



สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

Thai-Nichi Institute of Technology

泰日工業大学

สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

TNI Journal of Engineering and Technology

ISSN (Online) 2672-9989

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

- | | | |
|---|--|----|
| ☼ | A Comparison of Real-Time Data Analytics Algorithms
Ekarat Rattagan | 1 |
| ☼ | Application of Swarm Intelligence for the Multi-Objective Optimization of the
Thermodynamic Performance and Economic of Double Reheat Steam Power Plants
Somboon Sukpancharoen | 9 |
| ☼ | Design of a Shunt Active Power Filter for Single-Phase Power Systems
Sutthinee Waosungnern, Tosaporn Narongrit, Kongpol Areerak | 27 |
| ☼ | Hotspot Condition Analysis and Proposed Hotspot Detection Method for
the PV Module in Cluster's Structure
Jirada Gosumbonggot | 37 |
| ☼ | The Sound Interaction Framework for People with Autism on Mobile Devices
Pitsanu Chaichitwanidchakol, Wittha Feungchan | 48 |
| ☼ | The Study of Evaporation Measurement of Lam Takhong Reservoir
Phattrasuda Phosri, Pruchaya Yoddumrong, Sattawat Haruehasapong,
Soontaree Taprasit | 60 |
| ☼ | Workforce Scheduling for the System with Flexible Processing Time Jobs
Rachanid Rueangsri, Wisut Supithak | 70 |

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

TNI Journal of Engineering and Technology

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564 Vol. 9 No. 1 January - June 2021

ISSN (Online) 2672-9989

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่บทความจากผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาความรู้แก่สังคม โดยเฉพาะภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำวารสารวิชาการ คือ วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

วัตถุประสงค์

1. เพื่อส่งเสริมและเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพ
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางการวิจัยในสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อพัฒนาศักยภาพทางการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์กฤษดา วิศวธีรานนท์

ขอบเขตเนื้อหา

บทความวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี เทคโนโลยีสารสนเทศ และมัลติมีเดีย

กำหนดออกเผยแพร่

วารสารตีพิมพ์เผยแพร่ราย 6 เดือน (ปีละ 2 ฉบับ)

- ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน
- ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม

เจ้าของ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (Thai-Nichi Institute of Technology : TNI)

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมันคง
2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย
3. ศาสตราจารย์ ดร.บุญเจริญ ศรีเนาวกุล
4. ศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ชาญยานนท์
5. ศาสตราจารย์ ดร.วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์
6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน
7. ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์
8. รองศาสตราจารย์ ดร.จิรณัฐ เสี่ยงศักดิ์
9. รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์
10. รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

คณะกรรมการดำเนินงาน

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิ สุขเจริญ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
4. ดร. ประมุข บุญเสียง
5. ดร. ศรายุทธ นนท์ศิริ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อนุญาหงษ์
7. ดร.เอิบ พงษ์พวง
8. นางสาวจุฑามาศ ประสพสันต์
9. นางสาวสุพิศ บายคายคม
10. นางสาวรชนี นารินทร์
11. นายเสกสรร พรหมสุทธิ์
12. นางสาวพิมพ์รต พิพัฒน์กุล
13. นางสาวอาริสา จิระเวชถาวร

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (ต่อ 2402, 2752)

website : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal> e-mail : journaleng@tni.ac.th

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์พูลพร แสงบางปลา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.ธีรพล ศิลาวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วิลาศ วูวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา เกียรติวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ ญาณภีร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ศรี สิงห์เลื่อน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ สุพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.รังสิมา ชลคุป	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
รองศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ชัยวิวัฒน์วรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.บุญพริกา เกษมสันติธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สรพงศ์ ทานอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปตะเขียว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุ์บรรยงค์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรภรณ์ อีสัยกุล	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
ดร.เจนจบ วีระพานิชเจริญกิจ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ศาสตราจารย์ ดร.รัชนิกร ธรรมวิชัย	St.Cloud State University, USA
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาสน์ ทิมทรัพย์	มหาวิทยาลัยสแตมป์ฟอร์ด
รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักพงศ์ จันทเปรมจิตต์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.วิพุธ อ่องสกุล	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เมตตา องค์กรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
Prof. Dr.Michiko Ohkura	Shibaura Institute of Technology, Japan
Dr.Masayuki Fujise	National Institute of Information and Communications Technology, Japan
Dr.Tran Thanh Son	Hanoi University of Science and Technology
Dr.Nguyen Duc Tuyen	Hanoi University of Science and Technology

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกโร วรากุลศิริพันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส
รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรสิทธิ์ เบญจบุญยสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมล แสนอุ่ม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ เฉิดโถม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกษม ทิพย์ธาราจันทร์
ดร.สะพรั่งสิทธิ์ มฤทสาธ
ดร.กรกฏ เหมสถาปัตย์
ดร.กันติชา กิตติพิรชล
ดร.ดอน แก้วดก
ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ
ดร.อภิขญา นิ่มคุ้มภัย

[illegible]

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบัน ภายใต้นโยบายสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาประเทศของภาครัฐและเอกชน ที่มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้กับการดำเนินกิจการต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากขึ้น ทำให้สังคมและเศรษฐกิจมีความมั่นคงและเจริญก้าวหน้า โดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อการพัฒนา 10 อุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย จึงทำให้นักวิชาการและนักวิจัยได้มีการคิดค้น วิจัย และพัฒนาสิ่งต่าง ๆ บนความเชี่ยวชาญของแต่ละท่าน จนประสบความสำเร็จเผยแพร่ในการประชุมวิชาการต่าง ๆ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการเผยแพร่ผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์ทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและการประยุกต์ใช้ในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม และการพัฒนาเทคโนโลยีพื้นฐาน จึงได้จัดทำวารสารฉบับนี้ขึ้นเพื่อเป็นช่องทางสำหรับนักวิจัยและนักวิชาการในการเผยแพร่ผลงานสู่สาธารณะ

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น: วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา กองบรรณาธิการคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความจากวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทั้งในทางวิชาการ และวิชาชีพ และหากผู้เขียนหรือผู้อ่านท่านใดมีข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อวารสารสามารถส่งมาได้ที่ research@tni.ac.th เพื่อการปรับปรุงวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้นต่อไป และต้องขอขอบพระคุณผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์
บรรณาธิการ

สารบัญ

- 1 A Comparison of Real-Time Data Analytics Algorithms
Ekarat Rattagan
- 9 Application of Swarm Intelligence for the Multi-Objective Optimization of the
Thermodynamic Performance and Economic of Double Reheat Steam Power Plants
Somboon Sukpancharoen
- 27 Design of a Shunt Active Power Filter for Single-Phase Power Systems
Sutthinee Waosungnern, Tosaporn Narongrit, Kongpol Areerak
- 37 Hotspot Condition Analysis and Proposed Hotspot Detection Method
for the PV Module in Cluster's Structure
Jirada Gosumbonggot
- 48 The Sound Interaction Framework for People with Autism on Mobile Devices
Pitsanu Chaichitwanidchakol, Wittha Feungchan
- 60 The Study of Evaporation Measurement of Lam Takhong Reservoir
Phattrasuda Phosri, Pruchaya Yoddumrong, Sattawat Haruehasapong, Soontaree Taprasit
- 70 Workforce Scheduling for the System with Flexible Processing Time Jobs
Rachanid Rueangsri, Wisut Supithak

A Comparison of Real-Time Data Analytics Algorithms

Ekarat Rattagan^{1*}

^{1*}*Graduate School of Applied Statistics, National Institute of Development Administration, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: ekarat@as.nida.ac.th

Received: 10 May 2021; Revised: 17 May 2021; Accepted: 24 May 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

Today's world is overwhelmed with the stream of data generated by IoT sensors, Smartphone applications, E-commerce transactions, etc. Data streaming and real-time analytics tools are necessary to apply for various purposes such as financial fraud detection, recommended products, or disaster warning systems. Existing real-time data analytics tools such as StreamDM, Scikit-multiflow, or Massive Online Analysis (MOA) play a significant role in this field. There is, however, still a lack of well-comparisons among streaming algorithms in these tools. In this paper, we aim to study and compare the performance of the streaming algorithms provided by Scikit-multiflow, one of the most popular tools. In the experiment, we compare various algorithms on classification and regression problems in terms of accuracy, model size, memory, etc. The synthesized and real-world datasets are both employed for the experiment. The experimental results illustrate that the Hoeffding-Tree algorithm shows the best performance among other algorithms.

Keywords: Streaming, Algorithms, Real-Time, Analytics, Concept drift

I. INTRODUCTION

With the integration of high-speed network technology, e.g., Wi-Fi and cellular network, and mobile technology, e.g., mobile devices and Internet-of-Things (IoT), the physical objects have connected with other things seamlessly. With these connections, people can do several things online via applications (apps), especially mobile apps. For instance, they use mobile apps to spend their living costs, pay the monthly home mortgage, have an online meeting, etc. With these connections, machines can communicate with other machines. For example, IoT devices embedded in the factorial machinery can send/receive data to/from other IoT devices via a low-power network. Food-delivery drivers can keep connecting with their customers via GPS technology. These scenarios of a modern society generate a massive of real-time data streaming in every unit of time.

This data streaming pushes data scientists, data engineers, or business analysts have to discover new knowledge from various sources of data-driven economics. Traditionally, their daily-routine tasks involved the pipeline process, including collecting, cleaning, training mathematical models (models for short), and analyzing data, iteratively. The data-analytic tools for this pipeline process are traditionally invented to work with a complete set of data or bound data, namely the batch processing approach, which contrasts with the other direction, i.e., the stream processing approach. Figure 1 depicts the overall diagram of batch and stream processing approaches.

The stream processing approach is appropriate for processing the streaming data, or unbounded data, which is naturally fast, imbalanced, and infinite; this means the analysts do not know when it will finish streaming [1]. Meanwhile, batch processing tools are

insufficient to handle the streaming data because they lack streaming algorithms. Therefore, the models generated from the batch processing may show low performance

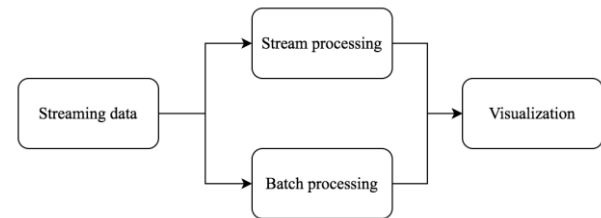


Figure 1 Batch VS Streaming processing

in predicting the sudden change of data or concept drifts, e.g., the fraud behaviors in financial transactions. This is because the models are trained by the outdated data. To squeeze the highest capability of models, we should frequently update the generated models with a small set of data to get ready for use in real-time.

Currently, there are a couple of software tools invented for stream processing analytics, for instance, Massive Online Analysis (MOA) [2], Scikit-learn Multiflow [3], and StreamDM of Huawei [4]. In particular, these tools provide online machine learning algorithms for generating models for analyzing streaming data. The online algorithms, for instance, include Hoeffding Tree Classifier, Stochastic Gradient Descent Classifier, Adaptive Windowing drift detection, etc. Figure 2 illustrates the process of an online machine learning algorithm in the Scikit-multiflow framework.

As these existing tools are getting attention in stream processing communities, it is necessary to survey the strongest and weakest points of them. This paper aim to compare the online algorithms provided by the Scikit-multiflow framework, which shows the most attention in the community. The target algorithms have experimented in various

datasets, both synthesized and real-world streaming data. Moreover, different error metrics, including accuracy, kappa, f1, model size, training, and testing time, are used to justify the performance of the target algorithms.

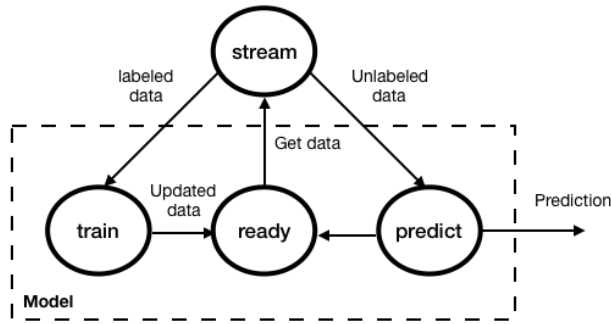


Figure 2 Online machine learning in Scikit-multiflow [3]

The remainder of this paper is organized as follows: Section II provides the background to this work; Section III gives the problem statement; Section IV and V presents the experimental results and concludes this work, respectively.

II. BACKGROUND

A. Stream processing tools

MOA is a software environment for developing and evaluating algorithms for online learning from data streams. It was designed to deal with the scaling up algorithms in the big data era. This tool provides algorithms for solving classification and clustering algorithms. For example, Hoeffding Trees, boosting, bagging for classification, StreamKM++, CluStream, and Clustree for clustering. MOA also provides several stream generators and evaluators for an experiment on the new algorithm design. It also cooperates with Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) tools for data analytics.

Scikit-multiflow is similar to MOA. It, however, provides multiple online algorithms for different stream learning issues, including single-output, multi-

output, and multi-label issues. It is worth noting that multi-label is about predicting various output variables (features) instead of a single target variable, the unique feature of this tool. One of the main reasons for making the Scikit-multiflow framework popular is its python friendliness, while MOA is only for JAVA.

StreamDM is also an open-source stream processing tool created at Huawei-Noah's Ark lab. This tool is built on top of the Apache spark streaming technology, which is the extension of the core Spark API and leverages the benefit of Hadoop opensource. StreamDM is implemented in Scala programming language, and it is claimed as the first tool that implements advanced methods on top of the Apache spark streaming.

B. Concept Drift

In dynamic and non-stationary environments, the concept drift [5] is the streaming data whose relation between the input data and the target variable (data means) changes over time. The concept drift harms learning models generated from the batch processing because the models generated from the batch processing causes very high errors, which is impractical in real usage. Figure 3 illustrates the behaviors of the various concept drift as follow:

1) Abrupt concept drift means the transition between the new and old concept (or data mean) is minimal, as shown in Figure 3a. The stock market shows this behavior when an unexpected event is coming.

2) Gradual concept drift means the intermediate concept continuously appears during the transition between new and old ones, as shown in Figure 3b. This behavior is quite natural to happen and addressed by time series models.

3) Incremental concept drift means the old and new concepts alternately concur during the transition period. Figure 3c depicts this behavior.

4) Recurring concept drift means the old concept is seen again, as shown in Figure 3d. The specific time in a year, such as New year, causes this behavior.

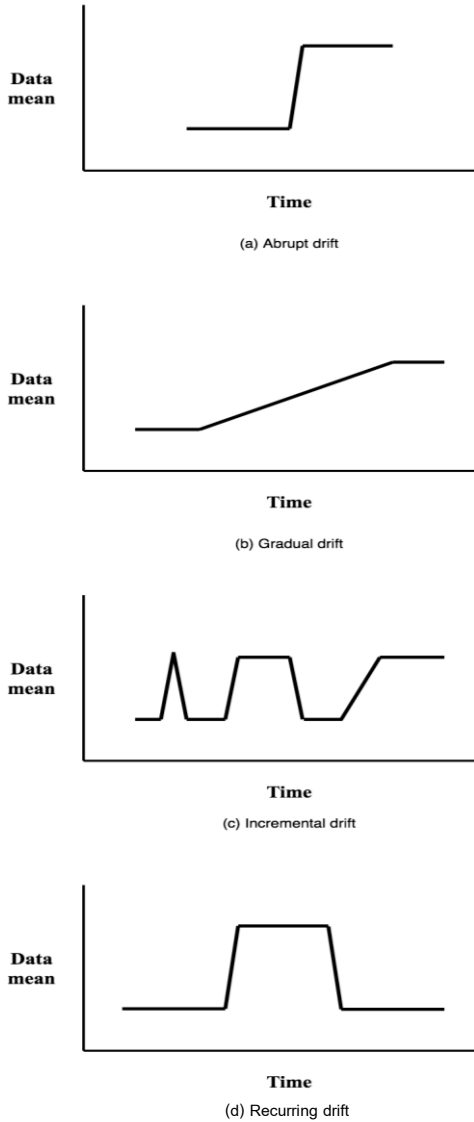


Figure 3 Concept drift behaviors

C. Evaluation method for Streaming processing

1) Holdout validation is the most popular and straightforward evaluation method. This method requires separate datasets into two sets: training and

testing set, e.g., 70% and 30%, respectively. The holdout validation method usually uses less computational time; it, however, generates the overfit problems.

2) Prequential evaluation [6]. For each streaming instance, this method requires first to predict the data, and if the label is known, it uses the predicted value and label for evaluation and then trains the model, as shown in Figure 2. For this reason, the accuracy of the existing model can be incrementally updated. The benefit of this method is that it does not require separating the data into two sets like the holdout method. Thus, this method can save more space than other methods. The limitation of this method is that it cannot depict changes in class distribution, such as concept drift. Eq (1) shows the prequential error at time i is based on the accumulated sum of a loss function l between the prediction y_k and actual value y_k .

$$p_e(i) = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i l(y_k, y_k) \quad (1)$$

3) Kappa [7] is the evaluation metric used for assessing the agreement between two raters who each classify N items into C mutually exclusive categorical items. This method is appropriated for evaluating the performance of the classification problems, especially with imbalanced data. The definition of Kappa is defined as

$$kappa = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \quad (2)$$

where $p_0 = \frac{\text{Sum of all agreements}}{N}$ is the relative observed agreement among raters, and $p_c = \frac{1}{N^2} \sum_k n_{k1} n_{k2}$ is the hypothetical probability of chance agreement, using the observed data to calculate the probabilities of each observer

randomly seeing each category, where k is categories (e.g., yes or no), N is a number of observations, and n_{ki} is the number of times rater i predicted category k .

The kappa's value is varied from a negative value to 1. If the value is 1, it means all raters are in complete agreement. If the value is 0, that means there is no agreement among all raters. If the value is negative, it means the agreement is worse than the random event.

To illustrate an example, let's assume the situation that two teachers, **T1** and **T2**, have to classify 50 students into two groups for some purposes. And, the result shows in the table below:

Table 1 Kappa example

		T2	
		yes	no
T1	yes	25	10
	no	10	5

Base on calculation, we found

$$p_0 = \frac{25+5}{50} = 0.6, \text{ and}$$

$$p_c = \left(\frac{n_{yes,T1}}{N} x \frac{n_{yes,T2}}{N} \right) + \left(\frac{n_{no,T1}}{N} x \frac{n_{no,T2}}{N} \right)$$

$$= \left(\frac{35}{50} x \frac{35}{50} \right) + \left(\frac{15}{50} x \frac{15}{50} \right)$$

$$= 0.49 + 0.09 = 0.58$$

Based on eq (1) calculation, $kappa = \frac{0.6-0.58}{1-0.58} = \frac{0.02}{0.42} = 0.05$. This value shows high disagreement between **T1** and **T2** for their classified decision.

III. PROBLEM STATEMENT

In this section, the problem statement is stated as follow,

(1) given, a set of algorithm A, including both online and batch algorithm, i.e., regressor, including

K-Nearest Neighbor (K-NN), Adaptive Random Forest Regressor (ARF_RE), Hoeffding Tree Regressor (HT_RE), and classifier, including Hoeffding Adaptive Tree (HAT) classifier, and Support Vector Machine (SVM) classifier.

(2) A target dataset D, which is comprised of synthesized and real-world data, both datasets are with/without concept drift behaviors.

(3) A collection of evaluation metrics M including Mean Squared Error, Kappa, F1-score, Model size (kB), and Training and Testing time (sec).

The objective of this study is to compare the performance of algorithms in set A, tested on the dataset D, and evaluated by the error metrics M.

IV. EXPERIMENTAL RESULT

In this section, we show the results on different experiments. We first compared the algorithm on the regression problem and then classification problem. We finally compared the algorithm on the concept drifts dataset, both synthesized and real-world data.

A. Regression problem Comparison

In this subsection, we compare three regression algorithms provided by Scikit-multiflow, including KNN (KNN), Adaptive Random Forest (ARF_RE), and Hoeffding Tree regressor (HT_REG). These three algorithms were first trained with 200 data samples and then evaluated on 1000 data samples generated by the built-in generators; the data contains 100 features and one target variable. We used three error metrics for the performance evaluation, including model size, running time, and Mean Squared Error (MSE). Figure 4 depicts that HT_REG shows the best performance since it has the lowest mean of MSE (29726.70), while ARF_RE shows the highest mean of MSE (38489.42). However, KNN shows the smallest

model size and running time over HT_REG and ARF_R, respectively.

B. Classification problem Comparison

In this subsection, we compared two classification algorithms, including Hoeffding Adaptive Tree (HAT), and Support Vector Machine (SVM), provided by Scikit-multiflow. We used Stream Ensemble Algorithm (SEA) generator to generate 20,000

samples. Each sample includes three features, one target, and two classes. These two algorithms were first trained with 200 samples and running time as the evaluation metrics for this classification comparison. Figure 5 illustrates that HAT shows the better F1 and kappa scores over the SVM algorithm. However, SVM is better than HAT in terms of model size and total running time.

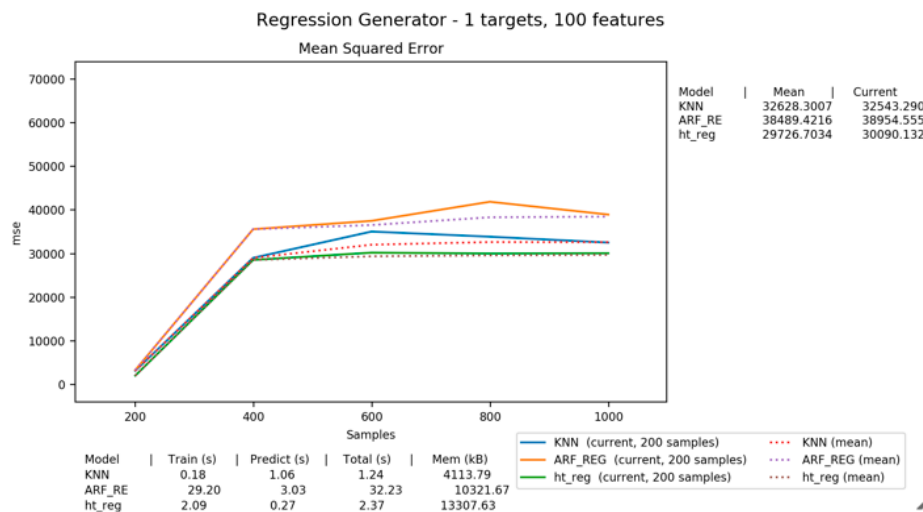


Figure 4 Comparing regression algorithms, including KNN, Adaptive Random Forest, and Hoeffding Tree algorithms

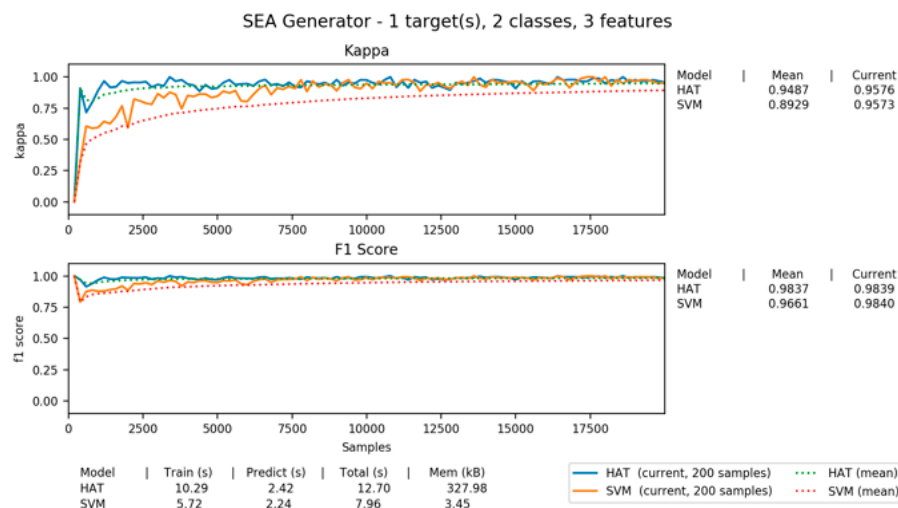


Figure 5 A comparison between Hoeffding Adaptive Tree (HAT) and Support Vector Machine (SVM) Algorithms in a classification problem

C. Concept Drift Comparison

In this subsection, we compared the two algorithms from the previous subsection, i.e., HAT and SVM, on the classification problem with two different datasets, including synthesized and real-world data integrated with the concept drift behaviors.

The synthesized concept-drift data was generated by a drifting Agrawal generator [8], composed of nine features, one target with two classes. The dataset is

about to determine whether the loan should be approved or not. Figure 6 depicts that HAT shows 200% improvement over SVM on accuracy and F1 scores, while nearly 1000% improvement over SVM on the kappa metric.

In particular, SVM's kappa shows a negative value which represents disagreement between actual and predicted values. However, the model's size of HAT is much larger than SVM, which is not the significant point of the streaming analytics.

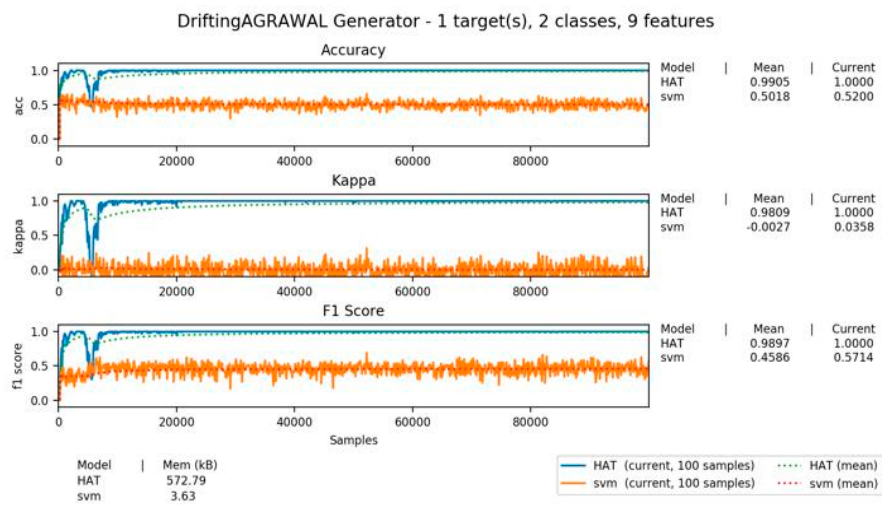


Figure 6 Real-world data of Concept drift comparison between HAT and SVM

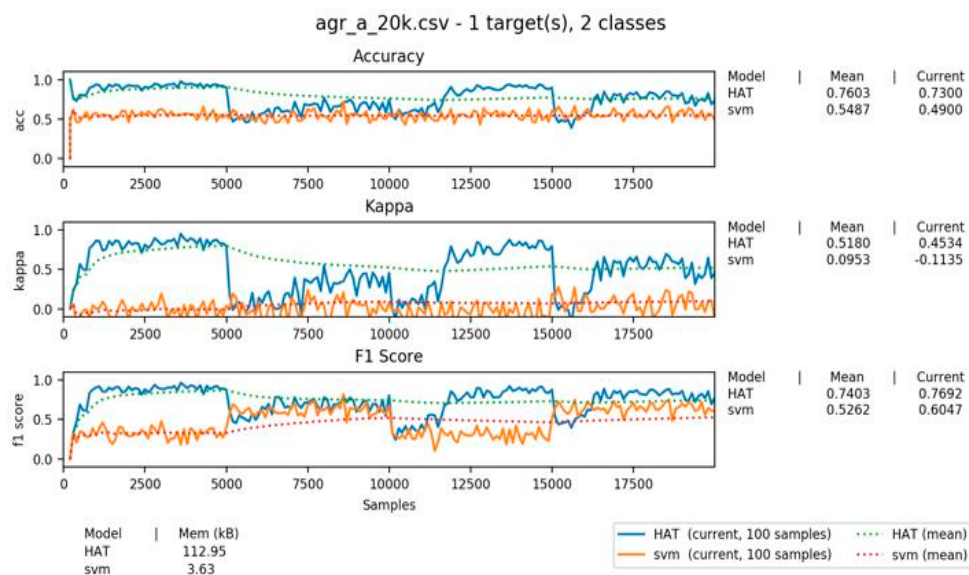


Figure 7 Synthesized data of Concept drift comparison between HAT and SVM



For the real-world streaming data, we used the `agr_a_20k.csv` file. Figure 7 depicts that HAT still shows about 40% improvement over SVM accuracy and F1 score, respectively. For the kappa metric, HAT shows a gain of nearly 500% over SVM.

However, in this experiment, SVM's kappa shows a positive value representing less agreement between actual and predicted values. However, the model's size of HAT is still larger than SVM. The results show that the different types of data, i.e., synthesized and real-world data, do not affect the testing algorithms.

From all experiments, the results illustrate that streaming algorithm such as Hoeffding Adaptive Tree (HAT) has the most performance compared to Support Vector Machine in the classification problem. At the same time, Hoeffding Tree Regressor delivers the most performance over K-Nearest Neighbor and Adaptive Random Forest algorithm in the regression problem. This is because the HAT algorithm is designed to handle the streaming data.

V. CONCLUSION

This study compares and evaluates streaming and traditional machine learning algorithms, including regression algorithms, such as Hoeffding Tree Regressor, KNN regressor, and classification algorithms, such as Hoeffding Adaptive Tree (Hat) algorithm, SVM, on streaming data with and without concept drift behaviors. We evaluate the performances of algorithms by several streaming error metrics, including Kappa, F1-score, etc. The results reveal that the Hoeffding Tree family outperformed the other algorithms because of the nature of the streaming algorithm, which incrementally updates its model's parameters based on data change. Future works will be conducted

more on other streaming algorithms with several datasets.

REFERENCES

- [1] A. Kejariwal, S. Kulkarni, and K. Ramasamy, "Real time analytics: Algorithms and systems," *VLDB Endowment*, vol. 8, no. 12, pp. 2040–2041, Aug. 2015.
- [2] A. Bifet, G. Holmes, R. Kirkby, and B. Pfahringer, "MOA: Massive online analysis," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 11, pp. 1601–1604, 2010.
- [3] J. Montiel, J. Read, A. Bifet, and T. Abdesslem, "Scikit-multiflow: A multi-output streaming framework," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 19, pp. 2915–2914, 2018.
- [4] A. Bifet, S. Maniu, J. Qian, G. Tian, C. He, and W. Fan, "Stream DM: Advanced data mining in spark streaming," in *Proc. IEEE Int. Conf. Data Mining Workshop (ICDMW)*, Atlantic City, NJ, USA, Nov. 14–17, 2015, pp. 1608–1611.
- [5] J. Gama, I. Zliobaite, A. Bifet, M. Pechenizkiy, and A. Bouchachia, "A survey on concept drift adaptation," *ACM Computing Surveys*, vol. 46, no. 4, pp. 1–37, Apr. 2014.
- [6] A. P. Dawid, "Present position and potential developments: Some personal views statistical theory the prequential approach," *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, vol. 147, no. 2, pp. 278–290, 1984.
- [7] J. Cohen, "A coefficient of agreement for nominal scales," *Educational and Psychological Measurement*, vol. 20, no. 1, pp. 37–46, Apr. 1960.
- [8] R. Agrawal, T. Imielinski, and A. Swami, "Database Mining: A performance perspective," *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 914–925, Dec. 1993.

Application of Swarm Intelligence for the Multi-Objective Optimization of the Thermodynamic Performance and Economic of Double Reheat Steam Power Plants

Somboon Sukpancharoen^{1*}

^{1}Division of Mechatronics and Robotics Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathum Thani 12110, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: somboon_s@rmutt.ac.th

Received: 23 March 2021; Revised: 4 May 2021; Accepted: 10 May 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

This paper seeks to employ swarm intelligence (SI) based algorithms to perform the multi-objective optimization of a steam power plant using double reheat and feedwater heaters. The analysis is carried out to take into consideration the 3E aspects of energy, exergy, and economy. The first and second laws of thermodynamics are applied in the analysis of the cycle and the optimization of both the thermal and exergy efficiencies. Assessment of the economic aspect involves consideration of the fixed and operating costs. Three SI algorithm were tested and the resulting system performance improvements in terms of 3E analysis were compared. The algorithms were the sparrow search algorithm (SSA), artificial jellyfish search (JS) optimizer, and cooperation search algorithm (CSA). The testing revealed that the SSA method approach offered the best search potential at the optimal cost, thus proving more economical than either of the alternative algorithms. Furthermore, when comparing the SSA method multi-objective optimization in the steam power plant with the based case, the respective improvements in thermal and exergy efficiency were from 48.9% to 49.54%, and from 46.13% to 48.06%, while the overall cost saving was 25.8%.

Keywords: Energy exergy and economic (3E) analysis, Thermodynamics modelling, Multi-objective optimization, Steam power plant, Swarm intelligence (SI)



I. INTRODUCTION

Electricity is generated all over the world using coal, oil, or natural gas as the fuel to produce the steam required for the process. The rate of energy consumption in the different countries worldwide can be used as an indicator that shows how developed those countries and the standard of living they have achieved [1].

The generation of electricity involves the conversion of one form of energy into another, and the total amount generated is currently trending upwards with annual global increases of about 2% to 3%. By 2030, it is anticipated that the total amount of electrical production will reach 30.3 billion kWh. The costs involved in this production will ultimately depend on the fuel used in the process and the power plant efficiency. For this reason, the cost function for a power plant will be defined in terms of the cost function for the fuel source involved [2].

To improve the operation of a power plant in terms of thermal efficiency, it is appropriate to begin by examining the feedwater heater network to create a more efficient design [3]. Much of the previous work has focused on applications of the first law of thermodynamics while disregarding the idea of irreversibility. Later studies have built upon that foundation by applying techniques based on equal enthalpy and temperature rises when designing the networks for the feedwater heaters [4]. This approach requires each heater to be designed independently before being added to the network of heaters. By integrating the feedwater heater design, the efficiency is greatly improved compared to conventional approaches, and it can be anticipated that the overall power plant thermal efficiency will also be enhanced as a result [2], [5].

Various techniques can be used to improve thermodynamic system efficiency. In particular, it can

be helpful to make adjustments to how to input heat interacts with the performance of mechanical work to manipulate the total energy loss within the system. The first law of thermodynamics or the principle of energy conservation is relevant here, in particular, because the form of energy involved is not significant. While the balance of energy adheres to the first law, however, heat and work differ in qualitative terms. Therefore, it is not appropriate to assess a thermodynamic system solely from a quantitative perspective if the efficiency is determined. Instead, the second law of thermodynamics must also be taken into consideration. This is the concept of exergy, and it allows the quality of the energy to be evaluated. Moreover, it is also possible to calculate irreversibility through this approach, as well as determining the level of useful energy. In summary, although it is possible to analyze pressure and temperature and their effects within the system using the first law, irreversibility is assessed using the exergy method. Finally, the extent to which economic value is linked to exergy can also be established [6].

When energy conversion systems undergo performance evaluations, energy analysis has typically been the most common approach employed, but more recently exergy utilization and destruction have drawn increasing attention [7]. Energy systems can be considered in terms of exergy analysis, while from an economic perspective, it is possible to use exergo-economic analysis, which is an engineering field that draws upon elements of exergy analysis in combination with economic theory [8]. For a broad analysis of thermal power plants covering different viewpoints, one of the most effective means of assessing performance is through 3E analysis (energy, exergy, and environmental) [9], [10].

In one such example, Lee et al. [11] studied the pure refrigeration cycle in the process of natural gas

liquefaction and sought to minimize the energy by focusing attention upon the system for subcooling and conducting thermodynamic analysis upon the upgrade. Based on this analysis, the design underwent optimization to minimize the consumption of energy by determining the ideal pressure, temperature, flow rate, and compression ratio. Having optimized the parameters of the system it was possible to reduce the consumption of energy by 17.74%.

An exergo-economic power plant analysis was conducted by Rosen and Dincer [12] with a specific focus on a coal-fired power station. This study determined that it is essential to consider the relationship between capital costs and thermodynamic loss [10], [12].

Oyedepo et al. [13] reported that it is possible to improve the Rankine cycle performance while minimizing the fuel consumption by altering the design to feature closed feedwater heaters. If the number of feedwater heaters is increased, it has been shown that the heat rate and fuel consumption will decline, along with the heat rejected in the condenser and the heat input to the cycle.

A reheat Rankine cycle steam power plant underwent thermodynamic analysis by Rashidi et al. The plant contained six feedwater heaters, of which three were high pressure and three were low pressure, where deaeration is performed. The application of the first and second laws of thermodynamics permitted the maximization of the first and second law efficiencies [1].

Engineers developing the equipment and operational processes for power plants are obliged to perform a number of thermodynamic calculations in mechanical and chemical engineering scenarios. Furthermore, it is necessary to use the repeated solutions of problems based on thermal efficiency and exergy efficiency when designing the systems and their operating parameters. There is a high degree of

complexity in these calculations due to the non-linear aspects of the thermodynamic models that explain the balance of mass, energy, and exergy, the potential nonconvexity of the objective thermodynamic functions, and the existence within the search space of trivial solutions. Such problems can be addressed using global optimization algorithms, which is an important field of study. One particular challenge is that the global minimum is often quite similar to local minima, and therefore global optimizers are particularly important [14].

One way to find solutions that are simultaneously optimized for a number of criteria is the multi-objective optimization approach [15], [16]. The optimization process can consider several different criteria; thermodynamic and economic factors must be taken into account, but it is important to note that if the focus is placed upon just one of these, the others may underperform to the detriment of the system. Only through simultaneous optimization can an advantageous outcome be obtained [17].

The complexity involved in designing optimal systems leads to the failure of conventional approaches to optimization. Such techniques tend to be lacking in efficiency or accuracy, and therefore it is necessary to develop novel optimization techniques that make use of artificial intelligence (AI) to quickly and accurately obtain global optima [18]–[21].

Rankine cycle optimization was studied by Elahifar et al. [2], who sought to maximize exergy efficiency. Some different algorithms were employed such as bee algorithm, firefly algorithm (FA), and teaching-learning-based (TLBO) optimization, with various parameters selected to serve as decision variables. The findings revealed that it is possible to improve exergy efficiency for the thermal power plant under investigation from 30.1% to 30.68%, 30.70368%, and 30.70369%, for each of the respective algorithms.

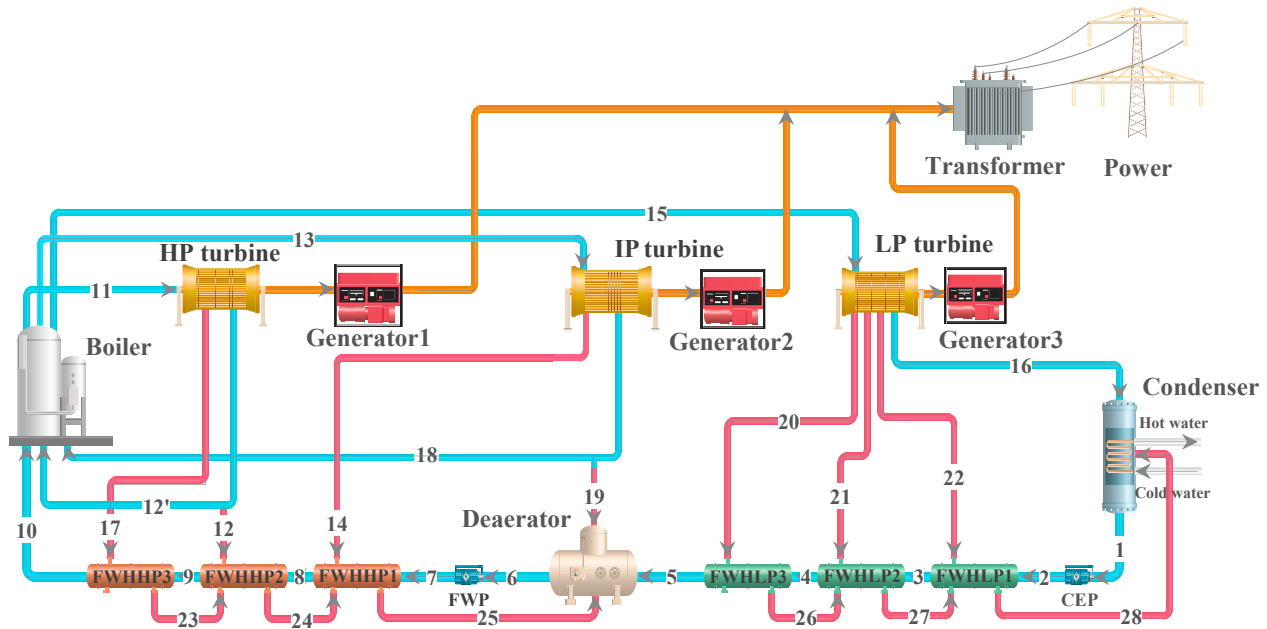


Figure 1 Schematic diagram showing the cycle of the double reheat steam power plant

One of the more effective optimization approaches is SI algorithm, which is based on the group behaviour patterns that result when individual members engage with their local environment. Functional global patterns are developed in such scenarios [21]. The SI algorithms which have been most widely applied to date include ant colony optimization (ACO) [22] and particle swarm optimization (PSO) [23].

However, while these algorithms have been relatively effective, the latest algorithms to be developed have shown even greater promise in analysing thermodynamic systems. These include the sparrow search algorithm (SSA) [24], Artificial Jellyfish Search (JS) optimizer [25], and Co-operation Search Algorithm (CSA) [26]. Therefore, this paper seeks to examine these latest algorithms in thermodynamic system analysis, like thermal efficiency, exergy efficiency, and economical cost, to optimize the system's performance and compare the effectiveness of the algorithms in achieving their results.

II. METHODOLOGY

A. Procedure depiction for the steam power plant using double reheat and feedwater heaters

The cycle flow sheet for the steam power plant from a previous study by Rashidi et al. [1] is presented in Figure 1, which consists of the condensate extraction pump (CEP), feedwater heaters with low pressure (FWHLP), feedwater heaters with high pressure (FWHHP), deaerator, feedwater pump (FWP), boiler, turbine, and the condenser. In the beginning, the pressure of the compressed liquid is increased by CEP, then its temperature is increased using FWHLP1, FWHLP2, and FWHLP3 which offer the heat transfer areas of 5.682, 4.219, and 3.321 m² respectively, to prepare the temperature and pressure conditions before introduction to the deaerator. The deaerator will remove oxygen and other dissolved gases from the liquids and pumpable compounds to prevent hazards to the boilers and turbines since the oxygen can cause the rapid corrosion of metal materials. The FWP and FWHHP1, FWHHP2, and FWHHP3, which have heat transfer areas of 17.112, 24.781, and 6.9 m²

respectively, also increase the steam temperature and pressure before sending to the boilers to lighten the load of the reboilers for heating the steam to a high temperature of 600°C at which liquid steam will be converted to superheated vapor steam. The electric power can then be produced from the turbine with high pressure (HPT), and two turbines at intermediate pressure (IPT) and low pressure (LPT). Finally, the waste steam vapor from the last LPT will be sent to the condenser to condense the waste steam vapor into a compressed liquid as a cycle operation process. Information and thermodynamics details from [1] will be used as a base case in this work to determine the optimization and improvement through the alteration of the mass flow rate and operating temperature for each stream (each pressure steam condition is the same as proposed by [1]). The objective function in work includes thermal, exergy efficiency, and economy with multiple objectives.

B. Thermodynamic modelling and economic evaluation

The equations are used with a numerical process in order to solve to determine temperature and the enthalpy of the flow within the power plant. The following assumptions are made in line with similar investigations [27]:

- The definition of the thermodynamic reference status holds that $P_0 = 1.01$ bar while $T_0 = 293.15$ K
- All processes are examined under conditions of steady-state and steady-flow.
- The equipment used in the power plant is assumed to be working in adiabatic conditions.
- The fuel used was natural gas, while the lower heating value (LHV) = 46,515 kJ/kg [28]
- The power plant machinery was assumed to operate for 7,776 hours per year.

- The respective isentropic efficiencies for the pump, HPT, and LPT were 0.8, 0.85, and 0.9
- The effects of potential and kinetic energy were disregarded
- Annual revenue, labour costs, utility costs, ash handling and fuel storage costs, electrical or civil works, and the treatment costs for fumes are all ignored for this study
- The cost estimates (fixed and operating) cover a one-year period.

1) Energy analysis:

By balancing energy and mass, the system energy analysis can be performed through Equations (1) and (2), which allow the energy analysis of each of the system components to be made. In open systems under steady-state conditions, the first law of thermodynamics applies, and Table 1 presents the energy equations for each of the various components.

$$\sum_{in} \dot{m}_i = \sum_{out} \dot{m}_o \quad (1)$$

$$\sum \dot{Q}_i + \dot{m} \left(h_i + \frac{C_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_o + \frac{C_o^2}{2} + gZ_o \right) + \dot{W} \quad (2)$$

in which $\dot{Q}_i$ represents the transfer of heat from the source to the system at temperature T_i , while the network of the system is represented by $\dot{W}$. The working fluid bulk velocity is given by C while Z shows the height above sea level of the stream and g indicates the specific force due to gravity.

2) Exergy analysis:

The second law of thermodynamics is employed to calculate exergy and to assess the system irreversibility. All of the procedures involved are irreversible. The exergy expression equations for each of the different streams are given as:

$$\dot{E}x_D = \sum_i \dot{m}_i ex_i - \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_Q + \dot{E}x_W \quad (3)$$

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \dot{Q}_i \quad (4)$$

$$\dot{E}x_w = \dot{W} \quad (5)$$

in which $\dot{E}x_D$, $\dot{E}x_Q$ and $\dot{E}x_w$ represent exergy destruction, exergy rates arising due to the heat transfer and the work occurring over the control volume boundaries, respectively

Only the physical exergy associated with the mass flows across the control volume is taken into account and calculated using:

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} + ex_k + ex_{po} \quad (6)$$

There is no need to consider the kinetic (ex_k) and potential exergies (ex_{po}) [29].

Physical exergy (ex_{ph}) can be calculated from the following formula:

$$ex_{ph} = \dot{m}(h - h_0) + T_0(s - s_0) \quad (7)$$

Chemical exergy (ex_{ch}) from the gas mixtures is calculated on the basis of:

$$ex_{mix}^{ch} = \sum_{i=1}^n x_i ex_i^{ch} + RT_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (8)$$

The equation (8) given above is not suitable for the calculation of fuel exergy, and instead the simplified version given below can be applied:

$$ex_{ch} = ex_{fuel} = \lambda (LHV_{fuel}) \quad (9)$$

Where the situation involves a gaseous fuel, it is possible to employ the experimental formula C_xH_y , which was put forward by Dincer and Rosen [12] for calculations as:

$$\lambda = 1.033 + 0.0169 \frac{y}{x} - \frac{0.0698}{x} \quad (10)$$

3) Economic analysis:

In performing the economic analysis for the power plant, the operating costs and the original capital investment are the key factors to be considered. The equipment costs include the acquisition of the steam turbine, boiler, and condenser, as well as the auxiliary

items including the feedwater pumps, heater, condensate extraction pumps, and deaerator. The cost of this equipment is fixed and given as C_F , which can be expressed in terms of the component redundancies in each case [30]:

$$C_F = f \left(\begin{matrix} C_{SB} + C_{ST} + C_C + n_{CEP} (C_{CEP}) \\ + n_{BFP} (C_{BFP}) + C_H + C_D \end{matrix} \right) \quad (11)$$

In which reference value f is 1.87.

The original cost of each of the items or components represented by C_{Fi} was determined empirically from [4], [31] as shown:

- Steam turbine

$$C_{ST} = 633000 (MWe)^{0.398} \quad (12)$$

- Condensate extraction pumps

$$C_{CEP} = 9000 (MWe)^{0.4425} \quad (13)$$

- Steam boiler

$$C_{SB} = 1340000 (MWe)^{0.694} \quad (14)$$

- Condenser

$$C_C = 398000 (MWe)^{0.333} \quad (15)$$

Where MWe is the work rate produced in the steam power plant at the turbine.

- Boiler feed pumps

$$C_{BFP} = 35000 (MWe)^{0.6107} \quad (16)$$

- Heater [32]

$$C_H = 6200 (10.764A)^{0.42} \quad (17)$$

Where A is the heat-transfer area (m^2), which has the range of 1.858-185.806 m^2 [32]

- Deaerator [33]

$$C_D = 0.958 M_{dea} + 30.0 \quad (18)$$

in which C_D represents the cost of the deaerator (\$1000)(2002), and M_{dea} indicates the design water mass flow emanating from the deaerator in kg/s [34].

Overall operational costs will cover items such as insurance, maintenance, and fuel feedstock shown as [4], [31]:

$$C_O = (m_F C_F + C_M + C_I) \quad (19)$$

in which C_O represents the total operating cost, and F is fuel, M is maintenance, and I is insurance. In this instance. Maintenance is 3% of the total fixed cost, while insurance amounts to 2.5% [4], [31].

The equations determining the energy and destruction of exergy for each cycle component can be seen in Table 1. Exergy destruction is also known as irreversibility and is determined by the process of entropy generation. Entropy serves as an indication of the degree of randomness which exists within a particular system. In cases where less exergy is destroyed, and entropy generation is low, a system can be considered more orderly and offers the greater potential to work effectively. Furthermore, ambient temperatures also influence the rate of exergy destruction or irreversibility since it has a role to play in the equations which determine exergy destruction rates. Irreversibility increases as the ambient temperature rises.

III. OPTIMIZATION

A. Multi-objective optimization (MOO) of the formulation

The overall MOO problem can be expressed as shown [35]:

Minimize or maximize:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$$

Subject to: $g_j(x) \leq 0; \quad j = 1, 2, \dots, m$

in which k enumerates the objective functions while inequality constraints are enumerated by m .

This study makes use of a weighted sum technique in addressing the problem, which requires the use of predetermined scalar weights w_i allowing the minimization of the composite objective function shown as:

$$U = \frac{w_1}{f_1} + \frac{w_2}{f_2} + w_3 f_3 \quad (20)$$

in which U represents the minimum multi-objective desirability value.

This study makes use of three fitness functions. The first relates to energy efficiency as indicated by Equation (21); the second addresses exergy efficiency as indicated by Equation (22), while the third relates to the overall cost as indicated by Equation (23). These objectives have equal weightings, and therefore each weighting (w_k) can be allocated a value of 0.33 for equality of all three objective functions. These functions are expressed as follows:

Maximize energy efficiency:

$$f_1(T_i, m_i, h_i)_{i=1-28} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{CEP} - \dot{W}_{FWP}}{\dot{Q}_B} \quad (21)$$

Maximize exergy efficiency:

$$f_2(T_i, m_i, h_i, s_i)_{i=1-28} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{CEP} - \dot{W}_{FWP}}{ex_{fuel}} \quad (22)$$

Minimize overall cost:

$$f_3(T_i)_{i=1-28} = C_F + C_O \quad (23)$$

Subject to:

$25 \leq T_1 \leq 45.85$	$25 \leq T_2 \leq 50$	$40 \leq T_3 \leq 90$
$75 \leq T_4 \leq 110$	$100 \leq T_5 \leq 135$	$186 \leq T_6 \leq 187.92$
$194 \leq T_7 \leq 194.15$	$205 \leq T_8 \leq 237$	$270 \leq T_9 \leq 296$
$328 \leq T_{10} \leq 341$	$388 \leq T_{12} \leq 400$	$388 \leq T_{12'} \leq 400$
$73 \leq T_{16} \leq 74$	$475 \leq T_{17} \leq 485$	$318 \leq T_{18} \leq 321$
$318 \leq T_{19} \leq 321$	$285 \leq T_{23} \leq 304$	$205 \leq T_{24} \leq 245$

$$195 \leq T_{25} \leq 203 \quad 80 \leq T_{26} \leq 116 \quad 44 \leq T_{27} \leq 94$$

$$30 \leq T_{28} \leq 55 \quad 33 \leq T_{HW} \leq 36$$

B. SI algorithm

1) The sparrow search algorithm (SSA):

One interesting novel algorithm based on the concept of SI algorithm is the SSA [24], which was first developed in 2020 by Xue and Shen. The model is based on the foraging activities of flocks of sparrows as they look for food. The algorithm continually provides updates of the latest positions of the designated scroungers and producers as they conduct their search, and these updates are assessed to determine the optimal outcome through consideration of the fitness values.

The producer in the SSA generates foraging instructions for the whole sparrow population. The locations of discoverers are updated using a formula (24) which ensures that the algorithm cannot simply

converge to the origin when attempting to optimize, and thus global optimization performance is improved. The following equation is used for the updates of the position of the producer:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times (1+Q) & \text{if } R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + (Q \times L) & \text{if } R_2 \geq ST \end{cases} \quad (24)$$

In this form, the current number of iterations is given by t , while $iter_{\max}$ shows the maximum permissible number for those iterations. $X_{i,j}^t$ indicates the location details for the i^{th} sparrow positioned in the j^{th} dimension, while $\alpha \in (0,1]$ is simply a random number. The respective roles of R_2 ($R_2 \in [0,1]$) and ST ($ST \in [0.5,1]$) are to show the warning value and safety value. Q is a normally distributed random number while L is representative of a matrix which has a single element.

Table 1 Expression for energy efficiency, exergy efficiency, and exergy destruction rate and for double reheat steam power plant components

Equipment	Energy Balance Equations	Exergy Destruction Rate Equations	Exergy Efficiency
FWHLP1	$(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_3 - h_2) + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{22})h_{28} - (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21})h_{27} - \dot{m}_7 h_{27} = 0$	$\dot{I}_{FWHLP1} = -T_0[(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(s_2 - s_3) + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21})s_{27} + \dot{m}_7 s_{22} - (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{22})s_{28}]$	$\eta_{e,FWHLP1} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHLP1}}{\psi_{in,FWHLP1}}$
FWHLP2	$(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_4 - h_3) + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21})h_{27} - \dot{m}_{20}h_{26} - \dot{m}_{21}h_{21} = 0$	$\dot{I}_{FWHLP2} = -T_0[(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(s_3 - s_4) + \dot{m}_{20}s_{26} + \dot{m}_{21}s_{21} - (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21})s_{27}]$	$\eta_{e,FWHLP2} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHLP2}}{\psi_{in,FWHLP2}}$
FWHLP3	$(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_5 - h_4) + (h_{26} - h_{20})\dot{m}_{20} = 0$	$\dot{I}_{FWHLP3} = -T_0[(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(s_4 - s_5) + (s_{20} + s_{26})\dot{m}_{20}]$	$\eta_{e,FWHLP3} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHLP3}}{\psi_{in,FWHLP3}}$
Deaerator	$\dot{m}_{19}h_9 + (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{14})h_{25} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})h_5 - \dot{m}_6 h_6 = 0$	$\dot{I}_{Deaerator} = -T_0[\dot{m}_{19}s_{19} + (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{14})s_{25} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})s_5 - \dot{m}_6 s_6]$	$\eta_{e,Deaerator} = 1 - \frac{\dot{I}_{Deaerator}}{\psi_{in,Deaerator}}$
FWHHP1	$\dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{14}h_{14} + (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12})h_{24} - (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{14})h_{25} = 0$	$\dot{I}_{FWHHP1} = -T_0[\dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{14}s_{14} + (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12})s_{24} - \dot{m}_8 s_8 - (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{14})s_{25}]$	$\eta_{e,FWHHP1} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHHP1}}{\psi_{in,FWHHP1}}$
FWHHP2	$\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{17}h_{23} + \dot{m}_{12}h_{12} - (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12})h_{24} = 0$	$\dot{I}_{FWHHP2} = -T_0[\dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{17}s_{23} + \dot{m}_{12}s_{12} - \dot{m}_9 s_9 - (\dot{m}_{17} + \dot{m}_{12})s_{24}]$	$\eta_{e,FWHHP2} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHHP2}}{\psi_{in,FWHHP2}}$
FWHHP3	$\dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{23}) = 0$	$\dot{I}_{FWHHP3} = -T_0[\dot{m}_9 s_9 - \dot{m}_{10}s_{10} + \dot{m}_{17}(s_{17} - s_{23})]$	$\eta_{e,FWHHP3} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWHHP3}}{\psi_{in,FWHHP3}}$

Table 1 Expression for energy efficiency, exergy efficiency, and exergy destruction rate and for double reheat steam power plant components (cont.)

Equipment	Energy Balance Equations	Exergy Destruction Rate Equations	Exergy Efficiency
Condenser	$\dot{q}_C = (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22})h_{16} + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{22})h_{28} - (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})h_1$	$\dot{I}_C = \{(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22})h_{16} + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{22})h_{28} - (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})h_1\} - T_0\{(\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22})s_{16} + (\dot{m}_{20} + \dot{m}_{21} + \dot{m}_{22})s_{28} - (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})s_1\} + \dot{m}_{w.in}\{(h_{w.in} - h_{w.out}) - T_0(s_{w.in} - s_{w.out})\}$	$\eta_{\varepsilon,C} = 1 - \frac{\dot{I}_C}{\dot{\psi}_{in,C}}$
Boiler	$\dot{q}_B = \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_{10}h_{10} + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_{13} - h_{12'}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_{15} - h_{18})$	$\dot{I}_B = \{\dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_{12'} - h_{13}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(h_{18} - h_{15}) - T_0[(s_{10} - s_{11}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(s_{12'} - s_{13}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})(s_{18} - s_{15})]\} + \dot{q}_B(1 - \frac{T_0}{T_B})$	$\eta_{\varepsilon,B} = 1 - \frac{\dot{I}_B}{ex_{fuel}}$
FWP	$\dot{W}_{FWP} = \dot{m}_7(h_7 - h_6)$	$\dot{W}_{FWP} = \dot{m}_7[(h_6 - h_7) - T_0(s_6 - s_7)] + \dot{W}_{FWP} $	$\eta_{\varepsilon,FWP} = 1 - \frac{\dot{I}_{FWP}}{\dot{W}_{FWP}}$
CEP	$\dot{W}_{CEP} = (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19}) \times (h_2 - h_1)$	$\dot{I}_{CEP} = (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19})[(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2)] + \dot{W}_{CEP} $	$\eta_{\varepsilon,CEP} = 1 - \frac{\dot{I}_{CEP}}{\dot{W}_{CEP}}$
Turbine	$\dot{W}_t = \{\dot{m}_{11}(h_{11} - h_{17}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17})(h_{17} - h_{12}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12})(h_{13} - h_{14}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19}) \times (h_{15} - h_{20}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20}) \times (h_{20} - h_{21}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21})(h_{21} - h_{22}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22})(h_{22} - h_{16})\}$	$\dot{I}_t = \{-T_0[\dot{m}_{11}(s_{11} - s_{17}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17})(s_{17} - s_{12}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12})(s_{13} - s_{14}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14})(s_{14} - s_{18}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19}) \times (s_{15} - s_{20}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20}) \times (s_{20} - s_{21}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21})(s_{21} - s_{22}) + (\dot{m}_{10} - \dot{m}_{17} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{19} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} - \dot{m}_{22})(s_{22} - s_{16})]\}$	$\eta_{\varepsilon,t} = 1 - \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_t + \dot{I}_t}$

The scrounger locations are then updated as shown:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{t^2}\right) & \text{if } i < \frac{n}{2} \\ X_P^{t+1} + |X_{i,j}^{t+1} - X_P^{t+1}| \times A^+ \times L & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

This formula X_P represents the best location reached by the current producer while X_{worst} indicates the worst location currently occupied globally. A represents a matrix of $1 \times d$ in which the elements are each given a random value of either 1 or -1, so that $A^+ = A^T (AA^T)^{-1}$

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta \times |X_{i,j}^t - X_{best}^t| & \text{if } f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \times \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}\right) & \text{if } f_i = f_g \end{cases} \quad (26)$$

In this case, the current global optimum is given by X_{best} while β serves as a parameter of step-length

control with a normal distribution of mean 0 and variance 1. The direction taken by each sparrow is given by K while f_i is the fitness value for the current sparrow and f_g indicates the best current fitness value while f_w is the worst current fitness value. Finally, ε indicates the smallest constant.

Algorithm 1 The framework of the SSA [24]

Input:

Initialize a population of n sparrows and define its relevant parameters including G (the maximum iterations), PD (the number of producers), SD (the number of sparrows n),

Output: x_{best}, f_g .

1. while ($t < G$)
2. Place the fitness values in order, identifying the current best and current worst items;
3. $R_2 = rand(1)$
4. for $i = 1:PD$
5. Update the location of the sparrow via Equation (24);
6. end for
7. for $i = (PD+1):n$
8. Update the location of the sparrow via Equation (25);

Algorithm 1 The framework of the SSA [24] (cont.)

```

9. end for
10. for  $i = 1:SD$ 
11. Update the location of the sparrow via Equation (26);
12. end for
13. Obtain the latest current location;
14. In the event that this new location is superior to the
    previous location, it should be updated;
15.  $t = t+1$ 
16. end while
17. return  $x_{best}, f_g$ 

```

2) The artificial jellyfish search (JS) optimizer:

Another example among the latest meta-heuristic SI algorithm approaches is the JS, which is based on the behavioural tendencies of jellyfish. It was created by Chou and Truong in 2020. To simulate the behavior of jellyfish swarms in the ocean, it is necessary to model the activity of each jellyfish and the sea current at any given moment, along with implementing a means of control for the timing of the actions. JS achieves optimized convergence through balancing the activities of exploration and utilization within the search area. In the open ocean, jellyfish move to search for food, and therefore they are inclined to move constantly towards areas rich in food. A more detailed explanation of the workings of the JS optimizer can be found in [25].

3) Cooperation search algorithm (CSA):

In 2020, Feng et al. created a novel algorithm known as CSA, and it is based on the nature of collaborative activity in modern organizations. Initially, a random set of potential solutions is generated within the search space before three operators are allowed to run until the predetermined stopping criterion is reached. The first operator is the team communication operator in which the list headed Algorithm 1 presents the details of the procedure for implementing CSA enhances global exploration and serves to identify the search area with the greatest potential. Second is the reflective

learning operator which serves to balance the exploration and exploitation activities. Finally, the internal competition operator selects solutions which offer the greatest potential for subsequent cycles. More details concerning the CSA can be found in [26].

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The 3E analysis for the steam power plant based on energy efficiency, exergy efficiency, and economic evaluation is calculated and optimized using the parameters of temperature, pressure, enthalpy, and entropy via thermodynamic and economic modelling using MATLAB software R2021a (Master License: 31557780). The balance of mass and energy, and exergy can be determined for all of the plant equipment, while the decision variable of the calculations is the temperature of each of the streams.

The running performance can be assessed by running the test 30 times using each algorithm under the same fitness conditions governing the initial iteration in the case of each of the three algorithms, including SSA, JS, and CSA methods. The set up was arranged such that the population size was 50 and the maximum iterations amounted to 500. The MATLAB software was then used to run the optimizations using the SSA, JS, and CSA methods. The solutions are presented in terms of the multi-objective desirability value (U), which is summarized in Table 2 based on the statistical data for the different algorithms.

In conclusion, SSA was found to offer the best performance in searching for solutions and determining global (or near-global) optima and therefore achieved the leading multi-objective desirability value (U). The robustness of SSA was also superior to JS and CSA methods as evidenced from the standard deviation (SD.). In terms of central processing unit time (CPU. Time), the three algorithms produced broadly similar results.

The best solution performance from the 30 runs was selected for each of the three algorithms, and the association between the multi-objective desirability value (U) and the number of iterations was determined in order to assess the convergence rate for the solution, as can be seen in Figure 2. For the best solutions of SSA, JS, and CSA methods, the number of iterations amounted to 261, 299, and 157, respectively. Although CSA had a significantly faster convergence rate, its optimal results were not satisfactory, at 2,060,496, while SSA achieved a superior outcome of 2,037,752 and JS was also better at 2,057,431.

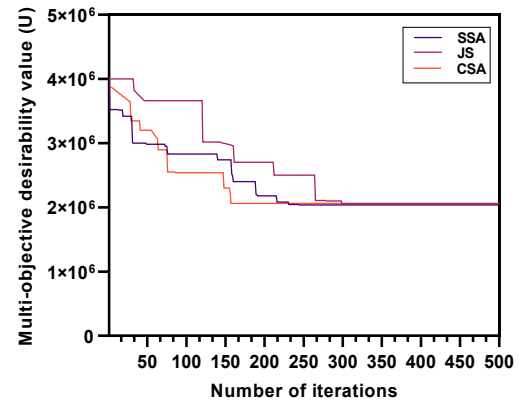


Figure 2 Convergence rate characteristics of multi-objective desirability value (U) for the three different algorithms.

Table 2 Statistical results in the double reheat steam power plant using the three different algorithms

SI algorithm	SSA	JS	CSA
Mean	2,042,636	2,063,922	2,065,366
Best	2,037,752	2,057,431	2,060,496
Worst	2,064,751	2,087,596	2,086,261
SD.	8,157.266	11,180.78	9,177.15
CPU. average time	65.48 s	63.57 s	66.41 s

For the optimal values reported, the decision variables from the MATLAB software and the test results from the SSA, JS, and CSA methods and from [1] can be seen in Table 3. In Table 3 the temperature and mass flow rate values of each of the streams prior to optimization are presented [1], and the same parameter values are shown following optimization via SSA, JS, and CSA methods. The thermodynamic operational properties for the different streams in the steam are shown in Table 4 under SSA.

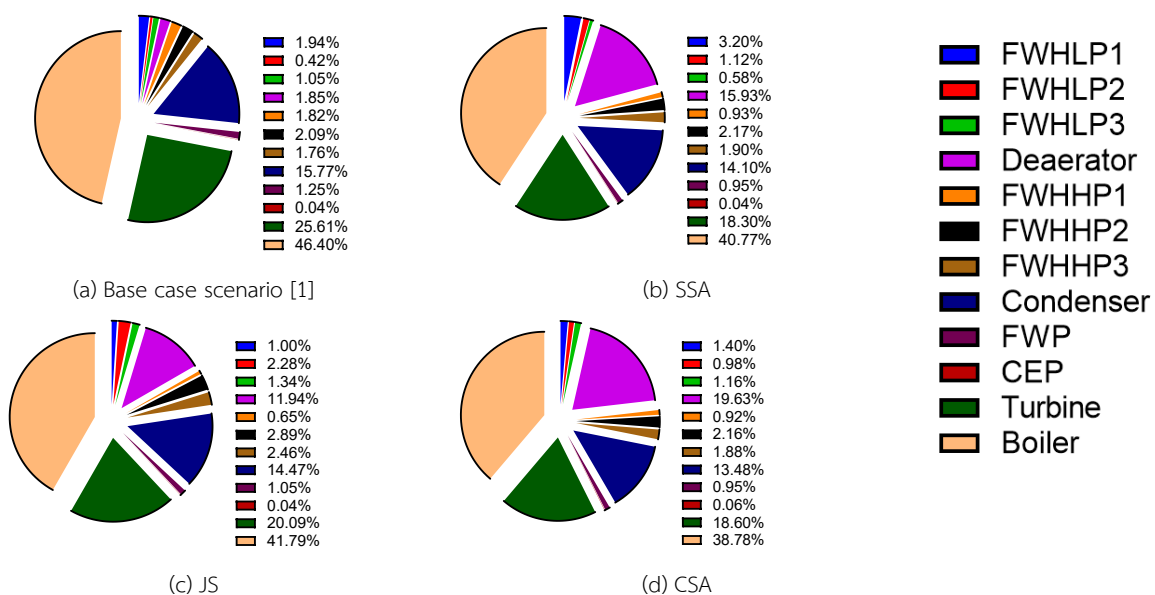


Figure 3 The destruction of exergy in steam power plants with double reheat

Table 5 indicates that the power balance based on the steam power plant with double reheat for the three algorithms SSA, JS, and CSA methods, has a higher duty at the boiler and the condenser than reported by [1]. This is because the inlet temperature at the boiler (stream 10) of all three algorithms obtained from calculations using the MATLAB tool is lower than the values obtained by [1] (shown in Table 3.), resulting in higher energy requirements for heating the temperature steam to 600°C. In addition, it can be observed that the three algorithms also have the higher condenser duty than traditional work due to their large differences in temperature output (stream 1) and input (stream 16) of the condenser is greater than for traditional work, resulting in a greater energy requirement for cooling the steam down. Accordingly, this increases the utility cost since a more incredible amount of energy is necessary. However, when considering the steam turbine, which has the role of obtaining heat energy from the pressurized steam before converting it to mechanical work, three algorithms can promote the energy produced from [1], which amounts to only 1,311.5 kW due to the greater mass flow rate of the three algorithms at the inlet (stream 15) of the LP turbine

which is the main component in producing energy. The turbine power output can be expressed in the form of the mass flow rate of the working substance and the enthalpy drop, which appears as $P_{op} = \dot{m}_w \Delta h$, in which $\Delta h = h_{in} - h_{out}$.

Exergy destruction in the steam power plant with double reheat shown in Figure 3 demonstrates that within the power plant, the boiler, turbine, condenser, and deaerator are sources of exergy destruction as shown in the percentage fraction pie chart. The greatest exergy destruction of the based case and all algorithms were due to the boiler since the boiler system is the main destroyer of exergy from high-temperature operations [36]. Since this work set the ambient temperature at 25°C while the boiler is operated at 600°C, the lower ambient temperature can cause an increase in the irreversibility rate of the boiler. It is noteworthy that there is no need to consider the reference environment state when performing the calculations for any alteration in a thermodynamic property (analysis of the first law), although it does influence exergy (analysis of the second law).

Table 3 The decision variables for each of the streams prior to and following optimization

Stream	Before Optimization			After Optimization each algorithm					
	Base case scenario [1]			SSA		JS		CSA	
	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	Phase	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)
1	0.6416	45.79	C	0.6532	27.67	0.647	29.26	0.6612	34.75
2	0.6416	45.9	C	0.6532	27.77	0.647	29.37	0.6612	34.91
3	0.6416	85.99	C	0.6532	77.73	0.647	43.91	0.6612	63.12
4	0.6416	107.6	C	0.6532	101.01	0.647	79.55	0.6612	83.87
5	0.6416	134.6	C	0.6532	114.56	0.647	100.61	0.6612	104.78
6	1	187.9	C	0.97	187.92	0.9935	187.92	0.9817	187.92
7	1	194.1	C	0.97	194.05	0.9935	194.05	0.9817	194.05
8	1	236.8	C	0.97	217.42	0.9935	205.88	0.9817	217.42
9	1	295.7	C	0.97	281.30	0.9935	272.13	0.9817	281.40
10	1	340.8	C	0.97	336.23	0.9935	329.76	0.9817	336.25

Table 3 The decision variables for each of the streams prior to and following optimization (cont.)

Stream	Before Optimization			After Optimization each algorithm					
	Base case scenario [1]			SSA		JS		CSA	
	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	Phase	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)
11	1	600	V	0.97	600.00	0.9935	600.00	0.9817	600.00
12	0.1165	395.5	V	0.1067	389.43	0.1093	389.43	0.108	389.43
12'	0.7545	395.5	V	0.7178	389.43	0.7352	389.43	0.7265	389.43
13	0.7545	600	V	0.7178	600.00	0.7352	600.00	0.7265	600.00
14	0.05638	452.2	V	0.0287	452.23	0.0147	452.23	0.0291	452.23
15	0.6416	600	V	0.6532	600.00	0.647	600.00	0.6611	600.00
16	0.5575	73.35	V	0.5552	73.49	0.5823	73.49	0.595	73.49
17	0.1289	483.3	V	0.1455	476.73	0.149	476.73	0.1473	476.73
18	0.6416	320.1	V	0.6532	319.97	0.647	319.97	0.6611	319.97
19	0.05653	320.1	V	0.0359	319.97	0.0735	319.97	0.0363	319.97
20	0.0262	406.6	V	0.0131	406.57	0.0194	406.57	0.0198	406.57
21	0.002087	303.7	V	0.0588	303.68	0.0323	303.68	0.0198	303.68
22	0.037	222.5	V	0.0261	222.43	0.0129	222.43	0.0264	222.43
23	0.1289	303.7	C	0.1455	295.67	0.149	286.93	0.1473	296.24
24	0.2455	244.8	C	0.2522	218.42	0.2583	206.88	0.2553	218.42
25	0.3019	202.1	C	0.2809	195.05	0.273	195.05	0.2843	195.05
26	0.0262	115.6	C	0.0131	102.01	0.0194	80.55	0.0198	84.87
27	0.04707	93.99	C	0.0719	109.63	0.0518	44.91	0.0397	64.12
28	0.08407	53.9	C	0.098	87.99	0.0647	30.37	0.0661	35.91
Cold water	32.65	25	C	40	25.00	40	25.00	40	25.00
Hot water	32.65	35	C	40	33.68	40	33.76	40	33.87

Where V represent superheated vapor steam and C represent the compressed liquid steam

Table 4 Thermodynamic properties of the double reheat steam power plant obtained using SSA for each of the streams

Stream	$\dot{m}$ (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	Phase	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	Ψ (kJ/kg.K)
1	0.6532	10	27.67	C	116.01	0.404	0.136
2	0.6532	1,199	27.77	C	117.519	0.406	0.732
3	0.6532	1,199	77.73	C	326.349	1.048	12.109
4	0.6532	1,199	101.01	C	424.181	1.318	23.43
5	0.6532	1,199	114.56	C	481.426	1.468	31.61
6	0.97	1,199	187.92	C	798.3	2.216	137.983
7	0.97	30,000	194.05	C	839.289	2.234	172.536
8	0.97	30,000	217.42	C	941.563	2.448	209.852
9	0.97	30,000	281.30	C	1,235.865	3.011	332.502
10	0.97	30,000	336.23	C	1,524.784	3.507	469.308
11	0.97	30,000	600.00	V	3,446.872	6.237	1,544.202

Table 4 Thermodynamic properties of the double reheat steam power plant obtained using SSA for each of the streams (cont.)

Stream	$\dot{m}$ (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	Phase	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	Ψ (kJ/kg.K)
12	0.1067	8,307	389.43	V	3,102.6	6.295	131.283
12'	0.7178	8,307	389.43	V	3,102.6	6.295	883.179
13	0.7178	8,307	600.00	V	3,639.894	7.002	1,117.541
14	0.0287	3,277	452.23	V	3,345.954	7.048	35.853
15	0.6532	1,199	600.00	V	3,696.998	7.946	870.421
16	0.5552	10	73.49	V	2,636.925	8.308	91.356
17	0.1455	15,121	476.73	V	3,240.031	6.252	200.884
18	0.6532	1,199	319.97	V	3,089.638	7.108	636.895
19	0.0359	1,199	319.97	V	3,089.638	7.108	35.004
20	0.0131	327.7	406.57	V	3,288.695	8.014	11.842
21	0.0588	141.6	303.68	V	3,080.948	8.068	39.991
22	0.0261	65	222.43	V	2,921.195	8.128	13.115
23	0.1455	15,121	295.67	C	1,314.489	3.186	53.724
24	0.2522	8,307	218.42	C	938.149	2.492	50.392
25	0.2809	3,277	195.05	C	830.956	2.281	43.687
26	0.0131	3,277	102.01	C	429.949	1.327	0.51
27	0.0719	141.6	109.63	V	2,690.505	7.242	38.535
28	0.098	65	87.99	C	368.514	1.169	2.413
Cold water	40	101	25.00	C	104.929	0.367	6.345
Hot water	40	101	33.68	C	141.214	0.487	26.625

Where V represent superheated vapor and C represent the compressed liquid

Table 5 The power of main equipment in the double reheat steam power plant process

Equipment	Base case scenario [1]	SSA	JS	CSA
Boiler (kW)	2,581	2,646.382	2,734.23	2,678.32
Condenser (kW)	1,312	1,450.872	1,464.258	1,482.46
Turbine (kW)	1,311.5	1,351.66	1,377.247	1,381.27
Feed water pump (kW)	41.18	39.76	40.72	40.24
Condense extraction pump (kW)	1.7	0.993	0.9963	1.17

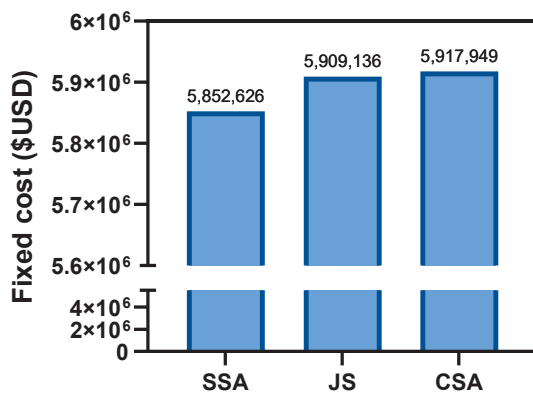
Therefore, these conditions should enhance the performance of the boiler and bring about a significant rise in the efficiency of the plant. This issue can be reduced by preheating the steam before sending it to the boiler [37]. In the case of exergy being destroyed within the system's heat exchangers, such as the condenser or the feedwater heater, this occurs because of the substantial difference in temperature

between hot fluids and cold fluids. The three algorithms achieve slightly lower exergy destruction than in the base case scenario [1], and this suggests that the rate of irreversibility for the turbine is lower than was the case in the study conducted by [1].

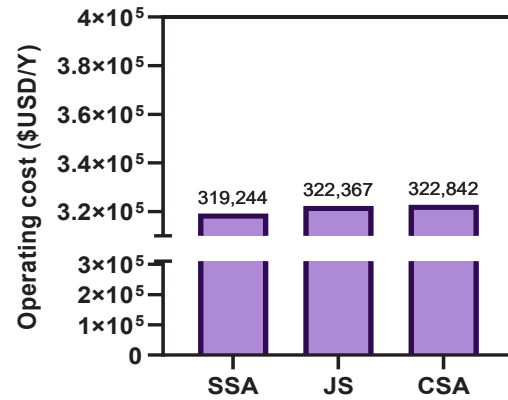
The fixed cost in this paper was calculated from the equipment purchase cost (Eqs. 11-18) and also the operating cost which is calculated from maintenance,

insurance, and purchase of fuel feedstock (Eq. 19) and can be seen in Figure 4 (a).

The comparison of the operating cost of the three algorithms in Figure 4 (b) indicates that the highest fixed cost and operating cost is for the CSA, because of the high duty energy consumption of the boiler and the condenser shown respectively in Table 5 as 2,678.32 kW and 1,482.46 kW. Additionally, the highest 1,381.27 kW energy produced from the CSA turbine significantly increases the fixed cost due to the energy produced being a function of the fixed cost Equations 11-18 for many items of equipment. The power balance in the turbine is 1,377.247 kW and 1,351.66 kW of energy produced for the JS and SSA methods, respectively, which are less than for the CSA. In contrast, SSA has the lowest fixed cost including the operating cost when compared with JS and CSA. That means that SSA used the lowest amount of fuel, and also had the lowest fixed cost which can result in the lowest operating cost due to the fixed cost being a function of the operational cost. In the meantime, SSA can still maintain the efficiency of energy produced when compared with JS that has a higher fixed cost and operating cost. These hints can imply that SSA is an appropriate choice for this steam power plant when considering the economic aspect.



(a)



(b)

Figure 4 Steam power plant economic evaluation using double reheat (a) Fixed cost (\$USD), (b) Operating cost (\$USD/yr)

Table 6 indicates that the three algorithms have a higher enthalpy efficiency and exergy efficiency than in the base case except for the enthalpy efficiency of JS which is slightly lower than [1] by 0.06%. This means the three algorithms can wisely use the amount of heated steam at constant pressure for heat transferring in the six heat exchangers in a manner that improved upon the pre-optimization conditions. In addition, the three algorithms can show that this steam power plant optimized the maximum level of useful work obtained within a given process in which the system obtains a dead state. Thus, one may infer that the three algorithms successfully improve both the enthalpy efficiency and the exergy efficiency from the work of [1].

After the three algorithms' optimization results revealed that the CSA has the highest enthalpy efficiency and exergy efficiency at 50.03% and 48.53% respectively, the reduced level of exergy destruction seen in Figure 3 is likely to offer a substantial advantage in terms of exergy efficiency. It is possible to define this exergy efficiency in terms of only physical exergy while ignoring kinetic and potential exergy components since their lack of size renders them insignificant. It is possible

to offer the description of physical exergy as the maximum theoretically feasible extent of useful work that a system might accomplish during its interaction with an equilibrium state. Significantly, the overall performance should have its basis in efficiency as defined by the second law of thermodynamics, which can be applied to describe exergy efficiency, whereas the first law is only concerned with energy efficiency [36]. Consequently, the JS has the lowest efficiency compared with the other two algorithms, but it still offers better exergy efficiency than in the work of base case scenario [1]. However, the SSA is most valuable

when considering the economic cost because the SSA has enthalpy efficiency slightly different from the CSA by 0.49%. In the meantime, the exergy efficiency difference between SSA and CSA is 0.47%. Thus, the SSA method can achieve cost savings of up to \$USD 68,921. According to the multi-objective desirability value (U) of SSA, which was the lowest value in comparison with JS and CSA, it makes sense that we can choose SSA as the best algorithm among the three for the reasons mentioned in order to achieve steam power plant improvement.

Table 6 3E analysis resulted from the different optimization algorithm

3E analysis	Base case scenario [1]	SSA	JS	CSA
Enthalpy efficiency	48.90%	49.54%	48.84%	50.03%
Exergy efficiency	46.13%	48.06%	47.38%	48.53%
Economic cost (\$USD)	-	6,175,006	6,234,639	6,243,927
Multi-objective desirability value (U)		2,037,752	2,057,431	2,060,496

V. CONCLUSION

An analysis was carried out to examine the 3E aspects of a steam power plant which used double reheat and feedwater heaters. The energy, exergy, and economic factors were addressed using multi-objective optimization via SI algorithm including SSA, JS, and CSA methods. When comparing the results with those of [1], which is defined as a base case in this work, it was found that the optimal results were achieved using SSA method in terms of search performance and the achievement of global optima. Accordingly, SSA method achieved a fitness of 2,037,752, which represented the best multi-objective desirability value (U) obtained from a trial set of 30 runs. The SSA method also offered superior robustness compared to JS and CSA methods, taking the SD. values as evidence. The three algorithms showed little difference when their CPU. times were evaluated, while none of the three algorithms could successfully solve the issue of

exergy destruction at the boiler, although it is well known that the boiler is the main site where exergy destruction takes place when the system is operated at high temperatures. However, all three algorithms were able to support the energy production of turbine power with SSA, JS, and CSA methods achieving 1,351.66 kW, 1,377.247 kW, and 1,381.27 kW respectively, which compares favorably with the base case which reported 1,311.5 kW. One further advantage of the three algorithms is that all three were able to make effective use of the heated steam at constant pressure when performing transfers among the six heat exchangers, since enthalpy and exergy efficiencies were increased significantly by the algorithms. The sole exception came in the case of JS, for which the enthalpy efficiency was the lowest among those algorithms. From the economic perspective, SSA delivered reduced costs by up to \$USD 68,921. Finally, SSA's multi-objective desirability value (U) was the lowest among

the three algorithms, leading to the conclusion that SSA method would be more appropriate than JS or CSA methods. From these findings, it is possible to conclude that 3E analysis can be effectively performed using a SI algorithms technique. It was found that multi-objective optimization analysis could be employed to further improve upon the result from previous study [1].

REFERENCES

- [1] M. M. Rashidi, A. Aghagoli, and M. Ali, "Thermodynamic analysis of a steam power plant with double reheat and feed water heaters," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 1–11, Mar. 2014.
- [2] S. Elahifar, E. Assareh, and R. Moltames, "Exergy analysis and thermodynamic optimisation of a steam power plant-based Rankine cycle system using intelligent optimisation algorithms," *Australian Journal of Mechanical Engineering*, pp. 1–12, Sep. 2019.
- [3] C. D. Weir, "Optimization of heater enthalpy rises in feed-heating trains," *Institution of Mechanical Engineers*, vol. 174, no. 1, pp. 769–796, Jun. 1960.
- [4] P. G. Potter, *Power plant theory and design*, New York, NY, USA: Krieger Publishing Company, 1989.
- [5] S. Farhad, M. S. Avval, and M. Y. Sinaki, "Efficient design of feedwater heaters network in steam power plants using pinch technology and exergy analysis," *Int. Journal of Energy Research*, vol. 32, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2008.
- [6] S. N. Naserabad, A. Mehrpanahi, and G. Ahmadi, "Multi-objective optimization of feed-water heater arrangement options in a steam power plant repowering," *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 253–270, May. 2019.
- [7] S. Khanmohammadi, A. R. Azimian, and S. Khanmohammadi, "Exergy and exergoeconomic evaluation of Isfahan steam power plant," *Int. Journal of Exergy*, vol. 12, no. 2, pp. 249–272, Jan. 2013.
- [8] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, *Thermal design and optimization*, New York, NY, USA: Wiley, 1996.
- [9] R. Kumar, "A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants," *Engineering Science and Technology, an Int. Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 283–292, Feb. 2017.
- [10] G. Ahmadi, D. Toghraie, and O. Akbari, "Energy, exergy and environmental (3E) analysis of the existing CHP system in a petrochemical plant," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 99, pp. 234–242, Jan. 2019.
- [11] I. Lee, K. Tak, H. Kwon, J. Kim, and I. Moon, "Design and optimization of a pure refrigerant cycle for natural gas liquefaction with subcooling," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 25, pp. 10397–10403, Jun. 2014.
- [12] M. A. Rosen and I. Dincer, "Exergo-economic analysis of power plants operating on various Fuels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 23 no. 6, pp. 643–658, Apr. 2003.
- [13] S. O. Oyedepo, O. Kilankso, M. A. Waheed, O. S. Fayomi, O. S. Ohunakin, P. O. Babalola, S. O. Ongbali, C. N. Nwaokocha, B. Mabinuori, and O. O. Shopeju, "Dataset on thermodynamics performance analysis and optimization of a reheat-regenerative steam turbine power plant with feed water heaters," *Data in Brief*, vol. 32, pp. 1–7, Oct. 2020.
- [14] S. E. K. Fateen and A. B. Petriciolet, "On the effectiveness of nature-inspired metaheuristic algorithms for performing phase equilibrium thermodynamic calculations," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1–12, Aug. 2014.
- [15] M. M. Keshtkar, "Effect of subcooling and superheating on performance of a cascade refrigeration system with considering thermo-economic analysis and multi-objective optimization," *Journal of Advanced Computer Science & Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 42–47, 2016.
- [16] H. Sayyaadi, E. H. Amlashi, and M. Amidpour, "Multi-objective optimization of a vertical ground source heat pump using evolutionary algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 8, pp. 2035–2046, Aug. 2009.
- [17] M. M. Keshtkar and P. Talebizadeh, "Multi-objective optimization of cooling water package based on 3E analysis: A case study," *Energy*, vol. 134, pp. 840–849, Sep. 2017.
- [18] M. R. Kolahi, M. Amidpour, and M. Yari, "Multi-Multi-objective metaheuristic optimization of combined flash-binary geothermal and humidification dehumidification desalination systems," *Desalination*, vol. 490, pp. 1–12, Sep. 2020.
- [19] R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, and J. Contreras, "Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage," *Renewable Energy*, vol. 32, no.7, pp. 1102–1126, Jun. 2007.



- [20] A. M. Abdelshafy, H. Hassan, and J. Jurasz, "Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO-GWO approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 173, pp. 331–347, Oct. 2018.
- [21] M. Mavrovouniotis, C. Li, and S. Yang, "A survey of swarm intelligence for dynamic optimization: Algorithms and applications," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 33, pp. 1–7, Apr. 2017.
- [22] A. Colomi, M. Dorigo, and V. Maniezzo, "Distributed optimization by ant colonies," in *Proc. the First European Conf. Artificial Life*, Paris, France, Dec. 11-13, 1991, pp. 134–142.
- [23] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. the IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Perth, Australia, Nov. 27, 1995, pp. 1942–1948.
- [24] J. Xue and B. Shen, "A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm," *Systems Science & Control Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 22–34, Jan. 2020.
- [25] J. S. Chou and D. N. Truong, "A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 389, pp. 1–47, Jan. 2021.
- [26] Z. K. Feng, W. J. Niu, and S. Liu, "Cooperation search algorithm: A novel metaheuristic evolutionary intelligence algorithm for numerical optimization and engineering optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 98, pp. 1–27, Jan. 2021.
- [27] M. H. Ahmadi, M. A. Nazari, M. Sadeghzadeh, F. Pourfayaz, M. Ghazvini, T. Ming, J. P. Meyer, and M. Sharifpur, "Thermodynamic and economic analysis of performance evaluation of all the thermal power plants: A review," *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 30–65, Feb. 2019.
- [28] H. Kurt, Z. Recebli, and E. Gedik, "Performance analysis of open cycle gas turbines," *Int. Journal of Energy Research*, vol. 33, no. 3, pp. 285–294, Mar. 2009.
- [29] Y. A. Cengel, and M. A. Boles, *Thermodynamics: An engineering approach*, 6th ed. New York, NY, USA: The McGraw-Hill Companies, 2007.
- [30] R. Kumar, A. K. Sharma, and P. C. Tewari, "Thermal performance and economic analysis of 210 MWe coal-fired power plant," *Journal of Thermodynamics*, vol. 2014, pp. 1–10, Feb. 2014.
- [31] A. C. Caputo, M. Palumbo, P. M. Pelagagge, and F. Scacchia, "Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 1, pp. 35–51, Jan. 2005.
- [32] W. D. Seider, J. D. Seader, D. R. Lewin, and S. Widagdo, *Product and process design principles*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- [33] M. Ameri, P. Ahmadi, and A. Hamidi, "Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study," *Int. Journal of Energy Research*, vol. 33, no. 5, pp. 499–512, Apr. 2009.
- [34] M. K. Manesh, S. K. Abadi, M. Amidpour, and M. H. Hamed, "A new targeting method for estimation of cogeneration potential and total annualized cost in process industries," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, no. 6, pp. 1039–1049, Jun. 2013.
- [35] R. T. Marler and J. S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 6, pp. 853–862, Jun. 2010.
- [36] I. H. Aljundi, "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 2-3, pp. 324–328, Feb. 2009.
- [37] A. Mohammad, A. Pouria, H. Armita, "Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study," *Int. Journal of Energy Research*, vol. 33, pp. 499–512, 2009.

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

สุทธิณี ว้าวสูงเนิน¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{2*} กองพล อารีรักษ์³

^{1,2*,3}กลุ่มวิจัย PEMC สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : tosaporn@sut.ac.th

รับต้นฉบับ: 27 เมษายน 2564; รับบทความฉบับแก้ไข: 29 เมษายน 2564; ตอรับบทความ: 1 มิถุนายน 2564

เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) สำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) สำหรับใช้ควบคุมการผิดกระแสของวงจร การออกแบบได้ประยุกต์ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้ออกแบบจะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะการทำงานที่ดี สามารถผิดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงและเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

คำสำคัญ : การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การตรวจจับฮาร์มอนิก การกำจัดฮาร์มอนิก การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

Design of a Shunt Active Power Filter for Single-Phase Power Systems

Sutthinee Waosungnern¹ Tosaporn Narongrit^{2*} Kongpol Areerak³

^{1,2*,3}*PEMC Research Group, Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: tosaporn@sut.ac.th

Received: 27 April 2021; Revised: 29 April 2021; Accepted: 1 June 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

This paper presents the design of a shunt active power filter (SAPF) for harmonic elimination in single-phase power systems. The parameters of the shunt active power filter and PI controllers for the compensating current injection control are considered to design. The conventional design method depended on an easy and uncomplicated calculation is applied for this paper. The MATLAB/Simulink program is used to simulate the harmonic elimination system for the performance testing of SAPF. The simulation results confirm that the SAPF and PI controllers designed by the proposed method can provide good performance to inject the compensating current for harmonic elimination in single-phase power system. Moreover, the total harmonic current distortion percentage (%THD_i) of the source current after compensation is reduced and satisfied under the IEEE std 519-2014.

Keywords: Active power filter design, Active power filter, Harmonic detection, Harmonic elimination, Improve power quality

1) บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสในโรงงานอุตสาหกรรม สถานประกอบการ และที่พักอาศัย ได้มีการใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Loads) จำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรเรียงกระแส อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบอาร์ก หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น [1] ซึ่งการใช้งานโหลดประเภทดังกล่าวเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบและส่งผลเสียหลายประการ เช่น เกิดสัญญาณรบกวนในวงจรสื่อสาร อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด [2] เกิดความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลง [3] เป็นต้น จากผลเสียดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดฮาร์มอนิกให้หมดหรือลดลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter) การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter) และการใช้วงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (Hybrid Power Filter) อย่างไรก็ตามบทความนี้ได้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ซึ่งเป็นวิธีกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบและไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ซึ่งพบในวิธีกำจัดฮาร์มอนิกแบบวงจรกรองกำลังพาสซีฟ [4], [5] การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 1 โดยระบบควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอคทีฟจะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญสำหรับส่วนแรกคือ การตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic Detection) ใช้คำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกอ้างอิงในการชดเชยซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วิธีซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) [6] เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับและมีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย ส่วนที่สองคือ การควบคุมกระแสชดเชย (Compensating Current Control) สำหรับควบคุมวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้สามารถชดเชยได้ตามลักษณะตามรูปสัญญาณของกระแสอ้างอิงและส่วนสุดท้ายคือ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่ออกแบบไว้เพื่อให้วงจรมีพลังงานในการชดเชย

เข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยในบทความนี้การควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบได้ง่าย และให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีเพียงพอ [5], [7] นอกจากนี้เพื่อให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดีจำเป็นต้องออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (ค่า V_{DC} , ค่า L_f และค่า C_{DC}) และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_p และ K_i) ของระบบควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสม [8]–[10] ในบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยประยุกต์ใช้วิธีการดั้งเดิมซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีการออกแบบทั้งหมดได้จากหัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

การนำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วยหัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง หัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล และหัวข้อสุดท้าย คือ การสรุปผลของบทความ

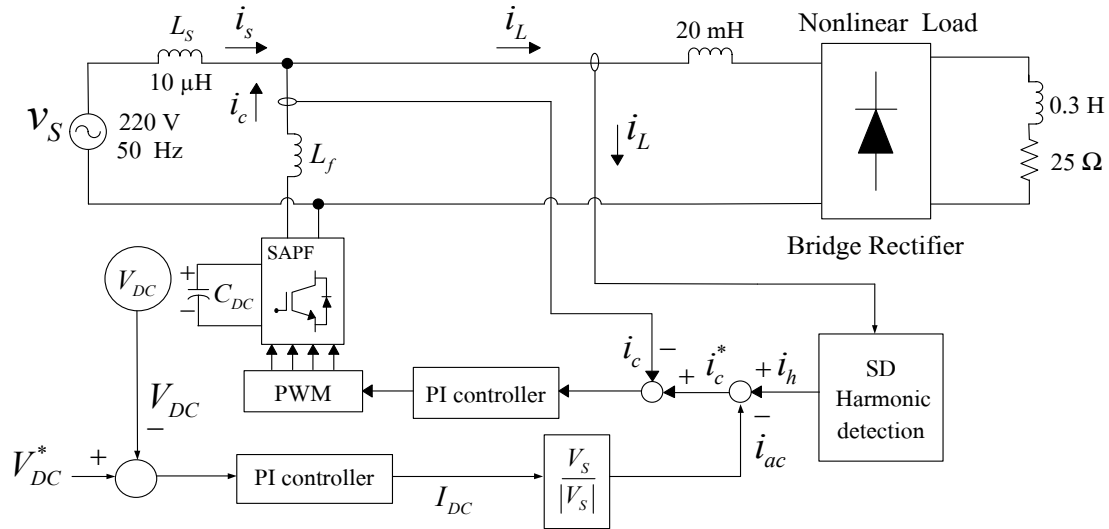
2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ความรู้ด้านการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส
2. เพื่อศึกษาองค์ความรู้วิธีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส
3. เพื่อจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

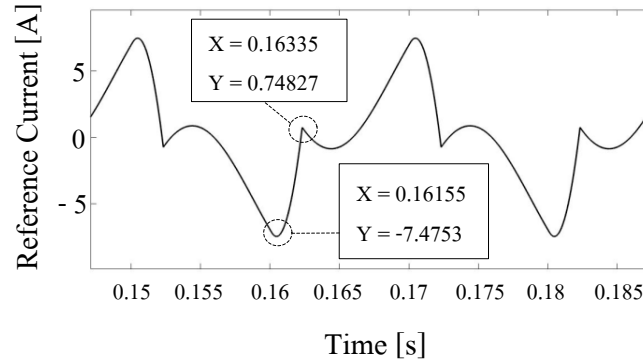
- 3) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

3.1) การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานจะใช้วิธีการของ Ingram และ Round [8], [9] ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบจะได้ขอบเขตขนาด ตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) จากนั้นจึงเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสอ้างอิงกับเวลา

ที่เหมาะสมที่มีขนาดไม่เกิน $L_{f,max}$ โดยรายละเอียดการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(di_c^*/dt)$) ซึ่งสามารถประมาณได้จากความชันสูงสุดของรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับด้วยวิธี SD [6] ดังสมการที่ (1)

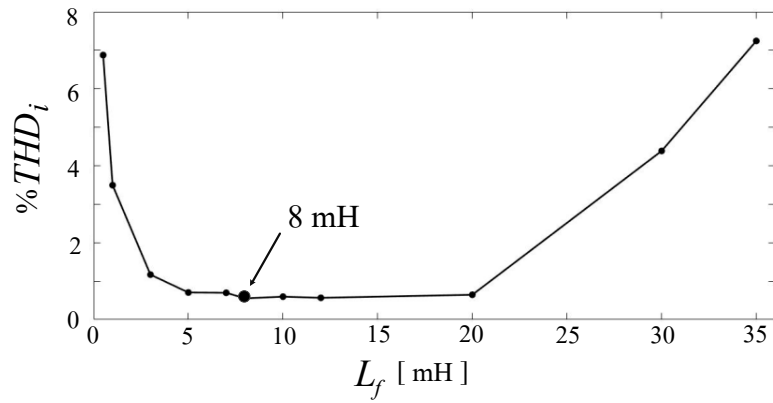
$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) \approx \max\left(\frac{\Delta i_c^*}{\Delta t}\right) \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) เมื่อพิจารณารูปสัญญาณของกระแสอ้างอิง (i_c^*) ของระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 2 จะสามารถประมาณหาค่า $\max(di_c^*/dt)$ ได้เท่ากับ 4568.65 A/s ดังนี้

$$\max\left(\frac{\Delta i_c^*}{\Delta t}\right) = \frac{0.74827 - (-7.4753)}{0.16335 - 0.16155} = 4568.65 \text{ A/s}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณหาตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) โดยใช้สมการที่ (2)

$$L_{f,max} = \frac{V_{DC} - V_{PCC}}{\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right)} \quad (2)$$



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_f และค่า %THD_i

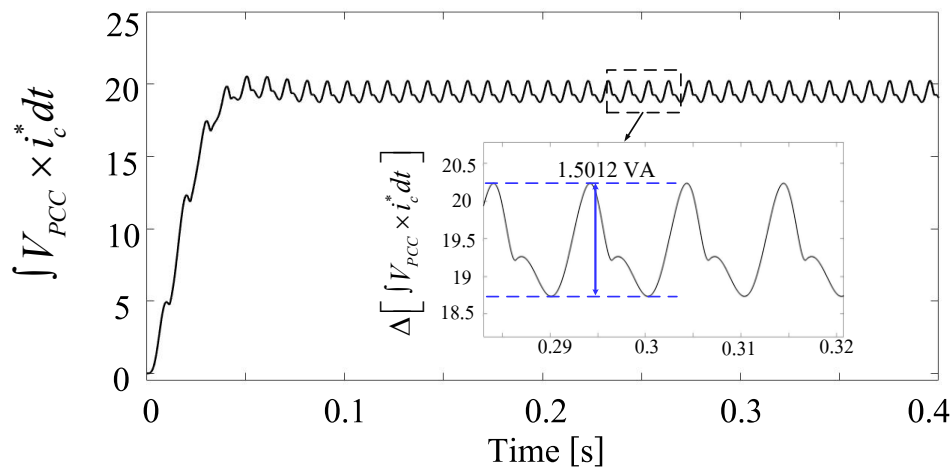
โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

V_{DC} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

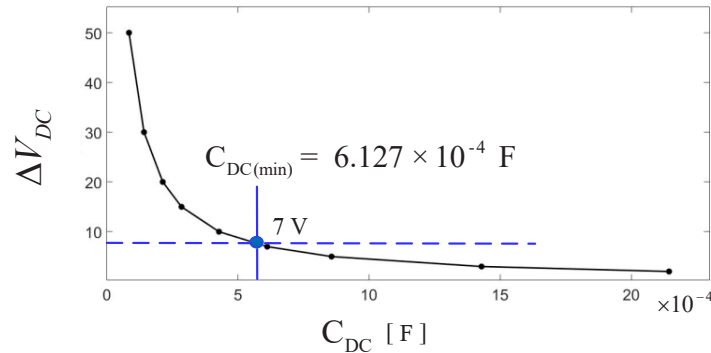
จากสมการที่ (2) V_{PCC} ของระบบที่พิจารณามีค่าเท่ากับ $\sqrt{2} (220) \text{ V}$ และค่า V_{DC} ควรออกแบบให้มีค่ามากกว่าค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สำหรับบทความนี้ได้ออกแบบให้ V_{DC} มีค่าเท่ากับ 350 V ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า $L_{f,max}$ ได้เท่ากับ 8.51 mH ดังนี้

$$L_{f,max} = \frac{350 - (\sqrt{2} \times 220)}{4594.173} = 8.51 \text{ mH}$$

ขั้นที่ 3 กำหนดเลือกใช้ค่า L_f ที่มีขนาดไม่เกิน $L_{f,max}$ ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อเลือกค่า L_f ที่เหมาะสมโดยใช้ค่า %THD_i หลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัด ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยพบว่าค่า L_f ที่ส่งผลให้วงจรรบกวนกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบได้ดีที่สุดหรือให้ค่า %THD_i ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 8 mH ดังนั้นบทความนี้จึงเลือกใช้ค่า L_f เท่ากับ 8 mH



รูปที่ 4 การคำนวณหาค่า $\Delta[\int V_{PCC} \times i_c^* dt]$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{DC} และค่า ΔV_{DC}

3.2) การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (C_{DC}) สำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะใช้วิธีการออกแบบของ Thomas [8], [10] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจะเป็นค่าขอบเขตที่ต่ำสุดของตัวเก็บประจุ ($C_{DC,min}$) จากนั้นจึงดำเนินการเลือกค่า C_{DC} ที่เหมาะสมภายใต้ขอบเขตของ $C_{DC,min}$ อีกครั้ง โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุต่ำที่สุด ($C_{DC,min}$) จากสมการที่ (3)

$$C_{DC,min} = \frac{\Delta \left[\int V_{PCC} \times i_c^* dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (3)$$

โดยที่ V_{DC}^* ได้จากการออกแบบเท่ากับ 350 V และกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดัน (ΔV_{DC}) เท่ากับ 7 V และค่า $\Delta \left[\int V_{PCC} \times i_c^* dt \right]$ คือ ค่าขนาดการกระเพื่อมของทอมปริพันธ์ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (V_{PCC}) กับกระแสอ้างอิง (i_c^*) ซึ่งสามารถหาได้ดังรูปที่ IV ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.5012 VA ดังนั้นจากสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณหาค่า $C_{DC,min}$ ได้เท่ากับ 0.6127 mF ดังนี้

$$C_{DC,min} = \frac{1.5012}{7 \times 350} = 0.6127 \text{ mF}$$

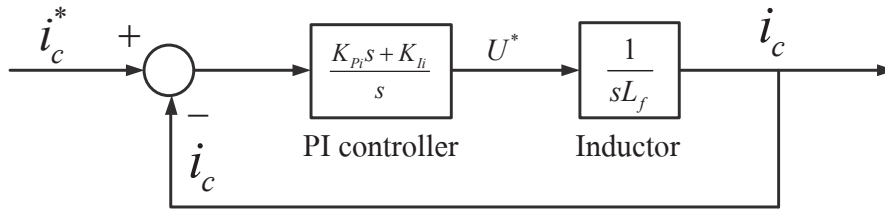
ขั้นที่ 2 กำหนดเลือกใช้ค่า C_{DC} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มากกว่าค่า $C_{DC,min}$ ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการทดสอบ

ปรับเปลี่ยนค่า C_{DC} ที่ขนาดต่าง ๆ เทียบกับค่า ΔV_{DC} และเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ V ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อปรับค่า C_{DC} เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ΔV_{DC} จะลดลง และในบทความนี้เลือกใช้ค่า C_{DC} เท่ากับ 1.5 mF เนื่องจากคำนึงถึงสมรรถนะการลดกระแสชดเชยของวงจร SAPF ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่า V_{DC} และค่าแรงดันกระแสเพื่ออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยไม่เกิน 7 V (2%)

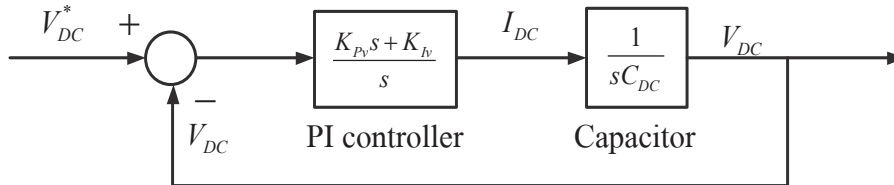
4) การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

4.1) การออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชย

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ เป็นวิธีที่ได้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ [7], [8] โดยการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอจะต้องมีการทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อสร้างพัลส์ควบคุมการสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6 จากรูปดังกล่าว ผลต่างระหว่างค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD กับค่ากระแสชดเชย (i_c) ที่ฉีดโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ และกำหนดให้เอาต์พุตเป็นค่าแรงดันอ้างอิง (U^*) สำหรับนำไปผ่านพลาเน็ต (Plant) ตัวเหี่ยววนาเพื่อจำลองค่ากระแสชดเชย (i_c) ทางฝั่งเอาต์พุต



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสขดเคย์



รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (Closed-loop transfer function) แสดงได้ดังสมการที่ (4) การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะใช้วิธีการประมาณโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมดังสมการที่ (4) กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานอันดับสองดังสมการที่ (5) ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะทำให้ได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_{pi} และ K_{li} ของตัวควบคุมพีไอแสดงดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{li}}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pi}}{L_f} \right)s + \frac{K_{li}}{L_f}} \quad (4)$$

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s\omega_n + \omega_n^2} \quad (5)$$

$$K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{ni} L_f \quad (6)$$

$$K_{li} = \omega_{ni}^2 L_f \quad (7)$$

โดยที่ ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูกระแส (damping ratio)

ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของกระแสขดเคย์ (natural frequency)

จากสมการที่(6) และ (7) สำหรับการออกแบบค่า ω_{ni} จะพิจารณาจากค่าความถี่ฮาร์โมนิกอันดับสูงสุดที่ต้องการกำจัด ($f_{h,max}$) ซึ่งบทความนี้พิจารณาจำกัดฮาร์โมนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 2500 Hz ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า ω_{ni} ตามสมการที่ (8) ได้เท่ากับ $2\pi \times 2500$ rad/s และสำหรับค่า ζ_i จะกำหนดให้เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เนื่องจากต้องการให้การควบคุมกระแสขดเคย์มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ที่สูงเกินไป

$$\omega_{ni} = 2\pi f_{h,max} \quad (8)$$

จากค่า ω_{ni} และค่า ζ_i ดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า K_{pi} ได้เท่ากับ 177.688 และ K_{li} ได้เท่ากับ 1973920.88

4.2) การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรง

การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีโอแสดงในรูปที่ 1 สามารถแสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 7 ผลต่างระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) กับค่าแรงดันไฟฟ้าตรงตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (V_{DC}) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีโอ เพื่อให้ได้ค่ากระแสไหลผ่านพลาซม (Plant) ตัวเก็บประจุ C_{DC} เพื่อจำลองเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตรง (V_{DC}) ทางฝั่งเอาต์พุตจากระบบดังกล่าวสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (9) ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานอันดับสอง (สมการที่ (5)) เพื่อหาสมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_{Pv} และค่า K_{Iv} ของตัวควบคุมพีโอ [7], [8] โดยผลการเปรียบเทียบบ่งชี้ว่าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_{Pv}}{K_{Iv}}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{Pv}}{C_{DC}}\right)s + \frac{K_{Iv}}{C_{DC}}} \quad (9)$$

$$K_{Pv} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} \quad (10)$$

$$K_{Iv} = \omega_{nv}^2 C_{DC} \quad (11)$$

โดยที่ ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปทรง

ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของแรงดันไฟฟ้าตรง

จากสมการที่ (10) และ (11) พิจารณาออกแบบค่า ω_{nv} จาก $\omega_{nv} = 4/T_{Sv}$ โดยกำหนดให้ช่วงเวลาเข้าที่ (setting time ; T_{Sv}) มีค่า 0.05 s และค่า ζ_v กำหนดให้เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า K_{Pv} และค่า K_{Iv} ของตัวควบคุมพีโอรูปทรงได้เท่ากับ 0.24 และ 19.206

จากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร SAPF และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 และ 4 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังในตารางที่ 1

5) ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

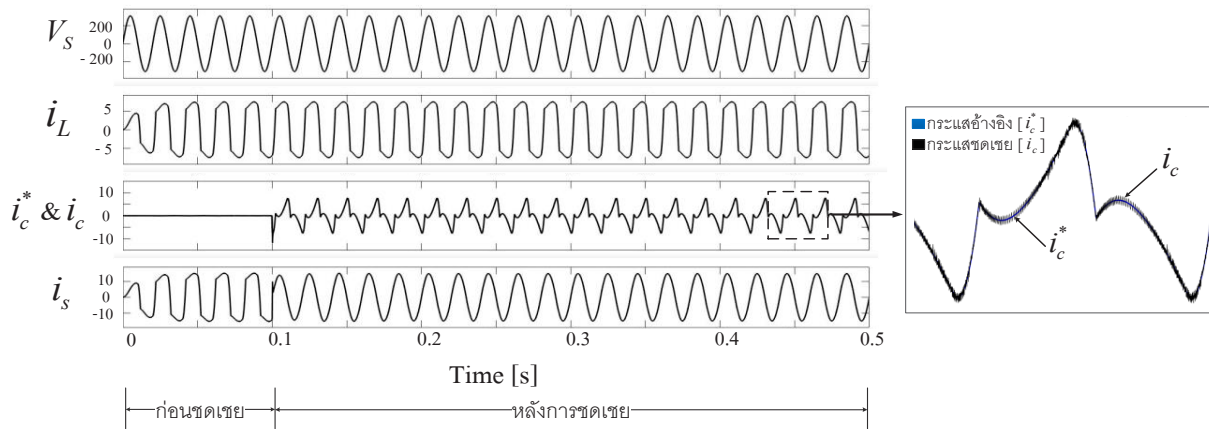
การจำลองสถานการณ์ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสในรูปที่ 1 ด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจร SAPF และ

ตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบไว้ดังตารางที่ 1 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 8 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าก่อนทำการฉีดกระแสชดเชย (i_c) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที รูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_s) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ ลักษณะสัญญาณเหมือนกับกระแสโหลด โดยวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 27.9% ต่อมาเมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟพร้อมกับตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบทำการฉีดกระแสชดเชยตามลักษณะของกระแสอ้างอิง (i_c^*) ที่ได้จากวิธี SD [6] เข้าสู่ระบบไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป สังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายสามารถกลับมาเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 1.865% นอกจากนี้ผลการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีโอของวงจร SAPF สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 9 โดยสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบ มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตรงให้มีความเท่ากับแรงดันไฟฟ้าตรงอ้างอิง 350 V ในช่วงเข้าสถานะคงตัว (Steady State) พบว่าค่า ΔV_{DC} มีค่าเท่ากับ 3.3 V ซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตของแรงดันกระแสเพื่อที่ได้ออกแบบไว้ (7 V)

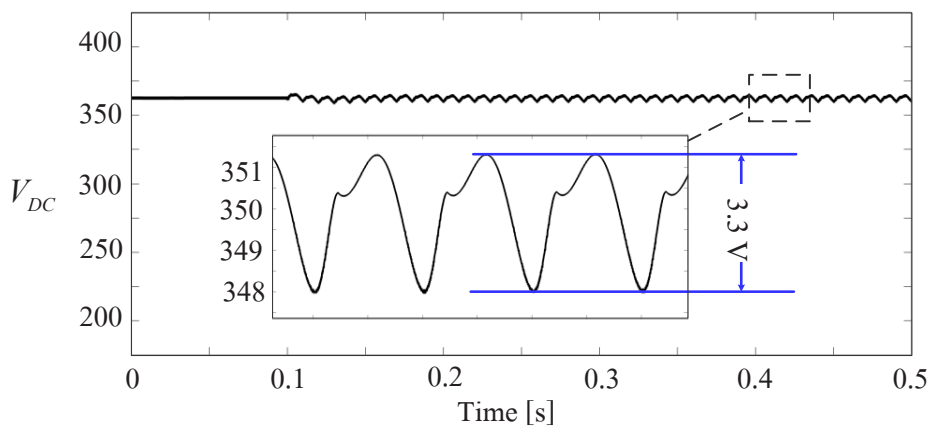
จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก ส่งผลทำให้ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าน้อยลง

6) สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอ สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาพบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมที่ได้ออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลง และอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std 519-2014



รูปที่ 8 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส



รูปที่ 9 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ	$L_f = 8 \text{ mH}$ $V_{DC} = 350 \text{ V}$ $C_{DC} = 1.5 \text{ mF}$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	$K_{pi} = 177.688$ $K_{ii} = 1973920.88$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{pv} = 0.24$ $K_{hv} = 19.206$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ
กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการ
ควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงสถานที่และเครื่องมือ
ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

REFERENCES

- [1] V. E. Wagner, "Effects of harmonic on equipment" *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, Apr. 1993.
- [2] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519, Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, Jun. 2014.
- [3] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of harmonic on distribution transformers," in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conf.*, Sydney, NSW, Australia, Dec. 14–17, 2008, pp. 1–5.
- [4] M. Izhar, C. M. Hadzer, M. Syafrudin, S. Taib, and S. Idris, "Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system," in *Proc. National Power and Energy Conf.*, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 29–30, 2004, pp. 104–108.
- [5] A. Zouidi, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, "Voltage source inverter based three- phase shunt active Power filter: Topology, modeling and control strategies," in *2006 IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, Montreal, QC, Canada, Jul. 9–13, 2006, pp. 785–790.
- [6] T. Narongrit, P. Santiprapan, and S. Janpong, "A Synchronous detection with fourier analysis for single-phase shunt active power filters," in *2018 5th Int. Conf. Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Kitakyushu, Japan, Apr. 23–25, 2018, pp. 1–6.
- [7] S. Rahmani, N. Mendlek, and K. Al-Haddad, "Experimental design of a nonlinear control technique for three - phase shunt active power filter," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no.10, pp. 3364–3375, Oct. 2010.
- [8] T. Trongjai, T. Narongrit, and K. Areerak. "Design of a shunt active power filter for harmonic elimination in electric railway systems," (in Thai), *UBU Engineering Journal*, vol. 13, no.1, pp. 29–41, 2019.
- [9] D. M. E. Ingram and S. D. Round, "A novel digital hysteresis current controller for an active power filter," in *Proc. 2nd Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, May 26–29, 1997, vol. 2, pp. 744–749.
- [10] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, "Design and performance of active power filters," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no.5, pp. 38–46, 1998.

Hotspot Condition Analysis and Proposed Hotspot Detection Method for the PV Module in Cluster's Structure

Jirada Gosumbonggot^{1*}

^{1*}*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: jirada@tni.ac.th

Received: 30 April 2021; Revised: 29 May 2021; Accepted: 10 June 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

Renewable energy becomes an emerging trend in many countries. Photovoltaic (PV) technology has been gaining an increasing amount of attention due to its unpolluted operation. Importantly, the PV system should be utilized with safety awareness. The problem of hotspot takes place due to the mismatch in the irradiation of the cells in the PV module. Under the hotspot condition, the unshaded part of the module operates at a current level higher than the shaded cell. As a result, the affected cells start to dissipate power leading to an increase in the temperature. Afterward, the hotspot reduces performance and brings damage to the PV module. This paper presents the hotspot detection algorithm that can integrate with the PV's MPPT system. The method uses the concept of characteristic curves analysis and the rate of current changes under reversed bias conditions to detect the hotspot. Moreover, the algorithm displays the PV system's status indicator after the detection completes. The implementations in different testing cases, including various PV sizing at different irradiation levels. Results confirm the performance of the proposed algorithm, showing the accuracy with fast detection.

Keywords: Photovoltaic, Hotspot detection, Shading condition, Irradiation



I. INTRODUCTION

Renewable power led by photovoltaic (PV) technology has gained popularity as one of the potential avenues. PV's expansion increases due to unlimited power resources from the sunlight and unpolluted operation with no emission. Researches in renewable energy receive great attention. Because most of the resources are available on short-timescales and depend on the weather conditions, it is important to investigate the enhancement of renewable energy to achieve its highest potential. To enhance the efficiency of PV, the effect of weather conditions must be considered. Two main parameters affect the PV-generated power, irradiation and temperature; they vary from the location where the PV is installed. Moreover, the problems that could occur to the PV system such as cell mismatch, material degradation and shading could lead to a problem called a hotspot.

A hotspot is defined as the fault formed on the panel's surface, which happens from the consequence of shading on the PV panel's surface when a PV cell in a panel generates less power. Hotspot not only causes the generated power reduction but could also lead to a PV cell's damage. Conventionally, the detection uses the infrared camera to capture a thermal image of objects under inspection [1]. Although the thermography detection method's performance is effective, the cost of the equipment especially the infrared camera is generally quite high, and a workforce for the routine checkup is also needed. Although the hotspot happens on a part of the area on the PV cell, the power dissipation caused by the temperature can be found.

In addition, it is confirmed by case studies and surveys that hotspot causes the reduction of PV system's performance ratio. Work done by Dhinish et al. [2] presents the impact of hotspot through the PV modules installed across the U.K. The study shows that

42% of all the installed PV modules do contain the hotspot. The existed hotspot causes a -15.47% decrease rate of the performance ratio, making the generated power of the PV system decreases every year. Other confirmations are shown by Pillai et al., Hossam et al. and Yedidi et al. [3]–[5] show that hotspots can cause a reduction of energy yields up to 15%. According to the studies, researchers need to develop methods for detecting hotspots accurately and effectively.

The main context of this paper is to describe the effect of the hotspot by the operation factors and propose the hotspot detection methodology for the small-scale PV system, in the form of the algorithm. The analysis of hotspots in each condition is performed and verified with the description explained by the IEC 61215 standard. The hotspot detection method is designed based on the practical PV module model with the three clusters structure. The proposed algorithm operates using the real-time difference method (RDM) [6] by sensing real-time voltage and current from the PV module. After that, the real-time calculation of PV output parameters and comparison with the reference values are performed. The algorithm is designed by using the analysis from the PV's characteristic curve and the rate of current changes under reversed bias conditions to detect the hotspot. After the detection completes, the algorithm displays the PV module's status by using the indicator signal. The usefulness of this research is the presented algorithm can accurately detect the hotspot and differentiate it from normal and shading conditions. The proposed method shows the compatibility with the practical PV standard.

II. PROBLEM STATEMENT

The hotspot is formed by the localized heat on the PV module's surface, which happens due to the mismatch in the PV cell, shading or material defection [7]–[8]. During the hotspot condition, the PV cell

voltage operates in reversed bias. Instead of generating the power, the hotspot cell starts to absorb the current generated from other normal condition cells. Then, the total power generated from the PV module is reduced and the temperature inside the cell increases. If the temperature reaches and exceeds the limited threshold (85 °C typical rate for PV to operate and at 150 °C for the permanent damage), [1] the hotspot can be formed and bring permanent damage to the module.

The efficiency degradation of the PV module due to the hotspot has been confirmed by research works [9]–[11]. In practice, the PV module internal structure contains the PV cells arranged in series connection, the cells are divided into a group called a cluster. In each cluster, the bypass diode is installed to prevent the extreme reverse voltage bias on the PV module. Figure 1 shows the PV module in three cluster structures with one hotspot's cell highlighted.

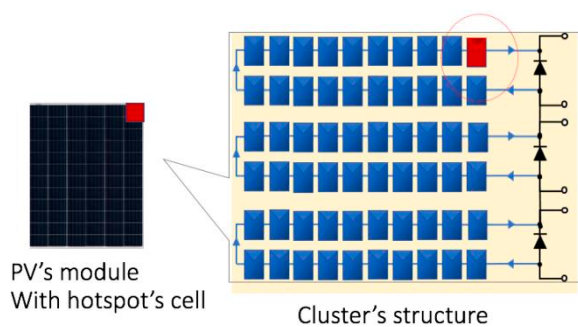


Figure 1 Hotspot's cell in PV module model in three cluster's structure [12]

To decrease the effect of shading towards the hotspot, bypass diodes are installed. Diodes can restrain the reverse bias voltage that can occur in a PV cell, and protect the cell's current to reach the breakdown voltage by providing the alternative path for the current to flow. However, studies show the disadvantages in the case of the long-term operation, higher temperature, and the installation generates

maximum power points alignment which increases the difficulty to track PV's highest power [2], [12]–[14].

Detailed confirmation is explained in IEC 61215 (design qualification and type approval of PV module) [15]. The standard states the hotspot endurance testing method to determine the ability of the module to withstand hotspot heating effects. When the hotspot's cell exists in the module, the cell's current inclines significantly and the total module current starts to decrease. The fundamental simulation in Figure 2 is performed to present the effect of the hotspot, according to the information in IEC 61215.

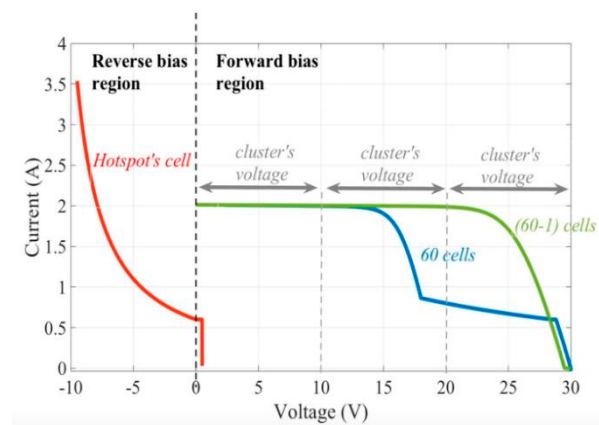


Figure 2 I-V characteristic curves of the hotspot's cell and whole PV module [15]

By using the configuration in Figure 1, the current-voltage characteristic of the hotspot's cell and total PV module under normal and hotspot conditions are displayed. The simulation uses the testing condition according to the IEC 61215 standard. The hotspot's cell is set to have the irradiation of 300 W/m^2 , while other cells operate at 1000 W/m^2 . The results present three current parameters measured at the hotspot's cell, the normal condition cells and the whole PV module. The voltage is divided into two regions include the forward bias (PV's voltage is greater than zero) and the reverse bias (PV's voltage is less than zero). Under reversed bias region, the red graph displays the hotspot cell's current

which increased exponentially, starts from 0.5 A which indicates the PV's current value at 300 W/m². The current continues to increase until it reaches the breakdown voltage at -10 V.

For the performance of the whole PV module, the blue graph displays the whole PV module's current; which decreases due to the low irradiance on the hotspot's cell. The current drops from the short-circuit current at 2 A to 0.5 A, the drop exists at approximately the PV cluster's voltage (20 V). The result shows that, although the maximum power of the module is not significantly different compared to the normal condition, the power dissipation is hidden under the hotspot's cell which causes the cell to overheat and bring damage. The IEC 61215 standard clearly states the step-by-step testing procedure in which manufactured PV module needs to pass before being certified. IEC 61215 specifically states the hotspot test requirements of the module; however, the hotspot detection procedures have not been described yet. As a result, it is important to study the impact of the hotspot and design the detection method for preventing the damage that occurs to the PV module.

III. ANALYSIS

There are examples of hotspot models presented in published works, represents using DC or AC circuits. In this paper, the model by [16] is used due to its representation in DC which is well-matched to the previously proposed maximum power point tracking (MPPT) algorithm. The model is implemented based on the single-diode DC model with the additional voltage-controlled current source (VCCS) connected to the shunt resistance branch. The reversed bias current I_{BR} is generated, as shown in Figure 3.

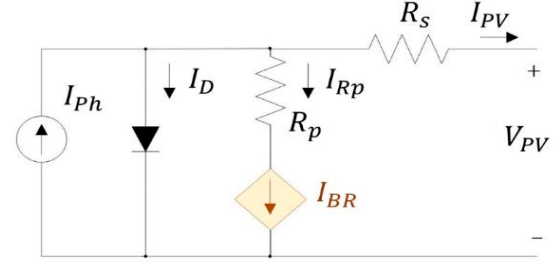


Figure 3 Hotspot model with VCCS and shunt resistance [16]
Equation (1) shows the expression of the currents in the circuit according to Kirchoff's current law.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (1)$$

The current I_{BR} generated from the additional VCCS is expressed as shown in equation (2) [16]. From equation (2), α and m are the fitting parameter ($\alpha=1.93$ and $m=1.10$ for the crystalline Silicon) and V_{BD} is the cell's breakdown voltage.

$$I_{BR} = \begin{cases} 0 & , V_{PV} > 0 \\ \alpha \left(\frac{V_{PV}}{R_p} \right) \left(1 - \left(\frac{V_{PV}}{V_{BD}} \right) \right)^{-m} & , V_{PV} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

When V_{PV} turns negative, the current source generates I_{BR} in the exponential trends. As described in section II, since the material's degradation in the cell can affect the hotspot model parameter and increase the induced current; therefore, the analysis considers the effect of the shunt resistance towards the performance of the PV module. A detailed investigation is performed by considering the value of shunt resistance (R_p), and levels of irradiation as shown in at different irradiances Figure 4.

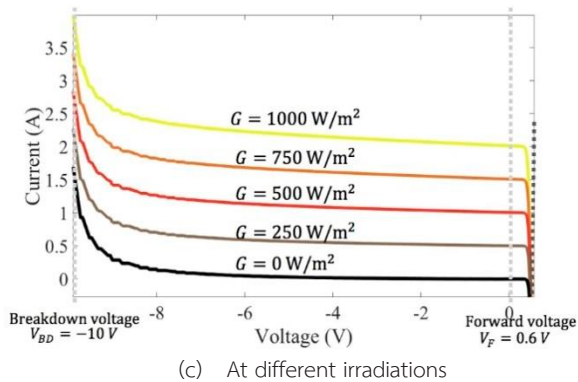
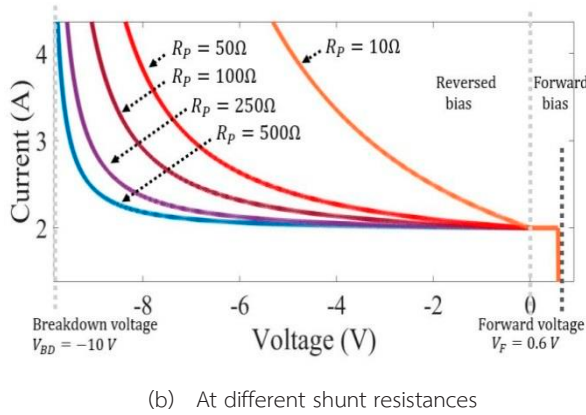
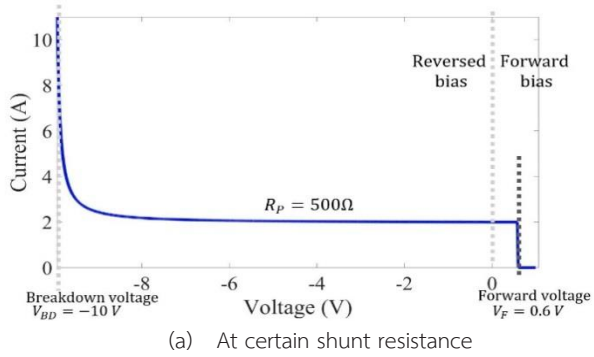


Figure 4 I-V characteristic curves of the hotspot cell

As shown in figure 4a, under the forward bias condition the cell's diode turns on when reaching the diode's forward voltage V_F of 0.6 V. PV's current I_{PV} increases to approximately 2 A. In contrast to the reverse bias condition, the graph shows the PV's current starts to incline exponentially, especially when reaching the breakdown voltage of 10 V. Overall, in figure 4b the result presents the generation of a large current from the low resistances. Especially for the lowest resistance value of 10 Ohm, the current increases significantly at approximately -5 V, which the voltage is less than the

value of the breakdown voltage. The low resistance value can be reflected as the degradation which induces more current and more power dissipation. Also, due to the dependence of weather, especially irradiation, it is necessary to evaluate the hotspot effect at different irradiation levels. Figure 4c shows that the more irradiation inputs to the hotspot's cell, the more generated current causes a higher power dissipation.

IV. METHODOLOGY

The system in Figure 5 is implemented by PV array (two series-connected modules, one module contains the hotspot's cell), the boost converter with a duty cycle control and the constant voltage load.

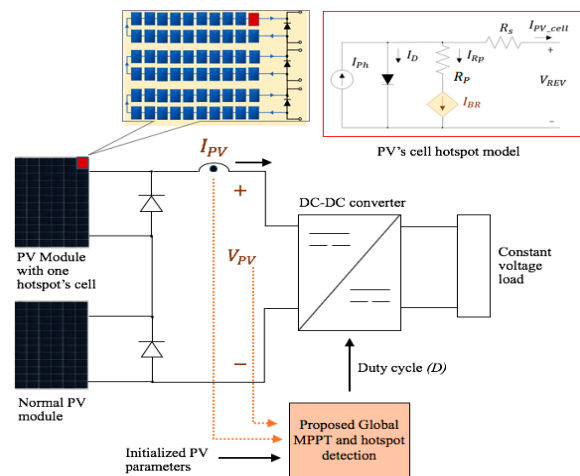
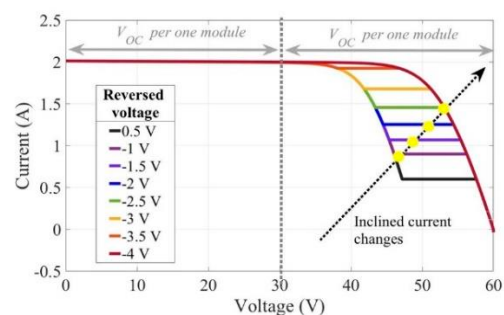
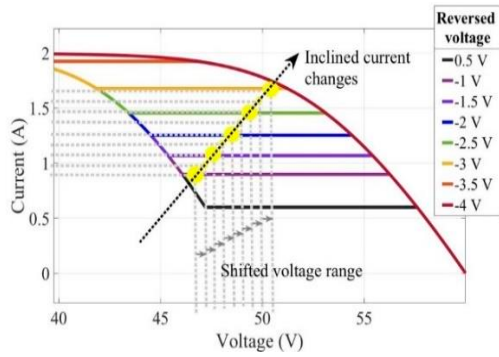


Figure 5 System's implementation

The results achieved from the system's implementation in figure 6 are used to design the algorithm.



(a) I-V characteristic curves under hotspot condition



(b) Magnified inclined current changes detection area

Figure 6 I-V characteristic curves under hotspot condition with the decrease of reverse bias voltage over time

From figure 6, levels of reversed voltages are set to be between -0.5 V to -4 V with the decrement of 0.5 V, to present the behavior of the hotspot while the reversed voltages approaching the breakdown voltage.

The characteristic curves undervalue of reversed voltage are displayed. The condition shows the amount of PV's current at different reversed voltage. The less reversed voltage, the more increased the current is displayed.

The proposed hotspot detection method is shown in (b) Figure 7. The algorithm is designed by using the slope calculation concept to identify the hotspot. The program has two major parts (a) the main program and (b) the hotspot detection algorithm. The main improvement is the compatibility with the practical cluster structure. Furthermore, to increase the functionality, the algorithm is also complemented with the shading detection and global MPP tracking system. The tracking algorithm has published by the author [17].

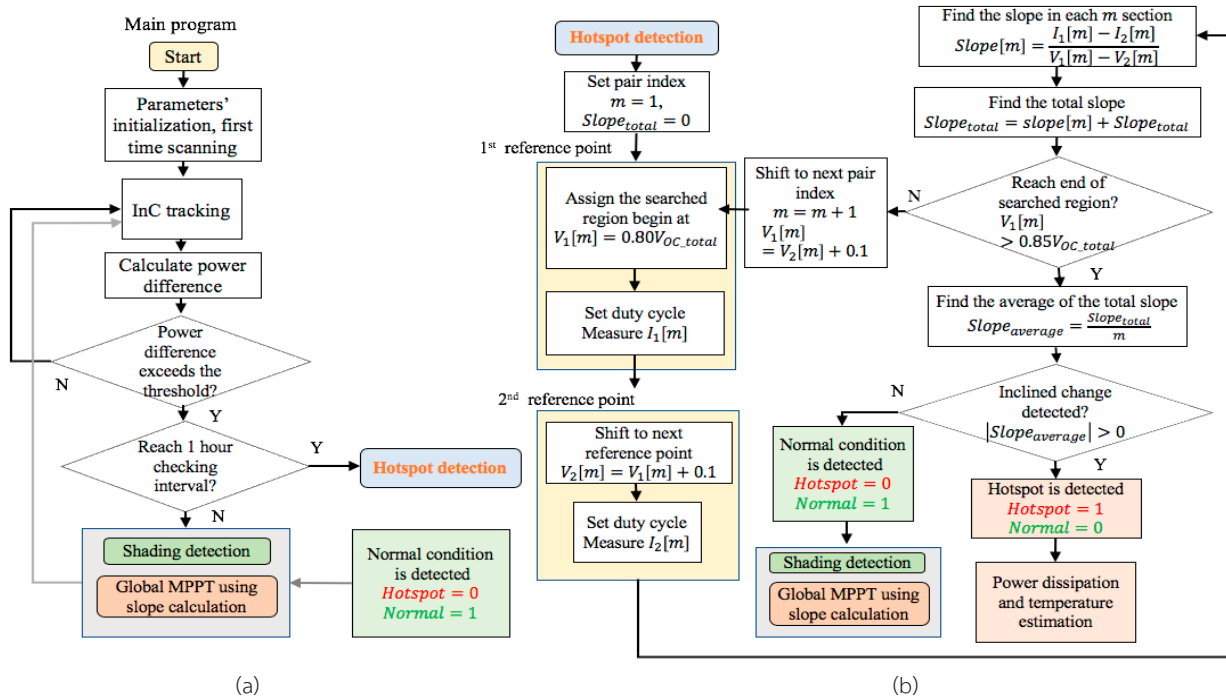


Figure 7 Proposed hotspot detection algorithm for PV module in cluster's structure

(a) The main program (b) Hotspot detection

From the I-V characteristic curves, the commonly searched region for all number of defected clusters locates at the ranges of the knee level of the curve

(at 80% of PV's open-circuit voltage (V_{OC})). Consequently, the algorithm starts detecting the inclined current from 80% of V_{OC} . The measured

voltage is assigned as the first reference voltage $V_1[1]$ and the current is recorded as $I_1[1]$. Step repeats after shifting the voltage by 0.1 V to the next point $V_2[1]$ at 85% of V_{OC} ; afterward, the algorithm records the current $I_2[1]$. Consequently, the algorithm calculates the rate of change called $Slope[m]$ between two current points with respect to the voltage points. The calculation is shown in equation (3).

$$Slope[m] = \frac{(I_2[m] - I_1[m])}{(V_2[m] - V_1[m])} \quad (3)$$

After calculating the slope pairs in the searched region, the average of the total slope ($|Slope_{average}|$) is determined. The algorithm calculates whether $|Slope_{average}|$ presents the increase of PV's current inside the hotspot's cell. If $|Slope_{average}|$ shows the inclined trend (value is greater than 0), the program estimates the status as the hotspot condition, making the hotspot indicator triggers from 0 to 1. After that, the algorithm proceeds to the second stage which is the power dissipation and temperature estimation. On the other hand, if $|Slope_{average}|$ does not show the increase of PV's current (value is less than or equal to zero), meaning the PV cell does not present the hotspot characteristic.

The proposed algorithm uses the indicator to present the detection result. Two indicators are "Hotspot" and "Normal". The hotspot indicator shows when the hotspot is detected. Inversely, the normal indicator presents the normal operation. Continuously, the system proceeds to the global MPPT function to track the power back to the highest point. In conclusion, the proposed detection method using slope calculation helps the system to detect the hotspot that occurs in the PV array, also provides the integration with the proposed algorithm to the MPPT. Moreover, the program can track the global MPP after

shading happens. After the estimation, the important point is to identify the degradation level regarding the hotspot's temperature (explained in section II). If the estimated temperatures surpass 150 °C, the maintenance step should be performed to prevent the severity of the hotspot formation.

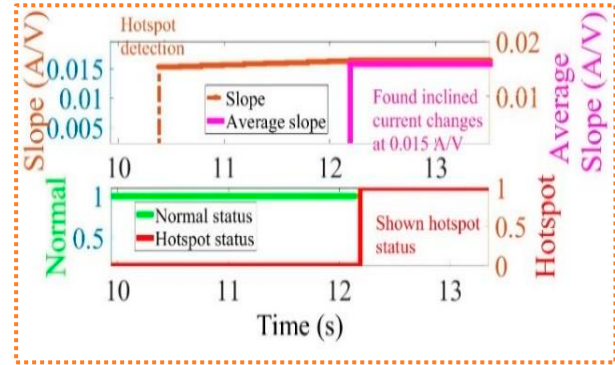
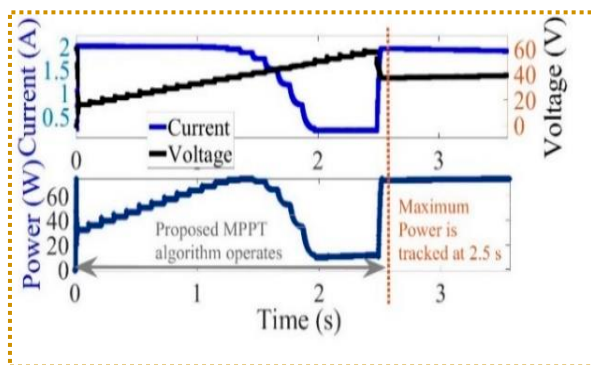
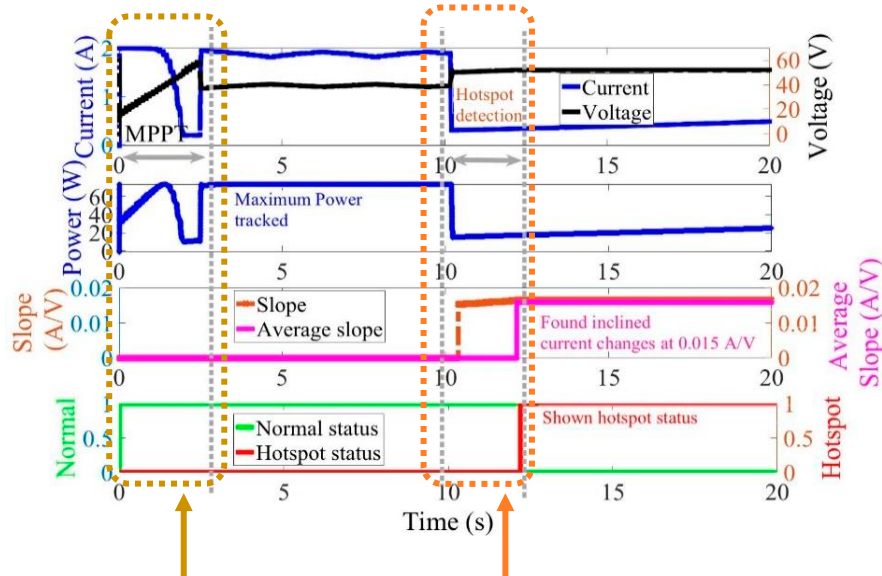
V. RESULTS AND DISCUSSION

The implementation is built for evaluating the proposed detection method. The PV cell with the maximum power at 0.76 W, shunt resistance of 35.54 Ohm and series resistance at 0.02 Ohm are used. The implementation in Figure 5 is simulated to detect the proposed detection algorithm. The hotspot's cell is highlighted in red. For testing the algorithm, case studies criteria are referenced from Dhinish et al. work [2], in which cases are divided with five possible values of shunt resistances with a -20% variation with respect to its nominal value. The variation is used to represent different hotspot degradation values. The resistance values include 7, 14, 21, 28 and 35 Ohm. The conditions represent the degradation at different impurity concentrations [16]. Figure 8 presents the results of hotspot detection with the maximum and minimum shunt resistances, including the shading condition.

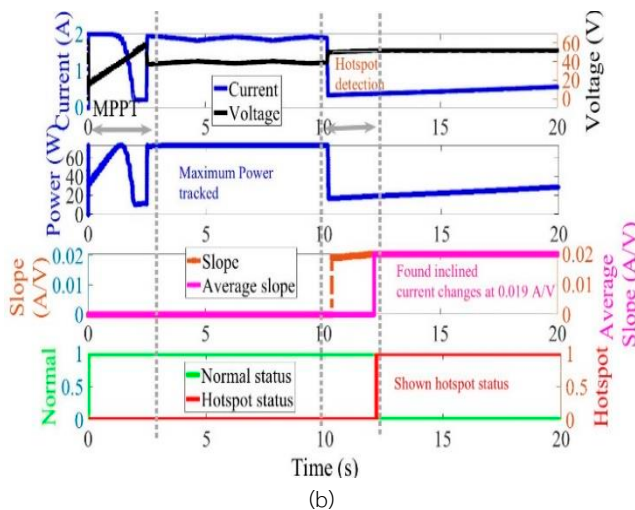
The results in Figure 8 confirm the efficiency of the proposed hotspot detection algorithm. The program starts with the first time MPPT to determine the maximum power of the total PV array, detecting at 72.74 W. The process takes approximately 2.5 seconds. Continuously, when the hotspot occurs at 10 seconds, the program starts to identify the hotspot by calculating $Slope[m]$ and detecting any incline of the current from the reverse bias current. The result shows the detected slope results. Less shunt resistance develops a higher slope.

Although the resistances vary the changes of PV cell current; the algorithm is capable to detect the incline change. After detection completes, the status indicator triggers from 0 to 1 for indication. The process takes approximately 2.23 seconds. Figures 8a to 8e show the detected slope results. Less shunt resistance develops a higher slope. Although the

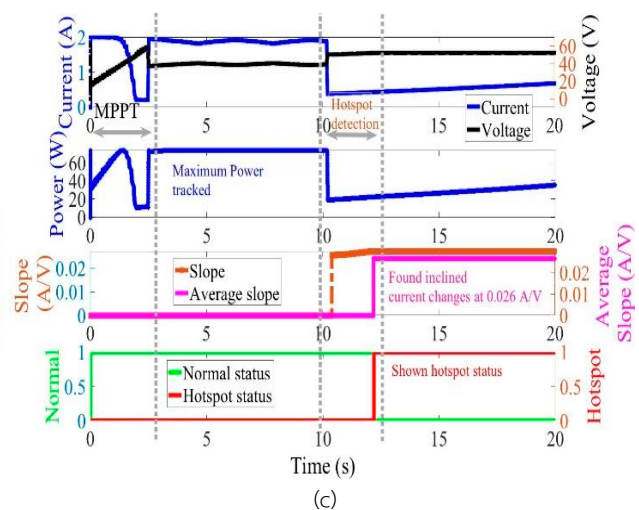
resistances vary the changes of PV cell current; the algorithm is capable to detect the incline change. After detection completes, the status indicator triggers from 0 to 1 for indication. The process takes approximately 2.23 seconds.



(a)



(b)



(c)

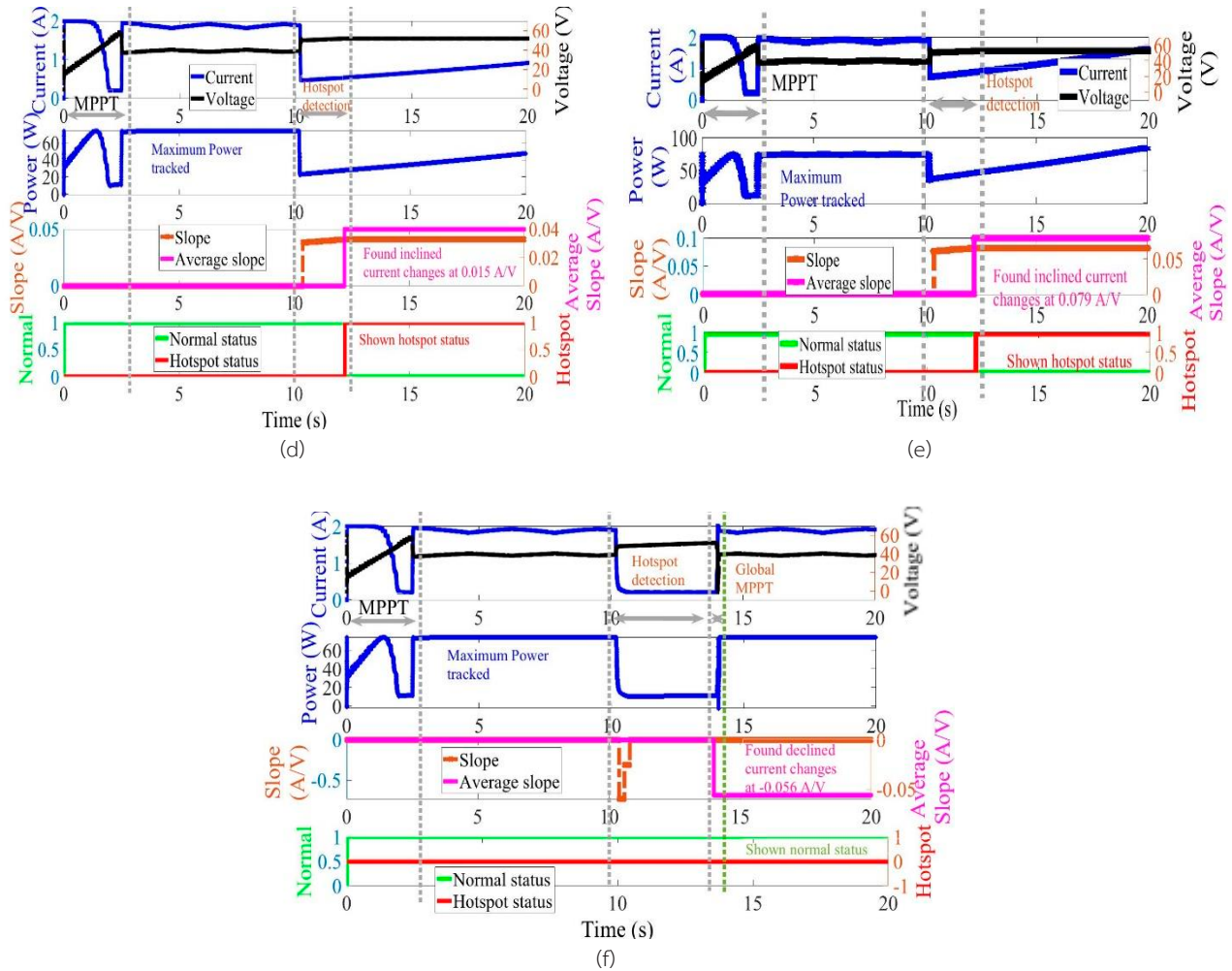


Figure 8 Graphical results of one-cell hotspot detection for shunt resistance cases

(a) 35 Ohm (b) 28 Ohm (c) 21 Ohm (d) 14 Ohm (e) 7 Ohm and (f) shading condition

On the other hand, the proposed algorithm can detect the occurrence of shading conditions. From figure 8f, the results show the detection of the normal condition with the decline slope at -0.15 A/V . The negative slope occurs due to the high parallel resistance in the healthy PV cell. Consequently, the system proceeds to the global MPPT algorithm to restore the power to the maximum level. The algorithm takes approximately 0.23 seconds to track the new global MPP.

Moreover, the proposed method is compared to other published hotspot detection techniques. In this case, the detection based on the real-time difference method is focused. Selected works include the hotspot index determination [12] and equivalent DC resistance and Thevenin impedance calculation [18]. Table I shows the comparison of hotspot detection techniques in terms of implementation requirement and detection capability.

Table 1 Comparison of hotspot detection techniques based on real time difference method

References	Hotspot detection techniques	Implementation requirement	Hotspot detection capability	Remarks
Proposed method	Reversed bias detection from the I-V curve	one current sensor and one voltage sensor	Can detect the hotspot in cell's scale	-
[12]	Hotspot Index determination using PV voltage's ratio	Sensor's number is proportional to number of tested and values of shunt and series resistance	Can detect the hotspot in cell's scale but at certain irradiation	• Test condition is limited to two cluster panels • Hard to distinguish from the shading condition
[18]	Equivalent DC resistance and Thevenin impedance calculation	two current sensors and one voltage sensor	Can detect the hotspot in cell's scale but limited to series-connected configuration	Threshold's calculation process used for detecting the hotspot is not described

Table 1 summarizes that the proposed method shows the least installed sensors, while other techniques require more. Fewer sensor installation makes the proposed algorithm becomes simple to implement with less cost. Also, in terms of the detection capability in cell scale, other techniques have limitations. Several points include certain irradiation and configuration limitation.

VI. CONCLUSION

This paper presents the improved hotspot model, which is derived from the elaborate analysis of the reversed bias effect stated in the IEC 61215 standard. The analysis shows the effects of hotspots from the factors, including the shunt resistance, level of irradiation and total performance in the cluster's structure PV module. Results show more development and compatibility of the hotspot's model, contributing to a more practical level with the PV's standard. The implementation and graphical results prove the efficiency and accuracy of the detection in different irradiation and shunt resistances. The algorithm shows fast detection within 5 seconds, representing the inclined average slope. The main

challenges are the determination of power dissipation, which requires more elaborate sensors installation and the material property parameters. Future works include the PV material characteristic analysis under hotspot conditions such as thermal distributions and heat transfer on each PV material structure.

REFERENCES

- [1] A. M. Salazar and E. Q. B. Macabebe, "Hotspots detection in photovoltaic modules using infrared thermography," in *The 3rd Int. Conf. Manufacturing and Industrial Technologies (ICMIT 2016)*, Istanbul, Turkey, May 2016, pp. 1–5, doi: 10.1051/mateconf/20167010015.
- [2] M. Dhinish, P. Mather, and V. Holmes, "Evaluating power loss and performance ratio of hot-spotted photovoltaic modules," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 12, pp. 5419–5427, 2018, doi: 10.1109/TED.2018.2877806.
- [3] D. S. Pillai and N. Rajasekar, "A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PV systems," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 18–40, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.082.
- [4] B. Hossam and K. Itako, "Real time hotspot detection using scan-method adopted with P&O MPPT for PV generation system," in *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conf. (SPEC)*, Auckland, New Zealand, Dec. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846122.

- [5] K. Yedidi, S. Tatapudi, J. Mallineni, B. Knisely, J. Kutiche, and G. Tamizhmani, "Failure and degradation modes and rates of PV modules in a hot-dry climate: Results after 16 years of field exposure," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)*, Denver, CO, USA, Jun. 2014, pp. 3245–3247, doi: 10.1109/PVSC.2014.6925626.
- [6] I. U. Khalil, A. U. Haq, Y. Mahmoud, M. Jalal, M. Aamir, M. U. Ahsan, and K. Mehmood, "Comparative analysis of photovoltaic faults and performance evaluation of its detection techniques," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26676–26700, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970531.
- [7] P. Bharadwaj, K. Karnataki, and V. John, "Formation of hotspots on healthy PV modules and their effect on output performance," in *2018 IEEE 7th World Conf. Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, Waikoloa, HI, USA, Jun. 2018, pp. 0676–0680, doi: 10.1109/PVSC.2018.8548126.
- [8] S. Deng, Z. Zhang, C. Ju, J. Dong, Z. Xia, X. Yan, T. Xua, and G. Xing, "Research on hot spot risk for high-efficiency solar module," *Energy Procedia*, vol. 130, pp. 77–86, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.399.
- [9] U. Hoyer, A. Burkert, R. Auer, C. B. Lutz, C. Vodermayr, M. Mayer, and G. Wotruba, "Analysis of PV modules by electroluminescence and IR thermography," in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (24th PVSEC)*, Hamburg, Germany, Sep. 2009, pp. 21–25.
- [10] L. Antonio and H. Steven, *Handbook of photovoltaic science and engineering*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2003.
- [11] M. Simon and E. L. Meyer, "Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, no. 2, pp. 106–113, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2009.09.016.
- [12] Y. Wang, K. Itako, T. Kudoh, K. Koh, and Q. Ge, "Voltage-based hot-spot detection method for photovoltaic string using a projector," *Energies*, vol. 10, no. 2, pp. 1–14, 2017, doi: 10.3390/en10020230.
- [13] K. A. Kim and P. T. Krein, "Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 5, pp. 1435–1441, Sep. 2015, doi: 10.1109/jphotov.2015.2444091.
- [14] T. Ghanbari, "Hot spot detection and prevention using a simple method in photovoltaic panels," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 4, pp. 883–890, Mar. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0794.
- [15] *Terrestrial photovoltaic (PV) modules- design qualification and type approval - Part 1: Test requirements*, IEC 61215-1, 2016.
- [16] D. Rossi, M. Omana, D. Giaffreda, and C. Metra, "Modeling and detection of hotspot in shaded photovoltaic cells," *IEEE Trans. Very Large Scale Integration*, vol. 23, no. 6, pp. 1031–1039, Jun. 2015, doi: 10.1109/tvlsi.2014.2333064.
- [17] J. Gosumbonggot and G. Fujita, "Partial shading detection and global maximum power point tracking algorithm for photovoltaic with the variation of irradiation and temperature," *Energies*, vol. 12, no. 2, pp. 1–22, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12020202.
- [18] T. Ghanbari, "Permanent partial shading detection for protection of photovoltaic panels against hot spotting," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 1, pp. 123–131, Sep. 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0294.

กรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงสำหรับผู้มีภาวะออทิสซึมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่

พิศณุ ชัยจิตวนิชกุล¹ วิชชา เพื่องจันทร์^{2*}

^{1,2*}สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, จังหวัดขอนแก่น, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : wicha@kku.ac.th

รับต้นฉบับ: 28 มกราคม 2564; รับบทความฉบับแก้ไข: 7 มีนาคม 2564; ตอบรับบทความ: 25 มีนาคม 2564

เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

โรคออทิสซึมเป็นกลุ่มของโรคที่เกิดจากความผิดปกติในการพัฒนาของระบบประสาทที่ซับซ้อน ส่งผลให้เกิดความบกพร่องทางด้านการปฏิสัมพันธ์กับสังคมและการสื่อสาร ทำให้มีความผิดปกติด้านภาษา และการพูด บางคนไม่พูดเลย บางคนพูดเลียนแบบ หรือบางคนพูดภาษาของตนเอง ทำให้ไม่สามารถสื่อสารความต้องการของตนเองกับผู้อื่นได้ ถึงแม้ว่าโรคออทิสซึมจะยังไม่มีวิธีรักษาให้หายขาด แต่การบำบัดสามารถช่วยพัฒนาทักษะและการเรียนรู้ให้กับคนกลุ่มนี้ ส่งผลให้ความเป็นอยู่และคุณภาพชีวิตดีขึ้น ซึ่งในศูนย์วิจัยออทิสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีกิจกรรมในการฝึกทักษะการพูดโดยใช้บัตรคำศัพท์พร้อมรูปภาพ และให้ความรู้ด้วยหนังสือหรือสไลด์ประกอบการสอน แต่เด็กไม่ให้ความสนใจในกิจกรรมนี้เท่าที่ควร จากการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามี การบำบัดความบกพร่องทางการสื่อสารโดยใช้แอปพลิเคชันหรือเกมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่อย่างแพร่หลาย การใช้รูปแบบการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมจะเป็นกุญแจนำไปสู่ความสำเร็จของการบำบัดนี้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงบนอุปกรณ์เคลื่อนที่สำหรับผู้มีภาวะออทิสซึม และนำเสนอกรอบการปฏิสัมพันธ์เพื่อเป็นแนวทางให้นักพัฒนาได้ออกแบบแอปพลิเคชันหรือเกมด้วยเทคนิคการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับการบำบัดความบกพร่องทางการสื่อสาร โดยที่นักพัฒนาสามารถลดระยะเวลาในการพัฒนาลงด้วยการทำตามกรอบที่นำเสนอในการเลือกการปฏิสัมพันธ์ เพื่อเป็นการยืนยันถึงประสิทธิผล งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเกมตัวอย่างชื่อ “Run Animal Run” เพื่อให้ความรู้โดยใช้สื่อประสมเชิงโต้ตอบ (Interactive multimedia) และฝึกฝนทักษะการออกเสียงโดยเลือกใช้เทคนิคการปฏิสัมพันธ์จากกรอบการปฏิสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอไว้ และนำเกมตัวอย่างนี้ไปทดลองกับอาสาสมัครที่ศูนย์วิจัยออทิสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอาสาสมัครสามารถเรียนรู้ได้ดีขึ้นกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม และใช้การปฏิสัมพันธ์ที่ออกแบบในการโต้ตอบกับเกมตัวอย่างได้ โดยช่วยกระตุ้นความสนใจ พร้อมทั้งพัฒนาทักษะทางด้านภาษาด้วย

คำสำคัญ : ออทิสซึม การปฏิสัมพันธ์ เสียง การพูด อุปกรณ์เคลื่อนที่

The Sound Interaction Framework for People with Autism on Mobile Devices

Pitsanu Chaichitwanidchakol¹ Witcha Feungchan^{2*}

^{1,2*}*Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: witcha@kku.ac.th

Received: 28 January 2021; Revised: 7 March 2021; Accepted: 25 March 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

Autism spectrum disorders (ASDs) is a group of complex neurodevelopmental disorders characterized by impairments in social interaction and communication. It results in language and speech disorders. Some autistic people may not speak at all, some imitate, and others speak their own language. This impedes the ability to communicate their own needs to others. Although cure for autism remains unknown, therapy can help develop skills and learning for them, leading to better well-being and quality of life. At Autism Research Center, Khon Kaen University, flash cards with pictures, books, and teaching slides have been used to improve speaking competency, but the children have not been satisfactorily interested in them. Today, communication disabilities are being widely treated by using mobile applications or games. Appropriate interaction is the key to the success of this therapy. Therefore, this paper presents a mobile sound interaction technique for people with autism. Developers could shorten their development time by following the proposed framework guideline to select the right interaction. To confirm the effectiveness, this research developed a game called “Run animal Run” by using the presented interaction framework and interactive multimedia, and then the game is employed with the volunteers at Autism Research Center, Khon Kaen University. The results showed that volunteers were able to interact with Run Animal Run game by using the designed interactions. This game help stimulating interest and improving their language skills.

Keywords: Autism, Interaction, Sound, Speech, Mobile devices

1) บทนำ

ออทิสซึม (Autism Spectrum Disorder: ASD) เป็นกลุ่มของโรคที่มีสาเหตุจากความผิดปกติของสมองตั้งแต่กำเนิด ทำให้มีความบกพร่องทางพัฒนาการหลายด้าน ได้แก่ พัฒนาการด้านภาษา และสังคมล่าช้า พัฒนาการด้านพฤติกรรมมีความผิดปกติโดยมีพฤติกรรมความสนใจและการกระทำที่ซ้ำ ๆ และจำกัดความบกพร่องเหล่านี้ยังคงมีต่อเนื่องตลอดชีวิต จากข้อมูลทางสถิติทั่วโลกพบอัตราการเกิดภาวะออทิสซึม 1 ต่อ 160 คน [1] ส่วนในประเทศไทยพบอัตราผู้มีความออทิสซึม 1 ต่อ 167 คน คาดว่าทั่วประเทศจะมีผู้มีความออทิสซึมประมาณ 300,000 คน [2] ซึ่งโรคนี้ยังไม่สามารถรักษาให้หายขาดได้ ดังนั้นแนวทางการรักษาจึงใช้การบำบัดโดยเน้นการเสริมสร้างพัฒนาการและปรับลดพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสม ทำให้ผู้มีความออทิสซึมสามารถดำรงชีวิตประจำวันได้ใกล้เคียงกับมนุษย์ปกติมากที่สุด

ความบกพร่องด้านการสื่อสาร ทำให้ผู้มีความออทิสซึมมีปัญหาตั้งแต่พัฒนาการทางด้านภาษา จนถึงขั้นไม่สามารถใช้การพูดหรือภาษาท่าทางสื่อสารกับผู้อื่นได้ สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการพัฒนาทักษะทางการสื่อสารมี 2 วิธี คือ 1) ระบบแลกเปลี่ยนรูปภาพเพื่อการสื่อสาร (Picture Exchange Communication System: PECS) [3], [4] เป็นเทคนิคที่ใช้รูปภาพเพื่อแลกเปลี่ยนกับสิ่งที่ต้องการ สอนให้ผู้มีความออทิสซึมเข้าใจกระบวนการและทักษะการสื่อสาร และ 2) เทคนิคการสื่อความหมายทดแทน (Augmentative and Alternative Communication: AAC) [5], [6] เพื่อใช้ทดแทนการพูดเป็นการชั่วคราว หรือโดยถาวรในรายที่มีความบกพร่องทางการพูดอย่างรุนแรง โดย PECS นั้นจะเหมาะกับผู้ที่เริ่มต้นฝึกฝนการสื่อสาร ส่วน AAC เหมาะกับการส่งเสริมหรือสนับสนุนผู้ที่มีความบกพร่องให้สามารถสื่อสารกับผู้อื่นได้ด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกจากนี้ในปัจจุบันนิยมใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่มาช่วยในการบำบัดผ่านการใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับผู้มีความออทิสซึมที่บกพร่องทางการสื่อสาร เช่น [3], [7], [8] และ [9]

ในการออกแบบแอปพลิเคชันหรือเกมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ การใช้รูปแบบการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมจะเป็นกุญแจนำไปสู่ความสำเร็จของการใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่หรือเกมในการบำบัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและนำเสนอเทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงบนอุปกรณ์เคลื่อนที่สำหรับผู้มีความออทิสซึม และนำเสนอกรอบการปฏิสัมพันธ์ที่รวบรวมเทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักพัฒนานำไปเลือกใช้

เทคนิคการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับออกแบบแอปพลิเคชันหรือเกมเพื่อการบำบัดความบกพร่องทางการสื่อสาร และช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาเนื่องจากนักพัฒนาไม่ต้องเสียเวลาไปค้นหาหรือทบทวนวรรณกรรมเพื่อเลือกรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับผู้มีความออทิสซึม

เพื่อเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเกมตัวอย่างประเภทเกมจริงจัง (serious game) โดยเลือกใช้กรอบการปฏิสัมพันธ์ที่ได้นำเสนอไว้ เกมตัวอย่างนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ 1) ส่วนให้ความรู้ โดยใช้สื่อที่เป็นสื่อประสมเชิงโต้ตอบ และ 2) ส่วนฝึกทักษะการออกเสียง โดยใช้การปฏิสัมพันธ์โดยการพูด ฝึกให้อาสาสมัครได้พูดออกเสียงคำศัพท์ตามสิ่งที่ได้เรียนรู้มา และนำเกมตัวอย่างนี้ไปทดลองกับอาสาสมัครที่ศูนย์วิจัยออทิสติก มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอาสาสมัครสามารถเรียนรู้ด้วยวิธีการใช้สื่อประสมเชิงโต้ตอบได้ดีกว่าการสอนโดยใช้หนังสือ แผ่นภาพบัตรคำศัพท์หรือโปรแกรมนำเสนอแบบดั้งเดิม และอาสาสมัครสามารถใช้การปฏิสัมพันธ์ที่ออกแบบในการโต้ตอบกับเกมตัวอย่างได้ โดยช่วยกระตุ้นความสนใจได้มากกว่าการใช้เกมบัตรคำศัพท์แบบดั้งเดิม พร้อมทั้งส่งเสริมการพัฒนาทักษะทางด้านภาษา

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนากรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงสำหรับผู้มีความออทิสซึม และพัฒนาเกมตัวอย่างที่ใช้กรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง เพื่อพัฒนาทักษะทางการออกเสียงของผู้มีความออทิสซึม

3) วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบเทคนิคที่นำมาใช้ในการออกแบบแอปพลิเคชันหรือเกมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่เพื่อพัฒนาทักษะทางการสื่อสาร 4 เทคนิคดังนี้

3.1) ระบบแลกเปลี่ยนรูปภาพเพื่อการสื่อสาร (Picture Exchange Communication System: PECS) คือ เทคนิคที่ใช้รูปภาพเพื่อแลกเปลี่ยนกับสิ่งที่ต้องการ โดยที่เทคนิคนี้ในตอนเริ่มต้นการสื่อสารจะเป็นการแลกเปลี่ยนภาพระหว่างคู่สนทนา 2 คน โดยไม่มีการพูดคุยกัน ถัดจากนั้นผู้สอนจะเริ่มพูดคุยกับเด็กทีละน้อย ในตอนแรกเด็กอาจยังไม่โต้ตอบแต่ต่อมา

เด็กจะเริ่มโต้ตอบโดยใช้อุปกรณ์ โดยใช้อักษรภาพทางและใช้ภาษาพูดในที่สุด

3.2) เทคนิคการสื่อความหมายทดแทน (Augmentative and Alternative Communication: AAC) คือ เป็นเทคนิคการสื่อสารโดยการสนับสนุนความสามารถในการพูดที่มีอยู่ หรือใช้วิธีการอื่นแทนการสื่อสารด้วยการพูด แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) Augmentative Communication หมายถึง วิธีการสนับสนุนทักษะการพูดของคนที่มีความบกพร่องให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้เพื่อสนับสนุนความสามารถที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้น และ 2) Alternative Communication หมายถึง วิธีการที่นำใช้ทดแทนการสื่อสารด้วยการพูด สำหรับคนที่ไม่สามารถใช้ภาษาพูดได้เลย เช่น ท่าทาง ภาพสัญลักษณ์ และอุปกรณ์สื่อสารที่มีเสียงพูดแทน

3.3) เทคนิคการรู้จำเสียงพูดโดยอัตโนมัติ (Automatic Speech Recognition: ASR) คือ เทคนิคที่สามารถแปลงภาษาพูดไปเป็นข้อความตัวอักษรได้โดยอัตโนมัติ

3.4) เทคนิคการติดตามการบำบัดการพูด (Speech Therapy Monitoring: STM) คือ เทคนิคที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลการบำบัดเพื่อนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยการพูด และนำผลที่ได้ไปปรับปรุงกระบวนการในการบำบัดต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเกม Run Animal Run เพื่อใช้พัฒนาทักษะการด้านการออกเสียงโดยใช้เทคนิค 3 เทคนิค คือ PECS AAC และ ASR ส่วนเทคนิค STM จะนำไปใช้ในการวิจัยต่อจากงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบเกม Run Animal Run กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย \ เทคนิค	PECS	AAC	ASR	STM
[3]	✓			
[4]	✓			
[5]		✓		
[6]		✓		
[7]			✓	
[8]				✓
[9]	✓			
Run Animal Run	✓	✓	✓	

โดยพบปัญหาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนมาก คือ ไม่สามารถดึงดูดความสนใจในการเรียนรู้ได้นานเท่าที่ควร และไม่สามารถรองรับผู้ที่มีภาวะออทิสซึมได้ทุกกลุ่มอาการ

4) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงสำหรับผู้มีภาวะออทิสซึม

4.1) ลักษณะของผู้มีภาวะออทิสซึม

ผู้มีภาวะออทิสซึมจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามที่แบบประเมินความระดับความเป็นออทิสติก [10] และ [11] ได้กล่าวไว้ดังนี้

4.1.1) ระดับกลุ่มที่มีอาการน้อย (Mild autism) หรือเรียกว่ากลุ่มออทิสซึมศักยภาพสูง (High functional autism) ในกลุ่มนี้จะมีระดับสติปัญญาปกติหรือสูงกว่าปกติ มีพัฒนาการทางภาษาดีกว่ากลุ่มอื่น สามารถสื่อสารกับบุคคลอื่นได้ดีพอใช้ แต่ยังคงมีความบกพร่องในด้านการปฏิสัมพันธ์ทางสังคม

4.1.2) ระดับกลุ่มที่มีอาการปานกลาง (Moderate autism) ในกลุ่มนี้จะมีระดับความบกพร่องด้านการสื่อสาร ด้านสังคม และการเรียนรู้ สามารถช่วยเหลือตนเองได้บ้าง ในบางรายสามารถสื่อสารเป็นคำ แต่ไม่สามารถสื่อสารเป็นประโยคได้

4.1.3) ระดับกลุ่มที่มีอาการรุนแรง (Severe autism) ในกลุ่มนี้จะมีระดับความล่าช้าในพัฒนาการเกือบทุกด้าน ไม่สามารถพูดสื่อสารกับผู้อื่นได้ และอาจมีภาวะอื่นเกิดร่วมด้วย เช่น ปัญญาอ่อน ทำให้ในกลุ่มนี้ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ ต้องมีผู้ดูแลตลอดชีวิต

4.2) เสียง

เสียง เป็นคลื่นเชิงกลที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการอัดตัวและขยายตัวของคลื่นเสียง และถูกส่งผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ ไปยังหู เมื่อคลื่นเสียงถูกส่งมาถึงหู ทำให้มนุษย์เกิดการรับรู้ และจำแนกเสียงต่าง ๆ ได้

ในงานวิจัยนี้เป็นการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง ดังนั้นสิ่งสำคัญในการนำเสียงไปใช้ปฏิสัมพันธ์ คือ แหล่งกำเนิดเสียง ซึ่งต้องมาจากผู้มีภาวะออทิสซึม โดยสามารถแบ่งวิธีที่ให้กำเนิดเสียงออกเป็น 2 วิธีดังนี้

4.2.1) การกำเนิดเสียงจากผู้มีภาวะออทิสซึมโดยการใช้อวัยวะเปล่งเสียง เช่น พูดเป็นประโยค พูดเป็นคำ เปล่งเสียงที่ไม่เป็นประโยคหรือเป็นคำ และผิวปาก

4.2.2) การกำเนิดเสียงจากผู้มีภาวะออทิสซึมโดยการทำให้วัตถุหรือร่างกายเกิดการสั่นสะเทือน เช่น ทูบหน้าอก ประหมือ เคาะโต๊ะ เคาะกล่อง และตีกลอง

5) การออกแบบ

5.1) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง (Sound Interaction)

การรับรู้ของมนุษย์มีทั้งหมด 5 ด้าน ด้านการได้ยินมีส่วนในการรับรู้รายละเอียด 13 [12] ซึ่งเป็นอันดับสองรองลงมาจากด้านการมองเห็น ดังนั้นการได้ยินจึงมีส่วนสำคัญในการเรียนรู้หรือฝึกทักษะด้านต่าง ๆ การปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์รับฟังสำหรับการปฏิสัมพันธ์

จากการจำแนกกลุ่มของผู้มีภาวะออทิสซึม และวิธีการให้กำเนิดเสียง สามารถสรุปข้อมูลสำหรับการออกแบบได้ดังนี้ กลุ่มที่มีอาการน้อย ส่วนมากสามารถพูดเป็นประโยคหรือเป็นคำได้จะสามารถใช้การปฏิสัมพันธ์โดยการพูดแบบมนุษย์ปกติทั่วไป แต่ถ้าเป็นกลุ่มที่มีอาการปานกลาง ผู้มีภาวะออทิสซึมที่ไม่สามารถพูดเป็นคำได้ จะใช้การเปล่งเสียง (คำที่ไม่มีความหมาย หรือมีความหมาย เฉพาะผู้ที่อยู่ใกล้ชิดเท่านั้นที่จะเข้าใจ) ไปใช้ในการปฏิสัมพันธ์ ส่วนในกรณีของกลุ่มที่มีอาการรุนแรง ผู้มีภาวะออทิสซึมไม่สามารถพูดเป็นคำได้ หรือไม่เปล่งเสียง ในบางรายสามารถสร้างเสียงด้วยการทุบหน้าอก เคาะโต๊ะ ดังนั้นจะใช้เสียงที่ถูกสร้างขึ้นในการปฏิสัมพันธ์ ซึ่งการจะเข้าใจความหมายของเสียงที่สร้างขึ้นนี้ ต้องให้ผู้ที่อยู่ใกล้ชิดมาช่วยอธิบายหรือให้ข้อมูลเพิ่มเติม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น ทำให้สามารถออกแบบรูปแบบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ที่เหมาะกับผู้มีภาวะออทิสซึมแต่ละกลุ่ม ดังนี้

5.1.1) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด เหมาะกับผู้มีภาวะออทิสซึมในกลุ่มที่มีอาการน้อย และอาการปานกลางบางคนที่สามารถพูดได้

5.1.2) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การเปล่งเสียง เหมาะกับผู้มีภาวะออทิสซึมกลุ่มที่มีอาการน้อย อาการปานกลาง และอาการรุนแรงบางคนที่สามารถเปล่งเสียงได้

5.1.3) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การสร้างเสียงจากร่างกายหรือวัตถุ เหมาะกับผู้มีภาวะออทิสซึมทุกกลุ่มอาการผู้มีภาวะออทิสซึมทุกกลุ่มอาการ

5.2) กรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง (Sound Interaction Framework: SIF)

SIF ออกแบบขึ้นเพื่อรวบรวมเทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง ซึ่งจะช่วยนักพัฒนาในการเลือกใช้เทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงที่เหมาะสมกับแอปพลิเคชันหรือเกมที่ต้องการจะพัฒนา

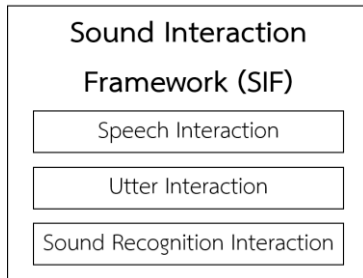
จากการออกแบบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงในส่วนที่แล้วได้ การปฏิสัมพันธ์ทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด 2) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การเปล่งเสียง และ 3) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การสร้างเสียงจากร่างกายหรือวัตถุ เมื่อพิจารณาการปฏิสัมพันธ์ที่ 1 และ 2 สามารถนำมาใช้ในการออกแบบการปฏิสัมพันธ์ได้ แต่การปฏิสัมพันธ์ที่ 3 ได้ปรับไปใช้เทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยการรู้จำเสียง เพื่อการตอบสนองและแยกแยะเสียงที่หลากหลายได้ ดังนั้น SIF ประกอบไปด้วย 3 รูปแบบการปฏิสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 1 แต่ละรูปแบบการปฏิสัมพันธ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1) การปฏิสัมพันธ์โดยการพูด (Speech Interaction) ใช้การตรวจจบบการพูดเป็นประโยคหรือเป็นคำ เพื่อใช้ในการปฏิสัมพันธ์ โดยการปฏิสัมพันธ์ในรูปแบบนี้ผู้ที่ใช้งานต้องสามารถพูดเป็นประโยคหรือเป็นคำได้ มีรูปแบบการทำงาน คือ เมื่อระบบได้รับเสียงพูด ระบบจะทำการแปลงเสียงพูดนั้นไปเป็นตัวอักษรเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

5.2.2) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การเปล่งเสียง (Utter Interaction) ใช้การตรวจจกระดับความดัง (Volume) ของเสียงเพื่อใช้ในการปฏิสัมพันธ์ โดยสามารถใช้งานกับผู้มีภาวะออทิสซึมที่พูดไม่เป็นประโยค หรือเป็นคำ แต่สามารถเปล่งเสียงได้ มีรูปแบบการทำงาน คือ เมื่อระบบได้รับเสียงเข้ามา ระบบจะทำการวิเคราะห์ระดับความดังของเสียง โดยดูจากแอมพลิจูดของคลื่นเสียงนั้น ถ้าแอมพลิจูดมีค่ามาก หมายความว่าเสียงดัง แต่ถ้าแอมพลิจูดมีค่าน้อย หมายความว่าเสียงเบา

5.2.3) การปฏิสัมพันธ์โดยการรู้จำเสียง (Sound Recognition Interaction) ใช้การรู้จำเสียงในการปฏิสัมพันธ์ โดยสามารถใช้เสียงที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ เช่น เสียงทุบอก เสียงเคาะโต๊ะ หรือเสียงประหมือ การปฏิสัมพันธ์นี้สามารถใช้งานได้กับผู้มีภาวะออทิสซึมทุกระดับ แต่ต้องมีการเก็บข้อมูลของเสียงและความหมายเป็นรายบุคคล ร่วมกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์และแปลผล มีรูปแบบการทำงาน คือ เมื่อระบบได้รับเสียงเข้ามา เทคนิคการรู้จำเสียงจะถูกเรียก

ขึ้นมาทำงานเพื่อวิเคราะห์ หรือนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในฐานข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อให้คำตอบว่าเสียงที่รับเข้ามานั้นเป็นเสียงอะไร



รูปที่ 1 กรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียง
(Sound Interaction Framework: SIF)

5.3) การออกแบบเกมตัวอย่าง

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของกรอบการปฏิสัมพันธ์นี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด (Speech Interaction) ใน SIF มาออกแบบและพัฒนาเกมตัวอย่าง ชื่อเกม Run Animal Run และนำไปทดสอบกับผู้มีภาวะออทิสซึม เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบยืนยันถึงประสิทธิผลของ SIF

5.3.1) รายละเอียด เกม Run Animal Run คือเกมจริงจังที่ใช้สอนคำศัพท์และฝึกให้ผู้มีภาวะออทิสซึมออกเสียงคำศัพท์ภาษาอังกฤษเกี่ยวกับชื่อสัตว์ให้ถูกต้อง โดยมีการปฏิสัมพันธ์โต้ตอบกับเกมโดยใช้เสียง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงพูดกับเกมตัวอย่าง

5.3.2) เกมเพลย์ (Gameplay) เกมแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดเรียนรู้ และโหมดเล่นเกม เมื่อเข้าสู่แอปพลิเคชันจะปรากฏตัวเลือกให้ผู้เล่นเลือกโหมดของเกม

เลือกโหมดเรียนรู้ เกมจะแสดงหน้าจอแสดงรูปสัตว์และรายละเอียดของสัตว์แต่ละชนิด โดยด้านรูปลักษณะ จะนำเสนอภาพถ่ายสัตว์และภาพวาดเพื่อให้ผู้ใช้เรียนรู้ลักษณะทางกายภาพของสัตว์แต่ละชนิดในมุมมองที่ต่างกัน ชื่อสัตว์นำเสนอเป็นภาษาอังกฤษเพื่อให้ผู้เล่นได้ใช้ในการเรียนรู้และจดจำคำศัพท์ และเรียนรู้การออกเสียงที่ถูกต้อง นอกจากนั้นยังสามารถรับฟังเสียงร้องสัตว์แต่ละประเภทได้ ในส่วนการเรียนรู้ถูกออกแบบให้สอดคล้องกับเนื้อหาวิชาภาษาอังกฤษ หมวดเรียนรู้เรื่องสัตว์ต่าง ๆ

เลือกโหมดเล่นเกม ระบบจะให้ผู้เล่นสร้างโปรไฟล์ผู้เล่นเพื่อบันทึกคะแนนและระดับความยากของเกม ก่อนเข้าเกมจะมีนิทานเล่าเรื่องราวเกี่ยวกับฟาร์มให้ผู้เล่นคล้อยตาม เมื่อผู้เล่นทราบวัตถุประสงค์หลักของเกม บทบาทและหน้าที่ของตนแล้วจึงสามารถเริ่มเล่นเกมได้

ตัวละครสัตว์จะเดินออกมาจากโรงเลี้ยงสัตว์ โดยสัตว์ที่ออกมาแต่ละตัวนั้นจะเป็นการสุ่ม และไม่มีระยะเวลาที่แน่นอน

หมาป่ามีหน้าที่ไล่ล่าสัตว์ที่วิ่งออกมาจากคอก หากสัตว์ถูกกิน สัตว์ตัวนั้นจะหายไป

ผู้เล่นจะต้องพูดชื่อของสัตว์เป็นภาษาอังกฤษ เพื่อให้สัตว์วิ่งกลับเข้าไปในโรงเลี้ยงสัตว์ โดยจะต้องพูดชื่อสัตว์นั้นให้ถูกต้อง และต้องเป็นสัตว์ที่ถูกปล่อยออกมาเท่านั้น ถ้าผู้เล่นพูดชื่อสัตว์ที่ถูกปล่อยออกมาถูกต้อง สัตว์ตัวนั้นจะวิ่งกลับไปโรงเลี้ยงสัตว์ทันที หากออกเสียงไม่ถูกต้องสัตว์จะยังคงเดินต่อไป โดยผู้เล่นสามารถพูดชื่อสัตว์ตัวใหม่ได้หากในขณะนั้นมีสัตว์ถูกปล่อยออกมาหลายตัว

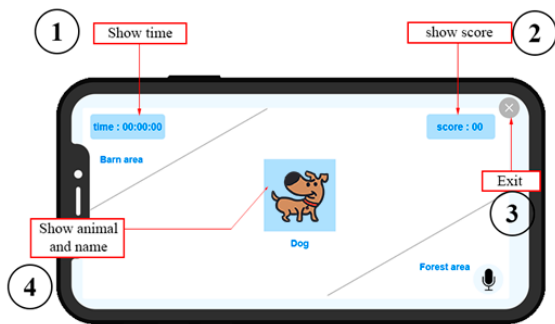
เมื่อครบกำหนดเวลา 4 นาทีเกมจะจบลงทันที ในหน้าจบเกมจะแสดงจำนวนและรายชื่อสัตว์ที่ช่วยได้ให้ผู้เล่นทราบ จากนั้นระบบจะบันทึกข้อมูลเก็บไว้เพื่อใช้ในการติดตามผลพัฒนาการด้านการเรียนรู้ของผู้เล่นแต่ละคน เช่นสามารถออกเสียงสัตว์ได้ถูกต้องร้อยละ 80 ของศัพท์ทั้งหมด

5.3.3) การออกแบบระบบของเกม (Game system) ระบบของเกมประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเกี่ยวข้องกับการเรียนรู้คำศัพท์ภาษาอังกฤษ และส่วนที่สองเกี่ยวข้องกับการฝึกออกเสียงชื่อสัตว์เป็นภาษาอังกฤษ

ส่วนที่ 1 ระบบเรียนรู้คำศัพท์ภาษาอังกฤษ ออกแบบโดยใช้เทคนิค PECS และ AAC นำเสนอด้วยสื่อประสมเชิงโต้ตอบ ใช้รูปภาพและเสียงของสัตว์จริงในการสอน เพื่อดึงดูดความสนใจในขณะที่เรียนรู้ให้ได้มากที่สุด

ส่วนที่ 2 ระบบฝึกออกเสียงชื่อสัตว์เป็นภาษาอังกฤษ ใช้เทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด โดยเทคนิคนี้ใช้การรู้จำเสียงพูด (Speech recognition) หรือเทคนิค ASR เป็นฟังก์ชันในการทำงานหลัก เพื่อตรวจจับการพูดชื่อสัตว์และนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลชื่อสัตว์ที่ปรากฏในเกม

5.3.4) การออกแบบส่วนต่อประสานของเกม (Game interface) แสดงดังรูปที่ 3 โดยประกอบด้วย 1) ส่วนแสดงเวลา 2) ส่วนแสดงคะแนน 3) ปุ่มปิดเกม และ 4) ส่วนแสดงสัตว์และชื่อสัตว์ภาษาอังกฤษ



รูปที่ 3 การออกแบบส่วนต่อประสานเกม Run Animal Run

5.4) การออกแบบการทดลอง

ในการทดลอง กำหนดให้อาสาสมัคร ได้ทดสอบเล่นเกม Run Animal Run โดยอาสาสมัครแต่ละคนจะได้เล่นเกม 2 แบบเพื่อเปรียบเทียบกัน แสดงดังตารางที่ 2 แบบแรกจะใช้บัตรภาพ ส่วนแบบที่ 2 จะใช้เกม Run Animal Run โดยอาสาสมัครจะได้เล่นเกมทั้ง 2 แบบนี้ แบบละ 2 ครั้ง ใช้เวลาในการเล่นเกมนั้นประมาณ 10-15 นาที ครูผู้ดูแลและนักพัฒนาบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง

5.4.1) การเลือกกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นนักเรียนที่มีภาวะออทิสซึม อายุ 6-12 ปี และต้องได้รับความยินยอมจากผู้ปกครอง ก่อนที่จะเข้าเป็นอาสาสมัครของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีอาสาสมัครทั้งหมด 2 คน เป็นเพศชายทั้งหมด

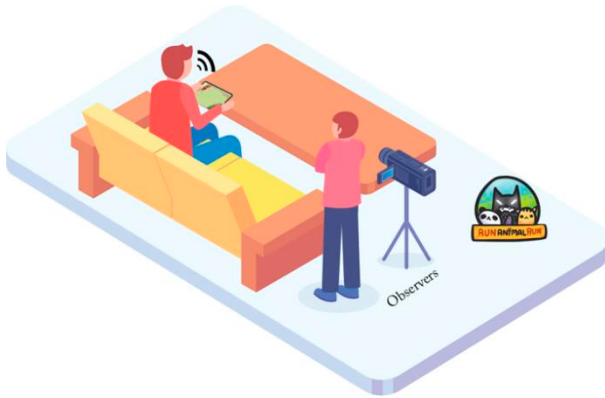
5.4.2) การติดตั้งอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ iPhone หรือ iPad โดยที่อาสาสมัครจะได้สัมผัสและโต้ตอบกับอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4

ตารางที่ 2 สรุปลักษณะการทดสอบกับอาสาสมัคร

เกม	การทดสอบกับอาสาสมัคร
บัตรภาพ	- นำคำศัพท์สัตว์ทั้งหมด 18 คำ แบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนละ 9 คำ - นำคำศัพท์ตอนที่ 1 (เลเวล 1) ให้อาสาสมัครเรียนรู้และจดจำคำศัพท์ - เรียนโดยใช้บัตรภาพ โดยให้เด็กดูภาพจากบัตร ครูหรือผู้ปกครองเป็นผู้อ่านออกเสียงให้อาสาสมัครฟัง และให้อาสาสมัครออกเสียงตาม จากนั้นสุ่มหยิบบัตรภาพเพื่อให้อาสาสมัครตอบ - บันทึกพฤติกรรมของอาสาสมัครด้วยกล้องวิดีโอและสังเกตพฤติกรรมโดยคุณครูและนักพัฒนา แสดงดังรูปที่ 5 - ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 อีกครั้งแต่เปลี่ยนคำศัพท์เป็นตอนที่ 2 (เลเวล 2)
Run Animal Run	- นำคำศัพท์สัตว์ทั้งหมด 18 คำ แบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนละ 9 คำ - นำคำศัพท์ตอนที่ 1 (เลเวล 1) ให้อาสาสมัครเรียนรู้และจดจำคำศัพท์ - เรียนโดยใช้เกม Run Animal Run สามารถเข้าสู่โหมดการเรียนรู้ในเกมก่อน คลิกที่ภาพสัตว์เพื่อฟังเสียงและให้อาสาสมัครออกเสียงตาม จากนั้นให้อาสาสมัครเล่นเกมเพื่อทบทวน - บันทึกพฤติกรรมของอาสาสมัครด้วยกล้องวิดีโอและสังเกตพฤติกรรมโดยคุณครูและนักพัฒนา แสดงดังรูปที่ 5 - ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 อีกครั้งแต่เปลี่ยนคำศัพท์เป็นตอนที่ 2 (เลเวล 2)



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเกม Run Animal Run



รูปที่ 5 การเก็บข้อมูลและบันทึกวิดีโอขณะทดลอง

6) ผลการศึกษา

6.1) ผลการพัฒนาเกม Run Animal Run

เกม Run Animal Run รันทดสอบบน iPhone หรือ iPad จากการออกแบบส่วนต่อประสานในส่วนที่แล้ว ได้ผลแสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 หน้าเรียนรู้ของเกม Run Animal Run



รูปที่ 7 หน้าเล่นเกมของเกม Run Animal Run

6.2) ผลการทดลอง

6.2.1) รูประหว่างการทดลอง ในระหว่างการทดลองกับอาสาสมัครที่มีครูที่เลี้ยงและผู้วิจัยเฝ้าสังเกตและบันทึกผลอยู่ด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 อาสาสมัครทดลองเล่นเกม Run Animal Run

6.2.2) ผลที่ได้จากการทดลอง

ก) ด้านความสนใจ (Attention) สามารถแสดงข้อมูลพฤติกรรมความสนใจของอาสาสมัครในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

อาสาสมัครจะให้ความสนใจกับการเรียนโดยใช้เกมมากกว่าการใช้บัตรภาพ โดยอาสาสมัครไม่ได้หยุดสนใจระหว่างการเล่น แต่เมื่อเรียนโดยใช้บัตรภาพอาสาสมัครหยุดสนใจระหว่างการเรียนเฉลี่ย 1 ครั้งและใช้เวลาทำให้อาสาสมัครกลับมาสนใจเฉลี่ย 1 นาที 13 วินาที นอกจากนี้แล้วอาสาสมัครสามารถเพ่งความสนใจกับการเล่นเกมได้นานเฉลี่ย 8 นาที 29 วินาทีซึ่งนานกว่าการเรียนโดยใช้บัตรภาพที่ใช้เวลาเฉลี่ย 2 นาที 55 วินาที

ข) ด้านการออกเสียง (Pronunciation) อาสาสมัครพยายามออกเสียงตามทั้งในการเรียนแบบใช้เกมและการเรียนแบบใช้บัตรภาพ แต่ทั้งนี้การใช้บัตรภาพในการสอนจำเป็นต้องมีการกระตุ้นหลายครั้งจากคุณครูผู้ดูแล

ค) การให้รางวัล (Rewarding) มีการให้รางวัลเมื่ออาสาสมัครทำได้ โดยในการเรียนโดยใช้เกมมีการกระตุ้นความสนใจของอาสาสมัครอยู่ตลอดเวลาโดยให้รางวัลในรูปแบบของการแสดงคะแนนที่เพิ่มขึ้นเมื่ออาสาสมัครทำได้ อาสาสมัครแสดง

อาการดีใจเมื่อได้รางวัลและพยายามทำคะแนนให้ได้มากขึ้น การให้รางวัลด้วยคะแนนจึงนับว่ามีความเหมาะสมในการเสริมแรงทางบวก

ตารางที่ 3 ข้อมูลพฤติกรรมความสนใจของอาสาสมัคร

หัวข้อ	แบบใช้บัตรภาพ			แบบใช้เกม Run Animal Run		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
อาสาสมัครหยุดสนใจระหว่างการทดลอง (ครั้ง)	2	1	1	0	0	0
เวลาเฉลี่ยที่ทำให้อาสาสมัครกลับมาสนใจเล่นเกมต่อ (นาท)	1.55	0.20	1.13	0	0	0
เวลาทั้งหมดที่อาสาสมัครสนใจ (นาท)	3.55	1.55	2.55	8.22	8.36	8.29

6.2.3) ผลที่ได้จากแบบสอบถาม

หลังจากทดลองเกมกับผู้ใช้งานแล้วได้มีการปรับปรุงเกมให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานและทำให้ใช้งานได้ง่าย จากแบบประเมินความพึงพอใจของครูที่มีต่อเกมแบบใช้บัตรภาพและเกม Run Animal Run สามารถสรุปคะแนนในแต่ละด้าน โดยคะแนนสูงสุดคือ 5 คะแนน น้อยสุดคือ 0 คะแนน ได้ผลดังนี้

ก) ด้านกระบวนการติดตั้งและความเข้าใจในการใช้งาน เกมแบบใช้บัตรภาพได้คะแนนเฉลี่ย 3.67 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ส่วนเกม Run Animal Run ได้คะแนนเฉลี่ย 5 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

ข) ด้านภาพรวมของเกม เกมแบบใช้บัตรภาพได้คะแนนเฉลี่ย 3.5 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ส่วนเกม Run Animal Run ได้คะแนนเฉลี่ย 4.25 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

ค) ด้านรูปแบบและภาพลักษณ์ เกมแบบใช้บัตรภาพได้คะแนนเฉลี่ย 3 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจปานกลาง ส่วนเกม Run Animal Run ได้คะแนนเฉลี่ย 4.67 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

ง) ด้านการใช้งาน เกมแบบใช้บัตรภาพได้คะแนนเฉลี่ย 3.75 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ส่วนเกม Run Animal Run ได้คะแนนเฉลี่ย 4.75 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

จ) ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน เกมแบบใช้บัตรภาพได้คะแนนเฉลี่ย 3.48 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจปานกลาง ส่วนเกม Run Animal Run 4.67 จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

จากคะแนนความพึงพอใจเปรียบเทียบกับระหว่างเกมแบบใช้บัตรภาพ และเกม Run Animal Run ผลปรากฏว่า เกม Run Animal Run ได้รับคะแนนความพึงพอใจมากกว่า ซึ่งก็เป็นผลมาจากการใช้สื่อที่มีความทันสมัยสามารถโต้ตอบกับอาสาสมัครได้ดีกว่าสื่อแบบดั้งเดิม

เกมแบบใช้บัตรภาพ มีด้านที่รับคะแนนประเมินน้อยที่สุดคือ ด้านรูปแบบและภาพลักษณ์ เพราะว่า เกมนี้ใช้กระดาษเป็นสื่อ จึงมีความไม่ทันสมัย ส่วนเกม Run Animal Run ด้านที่ได้รับคะแนนประเมินน้อยที่สุดคือ ด้านภาพรวมของเกม เพราะว่า ตัวเกมไม่ได้ออกแบบโดยเน้นความสนุกสนาน แต่เน้นด้านการฝึกทักษะการออกเสียง และไม่ได้มีการเพิ่มเติมความสามารถพิเศษอื่นใด ที่จะช่วยให้ผู้เล่นมีความตื่นตัวในการเล่น

7) อภิปรายผล

7.1) วิเคราะห์ผลการทดลอง

เกม Run Animal Run ใช้เทคนิคการให้ความรู้ด้วยสื่อประสมเชิงโต้ตอบ โดยใช้รูปภาพและเสียงสัตว์จริง ช่วยให้อาสาสมัครสามารถเรียนรู้ได้ดีกว่าเทคนิคการให้ความรู้แบบดั้งเดิม ซึ่งการเรียนรู้ด้วยสื่อประสมเชิงโต้ตอบสามารถให้ประสบการณ์การเรียนรู้ที่แปลกใหม่กับอาสาสมัครได้ ส่งผลให้อาสาสมัครสามารถเรียนรู้ได้ง่ายขึ้น มีสมาธิในการเรียนรู้มากขึ้น

จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้บัตรภาพและการใช้เกม Run Animal Run ผลปรากฏว่า การใช้เกม Run Animal Run ให้ผลดีกว่า เพราะเกมที่เล่นในคอมพิวเตอร์สามารถดึงดูดความสนใจของอาสาสมัครได้มากกว่าแบบกระดาษ นอกจากนี้ในเกมยังมีการเสริมแรงทางบวก ทำให้อาสาสมัครอยากจะทำคะแนนให้ได้มากขึ้น

การนำรูปแบบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด มาใช้พัฒนาเกม Run Animal Run ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอาสาสมัครทั้ง 2 คนสามารถใช้งานรูปแบบการปฏิสัมพันธ์นี้ในการเล่นได้ เกมสามารถดึงดูดให้อาสาสมัครไม่เบื่อ อีกทั้งยังพัฒนาการเรียนรู้

คำศัพท์ภาษาอังกฤษ และทักษะในการออกเสียงชื่อสัตว์เป็นภาษาอังกฤษอีกด้วย

7.2) ความสามารถของเกม Run Animal Run

เกม Run Animal Run มีส่วนช่วยในการพัฒนาทักษะด้านการเรียนรู้ และทักษะด้านการพูด ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ฟิเจอร์ดังนี้

7.2.1) ฟิเจอร์การให้ความรู้ โดยการใช้สื่อประสมเชิงโต้ตอบ โดยการใช้รูปภาพสัตว์จริง และการใช้เสียงสัตว์ เพื่อให้ผู้เรียนเสมือนว่าได้เรียนรู้จากของจริง ซึ่งทดแทนจากการให้ความรู้แบบดั้งเดิม โดยการใช้หนังสือ หรือสไลด์ประกอบการสอน

7.2.2) ฟิเจอร์การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด การปฏิสัมพันธ์รูปแบบนี้เป็นปฏิสัมพันธ์แบบธรรมชาติ ทำให้ผู้ที่มีภาวะออทิสซึมสามารถเรียนรู้การใช้งานได้ง่ายกว่าการปฏิสัมพันธ์แบบอื่น ๆ ส่งผลให้สามารถปฏิสัมพันธ์กับเกมได้นานขึ้นกว่าการใช้เกมแบบดั้งเดิม และการปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด สามารถช่วยพัฒนาทักษะในด้านการพูด การออกเสียง และการเรียนรู้คำศัพท์ชื่อสัตว์ภาษาอังกฤษ

7.2.3) ฟิเจอร์การใช้สีหรือสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในการออกแบบเกม สามารถช่วยกระตุ้นและดึงดูดความสนใจผู้ที่มีภาวะออทิสซึมได้นานขึ้น

7.2.4) ฟิเจอร์ระบบการให้รางวัลและระบบคะแนน ซึ่งเป็นการเสริมแรงทางบวก กระตุ้นให้ผู้ที่มีภาวะออทิสซึมอยากเล่นเกมนี้มากขึ้น

8) สรุปผลการทดลอง

เกม Run Animal Run มีวิธีการให้ความรู้โดยใช้รูปภาพและเสียงสัตว์จริง ซึ่งการเรียนรู้ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมไม่สามารถให้ประสบการณ์แบบนี้กับอาสาสมัครได้ เป็นผลให้อาสาสมัครสามารถเรียนรู้ได้ง่ายขึ้น และมีสมาธิในการเรียนรู้มากขึ้น

เกม Run Animal Run ถูกทดสอบด้วยอาสาสมัคร 2 คน และประเมินผลจากการหยุดสนใจเกม โดยเปรียบเทียบการเล่นเกม 2 แบบ แบบแรกใช้บัตรภาพ และแบบที่สองใช้เกม Run Animal Run ผลจากการทดสอบกับอาสาสมัคร 2 คน ชี้ให้เห็นว่า เกม Run Animal Run สามารถดึงดูดอาสาสมัครให้สนใจเกมได้มากกว่าการใช้บัตรภาพ ในเกมยังได้สอดแทรกความรู้เรื่องคำศัพท์ที่เป็นชื่อสัตว์ภาษาอังกฤษ และฝึกทักษะในการออกเสียงคำศัพท์ภาษาอังกฤษที่อาสาสมัครได้เรียนรู้ไป

เกม Run Animal Run ได้ใช้รูปแบบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้การพูด (Speech Interaction) จากกรอบการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงในการออกแบบและพัฒนา ผลปรากฏว่าอาสาสมัครทั้ง 2 คน สามารถใช้การปฏิสัมพันธ์ทั้ง 2 รูปแบบนี้เล่นเกมได้เป็นอย่างดี

หลังจากที่อาสาสมัครได้ทดสอบเล่นเกม และประเมินความพึงพอใจโดยครูผู้ดูแล ครูผู้ดูแลมีความพึงพอใจในเกม Run Animal Run ในระดับคะแนน 4.64 จากระบบคะแนนแบบ Five Point Scores จัดอยู่ในระดับพึงพอใจมากที่สุด

เทคนิคการปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงสามารถนำไปใช้ฝึกคำศัพท์หมวดอื่น ๆ ได้โดยการปรับเปลี่ยนเนื้อหาให้เหมาะสม หรือสามารถประยุกต์ใช้กับด้านอื่น ๆ เช่น การถามตอบโดยใช้เสียง หรือช่วยฝึกการสนทนา โดยการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ทั้งจิตวิทยาสื่อประสาท (Neuro-Linguistic Programing: NLP) หรือแชทบอท (Chatbot) มาช่วยในการทำงาน

9) ข้อเสนอแนะ

9.1) การปรับปรุงการเรียนรู้ด้วยเทคโนโลยีอื่น ๆ

เพื่อการเรียนรู้ที่ใช้ระยะเวลาสั้นขึ้น การปฏิสัมพันธ์โดยใช้เสียงเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการดึงดูดความสนใจของเด็ก ดังนั้นสามารถเพิ่มการเรียนรู้ด้วยเทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น การใช้เทคโนโลยีการรู้จำอารมณ์จากใบหน้า (Face Emotional Recognition) หรือ เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality: AR) แสดงดังรูปที่ 9

9.2) การรองรับความหลากหลายของผู้มีภาวะออทิสซึม

ความหลากหลายหมายถึง ลักษณะอาการ พฤติกรรม และความสนใจ ของผู้ที่มีภาวะออทิสซึมแต่ละคนจะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการปรับปรุงให้การปฏิสัมพันธ์มีความยืดหยุ่น สามารถรองรับความหลากหลายของผู้มีภาวะออทิสซึมแต่ละคนได้ จะทำให้ผู้ที่มีภาวะออทิสซึมส่วนใหญ่สามารถใช้งานการปฏิสัมพันธ์ที่ออกแบบได้ ซึ่งจะทำให้การปฏิสัมพันธ์ที่ออกแบบนี้มีความเหมาะสมสำหรับผู้มีภาวะออทิสซึมแต่ละคน ส่งผลให้ผู้มีภาวะออทิสซึมสามารถใช้งานการปฏิสัมพันธ์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



เทคโนโลยีการรู้จำอารมณ์จากใบหน้า



เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม

รูปที่ 9 การปรับปรุงการเรียนรู้ด้วยเทคโนโลยีอื่น ๆ

9.3) การรองรับเทคโนโลยีใหม่

การปฏิสัมพันธ์ที่รวบรวมและออกแบบไว้ในงานวิจัยนี้ อาจไม่ใช้การปฏิสัมพันธ์ที่มีทั้งหมดในปัจจุบัน แต่เป็นรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ที่ผู้วิจัยวิเคราะห์แล้วมีความเพียงพอต่อการใช้งานของผู้มีภาวะออทิสซึม นอกจากนี้ในอนาคตอาจมีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ซึ่งอาจจะทำให้การปฏิสัมพันธ์สำหรับผู้มีภาวะออทิสซึมมีความหลากหลายมากขึ้น

9.4) การเพิ่มเทคนิค STM

เทคนิค STM จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์พัฒนาการของผู้มีภาวะออทิสซึมก่อนและหลังการบำบัดได้

9.5) การพัฒนางานวิจัยโดยใช้รูปแบบการปฏิสัมพันธ์ที่เหลือ

9.5.1) การปฏิสัมพันธ์โดยใช้การเปล่งเสียง ใช้งานร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ เพื่อแปลผลรายบุคคล จากระดับความดังของเสียงที่ผู้ต้องการสื่อ

9.5.2) การปฏิสัมพันธ์โดยการใช้รู้จำเสียง สร้างเกมสอนการออกเสียง หรือการเลียนเสียง เพื่อส่งเสริมทักษะด้านการออกเสียงต่าง ๆ เช่น ออกเสียงภาษาไทย หรือหัดออกเสียงแบบโฟนิกส์ (Phonics) นอกจากนั้น การปฏิสัมพันธ์โดยการใช้รู้จำเสียงยังสามารถนำไปออกแบบเกมเพื่อดึงดูดการเรียนรู้ในห้องเรียน

เช่น เกมให้ภารกิจไปค้นหาเสียงแบบต่าง ๆ ภายนอกห้องเรียน (เสียงจิ้งหรีด เสียงระฆังวัด)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณความร่วมมือจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฝ่ายการศึกษาพิเศษ (ศูนย์วิจัยออทิสติก)

REFERENCES

- [1] M. Elsabbagh, G. Divan, Y. J. Koh, Y. S. Kim, S. Kauchali, C. Marcin, C. M. Nava, V. Patel, C. S. Paula, C. Wang, M. T. Yasamy, and E. Fombonne, "Global prevalence of autism and other pervasive developmental disorders," *Autism Research*, vol. 5, no. 3, pp. 160–179, Jun. 2012.
- [2] Komchadluek. "Department of Mental Health reveals Thailand have three hundred thousand children with autism," KOMCHADLUEK.net. <https://www.komchadluek.net/news/regional/288899> (accessed Sep. 26, 2020).
- [3] A. S. Shminan, R. A. Adzani, S. Sharif, and N. K. Lee, "AutiPECS: Mobile based learning of picture exchange communication intervention for caregivers of autistic children," in *2017 Int. Conf. Computer and Drone Applications (IConDA)*, Kuching, Malaysia, Nov. 2017, pp. 49–54.
- [4] F. Susanti, D. Junaedi, and V. Effendy, "Communication learning user interface model for children with autism with the goal-directed design method," in *2019 7th Int. Conf. Information and Communication Technology (ICoICT)*, Kuala Lumpur, Malaysia, Jul. 2019, pp. 1–6.
- [5] I. Torii, K. Ohtani, T. Niwa, A. Yamamoto, and N. Ishii, "Augmentative and alternative communication with digital assistant for autistic children," in *2012 IEEE Int. Conf. Emerging Signal Processing Applications*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2012, pp. 71–74.
- [6] G. Hornero, D. Conde, M. Quilez, S. Domingo, M. P. Rodríguez, B. Romero, and O. Casas, "A wireless augmentative and alternative communication system for people with speech disabilities," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1288–1297, 2015.
- [7] N. Heni and H. Hamam, "Design of emotional educational system mobile games for autistic children," in *2016 2nd Int. Conf. Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Monastir, Tunisia, Mar. 2016, pp. 631–637.

- [8] M. Santiputri, E. B. Sembiring, N. Z. Janah, and M. K. Mufida, "Abangmanis: Speech therapy for autism monitoring mobile application," in *2019 2nd Int. Conf. Applied Engineering (ICAE)*, Batam, Indonesia, Oct. 2019, pp. 1–6.
- [9] S. An, X. Feng, Y. Dai, H. Bo, X. Wang, M. Li, J. Z. Woo, X. Liang, C. Guo, and C. X. Liu, "Development and evaluation of a speech-generating AAC mobile app for minimally verbal children with autism spectrum disorder in Mainland China," *Molecular Autism*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [10] American Psychiatric Association, *Diagnostic and statistical manual of mental disorders*, 5th ed. Arlington, VA, USA: American Psychiatric Publishing, 2013.
- [11] U. Trangkasomba, *Helping an autistic children*, 2nd ed. Bangkok, Thailand: SUNTA PRESS (in Thai), 2007.
- [12] P. T. Torres, *Learning excellence: A master course in learning how to learn*, 2nd ed. Manila, Philippines: Training Systems Associates, Inc., 2002.

การศึกษาการวัดปริมาณการระเหยโดยถาดวัดการระเหยของอ่างเก็บน้ำลำตะคอง

ภัทรสุตา โพธิ์ศรี^{1*} ปรัชญา ยอดดำรงค์² ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์³ สุนทรี แทบประสิทธิ์⁴

^{1*,2,3}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

⁴สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวง กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : Phattrasuda_ph@rmutto.ac.th, Phattrasuda@hotmail.com

รับต้นฉบับ: 3 พฤษภาคม 2564; รับบทความฉบับแก้ไข: 25 พฤษภาคม 2564; ตอบรับบทความ: 15 มิถุนายน 2564
เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าการระเหยจากถาดวัดการระเหย Class A pan กับค่าการระเหยจากการจำลองถาดวัดการระเหยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ทำจากวัสดุทองเหลืองจำนวน 2 ใบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 300 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตรและหนา 4 มิลลิเมตร บริเวณสนามอุตุนิยมวิทยาของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง สำนักชลประทานที่ 8 ต่อเนื่องกันระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 เดือน และค่าการระเหยจากทฤษฎีของเพนแมนภายใต้เงื่อนไขเดียวกันบนสนามอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ศึกษา จากผลการศึกษาพบว่า ค่าที่วัดได้จากถาดวัดการระเหยชนิดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตรจะมีค่ามากกว่าถาดวัดการระเหย Class A pan ประมาณร้อยละ 15 ค่าอัตราส่วน E_m/E_{pan} เฉลี่ยเท่ากับ 1.21 เดือนที่มีการระเหยเฉลี่ยมากที่สุดคือเดือนเมษายนมีค่า 6.03 มิลลิเมตร/วัน ค่าการระเหยที่คำนวณจากสมการเพนแมน (Penman Equation) มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากถาดวัดการระเหยชนิดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ประมาณร้อยละ 30 เดือนที่มีการระเหยเฉลี่ยมากที่สุดคือเดือนเมษายนมีค่า 5.17 มิลลิเมตร/วัน และค่าสัมประสิทธิ์ของถาดทองเหลือง K_p เฉลี่ยตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม เท่ากับ 0.76

คำสำคัญ : การระเหย ถาดวัดการระเหย สัมประสิทธิ์การระเหย สมการเพนแมน

The Study of Evaporation Measurement of Lam Takhong Reservoir

Phattrasuda Phosri^{1*} Pruchaya Yoddumrong² Sattawat Haruehasapong³ Soontaree Taprasit⁴

^{1,2,3}*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bangkok, Thailand*

⁴*Bureau of Location and Design, Department of Highway*

*Corresponding Author. E-mail address: Phattrasuda_ph@rmutto.ac.th, Phattrasuda@hotmail.com

Received: 3 May 2021; Revised: 25 May 2021; Accepted: 15 June 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

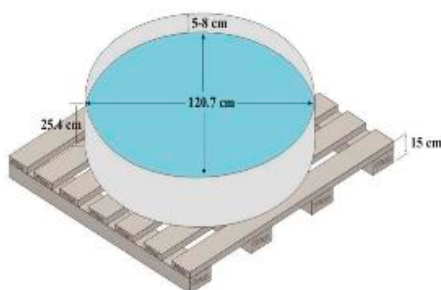
This research aims to find out the comparison results of evaporation value of Class A pan with the evaporation pan model constructed as the tool of the study. Two evaporation model pans made from brass with 30 - centimeters diameter (300 millimeters diameter, 200 millimeters in depth and 4 millimeters in thickness) were situated in the location at The Lam Ta Khong Operation Maintenance Project, Nakhon Ratchasima Province, during March through May. With the similar meteorological conditions, the data was continuously collected for 3 months to compare the evaporation value of the two pans with the Class A pan at the site and with the evaporation of the Penman Equation method. The results showed that the average evaporation of 30 - centimeters diameter pans were approximately 15% greater than the Class A pan, E_m/E_{pan} ratio was 1.21 and the maximum average evaporation value, which was in April at 6.03 millimeter/day. The average evaporation of the Penman Equation was approximately 30% less than the 30 - centimeters diameter pans and the maximum average evaporation value, which was in April at 5.17 millimeter/day. The average evaporation coefficient (K_p) of the 30 - centimeters diameter pans was at 0.76 which the only coefficient of evaporation in the summer season.

Keywords: Evaporation, Pan evaporation, Coefficient of evaporation, Penman equation

1) บทนำ

การระเหยของน้ำ (Evaporation) คือกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรของน้ำซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งตลอดเวลาที่น้ำอยู่ในอ่างเก็บน้ำ ทะเลหรือมหาสมุทร จะเกิดการระเหยทั้งจากผิวน้ำโดยตรง หรือจากผิวดินและการคายน้ำจากพืชเกิดการคายระเหยนับเป็นการสูญเสียน้ำ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นดินในปริมาณ 2 ใน 3 ส่วนจะเกิดการระเหยสู่บรรยากาศ ซึ่งการสูญเสียน้ำเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาระบบและการจัดการทรัพยากรน้ำ การหาอัตราการระเหยของน้ำจากอ่างเก็บน้ำทำให้ทราบค่าการระเหยเพื่อนำมาใช้ประกอบในการพิจารณาออกแบบระบบและการคาดการณ์การจัดสรรน้ำ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการระเหยขึ้นอยู่กับความอุณหภูมิ ชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ขนาดพื้นที่ผิวของการระเหย ความลึกของน้ำ และความดันไอน้ำในอากาศ [1], [2] เป็นต้นด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าการระเหยมากดังกล่าว จึงทำให้การหาค่าทำได้ด้วยความลำบากมีปัจจัยควบคุมที่ต้องเก็บข้อมูลอยู่มาก

ปัจจุบันเครื่องมือวัดการระเหยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับขององค์กรอุตุนิยมโลก คือถาดคลาส เอ ของสหรัฐอเมริกา American Evaporation Class A Pan [3] จะประกอบด้วยถาดน้ำ (Evaporation Pan) ขนาดลึก 25.4 เซนติเมตร (10 นิ้ว) เส้นผ่าศูนย์กลาง 120.7 เซนติเมตร (48 นิ้ว) ตั้งสูงจากพื้นดิน 15 เซนติเมตร (6 นิ้ว) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ถาดวัดการระเหยแบบคลาส เอ (Evaporation Class A Pan)
แหล่งที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา [3]

ถาดวัดการระเหยแบบคลาส เอ (Evaporation Class A Pan) เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีความสะดวกในการใช้งาน การบำรุงรักษา และง่ายในการติดตั้ง ในการหาค่าของการระเหยจากพื้นผิวน้ำขนาดใหญ่เช่น ทะเลสาบหรืออ่างเก็บน้ำ ซึ่งเครื่องมือวัดการระเหยแบบนี้ก็มีใช้ไปทั่วทั้งในประเทศไทยด้วย ข้อมูลที่ได้จากถาดวัดการระเหยจะนำไปใช้ในการออกแบบทางด้านอุทกวิทยา การจัดสรรน้ำ และการบริหารจัดการน้ำในโครงการพัฒนาแหล่งน้ำต่อไป

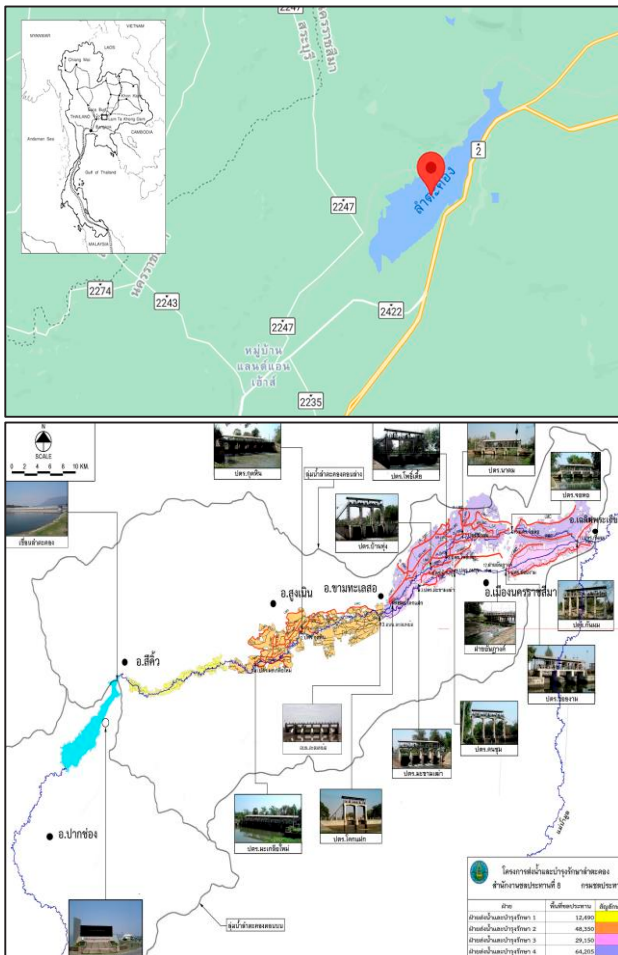
การศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาค่าการระเหยด้วยการจำลองแบบจากถาดคลาส เอ โดยใช้ทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร จำนวน 2 ถาด (Pan Model, E_m) ซึ่งเก็บข้อมูลจากบริเวณสนามอุตุนิยมวิทยาของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง สำนักชลประทานที่ 8 ต่อเนื่องกันระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 3 เดือน เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าการระเหยจากสถิติการตรวจวัดซึ่งนำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการของ Penman และจากข้อมูลที่เก็บจากถาดคลาส เอ (Class Pan A, E_{pan}) ของพื้นที่โครงการเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของถาดวัดการระเหยขนาด 30 เซนติเมตร (Pan Model Coefficient) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองจากถาดคลาส เอ โดยใช้ทองเหลืองที่มีขนาด 30 เซนติเมตร โดยอ้างอิงกับงานศึกษาที่ผ่านมาซึ่งใช้สังกะสี [4] เทียบกับค่าจากถาดคลาส เอ (Class Pan A, E_{pan}) กับทฤษฎีของเพนแมนในการคำนวณค่าการระเหย ทำให้ได้ข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้ถาดคลาส เอ (Class Pan A, E_{pan}) สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนในพื้นที่ศึกษาสำหรับการใช้เก็บข้อมูลการระเหยในพื้นที่ที่จำกัดเพื่อความสะดวกในการเก็บข้อมูลและง่ายต่อการบำรุงรักษาในพื้นที่ศึกษาต่อไป

2) วิธีการศึกษา

2.1) พื้นที่ศึกษา

ลำตะคองเป็นลำน้ำสาขาที่สำคัญสายหนึ่งของแม่น้ำมูลมีต้นน้ำอยู่บริเวณเทือกเขาตองพญาเย็น ความยาวลำตะคองตลอดสายประมาณ 220 กิโลเมตรลักษณะภูมิอากาศบริเวณลุ่มน้ำลำตะคอง อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มี 3 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อนนอกจากอิทธิพลของมรสุมแล้ว ยังได้รับอิทธิพลของพายุ

ตีเปรสชันทางทิศตะวันออกในช่วงเดือนกันยายนและตุลาคมทำให้เกิดฝนตกชุกในบริเวณพื้นที่พายุพัดผ่านเขื่อนลำตะคอง ตั้งอยู่ตำบลลาดบัวขาวห่างจากตัวเมืองประมาณ 62 กิโลเมตรดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นเขื่อนดินสร้างกันลำตะคองที่ช่องเขาเขื่อนลั่นและช่องเขาถ่านเสียด [5] เริ่มสร้างในปี พ.ศ. 2507 แล้วเสร็จในปี 2512 ลักษณะทางอุทกวิทยา พื้นที่รับน้ำฝน 1,430 ตารางกิโลเมตร ปริมาณฝนปีเฉลี่ย 905.36 ตารางกิโลเมตร ปริมาณน้ำไหลลงอ่างฯ รายปีสูงสุด 497.78 ล้านลูกบาศก์เมตร รายปีเฉลี่ย 260.60 ล้านลูกบาศก์เมตร รายปีต่ำสุด 80.53 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักปกติ 323.95 ล้านลูกบาศก์เมตร ปริมาณน้ำใช้การได้ 297.07 ล้านลูกบาศก์เมตร[5]



รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษา

แหล่งที่มา : โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง สำนักชลประทานที่ 8 กรมชลประทาน [5]

2.2) เครื่องมือและอุปกรณ์ในการหาค่าระเหยจากอ่างเก็บน้ำ

ภาควัดการระเหยอาจจะแบ่งได้เป็นอีก 3 ชนิดด้วยกัน คือ ชนิดฝังดิน (Sunken Pan) ชนิดลอยอยู่บนผิวน้ำ (Floating Pan) และ ชนิดอยู่บนผิวดิน (Surface Pan) [2] สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ใช้ภาควัดการระเหยแบบคลาส เอ (Evaporation Pan) ชนิดอยู่บนผิวดิน ซึ่งจะยอมให้น้ำระเหยจากผิวน้ำได้โดยตรง

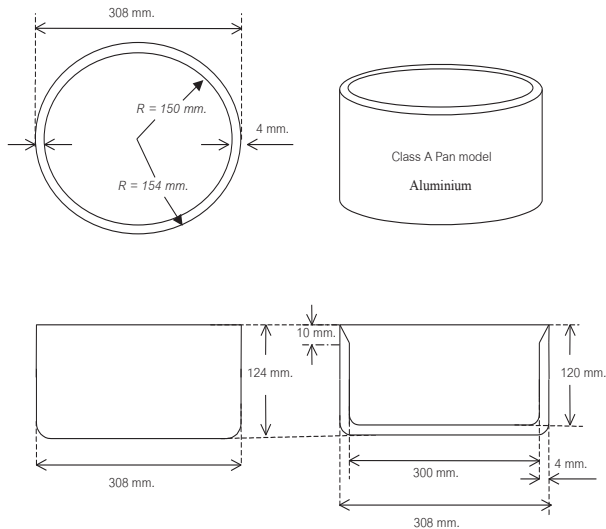
การทดลองหาปริมาณการระเหยนี้เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ การระเหยของภาควัดการระเหยทองเหลืองโดยการจำลองแบบภาควัดคลาส เอ ซึ่งการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาเพื่อหาปริมาณการระเหยจากภาควัดการระเหยทองเหลืองโดยการจำลองแบบภาควัดคลาส เอ และ การศึกษาหาปริมาณการระเหยของเพนแมน

2.2.1) ภาควัดการระเหยทองเหลืองโดยการจำลองแบบภาควัดคลาส เอ

ภาควัดการระเหยทองเหลืองโดยการจำลองแบบภาควัดคลาส เอ จำนวน 2 ใบ ซึ่งแต่ละใบมีขนาดเท่ากันคือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 30 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร ฐานที่ตั้งรองภาควัดจากไม้สูง 10 เซนติเมตร อุปกรณ์วัดระดับน้ำเพื่อใช้ในการวัดระดับของฐานรองภาควัด กระบอกตวงน้ำขนาด 100 มิลลิลิตร เทอร์โมมิเตอร์ วัดอุณหภูมิของบรรยากาศ เครื่องมือวัดระดับความลึกน้ำแบบตะขอ (Hook Gage) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าเคยมีผู้ศึกษาด้วยภาควัดการระเหยที่ทำจากสังกะสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตรที่สถานีตรวจวัดอากาศเกษตรกำแพงแสน [4]



รูปที่ 3 ภาควัดการระเหยทองเหลืองโดยการจำลองแบบภาควัดคลาส เอ



รูปที่ 3 ถาดวัดการระเหยของเหลวโดยการจำลองแบบถาดคลาส เอ (ต่อ)



รูปที่ 4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าการระเหยด้วยวิธีเพนแมน
แหล่งที่มา : โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง สำนักงานชลประทานที่ 8
กรมชลประทาน [5]

2.3) การหาค่าการระเหยจากอ่างเก็บน้ำโดยใช้ข้อมูลถาดวัดการระเหย

การเก็บข้อมูลการระเหยจากอ่างเก็บน้ำดำเนินการในช่วงฤดูร้อน คือเดือนมีนาคม ถึงเดือนพฤษภาคม ซึ่งทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล การระเหยต่อเนื่องกัน 90 วัน ซึ่งการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาเพื่อหาปริมาณการระเหยจากถาดวัดการระเหยของเหลวโดยการจำลองแบบถาดคลาส เอ และการศึกษาเพื่อหาปริมาณการระเหยของเพนแมนซึ่งทำการศึกษาควบคู่ไปพร้อมกัน โดยจะต้องใช้สถานที่ทดสอบเดียวกันเพื่อควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมือนกัน

2.3.1) การคำนวณหาค่าปริมาณการระเหยจากการจำลองแบบถาดคลาส เอ

วางถาดวัดการระเหยของเหลวโดยการจำลองแบบถาดคลาส เอ ลงตรงตำแหน่งกึ่งกลางของฐานรองจากนั้นให้เติมน้ำสะอาดลงไปในถาดจนถึงขีดบอกระดับที่ตั้งไว้ในสเกล โดยการเติมน้ำนั้นจะต้องใช้กระบอกตวงน้ำและน้ำปรับให้ไ้ระดับ พร้อมทั้งบันทึกค่าที่ตั้งไว้กับสเกลด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เติมน้ำลงในถาดพร้อมติดตั้งเครื่องมือวัดระดับน้ำ (Hook gage)

ปริมาณการระเหยที่จดบันทึกในแต่ละวันเท่ากับผลต่างของปริมาณน้ำที่เติมลงไปในวันนั้นรวมกับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงในถาด (ถ้ามี) กับปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในวันรุ่งขึ้น

2.3.2) การคำนวณหาค่าปริมาณการระเหยด้วยวิธีเพนแมน

ปริมาณการระเหยจากถาดยังสามารถคำนวณได้จากสูตรของเพนแมน [6] ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความเร็วลม และความชื้นในบรรยากาศ ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 และค่าปริมาณการระเหยคำนวณได้จากสมการที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมและความดันไอน้ำ

เดือน	ความดันไอน้ำ อิมตัว (มิลลิเมตร/วัน)	ความดันไอน้ำ จริง (มิลลิเมตร/ วัน)	ความเร็วลมที่จุด ความสูง 2 ม.(ไมล์/ชม.)
มีนาคม	30.85	22.61	32.67
เมษายน	34.58	24.11	38.48
พฤษภาคม	35.23	25.87	32.59

$$ET_o = 0.35(e_a - e_d) \left(1 + \frac{v_2}{100}\right) \quad (1)$$

โดยที่

ET_o = ปริมาณการระเหย (มิลลิเมตร/วัน)

e_a = ความดันไอน้ำอิมตัว (มิลลิเมตรของปรอท)

e_d = ความดันไอน้ำจริง (มิลลิเมตรของปรอท)

v_2 = ความเร็วลมที่จุดความสูง 2 เมตรเหนือพื้นผิว (ไมล์/ชม.)

สามารถคำนวณได้จากสูตรหาปริมาณการระเหยของอากาศ คลาส เอ ดังนี้ [7]

$$ET_o = K_p E_{pan} \quad (2)$$

ET_o = ปริมาณการระเหย (มิลลิเมตร/วัน)

K_p = ค่าสัมประสิทธิ์ของการระเหยของอากาศคลาส เอ

E_{pan} = ปริมาณการระเหยของอากาศคลาส เอ (มิลลิเมตร/วัน)

ในประเทศไทย Penman ถือว่าเป็นสูตรที่มีผู้นิยมมากกว่า สูตรอื่น ซึ่งได้มีการศึกษาเปรียบเทียบจากการใช้สูตร Thornthwaite, Blaney-Criddle และMakkink [7]

3) ผลการศึกษา

ผลการวัดการระเหยจากถาดทองเหลืองคลาส เอ โดยตรง ซึ่งเก็บข้อมูลจากบริเวณสนามอุตุนิยมวิทยาของสำนักงานชลประทานที่ 8 โครงการอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคอง ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 90 วัน ระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ดังนี้

3.1) ผลการศึกษาจากถาดวัดการระเหยทองเหลืองจำลอง

ปริมาณการระเหยจากถาดจำลองคลาส เอ แบบทองเหลือง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณการระเหยจากถาดจำลองคลาส เอ แบบทองเหลือง

ค่าปริมาณการระเหย (มิลลิเมตร/วัน)			
เดือน	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
มีนาคม	5.85	3.00	6.90
เมษายน	6.02	2.95	8.82
พฤษภาคม	5.83	2.84	8.94

เดือนมีนาคมมีค่าต่ำสุด 3.00 สูงสุด 6.90 และมีค่าเฉลี่ย 5.85 มิลลิเมตร/วัน เดือนเมษายนมีค่าต่ำสุด 2.95 สูงสุด 8.82 และมีค่าเฉลี่ย 6.03 มิลลิเมตร/วัน และเดือนพฤษภาคมมีค่าต่ำสุด 2.84 สูงสุด 8.94 และมีค่าเฉลี่ย 5.81 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราการระเหยของอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ [8] พบว่ามีค่าการระเหยเฉลี่ยในฤดูแล้ง 3.94 มิลลิเมตร/วัน และอ่างเก็บน้ำห้วยปรือมีค่าการสูญเสียประมาณ 4.314 มิลลิเมตรต่อวัน [9] ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่าในการเก็บข้อมูลบางวันมีปริมาณฝนที่ตกลงมาเช่นเดือนเมษายนส่งผลให้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์สูงค่าการระเหยจึงต่ำ นอกจากนี้ความเร็วลมก็มีผลต่อค่าการระเหยในช่วงเวลาที่บันทึกในแต่ละวันด้วยเช่นกัน และค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดการระเหยของถาดทองเหลือง (E_m) และถาดวัดการระเหยแบบคลาส เอ (E_{pan}) มีค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือนเท่ากับ 1.26 1.14 และ 1.05 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) จากผลการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากถาดจำลองทองเหลือง (E_m) มีค่ามากกว่าถาดวัดการระเหยแบบคลาส เอ (E_{pan}) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการผลการศึกษาการวัดการระเหยของสถานีตรวจอากาศเกษตรกำแพงแสนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.21 [4] ซึ่งจากอัตราส่วน E_m / E_{pan} แสดงให้เห็นว่าค่าการระเหยจากถาดทองเหลืองจำลอง (E_m) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการระเหยที่เก็บข้อมูลจากถาดวัดการระเหยแบบคลาส เอ (E_{pan}) และสอดคล้องกับรูปแบบการ Linear Regression มีค่า $R^2 = 0.726$ จากสมการพบว่าปริมาณการระเหยจากถาดวัดแบบคลาส เอ (Class A Pan) และปริมาณการระเหยจากถาดวัดทองเหลืองจำลองมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7(ข)-(ค) จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำค่าที่ได้จากถาดจำลองทองเหลือง (E_m) มาใช้เพื่อเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลค่าการระเหยในพื้นที่ศึกษาควบคู่ไปกับเครื่องมือที่มีอยู่เดิมได้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการนำมาใช้งานต่อไป

3.2) ผลการหาปริมาณการระเหยด้วยวิธีเพนแมน

ปริมาณการระเหยด้วยวิธีเพนแมนมีค่าน้อยกว่าค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหยจำลอง เดือนมีนาคม มีค่าต่ำสุด 2.49 สูงสุด 5.52 และมีค่าเฉลี่ย 3.85 มิลลิเมตร/วัน เดือนเมษายน มีค่าต่ำสุด 3.33 สูงสุด 8.02 และมีค่าเฉลี่ย 5.17 มิลลิเมตร/วัน และเดือนพฤษภาคม ค่าต่ำสุด 2.12 สูงสุด 5.28 และมีค่าเฉลี่ย 3.85 มิลลิเมตร/วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่าการระเหยจากสมการเพนแมนมีค่าเฉลี่ย 4.17 มิลลิเมตร/วัน (แสดงค่าเฉลี่ยตลอดปี พ.ศ. - เม.ย. 2547) [10]

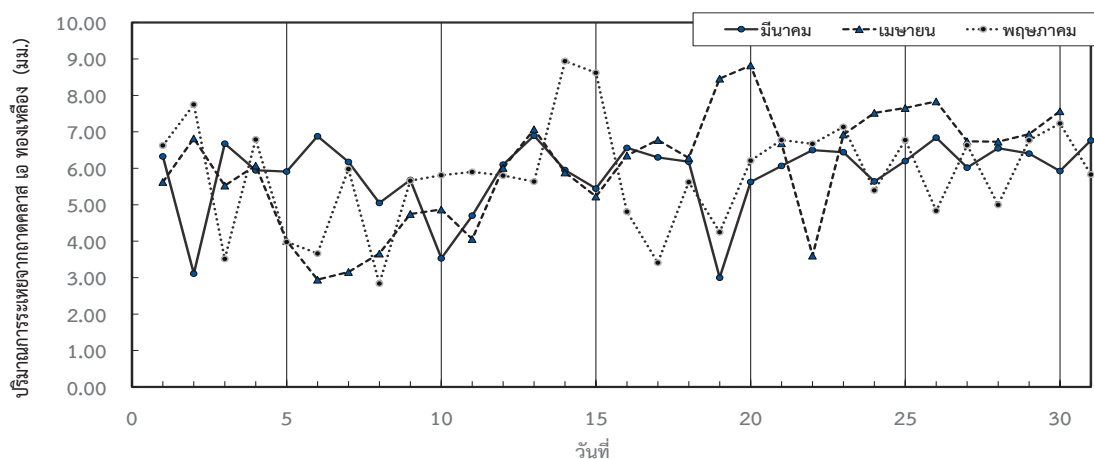
3.3) สัมประสิทธิ์การระเหยของถาดทองเหลือง (K_p)

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของถาดทองเหลือง (K_p) เฉลี่ย ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม เท่ากับ 0.76 ดังแสดงในตารางที่ 3

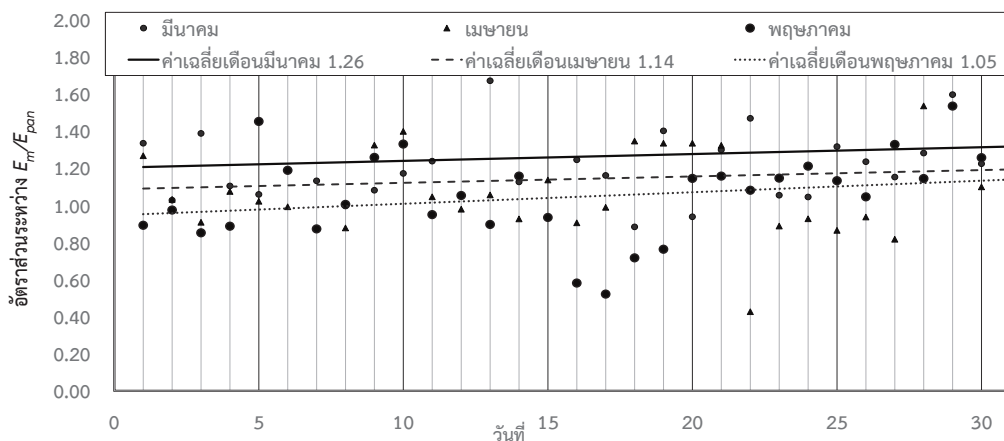
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของถาดทองเหลือง

เดือน	สัมประสิทธิ์การระเหยของถาดทองเหลือง (K_p)
มีนาคม	0.69
เมษายน	0.88
พฤษภาคม	0.71
เฉลี่ย	0.76

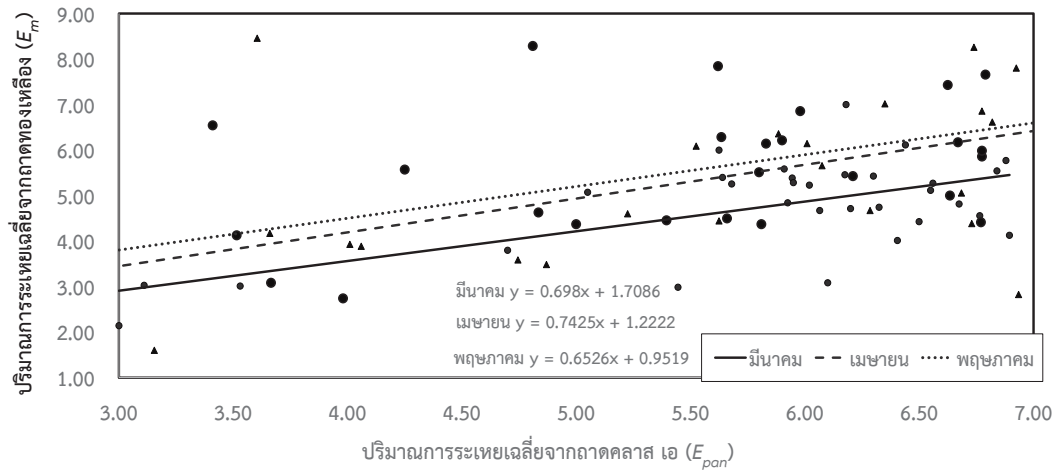
ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของถาดคลาส เอ ของอ่างเก็บน้ำมีค่าประมาณ 0.70 – 0.80 [1] มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของวรารุช (2539) [7] มีค่า $K_p = 0.84$ ซึ่งใกล้เคียงกับ วิบูลย์ (2526) [11] ที่แนะนำไว้ $K_p = 0.85$ และผลการศึกษาของสุประพล (2542) [12] $K_p = 0.84$



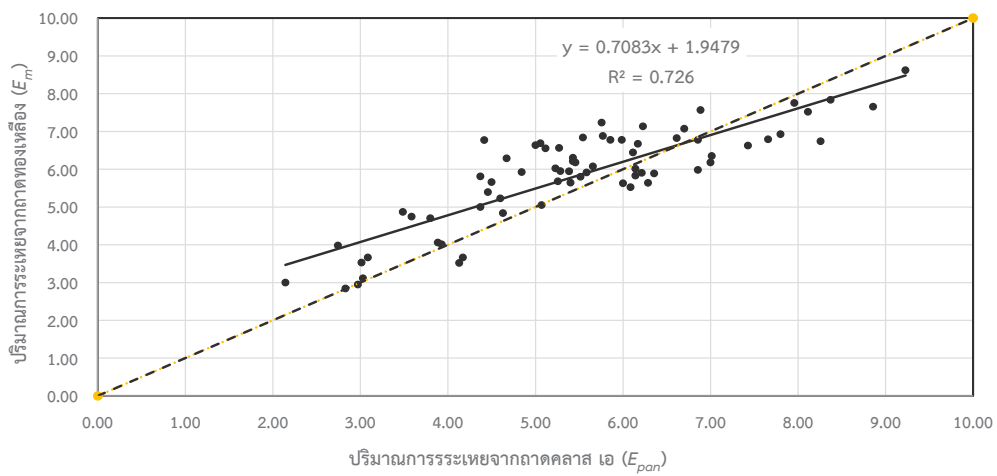
รูปที่ 6 ปริมาณการระเหยจากถาดจำลองคลาส เอ แบบทองเหลือง



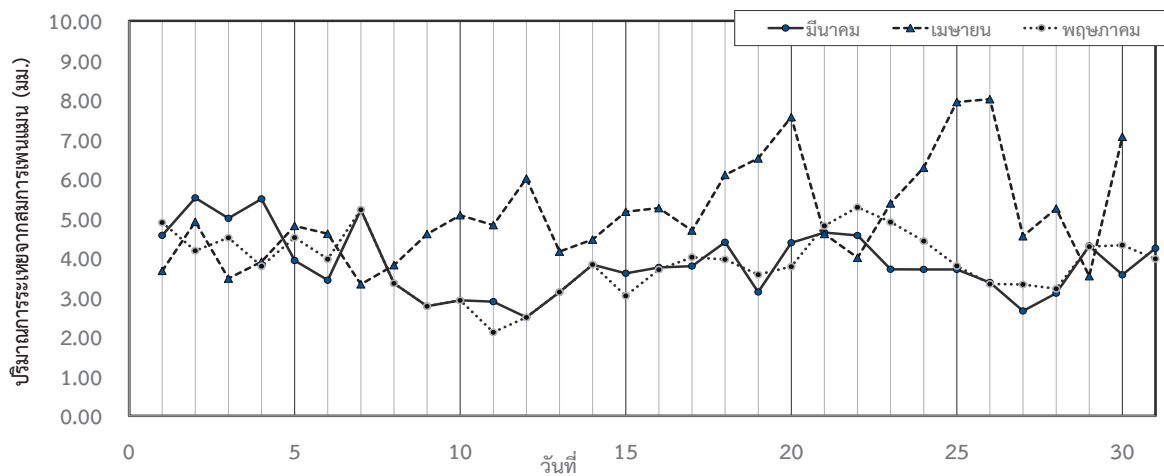
รูปที่ 7(n) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการระเหยของถาดทองเหลือง (E_m) และถาดวัดการระเหยคลาส เอ (E_{pan})



รูปที่ 7(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการระเหยของถาดทองเหลือง (E_m) และถาดวัดการระเหยคลาสน เอ (E_{pan})



รูปที่ 7(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการระเหยของถาดทองเหลือง (E_m) และถาดวัดการระเหยคลาสน เอ (E_{pan})



รูปที่ 8 ค่าการระเหยจากสมการเพนแมน (Penman Equation)

4) สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า

4.1) ผลการศึกษาจากถาดวัดการระเหยของเหล็องจำลอง

จากการเก็บข้อมูลการระเหยต่อเนื่องในสถานีเดียวกันพบว่า ค่าที่วัดได้จากถาดวัดการระเหยชนิดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตรจะมีค่ามากกว่าถาดวัดการระเหยคลาส เอ (Class A Pan) ประมาณร้อยละ 15 ซึ่งสอดคล้องกับโดยทั่วไป แล้วปริมาณการระเหยจากถาดวัดการระเหยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร จะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากการระเหยขนาดใหญ่ [4] และเดือนที่มีการระเหยเฉลี่ยมากที่สุดคือ เดือนเมษายนมีค่า 6.03 มิลลิเมตร/วัน

4.2) ผลการหาปริมาณการระเหยด้วยวิธีเพนแมน

พบว่าค่าการระเหยที่คำนวณจากสมการเพนแมน (Penman Equation) มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากถาดวัด 30 เซนติเมตร ประมาณร้อยละ 30 เดือนที่มีการระเหยเฉลี่ยมากที่สุดคือเดือนเมษายนมีค่า 5.17 มิลลิเมตร/วัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าการระเหยจากสมการเพนแมน คืออุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเร็วลมเหนือผิวดินหรือที่ระดับ 2.00 เมตร และจำนวนชั่วโมงแสงแดด [6]

4.3) สัมประสิทธิ์การระเหยของถาดทองเหลือง K_p

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การระเหยของถาดทองเหลืองเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษา $K_p = 0.76$ มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ($K_p = 0.70 - 0.80$) และสอดคล้องกับงานศึกษาที่ผ่านมาวิบูลย์ [11] ที่แนะนำไว้ $K_p = 0.85$ และผลการศึกษาของสุประพล [12] $K_p = 0.84$ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานและจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ถาดจำลองแบบทองเหลืองให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ ทำให้สามารถนำมาใช้เพื่อเก็บข้อมูลเพิ่มในพื้นที่ศึกษาในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด เนื่องจากถาดขนาดเล็กลงทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยลงงบประมาณน้อยลงและง่ายต่อการบำรุงรักษาอีกด้วย ทำให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้นสามารถนำมาใช้ร่วมกับถาดวัดการระเหยคลาส เอ (Class A Pan) ที่มีอยู่เดิมในพื้นที่ศึกษาเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลที่ครอบคลุมในพื้นที่ศึกษาและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5) ข้อเสนอแนะ

5.1) การทดลองใช้ค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบจากแบบจำลองถาดทองเหลืองคลาส เอ ทั้งสองและการคำนวณการระเหยจากทฤษฎีของเพนแมน เป็นการเก็บข้อมูลในช่วงฤดูร้อน (เดือนมีนาคม – เดือนพฤษภาคม) เท่านั้น หากมีการศึกษาเพิ่มเติมควรเก็บข้อมูลตลอดปีต่อเนื่องเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปีของการศึกษาเพื่อจะนำมาใช้ประโยชน์กับพื้นที่ศึกษาได้อย่างต่อเนื่องทั้งนี้จากทฤษฎีของเพนแมนการคำนวณค่าการระเหยซึ่งมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณทั้งความเร็วลม อุณหภูมิของบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ จึงควรคำนึงถึงคือตำแหน่งที่ติดตั้ง เนื่องจากมีผลต่อทิศทางลมซึ่งส่งผลต่อการคำนวณค่าอัตราการระเหย

5.2) ข้อจำกัดของการศึกษาในวันที่มีสภาพอากาศแปรปรวน พายุฝนตกหนักมาก ลมปั่นป่วน ทำให้การวัดค่าทำได้ค่อนข้างลำบาก ในบางครั้งเวลาในการเก็บข้อมูลต่างๆอาจคลาดเคลื่อนบ้าง หรือไม่สามารถวัดการระเหยจากแบบจำลองถาดวัดการระเหยนี้ได้เมื่อฝนตกหนัก เนื่องจากแบบจำลองถาดคลาส เอ มีความจุจำกัด การแก้ปัญหากรณีในฤดูฝนมีฝนตกหนักมากเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการล้นของน้ำออกมานอกถาด จะทำให้วัดการระเหยไม่ได้ ดังนั้นจะต้องทำการลดระดับน้ำในถาดลงได้ตามความเหมาะสม

5.3) ข้อดีของถาดจำลองที่มีขนาดเล็กกว่าโดยย่อสัดส่วนจากถาดมาตรฐานลงมาประมาณ 4 เท่า ความสูงขนาดลดลง 50 มิลลิเมตร แต่มีความหนาแน่นกว่า 4 เท่า ดังนั้นจากลักษณะทางกายภาพของถาดจำลองนั้นจึงสะดวกในการติดตั้งและใช้งานง่ายกว่า ทำจากวัสดุหล่อขึ้นรูปไร้รอยพับต่อจึงไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้น มีความหนาและแข็งแรงกว่าจึงมีความทนทานเพื่อการใช้งานและทนต่อการเสีรูปได้ดี ส่วนข้อด้อย คือ ถาดจำลองทำจากวัสดุทองเหลืองมีราคาสูง มีขนาดเล็กจึงบรรจุน้ำได้น้อยกว่าประมาณ 20 เท่าของขนาดมาตรฐาน เมื่อมีฝนตกในปริมาณมาก ดังนั้นจะต้องทำการลดระดับน้ำในถาดลงตามความเหมาะสมอาจส่งผลต่อความแม่นยำและความถูกต้องของข้อมูล

กิตติกรรมประกาศ

งานศึกษาครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ส่วนปฏิบัติการอุทกวิทยา สำนักงานชลประทานที่ 8 สถานีโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการศึกษา และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

REFERENCES

- [1] W. Boonyatharokul, *Irrigation Principles*, Bangkok, Thailand: Kasetsart University, Faculty of Engineering, Department of Irrigation Engineering (in Thai), 1983.
- [2] A. Rittima. (2018). *Hydrology* (in Thai) [Online]. Available: <https://www.gooshared.com/d/NzM2Ny00>
- [3] Northern Meteorological Center, "Meteorological Instruments," (in Thai). CMMET.TMD.go.th. <http://www.cmmet.tmd.go.th/instrument/instruments.php> (accessed Apr. 1, 2021).
- [4] Lam Ta Khong Operation and Maintenance Project, "*Lam Ta Khong operation and maintenance project*," (in Thai), 2021. [Online]. Available: <http://lamtakhong-omp.rid.go.th/Lamtakhong/index.php>
- [5] S. Duangdee, "*The study of evaporation measurement by 30-cm. diameter zinc pan*," (in Thai), M. Eng. thesis, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, Thailand, 1988.
- [6] H. L. Penman, "Natural evaporation from open water, bare soil and grass," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, vol. 193, no. 1032, pp. 120–145, 1948.
- [7] V. Vudhivanich, "Calculation of ETo of Thailand by Penman - Monteith method," (in Thai), *Engineering Journal Kasetsart*, vol. 10, no. 29, pp. 91–105, 1996.
- [8] A. Rittima, K. Saleekij, K. Samarnwongrak, P. Sritamma, I. Cheeranoravanich, and M. Udomthara, "The study on evaporation losses from medium and small reservoirs in Thailand," (in Thai), *Research and Development Journal*, vol. 24, no.1, 2013.
- [9] K. Saktrakul, "*Study of water losses from Huai Pru Reservoir Nakhon Nayok Province*," (in Thai), M. Eng. thesis, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, Thailand, 2002.
- [10] M. E. Jensen, A. Dotan, and R. Sanford, "Penman-monteith estimates of reservoir evaporation," in *World Water and Environmental Resources Congress 2005*, Anchorage, AK, USA, 2005, pp. 1-24, doi: 10.1061/40792(173)548.
- [11] W. Boonyatharokul, "Estimation of potential evapotranspiration in Thailand by using formulas based on climatological data," (in Thai), *Agriculture and Natural Resources*, vol. 9, no. 1. pp. 26–34, Jun 1975.
- [12] S. Wattasirichai, "Forecasting evaporation rate from Class A Pan and analysis of reservoir evaporation," (in Thai), M. Eng. thesis, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, Thailand, 1999.

การจัดตารางการทำงานของพนักงาน สำหรับระบบที่มีเวลาในการดำเนินงานยืดหยุ่น

รชนิศ เรืองศรี¹ วิสุทธิ์ สุพิทักษ์^{2*}

^{1,2*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : fengwsst@ku.ac.th

รับต้นฉบับ: 28 เมษายน 2564; รับบทความฉบับแก้ไข: 4 พฤษภาคม 2564; ตอบรับบทความ: 10 พฤษภาคม 2564

เผยแพร่ออนไลน์: 25 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนำเสนอการจัดตารางการทำงาน สำหรับระบบที่มีงานต้องดำเนินการหลายงาน มีจำนวนพนักงานจำกัด ระยะเวลาในการดำเนินงานมีความยืดหยุ่น เปลี่ยนแปลงตามจำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรร ซึ่งกำหนดเป็นจำนวนขั้นต่ำและขั้นสูงสำหรับแต่ละงาน ตัวชี้วัดการจัดตารางการทำงานคือการลดระยะเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย วิธีวิธีวิสติกสองขั้นตอน ถูกนำเสนอเพื่อหาคำตอบสำหรับปัญหาดังกล่าว ขั้นตอนหนึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มงาน และจัดสรรงานตามจำนวนพนักงานขั้นสูง โดยพิจารณาพนักงานที่ว่างก่อน ขั้นตอนที่สองเป็นการปรับจำนวนพนักงานในแต่ละงานเพื่อลดเวลาดำเนินงานของพนักงานที่มีเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายสูง เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ ปัญหาขนาดเล็กจำนวน 30 ปัญหา และปัญหาขนาดใหญ่จำนวน 30 ปัญหา ได้ถูกสร้างขึ้นอย่างสุ่ม คำตอบที่ได้จากวิธีวิสติกถูกนำไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการค้นหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ จากผลทดสอบปัญหาขนาดเล็กพบว่า คำตอบที่ได้จากวิธีวิสติกมีค่าเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายสูงกว่าคำตอบที่ได้จากการค้นหาคำตอบด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ โดยเฉลี่ย 1.57 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จากผลทดสอบปัญหาขนาดใหญ่ วิธีวิสติกให้คำตอบที่ดีกว่าการค้นหาคำตอบด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ โดยเฉลี่ย 15.45 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การจัดตารางการทำงานพนักงาน จำนวนพนักงานจำกัด เวลาดำเนินงานยืดหยุ่น เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย

Workforce Scheduling for the System with Flexible Processing Time Jobs

Rachanid Rueangsri¹ Wisut Supithak^{2*}

^{1,2*}*Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: fengwsst@ku.ac.th

Received: 28 April 2021; Revised: 4 May 2021; Accepted: 10 May 2021

Published online: 25 June 2021

Abstract

The research aims to determine the schedule of multiple jobs waiting to be processed by limited number of workers. Each job has its own minimum and maximum number of workers required. The processing time of each job is flexible depended on number of workers being assigned to perform the job. The scheduling objective is to minimize the system makespan. In order to determine a proper solution for the research problem, a two-phase heuristic is presented. The first phase is to cluster jobs according to the maximum number of workers required and assign workers to each job considering their availabilities. The second phase is to reduce number of jobs being assigned to the worker having maximum completion time. For the performance evolution of proposed heuristic, 30 small size and 30 large size problems are randomly generated. The solution obtained from the heuristic has been compared with the solution yielded from searching for the solution of a mathematical model by the evolutionary method. According to the results of small size problems, the solution provided by the proposed heuristic has the makespan value of 1.57 percent greater than the solution yielded from the evolutionary search. For those large size problems, the proposed heuristic yields better solution than the evolutionary search with the average percentage deviation of 15.54 percent.

Keywords: Workforce scheduling, Limited number of workers, Flexible processing time, Makespan

1) บทนำ

ในสถานะที่มีการแข่งขันสูง การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรได้อย่างเหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันขององค์กร ทั้งนี้ทรัพยากรประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญต่อองค์กร คือ ทรัพยากรแรงงาน การจัดการตารางการทำงานของพนักงานอย่างเหมาะสม ทำให้องค์กรสามารถใช้ทรัพยากรแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการรอคอยของพนักงาน ลดการทำงานล่วงเวลา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าใช้จ่ายของระบบ อย่างไรก็ตามการวางแผนจัดสรรทรัพยากรแรงงานสำหรับระบบที่มีการทำงานหลากหลายประเภท และมีจำนวนทรัพยากรแรงงานจำกัด เป็นกิจกรรมที่มีความซับซ้อนสูง ตัวอย่างของระบบดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จาก การจัดสรรพนักงานที่ใช้ในงานก่อสร้าง การจัดสรรการทำงานของพนักงานแผนกซ่อมบำรุงในงานซ่อมบำรุงเครื่องจักร การจัดสรรลูกเรือในงานบริการขนส่ง เป็นต้น

โดยทั่วไปปัญหาการจัดการตารางการทำงานของพนักงานสามารถถูกจำแนกตามความเป็นอิสระต่อกันของช่วงเวลาการทำงานในระบบที่พิจารณา เป็นการจัดการตารางการทำงานรูปแบบกะ (Shift Scheduling) การจัดการตารางวันหยุดงาน (Days Off Scheduling) และการจัดการตารางการทำงานรูปแบบทัวร์ (Tour Scheduling) ทั้งนี้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่เริ่มมีการพิจารณาปัญหาการจัดการตารางการทำงาน ถูกนำเสนอโดย [1] การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดการตารางการทำงานสามารถพิจารณาได้จาก [2] ทั้งนี้ [3] ได้เพิ่มเติมการพิจารณาภาระงานทั้งทางด้านร่างกาย (Physical Workload) และจิตใจ (Mental Workload) ในการจัดการตารางการทำงานสำหรับระบบงานขนส่งพัสดุ โดยได้นำเสนอโปรแกรมเชิงเป้าหมาย (Goal Programing) ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว ปัญหาการจัดการตารางการทำงานของระบบที่มีหลายงาน มีความต้องการจำนวนพนักงานดำเนินการแตกต่างกันโดยเป็นค่าคงที่ พนักงานที่พิจารณาในระบบมีความชำนาญงานและเวลาการทำงานที่แตกต่างกัน ได้ถูกศึกษาโดย [4] ซึ่งนำเสนอตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการหาคำตอบของปัญหาดังกล่าว [5] พิจารณาข้อมูลทางกายศาสตร์ของพนักงาน ในการจัดการตารางการทำงานของพนักงาน ซึ่งมีการหมุนเวียนสลับหน้าที่ในแต่ละสายการประกอบ โดยทำการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลดรอบเวลาการผลิตรวมในช่วงระยะเวลาการวางแผน โดยทั่วไปปัญหาการจัดการตารางการทำงาน

ของพนักงานสามารถเปรียบเทียบได้กับการจัดการตารางการทำงานของทรัพยากรเครื่องจักร อย่างไรก็ตามในบางกรณีพนักงานหนึ่งคนอาจถูกจัดสรรให้ดำเนินการหลายเครื่องจักร ปัญหาดังกล่าวได้ถูกศึกษาโดย [6] ซึ่งนำเสนอโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม กรณีที่มีสองวัตถุประสงค์ ในการจัดการตารางการทำงานของพนักงานสำหรับระบบที่มีจำนวนพนักงานน้อยกว่าเครื่องจักรหรือระบบที่มีกลุ่มของพนักงานดำเนินการปรับตั้งเครื่องจักรหลายกระบวนการต่อเนื่องกัน

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการตารางการทำงานของพนักงานสำหรับระบบที่มีจำนวนพนักงานจำกัด และมีงานที่ต้องดำเนินการหลายงาน โดยงานแต่ละงานมีข้อกำหนดด้านจำนวนพนักงานที่ต้องใช้ในการดำเนินงานขั้นต่ำและขั้นสูง ระยะเวลาในการดำเนินงานมีความยืดหยุ่น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามจำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรร โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ระยะเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายมีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้หากพิจารณาจากความซับซ้อนของปัญหาเป็นการจัดสรรงานที่เป็นอิสระต่อกันแต่ละงานให้กับพนักงานแต่ละคนในระบบ โดยงานแต่ละงานต้องเพียงพนักงานดำเนินการหนึ่งคน ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการดำเนินงานเป็นค่าคงที่ ลักษณะดังกล่าวคล้ายคลึงกับการจัดการตารางการทำงานเพื่อลดระยะเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายบนเครื่องจักรขนานที่เหมือนกัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาชนิด NP [7]

2) คำอธิบายสัญลักษณ์ คุณลักษณะ และคุณสมบัติของปัญหา

2.1) คำอธิบายสัญลักษณ์ย่อ

E	จำนวนพนักงานในระบบ
n	จำนวนงานในระบบ
W_i	พนักงานคนที่ i โดย $i = 1, \dots, m_j$
J_j	งาน j
L_j	จำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำงาน j โดย $j = 1, \dots, n$
U_j	จำนวนพนักงานที่มากที่สุดที่สามารถทำงาน j โดย $j = 1, \dots, n$
m_j	จำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรรให้ทำงาน j โดย $L_j \leq m_j \leq U_j$
T_j	จำนวนชั่วโมงทำงานสำหรับงาน j
p_{j,m_j}	เวลาที่ใช้ทำงาน j ต่อจำนวนพนักงานที่ทำงาน j
d	จำนวนพนักงานที่เปลี่ยนแปลง โดย $L_j \leq d \leq U_j$

- A_j ระยะเวลาดำเนินการของพนักงานที่ทำงาน j เมื่อถูกดำเนินการด้วยพนักงานจำนวน $m_j - d$ คน
- R_j ระยะเวลาดำเนินการของพนักงานที่ทำงาน j เมื่อถูกดำเนินการด้วยพนักงานจำนวน $m_j + d$ คน
- Z_i เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายบนพนักงานคนที่ i
- $C_{\max}$ เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายที่มากที่สุด โดย $i \in P_1$
- $C'_{\max}$ เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายที่มากที่สุด โดย $i \in P_2$
- P_1 เซตของพนักงานที่มี $Z_i = C_{\max}$
- P_2 เซตของพนักงานที่มี $Z_i \neq C_{\max}$
- $n_{\max}$ จำนวนพนักงานที่มีเวลาแล้วเสร็จของการทำงานสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ $C_{\max}$
- $n'_{\max}$ จำนวนพนักงานที่มีเวลาแล้วเสร็จของการทำงานไม่เท่ากับ $C_{\max}$ (โดย $n'_{\max} = E - n_{\max}$)
- S_1 เซตของงานทั้งหมดที่ดำเนินการโดยพนักงานที่มี $Z_i = C_{\max}$
- S_2 เซตของงานทั้งหมดที่ดำเนินการโดยพนักงานที่มี $Z_i \neq C_{\max}$
- F ผลรวมของผลต่างระหว่างเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายมากที่สุด ($i \in P_1$) กับเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย ($i \in P_2$) บนพนักงานเซต P_2 โดย $F = (C_{\max} - C'_{\max}) \times n'_{\max}$

2.2) คุณลักษณะของปัญหา

งานวิจัยพิจารณาระบบที่มีจำนวนงาน n งาน จำนวนพนักงาน E คน โดยงานไม่มีความสัมพันธ์ในลำดับก่อน-หลัง และพนักงานหนึ่งคนสามารถทำงานได้เพียงงานเดียวในแต่ละช่วงเวลา ทั้งนี้งานแต่ละงานมีความต้องการพนักงานดำเนินการเป็นจำนวนขั้นต่ำและจำนวนขั้นสูงแตกต่างกัน ระยะเวลาในการดำเนินงานขึ้นอยู่กับจำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรรให้งานนั้น ในรูปแบบความสัมพันธ์เอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ 1

$$p_{j,m_j} = \frac{T_j}{m_j} \quad (1)$$

หากงานใดมีจำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรรตั้งแต่สองคนขึ้นไป พนักงานทุกคนที่ถูกจัดสรรให้ทำงานนั้น ต้องเริ่มดำเนินงานและ

สิ้นสุดงานนั้นพร้อมกัน สมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

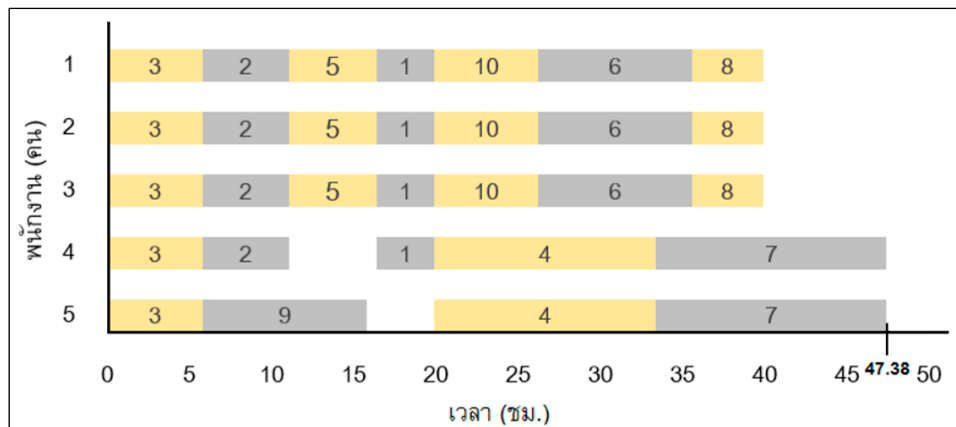
- พนักงานทุกคนมีความสามารถในการทำงานเท่ากัน
- เมื่องานใดเริ่มดำเนินการแล้ว จะต้องถูกดำเนินการให้แล้วเสร็จ โดยไม่มีการแบ่งงานหรือหยุดพัก
- งานทุกงานพร้อมที่จะถูกดำเนินการตั้งแต่ต้นช่วงเวลาของการจัดตารางการทำงาน

ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้ระบบมีจำนวนงานที่ต้องดำเนินการ 10 งาน และจำนวนพนักงาน 5 คน โดยทุกงานพร้อมจะถูกดำเนินการตั้งแต่ต้นช่วงเวลาการจัดตารางการทำงาน รายละเอียดของงานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของงาน

งาน	ระยะเวลาดำเนินการ (จำนวนชั่วโมงต่อ หนึ่งคนทำงาน)	จำนวนพนักงาน ที่ต้องการ (คน)	
		ขั้นต่ำ	ขั้นสูง
1	14	3	4
2	21	4	4
3	29	5	5
4	27	2	5
5	16	3	3
6	28	2	3
7	28	2	4
8	13	3	5
9	10	1	1
10	19	2	5

กำหนดให้คำตอบการจัดตารางการทำงานที่สนใจ (คำตอบดังกล่าวอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด) มีจำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรรให้กับ งาน 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 เท่ากับ 4 4 5 2 3 3 2 3 1 และ 3 คน ตามลำดับ จากสมการที่ (1) เมื่อทราบจำนวนพนักงานที่ดำเนินการแต่ละงาน สามารถคำนวณระยะเวลาในการดำเนินงานทั้ง 10 งาน ได้เท่ากับ 3.50 5.25 5.80 13.50 5.33 9.33 14.00 4.33 10.00 และ 6.33 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาลำดับความสำคัญของงานที่กำหนด ตารางการทำงานสามารถถูกแสดงได้ด้วยแผนภูมิแกนต์ (Gantt Chart) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิแกนต์แสดงตารางการทำงานของพนักงาน

จากแผนภูมิแกนต์ด้านบน สามารถแสดงรายละเอียดการทำงานแต่ละงานได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของการทำงานแต่ละงาน

งาน	จำนวนพนักงานดำเนินการ (คน)	ระยะเวลาในการดำเนินงาน (ชม.)	เวลาเริ่มงาน (ชม.)	เวลาแล้วเสร็จของงาน (ชม.)
1	4	3.50	16.38	19.88
2	4	5.25	5.80	11.05
3	5	5.80	0.00	5.80
4	2	13.50	19.88	33.38
5	3	5.33	11.05	16.38
6	3	9.33	26.21	35.54
7	2	14.00	39.88	47.38
8	3	4.33	35.54	39.87
9	1	10.00	5.80	15.80
10	3	6.33	19.88	26.21

ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้ว่าเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายจากตารางการทำงานดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 47.38 ชั่วโมง

2.3) คุณสมบัติของปัญหาทางวิจัย

2.3.1) คุณสมบัติที่ 1 หากงาน J_a และงาน J_b ถูกทำโดยพนักงานมากกว่าหนึ่งคน ลำดับก่อนหลังของงาน J_a และงาน J_b บนพนักงานทั้งหมดที่ทำงานดังกล่าวจะต้องเหมือนกัน

คำอธิบาย : จากคุณลักษณะของปัญหา งานใดที่ถูกดำเนินการโดยพนักงานมากกว่าหนึ่งคน พนักงานทุกคนที่ทำงาน

นั้น ต้องดำเนินงานดังกล่าวพร้อมกัน เนื่องจากงานเดียวกันต้องมีเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดงานบนพนักงานแต่ละคนพร้อมกัน

2.3.2) คุณสมบัติที่ 2 หากทราบงานที่พนักงานแต่ละคนต้องดำเนินการและทราบลำดับการดำเนินงาน จะสามารถจัดตารางการทำงานได้ทันที เนื่องจากการจัดตารางการทำงานที่ควรเริ่มทุกงานให้เร็วที่สุด เพื่อลดค่าของตัวชี้วัด ซึ่งเป็นเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย

คำอธิบาย : ตัวชี้วัดชนิดเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย เป็นตัวชี้วัดที่ไม่ควรมีการล่าช้าที่ไม่จำเป็นของงาน หากทราบลำดับของงาน ตารางการทำงานสามารถถูกกำหนดได้โดยเริ่มงานทุกงานให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2.3.3) คุณสมบัติที่ 3 สำหรับงาน J_j ใด ๆ หากมีการลดจำนวนพนักงานที่ดำเนินงานจาก m_j คน เป็น $m_j - d$ คน จะทำให้เวลาดำเนินการของพนักงานที่ทำงาน J_j เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$R_j = \frac{T_j d}{m_j^2 - m_j d} \quad (2)$$

คำอธิบาย : หากมีการลดจำนวนพนักงานที่ทำงาน J_j จาก m_j คน เป็น $m_j - d$ คน คน จะทำให้ระยะเวลาในการดำเนินงาน J_j ที่เหลืออยู่มีค่ามากขึ้น โดยมีค่าผลต่างของระยะเวลาดำเนินงาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_j = \frac{T_j}{m_j - d} - \frac{T_j}{m_j} \quad (3)$$

$$= \frac{T_j d}{m_j^2 - m_j d} \quad (4)$$

2.3.4) *คุณสมบัติที่ 4* สำหรับงาน J_j ใด ๆ หากมีการเพิ่มจำนวนพนักงานที่ดำเนินงานจาก m_j คน เป็น $m_j + d$ คน จะทำให้เวลาดำเนินการของพนักงานที่ทำงาน J_j ลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$A_j = \frac{T_j d}{m_j^2 + m_j d} \quad (5)$$

คำอธิบาย : หากมีการเพิ่มจำนวนพนักงานที่ทำงาน J_j จาก m_j คน เป็น $m_j + d$ คน จะทำให้ระยะเวลาในการดำเนินงาน J_j ที่เหลืออยู่มีค่าน้อยลง โดยมีค่าผลต่างของระยะเวลาดำเนินงาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_j = \frac{T_j}{m_j} - \frac{T_j}{m_j + d} \quad (6)$$

$$= \frac{T_j d}{m_j^2 + m_j d} \quad (7)$$

2.3.5) *คุณสมบัติที่ 5* หากทุกงานมีจำนวนพนักงานขั้นสูงเท่ากับ E คน ทุกงาน คำตอบที่ดีที่สุด คือ การสรรจัดจำนวนพนักงานให้กับงานแต่ละงานเท่ากับจำนวนพนักงานขั้นสูง และลำดับของงานสามารถจัดเรียงได้ทุกรูปแบบ

คำอธิบาย : หากทุกงานมีความต้องการพนักงานขั้นสูงเท่ากับ E คน สามารถจัดเรียงงานได้ทุกแบบ คือ เรียงลำดับงานอย่างไรก็ตาม $C_{\max}$ ที่เท่ากันทุกแบบ เช่น มีพนักงานทั้งหมดจำนวน 5 คน งาน A งาน B และงาน C มีความต้องการพนักงานขั้นสูงเท่ากับ 5 คน สามารถจัดเรียงลำดับได้ทุกแบบ คือ ABC ACB BAC BCA CAB และ CBA เนื่องจากมีค่า $C_{\max}$ เท่ากัน แม้จะเรียงลำดับงานก่อนหลังไม่เหมือนกัน

2.3.6) *คุณสมบัติที่ 6* หากทุกงานมีความต้องการพนักงานขั้นต่ำมากกว่า $\frac{E}{2}$ คน และขั้นสูง U_j คน ควรใช้จำนวนพนักงานในการดำเนินการ U_j คน ทุกงาน

คำอธิบาย : หากงาน J_j ใช้พนักงานในการดำเนินงานเป็นจำนวนขั้นต่ำที่มากกว่า $\frac{E}{2}$ คน งานอื่นจะไม่สามารถเริ่มดำเนินการได้ เนื่องจากพนักงานจำนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งของพนักงานทั้งหมด กำลังดำเนินงาน J_j จึงควรใช้พนักงานทั้งหมดในการดำเนินงาน J_j เพราะช่วงลระยะเวลาในการดำเนินการ อีกทั้งยังทำให้งานอื่นได้เริ่มดำเนินการเร็วขึ้น

2.3.7) *คุณสมบัติที่ 7* หากงานมีความต้องการพนักงานขั้นต่ำและขั้นสูงเท่ากับ 1 คน ปัญหาการจัดจำนวนพนักงานสามารถถูกพิจารณาเป็นปัญหาชนิด NP

คำอธิบาย : หากงานในระบบมีความต้องการพนักงานขั้นต่ำและขั้นสูงเท่ากับ 1 คน ลักษณะปัญหาดังกล่าวเปรียบได้กับการลดเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายบนเครื่องจักรขนานที่เหมือนกัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาชนิด NP [7]

3) วิธีฮิวริสติกสองขั้นตอน

จากคุณสมบัติของปัญหาที่กล่าวมา วิธีฮิวริสติกได้ถูกพัฒนาเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาทางวิจัยในระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการฮิวริสติกสามารถจำแนกได้เป็นสองขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย การจัดตารางการทำงานเริ่มต้น และการปรับปรุงตารางการทำงานเริ่มต้น โดยมีรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1) การจัดตารางการทำงานเริ่มต้น

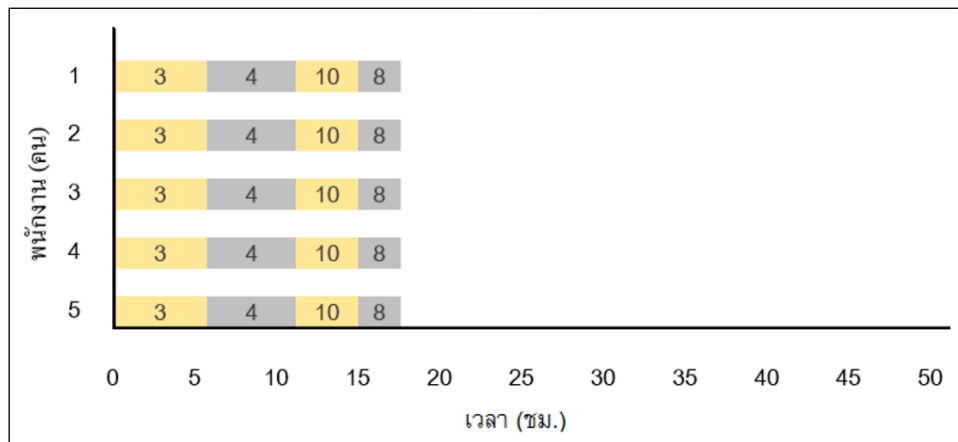
กำหนดให้จำนวนพนักงานดำเนินการแต่ละงาน มีค่าเท่ากับจำนวนพนักงานขั้นสูงที่สามารถดำเนินงานนั้นได้ ($m_j = U_j$) และ เซต A เป็นเซตของงานที่ยังไม่ได้ถูกกำหนดตารางการทำงาน

1. เรียงงานในเซต A ตามลำดับจากค่า m_j มากไปน้อย
2. พิจารณาจำนวนพนักงานดำเนินการแต่ละงานที่อยู่ในเซต A กำหนดให้ a มีค่าเท่ากับค่ามากที่สุดของ m_j
3. พิจารณาเซต A เลือกงานกลุ่มที่มี $m_j = a$ มาจัดตารางการทำงาน โดยกำหนดให้พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_{m_j} เป็นคนดำเนินการ ทั้งนี้นงานในกลุ่มเดียวกันที่มี p_{j,m_j} สูงที่สุด จะถูกนำมาจัดตารางการทำงานก่อน
4. นำงานที่ถูกจัดเรียงแล้วจากขั้นตอนที่ 3.1 ออกจากเซต A
5. พิจารณาเซต A เลือกงานกลุ่มที่มี $m_j = E - a$ มาจัดตารางการทำงานให้กับพนักงานจำนวน m_j คนที่ว่างก่อน โดยมีเงื่อนไขงานต้องถูกเริ่มดำเนินการเร็วที่สุด และพนักงานทุกคนที่ถูกจัดสรรงานเดียวกันต้องเริ่มงานพร้อมกัน ทั้งนี้นงานในกลุ่มเดียวกันที่มี p_{j,m_j} สูงที่สุด จะถูกนำมาจัดตารางการทำงานก่อน
6. นำงานที่ถูกจัดเรียงไปแล้วจากขั้นตอน 4.1 ออกจากเซต A

7. ทำซ้ำขั้นตอน 2 ถึงขั้นตอน 4 จนกระทั่งไม่เหลืองานในเซต A
8. สิ้นสุดการจัดตารางการทำงานเริ่มต้น

ตัวอย่างที่ 2 จากตารางที่ 1 สามารถนำมาจัดตารางการทำงานด้วยวิธีการจัดตารางการทำงานเริ่มต้น ดังนี้

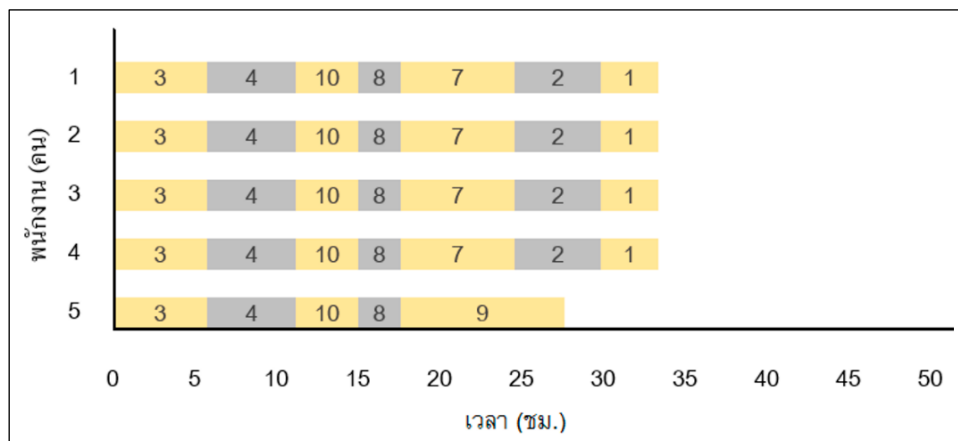
จากตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้ $E = 5$ จากขั้นตอน 2 เลือกงานที่มีค่า m_j มากที่สุด คือ $m_j = a = 5$ จากนั้นขั้นตอน 3.1 นำงานกลุ่ม a มาจัดตารางการทำงานให้พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_5 ดำเนินการ จะได้การจัดตารางการทำงานเริ่มต้นรอบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดตารางการทำงานเริ่มต้นรอบที่ 1

ดำเนินการรอบที่สอง จากขั้นตอน 2 เลือกงานที่มีค่า m_j มากที่สุด คือ $m_j = a = 4$ จากนั้นขั้นตอน 3.1 นำงานกลุ่ม a มาจัดตารางการทำงานให้พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_4 ดำเนินการ

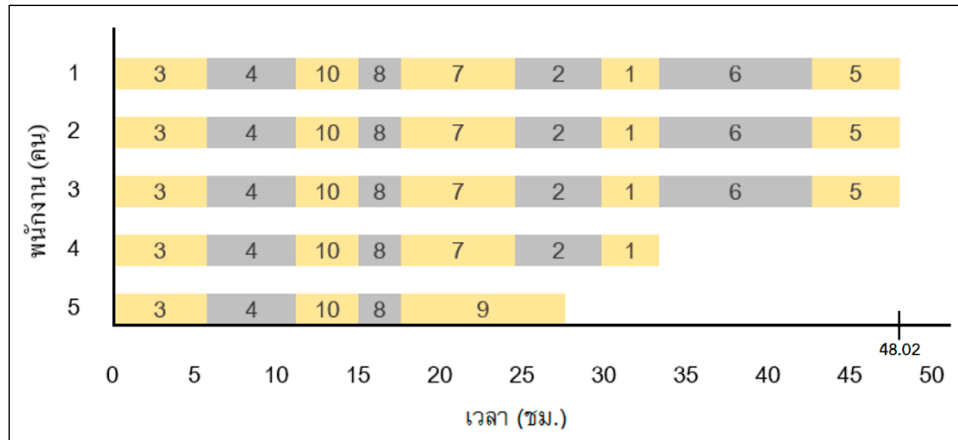
และจากข้อ 4.1 จะได้ $m_j = 5 - 4 = 1$ มาจัดตารางการทำงานให้พนักงานคนที่ W_5 ดำเนินการ จะได้การจัดตารางการทำงานเริ่มต้นรอบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดตารางการทำงานเริ่มต้นรอบที่ 2

ดำเนินการรอบที่สาม จากขั้นตอน 2 เลือกงานที่มีค่า m_j มากที่สุด คือ $m_j = a = 3$ จากนั้นขั้นตอน 3.1 นำงานกลุ่ม a มาจัดตารางการทำงานให้พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_3 ดำเนินการ

และจากข้อ 4.1 จะได้ $m_j = 5 - 3 = 2$ แต่เนื่องจากตัวอย่างที่ 1 ไม่มี $m_j = 2$ จึงได้ตารางการทำงานเริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตารางการทำงานเริ่มต้น

3.2) การปรับปรุงตารางการทำงานเริ่มต้น

จากตารางการทำงานเริ่มต้น คำนวณ $C_{\max}$ $C'_{\max}$ $n_{\max}$ และ $n'_{\max}$

- พิจารณากลุ่มงานที่มีจำนวนพนักงานดำเนินการ เท่ากับ $\frac{E}{2}$ คน (ในตารางการทำงานเริ่มต้น งานกลุ่มดังกล่าวถูกดำเนินการโดยพนักงานคนที่ W_1 ถึง $W_{\frac{E}{2}}$) เลื่อยย้ายงานที่มีค่า p_{j,u_j} ต่ำที่สุดในกลุ่ม ให้พนักงานคนที่ $W_{\frac{E}{2}+1}$ ถึง W_E ดำเนินการ ทำซ้ำในขั้นตอนนี้ หาก $C_{\max}$ ยังมีค่าลดลง ปรับปรุงค่า $C_{\max}$ $C'_{\max}$ $n_{\max}$ และ $n'_{\max}$
- สร้างเซตของพนักงาน P_1 และ P_2 และสร้างเซตของงาน S_1 และ S_2
- คำนวณค่า $F = (C_{\max} - C'_{\max}) \times n'_{\max}$ หากมีงานใดในเซต S_1 ที่มีค่า $T_j < F$ ให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 4; หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ข้ามไปดำเนินการขั้นตอนที่ 7
- พิจารณางานในเซต S_1 คัดเลือกงานที่มี $L_j > n'_{\max}$ นำออกไปจากเซต S_1 และคัดเลือกงานที่มี $U_j \leq n'_{\max}$ นำออกไปจากเซต S_1
- พิจารณาทุกงานที่เหลืออยู่ในเซต S_1 ที่มีค่า $T_j \leq F$ และใกล้เคียงกับค่า F ที่สุด จำนวน 1 งาน (หากมีงานที่มีค่า T_j เท่ากัน และเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ F มากกว่า 1 งาน ให้เลือกงานที่มีค่า U_j มากกว่า) กำหนดงานนั้นให้พนักงานทุกคนในเซต P_2 ดำเนินการ
- ปรับปรุงค่า $C_{\max}$ $C'_{\max}$ $n_{\max}$ และ $n'_{\max}$ ย้อนกลับไปที่ขั้นตอนที่ 2
- หยุดกระบวนการ

ตัวอย่างที่ 3 จากคำตอบการจัดตารางการทำงานเริ่มต้นในตัวอย่างที่ 2 สามารถนำมาปรับปรุงตารางการทำงานให้เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายมีค่าลดลง แสดงได้ดังนี้

จากตารางการทำงานเริ่มต้นซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 มีค่า $C_{\max} = 48.02$ ชั่วโมง $C'_{\max} = 33.35$ ชั่วโมง $n_{\max} = 3$ คน และ $n'_{\max} = 2$ คน

ขั้นตอนที่ 1: ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตารางการทำงานเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 2: พนักงานในเซต P_1 ได้แก่ พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_3

พนักงานในเซต P_2 ได้แก่ พนักงานคนที่ W_4 และ W_5

งานในเซต S_1 ได้แก่ $J_3 J_4 J_{10} J_8 J_7 J_2 J_1 J_6$ และ J_5

งานในเซต S_2 ได้แก่ $J_3 J_4 J_{10} J_8 J_7 J_9 J_2$ และ J_1

ขั้นตอนที่ 3: ค่า $F = (48.02 - 33.35) \times 2 = 29.34$

ขั้นตอนที่ 4: จะเหลืองานในเซต S_1 ได้แก่ $J_4 J_{10} J_7$ และ J_6

ขั้นตอนที่ 5: J_4 มีค่า $T_4 = 27$ และ $U_4 = 5$

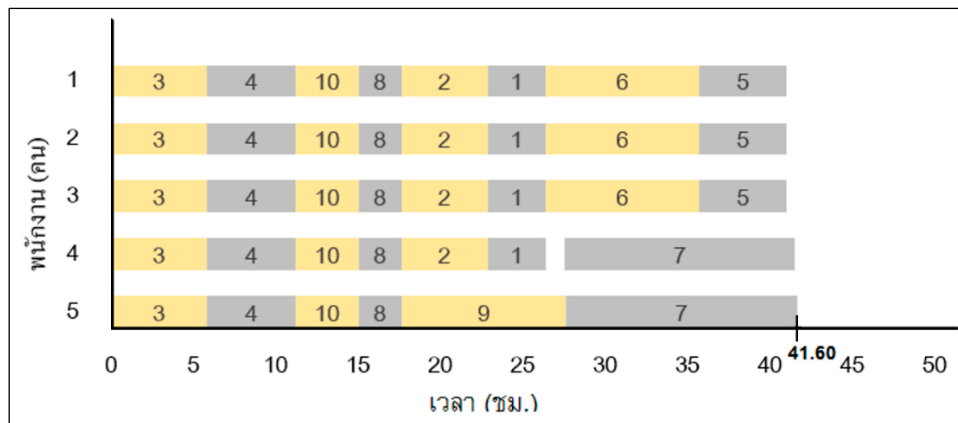
J_{10} มีค่า $T_{10} = 19$ และ $U_{10} = 5$

J_7 มีค่า $T_7 = 28$ และ $U_7 = 4$

J_6 มีค่า $T_6 = 28$ และ $U_6 = 3$

เลือก J_7 ให้พนักงานคนที่ W_4 และ W_5 ดำเนินการ

เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 5 สามารถทำการปรับปรุงตารางการทำงาน ซึ่งเขียนเป็นแผนภูมิแกนต์ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตารางการทำงานหลังการปรับปรุงตารางการทำงานเริ่มต้น

พิจารณาการเข้าเพื่อปรับปรุงตารางการทำงานในรอบที่สองโดยเริ่มจากการปรับปรุงค่าต่าง ๆ ในชั้นตอนที่ 6 ได้ดังนี้
ชั้นตอนที่ 6: ทำการปรับปรุงค่าพบว่า $C_{\max} = 41.60$ ชั่วโมง

$$C'_{\max} = 41.02 \text{ ชั่วโมง } n_{\max} = 2 \text{ คน และ } n'_{\max} = 3 \text{ คน}$$

ย้อนกลับไปทำชั้นตอนที่ 2

ชั้นตอนที่ 2: พนักงานในเซต P_1 ได้แก่ พนักงานคนที่ W_4 และ W_5
พนักงานในเซต P_2 ได้แก่ พนักงานคนที่ W_1 ถึง W_3
งานในเซต S_1 ได้แก่ $J_3 J_4 J_{10} J_8 J_2 J_9 J_1$ และ J_7
งานในเซต S_2 ได้แก่ $J_3 J_4 J_{10} J_8 J_2 J_1 J_6$ และ J_5

ชั้นตอนที่ 3: $F = (41.60 - 41.02) \times 2 = 1.16$

เนื่องจาก $F < T_9$ โดย $T_9 = 10$ ซึ่งเป็นค่า T_j ที่น้อยที่สุดในเซต S_1 ดังนั้นข้ามไปดำเนินการในชั้นตอนที่ 7

ชั้นตอนที่ 7: หยุดกระบวนการ

ทั้งนี้พิจารณาได้ว่า ไม่สามารถทำการปรับปรุงตารางการทำงานเพิ่มเติมได้ ตารางการทำงานหลังปรับปรุงที่ได้จึงยังคงเป็นดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นผลจากการปรับปรุงในรอบแรก

4) การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวิธีวิริสติกสองชั้นตอน

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีวิริสติก ซึ่งถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาคำตอบที่ได้จากวิธีวิริสติกถูกนำไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการค้นหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ

ปัญหาที่สุ่มขึ้นพิจารณาปัจจัยหลักสองปัจจัยได้แก่ จำนวนงานย่อย ซึ่งแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ 5 งาน และ 10 งาน และจำนวนพนักงานในระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ 3 คน และ 5 คน สามารถแบ่งปัญหออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ปัญหาขนาดเล็ก (พนักงานในระบบจำนวน 3 คน และงานจำนวน 5 งาน) และปัญหาขนาดใหญ่ (พนักงานในระบบจำนวน 5 คน และงานจำนวน 10 งาน) ทั้งนี้ปัญหาแต่ละรูปแบบได้ถูกสร้างขึ้นอย่างสุ่ม โดยปัญหาที่แตกต่างกันจำนวน 30 ปัญหา จึงมีปัญหาที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 60 ปัญหา ค่าพารามิเตอร์ของปัญหาในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และค่าที่กำหนด

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
จำนวนงานย่อย (n)	5, 10
เวลาที่ใช้ในการทำงาน (T_j) ชั่วโมง-คน	$\sim U [10, 30]$
จำนวนพนักงานขั้นต่ำ (L_j)	$\sim U [1, 3], \sim U [1, 5]$
จำนวนพนักงานขั้นสูง (U_j)	$\sim U [L_j, 3], \sim U [L_j, 5]$

ค่าเปรียบเทียบที่นำมาพิจารณา คือ เปอร์เซนต์ความแตกต่าง (% dev) ของคำตอบที่ได้จากวิธีวิริสติกและการค้นหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 8

$$\% dev = \frac{(C_{HEU} - C_{EVO}) \times 100}{C_{EVO}} \quad (8)$$

โดย C_{HEU} = เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายจากวิธีวิริสติก

C_{EVO} = เวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายจากการค้นหา
คำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิง
วิวัฒนาการ

ผลการวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่นของเปอร์เซ็นต์ความ
แตกต่างสำหรับปัญหาขนาดเล็กและช่วงความเชื่อมั่นของ
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ สามารถแสดง
ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ช่วงความเชื่อมั่นของ % *dev* ที่แต่ละระดับของปัจจัย

รูปแบบ	ขนาด ของ ปัญหา	จำนวน		ช่วงความเชื่อมั่น ของ % <i>dev</i>
		พนักงาน (คน)	งาน (งาน)	
1	เล็ก	3	5	(0.30, 2.84)
2	ใหญ่	5	10	(-20.46, -10.44)

จากตารางที่ 4 สำหรับปัญหาขนาดเล็ก (พนักงานในระบบ
จำนวน 3 คน และงานจำนวน 5 งาน) คำตอบที่ได้จากวิธี
ฮิวริสติกมีเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายแตกต่างจากการค้นหา
คำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการเล็กน้อย
โดยวิธีฮิวริสติกมีเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายสูงกว่า (ค่า
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเป็นบวก) การค้นหาคำตอบของตัวแบบ
ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการโดยประมาณ 1.57 เปอร์เซ็นต์
หรือมีค่า 95% ช่วงความเชื่อมั่นของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
เท่ากับ (0.30, 2.84) สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ (พนักงานในระบบ
จำนวน 5 คน และงานจำนวน 10 งาน) คำตอบที่ได้จากวิธี
ฮิวริสติกมีเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายแตกต่างจากการค้นหา
คำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ โดย
วิธีฮิวริสติกมีเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้ายต่ำกว่า (ค่าเปอร์เซ็นต์
ความแตกต่างเป็นลบ) การค้นหาคำตอบของตัวแบบทาง
คณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการโดยประมาณ 15.45 เปอร์เซ็นต์
หรือมีค่า 95% ช่วงความเชื่อมั่นของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
เท่ากับ (20.46, 10.44)

5) สรุป

งานวิจัยทำการศึกษาการจัดตารางการทำงานของพนักงาน
สำหรับระบบที่มีจำนวนพนักงานจำกัด และมีงานที่ต้อง
ดำเนินการหลายงาน โดยงานแต่ละงานมีข้อกำหนดด้านจำนวน
พนักงานที่ต้องใช้ในการดำเนินงานขั้นต่ำและขั้นสูง ระยะเวลาใน
การดำเนินงานมีความยืดหยุ่น สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตาม

จำนวนพนักงานที่ถูกจัดสรร วิธีฮิวริสติกได้ถูกพัฒนาเพื่อค้นหา
คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหามหาจำนวนในระยะเวลาที่เหมาะสม จาก
การประเมินคุณภาพคำตอบที่ได้รับจากวิธีฮิวริสติก โดย
เปรียบเทียบกับการค้นหาคำตอบของตัวแบบทางคณิตศาสตร์
ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ สำหรับ 60 ปัญหา ซึ่งแบ่งเป็น ปัญหาขนาดเล็ก
จำนวน 30 ปัญหา และปัญหาขนาดใหญ่จำนวน 30 ปัญหา
พบว่าที่ปัญหาขนาดเล็ก วิธีฮิวริสติกให้คำตอบที่มีค่าเวลาแล้ว
เสร็จของงานสุดท้ายสูงกว่าการค้นหาคำตอบของตัวแบบทาง
คณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์
ความแตกต่างของคุณภาพคำตอบเท่ากับ 1.57 เปอร์เซ็นต์
โดยประมาณ ทั้งนี้จากผลทดสอบปัญหามหาจำนวน พบว่าวิธี
ฮิวริสติกที่นำเสนอให้คำตอบที่ดีกว่าการค้นหาคำตอบของ
ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงวิวัฒนาการ โดยเฉลี่ย 15.45
เปอร์เซ็นต์

REFERENCES

- [1] K. R. Baker, "Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey," *Journal of the Operational Research Quarterly*, vol. 27, no. 1, pp. 155–167, 1976.
- [2] U. S. Pawar and D. B. Hanchate, "Literature review on personannel sheduling," *Int. Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, vol. 4, no. 5, pp. 312–324, Sep. 2013.
- [3] D. S. Dewi and T. Septiana, "Workforce sheduling considering physical and mental workload: A case sudy of domestic freight forwarding," *Procedia Manufacturing*, vol. 4, pp. 445–453, 2015.
- [4] T. Garaix, M. Gondran, P. Lacomme, E. Mura, and N. Tchernev, "Workforce scheduling linear programming formulation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 264–269, 2018.
- [5] S. E. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 419–424, 2016.
- [6] M. Liu and X. Liu, "Satisfaction-driven bi-objective multi-skill workforce scheduling problem," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 229–234, 2019.
- [7] P. Alcan and H. Başlıgil, "A genetic algorithm application using fuzzy processing times in non- identical parallel machine scheduling problem," *Advances in Engineering Software*, vol. 45, no. 1, pp. 272–280, Mar. 2012.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ของสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น บทความที่นำเสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด และพร้อมที่จะนำไปตีพิมพ์ได้ทันที การเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร มีรายละเอียดดังนี้

1. หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์

1.1 เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ หรือไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ และไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการใดมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ หากตรวจสอบพบว่ามีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.2 เป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีคุณค่าทางวิชาการ มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา และมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ

1.3 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะต้องผ่านการประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewer) อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อบทความ ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิอาจให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือปรับปรุงบทความให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

1.4 กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ตามที่เห็นสมควร

1.5 บทความ ข้อความ ภาพประกอบ และตารางประกอบ ที่ตีพิมพ์ลงวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใด ๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

1.6 ต้องเป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ลอกเลียน หรือดัดทอนข้อความของผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

1.7 หากเป็นงานแปลหรือเรียบเรียงจากภาษาต่างประเทศ ต้องมีหลักฐานการอนุญาตให้ตีพิมพ์เป็นลายลักษณ์อักษรจากเจ้าของลิขสิทธิ์

1.8 ต้องมีการอ้างอิงที่ถูกต้อง เหมาะสมก่อนการตีพิมพ์ ซึ่งเป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน

1.9 บทความที่ส่งถึงกองบรรณาธิการ ขอสงวนสิทธิ์ที่จะไม่ส่งคืนผู้เขียน

2. รูปแบบการกลั่นกรองบทความก่อนลงตีพิมพ์ (Peer-review)

ในการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิเป็นการประเมินแบบ Double-blind peer review คือ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้เขียนบทความ และผู้เขียนบทความไม่ทราบชื่อและรายละเอียดของผู้ทรงคุณวุฒิ

3. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทคัดย่อ บทนำ วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย สรุปและอภิปรายผล และเอกสารอ้างอิง

หมายเหตุ : บทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้หน้าบทคัดย่อภาษาไทยอยู่ก่อนหน้าบทคัดย่อภาษาอังกฤษ สำหรับบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

* เอกสารอ้างอิง เป็นการบอกรายการแหล่งอ้างอิงที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาของงานเขียน

4. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ โดยจริยธรรมและบทบาทหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้อง มีดังนี้

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้เขียน

1. ผู้เขียนต้องเขียนบทความให้เป็นไปตามรูปแบบที่วารสารกำหนดไว้ในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน
2. หากมีการนำข้อมูลของผู้อื่นหรือข้อมูลของผู้เขียนที่เคยตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาใช้ ผู้เขียนต้องอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลนั้น โดยไม่ทำให้ผู้อื่นเข้าใจผิดว่าข้อมูลนั้นเป็นผลงานใหม่ของผู้เขียน
3. ผู้เขียนต้องไม่ดัดแปลงหรือบิดเบือนข้อมูล
4. ผู้เขียนต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัย (ถ้ามี)
5. ผู้เขียนต้องเปิดเผยข้อมูลเกี่ยวกับผลประโยชน์ทับซ้อนอย่างชัดเจน (ถ้ามี)

จริยธรรมและหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการต้องดำเนินการเผยแพร่วารสารให้ตรงตามเวลา
2. บรรณาธิการต้องคัดเลือกรับบทความ โดยพิจารณาจากคุณภาพและความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับขอบเขตของวารสาร
3. บรรณาธิการต้องดำเนินการประเมินบทความอย่างเป็นธรรม ไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความโดยใช้อคติ
4. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียนบทความ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ประเมินบทความ
6. บรรณาธิการต้องใช้โปรแกรมในการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน เพื่อป้องกันการตีพิมพ์ผลงานซึ่งคัดลอกมาจากผลงานผู้อื่น หากพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่น บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการพิจารณาบทความทันที และติดต่อผู้เขียนเพื่อขอคำชี้แจง

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

1. ผู้ประเมินบทความ ควรพิจารณาตอบรับการประเมินเฉพาะบทความที่สอดคล้องกับความเชี่ยวชาญของตนเองเท่านั้น เพื่อให้บทความที่ตีพิมพ์มีคุณภาพ
2. ผู้ประเมินบทความควรประเมินบทความให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้บทความที่ผ่านการพิจารณาตีพิมพ์ล่าช้า
3. ผู้ประเมินควรประเมินบทความโดยให้ข้อเสนอแนะตามหลักวิชาการเท่านั้น ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีเหตุผลหรือไม่มีข้อมูลรองรับ
4. ผู้ประเมินควรปฏิเสธการประเมินบทความ หากเห็นว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน
5. ผู้ประเมินต้องไม่เปิดเผยเนื้อหาภายในบทความให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทราบ
6. หากผู้ประเมินเห็นว่ามีความเห็นที่ผู้เขียนไม่ได้กล่าวอ้างถึง แต่เป็นบทความที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับบทความ ผู้ประเมินควรแจ้งให้ผู้เขียนกล่าวอ้างถึงบทความนั้น

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

5. ข้อกำหนดการจัดพิมพ์ต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนต้องจัดพิมพ์บทความตามข้อกำหนดเพื่อให้มีรูปแบบการตีพิมพ์เป็นมาตรฐานแบบเดียวกัน ดังนี้

5.1 ขนาดของกระดาษ ให้ใช้ขนาด A4

5.2 กรอบของข้อความ ระยะห่างของขอบกระดาษ

ด้านบน 2.5 ซม. (0.98")

ด้านล่าง 2 ซม. (0.79")

ด้านซ้าย 2 ซม. (0.79")

ด้านขวา 2 ซม. (0.79")

5.3 ระยะห่างระหว่างบรรทัด หนึ่งช่วงบรรทัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Single)

5.4 ตัวอักษร รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ TH Sarabun New

5.5 รายละเอียดต่างๆ ของบทความ กำหนดดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ขนาด 22 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง

ชื่อผู้เขียน (Author) ขนาด 16 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง ไม่ต้องใส่คำนำหน้า

ที่ติดต่อผู้เขียน ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดกึ่งกลาง

E-mail ผู้นิพนธ์ประสาน ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง

บทคัดย่อ (Abstract) จัดรูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 1 คอลัมน์ ชื่อหัวข้อ ขนาด 14 ตัวหนาและเอน กำหนดกึ่งกลาง ข้อความในบทคัดย่อ ขนาด 14 ตัวธรรมดา

คำสำคัญ (Keywords) ให้ใส่คำสำคัญ 4-5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้ บทคัดย่อ ขนาด 12 ตัวหนาและเอน กำหนดชิดซ้าย ข้อความในคำสำคัญ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

รูปแบบการพิมพ์เนื้อหาของบทความ

- รูปแบบการพิมพ์เป็นแบบ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์ กว้าง 8.2 ซม. (3.23") ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.6 ซม. (0.24")

- หัวข้อหลัก ประกอบด้วย บทนำ (INTRODUCTION) วัตถุประสงค์ของการวิจัย (OBJECTIVES) วิธีดำเนินการวิจัย (METHODS) ผลการวิจัย (RESULTS) สรุปและอภิปรายผล (CONCLUSIONS AND DISCUSSION) เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ขนาด 14 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และมีเลขกำกับ เช่น 1) บทนำ และ I. INTRODUCTION เป็นต้น

- หัวข้อรอง ระดับที่ 1 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้าย

- หัวข้อรอง ระดับที่ 2 ขนาด 14 ตัวเอน กำหนดชิดซ้ายและเลื่อนเข้ามา 0.5 cm

- เนื้อเรื่อง ขนาด 14 ตัวธรรมดา

- ชื่อตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อเหนือตาราง

- หัวข้อในตาราง ขนาด 12 ตัวหนา กำหนดกึ่งกลาง เนื้อหาในตาราง ขนาด 12 ตัวธรรมดา

- ชื่อภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา กำหนดกึ่งกลาง และใส่ชื่อใต้ภาพ

- เนื้อหาในภาพประกอบ ขนาด 12 ตัวธรรมดา

5.6 เอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหาบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข ตามมาตรฐานสากล โดยใช้หมายเลขในเครื่องหมายก้ามปู [] และเรียงลำดับการอ้างอิงตามเนื้อหา โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม ตัวอย่างเช่น by Brown [4], [5]; as mentioned earlier [2], [4]-[7], [9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood *et al.* [7]

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

2. รูปแบบของชื่อหัวข้อใช้รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun New ขนาด 14 ตัวธรรมดา ในเนื้อหาขนาด 12 ตัวธรรมดา
3. การอ้างอิงท้ายบทความ จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และใช้การอ้างอิงตามรูปแบบการอ้างอิง IEEE ซึ่งผู้เขียนสามารถศึกษาวิธีการเขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบที่กำหนดได้ที่ <http://journals.ieeeauthorcenter.ieee.org/wp-content/uploads/sites/7/IEEE-Reference-Guide.pdf> โดยจะต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความอ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง
4. กรณีที่เอกสารที่นำมาอ้างอิงเขียนเป็นภาษาไทยให้เติมคำว่า “(in Thai)” เข้าไปในเอกสารอ้างอิงดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างการแปลเอกสารอ้างอิงภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ

ตัวอย่างที่ 1 การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, (only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year.

[Number] J. K. Author, “Title of chapter in the book,” in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, (only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

Examples:

- [1] V. Rijiravanich, *Work study: principles and case studies*, 4th ed. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2005.
- [1] วันชัย ริจิรวนิช, *การศึกษาการทำงาน: หลักการและกรณีศึกษา*, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงวารสาร (Periodicals)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, “Name of paper,” *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year.

Examples:

- [2] N. Dechampai and K. Sethanan, “An application of lean manufacturing system in the textile of lean manufacturing system in the textile and garment industry case study: Wacoal Kabinburi Co., Ltd,” (in Thai), *MBA-KKU Journal*, vol. 7 no. 2, pp. 13-27, 2014.
- [2] นิวัฒน์ เดชอำไพ และกาญจนา เศรษฐนันท์, “การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชุดชั้นในสตรีโดยประยุกต์ใช้แนวคิดการผลิตแบบลีน,” *วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษากิจการมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 13-27, 2557.

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

ตัวอย่างที่ 3 การอ้างอิงจากการประชุมทางวิชาการ (Conferences and Conference Proceedings)

Basic Format:

[Number] J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City, State, Country, Month and day(s), year, Paper number.

Examples:

- [3] N. Kriengkarakot, P. Kriengkarakot, S. Duan P. Thung, and W. Piromsuk, "Repair work reduction in sewing process of the apparel factory," (in Thai), in *Proc. (10th UBRC) Ubon Ratchathani University National Research Conf.*, Ubon Ratchathani, Thailand, Jul. 7-8, 2016, pp. 87-96.
- [3] นุชสรุา เกรียงกรกฎ, ปรีชา เกรียงกรกฎ, สกาวเดือน พรหมทุ่ง และวิจิตรา ภิรมย์สุข, "งานวิจัยการลดชิ้นส่วนงานซ่อมในขั้นตอนการเย็บของโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป," *การประชุมวิชาการระดับชาติ มอบ. วิจัยครั้งที่ 10*, อุบลราชธานี, ประเทศไทย, 7-8 กรกฎาคม, 2559, หน้า 87-96.

6. วิธีการจัดส่งบทความ

ผู้เขียนส่งบทความออนไลน์ได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal>

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความจะดำเนินการส่งบทความเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความและแจ้งผลการพิจารณาให้ผู้เขียนบทความทราบ สำหรับบทความที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิแล้วจะได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป

หมายเหตุ

1. ตามประกาศสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ฉบับที่ 004/2563 เรื่อง ยกเลิกการตีพิมพ์วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นแบบรูปเล่ม ปี 2563 มีรายละเอียดให้วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ยกเลิกการตีพิมพ์วารสารแบบรูปเล่ม ISSN 2351-0056 (Print) โดยให้เผยแพร่ในรูปแบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ E-ISSN 2672-9989 (Online) เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ให้มีผลตั้งแต่วันที่ 20 มกราคม 2563 เป็นต้นไป

2. ตามประกาศสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ฉบับที่ 005/2563 เรื่อง การเก็บค่าอ่านประเมินค่าอ่านประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น พ.ศ. 2563 มีรายละเอียดให้ยกเลิกประกาศสถาบันฉบับที่ 080/2561 เรื่อง การเก็บค่าธรรมเนียมสมาชิกรายปี ค่าอ่านประเมินบทความวิจัยโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และค่าตีพิมพ์บทความวิชาการลงในวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

โดยกำหนดให้เก็บค่าอ่านประเมินบทความวิจัยโดยผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จากผู้ส่งบทความ เมื่อบทความผ่านการพิจารณาเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการ อัตรา 2,500 บาท ต่อ บทความ 1 เรื่อง ทั้งนี้ให้มีผลตั้งแต่วันที่ 20 มกราคม 2563 เป็นต้นไป

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

“สร้างนักคิด ผลิตนักปฏิบัติ สร้างนักประดิษฐ์ ผลิตนักบริหาร”

คณะวิศวกรรมศาสตร์

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ (Automotive Engineering, B.Eng. : AE)
- หลักสูตรวิศวกรรมการผลิต (Production Engineering, B.Eng. : PE)
- หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (Computer Engineering, B.Eng. : CE)
- หลักสูตรวิศวกรรมอุตสาหกรรม (Industrial Engineering, B.Eng. : IE)
- หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering, B.Eng. : EE)
- International Program (Digital Engineering, B.Eng. : DGE)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม (Engineering Technology, M.Eng. : MET)

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, B.Sc. : IT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีมัลติมีเดีย (Multimedia Technology, B.Sc. : MT)
- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศทางธุรกิจ (Business Information Technology, B.Sc. : BI)
- หลักสูตรเทคโนโลยีดิจิทัลทางสื่อสารมวลชน (Digital Technology in Mass Communication, B.Sc. : DC)
- International Program (Data Science and Analytics, B.Sc. : DSA)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology, M.Sc. : MIT)

คณะบริหารธุรกิจ

หลักสูตรระดับปริญญาตรี

- หลักสูตรการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรมการผลิต (Management of Production Technology and Innovation, B.B.A. : MI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, B.B.A. : BJ)
- หลักสูตรการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ (International Business Management, B.B.A. : IB)
- หลักสูตรการบัญชี (Accountancy, B.Acc. : AC)
- หลักสูตรการจัดการทรัพยากรมนุษย์แบบญี่ปุ่น (Japanese Human Resources Management, B.B.A. : HR)
- หลักสูตรการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (Logistics and Supply Chain Management, B.B.A. : LM)
- หลักสูตรการตลาดเชิงสร้างสรรค์ (Creative Marketing, B.B.A. : CM)
- หลักสูตรการจัดการการท่องเที่ยวและการบริการเชิงนวัตกรรม (Innovative Tourism and Hospitality Management, B.B.A. : TH)
- International Program (International Business Management, B.B.A. : IBM)

หลักสูตรระดับปริญญาโท

- หลักสูตรนวัตกรรมจัดการธุรกิจและอุตสาหกรรม (Innovation of Business and Industrial Management, M.B.A. : MBI)
- หลักสูตรบริหารธุรกิจญี่ปุ่น (Japanese Business Administration, M.B.A. : MBJ)
- หลักสูตรการจัดการระบบการผลิตและโลจิสติกส์แบบลีน (Lean Manufacturing System and Logistics Management, M.B.A. : LMS)

Thai-Nichi Institute of Technology

1771/1 Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand.

Tel : 0-2763-2600 Fax : 0-2763-2700

<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal> e-mail : journaleng@tni.ac.th