

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Volume 6 | Number 2 | July – December 2020



การควบคุมหุ่นยนต์หยิบจับวัตถุโดยใช้การมองเห็นจากกล้องแบบ 2 มิติ
Robot Control for Picking Up Objects using 2D Vision Camera
บุญเลิศ สือเฉย^{1*}, ณพงษ์ กุลคณา^{1*} และ มณฑล สีลาจินดาไทรฤกษ์²

A Short Review on the Utilization of Sugarcane Bagasse Ash in the
Manufacture of Concrete Block in Thailand
Kultida Bunjongsiri¹, Boonchai Chearnkiatpradab² and Jirat Bunjongsiri²

วงจรรากที่สองแบบซีมอสที่ทำงานได้ 2 โหมด
Two-mode CMOS square-rooting circuits
อิทธิพงศ์ ชัยสาธิต และ สมเกียรติ เพ็ญพรานทอง

แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยล้อกังหัน
Waste Water Treatment Model of Solar Aerator with Paddle Wheel
พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี และ ณัฐ จันท์คง



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

เจ้าของ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ที่ปรึกษา

ดร.นัททวุฒิ พิษผล

บรรณาธิการ

รศ.ดร.วีระพันธ์ คิวทองสุข (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

กองบรรณาธิการ

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

กรรมการบริหาร

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

ฝ่ายพัฒนา ดูแลและปรับปรุงเว็บไซต์

นางสาวรุ่งทิวา	ลังกาพันธ์	นายระพี	วาทะศรีศิลป์
นางสาวจิราภรณ์	ปราภุ		

ฝ่ายเลขานุการ

นางสาวห่มกฤษ	เข็มรู้การ	นางณัฐภาวี	จิระภาพันธ์
--------------	------------	------------	-------------

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 วิศวกรรมอุตสาหการ อาชีวอนามัยและความปลอดภัย วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเกษตร
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างนักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความวิจัยที่น่าสนใจ และมีคุณค่าทางวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้เกิดองค์ความรู้ใหม่แก่นักวิจัยของมหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ 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 6 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2563 ปัจจุบันเป็นวารสารที่ได้รับรองให้อยู่ในฐานข้อมูลของ TCI 2

จากผลการดำเนินงานของวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจทั้งหมด 4 บทความ เป็นบทความวิจัยที่น่าสนใจจำนวน 4 เรื่อง ได้แก่ เรื่อง “การควบคุมหุ่นยนต์หยิบจับวัตถุโดยใช้การมองเห็นจากกล้องแบบ 2 มิติ” เรื่อง “A Short Review on the Utilization of Sugarcane Bagasse Ash in the Manufacture of Concrete Block in Thailand” เรื่อง “วงจรรากที่สองแบบซิมอสที่ทำงานได้ 2 โหมด” และ เรื่อง “แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยสื่อกักหน้” ซึ่งกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับความรู้จากงานวิจัยต่าง ๆ ในวารสารเล่มนี้เป็นอย่างมาก

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

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
การควบคุมหุ่นยนต์หยิบจับวัตถุโดยใช้การมองเห็นจากกล้องแบบ 2 มิติ Robot Control for Picking Up Objects using 2D Vision Camera บุญเลิศ ลือไชย ^{1*} , ณพนธ์ กุลคณา ^{1*} และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ²	1
A Short Review on the Utilization of Sugarcane Bagasse Ash in the Manufacture of Concrete Block in Thailand <i>Kultida Bunjongsiri¹, Boonchai Chearnkiatpradab² and Jirat Bunjongsiri²</i>	14
วงจรรากที่สองแบบซีมอสที่ทำงานได้ 2 โหมด Two-mode CMOS square-rooting circuits อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง	25
แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยล้อกังหัน Waste Water Treatment Model of Solar Aerator with Paddle Wheel พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี และ ณัฐ จันท์กรบ	35

การควบคุมหุ่นยนต์หยิบจับวัตถุโดยใช้การมองเห็นจากกล้องแบบ 2 มิติ

Robot Control for Picking Up Objects using 2D Vision Camera

บุญเลิศ สือเฉย^{1*}, ณพงษ์ กุลคณา^{1*} และ มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์²
Boonlert Suechoey^{1*}, Napong Kulkana^{1*} and Monthon Leelajindakrairerk²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ผู้พิมพ์ประสานงาน : boonlerts@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มีนาคม 2563 / วันที่แก้ไขบทความ: 11 กรกฎาคม 2563 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 21 กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาการใช้กล้องร่วมกับแขนกลในการมองเห็นแบบ 2 มิติ เพื่อใช้ในการหยิบจับวัตถุ และทำการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้กล้องกับหุ่นยนต์ในการวางวัตถุให้มีความแม่นยำในการวางวัตถุตามจุดที่ได้กำหนดไว้ งานวิจัยนี้จึงได้เน้นไปที่การวิจัยพัฒนาควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ที่สามารถใช้งานได้จริง เพื่อใช้ในการหยิบจับชิ้นงาน โดยใช้กล้องในการมองเห็นตำแหน่งของชิ้นงานแทนเพื่อวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ โดยมีส่วนประกอบสำคัญสองส่วนคือการสร้างกลไกที่สามารถควบคุมได้อัตโนมัติในการจับวัตถุ และการใช้โปรแกรมวิทัศน์(Vision) ในการสร้างส่วนของการมองเห็นของเครื่องจักร และต้องให้การทำงานทั้งสองส่วนนั้นสอดคล้องประสานการทำงานอย่างถูกต้องไปพร้อมกัน และมีความเร็ว เป็นที่พอใจ จากการทดสอบการควบคุมหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้น มีผลเป็นที่น่าพอใจ และสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กล้อง, หุ่นยนต์, ความคลาดเคลื่อน, เครื่องจักร

Abstract : This research presents the development of using a camera with a 2D vision robot arm for handling object and study the efficiency of using cameras and robots to place objects with the accuracy of placing objects at specified points. This research focuses on the research and development of a robot arm control that can actually be used for grabbing work pieces by using the camera to see the position of the workpiece instead to analyze the product integrity. There are two important components: creating a mechanism that can be controlled automatically to capture the object and the use of vision programs to create machine vision and having both work parts correctly and coordinated with satisfactory speed. From the test of developed robot control, it shows satisfactory results that can be used effectively.

Keywords : camera, robot, tolerance, machine

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตและการทำงานของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกซึ่งในระยะเวลาไม่ถึง 10 ปี การพัฒนาเทคโนโลยีจะเป็นไปอย่างรวดเร็วและแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และทางการแพทย์ โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนที่คำนึงถึงสภาพแวดล้อมและช่วยลดปัญหามลพิษ ทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งเรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ และเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นไปอย่างรวดเร็ว

การใช้เครื่องจักรในการหยิบวางวัตถุนั้น ในงานระบบของอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องจักรในการหยิบวางหลายรูปแบบและมีหลายประเภทได้แก่งานที่เป็นระบบอัตโนมัติ และงานในส่วนของแขนกล จาก Chen และ คณะ [1] และ Prommarak และ คณะ Chamniprasart [2] ได้ใช้วิทัศน์ (Vision) ในการตรวจสอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จาก Guo-Shing และคณะ [3] ได้ใช้แขนกลในการจับวางโดยใช้ระบบตรวจจับขอบภาพ จาก Varagul และ Chamniprasart [4] ได้พัฒนาเครื่องตรวจสอบด้วยภาพอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ จาก Nerakae และคณะ [5] ได้ออกแบบหุ่นยนต์แบบหยิบวางที่ใช้ระบบมองเห็นของเครื่องจักรด้วยการจับขอบภาพ จาก Santosh และ Choudhury [6] ได้ใช้ระบบวิทัศน์สำหรับตรวจสอบวัตถุเพื่อระบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ซึ่งในงานส่วนนี้ต้องอาศัยความแม่นยำในการวางวัตถุของงานเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นและเพิ่มความเร็วความแม่นยำ

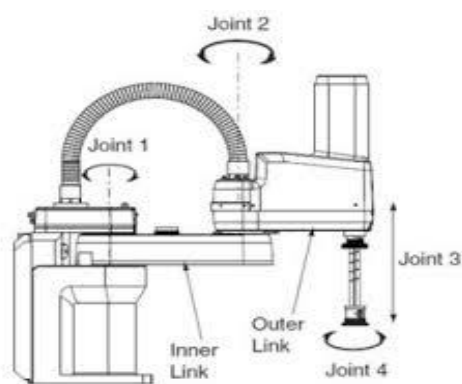
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิควิธีการใช้กล้องควบคุมแขนกลในการวางวัตถุ โดยการใช้กล้องเพื่อตรวจรู้ค่าความคลาดเคลื่อนว่าวัตถุเคลื่อนไปทางแกนเอ็กซ์ (x axis) ระยะกี่มิลลิเมตร ไปทางแกน

วาย (y axis) มีระยะกี่มิลลิเมตรและวัตถุได้หมุนไปกี่องศา หลังจากนั้นเมื่อได้ค่ามาแล้วแขนกลจะนำค่าที่ได้จากการถ่ายมาลบกับค่าที่ไปวางวัตถุตามระยะที่กำหนด

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีวิจัย

2.1 แขนกลตีสกอล่า (SCARA Robot)

การใช้แขนกลในการหยิบวางในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้แขนกลตีสกอล่า [5] ซึ่งเป็นแขนกลที่มีการเคลื่อนที่เร็ว มีการหยิบวางวัตถุที่แม่นยำประกอบกับความเหมาะสมกับงานในลักษณะนี้ จึงได้ใช้แขนกลตีสกอล่าในงานวิจัยนี้ โดยแสดงดังรูปที่ 1



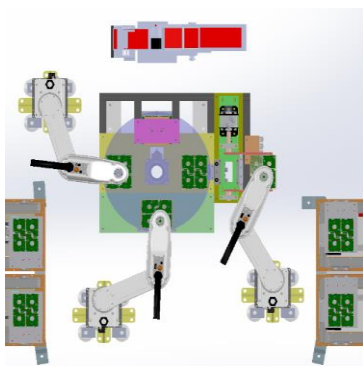
รูปที่ 1 แขนกลตีสกอล่า (SCARA Robot) [5]

2.2 การหยิบจับชิ้นงานของแขนกล

ในการหยิบวางของแขนกลตีสกอล่านั้น จะมีลักษณะที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง มีลักษณะที่มีความรวดเร็ว และแม่นยำในการหยิบ และวางวัตถุ อีกทั้งยังทำงานควบคุมการทำงานที่ใช้การมองเห็นจากภาพเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นและควบคุมการทำงานของแขนกลผ่านพีแอลซี (PLC) ในการเช็คสถานะและควบคุมการทำงานของแขนกล

ชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 10 x 10 มิลลิเมตร ซึ่งถ้ามองด้วยสายตาสายตาสีฟ้าจะรู้สึกว่าชิ้นงานมีขนาดเล็ก แต่ในมุมมองวิทัศน์ที่ใช้เลนส์ระยะโฟกัสที่ 8 มิลลิเมตรจะสามารถเห็นภาพของชิ้นงานได้ชัดเจน เพราะได้ทำการทดสอบเลนส์กล้องในขนาดที่แตกต่าง

กัน แล้วพบว่าขนาดเลนส์ระยะโฟกัสที่ 8 มิลลิเมตร สามารถให้ความละเอียดในระยะที่ติดตั้งกล้องถึงวัตถุ มีความคมชัดและเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด



รูปที่ 2 รูปแบบของแขนกล
ในการทำงานที่ใช้โปรแกรมออกแบบ

จากรูปที่ 2 แสดงรูปแบบของหุ่นยนต์ในการทำงานและลักษณะของจุดที่หยิบและวางของเครื่องนั้น โดยแขนกลจะไปหยิบตัวฟองน้ำที่เป็นสีแดง และจะนำไปวางลงตรงกลางของจุดสี่เหลี่ยมบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3 รูปแบบของแขนกลในการทำงานที่จริง

จากรูปที่ 3 แสดงรูปแบบของแขนกลทั้งหมดที่ใช้ในการทำงานในการหยิบวางฟองน้ำลงบนชิปของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (PCB)

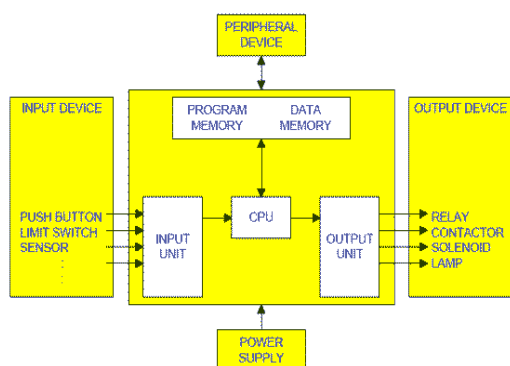


รูปที่ 4 รูปแบบของแขนกล
ในการหยิบฟองน้ำจากฟิดเดอร์

จากรูปที่ 4 แสดงรูปแบบของแขนกลในการทำงานและลักษณะจุดขึ้นงาน เพื่อนำไปวิเคราะห์ภาพเพื่อที่จะนำไปติดตั้งบนชิปของแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการประกอบฮาร์ดดิสก์[4], [7]

2.3 การควบคุมหุ่นยนต์ผ่านโปรแกรมพีแอลซี[8-9]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมพีแอลซีในการสั่งการหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งเป็นตัวลำเลียงแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ทำงานตามการผลิตที่วางแผนไว้ได้อย่างถูกต้องโดยจะทำการอินเตอร์เฟสระหว่างโปรแกรมพีแอลซี สไลเดอร์คอนเวเยอร์เข้ากับพีแอลซี ที่ควบคุมหุ่นยนต์เพื่อรับสัญญาณอินพุตจากสไลเดอร์คอนเวเยอร์ เพื่อลำเลียงแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มายังจิ๊กใส่แผ่น โดยจะทำการหมุนโดยเซอร์โวมอเตอร์ และให้พีแอลซี รับสัญญาณอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อเช็คสถานะของอุปกรณ์ประกอบการสั่งการแขนกลว่าถ้าสถานะขณะนี้อุปกรณ์ทำการตรวจวัดอยู่จะสั่งการหุ่นยนต์ให้ทำขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 5 โครงสร้างของพีแอลซี (PLC)[10]

จากรูปที่ 5 จะเป็นส่วนโครงสร้าง ของพีแอลซี โดยส่วนโครงสร้างจะมี 5 องค์ ประกอบหลัก ๆ คือ 1. ตัวประมวลผล (CPU) ทำหน้าที่คำนวณและควบคุม ซึ่งเปรียบเสมือนสมองของพีแอลซี ภายในจะประกอบด้วยวงจรลอจิกหลายชนิดใช้แทนอุปกรณ์พวก รีเลย์ เคาเตอร์/ไทมเมอร์ และซีเควนเซอร์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถออกแบบวงจรโดยใช้โปรแกรม (Ladder Diagram)

2. หน่วยความจำ (Memory Unit) ทำหน้าที่เก็บรักษา โปรแกรมและข้อมูลที่ใช้ในการทำงาน โดยขนาดของ หน่วยความจำจะถูกแบ่งออกเป็นบิตข้อมูลภายใน หน่วยความจำ 1 บิต ก็จะมีค่าสถานะทางลอจิก 0 หรือ 1 แตกต่างกันไปแต่คำสั่ง

3. หน่วยอินพุต – เอาต์พุต (Input-Output Unit) หน่วย อินพุตทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอกแล้ว แปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมแล้วส่ง สัญญาณให้หน่วยประมวลผล หน่วยเอาต์พุตทำหน้าที่ รับข้อมูลจากตัวประมวลผลแล้วส่งต่อข้อมูลไปควบคุม อุปกรณ์ภายนอกเช่น ควบคุมหลอดไฟ ควบคุมมอเตอร์ และวาล์ว เป็นต้น

4. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ทำหน้าที่จ่ายพลังงาน และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับหน่วย ประมวลผล (CPU Unit) หน่วยความจำและ หน่วย อินพุต/เอาต์พุต

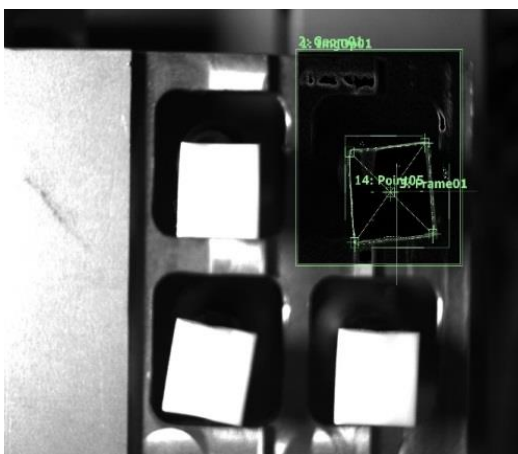
5. อุปกรณ์ต่อร่วม (Peripheral Devices)

- อุปกรณ์ป้อนโปรแกรม (Programming Console)
- หน้าจอทัชสกรีน (Human Machine Interface)
- คอมพิวเตอร์ (Computer)

2.4 เทคโนโลยีการมองเห็นของเครื่องจักร

กระบวนการวิเคราะห์ภาพและนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการตัดสินใจการทำงานของ เครื่องจักร เป็นกระบวนการ โดยรวมที่ใช้เรียกการมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision) ซึ่งแนวคิดในการมองเห็นภาพได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องมีวิธีการและเทคโนโลยีหลายรูปแบบ ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้กับการมองเห็นของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้คือการตรวจจับขอบภาพ (Edge Detection) [5], [11]

การประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ การประยุกต์ใช้งานการประมวลผลสัญญาณบน สัญญาณ 2 มิติ เช่น ภาพนิ่ง ภาพวิดีโอ และยังรวมถึง สัญญาณ 2 มิติอื่นๆ ที่ไม่ใช่ภาพด้วย ในหลายปีที่ผ่านมา การประมวลผลภาพนั้น จะอยู่ในรูปของการประมวลผล สัญญาณแอนะล็อก โดยใช้อุปกรณ์ปรับแต่งแสง ซึ่งวิธี เหล่านี้ในปัจจุบันยังมีการใช้อยู่ และได้มีการประยุกต์ใช้ งานบางอย่างได้แก่ งานโอโลกราฟี แต่เนื่องจากมี ประสิทธิภาพมากขึ้น การประมวลผลดิจิทัลจึงได้รับความนิยมมากกว่า เพราะการประมวลผลภาพที่ทำได้ ซับซ้อนขึ้นแม่นยำ และง่ายในการลงมือปฏิบัติ ในส่วน ของงานวิจัยนี้ได้ใช้การประมวลผลภาพแบบการหา ขอบภาพ (Edge Detection) เป็นการหาเส้นรอบวัตถุที่อยู่ในภาพ เมื่อทราบเส้นรอบวัตถุในภาพจะทำให้ทราบจุด กึ่งกลางของวัตถุ และเมื่อทราบจุดกึ่งกลางของวัตถุ ใน ตัวของโปรแกรมจะคำนวณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของวัตถุ จากตำแหน่ง (Pixel) ในแนวระนาบ X และ Y แปลงเป็น ตำแหน่ง (mm) ในแนว X และ Y ของตัวหุ่นยนต์ [5], [12]



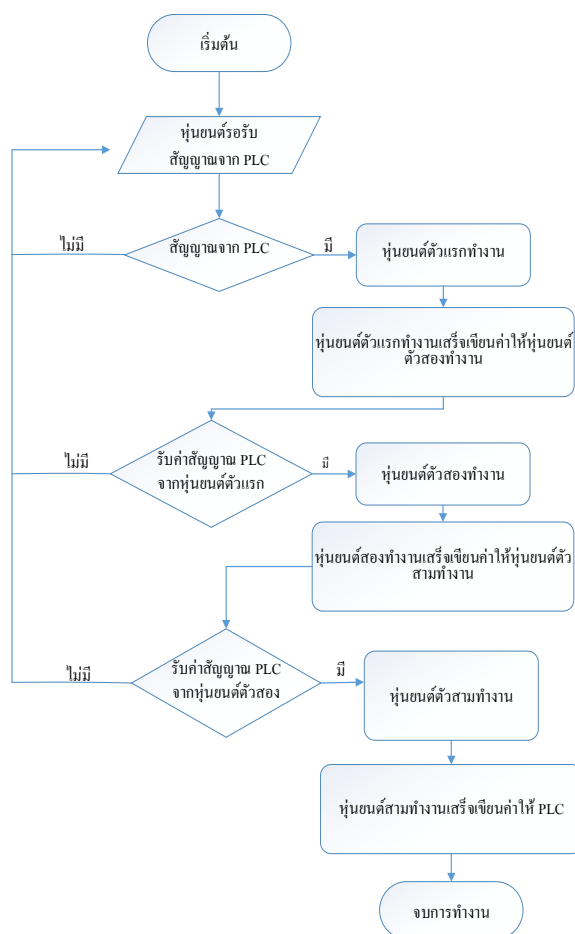
รูปที่ 6 ตัวอย่างในการตรวจจับขอบภาพแบบ

2.5 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์

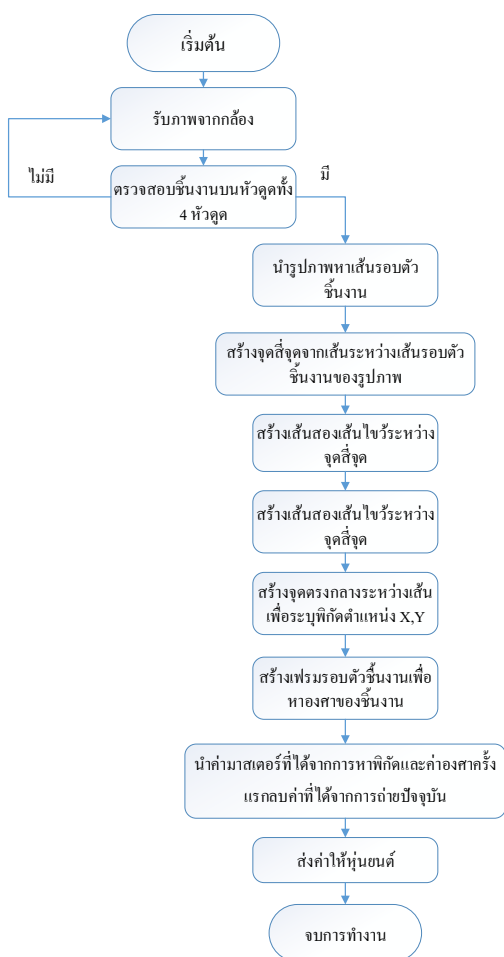
ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ แสดงได้ดังรูปที่ 7 การทำงานของแขนกลทั้ง 3 ทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลกับพีแอลซี โดยแขนกลแต่ละแขนจะทำการอ่านสถานะในพีแอลซีเพื่อทำงานตามโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้

2.6 ระบบการทำงานของกล้อง

ขั้นตอนการทำงานของกล้องแสดงได้ดังรูปที่ 8 การทำงานของกล้องร่วมกับแขนกล จะเริ่มจากกล้องรับสัญญาณภาพ เมื่อรับสัญญาณภาพมาแล้วจะทำการหาชิ้นงานบนหัวดูดจากภาพ เมื่อทำการหาชิ้นงานเจอทางโปรแกรมวิทัศน์ จะทำการหาเส้นรอบตัวชิ้นงานเพื่อหาจุดตัดในการระบุพิกัดตำแหน่งแกนเอ็กซ์ (x axis) และ แกนวาย (y axis) จากนั้นทำการสร้างเฟรมตัวจับชิ้นงานเพื่อหาความเอียงของชิ้นงาน(องศา) แล้วนำค่ามาสเตอร์ที่ได้จากการหาพิกัดและค่าองศาในครั้งแรกมาลบค่าที่ได้จากการหาพิกัดในปัจจุบันหลังจากนั้นส่งค่าที่ได้จากการลบค่าให้แขนกลติดอุปกรณ์



รูปที่ 7 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์



รูปที่ 8 ขั้นตอนการทำงานของกล้องร่วมกับหุ่นยนต์

3. การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในการทดสอบจากงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบทั้งหมดเป็น 5 ชุด ชุดละ 20 ครั้งของแต่ละหัวดูด โดยอุปกรณ์การดูดวัตถุบนหัวกับเปอร์ของหุ่นยนต์มีทั้งหมด 4 หัวดูด โดยจะเก็บค่า x , y , u ที่ได้จากการถ่ายในแต่ละหัวดูด เก็บค่าชดเชยที่ได้จากการนำค่ามาสเตอร์ที่ถ่ายได้ในครั้งแรกแล้วนำมาลบกับค่าที่ถ่ายได้ของแต่ละครั้งในทุกๆ ครั้งและนำค่าที่ได้จากการหาค่าชดเชยมารวมกับค่าเป้าหมายที่จะนำวัสดุไปวางในแต่ละ

ตำแหน่งของแต่ละหัวดูด เพื่อที่จะได้ค่าที่ต้องนำวัสดุ นั้นไปวางในจุดที่วางวัสดุอย่างถูกต้อง

3.1 ผลการทดสอบ

จากตารางที่ 1 จะแสดงค่ามาสเตอร์ที่ได้จากการถ่ายจากกล้องของแต่ละหัวดูดในครั้งแรกเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบในการชดเชยค่า เพื่อที่จะได้นำวัสดุไปวางยังตำแหน่งที่ถูกต้อง

โดยที่

x คือ ค่าตำแหน่งของวัตถุในแนวแกนเอ็กซ์ (mm.)

y คือ ค่าตำแหน่งของวัตถุในแนวแกนวาย (mm.)

u คือ ค่าตำแหน่งมุมของวัตถุมีหน่วยเป็นองศา

ตารางที่ 2 จะแสดงค่าในการถ่ายเฉลี่ยของในแต่ละรอบจากจำนวนการหยิบวัสดุในแต่ละหัวดูด หัวดูดละ 20 รอบการทดลอง ในแต่ละรอบของการดูดวัสดุนั้นเป็นการ ดูวัสดุในตำแหน่งที่ต่างกันทุกครั้งและเมื่อแต่ละหัวดูด ได้ดูดวัสดุของแต่ละหัวจนครบ 20 รอบได้ทำการเปลี่ยนชุดวัสดุใหม่ทุกรอบจนครบทั้งหมด 5 รอบรวมแล้วจะได้ค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 2

และจากตารางที่ 3 ค่าชดเชยของ x , y , u ในแต่ละครั้งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ค่าชดเชย} = \text{ค่ามาสเตอร์} - \text{ค่าที่ถ่ายปัจจุบัน} \quad (1)$$

จากตารางที่ 4 เป็นค่ามาสเตอร์ที่ใช้ในการอ้างอิงในตำแหน่งของจุดวาง โดยยังไม่ได้รวมค่าชดเชย

จากตารางที่ 5 เป็นการค่าเฉลี่ยรวมที่ได้จากการวางในแต่ละรอบ รอบละ 20 ครั้งจำนวน 5 รอบ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ตำแหน่งวาง} = \text{ค่ามาสเตอร์เป้าหมาย} + \text{ค่าชดเชย} \quad (2)$$

ตารางที่ 1 ตารางค่ามาตรฐานที่ได้จากการถ่ายครั้งแรก

ค่ามาตรฐานที่ถ่ายครั้งแรกหัวคุดที่ 1			ค่ามาตรฐานที่ถ่ายครั้งแรกหัวคุดที่ 2		
x	y	u	x	y	u
-247.54201	173.0878	101.115	-246.5204	153.5028	99.355
ค่ามาตรฐานที่ถ่ายครั้งแรกหัวคุดที่ 3			ค่ามาตรฐานที่ถ่ายครั้งแรกหัวคุดที่ 4		
x	y	u	x	y	u
-264.96	151.7565	90.337	-265.29219	172.9602	89.47798

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยรวมของการถ่ายได้ในแต่ละรอบ

ค่าเฉลี่ย	ตำแหน่งที่ถ่ายหัวคุดที่ 1			ตำแหน่งที่ถ่ายหัวคุดที่ 2		
	x	y	u	x	y	u
1	-249.2555	175.7101	90.7228	-248.5844	153.456	99.3551
2	-248.7369	174.7834	95.7913	-245.8095	153.2083	105.5173
3	-249.5206	174.53975	99.2785	-246.1486	152.8189	110.2642
4	-248.4693	174.8687	101.988	-247.7902	153.09	100.4776
5	-248.9224	174.6308	97.4787	-247.5836	153.4218	101.2137
ค่าเฉลี่ย	ตำแหน่งที่ถ่ายหัวคุดที่ 3			ตำแหน่งที่ถ่ายหัวคุดที่ 4		
	x	y	u	x	y	u
1	-268.4332	151.9068	98.6453	-269.0144	172.872	91.8497
2	-268.9667	151.3395	90.1033	-268.7493	173.0852	87.7516
3	-265.9509	150.0745	95.4106	-267.0287	172.1897	95.7233
4	-269.4187	151.1055	89.1626	-268.4659	173.2976	95.3173
5	-269.251	151.2517	91.8429	-268.3259	172.262	91.0159

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยขดเชยของหัวคูคในแต่ละรอบของการทดลอง

ค่าเฉลี่ย	ค่าชดเชยหัวคูคที่ 1			ค่าชดเชยหัวคูคที่ 2		
	x	y	u	x	y	u
1	1.71346	-2.622	10.3922	2.0643	0.0472	-0.003
2	1.1949	-1.6955	5.3236	-0.7105	0.2947	-6.1623
3	1.9786	-1.4517	1.8364	-0.3713	0.684	-10.9091
4	0.9272	-1.7806	-0.873	1.2702	0.4129	-1.1227
5	1.3803	-1.5428	3.6362	1.0636	0.0812	-1.8588
ค่าเฉลี่ย	ค่าชดเชยหัวคูคที่ 3			ค่าชดเชยหัวคูคที่ 4		
	x	y	u	x	y	u
1	3.4732	-0.1498	-8.3081	3.7224	0.088	-2.3717
2	4.0066	0.4176	0.2336	3.4572	-0.12529	1.72639
3	0.99096	1.6826	-5.1407	1.7367	0.7703	-6.24536
4	4.4586	0.6516	1.1743	3.17388	-0.33762	-5.8393
5	4.2909	0.5053	-1.5059	3.0339	0.6979	-1.5379

ตารางที่ 4 ตารางค่ามาตรฐานเป้าหมายในการวาง

ค่ามาตรฐานเป้าหมายหัวคูคที่ 1			ค่ามาตรฐานเป้าหมายหัวคูคที่ 2		
X	y	u	x	y	u
404.841	419.268	-181.646	402.525	358.63	-177.735
ค่ามาตรฐานเป้าหมายหัวคูคที่ 3			ค่ามาตรฐานเป้าหมายหัวคูคที่ 4		
X	y	u	x	y	u
297.508	356.417	-180.751	297.436	417.098	-180.421

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวางของแต่ละหัวคุด

ค่าเฉลี่ย	ตำแหน่งวางหัวคุดที่ 1			ตำแหน่งวางหัวคุดที่ 2		
	x	y	u	x	y	u
1	406.5544	416.6459	-171.2538	404.5895	358.6772	-177.7351
2	406.0359	417.5725	-176.3224	401.8144	358.9246	-183.8974
3	406.8196	417.8163	-179.8094	402.1536	359.31405	-188.6442
4	405.7683	417.4872	-182.5905	403.7953	359.04295	-178.8577
5	406.2214	417.7252	-178.0097	403.5886	358.7112	-179.594
ค่าเฉลี่ย	ตำแหน่งวางหัวคุดที่ 3			ตำแหน่งวางหัวคุดที่ 4		
	x	y	u	x	y	u
1	300.9821	356.2471	-189.0592	301.1584	417.1869	-182.7937
2	301.5157	356.8145	-180.5174	300.8933	416.9738	-178.6957
3	298.5	358.0795	-185.8247	299.1728	417.8693	-186.6674
4	301.9677	357.0486	-179.5766	300.6098	416.7614	-186.2613
5	301.8	356.9023	-182.2569	300.47	417.7969	-181.9599

ตารางที่ 6 ตารางแสดงตำแหน่งวางวัตถุครั้งแรก

ค่ามาตรฐานวางวัตถุครั้งแรกหัวคุดที่ 1			ค่ามาตรฐานวางวัตถุครั้งแรกหัวคุดที่ 2		
X	y	u	x	y	u
406.372	416.253	-172.148	404.294	358.841	-177.852
ค่ามาตรฐานวางวัตถุครั้งแรกหัวคุดที่ 3			ค่ามาตรฐานวางวัตถุครั้งแรกหัวคุดที่ 4		
X	y	u	x	y	u
300.614	356.509	-191.377	301.782	417.839	-184.637

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแต่ละหัวดูด

รอบที่	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหัวดูดที่ 1			ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหัวดูดที่ 2		
	x	y	u	x	y	u
1	0.0449	0.09438	0.51932	0.07309	0.04561	0.065785
2	0.0827	0.317	2.4246	0.61331	0.02332	3.3988
3	0.1101	0.3755	4.4502	0.5294	0.13184	6.0679
4	0.1485	0.2965	6.06629	0.1233	0.05629	0.5656
5	0.037	0.35367	3.4052	0.17447	0.0361	0.97946
ค่าเฉลี่ย	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหัวดูดที่ 3			ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหัวดูดที่ 4		
	x	y	u	x	y	u
1	0.12248	0.07343	1.2112	0.20663	0.156	0.99817
2	0.29995	0.08569	5.6746	0.29448	0.207	3.21766
3	0.70322	0.440521	2.9125	0.86459	0.00725	1.09945
4	0.4503	0.15135	6.16584	0.38839	0.2578	0.87956
5	0.39455	0.11031	4.76546	0.43475	0.01	1.4498

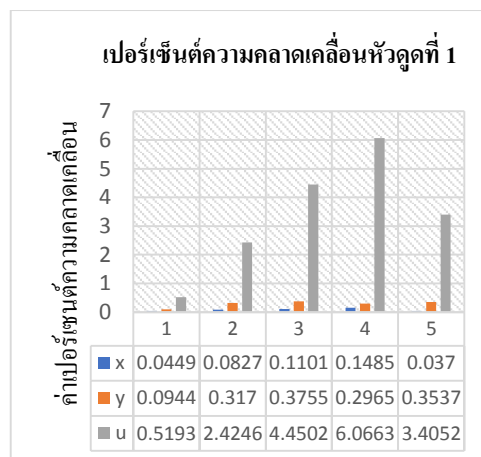
การหาค่าความคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Error} = \left\{ \left| \frac{X_{\text{mea}} - X_t}{X_t} \right| \right\} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ X_t คือ ค่าจริง

X_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการวัด

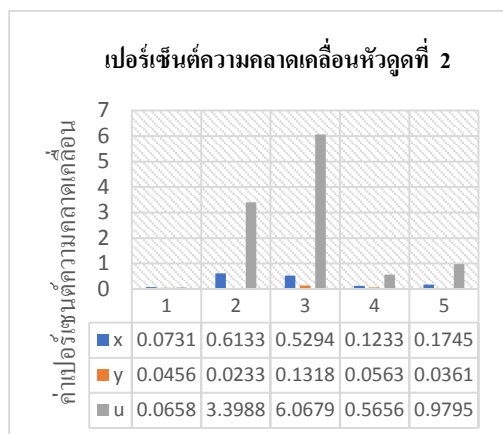
จากกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบในแต่ละรอบของการทดลองที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดวางมาตรฐาน ของแต่ละหัวดูด โดยสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนของแกน x สีส้มแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแกน y และสีเทาแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของแกน u



รูปที่ 9 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 1

จากรูปที่ 9 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y มีความคลาดเคลื่อนรองลงมา และในแนวแกน u หรือจุดหมุน(องศา) มี

ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะเห็นได้ว่าการทดลองรอบที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และในการทดลองที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด

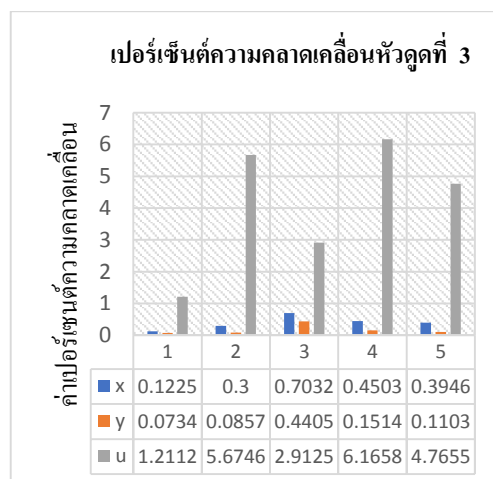


รูปที่ 10 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 2

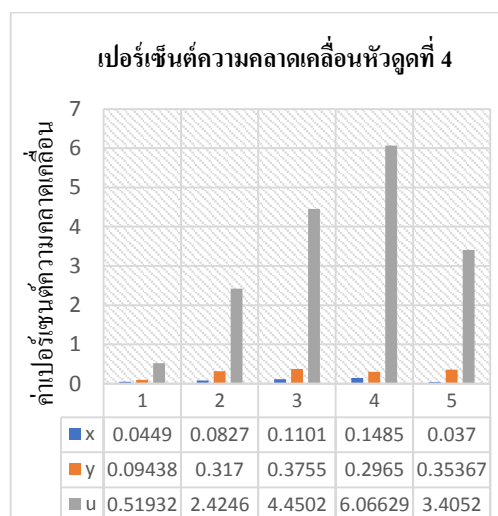
จากรูปที่ 10 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x มีความคลาดเคลื่อนรองลงมา และในแนวแกน u หรือจุดหมุน(องศา) มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะเห็นได้ว่าการทดลองรอบที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และในการทดลองที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด

จากรูปที่ 11 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x มีความคลาดเคลื่อนรองลงมา และในแนวแกน u หรือจุดหมุน(องศา) มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะเห็นได้ว่าการทดลองรอบ

ที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และในการทดลองที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด



รูปที่ 11 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 3



รูปที่ 12 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 4

จากรูปที่ 12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของหัวดูดที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x มีความคลาดเคลื่อนรองลงมา และในแนวแกน u หรือจุดหมุน(องศา) มี

ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะเห็นได้ว่าการทดลองรอบที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และในการทดลองที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีผลมาจากการฝึกชิ้นงานให้หุ่นยนต์หยิบจับ แสงไฟ การโค้งงอของวัสดุที่หุ่นยนต์หยิบจับ ขนาดของหัวดูด และขนาดของวัสดุ โดยผู้วิจัยได้วางแผนสำหรับพัฒนางานวิจัยต่อไป

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำหุ่นยนต์ที่นำมาใช้ในงาน ร่วมกับการทำงานโดยใช้กล้องร่วมในการทำงานเพื่อเป็นหุ่นยนต์ต้นแบบในการทำงานเฉพาะงาน โดยได้ทดลองใช้แล้วบันทึกผลการทดลอง บันทึกค่าความคลาดเคลื่อน ทดสอบประสิทธิภาพและคุณภาพในการทำงาน ซึ่งทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิดของตัวหุ่นยนต์ เวลาที่ได้จากการทำงานคุณภาพของฟีดเดอร์ในการฝึกชิ้นงานให้หุ่นยนต์หยิบจับ แสงไฟ การโค้งงอของวัสดุที่หุ่นยนต์หยิบจับและอีกหลายๆ ปัจจัยทำให้การอ่านค่าจากกล้อง ซึ่งมีผลโดยตรงและเป็นสาเหตุที่ทำให้กล้องอ่านค่ามาเพื่อชดเชยไปยังจุดวางไม่เท่ากัน ผลจากการเปรียบเทียบกับการทำงานแบบเดิม โดยทำเครื่องหมายติดลงไปที่เป็นหมยพบว่าตัวหุ่นยนต์สามารถทำงานได้แม่นยำกว่า และยังสามารถทำงานต่อเนื่อง ซึ่งเป็นจุดคุ้มทุนในการทำงานในระยะยาว และสามารถเพิ่มจำนวนการผลิตได้ตามต้องการได้ในเวลาที่กำหนดและจำนวนการผลิตค่อนข้างคงที่

สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อสามารถทำได้โดยทำการทดสอบความละเอียดของกล้องที่ความละเอียดต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบการมองเห็นอัตโนมัติโดยนำค่าความ

ละเอียดกล้องในพิกเซลที่แตกต่างกันมาทดสอบเปรียบเทียบว่าส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด รวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่ไม่อ่อนหรือโค้งงอจนเกินไป การสร้างหัวดูดจับที่มีความพอดีกับตัวของวัสดุ หรือมีความเหมาะสมในการดูดวัสดุ ก็จะทำให้มีข้อมูลอ้างอิงจำนวนมากขึ้น มีกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น และยังสามารถทำการวิเคราะห์ตำแหน่งของการวางชิ้นงานในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท แคล-คอมพีโอเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนข้อมูลวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.Q. Chen, Y.L. Murphey, J.X. Zhang, and Y.N. Zhou, A Smart Machine Vision System for PCB Inspection, IEA/AIE, 2001.
- [2] N. Prommarak and K. Chamniprasart, "Damage Screw Inspection Computer Vision Prototype Machine," Proceeding of International Conference on Data Storage Technology (DSTCON), Vol. 1, pp. 1-6, 2010.
- [3] H. Guo-Shing, L. Hsiung-Cheng and C. Po-Cheng, "Robotic arm grasping and placing using edge visual detection system," Proceeding of 8th Asian Control Conference (ASCC), Vol. 2, pp. 960-964, 2011.
- [4] J. Varagul, and K. Chamniprasart, "Development of automated visual inspection machine for HDD manufacturing process,"

Proceeding of International Conference on Data Storage Technology (DSTCON), Vol. 1, pp. 26-31, 2010.

- [5] P. Nerakae, P. Uangpairoj and K. Chamniprasart, "Prototyping of flexible manufacturing system with machine vision," ESIT: 2016, pp. 113-117, 2016.
- [6] S. K. Sahoo and B.B. Choudhury, "A robotic assistance machine vision technique for an effective inspection and analysis," Proceeding of International Conference on Data Storage Technology (DSTCON), Vol. 1, pp. 1-6, 2010.
- [7] N. Kulkana, Manual Auto Sponge Robotic and Calibration Automation, Calcom Electronics Co. Ltd., pp. 42-68, 2019.
- [8] N. Nakazawa, I.H. Kim, H. Inooka and R. Ikeura, "Force control of a robot hand emulating human's grasping motion," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 10, pp. 774-779, 1999.
- [9] E. Ottaviano, M. Toti and M. Ceccarelli, "Grasp force control in two-finger grippers with pneumatic actuation," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 10, pp. 1976-1981, 2000.
- [10] "Construction of PLC" [Online]. Available: <http://www.star-circuit.com/article/PLC.html>.
- [11] S.M. Kim, S.C. Lee and Y.C. Lee, System for SMT Assembly Vision Based Automatic, Inspection System for Computers & Industrial Engineering 40, pp.175-190, 2006.
- [12] B. V. Adorno, P. Fraisse, and S. Druon, "Dual position control strategies using the cooperative dual task-space framework,"

Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 3955-3960, 2010.

ประวัติผู้ประพันธ์



บุญเลิศ สือเคย

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้อำนวยการ
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



ณพงษ์ กุลคณา

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกร
ไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ



มณฑล สีสานจินดาไกรฤกษ์

จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (D. Eng.)
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

A Short Review on the Utilization of Sugarcane Bagasse Ash in the Manufacture of Concrete Block in Thailand

Kultida Bunjongsiri¹, Boonchai Chearnkiatpradab² and Jirat Bunjongsiri²

¹School of Health Science, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi, Thailand

²Faculty of Engineering, Southeast Asia University, Bangkok, Thailand
Corresponding author: Jiratb @gmail.com

Received :17 September 2020 /Revised 1st.6 October 2020 /Accepted : 4 November 2020

Abstract This paper presents the use of sugarcane bagasse ash (SCBA) as a pozzolanic material for producing concrete block in Thailand. Sugarcane bagasse ash is a silica rich material that can play the role of an effective pozzolan leading to enhance pozzolanic reactions resulting in better performance of building materials. The literature review reveals that it has been utilized in the manufacture of concrete blocks as well as tiles in form of an auxiliary additive as well as a primary stabilizer. However, the use of concrete block has been more popular compared to sintered blocks due to higher energy consumption in the latter. To summarize, sugarcane bagasse ash not only has improved capability of concrete block in most of the cases but also has lowered the cost of the materials, leading to the conclusion that it's a sustain and profoundly productive responsiveness for waste management as well as cost economy.

Keywords: Sugarcane Bagasse Ash, pozzolanic, concrete block, Thailand

1. Introduction

The demand for construction materials has been continuously growing with the increasing consumption in buildings, both in rural and urban areas. It has been clearly seen that traditional materials that are being used are still very popular. However, due to the limitation of natural resources such as soils with high clay contents, limestone, marble, granite, sandstone and other durable rocks, it has become necessary to think over this problem seriously and to provide some sustainable solutions to make the alternative

materials available. Consequently, the use of an alternative and cheaper building material to replace the ones being traditionally used may facilitate solving the problems relating to building materials [1]. Many researchers from various countries have made experimentation in utilizing the sugarcane bagasse ash (SCBA) as a partial replacement materials in concrete mostly replacing cement and fine aggregate [2]. Sugarcane bagasse ash is a byproduct of sugar factories found after burning sugarcane bagasse which is found after the extraction of all economical sugar from

sugarcane [3]. Bagasse ash consists of both bottom ash collected from the boilers and fly ash collected from the gas washers. The ashes are composed of both organic and inorganic fractions but fly ash consists of more organic content compared to bottom ash [4]. Approximately more than 200,000 tons of bagasse ash are produced every year in Thailand. The major advantages of the bagasse ash is that it is cheaper to produce and ready to use because it is produced by the existing facilities [5]. Thailand produced 130 million tons of sugarcane in the year 2017-18, which was about 30% higher than the previous time [6]. Sugarcane bagasse ash is one such solid waste generated in huge quantities in Thailand, a leading sugar producer. Presently, Thai sugar production heavily relies on export - as high as 70-75% of total domestic sugar output with the capacity of 105.96 tons of sugarcane or equivalent to sugar output of 11.34 million tons [7]. Thailand is one of the leading producers of sugar. The bagasse ash waste is generated in huge quantities in the country leading to potential disposal problems without effective management techniques. However, the economic importance of this solid waste has been realized with several applications like sealing materials, pozzolanic material, blocks and soil amendment. There is only limited research available on the utilization of SCBA as cement replacement material in concrete as compared to other popular pozzolans. In this study, a short review on the use of sugarcane bagasse ash in the

manufacture of concrete block in Thailand was conducted.

2. Sugarcane Bagasse Ash

Sugarcane bagasse ash (SCBA) is a solid waste generated from the sugar manufacturing industry. The sugar manufacturing process generates sugarcane trash, bagasse, bagasse fly ash, press mud, and spent wash [8, 9]. The economic wastes are bagasse, molasses, and filter press mud [10]. Sugar cane is typically used to produce sugar and ethanol. Bagasse is commonly used as a fuel in cogeneration to produce steam and generate electricity. In this process, SCBA remains as the final waste in the sugar production chain. Each ton of burnt bagasse may generate 25-40 kg of bagasse ash [11] and, subsequently, a considerable amount of SCBA could be generated. With the increasing demand for more sugar and ethanol production in recent years, SCBA outputs have substantially increased.

Around the world, approximately 1,500 Mt of sugarcane is annually produced, which yields approximately 40-45% bagasse after juice extraction in sugar mills [12]. In many of sugarcane industries, the bagasse generated is usually used as fuel while also reducing its volume for disposal. These residual ashes generated from burning or incineration are called bagasse ashes inclusive of both bottom and fly ashes. In most modern plants, the bottom ash gets mixed with fly ash in the water channel that comes from the gas washer [13]. This waste is typically disposed into sumps and is also applied on land as soil

amendment in some purposes [8]. It was widely recommended to consider bagasse ash as a nonhazardous waste material. However SCBA is an agro-industrial residue available in many countries, and it was proved by previous comprehensive studies that its use generally improves the behavior of the cementitious construction materials [14]. SCBA has been incorporated into concrete as a pozzolanic material, such as conventional concrete [15, 16], high-performance concrete [17], self-compacting concrete [18, 19], and recycled aggregate concrete [20]. However, being nonhazardous does not exactly mean it has actually no impact on the environment. SCBA is generally used as a fertilizer or is disposed of in landfills, which has led to

3. Chemical composition of bagasse ash

The chemical composition of bagasse ash reveals that it consists of silica, alumina, and iron oxide etc. In Thailand, the chemical composition of bagasse ash reported by various researchers has been compiled in Table 1. It can be seen that the major component of the chemical composition of bagasse ash is silica. Alumina and calcium, though significantly lesser when compared to silica, together make up a major portion of bagasse ash composition, which contribute to pozzolanic reaction.

However, the pozzolanic activity of bagasse ash depends on calcination temperature of the ash [22, 23]. According to Cordeiro et al., 600°C for three hours is the optimal calcination condition for achieving ash of high pozzolanic activity [22]. According to ASTM C618 [24], the minimum requirement of silica, alumina, and iron oxide for natural pozzolans is 70%.

intensified environmental concerns [21]. Fig 1 shows the sugarcane bagasse ash after passing through 300 μm sieve.



Fig.1 sugarcane bagasse ash after passing through 300 μm sieve

It can be seen that, in almost all of the studies reported in Table1, bagasse ash meets this requirement. Another requirement for natural pozzolan is that SO_3 content should be less than 4%. This criterion is also met by almost all the studies for which SO_3 data has been reported. However, Pourkhorshidi et al. reported that pozzolanic performance evaluated based on ASTM C618 showed disparities when compared to actual pozzolanic performance [25]. Mineralogical characterization has indicated that bagasse ash is outstandingly composed of quartz and cristobalite, both of which are silica minerals, followed by calcite which is agreed upon by most of the researchers.

4. Bagasse ash research in Thailand

A number of researchers have worked on the compressive strength and water absorption of the concrete blocks. However, concrete blocks have been known to be less durable. Hence, durability of concrete blocks is an important aspect that

needs to be focused upon to increase the acceptability of concrete blocks in practice. The themes analyzed in the bagasse ash literature are listed in Table 2.

In 2006, S. Dumrongsil and Thepwong R. [26] studied the strength and microstructure of cement mixed with bagasse ash and fly ash in order to develop the bagasse ash as a construction material. They used the ratio of cement mixed with bagasse ash and fly ash as 70:30:10 by weight, respectively. The result showed that the strength of cement mixed with bagasse ash and fly ash was comparable to the Portland cement. It can be used as a construction material.

S. Suvimol and C. Daungruedee (2008) [28] reported the potential as cementitious material of grinding bagasse ash. Ashes from two different sources were studied for chemical composition and basic performance. Then, the ash from the major source was investigated in detail and used as cement replacement in the range of 20 - 40%. A slight difference in chemical composition of ashes from two sources was found, however, pozzolanic reactivity of both sources corresponded with ASTM suggestion limit.

Table 1: Chemical composition of bagasse ash from various researchers.

Author(s)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SO ₃	LOI
S. Dumrongsil & Thepwong R. (2006) [26]	76.6	3.1	1.9	1.3	DNR	DNR	DNR	DNR	1.6	8.9
Dumrongsil, S. & Sujjavanich S. (2007) [27]	70.6	3.8	2.8	0.7	DNR	DNR	DNR	DNR	0.2	15.4
Suvimol, S. and C. Daungruedee (2008) [28]	83.27	2.7	7.27	2.85	DNR	DNR	DNR	DNR	0.31	9
Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009) [29]	64.88	6.40	10.69	2.63	DNR	1.55	DNR	DNR	1.56	8.16
Worathanakul, P. et al. (2009) [30]	75.14	0.61	16.14	1.41	0.90	DNR	1.2	DNR	3.74	DNR
Somna, R. & Jaturapitakkul C. (2011) [31]	55.0	5.1	11.0	4.1	1.2	0.9	DNR	0.2	2.2	19.6

Muangtong, P. et al. (2013) [32]	64.11	5.26	5.75	2.78	2.59	1.28	1.37	0.32	0.41	15.09
Tonnayopas, D. (2013) [33]	38.31	2.84	10.76	3.36	1.77	0.94	0.90	DNR	0.45	40.21
Patel, J. A., & Raijiwala, D. (2015) [34]	68.42	5.81	2.56	0.218	DNR	0.57	1.28	DNR	4.33	15.90
San, E. E., & Phueakphum, D. (2017) [35]	76.82	6.25	2.78	6.28	3.25	1.99	DNR	1.91	0.72	DNR
Janbuala S. & Wasanapiarnpong T. (2017) [36]	58.0	2.10	4.01	1.30	4.21	1.25	3.31	DNR	DNR	14.5

Table 2: Thematic analysis of some literature on bagasse ash in Thailand.

Author(s)	High-performance concrete	Heat evolution	Recycled aggregate concrete	Strength of cement mixed	Silica source extracted
S. Dumrongsil and Thepwoong R. (2006) [26]			✓	✓	
Dumrongsil, S. & Sujjavanich S. (2007) [27]			✓	✓	
Suvimol, S. and C. Daungruedee (2008) [28]			✓	✓	
Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009) [29]	✓	✓		✓	
Worathanakul, P. et al. (2009) [30]		✓			✓
Somna, R. & Jaturapitakkul C. (2011) [31]			✓	✓	
Muangtong, P. et al. (2013) [32]			✓	✓	

Tonnayopas, D. (2013) [33]		✓	✓	✓	
San, E. E., & Phueakphum, D. (2017) [35]	✓			✓	
Janbuala S. & Wasanapiarnpong T. (2017) [36]		✓		✓	

Detailed investigation suggested that the coarsest yielded pozzolanic reactivity of about 84-87% while of the fine ash ranged between 99-108%. For low cost material, there was a potential of cement replacement between 30 % and 40%.

Chusilp, N. et al. (2009) [29] studied the physical properties of concrete containing ground bagasse ash (BA) including compressive strength, water permeability, and heat evolution. The process started with preparing bagasse ash from a sugar factory, then used as a replacement for Type I Portland cement at 10, 20, and 30 wt% of binder. The results showed that, at the age of 28 days, the concrete samples containing 10-30% ground bagasse ash by weight of binder had greater compressive strengths, while the water permeability was lower than the control concrete. Concrete containing 20% ground bagasse ash had the highest compressive strength at 113% of the control concrete. The water permeability of concrete decreased as the fractional replacement of ground bagasse ash was increased. For the heat evolution, the maximum temperature rise of concrete containing ground bagasse ash was lower than the control concrete. It was also found that the maximum temperature rise of the concrete was reduced up to 33% as compared with the control concrete when the cement was replaced by ground bagasse

ash. The results indicated that ground bagasse ash can be used as a pozzolanic material in concrete with an acceptable strength, lower heat evolution, and reduced water permeability with respect to the control concrete.

Worathanakul, P. et al. (2009) [30] found that silica had been successfully extracted from bagasse ash. They reported a mass composition from XRF, XRD spectrum peak, morphology and chemical bonding. The synthesis conditions were optimized to obtain the bagasse ash with the maximum silica content. The silica content of 91.57 percent was achieved from heating of bagasse ash at 600°C for 3 hours under oxygen feeding and HCl treatment. The result can be used as value added for bagasse ash utilization and minimize the environmental impact of disposal problems.

Muangtong, P. et al. (2013) [32] investigated the appropriate ratio of replacing clinker by SCBA to produce the cement and w/c ratio of the resultant cement. The result confirmed that replacing clinker with 20% SCBA was appropriate for production in laboratory scale and w/c ratio of 0.735 was suitable on workability of the resultant cement. It presented the highest compressive strength comparing to all ratios (0-40% SCBA) of resultant cements and near that of commercial cement. The

appropriate w/c ratio was 0.735:1 for good mortar flow ($110\pm5\%$) at 80 % cement and 20% SCBA. It was ensured that increasing amount of SCBA influenced the increase of w/c ratio. Moreover, this cement mixture was possible for cement preparation in laboratory and would lead to industrial production in the future.

Sua-iama, G. and Makul N. (2013) [19] examined the effect of adding limestone powder to self- compacting concrete mixtures in which large amount of bagasse ash was employed as a fine aggregate replacement. A Type 1 Portland cement content of 550 kg/m³ was kept in all samples. The fine aggregate was replaced with 10, 20, 40, 60, 80, and 100% bagasse ash and limestone powder by volume. Mixtures were designed to yield a slump flow diameter of 70 ± 2.5 cm. The workability (slump flow, T50cm slump flow time, V-funnel flow time, and J-ring flow) and hardened properties (ultrasonic pulse velocity and compressive strength) of each mixture were collected, and blocking assessments were performed. The volumetric percentage replacement of 20% limestone powder in fine aggregate incorporating 20% bagasse ash effectively enhanced the workability and hardened properties of self-compacting concrete.

P. Promsawat and B. Chatveera. (2017) [37] studied flow loss of self-leveling mortar by using bagasse ash and fly ash from power plant as pozzolanic. Bagasse ash and fly ash were used to replace Portland cement at 10, 15 and 20% by weight of binder. Flow characteristic and 28-days compressive strength were examined. The results demonstrated that flow loss of mortar was increased when increasing the

bagasse ash. Conversely, it decreased with the increasing of fly ash replacement due to the improvement of flow characteristics of fly ash. Finally, fly ash had negative effect on setting time and compressive strength of self-leveling mortar because of incomplete hydration reaction.

San, E. E., & Phueakphum, D. (2017) [35] investigated the utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) mixed with Portland cement, bentonite and crushed salt as sealing materials to reduce the subsidence in salt and potash mine. The ratio of SCBA-to- cement (cementitious materials) was 20:80 by weight and bentonite-to-crushed salt (bentonite crushed salt mixture) was 30: 70 by weight. The mixture ratio of cementitious materials to bentonite-crushed salt was 1:2 (CPB-1) and 1:3 (CPB-2). The constant saturated brine-to-mixed materials ratio of 0.4 was used for blending. The uniaxial compressive strength (UCS) test, triaxial compression (TRI) test and Brazilian tensile strength (BZ) test were performed for each curing period of 3, 7, 14 and 28 days. The test results were used in FLAC program to simulate the time dependent behaviors of salt and potash mine with sealing materials. The results clearly showed that CPB- 1 mixture can produce more strength than CPB- 2 mixture. From the numerical analysis, the result obtained from the mine opening with the CPB-2 sealing can reduce the magnitude of subsidence about 46% as compared with that without backfills.

Vimuttasoongviriya (2017) [38] studied the behavior of bagasse ash with cement and fine stone (BCS) in terms of density, absorption and compressive strength, respectively. Three experimental groups - general cement with fine stone,

BCS in non-compressive mold and BCS in compressive mold - were used in this study. The test results showed that the density decreased as fine sand mixed increased. The specimens without fine stone had maximum water absorption. Moreover, BCS in compressive mold had higher water absorption than BCS in non-compressive mold. In case of compressive strength, most of experimental groups were higher than 25 kg/cm² as the non-bearing interlocking block standard. However, the compressive strength of the specimen increased while the bagasse ash decreased.

Many researchers have intended to characterize bagasse ash and have more or less concluded that it is a waste material that is rich in silica and can contribute to pozzolanic reactions due to the high amount of silica, alumina, and iron oxide present in it, a requirement stipulated by ASTM for natural pozzolans. The pozzolanic activity of the ash depends on the amorphous silica rather than crystalline silica, which is dependent on the calcination temperature of the ash. Preparation of the ash by sieving can grind its particle size and, thus, enhance its reactivity. Microstructure of bagasse ash from various sources reveals both crystalline forms and individual fibers with pores, which corresponds with the fact that bagasse ash consists of both organic and inorganic crystalline fractions.

5. Conclusions

The paper aims to give an overview of the characterization and utilization of bagasse ash in manufacture of stabilized concrete blocks in Thailand. Based on the literature review that concentrates on the utilization of bagasse ash in the manufacture of concrete blocks, the following points can be concluded:

(a) Bagasse ash utilization in soil engineering activities has increased in recent years with it gaining prominence in stabilized concrete blocks. The utilization of bagasse ash in concrete blocks has been adopted in two modes as auxiliary additive/replacement to primary stabilizers like lime or cement or as additive to soil in the manufacture of concrete blocks. The common tests adopted in investigations dealing with stabilized concrete blocks include compressive strength, water absorption, and to a lesser extent efflorescence of blocks.

(b) The literature shows that addition of bagasse ash results in an improvement in the strength of stabilized blocks in most of the cases. Addition of bagasse ash to cement as auxiliary additive results in an enhanced performance of the concrete blocks. However, it has been reported that bagasse ash performs better at lower cement contents when compared to higher cement contents. When bagasse ash is added as standalone stabilizer in manufacture of blocks, it results in an improved performance when compared to unstabilized blocks but their performance is lower when compared to cement/lime stabilized blocks amended with bagasse ash. Practically, most of the investigations reported the increase of water absorption in the stabilized blocks due to addition of bagasse ash.

(c) The utilization of bagasse ash has been found to reduce cost either in saving virgin material when adopted in concrete blocks or in the form of savings due to process optimization in the case of sintered tiles or blocks.

Hence, it can be summarized that bagasse ash is actually silica rich material that can contribute to improve the performance of stabilized soil blocks while

still having unrealized potential in further making sintered soil blocks more durable and acceptable for use in commercial applications.

6. Acknowledgment

The authors are grateful to the financial support for this research by Institute for Research and Development, Sukhothai Thammathirat Open University.

References

- [1] Ballerino, C.C., "Building Materials & Engineering Design: Low- income Housing Projects", Port Elizabeth, South Africa. 2002.
- [2] Lathamaheswari, R. , Kalaiyarasan, VandMohankumar, G., " Study on Bagasse Ash As Partial Replacement of Cement in Concrete". International Journal of Engineering Research and Development, vol.13, no.1: pp.01-06., 2017.
- [3] Hailu, B. and A. Dinku, "Application of sugarcane bagasse ash as a partial cement replacement material." Zede Journal, vol.29, no.1: pp.1-12., 2012.
- [4] Pöykiö, R. , Mänskinen, K. , Nurmesniemi, H. , & Dahl, O. " Comparison of trace elements in bottom ash and fly ash from a large-sized (77 MW) multi-fuel boiler at the power plant of a fluting board mill, Finland. " Energy exploration & exploitation, vol.29, no.3: pp.217-233., 2011.
- [5] Suliman, M.E. and S.M.F. Almola, "The use of sugarcane bagasse ash as an alternative local pozzolanic material: study of chemical composition. " Science vision, vol.16, no.17: pp.65-70., 2011.
- [6] Posttoday, " Sugarcane output in the year 2017/ 18 reached 130 million tonnes. " (2018), [Online] Available: <https://www.posttoday.com/economy/547559>.(in Thai)
- [7] Sugar Industry, " THAILAND INDUSTRY OUTLOOK 2016- 18" (2016) , [Online] Available: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/d81281c6-531f-48a0-8801-8f15c6402347/IO_Sugar_2016_EN.aspx
- [8] Balakrishnan, M. and V. Batra, "Valorization of solid waste in sugar factories with possible applications in India: A review. " Journal of Environmental Management, vol. 92, no.11: pp.2886-2891., 2011.
- [9] Partha, N. and V. Sivasubramanian, "Recovery of chemicals from pressmud- a sugar industry waste. " Indian Chemical Engineer, vol. 48, no. 3: pp.160-163., 2006.
- [10] Yadav, R.L., & Solomon, S., "Potential of developing sugarcane by- product based industries in India." Sugar Tech, vol.8, no.2-3: pp.104-111., 2006.
- [11] Sales, A. and S. A. Lima, " Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement." Waste Management, vol. 30, no. 6: pp. 1114-1122., 2010.
- [12] Shafiq, N., Hussein, A. A. E., Nuruddin, M. F., & Al Mattarneh, H. "Effects of sugarcane bagasse ash on the properties of concrete. " Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Engineering Sustainability, Thomas

- Telford Ltd. vol.171, no.3: pp.123-132., 2016.
- [13] Teixeira, S.R., et al., "Use of charcoal and partially paralyzed biomaterial in fly ash to produce briquettes: sugarcane bagasse (Chapter 8)". Alternative Fuel, InTech open access Publisher, Rijeka, Croatia., 2011.
- [14] Fairbairn, E. M. , et al. , " Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. " Journal of environmental management, vol. 91, no.9: pp.1864-1871., 2010.
- [15] Bahurudeen, A. , et al. , "Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete." Cement and Concrete Composites, vol.59: pp.77-88., 2015.
- [16] Montakarnitwong, K., et al., "Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. " Materials & Design, vol.49: pp.414-420., 2013.
- [17] Cordeiro, G. , et al. , " Experimental characterization of binary and ternary blended- cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes." Construction and Building Materials, vol.29: pp.641-646. 2012.
- [18] Akram, T. , S.A. Memon, and H. Obaid, "Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. " Construction and Building Materials, vol.23, no.2: pp.703-712., 2009.
- [19] Sua-Iam, G. and N. Makul, "Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self- compacting concrete by adding limestone powder waste." Journal of Cleaner Production, vol.57: pp.308-319., 2013.
- [20] Somna, R., et al., "Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. " *Materials & Design (1980-2015)*, vol.36: pp.597-603., 2012.
- [21] Xu, Q. , et al. , " Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials." *Materials*, vol.12, no.1: pp.39., 2019.
- [22] Cordeiro, G., R. Toledo Filho, and E. Fairbairn, " Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. " *Construction and Building Materials*, vol.23, no.10: pp.3301-3303., 2009.
- [23] Morales, E., et al., "Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA) : Influence in the pozzolanic activation." *Cement and Concrete Composites*, vol.31, no.1: pp.22-28., 2009.
- [24] ASTM, " *ASTM C 618 in Standard Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as A Mineral Admixture in Concrete.* " West Conshohocken, Penn, USA, 1999.
- [25] Pourkhorshidi, A., et al., "Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. " *Cement and Concrete Composites*, vol.32, no.10: pp. 794-800. 2010.
- [26] Dumrongsil S. and Thepwong R. , " Strength and Microstructure of Cement Blended Bagasses Ash and Fly Ash. " , Faculty of Engineering and Architecture Rajamangala University

- of Technology Rattanakosin. 2007. (in Thai)
- [27] Dumrongsil, S. and Sujjavanich S., "Effect of Cement Containing Binary Blended Bagasse Ash- Fly Ash on Physical and Mechanical Properties of Concrete. " *KMUTT Research and Development Journal*, vol.30, no.3: pp. 489-500., 2007. (in Thai)
- [28] Suvimol, S. and Daungruedee C. . " Bagasse ash: effect of pozzolanic activity and application in cement use aspect. " in proc. *The 3rd ACF international conference- ACF/ VCA Vietnam*, 11-13 November, 2008.
- [29] Chusilp, N. , Jaturapitakkul C. , and Kiattikomol K., "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete." *Construction and Building Materials*, vol.23, no.11: pp.3352-3358., 2009.
- [30] Worathanakul, P., Payubnop W., and Muangpet A. , " Characterization for post-treatment effect of bagasse ash for silica extraction." *World academy of science, Engineering and Technology*, vol.56: pp.360-362. 2009.
- [31] Somna, R. and Jaturapitakkul C., "Use of ground bagasse ash to improve compressive strength, water permeability, and chloride resistance of recycled aggregate concrete." *KMUTT Research and Development Journal*, vol.34, no.4: pp.369-382., 2011.
- [32] Muangtong, P., et al., "Effects of fine bagasse ash on the workability and compressive strength of mortars. " *Chiang Mai J. Sci*, vol.40, no.1: pp. 126-134., 2013.
- [33] Tonnayopas, D. "Green building bricks made with clays and sugar cane bagasse ash. " in Proc. *the 11th International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering*. South Africa, 27-28 November, 2013.
- [34] Patel, J.A. and Raijiwala D., "Use of Sugar Cane Bagasse Ash as Partial Replacement of Cement in Concrete - An Experimental Study." *Global Journal of Research In Engineering J General Engineering*, vol. 15, no. 5. , 2015. [Online] ISSN: 2249- 4596 Print ISSN:0975-5861
- [35] San, E.E. and Phueakphum D., "Sealing of Salt and Potash Mine using Sugarcane Bagasse Ash Mixture. " , *Engineering Journal of Research and Development*, vol.28, no.1: pp.17-30. 2017.
- [36] Janbuala S. and Wasanapiarnpong T., "The Development of Lightweight Clay Brick with Added Bagasse Ash. " *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*. vol.10, no.1: pp.13-30. 2017.
- [37] Promsawat P. and B. Chatveera, "Flow Behavior of Self - leveling Mortar Containing Bagasse Ash and Fly Ash.", *RMUTTO Journal*, vol.10, no.2: pp.52-61. 2017.
- [38] Vimuttasoongviriya C., "Bagasse Ash with Cement and Fine Stone Behavior." In Proc. *the 2nd RMU Graduate Research Conference*, Thailand, 20 January, 2017. (in Thai)

He has published more than 20 papers in Thai journals and conference papers.

Authors' biography :



Asst. Prof. Dr. Kultida Bunjongsiri is She received the B.Eng and the M. Eng degree in environmental engineering from Chulalongkorn University, Thailand in 1992 and 1997, respectively. She earned Ph.D. degrees in environmental engineering from Griffith University, Australia, in 2017. She has been promoted to be a vice-dean of School of Health Sceince, Sukhothai Thammathirat Open University in the early of 2020. Her major contribution is in occupational health & safety especially related to eco-industrial development. She has been awarded fellowship recognition of the Higher Education Academy under the UK Professional Standards Framework (UKPSF) since 2019.



Asst. Prof. Jirat Bunjongsiri is a lecturer of Department of Civil Engineering at South East Asia University. He received the B. Eng. and the M. Eng degree in civil engineering from South- East Asia University and Khonkaen University, Thailand in 1992 and 1997, respectively. He has been promoted to be a Head of department in the mid of 2020. He is working on geopolymer concrete since his masters and being associated with various research projects in the field of geopolymer concrete, cement chemistry, cementitious material, and material science.



Dr. Boonchai Chearnkiatpradab is a lecturer of Department of Civil Engineering at South East Asia University. He received his B. Eng and M. Eng. from King Mongkut' s University of Technology Thonburi in 1991 and 1997 respectively. D. Eng from Kasetsart University Thailand in 2015. He is interested in soil stabilization and soil slope failure and soil database.

วงจรรากที่สองแบบซีมอสที่ทำงานได้ 2 โหมด

Two-mode CMOS square-rooting circuits

อิทธิพงษ์ ชัยสายัณห์ และ สมเกียรติ เพียงพรานทอง
Ittipong Chaisayun and Somkiat Piangprantong

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160
ผู้พิมพ์ประสานงาน อีเมล: ittipongc@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 สิงหาคม 2563 / วันที่แก้ไขบทความ: 24 พฤศจิกายน 2563 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 27 พฤศจิกายน 2563

บทคัดย่อ บทความนี้เป็นการออกแบบวงจรรากที่สองจำนวนสองวงจรโดยใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบลบของวงจรกำลังสอง วงจรแรกรับอินพุตเป็นสัญญาณกระแสและให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณแรงดัน สองเอาต์พุตที่มีเฟสตรงข้ามกัน วงจรที่สองรับอินพุตเป็นสัญญาณกระแสและให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณกระแส ลักษณะเด่นที่สำคัญของวงจรรากที่สองทั้งสองวงจรคือ วงจรทั้งคู่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซีมอสที่สามารถทำงานได้ทั้งช่วง strong inversion เมื่อใช้ไฟเลี้ยงประมาณ $3V_T$ และ weak inversion เมื่อใช้ไฟเลี้ยงประมาณ V_T การทดสอบการทำงานของวงจรใช้โปรแกรม SPICE ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจรรากที่สอง, ซีมอสทรานซิสเตอร์, วงจรกำลังสอง

Abstract Two square-rooting circuits based on negative feedback technique are proposed. The first circuit gives two output voltage signals proportional to the square root of input current, and the second circuit gives the output current signal proportional to the square root of input current. Moreover, all CMOS transistor of both circuits can work in both saturation region at the used supply voltage of $3V_T$ and subthreshold at the used supply voltage of V_T . Simulation results by SPICE program agree well with theoretical anticipation.

Keywords: square-rooting circuit, CMOS transistor, squarer

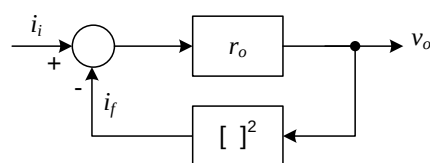
1. บทนำ

วงจรเรกที่สองเป็นวงจรหนึ่งที่ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายๆด้าน เช่นในระบบการวัด เครื่องมือวัด และระบบโครงข่ายประสาทเทียม[1] เมื่อไม่นานนี้ วงจรเรกที่สองหลายแบบที่สร้างจากอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดได้ถูกนำเสนอ เช่นวงจรเรกที่สอง[2]ที่สร้างโดยใช้โอปแอมป์ และทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ วงจรเรกที่สอง[3] ที่สร้างโดยใช้วงจรรายพานกระแสยุคที่สอง วงจรเรกที่สอง[4] ที่สร้างโดยใช้วงจรรายพานความนำ วงจรเรกที่สอง[5] สร้างโดยใช้กระแสที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจ่ายให้ออปแอมป์ วงจรเรกที่สอง[6]สร้างจากหลักการ dual slope และ วงจรเรกที่สอง[7] สร้างโดยใช้โอปแอมป์ และทรานซิสเตอร์แบบซิมอส แต่วงจรเรกที่สองทั้งหมดที่กล่าว[2-7] ไม่เหมาะสำหรับการสร้างเป็นวงจรรวมเพราะวงจรมีขนาดใหญ่ ขณะที่ความต้องการของเทคโนโลยีในปัจจุบันและในอนาคต มีความพยายามที่จะสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ประหยัดพลังงานและสามารถพกพาได้ ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์แบบซิมอสเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการออกแบบวงจร เพราะสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำได้ กินกำลังไฟต่ำ และตอบสนองความถี่ที่สูง ที่ผ่านมามีการนำเสนอวงจรเรกที่สองที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบซิมอส [8-11] แต่บางบทความยังไม่สามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำมากได้ และเมื่อเร็วนี้บทความ[12] ได้นำเสนอวงจรเรกที่สองที่ใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำมากประมาณ $2V_T$ และใช้จำนวนทรานซิสเตอร์ที่น้อย แต่มีข้อจำกัดคือวงจรดังกล่าวใช้แหล่งจ่ายกระแสที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนกับแรงดันไฟเลี้ยง ทำให้เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันไฟเลี้ยงก็ต้องปรับค่าแหล่งจ่ายกระแสใหม่ แต่ในบทความนี้ เราได้นำเสนอวงจรที่สามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงกว้างและสามารถเปลี่ยนค่าแรงดันไฟเลี้ยงได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอะไรเลย ทำให้สะดวกในการใช้งานมาก บทความนี้ได้นำเสนอวงจรเรกที่สอง

จำนวน สองวงจรที่สามารถทำงานได้ทั้งช่วง strong inversion ซึ่งใช้ไฟเลี้ยงประมาณ $3V_T$ และ weak inversion ซึ่งใช้ไฟเลี้ยงประมาณ V_T โดยที่ผ่านมาได้เคยมีการออกแบบให้วงจรทำงาน สองโหมดแบบนี้มาแล้วแต่เป็นวงจรรวมสัญญาณแบบอนาล็อก[14]

2. หลักการทำงาน

หลักการของวงจรเรกที่สองได้แสดงในบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1 ประกอบด้วยการป้อนกลับแบบลบของวงจรรำลึงสอง



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเรกที่สอง

การทำงานของวงจรเริ่มจากการเปรียบเทียบกระแสอินพุตกับกระแสป้อนกลับที่มาจากวงจรรำลึงสอง โดยผลการเปรียบเทียบจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกที่สองตามสมการที่ (1) จากนั้นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกที่สองจะเป็นอินพุตของวงจรรำลึงสองแสดงในสมการที่ (2) ซึ่งเอาต์พุตของวงจรรำลึงสองถูกนำไปป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับกระแสอินพุตของวงจรเรกที่สอง

$$v_o = (i_i - i_f)r_o \quad (1)$$

$$i_f = Kv_o^2 \quad (2)$$

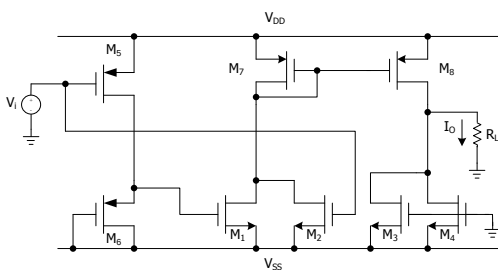
แทนสมการที่ (2) ใน (1) จะได้

$$\frac{v_o}{r_o} + Kv_o^2 = i_i \quad (3)$$

กำหนดให้ ความต้านทาน r_o ค่าสูงมากๆ ทำให้สามารถประมาณค่า $\frac{v_o}{r_o} = 0$ ดังนั้นสมการที่ (3) สามารถแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตได้เป็น

$$v_o = \sqrt{\frac{i_i}{K}} \quad (4)$$

สมการที่ (4) แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับรากที่สองของกระแสอินพุต จากรูปที่ 1 พบว่าการสร้างวงจรรอกที่สองในบทความนี้จำเป็นต้องใช้วงจรกำลังสองโดยเราได้เลือกวงจรกำลังสองในบทความ [13] มาใช้ในบทความนี้ ไม่ใช่เพราะวงจรกำลังสองนั้นเป็นวงจรที่เราเคยนำเสนอไว้แต่เป็นเพราะวงจรมีคุณสมบัติที่เราต้องการนั้นคือวงจรกำลังสองนี้มีช่วงแรงดันไฟเลี้ยงกว้าง หรือ วงจรกำลังสองนี้สามารถทำงานได้ทั้ง strong inversion ($v_{GS} > V_T$) และ weak inversion ($v_{GS} < V_T$) ซึ่งสามารถใช้ไฟเลี้ยงได้ต่ำมากประมาณ $V_T = 3V_T$ นอกจากนี้วงจรยังมีความยืดหยุ่นต่ำเพราะทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรอิสระจากผลของบอดี



รูปที่ 2 วงจรกำลังสองที่มีช่วงแรงดันไฟเลี้ยงกว้าง[13]

วงจรกำลังสองในรูปที่ 2 ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงมีค่าประมาณสามเท่าของแรงดันขีดเริ่ม ($3V_T$) จะทำให้แรงดัน v_{GS} ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าประมาณ $1.5V_T$ (เพราะใช้ทรานซิสเตอร์คู่กันสองตัวในแนวตั้ง) ทำให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วง

อิมตัวในย่าน strong inversion ซึ่งสามารถแสดงค่ากระแสเอาต์พุต (i_o) ของวงจรได้ตามบทความ [13] ดังนี้

$$i_o = Kv_i^2 \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 พบว่ากระแสเอาต์พุต (i_o) มีค่าเท่ากับกำลังสองของอินพุต (v_i) คูณกับค่าคงที่ K ในลักษณะเดียวกัน ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยงมีค่าประมาณเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม (V_T) จะทำให้แรงดัน v_{GS} ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าประมาณ $0.5V_T$ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิมตัวในย่าน weak inversion ซึ่งสามารถแสดงค่ากระแสเอาต์พุตของวงจรได้ตามบทความ [13] ดังนี้

$$i_o = \frac{I_{DO}v_i^2}{nU_T} \quad (6)$$

เมื่อ $I_{DO} = \frac{W}{L} \mu_o C_{OX} (n-1)U_T^2$ และ U_T คือแรงดันความร้อน ($26mV$ ที่อุณหภูมิห้อง) n คือ แฟคเตอร์ subthreshold slop ($1 < n < 3$)

จากสมการข้างบนจะเห็นว่ากระแสเอาต์พุต (i_o) เป็นฟังก์ชันของแรงดันอินพุตกำลังสอง วงจรกำลังสองนี้สร้างฟังก์ชันกำลังสองจากวงจรฟิโวลเรนเซียลซึ่งประกอบด้วย M1 และ M2 โดยมี ทรานซิสเตอร์ M5 และ M6 ทำหน้าที่กลับเฟสสัญญาณอินพุตเพื่อป้อนให้วงจรฟิโวลเรนเซียล และทรานซิสเตอร์ M3 และ M4 ทำหน้าที่สร้างกระแสไฟตรงเพื่อไปหักล้างเทอมกระแสไฟตรงที่วงจรฟิโวลเรนเซียลสร้างขึ้น โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสซึ่งประกอบด้วย M7 และ M8 จากวงจรที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นสามารถทำงานได้ทั้งช่วง strong inversion คือช่วงแรงดัน $v_{GS} > V_T$ และ weak

inversion คือช่วงแรงดัน $v_{GS} < V_T$ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์สามารถดูได้จากบทความ [13]

2.1 วงจรเรขาคณิตสองแบบ 2 แรงดันเอาต์พุตที่มีเฟสตรงข้ามกัน

เมื่อแทนวงจรกำลังสองในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1 ด้วยวงจรรูปที่ 2 จะได้วงจรเรขาคณิตสองแบบใหม่แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปที่ 3 กระแสอินพุตของวงจรเรขาคณิตสองแบบ ถูกเปรียบเทียบกับกระแสเอาต์พุตของวงจรดิฟเฟอเรนเชียล ผลการเปรียบเทียบกลายเป็นสัญญาณแรงดันที่ป้อนไปที่วงจรกลับเฟสสัญญาณและส่งต่อไปยังวงจรดิฟเฟอเรนเชียล เมื่อเปรียบวงจรรูปที่ 2 และ 3 เห็นว่ามีความคล้ายกันมากนั่นคือมีวงจรย่อยๆ ที่เหมือนกันแต่เปลี่ยนตำแหน่งอินพุตและเอาต์พุตและจุดต่อบางจุดในวงจรเท่านั้น ในกรณีที่ต้องการให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิมิตัวของ strong inversion แรงดันไฟเลี้ยงควรกำหนดไว้ให้มีค่า $\geq 3V_T$ เพื่อมั่นใจว่าทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิมิตัวของ strong inversion และสมการกระแสของทรานซิสเตอร์คือ

$$i_D = K(v_{GS} - V_T)^2 \quad (7)$$

$$; v_{GS} > V_T, v_{DS} \geq v_{GS} - V_T > 0$$

เมื่อ $K = \mu C_{OX} \frac{W}{L}$ คือค่าความนำของทรานซิสเตอร์ (K_N สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ NMOS และ K_P สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ PMOS), μ เป็นค่าความคล่องตัวของพาหะ C_{OX} คือค่าความจุของเกตออกไซด์ต่อพื้นที่ $\frac{W}{L}$ คือค่าความกว้างความยาวของช่องกระแส v_{GS} คือแรงดันเกต-ซอร์ส และ V_T คือแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ (V_{TN} สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ NMOS และ V_{TP} สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ PMOS) ในกรณีที่ต้องการให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิมิตัวของ weak

inversion แรงดันไฟเลี้ยงควรกำหนดไว้ให้มีค่า $\leq V_T$ เพื่อมั่นใจว่าทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในช่วงอิมิตัวของ weak inversion และสมการกระแสของทรานซิสเตอร์แสดงได้ใน (8)

$$i_D = I_{DO} \exp\left(\frac{V_{GS} - V_T}{nU_T}\right) \quad (8)$$

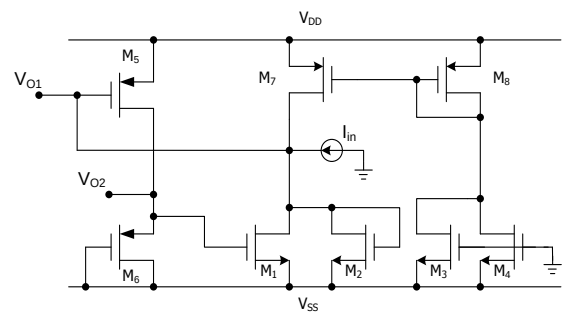
$$; v_{GS} < V_T, v_{DS} > 4U_T$$

จากอนุกรมของ Taylor ค่า e^x มีค่าเท่ากับ $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ ทำให้สมการ(8) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$i_D = I_{DO} \left(1 + \left(\frac{v_{GS} - V_T}{nU_T} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{v_{GS} - V_T}{nU_T} \right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{v_{GS} - V_T}{nU_T} \right)^3 + 1 \right) \quad (9)$$

เมื่อออกแบบให้ $v_{GS} \ll 1$ กระแสเดรนสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$i_D = I_{DO} \left(1 + \left(\frac{v_{GS} - V_T}{nU_T} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{v_{GS} - V_T}{nU_T} \right)^2 \right) \quad (10)$$



รูปที่ 3 วงจรเรขาคณิตสองแบบ 2 แรงดันเอาต์พุตที่มีเฟสตรงข้ามกัน

เนื่องจากวงจรที่นำเสนอได้ออกแบบให้ทำงานได้ทั้งช่วง strong inversion และ weak inversion ดังนั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์ห้วงจรทั้ง 2 กรณี

$$v_{o1} = \sqrt{\frac{i_{in}}{2K}} \quad (11)$$

$$V_{o1} = -\sqrt{\frac{i_{in}}{2K}} \quad (12)$$

กรณี ที่ 2 : เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกไปอัดใน weak inversion ความสัมพันธ์ของกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุต v_{o1} และ v_{o2} แสดงได้ดังนี้

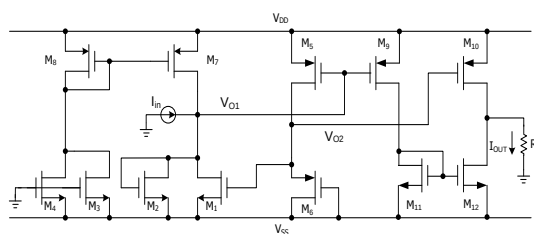
$$v_{o1} = nU_T \sqrt{\frac{i_{in}}{I_{DO}}} \quad (13)$$

$$v_{o2} = -nU_T \sqrt{\frac{i_{in}}{I_{DQ}}} \quad (14)$$

สมการ (13) และ (14) แสดงว่าแรงดันเอด์พุต v_{o1} มีค่าเท่ากับรากที่สองของกระแสอินพุต ขณะที่ v_{o2} มีค่าเท่ากับรากที่สองของกระแสอินพุตเช่นกันแต่มีค่าเป็นลบ

2.2 วงจรรากที่สองแบบกระแส

วงจรที่สองแบบกระแสนี้เป็นการพัฒนามาจากวงจรที่สองแบบ 2 แรงดันเอาต์พุตที่ผ่านมา โดยการเพิ่มวงจรแปลงแรงดันผลต่าง ($v_{o1} - v_{o2}$) เป็นกระแส i_{out} เข้าไป ทำให้วงจรได้ที่ได้นี้สามารถให้เอาต์พุตเป็นกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรรากที่สองแบบกระแส

วางจรวดแรงดันเป็นกระสวยประกอบด้วย
ทรานซิสเตอร์ M9- M12

$$i_{D10} - i_{D9} = i_{out} \quad (15)$$

กรณีที่ 1 แทนสมการ(15) ด้วยสมการ(7) (11) และ(12) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันผลต่างกับกระแสเอาต์พุตคือ

$$i_{out} = 4K_p(V_{DD} - V_{TP})v_{o1} \quad (16)$$

และความสัมพันธ์ของกระแสน้ำและเอาต์พุตคือ

$$i_{out} = K_p (V_{DD} - V_{TP}) \sqrt{\frac{8i_{in}}{K_N}} \quad (17)$$

สมการที่ (17) แสดงว่ากระแสเอาต์พุต i_{out} เป็นรากที่สองของกระแสอินพุต i_{in}

กรณี ที่ 2 แทนสมการ(15) ด้วยสมการ(10) (13) และ (14) จะได้รับความสัมพันธ์ของกระแสนิพุดและเอาต์พุต คือ

$$i_{out} = \frac{I_{DO}(V_{DD} + V_{TP} - nU_T)}{(nUT)^2} \sqrt{\frac{2i_{in}}{K_N}} \quad (18)$$

สมการที่(18) แสดงว่ากระแสเอาต์พุต i_{out} เป็นรากที่สองของกระแสอินพุต i_{in}

3. ผลการทดสอบ

วงจรที่แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ได้ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม SPICE โดยใช้แบบจำลองของ $0.25\mu\text{m}$ TSMC ที่มี $V_{TN}=0.42\text{V}$ และ $V_{TP}=0.55\text{V}$ ในการทดสอบจะออกแบบให้วงจรทำงานใน 2 กรณี กรณีที่ 1 ออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรทำงานใน strong inversion โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยง $V_{DD}=-V_{SS}=0.7\text{V}$ จะทำให้แรงดัน V_{GS} ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าประมาณ 0.7V ซึ่งมากกว่า V_{TN} และ $|V_{TP}|$ ความต้านทานโหลด $R_L=1\text{k}\Omega$ และกรณีที่ 2 ออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรทำงานใน weak inversion โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยง $V_{DD}=-V_{SS}=0.25\text{V}$ ทำให้แรงดัน V_{GS} ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าประมาณ 0.25V ซึ่งน้อยกว่า V_{TN} และ $|V_{TP}|$ ความต้านทานโหลด $R_L=1\text{M}\Omega$ ขนาดทรานซิสเตอร์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของทรานซิสเตอร์

วงจรที่แสดง แบบสองแรงดันเอาต์พุต (รูปที่ 3)		วงจรที่แสดง แบบกระแส (รูปที่ 4)	
ทรานซิสเตอร์	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	ทรานซิสเตอร์	W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
M1-M4	10/1	M1-M4	10/1
M5-M6	10/0.35	M5-M6	10/0.35
M7-M8	40/0.35	M7-M8	40/0.35
		M9-M10	40/0.7
		M11-M12	10/1

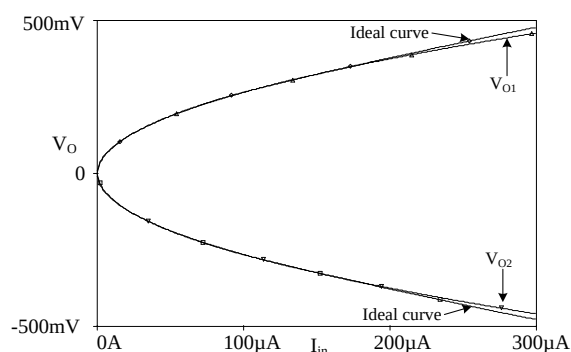
กรณีที่ 1 ออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรทำงานใน strong inversion โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยง $V_{DD}=-V_{SS}=0.7\text{V}$ คุณลักษณะสมบัติของวงจรที่แสดงแบบ 2 แรงดันเอาต์พุต (รูปที่ 3) แสดงในรูปที่ 5 โดยผลลัพธ์ของวงจรถูกเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีเท่ากับ $\pm 26.5\sqrt{i_{in}}$ เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ $0.1\mu\text{A}$ ถึง $300\mu\text{A}$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$(\%error) = \left| \frac{X_i - X_s}{X_i} \right| \times 100\%, \quad X_i \text{ ค่าทฤษฎี } X_s \text{ ค่า}$$

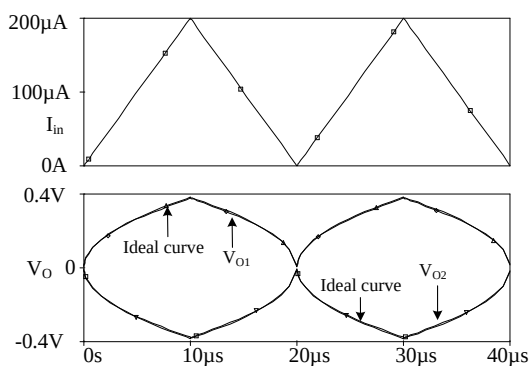
ผลจำลองการทำงาน) ของรูปที่ 5 มีความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 1% รูปที่ 6 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมขนาด $200\mu\text{A-p}$ ความถี่ 50kHz มีแรงดัน dc offset $100.1\mu\text{A}$ วงจรกินกำลังไฟฟ้า $580\mu\text{W}$ คุณลักษณะสมบัติของวงจรที่แสดงแบบกระแส (รูปที่ 4) แสดงในรูปที่ 7 โดยผลลัพธ์ของวงจรถูกเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีเท่ากับ $0.0253\sqrt{i_{in}}$ เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ $0.1\mu\text{A}$ ถึง $300\mu\text{A}$ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1% (เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ $0.1\mu\text{A}$ ถึง $200\mu\text{A}$) และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.8% (เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ $0.1\mu\text{A}$ ถึง $300\mu\text{A}$) รูปที่ 8 แสดงกระแสเอาต์พุตเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมขนาด $200\mu\text{A-p}$ ความถี่ 50kHz มีแรงดัน dc offset $100.1\mu\text{A}$ วงจรกินกำลังไฟฟ้า $757\mu\text{W}$

เมื่อเปรียบเทียบกระแสอินพุตปฏิบัติงานของรูปที่ 5 (ผลของวงจรในรูปที่ 3) และรูปที่ 7 (ผลของวงจรในรูปที่ 4) พบว่ารูปที่ 5 มีช่วงอินพุตปฏิบัติงานที่กว้างกว่านั้นเป็นเพราะในรูปที่ 7 เป็นผลของวงจรรูปที่ 4 ที่มีวงจรแปลงแรงดันผลต่างเป็นกระแสเพิ่มมาทำให้ลดทอนช่วงอินพุตปฏิบัติงานลง

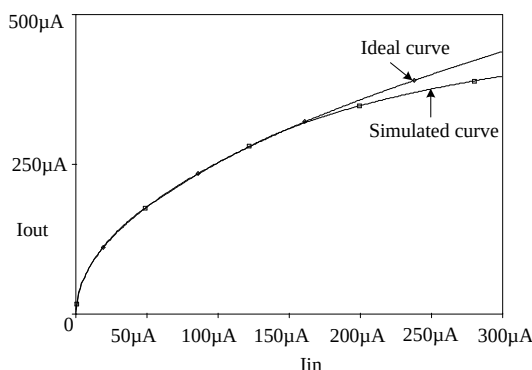


รูปที่ 5 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรรูปที่ 3

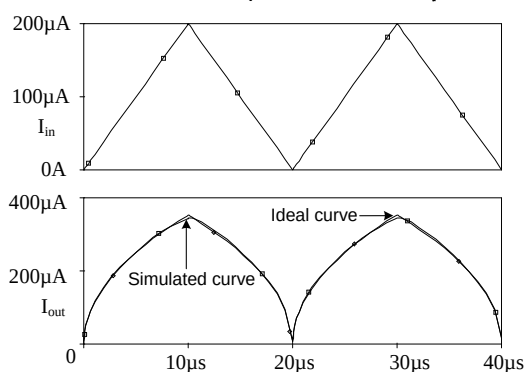
เปรียบเทียบกับค่าทฤษฎี (เท่ากับ $\pm 26.5\sqrt{i_{in}}$)



รูปที่ 6 เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 3 เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 50 kHz

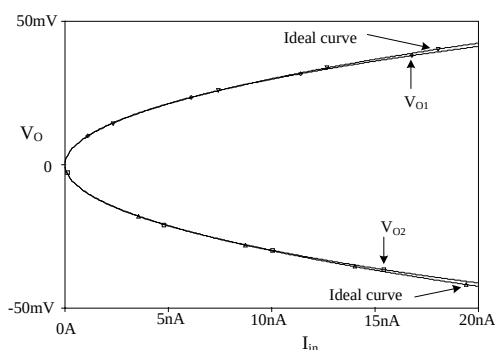


รูปที่ 7 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรรูปที่ 4 เปรียบเทียบกับค่าทฤษฎี (เท่ากับ $\pm 0.0253\sqrt{i_{in}}$)

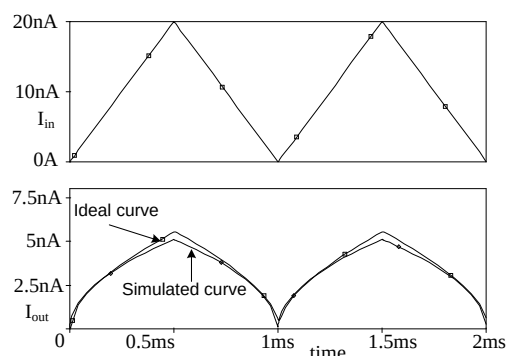


รูปที่ 8 เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 4 เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 50 kHz

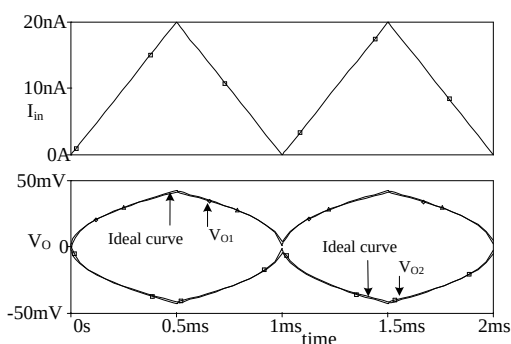
กรณีที่ 2 ออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรทำงานใน weak inversion โดยใช้แรงดันไฟเลี้ยง $V_{DD} = -V_{SS} = 0.25V$ คุณลักษณะสมบัติของวงจรรูปที่สองแบบ 2 แรงดันเอาต์พุต (รูปที่ 3) แสดงในรูปที่ 9 โดยผลลัพธ์ของวงจรถูกเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีเท่ากับ $\pm 300\sqrt{i_{in}}$ เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ 0.01nA ถึง 20nA ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ในรูปที่ 9 มีความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 1.32% รูปที่ 10 แสดงแรงดันเอาต์พุตเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมขนาด 20nAp-p ความถี่ 1 kHz มีแรงดัน dc offset 10.01 nA วงจรกินกำลังไฟฟ้า 34.4 nW คุณลักษณะสมบัติของวงจรรูปที่สองแบบกระแส (รูปที่ 4) แสดงในรูปที่ 11 โดยผลลัพธ์ของวงจรถูกเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีเท่ากับ $\pm 0.000036\sqrt{i_{in}}$ เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ 0.01nA ถึง 20nA ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของรูปที่ 11 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.4% (เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ 0.01nA ถึง 10nA) และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.5% (เมื่อ i_{in} มีค่าตั้งแต่ 0.01nA ถึง 20nA) รูปที่ 12 แสดงกระแสเอาต์พุตเมื่ออินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมขนาด 20nAp-p ความถี่ 1 kHz มีแรงดัน dc offset 10.01 nA วงจรกินกำลังไฟฟ้า 53 nW เมื่อเปรียบเทียบช่วงอินพุตปฏิบัติงานของวงจรรูปที่ 9 และรูปที่ 11 พบว่ารูปที่ 9 มีช่วงอินพุตปฏิบัติงานที่กว้างกว่า สาเหตุเพราะในรูปที่ 11 เป็นผลของวงจรรูปที่ 4 ที่มีการเพิ่มวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสเข้ามาทำให้ลดทอนช่วงอินพุตปฏิบัติงานแคบลงและนอกจากนี้วงจรทำงานในช่วง weak inversion ค่าสมการกระแสเดรนที่ได้เป็นค่าประมาณอนุกรมเทเลอร์ตามสมการที่ (9) และ (10) โดยที่เมื่ออินพุตมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น



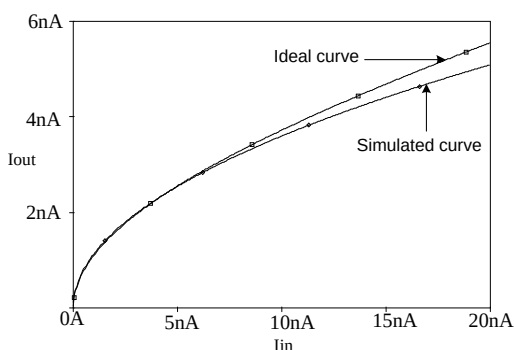
รูปที่ 9 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรรูปที่ 3
เปรียบเทียบกับค่าทฤษฎี (เท่ากับ $\pm 300\sqrt{i_{in}}$)



รูปที่ 12 เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 4 เมื่ออินพุตเป็น
สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1kHz



รูปที่ 10 เอาต์พุตของวงจรรูปที่ 3 เมื่ออินพุตเป็น
สัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1kHz



รูปที่ 11 คุณสมบัติทางไฟตรงของวงจรรูปที่ 4
เปรียบเทียบกับค่าทฤษฎี
(เท่ากับ $\pm 0.000036\sqrt{i_{in}}$)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวงจรรูปที่ 3 งานวิจัยอื่นที่ผ่านมา

ปัจจัย	Fig. 3	Ref [11]	Ref [12]
แรงดันไฟเลี้ยง	$\pm 0.7V^*$	$\pm 0.7V$	$\pm 0.5V$
	$\pm 0.25V^{**}$		
ช่วงอินพุต	300 μA^*	50 μA	30 μA
	20 nA ^{**}		
ช่วงเอาต์พุต	0.48V [*]	0.45V	0.18V
	0.04V ^{**}		
จำนวนทรานซิสเตอร์	8	3	5
จำนวนแหล่งจ่ายกระแส	-	1	1
ต้นทุน	สูงสุด	ต่ำสุด	ปานกลาง
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย	580 μW^*	1.6 μw	24.7 μw
	34nW ^{**}		
มี 2 แรงดันเอาต์พุต	yes	no	yes
เทคโนโลยี(μm)	0.25	0.25	0.25

*กรณีที่ 1

**กรณีที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบวงจรรูปที่ 3 กับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาที่มีอินพุตเป็นกระแสและเอาต์พุตเป็นแรงดัน จากข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่า วงจรรูปที่ 3 ที่นำเสนอนี้มีข้อดีหลายอย่างที่เหนือกว่าเช่น ใช้แรงดันไฟเลี้ยงได้กว้างกว่า ไม่ใช้แหล่งจ่ายกระแส มีช่วงอินพุตและเอาต์พุตปฏิบัติงานกว้างกว่านอกจากนั้น

ยังสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำมากเพียง $\pm 0.25V$ และแรงดันเอาต์พุต มี 2 เอาต์พุตที่มีเฟสต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบด้านต้นทุน (คิดจากจำนวนทรานซิสเตอร์และจำนวนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า) พบว่ารูปที่ 3 (ที่นำเสนอ) มีต้นทุนมากที่สุดรวมถึงความซับซ้อนของวงจรก็จะแปรผันตรงตามต้นทุนด้วย

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบวงจรรูปที่ 4 งานวิจัยอื่นที่ผ่านมา

ปัจจัย	Fig. 4	Ref [8]	Ref [12]
แรงดันไฟเลี้ยง	$\pm 0.7V^*$	$\pm 2.5V$	$\pm 0.5V$
	$\pm 0.25V^{**}$		
ช่วงอินพุต	$200\mu A^*$	$500\mu A$	$10\mu A$
	$10nA^{**}$		
ช่วงเอาต์พุต	$300\mu A^*$	$600\mu A$	$2\mu A$
	$4nA^{**}$		
จำนวนทรานซิสเตอร์	12	24	9
จำนวนแหล่งจ่ายกระแส	-	1	1
จำนวนแหล่งจ่ายแรงดัน	-	2	-
ต้นทุน	ปานกลาง	สูงสุด	ต่ำสุด
กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย	$757\mu W^*$	$5mw$	$26\mu w$
	$53nW^{**}$		
เทคโนโลยี(μm)	0.25	0.25	0.25

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบวงจรรูปที่ 4 กับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นสัญญาณกระแส จากข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าวงจรรูปที่ 4 ที่นำเสนอมีข้อดีหลายหลายที่เหนือกว่าเช่น ใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่กว้างกว่า ไม่ใช้แหล่งจ่ายกระแส นอกจากนั้นยังสามารถทำงานที่แรงดันไฟเลี้ยงต่ำมากเพียง $\pm 0.25V$ เมื่อเทียบด้านต้นทุน (คิดจากจำนวนทรานซิสเตอร์ จำนวนแหล่งจ่ายกระแสและจำนวนแหล่งจ่ายแรงดัน) พบว่ารูปวงจรที่ 4 (ที่นำเสนอ) มีต้นทุนที่ต่ำกว่า Ref [8] มาก แต่มีต้นทุนที่สูงกว่า Ref [12] เล็กน้อย ขณะที่ความซับซ้อนของวงจรจะแปรผันตรงตามต้นทุนเช่นกัน

4. สรุป

บทความนี้เป็นการออกแบบวงจรที่สงวนจำนวนสองวงจรรวมวงจรแรกให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณแรงดันวงจรที่สองให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณกระแส ลักษณะเด่นที่สำคัญของวงจรที่สองทั้งสองวงจรถือ วงจรทั้งคู่ออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ทั้งช่วง strong inversion และ weak inversion โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใดๆของวงจรทำให้วงจรที่สองนี้สามารถทำงานในช่วงแรงดันไฟเลี้ยงที่กว้าง การทดสอบการทำงานของวงจรใช้โปรแกรม Spice เมื่อใช้ไฟเลี้ยงประมาณ $\pm 0.7V$ หรือให้ ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ช่วง strong inversion พบว่าวงจรมีช่วงปฏิบัติงานอินพุตและเอาต์พุตที่กว้างประมาณ $200\mu A - 300\mu A$ และกำลังไฟที่สูญเสียประมาณ $600\mu W - 750\mu W$ ขณะที่เมื่อใช้ไฟเลี้ยงประมาณ $\pm 0.25V$ หรือให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ช่วง weak inversion พบว่าวงจรมีช่วงปฏิบัติงานอินพุตและเอาต์พุตที่กว้างประมาณ $10nA - 20nA$ และกำลังไฟที่สูญเสียประมาณ $30nW - 50nW$ ผลการทดสอบทั้งหมดถูกเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎีพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก นั้นยืนยันว่าวงจรที่นำเสนอทำงานได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. O. Doebelin, "Measurement systems: Application and Design," New york, Mcgraw Hill, 1990.
- [2] J. Millman and A. Grabel, "Microelectronics," New york, Mcgraw Hill, 1987.
- [3] S. I. Liu, "Square-rooting and vector summation circuits using current conveyors," *IEE Proceedings G-Circuits, Devices and Systems*, vol.142, pp. 223-226, 1995.
- [4] V. Rieuvuraja, "A simple square rooting circuit using OTA," *Electronic Letters*, Vol.44, Issue 17, pp.1000-1002, 2008.

- [5] V. Rievuraja and T. Kamsri, “ Square - rooting and absolute function circuits using operational amplifiers,” *IET circuits, Devices & systems*, Vol. 3, pp.55-63, 2009.
- [6] K.C. Selvam, “ Double dual slope square rooter,” *IET The journal of Engineering*, Vol 2014, pp.32-33, 2014.
- [7] I. Chaisayun, “ A simple and low cost square - rooting circuit employing commercial devices ,” in Proc. *The 5th International Electrical Engineering Congress (IEECON2017)* , March 8-10, 2017, pp. 759-762.
- [8] P. Phatsornsiri, M. Kumngern, and K. Dejhan, “ Current - Mode Square – Rooting Circuit Using CCDVCC ,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 28, No. 2, June 2011(in Thai).
- [9] I. Chaisayun, “A current - mode square - rooting circuit using negative feedback technique,” in Proc. *The 4 th international conference on electrical Engineering /electronics Computer, telecommunications and information technology (ECTI-CON 2007)* , 2007, pp. 77–84.
- [10] C. Sakul, “A cmos square rooting circuit,” in Proc. *The 23 International Technical Conference on Circuits /Systems, Computers and Communications (ITC- CCCC2008)* , 2008, pp. 537-540.
- [11] C. Sakul and K. Dejhan, “ Squaring and Square-Root Circuits based on Flipped Voltage Follower and Applications,” *Journal of Information Systems and Telecommunication Engineering*, Vol.1, pp.19-24, 2010.
- [12] S. Piangpratong and I. Chaisayun, “A low voltage CMOS square - rooting circuits,” in Proc. *International Technical Conference on Circuits /Systems, Computers and Communications (ITC- CCCC2018)*, 2018, pp.797-800.
- [13] I. Chaisayun, “A wide-supply – voltage - range CMOS squarer,” in Proc. *The 16th international Conference on electrical Engineering/ Electronics Computer, telecommunications and information Technology (ECTI - CON 2019)*, 2019, pp.174-177.
- [14] J.M. Rocha – Perez , G. Zamora - Mejia, A.Diaz-Armendariz , A.I. Bautista - Castillo, A. Diaz-Sanchez, J. Ramirez -Angulo “, A Compact Four Quadrant CMOS Analog Multiplier,” *International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 108, pp.53-61, 2019.

ประวัติผู้ประพันธ์



นายอิทธิพงศ์ ชัยสายันท์

สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรี โท เอก
ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ มหาวิทยาลัย
เอเชียอาคเนย์



นายสมเกียรติ เพ็ญพรานทอง

สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรี
วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย
เอเชียอาคเนย์ และ ระดับปริญญาโท
และเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็น
อาจารย์ประจำ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

แบบจำลองการบำบัดน้ำเสียเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยล้อกังหัน

Waste Water Treatment Model of Solar Aerator with Paddle Wheel

พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี และ ญัฐ จันท์กรบ

หน่วยส่งเสริมเทคโนโลยีความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

*ติดต่อ: phonniphab@sau.ac.th, โทรศัพท์ : 0-2807-4500 ต่อ 385, โทรสาร: 0-2807-4528

ผู้พิมพ์ประสานงาน : phonniphab@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 พฤศจิกายน 2563 / วันที่แก้ไขบทความ: 15 ธันวาคม 2563 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 17 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิจัยเชิงทดลองของการหาสมรรถนะเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยล้อกังหัน หลักการทำงานของเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 270 วัตต์ จำนวน 1 แผง ทำหน้าที่รับพลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า 18 โวลต์ ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านซึ่งทำหน้าที่คอยควบคุมไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับชุดควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีมอเตอร์วิเคราะห์พลังงานไว้ในวงจรค่าพลังงานไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบ ระบบถูกนำไปเดินเครื่องเพื่อเติมอากาศให้กับน้ำเสีย ซึ่งถูกกักเก็บไว้ในบ่อจำลองขนาดปริมาตร 9.6 ลูกบาศก์เมตร และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดไปตรวจวัดระดับของค่าบีโอดี ต่อเนื่องเป็นเวลา 49 วัน ผลการวิเคราะห์ระดับของพารามิเตอร์ พบว่าค่าบีโอดี มีการลดลงในรูปแบบลักษณะรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ด้วยอัตราการลดลงเท่ากับ 0.078 และได้สมการแบบจำลองความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย เป็น $BOD = BOD(0) e^{-0.078t}$ ซึ่งผลการวิเคราะห์สมรรถนะจากการบำบัดบีโอดีของเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์นี้ มีพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ 3.38 กิโลวัตต์ใน 10 ชั่วโมงต่อวัน โดยค่าบีโอดีเริ่มต้นที่ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร จะใช้เวลาในการบำบัด 15 วัน จึงจะให้ค่าบีโอดีลดอยู่ในระดับมาตรฐานที่ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถรองรับการบำบัดน้ำเสียได้ถึง 41,297 มิลลิกรัมต่อวัน

คำสำคัญ: การเติมอากาศ, ล้อกังหัน, เซลล์แสงอาทิตย์, การบำบัดน้ำเสีย

Abstract The research of this study to present the experiment of the performance of a solar-aerator with paddle wheel. The operation principle of a 270-watt solar-powered oxygen filler, which receives solar energy and converts into electrical energy of 18 volts. Then, transfers to the brushless motor controller unit which is responsible for controlling the electricity supplied for the motor, between the solar panel and brushless motor controller unit. There is an energy meter to measure the electric power, electric charge and electric voltage to analyze system operations. The system is operated to fill the air in waste water which is stored in a simulated

pond of 9.6 cubic meters. The treated waste water is continuously collected and measured the level of BOD for 49 days. The results of analysis found that the BOD value was decreased in exponential characteristics with a decay rate equal to 0.078, as the equation model: $BOD = BOD(0) e^{-0.078t}$. The result of the performance analysis from the BOD treatment of a set of solar oxygenators, the electrical energy from the sun is 3.38 kilowatt within 10 hours per day. The initial BOD value to 65 milligrams per liter. It took 15 days for treatment and the BOD value decreases to level 20 milligrams per liter, which can support the load of waste water to 41,297 milligrams per day.

Keywords: Aerator, Paddle Wheel, Solar Cell, Wastewater treatment

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ทั้งความสกปรก และส่งกลิ่นไม่พึงประสงค์ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่นิยมและง่ายหรือสะดวกในการติดตั้งที่สุดคือระบบเลี้ยงจุลินทรีย์แบบเดิมอากาศ แต่ระบบนี้ต้องเดินเครื่องจักรเดิมอากาศตลอดเวลาจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง หลายงานวิจัยพยายามลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการเดินเครื่องโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (EPA) ที่พบว่า การเดิมอากาศด้วยระบบไฟฟ้าที่มากขึ้นไปนั้นจะเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้า และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจนนำไปสู่ภาวะโลกร้อน รวมถึงเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานมากเกินความจำเป็น จึงมีการใช้เทคโนโลยีการหมุนเวียนพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยลดความจำเป็นในการลดค่าใช้จ่ายและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพลังงานไฟฟ้า [1],[2] ซึ่งให้ผลดีในการเดิมอากาศเพื่อช่วยปรับสภาพน้ำสำหรับงานด้านการเกษตร เลี้ยงปลาหรือประมงอื่นๆ ซึ่งลักษณะงานค่อนข้างยืดหยุ่นได้มาก [3] แต่ในงานบำบัดน้ำเสียนั้นต้องการการคำนวณและประเมินการเดิมอากาศที่แม่นยำ

ตารางที่ 1 ผลสมรรถนะ Standard Aeration efficiency: SAE

Paddle wheel aerator types	Maximum SAE (kgO ₂ /kWh)
Three paddle wheels	1.95 [4]
Steel	2.95 [5],[6]
PVC	2.60 [5], [6]
61- 91 cm Dia., 15- 75 cm lengths and 8-18 cm depths	2.54 [7]
Two impellers	3.46 [8]
Taiwan model	1.188 [9]
Curved blade	2.95 [10]
Four Paddle impeller	1.019 [11]
Nigeria	1.30 [12]
Spiral	1.00 [11]

เพื่อให้สามารถรับมือการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างถูกต้อง ได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด ที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินศักยภาพการเดิมออกซิเจนบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเดิมอากาศที่ใช้การจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ต้นกำลังด้วยไฟฟ้าในหลากหลายรูปแบบ และให้ผลเชิงสมรรถนะที่คิดในรูปน้ำหนักออกซิเจนที่ได้ต่อพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายไป (Standard Aeration efficiency: SAE) สูงสุดตั้งแต่ 1 ถึง 3.46 kgO₂/kWh ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 1 [4]-[12] โดยทั้งหมดใช้ไฟฟ้าจ่ายให้

มอเตอร์ต้นกำลังด้วยความเร็วรอบสม่ำเสมอตลอด 24 ชั่วโมง การใช้ข้อมูลดังกล่าวนี้มาใช้ประเมินเพื่อออกแบบการเติมอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะเป็นปัญหาในทางปฏิบัติ เนื่องจากความไม่คงที่ของไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ มีเสถียรภาพสม่ำเสมอเหมือนไฟจากโรงไฟฟ้าเช่นนั้นได้

การประยุกต์ออกแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการเติมออกซิเจนเพื่อบำบัดน้ำเสีย มีการศึกษาการเติมออกซิเจนที่ใช้พลังงานต้นกำลังจากแสงอาทิตย์อยู่ [13] แต่เป็นไปในลักษณะการสร้างนวัตกรรมต้นแบบขนาดเล็กที่ใช้การดูดน้ำมาปล่อยให้ไหลผ่านอากาศได้ และการใช้ไม่ได้ทำการประเมินสมรรถนะให้เป็นรูปแบบสมการแบบจำลองศักยภาพของระบบเอาไว้ ทำให้ไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงเพื่อการออกแบบได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Iqib Prasetyaningsari [14] ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ ช่วยคำนวณ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นต้นกำเนิดพลังงานให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย แต่ยังคงหลักการจ่ายไฟฟ้าสม่ำเสมอด้วยการใช้แบตเตอรี่สำรองซึ่งเพิ่มต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดมุ่งเน้นที่จะศึกษาศักยภาพการบำบัดน้ำเสียของเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงประเมินสมรรถนะและค่าระดับคุณภาพน้ำจากวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการเติมออกซิเจนด้วยกังหันที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อนำผลที่ได้มาพัฒนา เป็นสมการแบบจำลองสำหรับความสะดวกในการนำไปใช้งานออกแบบ และดัดแปลงเทคนิคกระบวนการให้เหมาะสมกับสภาพจริงในการใช้งานบำบัดน้ำเสียต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ เป็นแบบเติมออกซิเจนในอากาศลงน้ำเสียแบบใช้กังหันที่มีแหล่งกำเนิดพลังงานให้ต้นกำลังจากแสงอาทิตย์ประกอบด้วย ดังนี้

- (ก) มิติตัวเครื่อง กว้าง 1.30 x ยาว 1.64 x สูง 0.56 เมตร
- (ข) น้ำหนักรวม 70 กิโลกรัม
- (ค) ใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 270วัตต์ และ มอเตอร์ชนิดไร้แปรงถ่านขนาด 500วัตต์
- (ง) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ 100% ไม่ใช้แบตเตอรี่
- (จ) ทุนลอยน้ำจำนวน 4 ทุน
- (ฉ) กังหันตีน้ำแบบ 8 ใบพัด จำนวน 4 วงล้อ

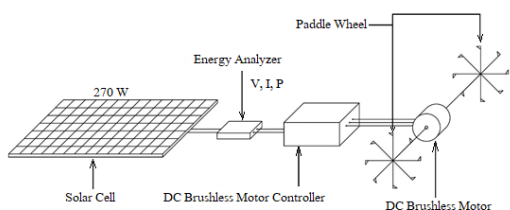
2.2 น้ำเสียทดสอบ เป็นน้ำเสียจากโรงอาหารในมหาวิทยาลัยฯ และศึกษาบ่มบ่อน้ำเสียจำลองแบบปิด ขนาด 3 เมตร x 4 เมตร x 1 เมตร และปริมาตรน้ำเสียขนาด 9.6 ลูกบาศก์เมตร

2.3 ตัวแปรที่ศึกษา

- 2.3.1 ตัวแปรต้นคือค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) ลดลงที่สามารถทำได้ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ชนิดเติมอากาศด้วยกังหันที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานจากแสงอาทิตย์
- 2.3.2 ตัวแปรตาม คือเวลาในการบำบัดน้ำเสียในหน่วยวัน

2.4 โครงสร้างระบบเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

โครงสร้างของระบบการทำงานประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ส่งจ่ายไปยังชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่เป็นชนิดไร้แปรงถ่าน ติดตั้งมิเตอร์วัดค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์พลังงาน ประกอบด้วย การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปขณะทำงานจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ต้นกำลัง ถ่ายทอดกำลังไปยังเพลาลูกสูบกังหันให้หมุนตามความเร็วที่กำหนด โดยมีต้นทุนอุปกรณ์เป็นเงิน 20,000 บาท ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบการทำงานของเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

2.5 บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon หรือ AL)

การสร้างบ่อ บ่อบทดสอบสร้างจากแผ่นพลาสติกหนา เชื่อมเป็นรูปทรงลูกบาศก์สี่เหลี่ยมขนาดขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 4 เมตร สูง 1 เมตร โดยติดตั้งไว้กลางบ่อน้ำจริง แล้วบรรจุปริมาณน้ำเสียลงบ่อบทดสอบจำนวน 9.6 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะบ่อบทดสอบและการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

นำน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียของโรงอาหารในมหาวิทยาลัยฯ มาใส่ในบ่อบทดสอบ ปริมาตร 9.6 ลูกบาศก์เมตร สุ่มน้ำเสียค่าเริ่มต้นส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการเคมีของเอกชนที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์สำคัญจำนวน 5 ตัวคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Positive potential of the Hydrogen ions: pH) ค่าดีไอ (Dissolve Oxygen: DO) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) ค่าน้ำมันและไขมัน (Oil and Grease) ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid: SS)

3.1 ขั้นตอนการทำงาน

3.1.1 ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่อง Power Analyzer/Meter วัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้ส่งให้เครื่องเติมอากาศ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า และวัดค่าความเร็วรอบของกังหันวงล้อตีนน้ำด้วย โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Lutron DT-2234B Photo Tachometer) ทั้งช่วง No Load และช่วง Full Load ดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 กังหันเครื่องเติมอากาศและ การวัดความเร็วรอบขณะ No load

3.1.2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบทดสอบก่อนนำเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ลงบ่อบำบัดน้ำเสีย จำลองและส่งตัวอย่างน้ำเสียตรวจวิเคราะห์ค่าคุณภาพน้ำกรณีก่อนเริ่มเปิดเครื่องเติมอากาศเพื่อทำการบำบัด

3.1.3 นำเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ลงบ่อบทดสอบบำบัดน้ำเสียจำลอง เปิดระบบทำงานและบันทึกค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

3.1.4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบทดสอบบำบัดน้ำเสียขณะเครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานตามระยะเวลาการทำงานที่กำหนดและส่งตัวอย่างน้ำเสียตรวจวิเคราะห์ค่าคุณภาพน้ำในห้องปฏิบัติการเคมี หลังการทดลองเดินเครื่องบำบัดน้ำเสียทุก ๆ 7 วัน



รูปที่ 4 เก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนบำบัดน้ำเสีย

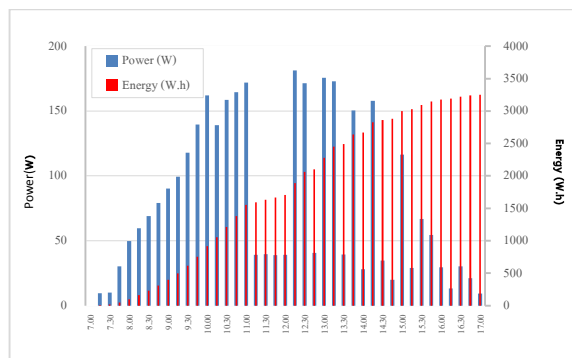
รูปที่ 5 นำเครื่องเดิมอากาศยานแสงอาทิตย์ลงบ่
ทดลองบำบัดน้ำเสีย

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การทดสอบสมรรถนะการสร้างกำลังขณะ No Load

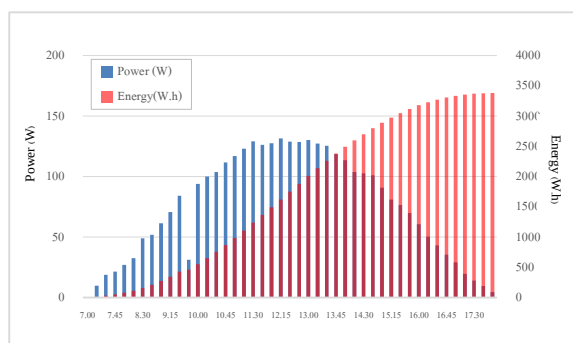
เป็นการทดสอบโดยการวางเครื่องรับพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นดินโดยที่กังหันไม่ต้องแบกรับภาระ ภายใต้สภาวะแตกต่างกัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าโดยทดสอบตั้งแต่เวลา 7.00 – 17.00 น. พบว่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นและลดลงตามความเข้มของแสงอาทิตย์ ค่าสูงสุดอยู่ที่ 185 วัตต์ เวลา 12:15 น. ซึ่งในบางช่วงเวลามีเมฆบดบังแสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าจะตกลงต่ำกว่า 50 วัตต์ และพลังไฟฟ้าสะสมได้ทั้งหมด

3,251.57 วัตต์ใน 10 ชั่วโมง(กลางวัน) ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลที่ปรากฏนี้เมื่อจำลองเป็นสมการคณิตศาสตร์พบว่ากำลังไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีเมฆบดบังเลย และสภาพขณะ No Load จะได้เป็นตามสมการที่ (1)



รูปที่ 6 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าขณะเดินระบบ

แบบ No Load



รูปที่ 7 กราฟค่ากำลังไฟฟ้าขณะเดินระบบ

แบบ Full Load

$$P(t_h) = 185 \sin\left(\frac{\pi}{10}t_h\right) \quad (1)$$

โดยที่ $P(t_h)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงแดดในหน่วยวัตต์
 t_h คือ เวลา ในหน่วยชั่วโมง

4.2 การทดสอบสมรรถนะการสร้างกำลังขณะ Full Load

การทดสอบสมรรถนะขณะ Full Load เป็นการทดสอบโดยการนำเครื่องรับพลังงานแสงอาทิตย์วางไว้บนบ่บำบัดน้ำเสียจำลองโดยที่กังหันรับภาระดัดน้ำเดิมอากาศ โดยทดสอบเวลา 7.00 - 17.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นและลดลงตามความเข้มของแสงอาทิตย์ ค่าสูงสุด

อยู่ที่ 131 วัตต์ เวลา 12:15 น. ในบางช่วงเวลานั้นมีเมฆบดบังแสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าจะตกลงต่ำถึง 31 วัตต์ และช่วงไม่มีเมฆบังได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 131 วัตต์ โดยพลังไฟฟ้าสะสมได้ทั้งหมด 3,382.16 วัตต์ ในเวลา 10 ชั่วโมง (กลางวัน) ดังรูปที่ 7 โดยผลค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 131 วัตต์ ในกรณีที่ไม่มีเมฆมาบดบัง ในขณะที่ Full Load ค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาสามารถจำลองสมการคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (2) ดังนี้

$$P(t_h) = 131 \sin\left(\frac{\pi}{10} t_h\right) \quad (2)$$

4.3 ความเร็วรอบขณะ No Load เทียบกับ Full Load

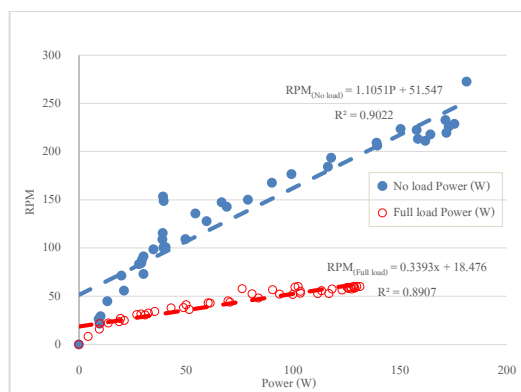
วิเคราะห์งานหมุนขณะ No Load ภายใต้สภาพแสงแดดธรรมชาติ พบความเร็วรอบมอเตอร์ค่าต่ำจนถึงสูงสุด 272.5 รอบต่อนาที (ไร้เมฆบัง) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 185 วัตต์ และยังพบว่าความเร็วรอบมีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ที่ระดับ 100 รอบต่อนาที และค่ากำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 40 วัตต์ขึ้นไป โดยช่วงดังกล่าวพบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) เทียบกับกำลังไฟฟ้า (P) ได้เป็นสมการเส้นตรงตามสมการที่ (3)

$$RPM_{(No\ load)} = 1.1051P + 51.547 \quad (3)$$

และขณะ Full Load ภายใต้สภาพแสงแดดธรรมชาติเช่นกัน พบความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุด 57.7 รอบต่อนาที กำลังไฟฟ้าสูงสุด 131 วัตต์ และยังพบว่าความเร็วรอบมีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ที่ความเร็วรอบ 21 รอบต่อนาทีและค่ากำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 9.7 วัตต์ขึ้นไป โดยพบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) เทียบกับกำลังไฟฟ้า (P) ได้เป็นสมการเส้นตรงตามสมการที่ (4)

$$RPM_{(Full\ load)} = 0.3393P + 18.476 \quad (4)$$

จะเห็นว่า ศักยภาพการบิดหมุนของเพลาลูกเบี้ยวให้ก้านหินดีน้ำเดิมอากาศมีความแตกต่างจากการบิดหมุนบนอากาศเปล่า สัดส่วน $1.105/0.3393 = 3.256$ เท่า ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า-ความเร็วรอบในการดีน้ำเดิมอากาศ ในสภาพ No Load และ Full Load

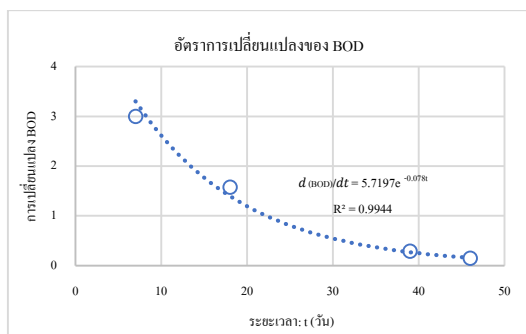
4.4 ผลการทดสอบระดับคุณภาพการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเทียบกับเวลา

ครั้งที่	ระยะเวลา: t (วัน)	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์	
		pH	BOD ₅ (มก/ล)
1	0	6	65
2	7	6	40
3	14	7	23
4	21	7	19
5	28	8	8
6	35	8	8
7	42	8	4
8	49	9	5

เมื่อนำผลที่ได้นี้มาวิเคราะห์หาความสามารถในการลดค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) โดยพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าบีโอดี (Differential of BOD: d(BOD)) ที่ลดลงได้ในแต่ละวัน (dt) ดังแสดงในรูปที่ 9 จะพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของบีโอดี ในแต่ละวัน มีค่าลดลงเป็นไปตามสมการที่ (5)

$$\frac{d(BOD)}{dt} = 5.5197e^{-0.078t} \quad (5)$$



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของค่าบีโอดีที่ลดลงได้รายวัน

พฤติกรรมการลดลงแบบนี้เป็นลักษณะการลดลงในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) และจะพบความสัมพันธ์ของความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีให้ลดลงต่อวัน ด้วยอัตราเท่ากับ 0.078 และจากสมการนี้สามารถนำไปประเมินหาสมรรถนะของการบำบัดน้ำเสียรายวันที่เป็นผลจากการเติมอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นี้ได้จากการอินทิเกรต ดังสมการที่ (6)

$$BOD(t) = \int 5.5197e^{-0.078t} dt \quad (6)$$

ซึ่งรูปแบบของคำตอบจะได้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยค่าเริ่มต้นจะเริ่มลดจากค่าบีโอดีเริ่มต้น หรือ BOD(0) ดังสมการที่ (7)

$$BOD(t) = BOD(0) e^{-0.078t} \quad (7)$$

โดยที่ BOD(0) คือค่าบีโอดีเริ่มต้นของกระบวนการ

t คือเวลาที่ทำการบำบัดน้ำเสียในหน่วยวัน

4.3.1 การวิเคราะห์สมรรถนะการบำบัดบีโอดี

ทั้งหมดนี้อยู่บนพื้นฐานของการทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกังหันเติมอากาศที่พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูร้อน ซึ่งมีพลังงานไฟฟ้าที่แปลงจากแสงอาทิตย์ได้ในอัตรา 3.38 kW ใน 10 ชั่วโมงต่อวัน และน้ำเสียมีปริมาตรเท่ากับ 9.6 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำเสียมีค่าบีโอดีเริ่มต้นที่ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$t = -\frac{1}{0.078} \ln \left(\frac{BOD \text{ มาตรฐาน}}{BOD(0)} \right) = -\frac{1}{0.078} \ln \left(\frac{20}{65} \right) = 15.11 \text{ วัน}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเครื่องเติมอากาศระบบนี้ 1 ชุดมีความสามารถในการรองรับภาระกำจัดบีโอดี (BOD load) ได้เท่ากับ $(9.6/15.11)65 = 41.297$ กรัมต่อวัน หรือรับโหลดการบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ 41,297 มิลลิกรัมต่อวัน

4.3.2 การประยุกต์ใช้งาน

ยกตัวอย่าง โรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งมีน้ำเสียโดยค่าบีโอดีเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปล่อน้ำเสียออกวันละ 8 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะต้องใช้เครื่องเติมอากาศเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยระบบแบบนี้เท่ากับกี่ชุด การคำนวณหา ภาระบีโอดี (BOD load) = $8 \times 200 = 1,600$ มิลลิกรัมต่อลิตร หรือต้องรับมือกับภาระน้ำเสียเท่ากับ 1,600,000 มิลลิกรัมต่อวัน ดังนั้นแล้วจึงต้องใช้เครื่องเติมอากาศแบบนี้จำนวนเท่ากับ $1,600,000/41,297$ ชุด ซึ่งเท่ากับ 38.74 ชุด หรือ 39 ชุด

5. สรุป

เครื่องเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ 1 เครื่องที่ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 270 วัตต์จำนวน 1 แผง ศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงแดด 3.38 กิโลวัตต์ ใน 10 ชั่วโมงต่อวัน กับระบบบำบัดน้ำเสียปริมาตรน้ำอยู่ที่ 9.6 ลูกบาศก์เมตรกับประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำ การวิเคราะห์ความสามารถในการลดของค่าบีโอดีเปลี่ยนแปลงรายวัน มีพฤติกรรมตอบสนองแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ตามสมการ

$$BOD(t) = BOD(0) e^{-0.078t}$$

ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของเครื่อง 1 ชุด จะสามารถลดค่าบีโอดีจากเริ่มต้น 65 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึงระดับตามเกณฑ์มาตรฐาน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลา 15 วัน และสามารถรองรับภาระน้ำเสียได้ 41,297 มิลลิกรัมต่อวัน สามารถนำสมการแบบจำลองสมรรถนะที่นำเสนอนี้มาใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบเติมอากาศบำบัดน้ำเสียให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นางสาวนฤพร ทศน์สุวรรณ นางสาวชนิศาภา สอนช่วย และนายอัศรภาม อุณหพันธ์ นักศึกษาหลักสูตร สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย ที่ช่วยสนับสนุนการเก็บข้อมูลวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Energy and Environmental Protection Agency, Washington D. C. (2000). Carbon dioxide emissions from the generation of electric power in the United States. URL:<https://www.eia.gov>, access on 26/10/2019
- [2] Hudnell, K., Green, D., Vien, R., Butler, S., Rahe G., Bruce A. R. & Bleth, J. (2010). Improving wastewater mixing and oxygenation efficiency with solar- powered circulation, Clean Technologies and Environmental Policy. 13, pages 731– 742 University of North Carolina, Chapel Hill.
- [3] Kamal Sarma, A. Rahman and A. Dey. (2018). Impact of solar operated aerator on dissolved oxygen and fish growth. J. Exp. Zool. India Vol. 21, No. 2, pp. 1041-1046, 2018.
- [4] Busch RL, Tucker CS, Steeby JA, Reames JE. An evaluation of three paddle wheel aerators used for emergency aeration of channel catfish ponds. Aquacultural Engineering. 1984; 3:59-69.
- [5] Ahmad T, Boyd CE. Design and performance of paddle wheel aerators. Aquacultural Engineering. 1988; 7- (39-62).
- [6] Boyd CE, Ahmad TLa-fa, Z. Evaluation of plastic pipe, paddle wheel aerators, Aquacultural Engineering. 1988; 7:63-72.
- [7] Moore JM, Boyd C.E. Design of small paddle wheel aerators. Aquacultural Engineering. 1992; 11:55-69.
- [8] Fast AW, Tan EC, Stevens DF, Olson JC, Qin J, Barclay DK. Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three Salinities. Aquacultural Engineering. 1991; 19:99-103.
- [9] Peterson & Walker (2002). Effect of speed on Taiwanese paddlewheel aeration. Aquacultural Engineering 26(2):129-147.
- [10] Bhuyar LB, Thakre SB, Ingole NW. Design characteristics of curved blade aerator w. r. t. aeration efficiency and overall oxygen transfer coefficient and comparison with cfd modeling. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2009; 1(1):1-15.
- [11] Roy SM, Moulick S, Mukherjee CM, Mal BC. Effect of rotational speeds of paddle wheel aerator on aeration cost. American Research thoughts. 2015; 2(1):3069-3087.
- [12] Omofunmi OE, Adewumi JK, Adisa AF, Alegbeleye SO. Development of a paddle wheel aerator for small and medium fish farmers in Nigeria. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2016; 13(1):50-56.
- [13] Chonmapat Torasa, et.al. (2016). Int. J. Ind. Electronics and Electrical Engineering, ISSN: 2347-6982 Volume-5, Issue-2, Feb.-2017
- [14] Igib Prasetyaningsari, Agus Setiawan and Ahmad Agus Setiawan. (2013). Design optimization of solar powered aeration system for fish pond in Sleman Regency, Yogyakarta by HOMER software. Energy Procedia 32: 90 – 98.

ประวัติผู้ประพันธ์



พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี
วท.ม(สุขศาสตร์อุตสาหกรรม
และความปลอดภัย)
มหาวิทยาลัยมหิดล
สนใจงานวิจัยด้าน สุขศาสตร์

อุตสาหกรรมและความปลอดภัย วิศวกรรม
สิ่งแวดล้อมและการจัดการอุตสาหกรรม



ณัฐ จันทร์กรบ
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า)
พระจอมเกล้าลาดกระบัง
สนใจงานวิจัยด้าน พลังงาน
ระบบสื่อสาร งานควบคุม

อัตโนมัติ สิ่งแวดล้อมและการจัดการอุตสาหกรรม

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2563

ชื่อ-นามสกุล	ต้นสังกัด
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	รัตน์มีชัยสกุล
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.จตุพร	แก้วอ่อน
	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์	ชาญเกียรติก้อง
	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.จรัล	รัตนโชตินันท์
	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดัสกรณ	ตันเจริญ
	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา	แก้วอาษา
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ศรัณย์	ฉัตรธัญญกิจ
	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ดร.ภาณุวัฒน์	แตระกุล
	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

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

ประเภทผลงานที่ตีพิมพ์

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

การเตรียมต้นฉบับบทความ

บทความหรือผลงานวิจัยที่นำเสนออาจอยู่ในรูปแบบภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยจัดพิมพ์ด้วยโปรแกรมเวิร์ดโปรเซสเซอร์ ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ สำหรับตาราง แผนภาพและภาพประกอบในส่วน of ต้นฉบับจะต้องตามรูปแบบที่กำหนดเพื่อให้พร้อมตีพิมพ์ได้ทันที (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 หากมีการแก้ไขหรือตอบรับการตีพิมพ์ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล 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

บทคัดย่อ นี่คือต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร 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 (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 20pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) ตามด้วยชื่อบทความภาษาอังกฤษ (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 16pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) จากนั้นเว้น 1 บรรทัด ตามด้วยชื่อผู้ประพันธ์ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) ภาควิชา/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) และที่อยู่/ประเทศ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) จากนั้นระบุ email address ของผู้พิมพ์/ประธานงาน (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 10pt กลางหน้า) หัวข้อเรื่องแต่ละข้อ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 15pt หน้าชิดขอบซ้าย) โดยใช้หมายเลขแบบอินดู อารบิก (1, 2, 3,...) ไม่ใช่แบบเลขโรมัน (I, II, III, ...).

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สรุปอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์และมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับคนอื่นๆ ที่จะสามารถที่จะทำให้เกิดการทดลองซ้ำได้

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับชื่อหัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษร Angsana 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

สำหรับรูปภาพตารางและการอ้างอิงตัวเลขควรเป็นเลขดังนี้ รูปที่ 1 รูปที่ 2, ... ฯลฯ (ที่กึ่งกลาง) และตารางควรจะเป็นเลขดังนี้ 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 กรณีที่เป็นเอกสารอ้างอิง [1] หมายถึง “หนังสือ” เอกสารอ้างอิง [2] หมายถึง “รายงาน”

- เอกสารอ้างอิง [3] หมายถึง “วารสาร”
 เอกสารอ้างอิง [4] หมายถึง “ประชุมวิชาการ”
 เอกสารอ้างอิง [5] หมายถึง “มาตรฐาน”
 เอกสารอ้างอิง [6] หมายถึง “เว็บไซต์”
 เอกสารอ้างอิง [7] หมายถึง “ปริญญาณิพนธ์”
 เอกสารอ้างอิง [8] หมายถึง “วิทยานิพนธ์”
 เอกสารอ้างอิง [9] หมายถึง “คุณิณีนิพนธ์”

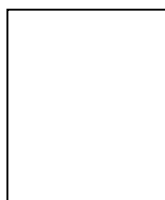
โดยในกรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

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. 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, 8-11Aug. 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 two 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

บทคัดย่อ นี่คือการต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร 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”

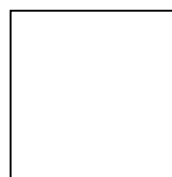
Ref. [9] stand for “Dissertation”

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 fed 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.x2.4 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.			

8. การรับรองบทความ

☐ ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ.....ผู้พิมพ์ประสานงาน

()

วัน..... เดือน..... พ.ศ.

หมายเหตุ ส่งแบบฟอร์มนี้มาพร้อมกับบทความช่องทางในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (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 หรือโทรสารมาที่
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.)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ (วท.บ.)

ติดต่อศูนย์รับสมัคร

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม (กิตติชัยเพชรเกษม 106) เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ : 02-8074500 - 27 ต่อ 190,192

WWW.SAU.AC.TH

