm," *Ocean Engineering*, vol. 260, 2022.
- [8] J. Jang, S. H. Choi, S.-M. Ahn, B. Kim, and J. S. Seo, "Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 363-379, 2014.
- [9] F. Cucinotta, E. Guglielmino, F. Sfravara, and C. Strasser, "Numerical and experimental investigation of a planing Air Cavity Ship and its air layer evolution," *Ocean Engineering*, vol. 152, pp. 130-144, 2018.
- [10] H. Wang, K. Wang, and G. Liu, "Drag reduction by gas lubrication with bubbles," *Ocean Engineering*, vol. 258, 2022.

- [11] T. Tanaka, Y. Oishi, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai and C. Kawakita, " Frictional drag reduction caused by bubble injection in a turbulent boundary layer beneath a 36- m-long flat-bottom model ship," *Ocean Engineering*, vol. 252, 2022.
- [12] KI. Kumagai, Y. Takahashi, and Y. Murai, "Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships," *Ocean Engineering*, vol. 95, pp. 183-194, 2015.
- [13] E. Böckmann and S. Steen, " Model test and simulation of a ship with wavefoils," *Applied Ocean Research*, vol. 57, pp. 8-18, 2016.
- [14] M. A. Budiyanto, M. F. Syahrudin, M. A. Murdianto, and D. Pham, " Investigation of the effectiveness of a stern foil on a patrol boat by experiment and simulation," *Cogent Engineering*, vol. 7, no. 1, 2020.
- [15] <http://airfoiltools.com>

ประวัติผู้ประพันธ์ :



ฉัตรชัย เอี่ยมพรสิน
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ : กลศาสตร์ของ
ไหล เครื่องยนต์ดีเซลในเรือ
การหล่อลื่น การคำนวณเชิงตัวเลข



วลีพรรณ กันเนื่อง
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตร-
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ : โครงสร้างเรือ
การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
การหล่อลื่น



จารุพันธุ์ หนูสมตน
การศึกษา: วิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
งานวิจัยที่สนใจ : กลศาสตร์ของ
ไหล การออกแบบเครื่องจักร-
ใบจักรเรือ วิศวกรรมงานระบบ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ
SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY
ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2565

ชื่อ-นามสกุล

ต้นสังกัด

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์	ด้วงทองสุข	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญาชัย	เอียดปราบ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมสุข	เสพศิริสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิเรก	สุริยวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ภาณุวัฒน์	दानกลาง	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.ปริญญา	เกียรติภัชชัย	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ โดยมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในการพิจารณาของวารสารอื่นๆ เรื่องที่จะตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 คน กองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้นและทรงไว้ซึ่งสิทธิ์ในการคัดลอกตีพิมพ์หรือไม่ก็ได้

ประเภทผลงานที่ตีพิมพ์

1. บทความวิจัย (Research articles) เป็นผลงานที่เตรียมจากข้อมูลที่ผู้เขียน หรือทีมงานผู้เขียนได้ค้นคว้าวิจัยด้วยตนเอง
2. บทความวิชาการ (Academic articles) อาจแยกเป็นบทความปริทรรศน์ (Review articles) บทความเทคนิค (Technical article) เรียบเรียงจากการสืบค้น ตรวจสอบเอกสารวิชาการในสาขานั้นๆ และบทความพิเศษ (Special articles) เสนอความรู้ทั่วไปในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การเตรียมต้นฉบับบทความ

บทความหรือผลงานวิจัยที่นำเสนออาจอยู่ในรูปแบบภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยจัดพิมพ์ด้วยโปรแกรมเวิร์ดโปรเซสเซอร์ ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ สำหรับตาราง แผนภาพและภาพประกอบในส่วนของคุณฉบับจะต้องตามรูปแบบที่กำหนดเพื่อให้พร้อมตีพิมพ์ได้ทันที (Camera ready) ต้นแบบสำหรับบทความสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th

การส่งบทความ

ส่ง “ต้นฉบับบทความ” โดยไม่ต้องระบุชื่อที่อยู่และประวัติของผู้ประพันธ์และทีมงานและส่ง “ใบรับรองบทความ” ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ ไฟล์ Doc ส่งผ่านระบบ Thaijo ได้ที่ วารสาร SAUJOURNALST

บทความทุกบทความที่เสนอมายังวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิ หากมีการแก้ไขหรือขอรับการตีพิมพ์ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ DOC ของบทความที่แก้ไข สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

โทรศัพท์ : 0-2807-4500-27 # 404 โทรสาร: 0-2807-4528

e-mail : SAUJournalST@sau.ac.th

ต้นฉบับสำหรับบทความที่เขียนเป็นภาษาไทยสำหรับวารสาร

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ชื่อบทความ

Title of the Paper

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาไทย)

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาอังกฤษ)

ภาค/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย

ที่อยู่/ประเทศ

ผู้พิมพ์ประสานงาน : Your email address

วันที่รับบทความ: / วันที่แก้ไขบทความ: / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์:

บทคัดย่อ นี้คือต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “**คำสำคัญ:**” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำ **บทคัดย่อ คำสำคัญ** และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns after the keywords. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract, Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords: Please leave one blank line after the *Abstract* and write your keywords (4-5 words).

1. บทนำ

ชื่อบทความภาษาไทย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 20pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) ตามด้วยชื่อบทความภาษาอังกฤษ (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 16pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) จากนั้นเว้น 1 บรรทัด ตามด้วยชื่อผู้ประพันธ์ (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt ตัวเข้มกลางหน้ากระดาษ) ภาค/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) และที่อยู่/ประเทศ(ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) จากนั้นระบุ email address ของผู้นิพนธ์ประสานงาน (ใช้ตัวอักษรTimes New Roman ขนาด10pt กลางหน้า) หัวข้อเรื่องแต่ละข้อ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด15pt หนาชิดขอบซ้าย) โดยใช้หมายเลขแบบอินดู อารบิก (1, 2, 3,...) ไม่ใช่แบบเลขโรมัน (I, II, III, ...).

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สรุปอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์และมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับคนอื่นๆ ที่จะสามารถที่จะทำให้เกิดการทดลองซ้ำได้

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับชื่อหัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 15pt, ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย เรียงลำดับหัวข้อด้วย 1, 2, 3,... (ไม่ใช่ I, II, III,...) การขึ้นหัวข้อใหม่แต่ละครั้งให้เว้น 1 บรรทัด สำหรับสมการคณิตศาสตร์ให้จัดเรียงด้วย (1), (2), (3),...

3.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 1

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 1 ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.1.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 2

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 2 ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.2 ตาราง รูป และการอ้างอิง

สำหรับรูปภาพตารางและการอ้างอิงตัวเลขควรเป็นเลขคี่นี้ รูปที่ 1 รูปที่ 2, ... ฯลฯ (ที่กึ่งกลาง) และตารางควรจะเป็นเลขคี่นี้ Table1, Table2 ... ฯลฯ (ที่ด้านซ้าย) การอ้างอิงในบทความให้ใช้เครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม เช่น [2] จะต้องเรียงลำดับหมายเลขอ้างอิงจากหมายเลขน้อยไปสู่หมายเลขมากให้ถูกต้อง การอ้างอิงหมายเลขที่มีลำดับติดต่อกัน ตัวอย่างเช่น[1-5]

4. สรุปผล

เพื่อให้ทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์มีรูปแบบที่ตรงกัน ผู้ประพันธ์จะต้องจัดทำบทความตามต้นแบบ ไม่เช่นนั้นบทความของท่านจะถูกส่งคืนเพื่อปรับปรุงรูปแบบให้ตรงกับต้นแบบนี้ขอขอบคุณท่านสำหรับการให้ความร่วมมือ

5. กิตติกรรมประกาศ

ในส่วนนี้ไม่จำเป็นต้องมี แต่ท่านสามารถใช้ส่วนนี้ในการนำเสนอให้ทราบถึงผู้ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยของท่าน เช่น นักศึกษาที่มีส่วนร่วม ผู้ที่มีส่วนร่วมจากภายในหรือภายนอก หรือองค์กรที่ให้ทุนสนับสนุน

6. หลักเกณฑ์ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงกำหนดให้ใช้ ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt และเขียนตามตัวอย่างของเอกสารอ้างอิงในแม่แบบนี้ กรณีที่เป็น

เอกสารอ้างอิง [1] หมายถึง “หนังสือ”

เอกสารอ้างอิง [2] หมายถึง “รายงาน”

เอกสารอ้างอิง [3] หมายถึง “วารสาร”

เอกสารอ้างอิง [4] หมายถึง “ประชุมวิชาการ”

- เอกสารอ้างอิง [5] หมายถึง “มาตรฐาน”
 เอกสารอ้างอิง [6] หมายถึง “เวปไซต์”
 เอกสารอ้างอิง [7] หมายถึง “ปริญญาานิพนธ์”
 เอกสารอ้างอิง [8] หมายถึง “วิทยานิพนธ์”
 เอกสารอ้างอิง [9] หมายถึง “คู่มือ”

โดยในกรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco-industrial development under the cost to develop green industry, 2013(in Thai).
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot-spot temperature,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no.3, pp.1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriyorakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in *Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009)*, China, 8-11Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise, ANSI/IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter

with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).

- [8] C. Bundanphrai, “A comparison of electric power and temperature on three- phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).
- [9] V. Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph.D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

หมายเหตุ กรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

ประวัติผู้ประพันธ์ :



ผู้ประพันธ์ระบุประวัติโดยย่อของตนเอง ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับประวัติศึกษาตำแหน่ง สถานที่ทำงาน และงานวิจัยที่สนใจ พร้อม

รูปถ่าย ขนาด 2 ซม. x 2.4 ซม.

Guidelines for Contributors

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two-annually by Southeast Asia University. All articles are considered for publication in this journal will have to follow the following conditions, 1) they have not been published elsewhere and 2) they are not currently being submitted for consideration in any other journals. All articles are independently assessed (peer reviewed) by at least three specialists in their relevant fields. The editor board reserves a privilege to ask the authors to improve their articles, and to decide whether submitted articles should be published or not.

Types of work published

1. Research articles by individual or team researchers.
2. Academic articles include review articles, technical articles, and special articles on science and technology.

Manuscripts

Manuscripts must be prepared to meet professional standards using word processors on Windows. The table, diagrams and illustrations in the contributed manuscripts should be in a camera-ready format. For the template article can be downloaded from the website <http://saujournalst.sau.ac.th>

Submission

The manuscripts of the prospective contributors should be submitted to the editor-in-chief. Authors must submit manuscript (without name, address and authors, biography notifications) with electronic file (PDF) and "Copyright Transfer Form".

- Directly to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University.

- By mail to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, 19 / 1 , Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand.

-By online at Website saujournalst.sau.ac.th

All papers submitted to SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY are subject to peer review. If revised or accepted of article should be submitted the manuscript (PDF and DOC) to the editor-in-chief. You may contact us using the information listed at Southeast Asia University, Tel.#: 0-2807-4500-27 EXT 331, FAX : 0-2807-4528 19/1, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand; Email address : SAUJournalST@sau.ac.th

Manuscripts of paper writing as english language for
SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Title of the Paper

Author's Names

Department, University

Address, (country)

Corresponding author : e-mail address

Received: / Revised: / Accepted:.....

บทคัดย่อ นี้คือต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “คำสำคัญ :” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำบทคัดย่อ คำสำคัญ และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract, Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords : Please leave one blank line after the Abstract and write your keywords (4-5 words).

1. Introduction

The title of the paper you must use 16 point Times New Roman in Bold at the center of the page. Leave one blank line and type the authors' names, department and country in capital letters with 11 point Times New Roman in Bold and centered. For the corresponding author, use 11 point Times New Roman centered. The heading of each section should be printed in small 12 point, left justified, bold Times New Roman font. Use Hindu-Arabic number (1, 2, 3,...) for the section's numbering and not the Roman Numerals (I, II, III, ...).

2. Materials and Methods

Brief description of the experimental procedure and analysis and sufficient information for others to be able to reproduce the experiments.

3. Results and Discussion

For section heading, use 12 point left justified Times New Roman in bold, numbered as follows : 1, 2, 3,... (not I, II, III,...). Please leave one blank spaces between successive sections. Mathematical equations must be numbered as follows : (1), (2), (3)....

3.1 Subsection

For subsection heading, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.1.1 Sub-subsection

When including a sub-subsection, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.2 Figures, Tables and Reference

Figures should be numbered as follows: Fig.1, Fig.2, ... etc.(at center) and Tables should be numbered as follows: Table.1, Table.2, ... etc.(at Left). Type the corresponding number of references in square brackets.

4. Conclusion

Please follow our instructions faithfully, otherwise, you have to resubmit your paper. This will enable us to maintain uniformity in the journal. Thank you for your cooperation.

5. Acknowledgement

This section is optional. You can use this section to acknowledge support you have had for your research from your colleagues, student's participation, internal or external partners' contribution or funding organization.

6. Rules for writing reference

The letter, in 11 point Times New Roman, will be used for writing reference and the reference in this template being subject to the condition as below :

Ref. [1] stand for "Book"

Ref. [2] stand for "Report"

Ref. [3] stand for "Journal"

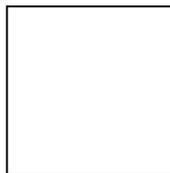
Ref. [4] stand for “Conference”
 Ref. [5] stand for “Standard”
 Ref. [6] stand for “Website”
 Ref. [7] stand for “Student’ Project”
 Ref. [8] stand for “Thesis”
 Ref. [9] stand for “Dissertation”

In case of reference written in Thai being used. It need to be translated to English and put the word "(in Thai)" at the back of reference.

References

- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco- industrial development under the cost to develop green industry, 2013. (in Thai)
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot- spot temperature,” IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 24, no.3, pp. 1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriworakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009), China, 8-11 Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65 °C or 55 °C average winding rise, ANSI/ IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online] . Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “ The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [8] C. Bundanphrai, “ A comparison of electric power and temperature on three- phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [9] Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph. D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

Authors’ Biography:



The author should include a brief introduction about his/ her interest in the research topic and a scanned 2 cm. x 2.4 cm.

photo attached the original manuscript



หมายเลขบทความ
(เฉพาะเจ้าหน้าที่กรอก)

แบบฟอร์มใบรับรองบทความ SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

1. ประเภทของบทความ

- บทความวิจัย บทความวิชาการปริทรรศน์ บทความวิชาการเทคนิค บทความวิชาการพิเศษ

2. สาขาบทความที่ส่ง

- Electrical Engineering Electronic & communication Engineering Industrial Engineering
 Civil Engineering Computer Science & Engineering Mechanical Engineering
 Agricultural Engineering Occupational Health & Safety Environment Engineering

3. ชื่อบทความ

ภาษาไทย.....

ภาษาอังกฤษ.....

4. ชื่อ-สกุลของผู้รับผิดชอบประสานงาน(Corresponding author).....

5. สถานที่ติดต่อของผู้รับผิดชอบประสานงาน(Corresponding author) ที่อยู่.....

.....

..... โทรศัพท์..... โทรสาร..... E-mail.....

6. รายชื่อและที่อยู่ของเจ้าของบทความทั้งหมด

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail
1.				
2.				
3.				

4.				
5.				

7. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

ชื่อ-สกุล	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail
1.			
2.			
3.			

8. การรับรองบทความ

ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน
 ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ.....ผู้พิมพ์ประสานงาน
 ()
 วัน..... เดือน..... พ.ศ.

หมายเหตุ ส่งแบบฟอร์มนี้มาพร้อมกับบทความตามช่องทางในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (การส่งบทความ)



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิก SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร E-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

..... ปี (2 ฉบับ/ปี)

500 บาท

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงิน(ตัวอักษร)

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเสร็จการจ่ายเงินมาที่ E-mail Address : saujournalST@sau.ac.th หรือ โทรสารมาที่
หมายเลข 0-2807-4528 พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแวง กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 0-2807-4500-27 ต่อ 331 โทรสาร 0-2807-4528 E-mail Address : SAUJournalST@sau.ac.th



มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
SOUTHEAST ASIA UNIVERSITY

สาขาวิชาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เปิดสอน

ปริญญาเอก

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (ปร.ด.)

ปริญญาโท

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.ม.)

ปริญญาตรี

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (IoT) (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (วศ.บ.)

สาขาวิชาดิจิทัลมีเดีย (วท.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ (วท.บ.)

ติดต่อศูนย์รับสมัคร

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม (ติดซอยเพชรเกษม 106) เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ : 02-8074500 - 27 ต่อ 190,192

WWW.SAU.AC.TH

