



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 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2563

- ☀ A Study of Silk Yarn Dyeing with Natural Dye from Annatto Tree Seeds 1
Patitta Wongsangthain
- ☀ Detection of COVID-19 using Deep Learning with CT Scan Images 8
Tiratana Metkarunchit, Kiarttipum Charoenpojvajara
- ☀ Dimensional Blurring of Large Face Image Based on Structural Similarity 18
Thitiporn Lertrusdachakul, Kasem Thiptarajan, Kanakarn Ruxpaitoon,
Kulwadee Somboonviwat
- ☀ Hybrid Energy Harvesting System Based on Regenerative Braking System 29
and Suspension Energy Harvesting for Middle Electric Vehicle
Kunagone Kiddee
- ☀ Improving the Performance of IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window 39
by Reducing the Wasted Time Slots
Warakorn Srichavengsup, Kanticha Kittipeerachon, Chatree Thongwan
- ☀ Local Maxima Niching Genetic Algorithm Based Automated Water Quality 48
Management System for Betta splendens
Ferdin Joe John Josep, Deepali Nayak, Salinla Chevakidagarn
- ☀ Performance Testing between ZigBee, LoRa and IEEE1888 Networks 64
in Community Energy Management System
Tanakorn Inthasuth, Kritsana Sureeya

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

TNI Journal of Engineering and Technology

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2563 Vol. 8 No. 2 July - December 2020

ISSN (Online) 2672-9989

ความเป็นมา

ด้วยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น มีนโยบายสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ 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.พิชิต สุขเจริญพงษ์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

กองบรรณาธิการ

- | | |
|---|---|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธนารักษ์ อีระมันคง | สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.อดิสร ลีลาสันติธรรม | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 5. รองศาสตราจารย์พูลพร แสงบางปลา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ พงษ์ยุพินพานิช | มหาวิทยาลัยรามคำแหง |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์ | สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |

คณะกรรมการดำเนินงาน

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิ สุขเจริญ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกษม ทิพย์ธาราจันทร์
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อนุญาหงษ์
7. ดร.เอิบ พงษ์หงอ
8. นางสาวสุพิศ บายคายนคม
9. นางสาวจุฑามาศ ประสพสันต์
10. นางสาวรชนี นารินนท์
11. นางสาวพิมพ์รด พิพัฒน์กุล

การติดต่อกองบรรณาธิการ

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

Tel. 0-2763-2600 (ต่อ 2402, 2752)

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

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียน
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใดๆ ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์พูลพร แสงบางปลา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ดาววัลย์ วิวรรณนะเดช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์	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.จันทร์ศิริ สิงห์เลื่อน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ 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.สรรพงศ์ ทานอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์ชะเอียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธุ์บรรยงค์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรภรณ์ อิศัยกุล	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.ภัคพงศ์ จันทเปรมจิตต์	มหาวิทยาลัยบูรพา
Prof. Dr.Michiko Ohkura	Shibaura Institute of Technology, Japan
Dr.Masayuki Fujise	National Institute of Information and Communications Technology, Japan

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อันตรเสน
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์
รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมล แสนอ้อม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ เฉ็ดโฉม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกษม ทิพย์ธาราจันทร์
ดร.สะพรั่งสิทธิ์ มฤทสาธร
ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์
ดร.กัณติชา กิตติพิรัชล
ดร.ดอน แก้วดก
ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

บทบรรณาธิการ

ภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ COVID-19 ที่ยังไม่บรรเทาเบาบางลง แม้จะมีการคิดค้นและเริ่มใช้วัคซีนเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดแล้วก็ตาม แต่อุบัติการณ์ครั้งนี้ได้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจและสังคมอย่างรุนแรงไปทั่วโลก หากมองในอีกมุมหนึ่งอุบัติการณ์ครั้งนี้ทำให้มนุษยชาติได้ตระหนักถึงความสำคัญของการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อการป้องกันและฟื้นฟูประเทศจากโรคภัยชนิดใหม่ที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การวิจัยด้านการแพทย์และสาธารณสุข ด้านการเกษตรและอาหาร ด้านสิ่งแวดล้อมและชุมชน ด้านการผลิตในอุตสาหกรรมและบริการ ด้านการศึกษาและการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ ตลอดจนด้านการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม การวิจัยในด้านต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของประเทศ และจะช่วยฟื้นฟูประเทศให้กลับมาเข้มแข็งได้ในเร็ววัน ทั้งนี้หน่วยงานต่าง ๆ ของภาครัฐและเอกชนได้ให้ความสำคัญโดยการส่งเสริมให้นักวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทำการวิจัยและสร้างนวัตกรรมเพื่อการเพิ่มพูนองค์ความรู้ทางด้านทางเทคโนโลยีระดับสูงและต่อยอดการประยุกต์เทคโนโลยีสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตและบริการเพื่อเป้าหมายการฟื้นฟูและพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนและมีนัย

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการเผยแพร่ผลงานวิจัยและนวัตกรรม ตลอดจนงานสร้างสรรค์ทางวิชาการที่จะเป็นประโยชน์ต่อแวดวงวิชาการและการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ จึงได้จัดทำวารสารฉบับนี้ขึ้นเพื่อเป็นช่องทางสำหรับนักวิจัยและนักวิชาการในการเผยแพร่ผลงานสู่สาธารณะ วารสารฉบับนี้จึงเป็นวารสารสำหรับนักวิจัย นักวิชาการตลอดจนผู้บริหารและผู้ปฏิบัติงานในด้านงานวิศวกรรมและเทคโนโลยี

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น: วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ กองบรรณาธิการยินดีรับพิจารณาทุกบทความจากผลงานวิจัย ที่นำเสนอให้คณะกรรมการกลั่นกรอง ผู้สนใจที่จะร่วมเผยแพร่ผลงาน ความรู้ และประสบการณ์ สามารถศึกษาและจัดเตรียมบทความจากคำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความและนำเสนอบทความได้ที่ กองบรรณาธิการเพื่อเสนอต่อคณะกรรมการกลั่นกรองบทความพิจารณาจัดพิมพ์ในวารสารต่อไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะประโยชน์ต่อนักวิจัย นักวิชาการ นักการศึกษาและผู้ประกอบการธุรกิจทุกภาคส่วน

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์

บรรณาธิการ

สารบัญ

- 1 A Study of Silk Yarn Dyeing with Natural Dye from Annatto Tree Seeds
Patitta Wongsangthain
- 8 Detection of COVID-19 using Deep Learning with CT Scan Images
Triratana Metkarunchit, Kiarttipum Charoenpojvajana
- 18 Dimensional Blurring of Large Face Image Based on Structural Similarity
*Thitiporn Lertrusdachakul, Kasem Thiptarajan, Kanakarn Ruxpaitoon,
Kulwadee Somboonviwat*
- 29 Hybrid Energy Harvesting System Based on Regenerative Braking System and
Suspension Energy Harvesting for Middle Electric Vehicle
Kunagone Kiddee
- 39 Improving the Performance of IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window
by Reducing the Wasted Time Slots
Warakorn Srichavengsup, Kanticha Kittipeerachon, Chatree Thongwan
- 48 Local Maxima Niching Genetic Algorithm Based Automated Water Quality Management
System for Betta splendens
Ferdin Joe John Josep, Deepali Nayak, Salinla Chevakidagarn
- 64 Performance Testing between ZigBee, LoRa and IEEE1888 Networks in Community
Energy Management System
Tanakorn Inthasuth, Kritsana Sureeya

การศึกษาการย้อมสีเส้นไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติจากเมล็ดกาแฟ

ปติตาท วังศ์แสงเทียน

มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสุโขทัย

ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: aoypatitta@gmail.com

รับต้นฉบับ: 6 ตุลาคม 2563; รับบทความแก้ไข: 3 ธันวาคม 2563; ตอบรับบทความ: 14 ธันวาคม 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี ค่าสี ความคงทนของสีต่อการซักและต่อแสง รวมถึงการเปรียบเทียบการย้อมสีในระดับต้นแบบกับการย้อมสีในห้องปฏิบัติการของน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ วิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย การวัดทางเคมี การวัดค่าความยาวคลื่นของสีน้ำย้อม การทดลองย้อมสีเส้นไหมในห้องปฏิบัติการ การวัดค่าค่าเฉลี่ยในระบบ CIELAB การทดสอบความคงทนต่อการซักฟอกและแสง และการเปรียบเทียบสีการย้อมสีต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัย พบว่า น้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟมีความเป็นกรด มีค่า pH เฉลี่ย 4.37 มีสารแทนนิน สารประกอบฟีนอลิก แอนทราควิโนน และฟลาวอนอยด์ เป็นองค์ประกอบ ค่าสีของเส้นไหมหลังการย้อมเป็นสีส้ม-เหลือง โดยมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 73.01-73.53 ซึ่งเกิดจากกรรมวิธีการย้อมด้วย Ca 4% ตามด้วยสารส้ม 0.01 % พร้อมกับน้ำย้อมสี ส่วนค่าสีแดง - เขียว (a^*) อยู่ระหว่าง 31.80-32.17 เป็นช่วงสีแดงมากที่สุด เกิดจากกรรมวิธีการย้อมด้วย Ca 1% ตามด้วยสารส้ม 0.05% ตามด้วยน้ำย้อมสี และค่าสีเหลือง - น้ำเงิน (b^*) อยู่ระหว่าง 63.92-64.64 เป็นช่วงสีเหลืองมากที่สุด เกิดจากกรรมวิธีการย้อม Ca 1% ตามด้วยสารส้ม 0.025 % ตามด้วยน้ำย้อมสี ซึ่งสีของเส้นไหมจะมีความคงทนต่อการซักส่วนใหญ่อยู่ในระดับดี แต่ความคงทนต่อแสงอยู่ในระดับพอใช้ค่อนข้างดี และค่าสีที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบไม่แตกต่างจากการย้อมสีในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ : สีย้อมธรรมชาติ เมล็ดกาแฟ การย้อมเส้นไหม



A Study of Silk Yarn Dyeing with Natural Dye from Annatto Tree Seeds

Patitta Wongsangthain

Thailand National Sports University Sukhothai Campus

Corresponding Author. E-mail address: aoypatitta@gmail.com

Received: 6 October 2020; Revised: 3 December 2020; Accepted: 14 December 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

The purposes of this study were to investigate chemical properties, colour properties, colour fastness to washing and light as well as the comparing silk yarn dyeing from annatto seed extract with laboratory process. The research process included chemical measurement, wavelength measurement of the extract, silk yarn dyeing in the laboratory, color shades measurement with CIELAB, the test of color fastness to washing and light, and the color comparing between dyeing in the model and in the laboratory. Findings indicate that annatto seed extract was acid as its average pH 4.37 and composed of tannin, a phenolic compound, structured as disubstituted hydroxy aromatic (o – para hydroxyl aromatic) and anthraquinone, as a flavonoid compound. The color of the silk yarn after dyeing with annatto seed extract was orange – yellow with brightness (L^*) was between 73.01 and 73.53 as the result of dyeing with Ca 4%, Alum 0.01% and the annatto seed extract. The red – green (a^*) was between 31.80 and 32.17 and most of which was red as the result of dyeing with Ca1%, Alum 0.05% and the annatto seed extract. The yellow- blue (b^*) was between 63.92 and 64.64 and most of which was yellow as the result of dyeing with Ca 1%, Alum 0.025%, and annatto seed extract. The colour fastness to washing of the dyed silk yarn was good meanwhile the colour fastness to light was between fair and good. The colour properties of dyeing in the model was not different from one in the laboratory.

Keywords: natural dye, annatto seeds, silk yarn dyeing

1) บทนำ

คำแสด (Bixa Orellana Linn.) เป็นไม้พุ่มกึ่งไม้ยืนต้นขนาดเล็ก มีผลสีแดงคล้ายลูกเงาะ มีเมล็ดสีแดง เนื้อเยื่อหุ้มเมล็ดจะมีสาร Bixin ($C_{25}H_{30}O_4$) สีแสดสด และสาร Bixol ($C_{18}H_{30}O$) สีเขียวเข้ม [1] สีที่ได้จากเมล็ดคำแสดใช้แต่งสีอาหารและใช้ย้อมผ้าให้มีสีแดงส้ม สารที่อยู่ในเมล็ดคำแสด เรียกว่า แอนแนตโต (Annatto) การสกัดแอนแนตโตจากเมล็ดคำแสดนั้น สามารถทำได้โดยใช้ตัวทำละลายหรือน้ำมันพืชก็ได้ สารสกัดแอนแนตโตแบ่งออกเป็น 6 ชนิด คือ Annatto B, C, D, E, F และ G ตามการใช้ตัวทำละลายและปริมาณของสารสี (pigment) 2 ชนิด คือ bixin และ norbixin เช่น นำ Annatto B มาสกัดเมล็ดคำแสดด้วยตัวทำละลาย โดยมีสารสีร้อยละ 92 จะประกอบด้วย bixin และ norbixin 97% และ 1.7% ตามลำดับ และ Annatto D สกัดโดยใช้น้ำมันพืช ประกอบด้วยสารสี 10.8% โดยเป็น bixin 94% เป็นต้น [2]

เส้นไหมเป็นเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ ประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ ไฟโบรอิน (Fibroin, $C_{15}H_{26}N_6O_6$) โครงสร้างของเส้นใยไหมมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอไมด์จะมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยไหมกับอีพอกซีเรซินผ่านทางพันธะไฮโดรเจน [3] ซึ่งความแข็งแรงในการยึดติดที่ผิวสัมผัสจะทำให้ย้อมติดสีได้ดีแต่มีปัญหาเรื่องความคงทนของสีต่อการซักล้างและแสงแดด จึงต้องทำการย้อมโดยใช้สารช่วยติดสีที่เรียกว่า mordant ซึ่งเป็นไฮดรอกไซด์หรือ basic salt ของ อลูมิเนียม เหล็ก หรือ โครเมียม ทั้งนี้ mordant ที่ใช้มักให้อยู่ในรูป เกลืออะซิเตตหรือเกลือฟอร์เมตที่ละลายน้ำได้แล้วจึงผ่านไอน้ำเข้าไปไฮโดรไลซิสให้เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับสีย้อม จะได้สารที่เรียกว่า lake ซึ่งไม่ละลายน้ำทำให้สีมีความคงทนต่อการซักล้างและแสงแดด [4]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ วิจัยจึงได้ศึกษาการย้อมสีเส้นไหมด้วยสีย้อมธรรมชาติจากเมล็ดคำแสด เพื่อเป็นการพัฒนาสีย้อมผ้าจากธรรมชาติและเป็นต้นแบบเผยแพร่ให้แก่ชุมชนต่อไป

2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด
2. เพื่อศึกษาค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด

3. เพื่อศึกษาความคงทนของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด

4. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสีการย้อมต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ

3) วิธีการวิจัย (Methods)

3.1) การศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำย้อมสีจากเมล็ดคำแสด มีวิธีการดังต่อไปนี้

3.1.1) การเตรียมน้ำย้อมสีด้วยการใช้เอทานอลเป็นตัวสกัด

โดยการนำเมล็ดคำแสด 1 กิโลกรัม แช่ใน 20% เอทานอล จำนวน 10 ลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ขยี้เมล็ดคำแสดที่แช่น้ำไว้ เพื่อให้ผงสีออกจากเมล็ดให้หมด แล้วนำไปต้มสารผสมที่ได้ให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (คอยเติม 35% เอทานอลให้อยู่ในระดับเท่าเดิมเสมอ) ตั้งทิ้งไว้จนสารเย็น กรองสารผสมด้วยผ้าขาวบางเพื่อเอากากออกได้เป็นน้ำย้อมสี แล้วเก็บน้ำย้อมในขวดสีชาเพื่อไว้ใช้ต่อไป

3.1.2) การศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำย้อมสี

โดยวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่า pH) ของน้ำย้อมด้วยเครื่องวัด pH และได้ทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ดังนี้

3.1.2.1) การตรวจหาแทนนิน โดยวิธี ferric chloride test ด้วยการนำน้ำย้อมสีที่ได้หยดด้วยสารละลาย ferric chloride ลงไป เกิดสีเขียวเข้ม ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลง

3.1.2.2) การตรวจหาสารประกอบฟีนอลิก โดยวิธี sodium tungstate test โดยการนำน้ำย้อมสี เดิม 10% sodium tungstate ให้สีน้ำตาลดำ มีตะกอน เดิม 0.5 M hydrochloric acid ให้สีน้ำตาลดำ เดิม 5% NaOH ให้สีน้ำตาล ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที เดิม 0.5 M NaOH ให้สีน้ำตาลดำ ตั้งทิ้งไว้ สังเกตการเกิดตะกอนและสีของส่วนที่ใส

3.1.2.3) การตรวจหาสาร ด้วยวิธี Borntrager reaction โดยการนำน้ำย้อมสีหยดด้วยสารละลาย 5% NaOH สังเกตการเปลี่ยนแปลง [5]

3.1.3) การวัดค่าความยาวคลื่นที่น้ำย้อมดูดกลืนแสงมากที่สุดด้วยเครื่องยูวี/วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.2) การย้อมเส้นไหมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟและการใช้สารส้มเป็นมอร์แดนต์ ประกอบด้วย วิธีการดังต่อไปนี้

3.2.1) การลอกกาวยเส้นไหม เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะเคลือบเส้นไหม โดยการผสมสบู่ซันไลต์ที่หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ กับผงโซเดียมคาร์บอเนตในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำตามอัตราส่วน แล้วต้มสารผสมบนเตาไฟฟ้าจนได้สารละลายที่ใส (น้ำยาลอกกาวไหม) ต้มเส้นไหมในน้ำยาลอกกาว อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 – 3 ชั่วโมง นำเส้นไหมขึ้นจากน้ำยาลอกกาว ล้างในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.1% ที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส (เปลี่ยนสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตทุกครั้ง) นำเส้นไหมมาล้างในน้ำสะอาด 3 – 4 ครั้ง และนำเส้นไหมขึ้นมาบิด สกัด กระจกตุก แล้วตากในที่ร่ม หรือผึ่งลมให้แห้ง [6]

3.2.2) การย้อมสีเส้นไหม ทำการย้อม 4 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 การย้อมโดยไม่ใช้สารมอร์แดนต์ โดยนำเส้นไหมที่ปรับสภาพด้วยสารละลายแคลเซียม ไฮดรอกไซด์แล้ว 1 กรัม ต้มในน้ำย้อมสีปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง พร้อมกับคนอย่างสม่ำเสมอ และพลิกเส้นไหมบ่อย ๆ เพื่อให้สีกระจายตัวได้ดีและแทรกซึมเข้าสู่เส้นไหมอย่างสม่ำเสมอ ป้องกันไม่ให้เกิดรอยต่างในการย้อม สีของเส้นไหมขึ้นจากน้ำย้อมสีที่ถูกอากาศแล้วบิดเอาน้ำออกและกระจกตุกเส้นไหม 2 – 3 ครั้ง เอาเส้นไหมดังกล่าวใส่ลงในน้ำสีเดิม แล้วต้ม จนได้เวลารวมทั้งหมด 1 ชั่วโมง แล้วนำเส้นไหมออกมา ผึ่งให้เย็นใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหมักทิ้งไว้ 1 คืน บิดให้หมาด แล้วตากให้แห้งในที่ร่ม แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จนน้ำที่ล้างออกมาใส แล้วกระจกตุกเส้นไหม 2 – 3 ครั้ง แล้วตากในที่ร่มให้แห้ง

วิธีที่ 2 การย้อมโดยย้อมมอร์แดนต์ก่อนการย้อมน้ำสี โดยการละลายสารส้มที่เป็นมอร์แดนต์ ด้วยความเข้มข้นร้อยละ 0.01, 0.025 และ 0.05 ตามที่กำหนด อุณหภูมิ 50 - 65 องศาเซลเซียส แล้วใส่เส้นไหมที่ปรับสภาพแล้วลงไปด้วยอัตราส่วนน้ำหนักเส้นไหม 1 กรัม ต่อสารละลายสารส้ม 10 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนต่อไปที่อุณหภูมิเดิมเป็นเวลานาน 30 นาที แล้วนำเส้นไหมขึ้นบิดพอหมาดนำน้ำย้อมสีให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส แล้วใส่เส้นไหมที่ย้อมมอร์แดนต์ไว้แล้วลงย้อมต่อไปนาน 1 ชั่วโมง แล้วนำเส้นไหมออกมาผึ่งให้เย็นใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหมักทิ้งไว้ 1 คืน บิดให้หมาด แล้วตากให้แห้งในที่ร่ม แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จนน้ำที่ล้างออกมาใสแล้วกระจกตุกเส้นไหม 2 – 3 ครั้ง แล้วตากในที่ร่มให้แห้ง

วิธีที่ 3 การย้อมโดยย้อมมอร์แดนต์พร้อมกับการย้อมน้ำสี โดยการละลายสารส้มด้วยความเข้มข้นร้อยละ 0.01, 0.025 และ 0.05 ตามที่กำหนดลงในน้ำย้อมสีแล้วให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส แล้วใส่เส้นไหมที่เตรียมไว้ลงย้อม เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วนำเส้นไหมออกมาผึ่งให้เย็นใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหมักทิ้งไว้ 1 คืน บิดให้หมาด แล้วตากให้แห้งในที่ร่ม ล้างด้วยน้ำสะอาดจนน้ำที่ล้างออกมาใสแล้วกระจกตุกเส้นไหม 2 – 3 ครั้ง แล้วตากในที่ร่มให้แห้ง

วิธีที่ 4 การย้อมโดยย้อมมอร์แดนต์หลังการย้อมน้ำสี โดยต้มเส้นไหมในน้ำย้อมสีที่ อุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วนำเส้นไหมที่ย้อมสีไว้แล้วต้มในสารละลายมอร์แดนต์ตามความเข้มข้นที่กำหนด คือ ร้อยละ 0.01, 0.025 และ 0.05 ที่อุณหภูมิ 50 - 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที แล้วนำเส้นไหมออกมาผึ่งให้เย็นใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงหมักทิ้งไว้ 1 คืน บิดให้หมาดแล้วตากให้แห้งในที่ร่ม แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดจนน้ำที่ล้างออกมาใสแล้วกระจกตุกเส้นไหม 2 – 3 ครั้ง แล้วตากในที่ร่มให้แห้ง

จากการย้อมสีเส้นไหมทั้ง 4 วิธี จะได้ตัวอย่าง 50 ตัวอย่าง แบ่งได้ดังนี้ การย้อมโดยไม่ใช้มอร์แดนต์ 5 ตัวอย่าง และการย้อมโดยใช้มอร์แดนต์ 45 ตัวอย่าง [7]

3.3) การศึกษาค่าสีของเส้นไหมหลังการย้อม

โดยนำเส้นไหมที่ย้อมและตากให้แห้งแล้วทุกตัวอย่างวัดหาค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยเครื่องวัดสีใช้โหมต Color plot D65/10° ได้ค่า L*, a*, b*

3.4) การศึกษาความคงทนของสีเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

โดยทำการทดสอบความคงทนต่อแสงด้วยวิธีการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ด้วยการทดสอบความคงทนต่อแสง (แสงซินอนอาร์ก) โดยวิธี ISO - 105 - B02: 1994 และทำการทดสอบความคงทนต่อซักด้วยวิธีการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมการทดสอบความคงทนต่อการซักฟอก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยวิธี ISO - 105 - C01: 1989 [8]

3.5) การศึกษาเปรียบเทียบสีการย้อมต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ

โดยการคัดเลือกตัวอย่างเส้นไหมที่ย้อมด้วยจากสีย้อมธรรมชาติจากเมล็ดกาแฟที่ดีที่สุด 1 ตัวอย่าง นำไปต้นแบบในการย้อมย้อมในระดับต้นแบบ โดยทำการย้อมสีด้วยวิธีการตามตัวอย่าง 4 อันดับแรก และทำการเปรียบเทียบกับสีที่ได้จากห้องปฏิบัติการ [9]

4) ผลการวิจัย

4.1) ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำย้อมสีเมล็ดกาแฟ

การทำวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

4.1.1) ค่าความเป็นกรด - เบสของน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ 1 ความเป็นกรด - เบสของน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

จำนวนครั้ง	อุณหภูมิ (°C)	ค่า pH	ความเป็นกรด - เบส
1	29.5	4.39	กรด
2	29.8	4.36	กรด
3	29.7	4.37	กรด
เฉลี่ย		4.37	กรด

น้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟมีความเป็นกรด และมีค่า pH เฉลี่ย 4.37

4.1.2) การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ จากการตรวจหาแทนนิน สารประกอบฟีนอลิก แอนทราควิโนน และเฟลโวนอยด์ ในน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพจากการตรวจหาแทนนิน สารประกอบฟีนอลิก แอนทราควิโนน และเฟลโวนอยด์ ในน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

สารเคมีที่ตรวจหา	น้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ		
	การตรวจ	ผลการทดลอง	แสดงถึง
แทนนิน	หยดสารละลาย ferric chloride	สีเขียวเข้ม แล้วเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มออกดำ	มีแทนนิน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพจากการตรวจหาแทนนิน สารประกอบฟีนอลิก แอนทราควิโนน และเฟลโวนอยด์ ในน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ (ต่อ)

สารเคมีที่ตรวจหา	น้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ		
	การตรวจ	ผลการทดลอง	แสดงถึง
สารประกอบฟีนอลิก	น้ำย้อมสี	สีแดงเข้ม	มีองค์ประกอบที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงอะโรมาติกที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่อยู่ติดกันบนวงอะโรมาติก คือ เป็นสารฟีนอลิก
	เติมด้วย 10% Na ₂ WO ₄	สีน้ำตาลดำ	
	เติมด้วย 0.5 M HCl	สีน้ำตาลดำ	
	เติมด้วย 5%NaOH	สีน้ำตาล	
	ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที แล้วเติม 0.5 M NaOH	สีแดงเข้ม	
สารแอนทราควิโนนและเฟลโวนอยด์	เติมด้วยสารละลาย 5% NaOH	สารละลายสีแดงและมีสารละลายที่มีสีเหลือง	มีแอนทราควิโนน และมีเฟลโวนอยด์เป็นองค์ประกอบ

สีน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟมีสารแทนนินที่มีโครงสร้างเป็น disubstituted hydroxy aromatic (o - para hydroxyl aromatic) ซึ่งจัดเป็นสารฟีนอลิก และมีแอนทราควิโนน โดยมีเฟลโวนอยด์เป็นองค์ประกอบ

4.2) ผลการศึกษาค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาค่าสีของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

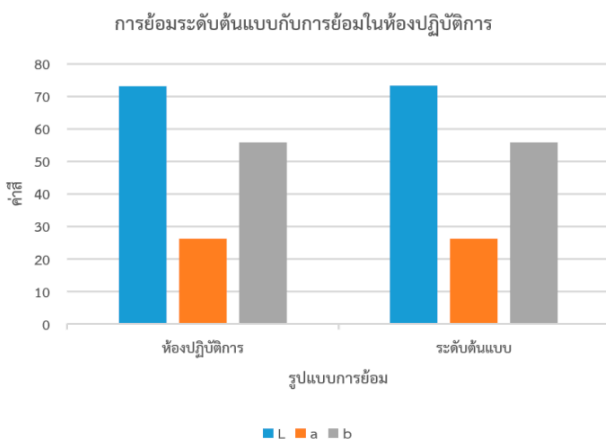
อัตราส่วนของสารช่วยติดสีและลำดับการย้อม	ค่าสี				
	ค่าสี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
Ca 4% ตามด้วยสารส้ม 0.01% พร้อมกับน้ำย้อมสี	L*	73.01	73.70	73.53	73.41
	a*	25.62	25.27	25.40	25.43
	b*	57.82	57.70	57.42	57.65
Ca 1% ตามด้วยสารส้ม 0.05 % ตามด้วยน้ำย้อมสี	L*	68.94	68.25	68.41	68.53
	a*	31.80	32.17	32.10	32.02
	b*	64.29	63.90	64.17	64.12
Ca 1% ตามด้วยสารส้ม 0.025 % ตามด้วยน้ำย้อมสี	L*	69.07	69.08	69.00	69.05
	a*	31.48	31.49	31.55	31.51
	b*	63.94	63.92	64.64	64.17

ค่าสีเส้นไหมย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟที่ได้มีความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 73.01-73.53 ซึ่งตัวอย่างที่มีความสว่างมากที่สุด ค่าสีแดง - เขียว (a^*) อยู่ระหว่าง 31.80-32.17 เป็นช่วงสีแดง และค่าสีเหลือง - น้ำเงิน (b^*) อยู่ระหว่าง 63.92-64.64 เป็นช่วงสีเหลือง จากการที่ค่าสีเป็นสีผสมของสีแดงกับสีเหลืองทำให้สีของเส้นไหมทั้งหมดมีสีส้ม-เหลือง

4.3) ความคงทนของเส้นไหมที่ย้อมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟ

เส้นไหมที่ทำการย้อมด้วยวิธีใช้ Ca 4% ตามด้วยน้ำย้อมสีตามด้วยสารส้ม 0.01% การย้อมด้วยวิธีนี้จะทำให้ค่าความคงทนของสีอยู่ในระดับ 4 (ดี) มีสีเบื่อนติดเส้นไหมค่อนข้างมาก (2) เส้นไหมจะติดเซลลูโลสจากซึเตดอยู่ในระดับ 5 (ดี) คุณภาพความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในระดับ 3 (พอใช้)

4.4) การเปรียบเทียบย้อมสีในระดับต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1 การย้อมระดับต้นแบบกับการย้อมในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า แท่งกราฟของ ค่า L a^* และ b^* ในห้องปฏิบัติการกับระดับต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่า ค่าสีที่ได้จากการย้อมในระดับต้นแบบไม่แตกต่างจากการย้อมสีในห้องปฏิบัติการ

5) สรุป

น้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟเป็นสารแทนนิน จัดเป็นสารฟีนอลิกและมีแอนทราควิโนน โดยมีเฟลโวนอยด์เป็นองค์ประกอบ การย้อมสีเส้นไหมด้วยน้ำย้อมสีจากเมล็ดกาแฟด้วยการใช้ Ca และสารส้ม เป็นสารช่วยทำให้สีจากเมล็ดกาแฟติดกับเส้นไหมได้ดีขึ้น วิธีการย้อมสีของเส้นไหมที่ดีที่สุด คือ การย้อมด้วยวิธีใช้ Ca 4% ตามด้วยน้ำย้อมสี แล้วตามด้วยสารส้ม 0.01% นำเส้นไหมมาวัดค่าสีในระบบ CIELAB พบว่า ค่าสีของเส้นไหมมีความสว่าง (L^*) อยู่ระหว่าง 73.01-73.53 ค่าสีแดง - เขียว (a^*) อยู่ระหว่าง 31.80-32.17 เป็นช่วงสีแดง และค่าสีเหลือง - น้ำเงิน (b^*) อยู่ระหว่าง 63.92-64.64 เป็นช่วงสีเหลือง สีของเส้นไหมทั้งหมดมีสีส้ม-เหลือง สีของเส้นไหมมีค่าความคงทนของสีอยู่ในระดับดี ค่าความคงทนต่อแสงอยู่ในระดับพอใช้ และสีย้อมที่ได้จากระดับต้นแบบไม่แตกต่างกับสีย้อมในห้องปฏิบัติการ

6) ข้อเสนอแนะ

ควรมีการพัฒนาการย้อมสีธรรมชาติจากเมล็ดกาแฟให้มีความคงทนต่อแสงให้มากขึ้น เพื่อจะได้นำน้ำย้อมสีธรรมชาติจากเมล็ดกาแฟไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอแทนการใช้สีย้อมที่ได้จากสารเคมี และควรศึกษาวิธีการเก็บรักษาน้ำย้อมจากเมล็ดกาแฟให้อยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้งาน เพื่อพัฒนาสู่การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

REFERENCES

- [1] P. Supcharoen, N. Rueng-rangsri, and K. Deewisej, *Herbal plants in national parks in central Thailand*. Nonthaburi, Thailand: Thai Traditional Medicine Development Foundation Press (in Thai), 2016.
- [2] N. Meiphan, S. Rattanadilok, and S. Khunadilok, "Dyeing silk fabric with natural dye from *Kaempferia Parviflora* Wall. ex. Baker Rhizomes," (in Thai), *Journal of Home Economics*, vol. 59, no. 2, pp. 26-35, 2016.
- [3] W. Sutaphan, N. Supakan, and Y. Raksakulpiwat, "Study of using Silk as a continuous fiber for reinforcing epoxy composite," (in Thai), School of Polymer Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, Rep. SUT-7-710-51-24-33, 2012.

- [4] P. Pimpraporn, "A Study of effects of various mordants added to the dye extracted from *litsea glutinosa* (Lour.) Leaves on color shades of dyeing silk thread through exhaustion dyeing process," (in Thai), M. Eng. thesis, Department of Textile Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 2015.
- [5] R. Chochai, P. Chochai, and M. Taweepol, "The cotton yarn natural dyeing with dyes from red cotton bark for small scale industry," (in Thai), Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet, Thailand, Rep. 20191212095948, 2010.
- [6] *Good practices for degumming and dyeing silk yarn*, Thai Agricultural Standard TAS 8204-2018, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://www.acfs.go.th/standard/download/GMP-DEGUMMING-AND-DYEING-SILK-YARN.pdf>.
- [7] M. Kumaresan, N. Palanisamy, and P. Kumar, "Application of ecofriendly natural dye on silk using combination of mordants," (in Thai), *International Journal of Chemistry Research*, vol. 2, no. 1, pp. 11-14, 2011.
- [8] N. Yosyingyong, *Improvement of color fastness and shades cotton fabric dyed with natural dye*. Bangkok, Thailand: Rajamangala University of Technology Krungthep, (in Thai), 2014.
- [9] R. Chochai and P. Chochai, "A Study of Nano Zinc Oxide Using for the Cotton Yarn Dyeing from the Natural Dyes," (in Thai), *The Golden Teah: Science and Technology Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 59-70, 2017.

การตรวจหา COVID-19 โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกกับภาพซีทีสแกน

ตรีรัตน์ เมตต์การุณจิต^{1*} เกียรติภูมิ เจริญพจน์วจนะ²

^{1*}สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

²บริษัทอาทอริจำกัด, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : triratana@tni.ac.th

รับต้นฉบับ: 13 พฤศจิกายน 2563; รับบทความฉบับแก้ไข: 1 ธันวาคม 2563; ตอรับบทความ: 15 ธันวาคม 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การตรวจหาผู้ที่คาดว่าจะเป็น “ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่” หรือ COVID-19 นั้นมีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างมาก เนื่องจากการแพร่ระบาดของยัคคงดำเนินอยู่ต่อเนื่องและรุนแรงในหลายประเทศ การตรวจคัดกรองโรคที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการตรวจสารพันธุกรรมของไวรัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ ปฏิกรียาลูกโซ่พอลิเมอเรสแบบย้อนกลับ (reverse transcription - polymerase chain reaction : RT-PCR) ไม่นานมานี้ได้เริ่มมีการวินิจฉัยโรค COVID-19 ด้วยภาพรังสีเอกซ์ทรวงอก (chest X-rays) เป็นวิธีที่ง่ายกว่าและมีความสำคัญในสถานการณ์แบบนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้ร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) ที่มีกรารู้จำและจำแนกภาพ โดยสามารถตรวจจับความผิดปกติของเนื้อเยื่อปอด (lung parenchyma) ที่เป็นลายเซ็นเฉพาะของไวรัส COVID-19 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ หน้ากากแยกบริเวณคอนโวลูชันโครงข่ายประสาทเทียม (mask region-based convolutional neural networks : Mask RCNN) แยกส่วนบริเวณเนื้อเยื่อที่ได้รับผลกระทบจากไวรัส จากภาพถ่ายรังสีส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ (computed tomography : CT) ทรวงอก การทำนายบริเวณเนื้อเยื่อปอดที่ได้รับความเสียหาย จะช่วยให้แพทย์จำแนกสภาพของผู้ป่วยได้ว่ามีอาการ “ไม่รุนแรง” หรือ “น่ากลัว” ได้ง่ายขึ้น จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ประมวลผลบนกูเกิ้ลคลาวด์แพลตฟอร์ม (google cloud platform) แบบจำลองนี้ได้คะแนน F1 เท่ากับ 89% และมีค่าเฉลี่ยความเร็วในการอนุมานอยู่ที่ 9.71 วินาที

คำสำคัญ : ไวรัสโคโรนา 2019 การเรียนรู้เชิงลึก การแบ่งส่วนภาพ ส่วนตัดอาศัยคอมพิวเตอร์ ทรวงอก

Detection of COVID-19 using Deep Learning with CT Scan Images

Triratana Metkarunchit^{1*} Kiarttipum Charoenpojvajana²

¹*Faculty of Information Technology, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

²*Atory Company Limited, Bangkok, Thailand*

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

Received: 13 November 2020; Revised: 1 December 2020; Accepted: 15 December 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

The demand of testing the potential infected patient of “new corona virus” or COVID-19 has been enormously increased as the virus is still continuously and immensely spread in many countries. The popular method of testing is to analyze the genetic material of the virus with reverse transcription - polymerase chain reaction (RT-PCR). Recently, the chest x-rays have been introduced to diagnose the infection as it is considered to be easier and crucial method in this circumstance, especially when combine with a deep learning that can recognize and detect the abnormality of lung parenchyma, in which considered to be the signature of COVID-19 effectively. The purpose of this article is to adapt the mask region-based convolutional neural networks (Mask RCNN) to segment the regions that had been affected by the virus by using computed tomography (CT) scan on the chest. The prediction of the tissues regions that have been damaged will help the medical team to classify if the patients are in ‘mild’ or ‘danger’ situation easier. From the model test result processed on google cloud platform, this model F1 scores equivalent to 89% and has the average of speed inference at 9.71 second.

Keywords: coronavirus 2019, deep learning, image segmentation, chest computed tomography.

1) บทนำ

ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่หรือโควิด - 19 (COVID-19) ระบาดทั่วโลกอย่างรวดเร็ว โดยแพร่เชื้อไปแล้วมากกว่า 50 ล้านคน [1] ไวรัสดังกล่าวได้รับการประกาศว่าเป็นโรคระบาดในเดือนมีนาคม 2020 โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) เนื่องจากอัตราการแพร่เชื้อที่รวดเร็วของผู้คนทั่วโลก ทำทั้งโลกหยุดนิ่ง และส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันสุขภาพของประชาชน รวมถึงกิจกรรมทางเศรษฐกิจ สังคมและการค้าโลก ปัจจุบันยังไม่มีวิธีการรักษาที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นสิ่งสำคัญคือความจำเป็นเร่งด่วนในการตรวจหาผู้ที่ติดเชื้อไวรัสให้เร็วที่สุด และรักษาผู้ป่วยทันที เพื่อชะลอการแพร่กระจายโรคระบาดร้ายแรงนี้

การเพิ่มพูนความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ COVID-19 ที่ได้จากทั่วโลกเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะให้เข้าใจถึง กลไกการติดเชื้อ และรูปแบบการกระจายของเนื้อเยื่อปอดที่เสียหาย ไม่เพียงแต่เพื่อการตรวจหาหรือการวินิจฉัยโรค แต่ยังสามารถสนับสนุนการออกแบบหาวิธีการบำบัดรักษาได้อีกด้วย ทั้งนี้ผู้เชี่ยวชาญทางการแพทย์ นักไวรัสวิทยา นักชีววิทยา นักวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence : AI) และนักวิจัยทางวิชาการจากทั่วโลก กำลังร่วมกันหาวิธีการรักษาไวรัสสมรณะนี้ การทดลองทางคลินิกสำหรับวัคซีนต่าง ๆ และการเฝ้าระวังรักษาทางคลินิกก็กำลังดำเนินการอยู่

สิ่งที่ดำเนินการควบคู่ไปกับความพยายามทั้งหมดนั้น คือการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ จำลองวิธีการพื้นฐานทางการแพทย์ร่วมกับภาพถ่ายรังสีเอกซ์ (X-Ray) ปอด และภาพสแกนตัดต่อด้วยคอมพิวเตอร์ (computed tomography : CT) หรือที่เรียกว่า ซีทีสแกน พร้อมกับวิธีทางคลินิกพยาธิวิทยา และพารามิเตอร์จีโนม มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาทดสอบ และนำมาปรับใช้เป็นชุดเครื่องมือเสริมทางคลินิกและชีววิทยา เพื่อการวินิจฉัยเพิ่มเติม ทั้งนี้แอปพลิเคชันและเครื่องมือดังกล่าว จะช่วยแพทย์ในการประเมินและคัดแยกผู้ป่วย รวมถึงการสอบสวนทางคลินิกและการวินิจฉัยโรคได้ด้วย

ไม่นานมานี้มีงานวิจัย [2]-[3] ได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพทางรังสีวิทยา ทำให้เห็นถึงคุณลักษณะและจุดเด่นเกี่ยวกับไวรัสโคโรนา COVID-19 ที่มีผลกระทบกับเนื้อเยื่อปอดในภาพ ทั้งนี้การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมและเทคนิค AI ขั้นสูง ควบคู่ไปกับภาพถ่ายรังสีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจจับผู้ติดเชื้อไวรัส ที่สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้เทคโนโลยี

AI นั้นมีศักยภาพในการแก้ปัญหาด้านบุคลากรทางการแพทย์หรือผู้เชี่ยวชาญที่มีไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลและพื้นที่ขาดแคลนบุคลากรทางการแพทย์ได้ [4]

ไวรัส COVID-19 ที่แพร่กระจายไปยัง 216 ประเทศทั่วโลก ทำให้ให้รัฐบาลประเทศต่าง ๆ ได้ใช้มาตรการต่าง ๆ เพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของไวรัสสมรณะ เช่น เคอร์ฟิวส์ ปิดเมือง ปิดประเทศ (lock-downs) และมาตรการเว้นระยะห่างทางกายภาพกับบุคคลอื่น ๆ ในสังคม (social distancing) ในตอนนี้วิธีการเดียวที่จะต่อสู้กับไวรัสสมรณะนี้ คือการคัดกรองผู้ที่มีไข้และแสดงอาการของ COVID-19 ออกมาในขั้นต้น โดยจะถูกแยกตัวออกเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของไวรัส วิธีการคัดกรองที่ทั่วโลกนิยมใช้ในการทดสอบหาผู้ติดเชื้อไวรัสนี้คือ ปฏิกริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสแบบย้อนกลับ (reverse transcription - polymerase chain reaction : RT-PCR) โดยตรวจหาไวรัส COVID-19 จากตัวอย่างในระบบทางเดินหายใจมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วตามมาตรฐานในปัจจุบัน จะใช้เวลาในการตรวจหาประมาณ 20 นาที แต่ก็ยังมีข้อจำกัดกับจำนวนการทดสอบภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อเร็ว ๆ นี้ มีการศึกษาวิจัย [5] พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับการวินิจฉัยว่าเป็น COVID-19 และรักษาหายแล้ว ก่อนออกจากโรงพยาบาลได้ซีทีสแกนบริเวณทรวงอก พบว่า 94 เปอร์เซ็นต์ มีความผิดปกติของปอดเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ จึงจำเป็นต้องติดตามผู้ป่วยเพื่อป้องกัน หรือชะลอการแพร่กระจายของเชื้อ นอกจากนี้ยังได้ติดตามผู้ป่วยในระยะยาว เพื่อวิเคราะห์ผลการตรวจภาพซีทีสแกน แบบต่อเนื่อง ในช่วงเวลา 16 มกราคมถึง 17 กุมภาพันธ์ 2563 กับผู้ป่วยที่ติดเชื้อปอดอักเสบ COVID-19 ได้รับการลงทะเบียนและติดตามผล โดยนักรังสีวิทยาได้ตรวจสอบภาพ ซีทีสแกน 366 ภาพ เพื่อวิเคราะห์หาคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงชั่วคราว และพบว่ามีความผิดปกติปรากฏขึ้น ในภาพซีทีสแกน และได้ขยายขอบเขตไปอย่างรวดเร็ว หลังจากเริ่มมีอาการป่วย โดยมีจุดสูงสุดในช่วงวันที่ 6-11 ทั้งนี้รูปแบบของอาการความผิดปกติที่โดดเด่นคือ มีรอยทึบแบบกระจกฝ้า (ground-glass opacity : GGO) บริเวณปอด จากผลซีทีสแกน พบว่ามีผู้ป่วยมากถึง 62 เปอร์เซ็นต์ แสดงอาการและปรากฏ GGO ภายใน 5 วันหลังจากเริ่มมีอาการป่วย

การประเมินด้วยภาพรังสีช่วยให้ผลลัพธ์เร็วขึ้น ที่ช่วยเสริมการทดสอบแบบ RT-PCR ได้อย่างดี อย่างไรก็ตามในหลายประเทศที่กำลังพัฒนา ยังขาดความพร้อมด้านของแพทย์

ผู้เชี่ยวชาญที่สามารถตีความภาพรังสีได้ ถึงแม้ว่า RT-PCR จะเป็นการตรวจมาตรฐานสูงสุด (gold standard) ของโรค COVID-19 อย่างไรก็ตามยังมีข้อกังวลเกี่ยวกับ อัตราการตรวจไม่พบเชื้อที่ผิดพลาด หรืออัตราผลลบเท็จ (false negative rate) มีค่าสูง [6] ฉะนั้นวิธีที่ดีในการคัดกรองโรคนี้อาจต้องอาศัยการทดสอบในหลายรูปแบบประกอบกัน เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำที่สุด อย่างไรก็ตามงานวิจัยล่าสุด [5] รายงานว่าผู้ป่วยจำนวนมาก มีรอยทึบแบบกระจกฝ้า GGO โดยมีการวินิจฉัยผู้ป่วยจำนวน 1,014 ราย กับภาพซีทีสแกนทรวงอก พบว่ามีความแม่นยำ (accuracy) ประมาณ 68% และความไว (sensitivity) หรืออัตราผลบวกจริง (true positive rate) สำหรับภาวะนั้น ๆ อยู่ที่ 97% นอกจากนี้ก็วิจัยใน [7] ได้ศึกษาผู้ป่วยจำนวน 1,099 ราย พบว่า 86% ของผู้ป่วยปรากฏ GGO เล็ก ๆ กระจายตัวในบริเวณนั้น ๆ โดยมีผู้ป่วยเพียง 2.9% เท่านั้น ที่ไม่แสดงอาการเหล่านี้

การนำเทคโนโลยี AI มาช่วยปรับปรุงความแม่นยำของการตรวจหา COVID-19 จากภาพซีทีสแกนทรวงอก มีเหตุผลที่สำคัญ 3 อย่าง ข้อแรกคือ AI สามารถกำจัดความผิดพลาดของมนุษย์ (human error) ได้ ข้อที่สองคือ AI ช่วยลดปัญหาจำนวนบุคลากรทางการแพทย์ที่ไม่เพียงพอ เนื่องจาก AI เป็นเครื่องมือที่สามารถวินิจฉัยได้ด้วยตนเอง และข้อสุดท้ายคือ เครื่องมือ AI สามารถเป็นผู้ช่วยติดตามอาการผู้ป่วย COVID-19 หลังการรักษาได้

ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่มีการตรวจหาไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ด้วยภาพสแกน CT ร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) ดังเช่นงานวิจัยใน [7] ได้ศึกษาภาพซีทีสแกนของผู้ป่วยจำนวน 618 ราย โดย 35% เป็นผู้ป่วย COVID-19 36% เป็นผู้ป่วยโรค ปอดอักเสบจากเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์เอ (Influenza-A-viral-pneumonia) และ 28% เป็นผู้ป่วยที่มีสุขภาพดี ภาพซีทีสแกนได้รับการอธิบายและระบุอาการของแต่ละโรค โดยนักรังสีวิทยาผู้เชี่ยวชาญ และป้อนเข้าสู่โมเดล คอนโวลูชันโครงข่ายประสาทเทียม (convolutional neural networks : CNN) แบบสามมิติ หรือ 3D-CNN ที่เป็นโครงข่าย ResNet18 แบบธรรมดา ที่อินพุตและเอาต์พุตเป็นแบบราบ และมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละชั้นอย่างสมบูรณ์ (fully connected layer : FCN) โดยข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของอาการที่ปรากฏขึ้น ได้ถูกป้อนเข้าไปยังโหนด ที่เข้าไปจนถึงฟังก์ชัน softmax ในชั้นสุดท้าย เพื่อทำนายว่าภาพซีทีสแกนนั้น จัดอยู่ใน

ประเภทของอาการในคลาสใด จากตัวอย่างที่ทดสอบนั้น พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำประมาณ 86.7%

อีกงานวิจัยที่ได้เผยแพร่เมื่อเร็ว ๆ นี้ [8] ได้ศึกษาวิธีการประเมินที่สำคัญสำหรับการตรวจหา COVID-19 แบบอัตโนมัติ จากภาพรังสีเอกซ์ (X-Ray) แบบอัตโนมัติ โดยกำจัดอคติ (bias) ออกจากโปรโตคอลสำหรับการทดสอบ COVID-19 ที่มีอยู่ตามปกติ ที่เกี่ยวข้องกับ การจัดการกับภาพรังสีเอกซ์ ในส่วนที่ได้รับผลกระทบของ COVID-19 เพื่อปรับปรุงรูปแบบการเรียนรู้ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

อีกงานวิจัยใน [9] ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมของสถาปัตยกรรม VB-Net มาฝึกฝน ภาพซีทีสแกนสามมิติ ของผู้ป่วย COVID-19 ทั้งหมด 249 ครั้ง และใช้วิธีที่มีมนุษย์ มาปฏิสัมพันธ์กับกระบวนการ (human-in-the-loop : HITL) แบบใหม่ ช่วยการเรียนรู้ของแบบจำลอง เพื่อให้ได้ความถูกต้องที่สูงขึ้น โดยส่วนหนึ่งในกระบวนการฝึกฝน ได้ใช้นักรังสีวิทยาที่เชี่ยวชาญระบุอาการ และจากนั้นส่งผลลัพธ์เข้าไปในแอปพลิเคชัน VB-Net เพื่อฝึกฝน เมื่อได้ผลลัพธ์เป็นการคาดการณ์บริเวณของภาพซีทีสแกน ที่ได้รับผลกระทบจาก COVID-19 หลังจากนั้นนักรังสีวิทยาก็จะมาปรับแก้ให้ผลลัพธ์ในคำอธิบายประกอบ (annotations) ให้ถูกต้องมากขึ้น และป้อนภาพเข้าไปในโครงข่ายใหม่อีกครั้ง เพื่อให้การคาดการณ์ส่วนคำอธิบายประกอบที่ดีขึ้น จากผลการทดสอบภาพซีทีสแกนของผู้ป่วย COVID-19 จำนวน 300 ภาพ ได้ผลลัพธ์มีค่าสัมประสิทธิ์ดัชนีความเหมือน (dice similarity coefficient) 91.6% +/- 10.0% ระหว่างแบบอัตโนมัติและแบบด้วยตนเอง

บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจหา COVID-19 และผลกระทบที่เกิดขึ้นที่ปอด จากการใช้ภาพซีทีสแกนทรวงอก ร่วมกับแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก สำหรับการตรวจหาวัตถุแบบหน้าฉากแยกบริเวณคอนโวลูชันโครงข่ายประสาทเทียม (mask region-based convolutional neural networks : Mask RCNN) [10]-[11] บนแกนหลักโครงข่าย ResNet101 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งและบริเวณของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากไวรัส COVID-19 จากผลลัพธ์ของการแบ่งส่วน (segmentation) ภาพเนื้อเยื่อปอดบริเวณต่าง ๆ ที่ได้รับความเสียหายออกมา เพื่อช่วยให้แพทย์ได้ประเมินระดับความรุนแรงของการแพร่กระจายเชื้อไวรัสได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามอุปสรรคของการวิจัยและการนำไปใช้จริงคือการประมวลผลเพื่อฝึกฝน และทำนายที่ต้องใช้เวลาอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงได้ใช้หลักการ

ประมวลผลของ กูเกิลคลาวด์แพลตฟอร์ม (google cloud platform) เพื่อลดเวลาในการทำนายของแบบจำลอง ทำให้ผลลัพธ์สามารถคำนวณภายในเวลาไม่กี่วินาที สามารถช่วยประหยัดเวลาของแพทย์ในการตรวจวินิจฉัยผู้ป่วย COVID-19

บทความนี้ส่วนที่ 2 เป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัย ส่วนที่ 3 เป็นวิธีดำเนินการวิจัย ที่ได้อธิบายถึงวิธีการรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลภาพซีทีสแกน ก่อนป้อนเข้าสู่โครงข่ายสำหรับการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อตรวจหาเนื้อเยื่อปอดที่เสียหายจาก COVID-19 โดยใช้แบบจำลอง Mask RCNN และได้อธิบายหลักการของแบบจำลองดังกล่าว ในส่วนที่ 4 เป็นผลการจำลองระบบที่แสดงให้เห็นถึง ค่าความแม่นยำที่ได้จากการทดสอบ รวมถึงภาพที่จะช่วยให้แพทย์ช่วยวินิจฉัยความรุนแรงของอาการ จากการระบุบริเวณที่เนื้อเยื่อปอดได้รับความเสียหาย และส่วนท้ายเป็นบทสรุป

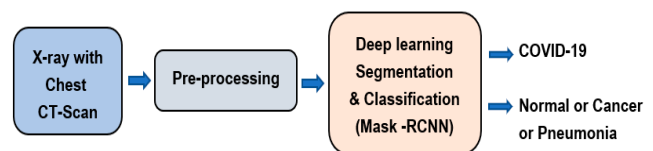
2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึกกับภาพซีทีสแกนทรวงอก เพื่อนำนายหาบริเวณตำแหน่งที่ได้รับผลกระทบจาก COVID-19 ที่จะสามารถคัดแยกผู้ที่เป็นโรคหรือไม่เป็นได้ อีกทั้งยังสามารถระบุขอบเขตและตำแหน่งของเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายต่าง ๆ เพื่อให้แพทย์สามารถติดตามอาการและรักษาได้ง่ายขึ้น โดยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกนั้นจะใช้โครงข่าย Mask RCNN นำมาฝึกฝนกับฐานข้อมูลภาพสแกนทรวงอกของผู้ที่เป็น COVID-19 ร่วมกับผู้ที่ปกติหรือเป็นโรคปอดอื่น ๆ โดยใช้จำนวนรอบคำนวณ (epoch) สำหรับการฝึกฝนที่เหมาะสม รวมถึงการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากนั้นทำการทดสอบหาค่าความแม่นยำในการทำนาย และระบุบริเวณที่เนื้อเยื่อปอดเสียหายจากไวรัสบนภาพซีทีสแกนเพื่อช่วยให้แพทย์วินิจฉัยได้ง่ายขึ้น

3) วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในบทความนี้ ได้ประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึก กับภาพซีทีสแกนทรวงอก เพื่อตรวจหาผู้ติดเชื้อ COVID-19 และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับปอด โดยจะแสดงให้เห็นถึงบริเวณเนื้อเยื่อปอดที่ได้รับความเสียหายจากไวรัส เพื่อให้แพทย์นำไปใช้ในการวินิจฉัยและรักษาผู้ป่วยได้ โดยฝั่งระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการวินิจฉัยและตรวจหา COVID-19 ของงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบที่ 1 ที่ได้รวบรวมภาพซีทีสแกนทรวงอกของ ผู้ที่เป็น COVID-19

และผู้ที่ไม่ได้เป็น ในฐานข้อมูลต่าง ๆ มาผ่านกระบวนการประมวลผลข้อมูลขั้นต้น (pre-processing) และถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้เชิงลึก เพื่อที่จะแบ่งส่วนพื้นที่และแยกคลาสบริเวณเนื้อเยื่อปอดในภาพว่าเป็น COVID-19 หรือไม่ โดยโครงข่ายการเรียนรู้เชิงลึกในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลอง Mask RCNN ที่โดยปกติเป็นแบบจำลองสำหรับการตรวจหาและแยกคลาสวัตถุทั่วไปในภาพมาประยุกต์ใช้ การประมวลผลเพื่อฝึกฝนได้ใช้แพลตฟอร์มกูเกิลคลาวด์ เพื่อฝึกฝนแบบจำลอง 100 รอบ สำหรับการทดลอง และ 11 รอบสำหรับที่นำไปใช้ทดสอบจริงตามลำดับ โดยแบบจำลองที่ฝึกฝนแล้วจะสามารถตรวจหาตำแหน่งและกำหนดบริเวณที่ปอดได้รับความเสียหายจาก COVID-19 ได้ นอกจากนี้เรายังสามารถนำบริเวณเนื้อเยื่อ ที่ได้รับความเสียหายต่าง ๆ มารวมหาพื้นที่โดยรวมเพื่อที่จะกำหนดระดับความรุนแรงของอาการได้



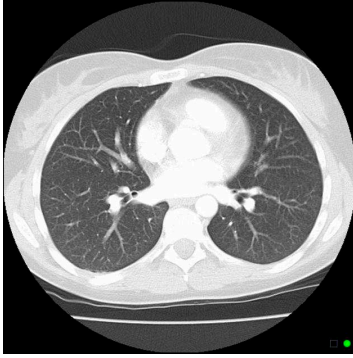
รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกของการตรวจหา COVID-19 โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก

3.1) การรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูล

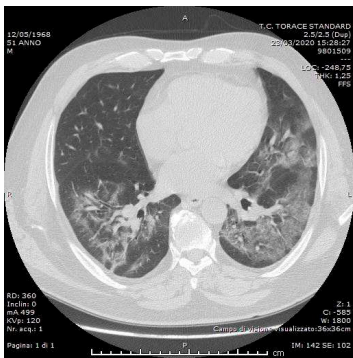
ในงานวิจัยนี้เราใช้ภาพสแกนซีทีทรวงอก จากทั้งหมด 669 ราย แบ่งออกเป็น ผู้ป่วย COVID-19 จำนวน 313 รายที่ผลเป็นบวก และที่เหลืออีก 356 ราย เป็นผู้ที่ไม่ได้ป่วยเป็น COVID-19 ประกอบด้วย ที่เป็นโรคปอดบวม มะเร็งปอด และคนที่สุขภาพดีรวมกัน โดยข้อมูลภาพซีทีสแกน ได้ถูกแบ่งตามวิธี 70-15-15 สำหรับภาพ 70% จำนวน 469 รูปใช้ในการฝึกฝน (train) อีก 15% จำนวน 100 รูป ใช้สำหรับตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) และอีก 15% ที่เหลือ จำนวน 100 รูป ใช้ในการทดสอบ โดยภาพทั้งหมดได้มาจาก [12] ที่ได้เก็บไฟล์ข้อมูลไว้บน GitHub และบนฐานข้อมูล Caristica Radiological COVID-19 [13] รวมถึงแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ทั้งนี้ชุดข้อมูลภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกแยกแยะประเภทเพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยอย่างชัดเจน ในตารางที่ 1 และภาพตัวอย่างในชุดข้อมูล (data set) ทั้งกรณีที่มีสุขภาพดีและผู้ที่เป็น COVID-19 อยู่ในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การแจกแจงชุดข้อมูล

	COVID-19	ไม่เป็น COVID-19
ฝึกฝน	213	256
ตรวจสอบความ สมเหตุสมผล	55	45
ทดสอบ	45	55



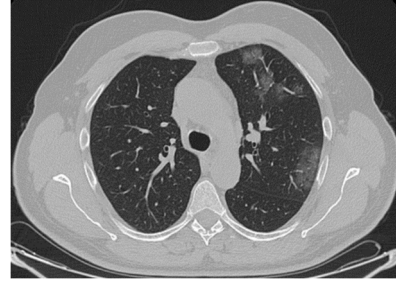
รูปที่ 2 ตัวอย่างภาพซีทีสแกนของผู้ที่มีสุขภาพดี



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพซีทีสแกนของผู้ป่วย COVID-19

3.2) การประมวลผลข้อมูลขั้นต้น (data pre-processing)

การจัดเตรียมข้อมูลภาพเริ่มจากปรับขนาดภาพให้เป็น 1024 x 1024 จุดภาพ (pixel) ใน 3 มิติของระบบสี RGB และใส่คำอธิบายประกอบด้วยตนเอง โดยใช้เครื่องมือคำอธิบายประกอบภาพ (image annotator) ของ Oxford [14] โดยการตัดส่วนภาพ ซึ่งทำให้ค่าของข้อมูลขาดหายไป จึงได้ใช้เทคนิคการเสริมเข้าไป เช่นการหมุน 15 องศา การพลิกแนวนอน การแปลงแนวนอนและแนวตั้งและการเบลอแบบเกาส์เซียน ดังรูปที่ 4 ภาพตัวอย่างต้นฉบับ และรูปที่ 5 เป็นภาพเดียวกันได้หมุนรูปไป 15 องศา



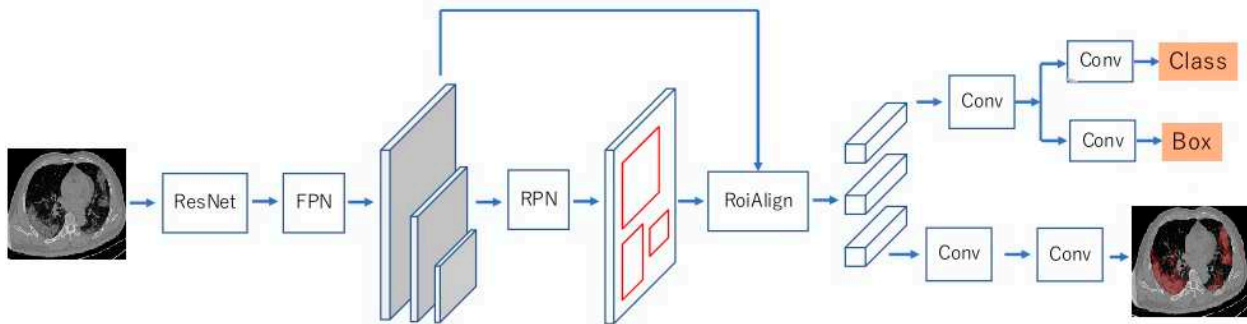
รูปที่ 4 ภาพซีทีสแกนต้นฉบับ



รูปที่ 5 ภาพซีทีสแกนที่ถูกหมุนไป 15 องศา

3.3) การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจหาวัตถุ (deep learning for object detection)

การตรวจหาตำแหน่งและบริเวณของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากไวรัส COVID-19 ในภาพซีทีสแกนนั้น ใช้วิธีการตรวจหาวัตถุในภาพจากการเรียนรู้เชิงลึก ในบทความนี้ใช้วิธีการตรวจหาวัตถุแบบ Mask RCNN ที่สามารถแยกแยะวัตถุต่าง ๆ และกำหนดกล่องขอบเขต (bounding box) ที่ปิดล้อมวัตถุ และตัวพราง (mask) ที่ระบายสีวัตถุในภาพได้ โดยโครงข่ายนี้มี 2 ส่วนหลักคือส่วนนำเสนอพื้นที่ เพื่อค้นหาขอบเขตที่น่าจะมีวัตถุอยู่ และส่วนการรู้จำ (recognition) วัตถุ ดังรูปที่ 6 เริ่มต้นภาพซีทีสแกนถูกป้อนเข้าไปในเฟรมเวิร์ก Mask RCNN ที่มีการประมวลผลขั้นต้นกับแกนหลัก (backbone) ของโครงข่าย ที่เป็นโครงข่ายประสาทเทียมตึกค้าง (residual neural network : ResNet) ใช้ร่วมกับ โครงข่ายพีระมิดคุณลักษณะ (feature pyramid network : FPN) เพื่อคัดแยกคุณลักษณะเด่น (feature extractions) ที่ได้เป็นฟังก์ชันคุณลักษณะ (feature map) ออกมา โดยการ ตรวจหา



รูปที่ 6 สถาปัตยกรรมเฟรมเวิร์ก โครงข่ายประสาทเทียม Mask RCNN

มีหลายชั้น ตั้งแต่ชั้นแรกที่เป็นการค้นหาคุณลักษณะระดับล่าง เช่น ขอบ มุม เส้น เป็นต้น ไปจนถึงชั้นสุดท้ายที่เป็นการค้นหาคุณลักษณะระดับบน เช่น ลักษณะเนื้อเยื่อปอดในรูปแบบต่าง ๆ ที่น่าจะเป็น COVID-19

ข้อคุณลักษณะเด่นที่สนใจต่าง ๆ จะถูกป้อนไปยัง โครงข่ายนำเสนอบริเวณ (region proposal network : RPN) เพื่อหาขอบเขตบริเวณที่สนใจ (regions of Interest: ROI) ที่น่าจะเป็นวัตถุมากที่สุด ในภาพ โดยการใช้ตัวกรองสแกนเข้ามาในผังคุณลักษณะที่ได้รับในตำแหน่งที่จุดตรึง (anchor) ต่าง ๆ โดยใช้กล่องจุดตรึง (anchor box) ที่มีขนาดและสัดส่วนต่างกันเพื่ออนุมาน (infers) พิกัดของกล่องขอบเขต (bounding box) ปิดล้อมวัตถุของ ROI ต่าง ๆ และระบุว่า ROI นั้น เป็นของคลาส (class) ไດ โดย RPN จะมีการนำเสนอ ROI ในภาพซีทีสแกนจำนวนกว่า 1,000 รายการ ที่ภายในรายการต่าง ๆ จะมีรอยทึบแบบกระจกฝ้า (ground glass opacity : GGO) ที่เล็กที่สุด โดย GGO เป็นการบ่งชี้ว่าถุงลมในบริเวณนั้นถูกเติมเต็มด้วยสารน้ำแทนที่จะเป็นอากาศตามปกติ โดยฟังก์ชันสูญเสีย (Loss function) ของโครงข่ายประสาทเทียม RPN เป็นไปตาม

$$L(\{p_i\}, \{t_i\}) = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^* L_{reg}(t_i, t_i^*) \quad (1)$$

โดย i คือดัชนีของจุดตรึง (anchor) ของตัวกรอง (filter) ที่นำไปทาบลงบนภาพ ในขณะที่ p_i เป็นความน่าจะเป็นที่ได้ทำนายไว้ว่าจุดตรึง i นั้นเป็นวัตถุ ทั้งนี้ค่าของผลเฉลย (ground truth) ความน่าจะเป็น p_i^* จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดตรึงมีค่าเป็นบวก และเท่ากับ 0 เมื่อจุดตรึงมีค่าเป็นลบ โดยทั้งจุดตรึงที่มีค่าเป็น

บวกและลบ มีส่วนทำให้เกิดการสูญเสียจำแนกประเภท (classification loss) มีเพียงจุดตรึงที่เป็นบวกเท่านั้น ที่ทำให้เกิดการสูญเสียถดถอย (regression loss) ในขณะที่ $t = \{t_x, t_y, t_h, t_w\}$ เป็นเวกเตอร์ที่มี 4 พารามิเตอร์ สำหรับพิกัด (x, y) อยู่ที่ด้านบน-ซ้าย ของกล่องขอบเขตที่มีขนาดสูง h และกว้าง w เวกเตอร์นี้เป็นกล่องขอบเขตที่ถูกทำนายได้ ในขณะที่ t^* เป็นผลเฉลยของกล่องขอบเขต ทั้งนี้ L_{reg} เป็นการสูญเสียของกล่องขอบเขต ที่เป็นไปตาม

$$L_{reg}(t_i, t_i^*) = \sum_{i \in x, y, w, h} L_1^{smooth}(t_i - t_i^*) \quad (2)$$

โดย L_1^{smooth} เป็นฟังก์ชันสูญเสียทนทาน (robust loss function) ที่เขียนได้เป็น

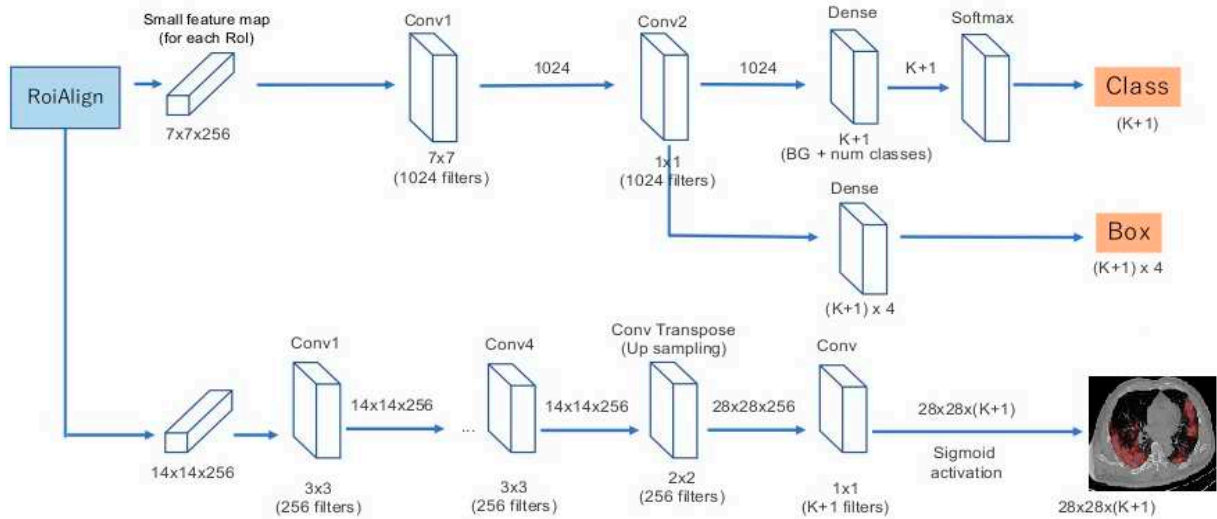
$$L_1^{smooth}(q) = \begin{cases} 0.5q^2 & \text{if } |q| < 1 \\ |q| - 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ในขณะที่ของ N_{cls} ได้จากการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) ของกลุ่มข้อมูลขนาดย่อ (mini-batch) ที่ใช้ในการฝึกฝนแบบจำลองโครงข่าย ตัวอย่างเช่น $N_{cls} = 256$ ในขณะที่ N_{reg} ได้จากการทำให้เป็นบรรทัดฐาน โดยจำนวนของตำแหน่งจุดตรึง ตัวอย่างเช่น $N_{reg} \sim 2,400$ และได้ตั้งค่าปริยาย (default) ของ $\lambda = 0.5$

จากนั้น ROI เหล่านี้ กับผังคุณลักษณะที่ได้มาจากขั้นตอน FPN ก่อนหน้า จะถูกป้อนเข้าไปยังชั้น RoiAlign ที่นำกล่องขอบเขตของ ROI ต่าง ๆ นำไปวางทาบบนผังคุณลักษณะ และตัดส่วนภาพผังคุณลักษณะตามกรอบสี่เหลี่ยมของ ROI แต่ละอันออกมา จากนั้นปรับขนาดผังคุณลักษณะ ที่มีขนาดแตกต่างกันให้เป็นขนาดเล็กคงที่ จำนวน 2 ขนาด เช่น 7×7 จุดภาพ (pixel)

และ 14 x14 จุดภาพ เป็นต้น เพื่อส่งต่อไปยังโครงข่ายส่วนหัวของ Mask RCNN ดังตัวอย่างในรูปที่ 7 ที่แยกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกด้านบนที่ดึงข้อมูลฝังคุณลักษณะขนาด 7 x 7 จุดภาพป้อนเข้าไปยัง โครงข่ายคอนโวลูชันประสาทเทียม (convolutional neural network : CNN) ชั้นต่าง ๆ เพื่อติด

ป้ายคลาส (class label) ของแต่ละ ROI ที่เป็นวัตถุชนิดต่าง ๆ ที่มีคลาสทั้งหมดจำนวน K และ ปรับตั้งค่าชดเชยเพื่อทำนายค่า $\{t_x, t_y, t_h, t_w\}$ หากกล่องขอบเขต (bounding box) ในส่วนต่าง ๆ ได้แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 7 ตัวอย่างสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนหัวของ Mask RCNN

ส่วนที่สองของส่วนหัวโครงข่าย Mask RCNN อยู่ในโพล์ด้านล่างในรูปที่ 7 ที่ได้ดึงข้อมูลฝังคุณลักษณะขนาด 14 x14 จุดภาพ เข้าไปยังโครงข่าย (fully convolutional network : FCN) ทำให้ได้ตัวพรางแบบอ่อน (soft mask) ความละเอียดต่ำ เช่น 28x28 จุดภาพ ที่ใช้ตัวพรางโดยระบายสีปกคลุมวัตถุภายใน ROI ต่าง ๆ ของทุกคลาส ในขั้นตอนสุดท้ายที่จะทำนายตัวพรางจริง จะมีการปรับสัดส่วนให้มีความละเอียดมากขึ้น ให้เท่ากับขนาดกล่องขอบเขตของ ROI นั้น ๆ

แบบจำลองแกนหลักของโครงข่ายในงานวิจัยนี้คือ โครงข่าย ResNet ร่วมกับโครงข่าย FPN ที่มีความลึก 101 ชั้น เพียงพอที่จะเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนขนาดเล็กของ GGO ในปอดของผู้ป่วยได้ ทั้งนี้จะไม่ใช้แบบจำลองโครงข่าย ResNet 101 ที่มีค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) เริ่มต้นมาก่อนแล้ว ที่ได้ผ่านการฝึกฝนมาเบื้องต้น (pre-train) เช่น ImageNet หรือ MS COCO ที่เป็นฐานข้อมูลเป็นคลาสเป็น ประเภทวัตถุทั่วไปที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากไม่เหมือนกับคลาสของภาพซีทีสแกนทรวงอก ในการวิจัยครั้งนี้แบบจำลองจะได้รับการฝึกฝน 100 และ 11 รอบการคำนวณ (epoch) หลังจากที่ได้ฝึกฝนแล้วจะประเมินความแม่นยำโดยใช้ตัวชี้วัดต่าง ๆ ในขณะที่การจำแนก

ประเภทว่าเป็นคลาส COVID-19 หรือไม่นั้นแบบจำลอง Mask RCNN จะต้องนำออก (output) กล่องขอบเขตอย่างน้อยหนึ่งกล่อง ก็จะถือว่าอยู่ในคลาส COVID-19

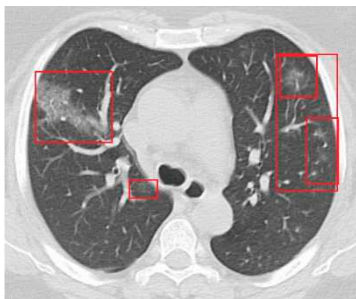
4) ผลการทดสอบ

การคำนวณและการประมวลผลต่าง ๆ ของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ จะใช้พลังการคำนวณของกูเกิลคลาวด์แพลตฟอร์ม เริ่มจากการทดสอบแกนหลักโครงข่าย Resnet 101 โดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝน ในรอบการคำนวณต่าง ๆ หลังจากนั้นจะนำโครงข่ายมาทดสอบกับชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบความสมเหตุสมผล ที่เป็นข้อมูลที่แบบจำลองไม่เคยเห็นมาก่อน เพื่อทดสอบว่าถ้านำไปใช้งานจริง ๆ แล้วได้ผลเป็นอย่างไร และกำหนดรอบการคำนวณสำหรับการฝึกฝนจริง เพื่อไม่ให้เกิดความเหมาะสมมากเกินไป (over fitting) ที่ได้ทดสอบหาจุดที่เหมาะสมโดยที่สังเกตได้จากแนวโน้มของ ค่าการสูญเสียฝึกฝน (training loss) ที่ยังคงมีแนวโน้มลดลงอยู่ และในขณะที่การสูญเสียตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validation losses) เริ่มจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จุดนี้อยู่ที่ 11 รอบการคำนวณ

การทดสอบเพื่อทำนาย COVID-19 ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง Mask-RCNN ที่ได้ปรับแต่งค่าของไฮเปอร์พารามิเตอร์ (hyperparameters) มาแล้ว และถูกฝึกฝนมาแล้ว 11 รอบคำนวณ ถ้าผลลัพธ์ได้ภาพสแกน CT ที่มีกล่องขอบเขตปรากฏอย่างน้อย 1 กล่อง ก็จะถือว่าเป็น COVID-19 จากผลการทำนายทั้งหมดกับชุดข้อมูลทดสอบพบว่ามีค่าความแม่นยำ (accuracy) มีค่าเท่ากับ 87% นอกจากนี้ความแม่นยำของการทำนาย ยังสามารถดูได้จากผลของมาตรวัดประสิทธิภาพโดยรวม คะแนน F1 (F1 score) ในตารางที่ 2 ที่ประกอบด้วยค่า ความเที่ยง (precision) ค่าเรียกคืน (recall) และคะแนน F1 ทั้งหมดของผลตรวจหาแล้วพบว่าเป็นและไม่เป็น COVID-19 ให้เห็นถึงความผิดพลาดของการตรวจหาทั้งสองแง่มุม

ตารางที่ 2 ค่าความเที่ยง ค่าเรียกคืน และคะแนน F1 จากการทำนายผลภาพสแกน CT ของแบบจำลองโครงข่าย

	precision	recall	F1 score
COVID-19	0.86	0.92	0.89
ไม่เป็น COVID	0.91	0.80	0.85



รูปที่ 8 ผลลัพธ์กล่องขอบเขตบนภาพสแกน CT

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอ สามารถเรียกคืนผู้ป่วย COVID-19 ได้ 92% เมื่อเทียบกับค่าเรียกคืน 80% ในกรณีปกติหรือกรณีที่ไม่มีอาการของ COVID-19 จากภาพสแกน CT ปอด มาตรวัดที่สำคัญอีกอย่างคือคะแนน F1 ที่เป็นค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิก ใช้บ่อยในงานทางการแพทย์ที่คนไข้ที่มีอาการป่วยมีจำนวนน้อยมาก เมื่อเทียบกับจำนวนของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ผลการทำนายแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้คะแนน F1 89% สำหรับกรณี COVID-19 ผลการวิจัยแสดงประสิทธิภาพของโครงข่าย Mask RCNN ในการตรวจหารอยโรคและรอยทึบแบบกระจุกฝ้า ของผู้ที่ติดเชื้อ COVID-19 ผลการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายนี้ จะช่วยนักรังสีวิทยาและ

แพทย์ในกระบวนการตรวจหาผู้ที่ติดเชื้อ COVID-19 และระบุระดับของอาการ ไปตลอดจนการรักษาได้

รูปที่ 8 เป็นผลลัพธ์กล่องขอบเขตบนภาพซีทีสแกน ในกรณีที่ทำนาย COVID-19 มีค่าเป็นบวก โดยกล่องขอบเขตนี้ได้ถูกคัดเลือกมาจาก ROI ต่าง ๆ ในชั้น RoiAlign ที่เลือกกล่องขอบเขตที่มีความน่าจะเป็นสูงสุด เป็นบริเวณที่เนื้อเยื่อปอดที่ได้รับผลกระทบ ที่จะช่วยให้แพทย์วินิจฉัยอาการของผู้ป่วย COVID-19 ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะระบุระดับความรุนแรงของอาการ เราจึงได้ใช้ขั้นตอนวิธีที่ลบกล่องขอบเขตที่เล็กออกไป หากบริเวณกล่องทับซ้อนกันตั้งแต่ 2 กล่องขึ้นไป



รูปที่ 9 กล่องขอบเขตบนภาพสแกน CT เมื่อนำมากรองขนาด เล็กซ้อนทับออกไป



Segmentation Masks



รูปที่ 10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งส่วนและตัวกลางบริเวณพื้นที่เนื้อเยื่อปอดที่ได้รับผลกระทบจาก COVID-19 หรือ GGO

ดังรูปที่ 9 ที่ทำให้ได้เห็นบริเวณพื้นที่ที่ได้ผลกระทบโดยรวม นอกจากนี้ในรูปที่ 10 เป็นผลลัพธ์จากการแบ่งส่วนและสร้างตัวพลาจบริเวณที่เป็นรอยทึบแบบกระจกฝ้าหรือ GGO ที่สามารถนำไปคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่เนื้อเยื่อปอด ที่ได้รับผลกระทบต่อพื้นที่ของปอดทั้งหมดต่อไปได้ เพื่อที่จะนำไปใช้ระบุระดับของความรุนแรงของอาการและหาแนวโน้มสภาพของผู้ป่วย

5) สรุป

ผลงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของความพยายามที่จะตรวจหาผู้ป่วยที่เป็น COVID-19 จากภาพถ่ายซีทีสแกนทรวงอก ด้วยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมและเครื่องมือ AI กับแบบจำลอง Mask RCNN ใช้การตรวจหาวัตถุในภาพ ที่สามารถตรวจหารอยทึบแบบกระจกฝ้าขนาดเล็กในปอด ที่ถูกทำลายไป ที่บ่งชี้ว่าได้รับผลกระทบจากโรคนี้ได้ สามารถช่วยให้แพทย์วินิจฉัยและประเมินอาการของผู้ป่วย กำหนดความรุนแรงของโรค และแบ่งกลุ่มอาการแสดงของผู้ป่วย COVID-19 ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าการวิจัยนี้ได้มีการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม ก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพและความแม่นยำของโมเดลมากขึ้น ที่จะเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยของเราในอนาคต นอกจากนี้งานวิจัยต่อไปจะปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดล Mask RCNN เพิ่มเติม เพื่อทำนายกล่องขอบเขตและตัวพลาจให้ดีขึ้น

REFERENCES

- [1] World Health Organization, "WHO coronavirus disease (COVID-19) dashboard," Accessed: Nov. 10, 2020. [Online]. Available: <https://covid19.who.int>
- [2] F. Pan, T. Ye, P. Sun, S. Gui, B. Liang, L. Li, D. Zheng, J. Wang, R. L. Hesketh, L. Yang, and C. Zheng, "Time course of lung changes at chest CT during recovery from coronavirus disease 2019 (COVID-19)," *Radiology*, vol. 295, no. 3, pp. 715–721, 2020.
- [3] S. Basu, S. Mitra, and N. Saha, "Deep learning for screening COVID-19 using chest X-ray Images," 2020. [Online]. Available: arXiv:2004.10507.
- [4] S. Latif, J. Qadir, S. Farooq, and M. A. Imran, "How 5G wireless (and concomitant technologies) will revolutionize healthcare?," *Future Internet*, vol. 9, no. 4, pp. 1-24, 2017.
- [5] Y. Wang, C. Dong, Y. Hu, C. Li, Q. Ren, X. Zhang, H. Shi, and M. Zhou, "Temporal changes of CT findings in 90 patients with COVID-19 pneumonia:A longitudinal study," *Radiology*, vol. 296, no. 2, pp. E55-E64, Mar, 2020.
- [6] J. L. He, L. Luo, Z. D. Luo, J. X. Lyu, M. Y. Ng, X. P. Shen, and Z. Wen, "Diagnostic performance between CT and initial real-time RT-PCR for clinically suspected 2019 coronavirus disease (COVID-19) patients outside Wuhan, China," *Respiratory Medicine*, vol. 168, pp. 1-5, Apr. 2020.
- [7] S. C. Shelmerdine, J. Lovrenski, P. C. Dominguez, and S. Toso, "Coronavirus disease 2019 (COVID-19) in children: A systematic review of imaging findings," *Pediatric Radiology*, vol. 50, no. 9, pp. 1217–1230, Jun, 2020.
- [8] G. Maguolo and L. Nanni, "A critic evaluation of methods for COVID-19 automatic detection from x-ray images," 2020. [Online]. Available: arXiv:2004.12823.
- [9] F. Shan, Y. Gao, J. Wang, W. Shi, N. Shi, M. Han, Z. Xue, and Y. Shi, "Lung infection quantification of COVID-19 in CT images with deep learning," 2020. [Online]. Available: arXiv:2003.04655.
- [10] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick, "Mask R-CNN," 2018. [Online]. Available: arXiv:1703.06870.
- [11] M. Aleem, R. Raj, and A. Khan, "Comparative performance analysis of the ResNet backbones of mask RCNN to segment the signs of COVID-19 in chest CT scans," 2020. [Online]. Available: arXiv:2008.09713.
- [12] J. P. Cohen, P. Morrison, L. Dao, K. Roth, T. Q. Duong, and M. Ghassemi, "COVID-19 image data collection: Prospective predictions are the future," 2020. [Online]. Available: arXiv:2006.11988.
- [13] COVID-19 Database, Società Italiana di Radiologia, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.sirm.org/category/senza-categoria/covid-19>
- [14] A. Dutta, A. Gupta, and A. Zisserman. VGG Image Annotator. (2020). Access: Nov. 10, 2020. [Online]. Available: <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/software/via>

การเบลอภาพใบหน้าขนาดใหญ่อย่างมีมิติ ด้วยความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพ

ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล^{1*} เกษม ทิพย์ธาราจันทร์² คณาภาญจน์ รักไพฑูรย์³ กุลวดี สมบูรณ์วิวัฒน์⁴

^{1*,2,3}คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

⁴คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา, ชลบุรี, ประเทศไทย

*ผู้พิมพ์ประสานงาน อีเมล : thitiporn@tni.ac.th

รับต้นฉบับ: 28 กันยายน 2563; รับบทความฉบับแก้ไข: 9 พฤศจิกายน 2563; ตอรับบทความ: 12 พฤศจิกายน 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การปกปิดใบหน้าถูกใช้อย่างแพร่หลายในสื่อสิ่งพิมพ์ สื่อดิจิทัลและภาพออนไลน์ต่าง ๆ เพื่อคุ้มครองสิทธิส่วนบุคคล โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการเบลอภาพใบหน้าบุคคล ที่มุ่งเน้นพัฒนาการเบลอภาพใบหน้าขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาพที่มีขนาดใหญ่ ที่มักได้รับผลกระทบจากระดับความเบลอมากเพื่อทำให้ภาพมีความพร่ามัวเพียงพอจนไม่สามารถระบุตัวตนได้ จึงทำให้ใบหน้ามีความแบนหรือราบเรียบสูง ขาดมิติของภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำค่าความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพระหว่างภาพเบลอมากกับภาพปกติ มากรองด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน และปรับค่าความแตกต่างระหว่างความสว่างและความมืด (Contrast) สร้างเป็นแผนที่ความทึบแสง (Opacity Map) เพื่อใช้เบลอองค์ประกอบภายในใบหน้าอย่างละมุนและเหมาะสม ทำให้บริเวณรายละเอียดของส่วนประกอบหลักมีความพร่ามัวมาก ยากต่อการรับรู้อัตลักษณ์บุคคล ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ ของใบหน้ามีความเบลอน้อยกว่า ซึ่งความแตกต่างของระดับความเบลอภายในองค์ประกอบของใบหน้าเหล่านี้ ช่วยเพิ่มมิติให้กับภาพและช่วยในการมองเห็นภาพบุคคลให้มีความเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าเฉลี่ยความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพกับภาพต้นฉบับมีค่าสูงขึ้น โดยสามารถนำไปประยุกต์ต่อยอดกับการเซ็นเซอร์ (Censor) ภาพอย่างมีประสิทธิภาพได้อีกด้วย

คำสำคัญ : การทำให้ภาพเรียบ การเบลอใบหน้า ความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพ

Dimensional Blurring of Large Face Image Based on Structural Similarity

Thitiporn Lertrusdachakul^{1*} Kasem Thiptarajan² Kanakarn Ruxpaitoon³ Kulwadee Somboonviwat⁴

^{1*,2,3}Faculty of Information Technology, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand

⁴Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi, Thailand

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

Received: 28 September 2020; Revised: 9 November 2020; Accepted: 12 November 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

Face masking is widely used in print media, digital media and various online images for privacy and security protection. This research proposes an innovative face-blurring method focusing on large face blurring in large image size which usually requires a high degree of blur level to anonymize face. This great blur causes the face to be flat or very smooth and lack of visual dimension. Therefore, this research exploits the local structural similarity between large blurred and original images with Gaussian filter and contrast adjustment to adaptively create an opacity map for smoothly and appropriately blurring of face components. The details of main components are then very blurry and difficult to recognize personal identity while other parts of the face are less blurred. This adaptively face smoothing can improve a sense of dimensional perception and help to visually anonymize the portrait more natural resulting in the higher average value of structural similarity to the original image. The proposed method can be further applied to an aesthetically image censoring.

Keywords: Image Smoothing, Face Blurring, Structural Similarity

1) บทนำ

การทำให้ภาพเรียบ (Image Smoothing) เป็นการลดทอนความคมชัดของภาพ และทำให้รายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่อาจไม่พึงประสงค์ เกิดความพร่ามัวหรือเบลอ และกลมกลืนไปกับส่วนพื้นหลังของภาพ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ลดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นภายในภาพ โดยการเบลอภาพในระดับความเบลอและบริเวณที่แตกต่างกัน สามารถใช้สร้างเอฟเฟกต์ให้กับภาพได้ เช่น สร้างความรู้สึกคลาสสิก สร้างหมอกควันจำลอง [1] สร้างการดึงดูดความสนใจให้กับวัตถุ สร้างมิติและความลึกให้กับภาพ [2], [3] นอกจากนี้ในการนำเสนอข่าวสารหรือเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อบุคคลที่อยู่ในภาพ เช่น ผู้เสียหาย ผู้ถูกกล่าวหา พยานผู้อาจได้รับความเสียหายจากการให้ข้อมูลผู้ติดเชื่อ เยาวชนก็ได้นำการเบลอภาพมาใช้เพื่อช่วยปกปิดใบหน้าบุคคล โดยสื่อโทรทัศน์และสื่อออนไลน์ทั่วไป มีวิธีการปิดบังใบหน้าหลายรูปแบบ เช่น การหันหลัง การใส่แว่นดำและหมวก การลดแสงไฟ การใช้ฉากมัวกัน การใส่หน้ากากอนามัย การปิดบริเวณตาด้วยแถบสีดำ การขยายขนาดพิกเซล (Pixelate) การเบลอภาพ ซึ่งการปิดบังใบหน้าด้วยวิธีการปัจจุบันสำหรับภาพที่มีใบหน้าขนาดใหญ่และถูกแสดงเป็นภาพนิ่งหรือภาพเคลื่อนไหวเป็นระยะเวลา ย่อมทำลายความสวยงามและคุณภาพของภาพ ทำให้การรับชมภาพขาดความเป็นธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเบลอภาพใบหน้าบุคคล โดยมุ่งเน้นพัฒนาการปกปิดใบหน้าขนาดใหญ่ให้มีความเป็นธรรมชาติ มีมิติมากยิ่งขึ้น

ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีการเบลอภาพ ได้แก่ การเบลอภาพโดยพิจารณาแสงร่วมกับการปรับโพกัสและความคลาดเคลื่อนของสายตามนุษย์ เพื่อให้ได้ภาพเบลอที่ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในการรับชมตามธรรมชาติ [4] การเบลอภาพโดยเลือกใช้ตัวกรองนำทางแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงเสมอ (Static and Dynamic Guidance Filters) เพื่อช่วยรักษาขอบภาพ [5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่เบลอภาพโดยพยายามรักษาขอบหลักหรือโครงสร้างของภาพไว้ [6]-[8] เช่น การทำให้ภาพเรียบในบริเวณภาพที่มีความคล้ายคลึงกันของพิกเซล [9] การใช้เกรเดียนต์ของภาพ (Image Gradient) เพื่อประมาณโครงสร้างที่โดดเด่นในกระบวนการเบลอภาพ [10], [11] สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเบลอบนใบหน้า ได้มีการพัฒนาการลบร็อยรอยอย่างเป็นธรรมชาติโดยการทำให้จุด ตาหนิ รอยต่าง ๆ ราบเรียบขึ้นและพื้นคินผิวหน้าดั้งเดิมด้วยส่วนประกอบภาพความถี่สูงจากการประมวลผลภาพในโดเมน

เวฟเลต (Wavelet Domain) จึงทำให้ได้ใบหน้าที่สวยงาม นำติงจุดและคงรูปลักษณะความเป็นธรรมชาติไว้ [12] โดยงานวิจัยเหล่านี้ต่างพัฒนาวิธีการเบลอภาพเพื่อให้ภาพมีความเป็นธรรมชาติ สวยงาม หรือมีประสิทธิภาพต่อการค้นหาขอบ (Edge Detection) หรือการแยกส่วนภาพ (Image Segmentation) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาวิธีการกำจัดสิ่งรบกวน โดยยังคงรักษาขอบหลักของภาพไว้ โดยหากนำมาประยุกต์กับภาพใบหน้าบุคคลก็จะเป็นการช่วยเน้นโครงสร้างใบหน้าอย่างนุ่มนวล เหมาะแก่การตกแต่งภาพถ่าย ในขณะที่การพัฒนาวิธีการเบลอภาพใบหน้าขนาดใหญ่ที่นำเสนอนี้ เป็นการเบลอเพื่อลดทอนขอบหลักหรือโครงสร้างหลักของภาพ ให้ไม่สามารถระบุตัวตนของบุคคลได้ แต่ยังคงรักษาความกลมกลืนเป็นธรรมชาติ ความมีมิติของภาพโดยรวมไว้

สำหรับเครื่องมือหรือโปรแกรมที่ช่วยในการเบลอหน้าทีนิยม ได้แก่ Adobe Photoshop [13] เป็นโปรแกรมที่สามารถปิดบังใบหน้าด้วยการเลือกตำแหน่ง รูปร่าง ขนาดพื้นที่ที่ต้องการเบลอ และสามารถเลือกตัวกรองภาพได้หลายประเภทและปรับระดับการกรองได้ตามความต้องการ สามารถแก้ไข ตกแต่งความเป็นธรรมชาติ นุ่มนวลอย่างละเอียดด้วยมือได้ (Manual), Facepixelizer [14] เป็นเว็บไซต์ที่สามารถตรวจจับใบหน้า (Face Detection) ภายในภาพและทำการปกปิดด้วยการขยายขนาดพิกเซล การเบลอภาพ การสวมหน้ากาก โดยปรับขนาดพิกเซลหรือระดับความเบลอหรือขนาดหน้ากากรได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบควบคุมโดยผู้ใช้งาน ซึ่งเครื่องมือช่วยในการเบลอหน้าเหล่านี้ แม้ว่าจะปรับระดับความเบลอที่ต้องการด้วยมือได้ หรือปรับให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติได้ แต่หากไม่ได้รับการแก้ไขส่วนรายละเอียดย่อยภายในใบหน้าด้วยมือแล้ว ภาพผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นใบหน้าที่ระดับความเบลอเดียวกัน ทำให้ในใบหน้าขนาดใหญ่ที่ต้องถูกแสดงเป็นระยะเวลา ยาวนาน เช่น ภาพประกอบการรายงานข่าว ภาพการสัมภาษณ์บุคคล ขาดความมีมิติของภาพ และเนื่องด้วยใบหน้าบุคคลนั้นมีโครงสร้างต่าง ๆ เช่น ตา จมูก ปาก เป็นส่วนประกอบ ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลต่อการจดจำอัตลักษณ์ของบุคคล งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการเบลอภาพใบหน้าขนาดใหญ่ด้วยการปรับระดับความเบลอของแต่ละส่วนประกอบบนใบหน้าแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ใบหน้ามีความพร่ามัวมากพอที่ไม่สามารถระบุตัวตนได้ แต่ยังคงรักษาความมีมิติของภาพไว้

2) วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้พัฒนาการปกปิดใบหน้าขนาดใหญ่ของบุคคลอย่างเป็นธรรมชาติ ด้วยการเพิ่มมิติของภาพ โดยมีกระบวนการทำงานดังรูปที่ 1 กล่าวคือ ภาพอินพุตจะถูกนำไปคำนวณหาค่าระดับความเบลอมาก ปานกลาง และน้อย รวม 3 ระดับ ซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดของภาพดังสมการที่ 1 และมีความสัมพันธ์กันระหว่างแต่ละระดับความเบลอดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned}
 & \text{ceil}(cL_{max}) \quad ; \text{ for } L_{max} > 1000 \\
 b_l &= \text{ceil}(1.5cL_{max}) \quad ; \text{ for } 500 < L_{max} \leq 1000 \quad (1) \\
 & \text{ceil}(2cL_{max}) \quad ; \text{ for } L_{max} \leq 500
 \end{aligned}$$

$$\{b_m, b_s\} = \left\{ \frac{b_l}{3}, \frac{b_l}{2} \right\} \quad (2)$$

เมื่อ b_l, b_m, b_s คือ ค่าระดับความเบลอมาก ปานกลาง และน้อย ตามลำดับ

c คือ ค่าคงที่ (จากผลการทดลองเบื้องต้น มีค่าเท่ากับ 0.018)

L_{max} คือ ขนาดด้านที่ยาวที่สุดของภาพ

$\text{ceil}(\cdot)$ คือ การปัดเศษทศนิยมขึ้น ให้เป็นจำนวนเต็มทีมากกว่า

เมื่อได้ค่าระดับความเบลอตามขนาดภาพอินพุตแล้ว จึงทำการกรองภาพด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian Filter) ด้วยเกาส์เซียนฟังก์ชันดังสมการที่ 3 โดยใช้ค่า σ เท่ากับ b_l, b_m, b_s ตามลำดับ

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

เมื่อ x คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดในแนวแกนอน

y คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดในแนวแกนตั้ง

σ หรือ sigma คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงเกาส์เซียน

จากนั้นจึงนำภาพที่ถูกเบลอในระดับมากและภาพอินพุตมาแปลงเป็นภาพระดับสีเทา(Grayscale Image) ด้วยผลรวมถ่วงน้ำหนักของส่วนประกอบสีแดง (R), สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ดังสมการที่ 4 แล้วจึงทำการหาค่าความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพ (Structural Similarity; SSIM) ด้วยสมการที่ 5 [15] โดย

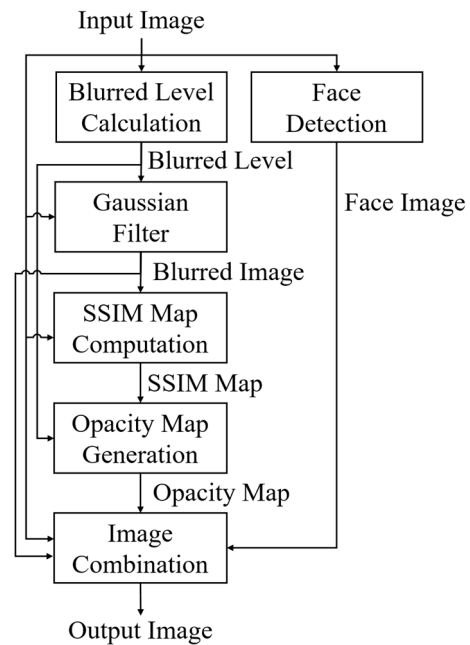
พิจารณาจากความสว่าง (Luminance) ความแตกต่างระหว่างความสว่างและความมืด (Contrast) และโครงสร้างรูปร่าง (Structure) ของภาพเพื่อแสดงส่วนที่เป็นโครงร่างรายละเอียดของภาพ สร้างเป็น SSIM Map สำหรับการประมวลผลระดับความเบลอที่เหมาะสมกับโครงสร้างภายในภาพ

$$\text{Grayscale} = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (4)$$

$$\text{SSIM}(I, B) = \frac{(2\mu_I\mu_B + C_1)(2\sigma_{IB} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_B^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_B^2 + C_2)} \quad (5)$$

โดย $\mu_I, \mu_B, \sigma_I, \sigma_B$ และ σ_{IB} คือ Local Means, Standard Deviations และ Cross-Covariance สำหรับภาพระดับสีเทา I (Input Image) และ B (Blurred Image)

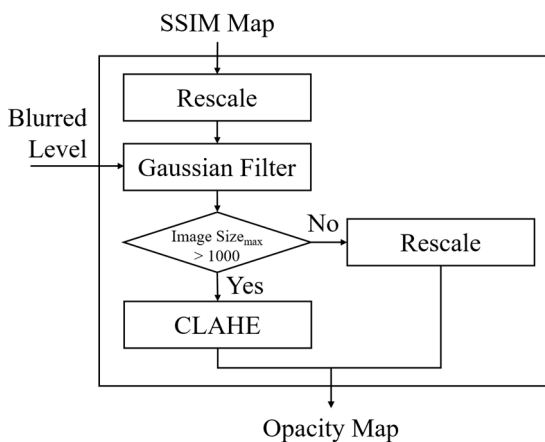
และ $C_1 = 0.01L^2, C_2 = 0.03L^2$ โดย L คือ ค่าช่วงไดนามิกของภาพอินพุต



รูปที่ 1 กระบวนการปกปิดใบหน้าขนาดใหญ่ของบุคคลอย่างเป็นธรรมชาติ

จากนั้น SSIM Map จะถูกประมวลผลตามขั้นตอนในรูปที่ 2 เพื่อสร้างแผนที่ความทึบแสง (Opacity Map) โดยในขั้นตอนแรก SSIM Map ซึ่งเป็นค่า SSIM ของแต่ละพิกเซล จะถูกปรับค่าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน 0 ถึง 1 แล้วจึงนำไปกรองด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียนด้วยค่า σ เท่ากับ b_m เพื่อสร้างความละมุนของ

รอยต่อระหว่างส่วนที่เป็นรายละเอียดภาพและส่วนที่ราบเรียบของภาพ โดยหากขนาดภาพด้านที่ยาวที่สุด มีค่ามากกว่า 1000 พิกเซล ซึ่งเป็นภาพที่มีขนาดใหญ่พอที่สามารถจัดจำรายละเอียดต่าง ๆ ได้ดี จึงจำเป็นต้องใช้ระดับความเบลอนอกในแต่ละส่วนที่เป็นรายละเอียดย่อยภายในภาพ ดังนั้นการปรับค่าหลังการเบลอภาพ จึงเลือกใช้วิธี Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) [16] เพื่อเพิ่ม Contrast ของภาพด้วยการปรับการกระจายตัวของฮิสโตแกรมให้มีความสม่ำเสมอในแต่ละบริเวณส่วนพื้นที่ย่อยภายในภาพ โดยมีการจำกัดค่า Contrast เพื่อหลีกเลี่ยงการขยายสัญญาณรบกวนที่อาจมีอยู่ในภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณพื้นที่ที่เป็นเนื้อเดียวกัน และทำการเชื่อมต่อผลลัพธ์ของพื้นที่ย่อยบริเวณใกล้เคียงกันด้วย Bilinear Interpolation เพื่อกำจัดขอบเทียมที่อาจเกิดขึ้น ในขณะที่ภาพที่มีขนาดของด้านที่ยาวที่สุด ไม่เกิน 1000 พิกเซล จะใช้วิธีการเพิ่ม Contrast ด้วยการปรับค่าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน 0 ถึง 1 ซึ่งผลจากการปรับ Contrast ของการเบลอโครงสร้างรายละเอียดภาพ จะได้ Opacity Map เพื่อใช้สำหรับการรวมภาพในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 กระบวนการสร้าง Opacity Map จากโครงสร้างรายละเอียดภาพ

สำหรับในขั้นตอนการรวมภาพ (Image Combination) นั้น จะรับภาพใบหน้าที่ได้จากการตรวจจับด้วย Haar Features ทำงานร่วมกับ Classification and Regression Tree Analysis (CART) และ Viola-Jones Algorithm [17], [18] ซึ่งขนาดของภาพใบหน้าที่ทั้งหมดที่ตรวจจับได้ จะใช้ในการควบคุมระดับความ

เบลอ ขนาดรูปร่างของการเบลอ และระยะการเปลี่ยนแปลงระหว่างส่วนใบหน้าที่เบลอกับส่วนพื้นหลังของภาพ ดังนี้

- ระดับความเบลอ

โดยหากขนาดความสูงของภาพใบหน้าที่ (H_f) ไม่เกิน 20% ของความสูงภาพ (H_{img}) หรือขนาดใบหน้าที่เล็กเมื่อเทียบกับขนาดภาพ จะเลือกใช้ภาพที่ระดับความเบลอน้อย (Img_{b_s}) ซึ่งเพียงพอต่อการทำให้ไม่สามารถระบุตัวตนได้ แต่หากภาพใบหน้าที่มีขนาดอยู่ในช่วง 20-40% ของความสูงภาพ จะเลือกใช้ภาพความเบลอที่เพิ่มขึ้นเป็นระดับปานกลาง (Img_{b_m}) แทน และเมื่อใบหน้าที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 40% ของความสูงภาพ ระดับความเบลอที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มมิติให้กับภาพ เกิดจากการรวมกันเชิงเส้นระหว่างภาพระดับความเบลอมาก (Img_{b_l}) กับภาพระดับความเบลอปานกลาง (Img_{b_m}) ด้วยแผนที่ความทึบแสง (Opacity Map) สรุปได้ดังสมการที่ 6 โดย Opacity Map จะมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน 0 - 1

$$\begin{aligned}
 &Img_{b_s} ; H_f \leq 0.2H_{img} \\
 &Img_b = Img_{b_m} ; 0.2H_{img} < H_f \leq 0.4H_{img} \quad (6) \\
 &(1 - Opacity)Img_{b_l} + (Opacity)Img_{b_m} \\
 & ; H_f > 0.4H_{img}
 \end{aligned}$$

- ขนาดรูปร่างของการเบลอ

เพื่อให้การปกปิดใบหน้าที่มีความเป็นธรรมชาติ รูปวงรีหรือวงกลมขนาดเท่ากับขนาดของใบหน้าที่ตรวจจับได้ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปร่างของใบหน้าที่ ถูกเลือกใช้ให้เป็นพื้นที่ส่วนของการเบลอภาพแทนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้จากการตรวจจับใบหน้าที่แบบทั่วไป

- ระยะการเปลี่ยนแปลงระหว่างส่วนใบหน้าที่เบลอกับส่วนพื้นหลังของภาพ

เพื่อให้การเบลอภาพเฉพาะส่วนมีความกลมกลืนกับส่วนภาพปกติ กล่าวคือ ไม่ให้เห็นความแตกต่างบริเวณรอยต่อ จนมีลักษณะเป็นขอบชัดเจน จึงกำหนดให้มีระยะหรือความกว้างของรอยต่อขึ้น เพื่อไล่ระดับของการเปลี่ยนแปลงจากภาพเบลอเป็นภาพปกติ โดยมีขนาดความกว้างของรอยต่อ แปรผันตามขนาดภาพ คิดเป็น 10% ของความสูงของภาพใบหน้าที่

ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตามรูปที่ 1 จะเป็นภาพที่บริเวณส่วนใบหน้าที่บุคคล ถูกเบลอด้วยระดับความเบลอที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดภาพ ขนาดใบหน้าที่และโครงสร้างที่

เป็นองค์ประกอบภายในหน้า เพื่อให้สามารถปิดบังลักษณะเฉพาะของบุคคล โดยยังคงรักษามิติของใบหน้าไว้ ซึ่งรูปร่างและขอบของพื้นที่ส่วนเบลอได้ถูกปรับให้มีความเป็นธรรมชาติกลมกลืนกับพื้นที่ส่วนปกติของภาพด้วย

3) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากวิธีการเบลอภาพที่นำเสนอในรูปที่ 1 ได้ทำการทดลองกับภาพอินพุตและใบหน้าขนาดต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้ สามารถปรับระดับความเบลอของหน้าตามขนาดและรายละเอียดของใบหน้าได้อย่างอัตโนมัติ โดยรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างภาพอินพุตขนาด 2320×3088 พิกเซล (กว้าง×สูง) ซึ่งจัดว่าเป็นภาพที่มีขนาดและใบหน้าใหญ่ โดยมีภาพที่ระดับความเบลอ (Img_{b_s}) ปานกลาง (Img_{b_m}) และมาก (Img_{b_l}) เรียงกันตามลำดับ จะเห็นว่า หากต้องการปกปิดใบหน้าจนไม่สามารถระบุตัวตนได้ จะต้องใช้ระดับความเบลอมาก เพื่อให้บริเวณส่วนที่ถูกจดจำลักษณะเฉพาะได้ง่าย เช่น ดวงตา เบลอมากเพียงพอ แต่ก็จะทำให้ส่วนอื่น ๆ พร่ามัวมากตามไปด้วย

รูปที่ 4 แสดง SSIM Map หลังการปรับค่าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน 0 ถึง 1 และภาพผลลัพธ์จากการนำไปกรองด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน และการปรับค่า Contrast ตามลำดับ โดยจาก SSIM Map จะได้ส่วนที่เป็นรายละเอียดของภาพและของใบหน้าแสดงเป็นสีดำหรือสีโทนมเข้ม และเมื่อนำภาพไปทำให้ราบเรียบขึ้น (Image Smoothing) ด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน ก็จะได้ภาพผลลัพธ์ที่มีความละมุนโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่างสีดำและสีขาว ซึ่งจะช่วยให้การเปลี่ยนแปลงระดับความเบลอมีความเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น โดยภาพล่างของรูปที่ 4 เป็นผลของการเพิ่ม Contrast ด้วยวิธี CLAHE เพื่อเน้นส่วนภาพที่ต้องการเบลอมากให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น และยังคงมีความละมุนในการไล่ระดับบริเวณขอบ มุมต่างๆ ของภาพ ซึ่งจะถูกใช้เป็น Opacity Map เพื่อการรวมภาพในลำดับถัดไป



ภาพอินพุต

เบลอเล็กน้อย



เบลอปานกลาง

เบลอมาก

รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพอินพุตและภาพระดับความเบลอต่าง ๆ



SSIM Map

Gaussian Blur of SSIM Map



Opacity Map

รูปที่ 4 SSIM Map, Gaussian Blur และ Opacity Map ของภาพระดับความเบลอมากในรูปที่ 3

รูปที่ 5 แสดงผลการรวมภาพโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจจับใบหน้า เพื่อกำหนดพื้นที่การเบลอภาพและการไล่ระดับระหว่างส่วนพื้นที่เบลอกับส่วนปกติของภาพ โดยเปรียบเทียบการรวมกันของภาพเบลอระดับปานกลาง (ภาพซ้าย) ภาพเบลอระดับมาก (ภาพขวา) และการผสมผสานความเบลอของภาพทั้งสองระดับด้วย Opacity Map (ภาพล่าง) ซึ่งพบว่า ภาพล่างสามารถเห็นส่วนประกอบภายในใบหน้า เช่น ตา จมูก ปาก ได้ชัดเจน มีมิติกว่าภาพขวา (เบลอมาก) แต่ภายในส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้มีความเบลอมากจนไม่สามารถเห็นรายละเอียดได้ชัด ดังเช่นภาพซ้ายที่เบลอในระดับปานกลาง จึงเป็นการเพิ่มมิติให้กับใบหน้าด้วยระดับความเบลอที่แตกต่างกันโดยใช้โครงสร้างตามธรรมชาติภายในภาพ เพื่อสร้างจุดเน้นของความพรั่มัวในองค์ประกอบที่ง่ายต่อการจดจำ ทั้งนี้สามารถดูภาพขนาดต้นฉบับได้ที่ลิงค์ <https://bit.ly/3cry03e>



ใบหน้าเบลอปานกลาง

ใบหน้าเบลอมาก



ใบหน้าเบลอด้วย Opacity Map

รูปที่ 5 ผลการรวมภาพสำหรับใบหน้าเบลอระดับปานกลาง มาก และด้วยวิธีที่นำเสนอ

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการเบลอใบหน้าด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ได้จากการตรวจจับใบหน้าแบบทั่วไป

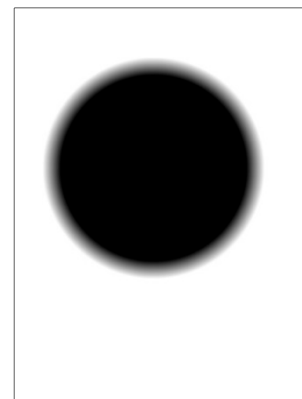
(ภาพซ้าย) กับพื้นที่วงกลม (ภาพขวา) โดยพบว่าพื้นที่วงกลมมีความเป็นธรรมชาติเข้ากับใบหน้ามากกว่า และเมื่อเพิ่มการไล่ระดับการเปลี่ยนแปลงความเบลอตามขนาดใบหน้าดังรูปที่ 7 (บริเวณขอบวงกลมสีดำเป็นภาพเบลอ ไล่ระดับไปยังสีขาวเป็นภาพปกติ) ก็จะได้ภาพผลลัพธ์ที่มีความกลมกลืนกับส่วนพื้นหลัง ดังแสดงในภาพล่างของรูปที่ 5 หรือเปรียบเทียบภาพต้นฉบับได้ที่ลิงค์ <https://bit.ly/3kN67W8>



พื้นที่เบลอสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พื้นที่เบลอวงกลม

รูปที่ 6 การเบลอใบหน้าด้วยพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและวงกลม



รูปที่ 7 การไล่ระดับการเปลี่ยนแปลงความเบลอบริเวณขอบวงกลม

ซึ่งได้ทำการทดลองเบลอใบหน้าของภาพจากฐานข้อมูลภาพ USC-SIPI (University of Southern California-Signal and Image Processing Institute) [19] และฐานข้อมูลภาพใบหน้า Labeled Faces in the Wild ของ University of Massachusetts, Amherst [20] รวมถึงภาพถ่ายบุคคลทั่วไปที่ถ่ายขึ้นใหม่และภาพจากผู้ใช้บริการภาพถ่าย Shutterstock [21] โดยรูปที่ 8 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ของภาพขนาด 3888x2592 และ 509x584 พิกเซล (กว้างxสูง) เปรียบเทียบ

ระหว่างการเบลอบใบหน้าด้วย Facepixelizer [14] (เครื่องมือที่มีฟังก์ชันการค้นหาใบหน้าและการเบลอภาพแบบอัตโนมัติ) กับการเบลอบใบหน้าในระดับมากและการเบลอโดยใช้ Opacity Map ซึ่งจากค่า SSIM เฉลี่ยของภาพ ($SSIM_{avg}$) พบว่า ภาพใบหน้าเบลอโดยวิธีที่นำเสนอมีค่า SSIM เฉลี่ยสูงกว่าภาพใบหน้าที่เบลอในระดับมากและภาพใบหน้าที่เบลอด้วย Facepixelizer หรือเรียกว่ามีความใกล้เคียงกับภาพอินพุตมากกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ค่าสูงสุด 1 ยิ่งมีความใกล้เคียงกับภาพอินพุต) ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ทางสายตาที่ Opacity Map ช่วยเพิ่มมิติให้กับองค์ประกอบภายในของใบหน้าเบลอขนาดใหญ่ในการปกปิดอัตลักษณ์บุคคล

ภาพขนาด 3888x2592 พิกเซล



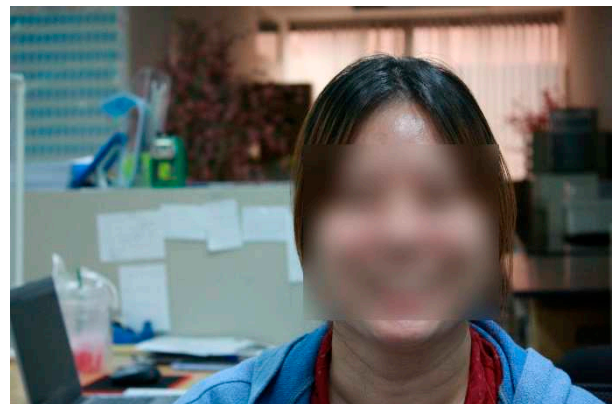
ภาพใบหน้าเบลอด้วย Facepixelizer ($SSIM_{avg} = 0.9238$)



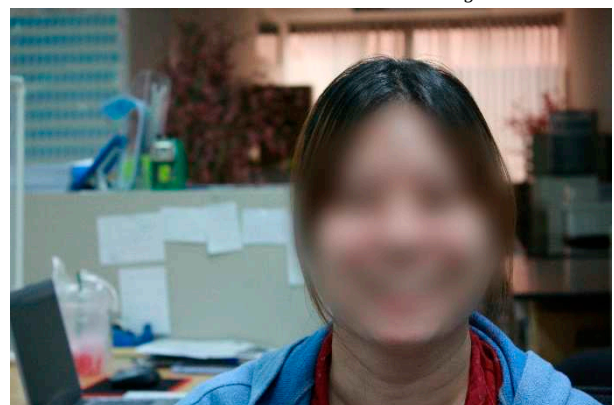
ภาพใบหน้าเบลอระดับมาก ($SSIM_{avg} = 0.9632$)



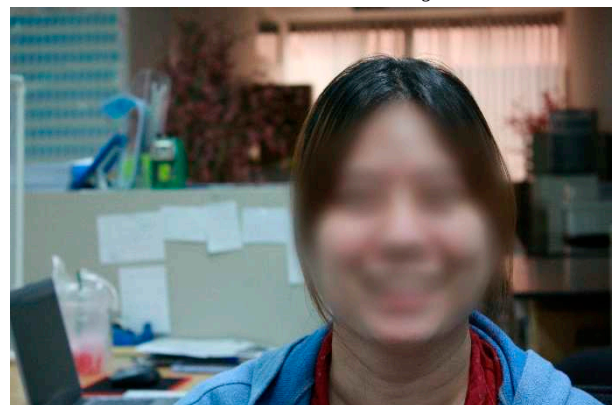
ภาพใบหน้าเบลอด้วยวิธีที่นำเสนอ ($SSIM_{avg} = 0.9659$)



ภาพใบหน้าเบลอด้วย Facepixelizer ($SSIM_{avg} = 0.9305$)



ภาพใบหน้าเบลอระดับมาก ($SSIM_{avg} = 0.9641$)



ภาพใบหน้าเบลอด้วยวิธีที่นำเสนอ ($SSIM_{avg} = 0.9661$)

ภาพขนาด 509×584 พิกเซล



ภาพใบหน้าเบลด้วย Facepixelizer ($SSIM_{avg} = 0.9402$)



ภาพใบหน้าเบลระดับมาก ($SSIM_{avg} = 0.9393$)



ภาพใบหน้าเบลด้วยวิธีที่นำเสนอ ($SSIM_{avg} = 0.9475$)

รูปที่ 8 ตัวอย่างภาพใบหน้าขนาดใหญ่เบลด้วย Facepixelizer และการเบลระดับมากกับการเบลด้วยวิธีที่นำเสนอ และค่า $SSIM_{avg}$

ซึ่งวิธีการเบลภาพที่นำเสนอนี้มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาการเบลภาพใบหน้าขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาพอินพุตที่มีขนาดใหญ่ เพื่อเพิ่มมิติให้กับใบหน้าและมีความเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นสำหรับใบหน้าขนาดกลางและเล็ก ก็สามารถถูกเบลในระดับที่เหมาะสมอย่างอัตโนมัติเพื่อปกปิดใบหน้าได้เช่นกัน ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9

ใบหน้าขนาดกลาง



ภาพขนาด 3888×2592 พิกเซล



ภาพขนาด 3024×4032 พิกเซล



ภาพขนาด 120×160 พิกเซล

ใบหน้าขนาดเล็ก



ภาพขนาด 3888×2592 พิกเซล

รูปที่ 9 ตัวอย่างภาพผลลัพธ์การเบลใบหน้าขนาดกลางและเล็ก

4) สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีเบลภาพใบหน้าขนาดใหญ่ด้วยการประยุกต์ใช้ค่าความคล้ายคลึงของโครงสร้างภาพ (SSIM) มาช่วยในการปรับระดับความเบลที่เหมาะสมกับโครงสร้างองค์ประกอบภายในใบหน้า เพื่อเพิ่มมิติ ความเป็นธรรมชาติ

ให้กับภาพ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอจะทำการตรวจจับใบหน้าและปรับระดับความเบลอลงอย่างอัตโนมัติตามขนาดภาพ ขนาดใบหน้าองค์ประกอบของหน้า และปรับรูปร่างพื้นที่ส่วนเบลอ ร่วมกับการไล่ระดับของส่วนภาพเบลอกับส่วนภาพปกติตามขนาดของใบหน้า เพื่อสร้างความกลมกลืนกับพื้นหลังของภาพ ซึ่งผลของการวิจัยนอกจากจะช่วยเพิ่มความเป็นธรรมชาติในการปกปิดใบหน้าขนาดใหญ่ที่อาจถูกแสดงในสื่อดิจิทัลต่าง ๆ เพื่อปกป้องสิทธิส่วนบุคคลแล้ว ยังสามารถใช้ในธุรกิจโฆษณาการจัดหาคู่แข่งเพื่อเบลอใบหน้าคู่แข่งที่น่าสนใจอย่างมีศิลปะก่อนการสมัครเข้าเป็นสมาชิก หรือนำไปต่อยอดร่วมกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อการเซ็นเซอร์ (Censor) บริเวณส่วนภาพที่ไม่ต้องการ เช่น ป้ายโฆษณาสินค้า หน้าจอโทรศัพท์มือถือ สถานที่ เครื่องดื่ม แอลกอฮอล์ อารู การกระทำที่มีความรุนแรงหรือไม่เหมาะสม ได้อย่างเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

REFERENCES

- [1] M. Gawron and U. Boryczka, "Heterogeneous fog generated with the effect of light scattering and blur," *JACS*, vol. 26, no. 2, pp. 31-44, Oct. 2019.
- [2] G. Mather, "The use of image blur as a depth cue," *Perception*, vol. 26, no. 9, pp. 1147-1158, Sep. 1997.
- [3] J. D. Pfautz, "Depth perception in computer graphics," Computer Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, Tech. Rep. UCAM-CL-TR-546, Sep. 2002.
- [4] S. A. Cholewiak, G. D. Love, and M. S. Banks, "Creating correct blur and its effect on accommodation," *Journal of Vision*, vol. 18, no. 9, pp. 1-29, Sep. 2018.
- [5] B. Ham, M. Cho, and J. Ponce, "Robust guided image filtering using nonconvex potentials," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 40, no. 1, pp. 291-207, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPAMI.2017.2669034.
- [6] L. Bao, Y. Song, Q. Yang, H. Yuan, and G. Wang, "Tree filtering: Efficient structure-preserving smoothing with a minimum spanning tree," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 555-569, Feb. 2014, doi: 10.1109/TIP.2013.2291328.
- [7] Q. Liu, B. Xiong, and M. Zhang, "Adaptive sparse norm and nonlocal total variation methods for image smoothing," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Dec. 2014, Art. no. 426125, doi: 10.1155/2014/426125.
- [8] F. Zhu, Z. Liang, X. Jia, L. Zhang, and Y. Yu, "A benchmark for edge-preserving image smoothing," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 7, pp. 3556-3570, Jul. 2019, doi: 10.1109/TIP.2019.2908778.
- [9] Z. A. Liu, Y. K. Hou, X. T. Zhen, J. Xu, L. Shao, and M. M. Cheng. (2020). Pixel-level non-local image smoothing with objective evaluation [Online]. Available: <https://csjunxu.github.io/paper/PNLS.pdf>
- [10] L. Xu, C. Lu, Y. Xu, and J. Jia, "Image smoothing via L_0 gradient minimization," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 6, Dec. 2011, Art. no. 174, doi: 10.1145/2024156.2024208.
- [11] X. Pang, S. Zhang, J. Gu, L. Li, B. Liu, and H. Wang, "Improved L_0 gradient minimization with L_1 fidelity for image smoothing," *Plos One*, vol. 10, no. 9, Sep. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0138682.
- [12] S. Velusamy, R. Parihar, R. Kini, and A. Rege, "FabSoftener: Face beautification via dynamic skin smoothing, guided feathering, and texture restoration," in *Proc. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 2248-2256, doi: 10.1109/CVPRW50498.2020.00273.
- [13] Adobe. "Adobe Photoshop." ADOBE.com. <https://www.adobe.com/products/photoshop.html> (accessed Sep. 26, 2020).
- [14] Rubber Duck Labs Inc. "Privacy image editor & anonymizer with face detection." FACEPIXELIZER.com. <https://www.facepixelizer.com> (accessed Sep. 26, 2020).
- [15] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, Apr. 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [16] K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization," in *Graphic Gems IV*. San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, 1994, pp. 474-485.



- [17] R. Lienhart, A. Kuranov, and V. Pisarevsky “Empirical analysis of detection cascades of boosted classifiers for rapid object detection,” in *Proc. of the 25th DAGM Symposium on Pattern Recognition*, Magdeburg, Germany, Sep. 2003, pp. 297-304.
- [18] P. Viola and M. Jones, “Robust real-time object detection,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 57, pp. 137-154, May 2004.
- [19] *USC-SIPI image database*, University of Southern California, Nov. 2020. [Online]. Available: <http://sipi.usc.edu/database>
- [20] *Labeled faces in the wild*, University of Massachusetts, Amherst, Nov. 2020. [Online]. Available: <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw>
- [21] Shutterstock, Inc., “Stock images,” SHUTTERSTOCK.com. <https://www.shutterstock.com/images> (accessed Nov. 1, 2020).

Hybrid Energy Harvesting System Based on Regenerative Braking System and Suspension Energy Harvesting for Middle Electric Vehicle

Kunagone Kiddee

Program in Electronics and Automation Systems Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Rangsit-Nakhonnayok Rd. Klong6, Thanyaburi Pathum Thani

Corresponding Author. E-mail address: kkunagone@gmail.com

Received: 22 October 2020; Revised: 8 December 2020; Accepted: 14 December 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

This research proposed a hybrid energy harvesting system (HEHS) based on Suspension Energy Harvesting using a regenerative shock absorber (RSA) with SC/Battery hybrid energy storage system (SCB-HESS) based regenerative braking system (RBS) for the middle electric vehicle (MEV). In the regenerative braking mode, the artificial neural network (ANN)-based RBS control mechanism was utilized to optimize the switching scheme of the three-phase inverter and transferred the braking energy to be stored in the energy storage devices. Furthermore, a supercapacitor-based RSA is capable of harvesting the vehicular suspension-vibration energy and converting it into electrical energy to extend energy storage devices. The experimental total energy harvesting efficiency of the supercapacitor-based RSA ranges between 21.74% and 49.93%, with an average total efficiency of 31.93%. In addition, the research findings revealed that the proposed hybrid energy harvesting system based on SCB-HESS-based RBS with suspension energy harvesting using RSA enhanced the regeneration efficiency of 31.75% compared with SCB-HESS-based RBS MEVs.

Keywords: Electric Vehicle (EV), Brushless DC (BLDC) motor, Neural Network (NN), Regenerative Braking System (RBS), Supercapacitor, Suspension-vibration energy.



I. INTRODUCTION

Rapid economic growth and rising affluence contributes to an increase in private-car ownership, which consequently contributes to increased toxic vehicular emissions. At present, most battery electric vehicles are run on electrochemical batteries (i.e. the main energy storage system) [1]-[6]. However, electrochemical batteries suffer from a number of drawbacks, including high cost, short life cycle, limited driving range and low power density as well as subsequent diminished regenerative braking efficiency. The present state of energy harvesting that efforts to convert lost energy into an available form does not focus on the vehicle but on components instead [1], [4]. Energy harvesting technology has significant potential for the present automotive industry by improving vehicle energy efficiency and fuel economy. For electric vehicles technologies, regenerative braking energy, and the vehicular suspension-vibration energy are the main targets of energy harvesting [7]. Furthermore, a bulky energy storage system (ESS) containing multiple battery packs is required to meet the vehicle regenerative braking efficiency.

To overcome the drawbacks, a hybrid energy storage system (HESS) based on multiple battery and supercapacitors (SC) was utilized to improve vehicle acceleration and prolong the battery life span [3]. Different energy management strategies have been proposed in literature for optimal power split strategies in HESSs [1]-[6]. Majority of the prior work is proposed for fuel cell systems hybridized with SC and/or batteries. Similar energy management techniques can be adopted for battery/SC hybridization. Strategies that are based on heuristics or empiric experience can be easily implemented by rule-based control algorithms [4]-[6] or using fuzzy logic methods [1], [4]. The simple filter-based or frequency-based power split strategies have been implemented in [11] and [12].

For a conventional EV, a significant amount of energy is consumed in urban driving cycles by braking [1], [2]. To improve the performance of EVs, the regenerative braking system has been developed. It utilizes the electric motor, providing negative torque to converting kinetic energy to electrical energy for recharging the energy storage devices. The dissipation of kinetic energy during braking, by an electric vehicle can be recovered advantageously by controlling the power electronics for total energy management onboard the vehicle. Therefore, regenerative braking is an efficient technology to improve the efficiency of electric vehicles. Various attempts to satisfy the control performance needs for regenerative braking have been presented in the literature, such as rule-based strategies [5]-[6], PID control strategies [3]-[5], and neural network approaches [4]. in the regenerative braking condition, the DC-link voltage is boosted. Hence, the ANN controller-based RBS program transferred the braking energy to store in the SC. [5]-[6]. Specifically, the battery/SC HESS scheme utilizes the high power density of an SC and the high energy density of a battery. Nevertheless, a high-power electronic interface, e.g. the bidirectional DC/DC converter, is required to connect the battery and the SC, rendering it cost-ineffective [1]-[6]. Moreover, the high-power electronic interface induces the power dissipation and the subsequent diminished regenerative braking efficiency [6].

In practice, shock-absorber vibration energy corresponds to road roughness and vehicle speed [7], [8], and [10], experimented with the hydraulic damper with a permanent-magnet synchronous machine and variable resistors; Despite extensive studies focused on regenerative shock absorbers (i.e. electromagnetic, hydraulic and mechanical schemes) [9]-[15] and [18], The electricity produced by the generator is stored in supercapacitors to charge the battery and extend the

range of EVs. The mechanical properties of the full-scaled fabricated prototype were studied by utilizing a mechanical testing and sensing fixture. An average power output of 3.701 W in 1Hz-3 mm sinusoidal vibration input and a peak efficiency of 51.1% and average efficiency of 36.4% were achieved in a bench test [14]-[16].

Several designs of energy harvesting suspension systems have been presented and optimized in order to ensure an improved performance for different applications. Moreover, regenerative braking has already been available and applied to hybrid and electric vehicles commercially. However, both the energy harvesting suspension systems and regenerative braking technology is still under continuous development. It can be concluded through studies that both energy harvesting methods have limitations such as total weight increases, extra space requirements, system losses, efficiency losses, costs, etc. In this respect, optimizations continue for more light weighted designs with choosing the more suitable material selection, power electronic interface, suitable switching control and dimensional designs [7], [17].

Specifically, this research experiments with the proposed a HEHS based on suspension energy harvesting using regenerative shock absorber (RSA). The proposed RSA composed of three main parts; the suspension vibration energy, conversion mechanism and energy storage modules with SC/battery Hybrid Energy Storage System (SCB-HESS) based RBS, in the regenerative braking condition, the DC-link voltage is boosted. Hence, the ANN-based RBS program with suitable switching pattern of three phase inverter

transferred the braking energy to store in the SC, both the energy harvesting was utilized to extend the battery life and the driving range for MEV.

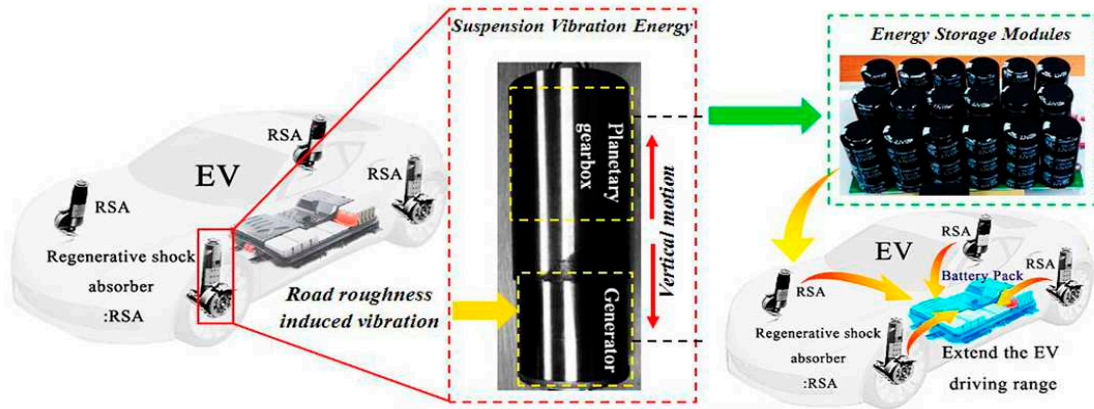
II. THE SCB-HESS REGENERATIVE MODE

In the SC-enabled regenerative braking mode, the DC-link voltage is boosted and power diode becomes forward-biased a boost circuit of the three-phase inverter can be formed. High sides of the switches of the half-bridge are turned off and the low sides of the switches are pulse width modulated [6]. The regenerative braking energy is then transferred and stored in the SC module (Figure 1 b) Conventionally, an additional buck-boost DC/DC converter is deployed to transfer the braking energy to the SC, as shown in Figure 1, (a) SC-enabled regenerative braking mode by regenerative shock absorbers, and (b) SC-enabled regenerative braking by RBS.

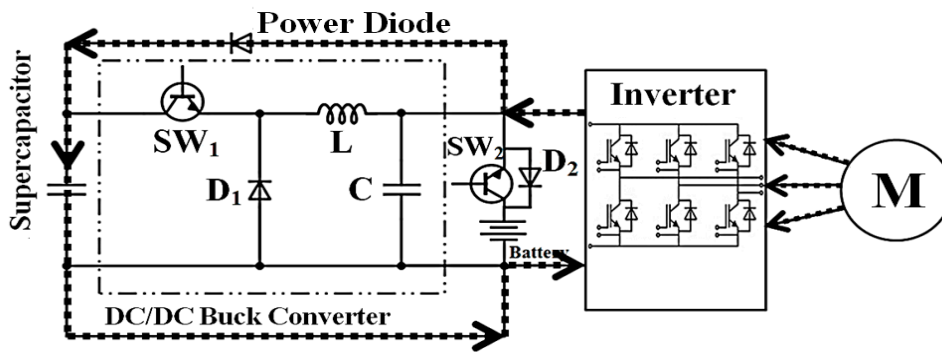
III. THE CONVERSION MECHANISM

The conversion mechanism converts the bidirectional between the inner and outer cylinders in linear motion (up-down movements) into a unidirectional rotation to drive the generator shaft. Figure 2(a) illustrates the prototype and 3D model of the RSA, consisting of two cylinders, bevel gears, overrunning clutches, rack-pinions, a shaft and internal gear as shown in Figure 2(b) [15].

In Figure 2(b), the shaft with two pinions is assembled without being stationary. The unidirectional overrunning clutches (CSK-PP type) are fitted to the shaft and fixed into the pinions [15].



(a)



(b)

Figure 1 The conversion mechanism of the proposed system (a) SC-enabled regenerative braking mode by regenerative shock absorbers (b) SC-enabled regenerative braking by RBS

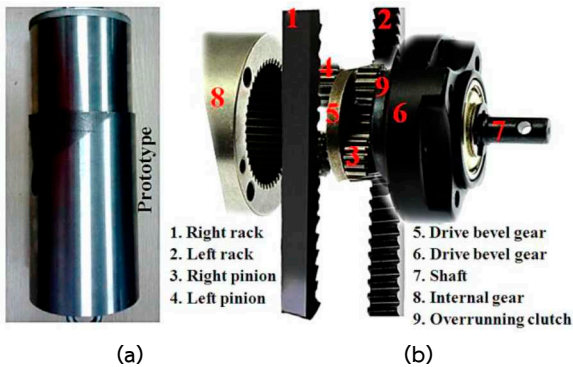


Figure 2 The prototype and 3D model of the RSA: (a) outer, and (b) inner structure

Upon vibration, the alternating pattern of movement between the inner and outer cylinders in linear motion induces the upward and downward movements of the racks. The racks then transmit the vertical movements to the left-right pinions. Given the rack and pinion assembly, the two pinions rotate in

directions opposite to each other [15]. The dual overrunning clutches alternately engage and disengage the shaft (i.e. if one overrunning clutch engages, the other disengages), This, results in the unidirectional rotation motion of an output shaft, independent of the movement of the racks, as shown in Figure 3.

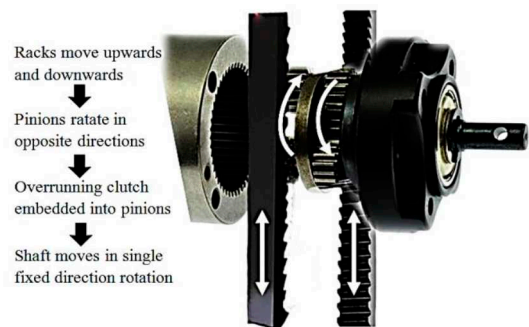


Figure 3 The conversion mechanism with bidirectional linear motion into a unidirectional rotation

IV. SYSTEM POWER ANALYSIS

In this study, the conduction and switching losses of the dc–dc buck converter is considered for buck mode. The dc–dc buck converter power electronic interface conduction losses of the high-side switch is computed as

$$P_{on,H} = I_{out}^2 \times R_{on,H} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

The dc–dc converter conduction losses of the low-side IGBT can be written as

$$P_{on,L} = I_{out}^2 \times R_{on,L} \times \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (2)$$

where V_{in} is the input voltage, and V_{out} is the output voltage. $P_{on,H}$ is the high-side IGBT on resistance, $P_{on,L}$ is the low-side IGBT on resistance.

The switching losses of dc–dc converter can be expressed as:

$$P_{sw,loss} = f_s \left(\frac{1}{2} V_G |I_L| (t_r + t_f) + \frac{1}{2} V_G^2 C_{oss} + Q_{charge} V_G + V_G Q_{rr} \right) \quad (3)$$

C_{oss} is the output capacitance of IGBT. Q_{charge} is the gate charge due to charging the gate capacitance by gate voltage. Q_{rr} is the reverse recovery charge. V_G is the gate voltage. t_r and t_f are the rise-time and fall-time transitions of IGBTs during switching periods.

The total power losses in HESS are the sum of power losses in the dc–dc buck converter, inverter, motor, during braking and the SC/battery as

$$P_{HESS,loss} = P_{on,H} + P_{on,L} + P_{sw,loss} + P_{Diode} + P_{Inv.Mot,loss} + P_{brake} + I_{SC}^2 R_{SC} + I_{batt}^2 \quad (4)$$

where $P_{Inv.Mot,loss}$ is the power of losses at power level (P). Since the total power loss is obtained, the

efficiency can be calculated with the following equation

$$\eta = \frac{V_{OUT} \times I_{OUT}}{(V_{OUT} \times I_{OUT}) + P_{HESS,loss}} \quad (5)$$

where V_{OUT} is the output voltage. I_{OUT} is the output current.

This part investigates the effects of the RSA scheme parameters (e.g. damping force, excitation force) on the output power efficiency. Specifically, the damping force (F_d) of the RSA can be expressed as

$$F_d = F = m_{eq} \ddot{x} + \dot{C}_L = m_c + 2m_r + \frac{J_g + J_{pg} + J_b + J_s + 2J_p}{r^2} \times \ddot{x} + \frac{1.5 \times k_e^2}{\beta_g \beta_{pg} \beta_b \beta_{rp} i^2 r^2 (R_e + R_i)} \times \dot{x} \quad (6)$$

where F_d is the damping force, F is the excitation force, x is the excitation speed, and $\beta_g, \beta_{pg}, \beta_b, \beta_{rp}$ are the efficiency of the generator, planetary gearbox, bevel gear and rack-pinion, respectively. m_c and m_r are the mass of the outer cylinder and the rack, while, $J_g, J_{pg}, J_b, J_s, J_p$ are the inertia of the generator, planetary gearbox, bevel gear, shaft and pinion respectively. k_e is the rotary damping coefficient, R_i is the Internal resistor of each phase of the generator charging circuit, R_e is external resistors, r is the radius of the pinion, i is the planetary gear ratio and C_L is the linear damping coefficient[15].

The mechanical efficiency (β_m) of the RSA is expressed as

$$\beta_m = \beta_g \beta_{pg} \beta_b \beta_{rp} \quad (7)$$

Substituting (2) into (1) yields

$$\beta_m P_{input} = P_E \quad (8)$$

where P_E is the electrical power, which comprises the fragment charge captured ($P_{captured}$) and the fragment lost to the internal resistance (P_{lost}) of the generator, which can be calculated as:

$$P_E = P_{captured} + P_{lost} \quad (9)$$

Thus, the electrical efficiency of the RSA is calculated by

$$\beta_e = \frac{P_{captured}}{P_{captured} + P_{lost}} \quad (10)$$

The linear damping coefficient can be calculated as follows:

$$C_L = \frac{\Delta W}{\pi \omega A^2} \quad (11)$$

where C_L is the linear damping coefficient, ΔW is the mechanical work input of the RSA, ω and A are the frequency and amplitude of the sinusoidal vibration, respectively.

V. DESIGN OF BEACH TEST EXPERIMENTAL

In this research, a 20 kW BLDC motor [6] was selected since it has higher power to weight ratio efficiency compared to other motors. For example, in comparison to an induction motor, the 20 kW BLDC motor has a weight of 40.5 kg, which is lighter than the 20 kW BLDC motor which has a weight of 102.5 kg. For this reason, it is lighter, smaller, and more suitable for installation in middle electric vehicles with a weight range of 400-800 kg and suitable for an average running speed of 30-85 km/h. Details for the beach test experimental are shown in Figure 4.

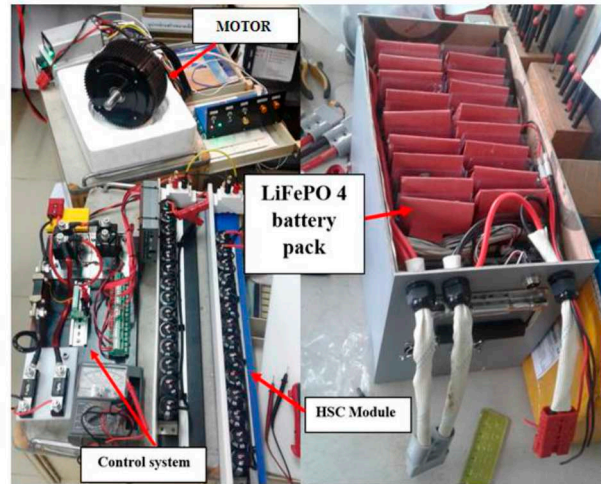


Figure 4 Test bench experiment of regenerative braking system.

VI. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 shows the simulation and experiments of the relationship between speed and the time spent using the braking range of 9.26 seconds at a pre-braking speed of 34.84 km/h to evaluate the supercapacitor pressure before/after braking which results from the simulation found that during the previous period and after braking for 9.26 seconds at an average speed of 34.15 km/h before the braking speed, SC voltage is increased after braking to 5.8 v, where Table I shows the experimental results, kinetic energy before braking and the energy stored after braking at the speed before braking, averaging 9.41 m/s at the time of braking at 9 seconds. The energy stored after braking averages at 3,215.02 joules. The kinetic energy that occurs before braking averages at 27,250.90 joules.

The RSA bench-test experiments carried out subject to sinusoidal vibration given variable frequencies (2.0, 2.5, 3.0, 3.5 Hz) and amplitudes (3, 6, 9 mm) for the force-displacement loops. The experimental platform of the RSA prototype using HS-5042-AF2 electronic shock absorber testing system and a UTD2102CEX-EDU digital oscilloscope to record the voltage signals from the generator. Due to the dimensional limitations, the maximum amplitude of the prototype RSA is 9 mm.

Table 1 Experimental and Simulation Specifications

Set	Speed before braking (m/s)	Total kinetic energy before braking(J)	Duration of braking (s)	Energy recovered (J)
1	9.60	27,490.43	9.24	2,240.31
2	9.71	28,523.75	9.28	2,811.49
3	9.55	27,233.27	9.24	3,286.39
4	9.59	27,531.91	9.32	3,491.02
5	9.52	27,438.08	9.25	4,127.75

The efficiency of the proposed method can be evaluated by comparing the SOC of the hybrid energy storage device. (SC and batteries) during the driving cycle of MEV, Figure 5 shows the comparison of simulations and experiments for the charge status of the SC and battery under 2 conditions: the system recovers braking using SC with the charge status of the SC and the battery starting at 87.2% and 82.6%. The system recovers braking using battery with the SOC of SC and batteries starting at capacitors 96.1% and 85.5%.

The multi-layer feed-forward ANN provide satisfactory ANN capability in this proposed scheme. The inputs comprise the vehicle speed, states of charge (SOC) of the SC and the battery, and the number of brake situation per drive cycle. The regenerative braking force of the front wheel are the outputs of the ANN algorithmic scheme. Five neurons in hidden layer are analyzed. Meanwhile, the hidden layer of the algorithmic scheme consists of five neurons whose activation functions are of sigmoid function [6].

The artificial neural network (ANN)-based RBS control mechanism was utilized to optimize the switching scheme of the RBS's three-phase inverter. In the regenerative braking mode, the ANN-based SC/battery RBS transferred the braking energy to be stored in the SC [6].

In the first case, the initial SOC value of the SC and the battery are set at 80.2% and 82.4% respectively. Therefore, the SC voltage is still far from the safety threshold of 93%, braking with the battery will not be activated. Consequently, there will be only SC used to store energy from braking in this case. With the SC status and battery in this case, Figure 6 shows the second case of braking, in which the SOC of the SC is set to an initial value of 96.2%, in this case, since the capacitor status (SOC) of the capacitor exceeds the set safety threshold.

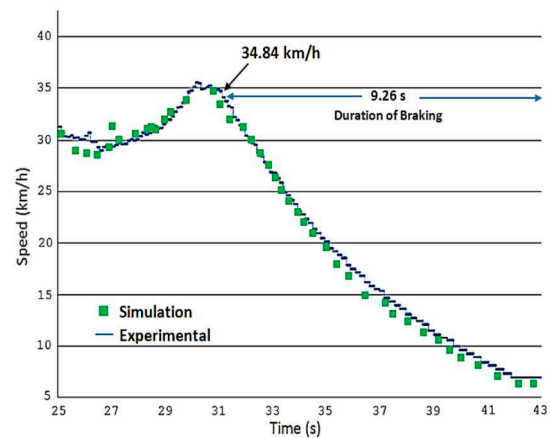


Figure 5 The simulation and experiments of the speed and time spent using the braking range of 9.26 seconds.

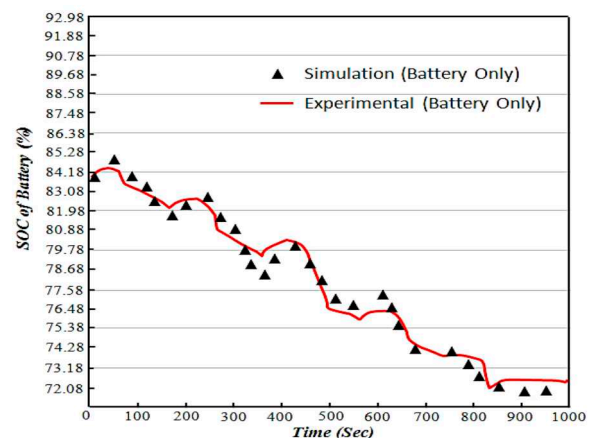


Figure 6 The initial SOC of 83.2% (Battery)

Table 2 tabulates the optimal simulation parameters of the RSA scheme. The RSA scheme was simulated using MATLAB based sinusoidal vibration under variable frequencies (2.0,2.5,3.0, 3.5 Hz) and amplitudes (3, 6, 9 mm) for the force-displacement loops. The sinusoidal vibration (x) function can be expressed as, where x is the sinusoidal vibration, t is the period time of frequency, **A** and **ω** are the amplitude and frequency of the sinusoidal vibration, respectively.

Figures 7(a)-(c) illustrate the simulated force-displacement loops of the proposed RSA scheme associated with 3, 6 and 9 mm amplitudes, given the frequencies of 2.0,2.5, 3.0, 3.5 Hz. The simulation results indicated that the regenerative shock absorber satisfied the requirements for conventional shock absorbers, particularly terms of in damping and elasticity [10]. The orientation of the force-displacement loops is non-horizontal and oblong-shaped, while the mass inertia is related to the negative slope. In addition, the ideal force-displacement loops could be achieved with the optimal simulation parameters [10], [11]

The simulation results also revealed that the vibrational frequency is positively correlated to the force-displacement loop slope, given 3, 6, 9 mm amplitudes. In other words, the loop slope increases with an increase in the excitation frequency. The non-horizontal loops are attributable to the masses of the outer cylinder (m_c) and the rack (m_r) as well as the inertia of the moving parts, i.e. the pinions, shaft, bevel gears, planetary gearbox and generator, as estimated by Eq. (1). By comparison, the simulated mechanical work input of the RSA (ΔW) (i.e. inner-loop area) increases with an increase in amplitude (3, 6, 9 mm), given the same excitation frequency.

Table 2 Experimental Optimal Simulation Parameters of the RSA

Parameter	Value
Pinion inertia J_p	32.275 kg mm ²
Shaft inertia J_s	3.251 kg mm ²
Bevel gear inertia J_b	4.811 kg mm ²
Planetary gearbox inertia J_{pg}	0.22 kg cm ²
Rotor inertia of generator J_g	0.5 kg cm ²
The mass of outer cylinder m_c	3.401 kg
The mass of rack m_r	0.197 kg
The rotary damping coefficient k_e	0.0512 V s/rad
the planetary gearbox ratio i	1:35

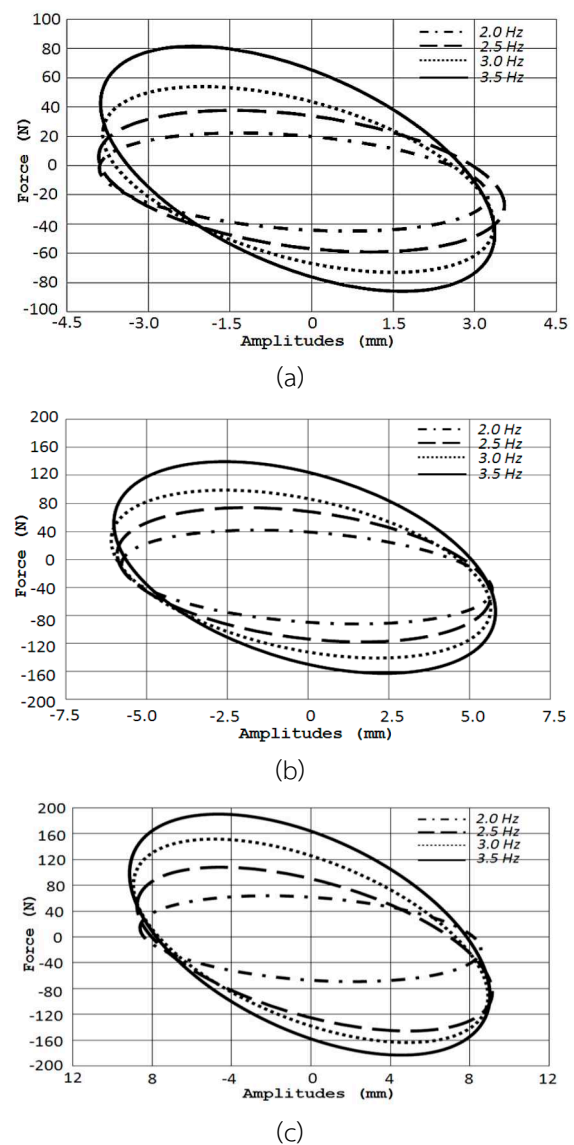


Figure 7 The simulated force-displacement loops under the frequencies of 2.0, 2.5, 3.0, 3.5Hz given the amplitude of: (a) 3 mm, (b) 6 mm and (c) 9 mm

Figure 8 illustrates the 9 mm-amplitude experimental force-displacement loops of the RSA scheme, given the frequencies of 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 Hz. The inner-loop area represents the mechanical work input (ΔW) of the RSA.

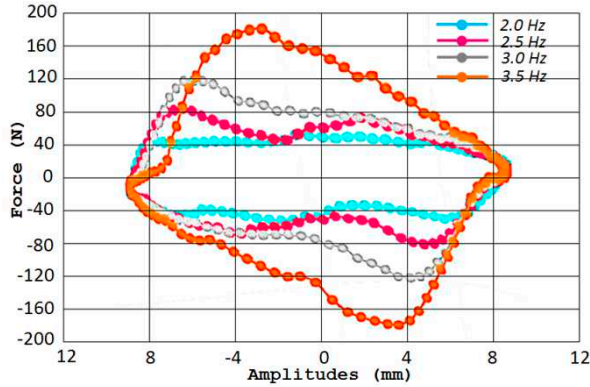


Figure 8 The experimental (bench test) force-displacement loops under frequencies of 2.0, 2.5, 3.0, 3.5Hz given amplitude of 9 mm

The average experimental linear damping coefficient (CL) is 1731.4 Ns/m, given 9 mm amplitudes. The experimental result closely resembles the calculated result of 1811.4 N s/m, calculated by (11).

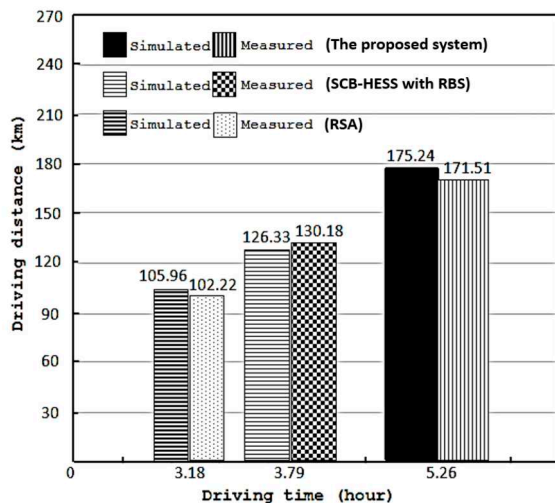


Figure 9 The driving range of the EV with RSA only, with the SCB-HESS with RBS only, with the proposed system (RSA with the SCB-HESS-based RBS)

Figure 9 compares the driving ranges and duration (drive cycle) of the EV without the RSA only, with SCB-HESS-based RBS, with the proposed system, given that one drive cycle is 8140.41 m with a total travelling time of 882.10 seconds. In the absence of the RSA only, the vehicle could travel 105.96 km (13 cycles) while, under the SCB-HESS-based RBS condition, the distance travelled by the EV was 126.33 km (15.5 cycles). Meanwhile, the distance logged by the vehicle with proposed system was 175.24 km (21.5 cycles), an increase of 48.91 km (6 cycles) compared to that of the RSA only vehicle.

VII. CONCLUSION

In this paper, a hybrid energy harvesting system was proposed based on a regenerative braking system and Suspension Energy Harvesting using Mechanical Regenerative Shock Absorber with SCB-HESS-based RBS for middle electric vehicles (MEV). In the regenerative braking mode, the DC-link voltage is boosted, and ANN-based RBS program transfers the braking energy to store in the energy storage devices.

In this study, experimental were carried out for an RSA prototype fabricated and bench-tested subject to sinusoidal vibration. The experimental RSA total efficiency (β) was in the range of 21.74% -49.93%, with an average total efficiency of 31.93%. The total efficiency was positively correlated with the vibrational frequency and amplitude. The maximum total efficiency of 63.22% was achieved at 3.5 Hz frequency and 9 mm amplitude, to comparatively assess the performance of the proposed hybrid energy harvesting system, the simulations were carried out under the NYCC drive cycle. The results showed that the regeneration efficiency was improved about 31.75% in comparison with SCB-HESS-based RBS.

The proposed SCB-HESS-based RBS with suspension energy harvesting is capable of harvesting the braking

energy and the suspension vibration energy used for renewable energy applications to extend the battery life and the EV driving range.

REFERENCES

- [1] J. Shen and A. Khaligh, "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 223-231, Oct. 2015.
- [2] A. Santucci, A. Sornioti, and C. Lekakou, "Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications," *Journal of Power Sources*, vol. 258, pp. 395-407, Jul. 2014.
- [3] S. Dusmez and A. Khaligh, "A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor-Battery vehicle deploying two propulsion machines," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1960-1971, Aug. 2014.
- [4] M. Wlas, Z. Krzeminski, J. Guzinski, H. A. Rub, and H. A. Toliyat, "Artificial-neural-network-based sensorless nonlinear control of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, No. 3, pp. 520-528, Sep. 2005.
- [5] A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki, and A. Kara, "Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 2, pp. 806-815, Feb. 2013.
- [6] X. Nian, F. Peng, and H. Zhang, "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5798-5808, Jan. 2014.
- [7] U. Aksu and R. Halicioglu, "A review study on energy harvesting systems for vehicles," *Tehnički Glasnik*, vol. 12 no. 4, pp. 251-259, Dec. 2018, doi: 10.31803/tg-20180210153816.
- [8] M. A. A. Abdelkareem, L. Xu, M. K. A. Ali, A. Elagouz, J. Mi, S. Guo, Y. Liu, and L. Zuo, "Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review," *Applied Energy*, vol. 229, pp. 672-699, Nov. 2018.
- [9] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, "Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications-a comprehensive review," *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1083-1094, Feb. 2018.
- [10] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1-18, Jul. 2017.
- [11] W. Salman, L. Qi, X. Zhu, H. Pan, X. Zhang, S. Bano, Z. Zhang, and Y. Yuan, "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles," *Energy*, vol. 159, pp. 361-372, Sep. 2018.
- [12] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2237-2245, Jun. 2008.
- [13] L. W. Ching, L. C. Liang, H. P. Min, and W. M. Tzong, "Realization of anti-lock braking strategy for electric scooters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2826-2833, Jun. 2014.
- [14] Z. Fang, X. Guo, L. Xu, and H. Zhang, "Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 1-9, May 2013, doi: 10.1155/2013/943528.
- [15] Z. Zhang, X. Zhang, W. Chen, Y. Rasim, W. Salman, H. Pan, Y. Yuan, and C. Wang, "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle," *Applied Energy*, vol. 178, pp. 177-188, Sep. 2016.
- [16] Z. Wang, T. Zhang, and Z. Zhang, "A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles," *Energy and Built Environment*, vol. 1, no. 1, pp. 36-49, Jan. 2020.
- [17] Y. Zhang, X. Zhanga, M. Zhana, K. Guoa, F. Zhao, and Z. Liu, "Study on a novel hydraulic pumping regenerative suspension for vehicles," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, no. 2, pp. 485-499, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jfranklin.2014.06.00.
- [18] Z. Zhao, T. Wang, B. Zhang, and J. Shi, "Energy Harvesting from Vehicle Suspension System by Piezoelectric Harvester," *Journal of the Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, 2019, Art. no. 1086983, doi: 10.1155/2019/1086983.

การปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไป

วรากร ศรีเขวงทรัพย์^{1*} กัญติชา กิตติพิรชล² ชาตรี ทองวรรณ³

^{1,2}ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมคอมพิวเตอร์หุ่นยนต์และเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น กรุงเทพฯ
ประเทศไทย

³สาขาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด ร้อยเอ็ด ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : warakorn@tni.ac.th

รับต้นฉบับ: 12 พฤศจิกายน 2563; รับบทความฉบับแก้ไข: 25 พฤศจิกายน 2563; ตอรับบทความ: 26 พฤศจิกายน 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ อาจจะมีช่องสัญญาณท้ายเฟรมที่ไม่มีผู้ใช้รายใดเข้าใช้งาน ซึ่งส่งผลให้เกิดช่องสัญญาณที่สูญเสียไป บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยใช้วิธีการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปท้ายเฟรม บทความฉบับนี้นำเสนอ 2 อัลกอริทึม ซึ่งได้แก่ อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในเฟรมสุดท้าย และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม จากผลการทดสอบพบว่า อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในเฟรมสุดท้ายมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้ง 2 วิธี สามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้ดี โดยเฉพาะกรณีที่มีจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมาก ทั้งนี้ควรเลือกใช้จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

คำสำคัญ : IEEE 802.11 DCF การลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไป การแก้ปัญหาการชนกัน

Improving the Performance of IEEE 802.11 DCF with Constant Contention Window by Reducing the Wasted Time Slots

Warakorn Srichavengsup^{1*} Kanticha Kittipeerachon² Chatree Thongwan³

^{1*,2}*Computer Engineering Robotics and Technology Research Laboratory : CERT
Faculty of Engineering, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand*

³*Computer and Information Technology Department, Faculty of Information Technology, Roi Et Rajabhat
University, Roi Et, Thailand*

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

Received: 12 November 2020; Revised: 25 November 2020; Accepted: 26 November 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

In the contention resolution of the IEEE 802.11 DCF algorithm with constant contention window, there may be wasted slots at the end of the frame. This paper proposes two algorithms to improve the performance of IEEE 802.11 DCF algorithm with constant contention window by using the method of reducing the wasted slots at the end of the frame. The first algorithm is reducing wasted slots at the end of last frame (RLF) and the second algorithm is reducing wasted slots at the end of every frames (REF). Based on the results, it is found that the REF algorithm offers superior performance and the RLF algorithm performs better than the IEEE 802.11 DCF with constant contention window algorithm. We can conclude that both proposed algorithms can improve system performance, especially when there are large amounts of slots per frame. The appropriate number of slots per frame should be used in order to ensure optimal system performance.

Keywords: IEEE 802.11 DCF, Reducing wasted slots, Contention resolution

1) บทนำ

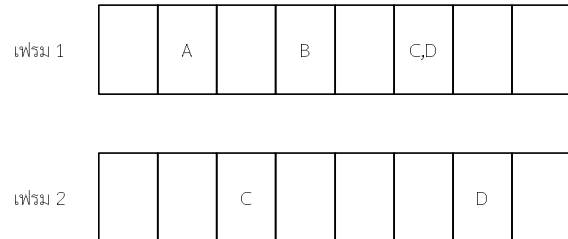
ในยุคโลกดิจิทัล มีความต้องการสื่อสารข้อมูลที่รวดเร็ว และรองรับผู้ใช้งานได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อมีความต้องการของผู้ใช้งานในระบบเป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณ เพราะหากไม่มีการควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณ อาจจะทำให้ผู้ใช้หลายรายส่งข้อมูลพร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการชนกันของข้อมูลอยู่เรื่อย ๆ โดยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมาแบ่งออกได้ 2 ประเภท อัลกอริทึมประเภทแรก ได้แก่ อัลกอริทึมที่ไม่มีการชนกันของข้อมูล ตัวอย่างของอัลกอริทึมประเภทนี้ ได้แก่ TDMA [1], FDMA [2] และ CDMA [3] ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้ จะมีการจัดสรรทรัพยากรให้กับผู้ใช้แต่ละราย จึงไม่เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น แต่อัลกอริทึมเหล่านี้มีข้อจำกัดตรงที่ หากผู้ใช้รายใดรายหนึ่งไม่มีข้อมูลที่จะส่งในขณะนั้น ช่องสัญญาณที่ถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้รายนั้น จะไม่สามารถนำมาให้ผู้ใช้รายอื่นใช้งานได้ ในขณะที่อัลกอริทึมประเภทที่ 2 ได้แก่ อัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาการชนกันของข้อมูล โดยอัลกอริทึมประเภทนี้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับผู้ใช้เป็นจำนวนมาก อย่างเช่น อัลกอริทึม ALOHA [4]-[6] อัลกอริทึม slotted ALOHA [7], [8] อัลกอริทึม Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [9], [10], IEEE 802.11 DCF [11], [12] และ IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ [13] ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้ มีความยืดหยุ่นตรงที่สามารถรองรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้ บทความวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยใช้วิธีการลดช่องสัญญาณในช่วงท้ายเฟรมที่สูญเปล่า

สำหรับเนื้อหาของบทความวิจัยฉบับนี้ เริ่มจากการแสดงรายละเอียดของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ จากนั้นจะกล่าวถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในการลดช่องสัญญาณท้ายเฟรมที่สูญเปล่า ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล จากนั้น จึงสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความ

2) อัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่

อัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ มีหลักการทำงานดังนี้ หากกำหนดให้ขนาดเฟรมเท่ากับ W ผู้ใช้แต่ละรายจะสุ่มเลือกช่องสัญญาณ 1 ช่อง จาก W ช่อง หากมีผู้ใช้หลายรายเลือกช่องสัญญาณเดียวกันจะเกิดการชนกันขึ้น และผู้ใช้ที่เกี่ยวข้องกับการชนจะรอส่งข้อมูลในเฟรมถัดไป ในกรณีที่มิ

ผู้ใช้เพียงรายเดียวเข้าใช้ช่องสัญญาณ ผู้ใช้รายนั้นจะประสบความสำเร็จในการส่งข้อมูล หากไม่มีผู้ใช้รายใดเลยส่งข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณนั้นคือว่าง และเมื่อผู้ใช้ทุกรายส่งข้อมูลสำเร็จ เวลาประวิง (delay) จะเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมคูณด้วยจำนวนเฟรมที่ใช้ไปทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูปกำหนดให้ขนาดช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 8 ช่อง และมีผู้ใช้ A B C และ D เข้าใช้ช่องสัญญาณในเฟรมแรก โดยมีเพียงผู้ใช้ A และ B ที่ประสบความสำเร็จในการส่งข้อมูล ในขณะที่ผู้ใช้ C และ D จองช่องสัญญาณเดียวกัน จึงเกิดการชนกันขึ้น ทำให้ต้องรอส่งข้อมูลใหม่ในเฟรมถัดมา และในเฟรมที่ 2 ผู้ใช้ C และ D ประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ เมื่อคำนวณเวลาประวิงจะเท่ากับ จำนวนเฟรมคูณด้วยจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม นั่นคือ เวลาประวิงเท่ากับ $2 \times 8 = 16$ ช่องสัญญาณ



รูปที่ 1 ตัวอย่างการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่

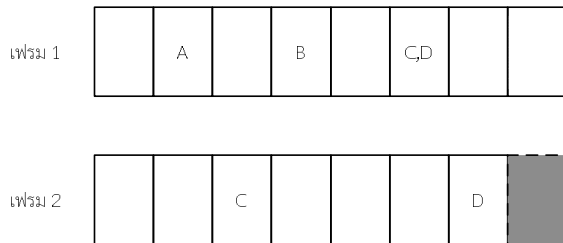
3) อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเปล่า

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า ในช่วงท้ายของแต่ละเฟรม จะมีช่องสัญญาณที่ว่างเปล่าอยู่ นั่นคือ ในเฟรมแรกผู้ใช้ทุกรายเข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 6 ในเฟรมที่ 2 ผู้ใช้ที่เหลืออยู่เข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 7 ซึ่งช่องสัญญาณท้ายเฟรมนี้ เป็นช่องสัญญาณที่สูญเปล่า เนื่องจากไม่มีการใช้งาน บทความวิจัยนี้ จึงนำเสนออัลกอริทึมที่ช่วยในการลดช่องสัญญาณที่สูญเปล่า โดยแบ่งออกได้ดังนี้

3.1) อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเปล่าในเฟรมสุดท้าย

หลักการของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเปล่าในเฟรมสุดท้ายมีรายละเอียดดังนี้ ในเฟรมสุดท้ายเมื่อผู้ใช้ทุกรายเข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จ ให้ระบบยุติการจองเวลาของช่องสัญญาณที่เหลือในเฟรม อย่างเช่น ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าในเฟรมที่ 2 ผู้ใช้ที่เหลืออยู่เข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จตั้งแต่

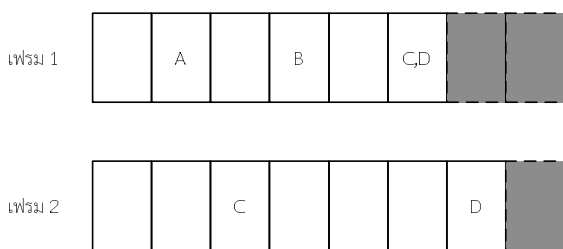
ช่องสัญญาณที่ 7 ให้ระบบยุติการจองเวลาของช่องสัญญาณที่ 8 ซึ่งส่งผลให้อัลกอริทึมนี้สามารถลดเวลาที่สูญเสียไป 1 ช่องสัญญาณ นั่นคือเวลาประวิงจะลดลงจาก 16 ช่องเป็น 15 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในเฟรมสุดท้าย

3.2) อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม

หลักการของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมเป็นดังนี้ ในแต่ละเฟรมเมื่อผู้ใช้ทุกรายเข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จ ให้นำเวลาของช่องสัญญาณที่เหลือไปใช้ในการส่งข้อมูลในเฟรมถัดไป อย่างเช่น ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าเฟรมที่ 1 ผู้ใช้ทุกคนเข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 6 ให้ออกเลิกการจองเวลาของช่องสัญญาณที่ 7 และ 8 และนำเวลาที่ยกเลิกไปใช้ในการส่งข้อมูลในเฟรมถัดไป ในเฟรมที่ 2 ผู้ใช้ทุกคนเข้าใช้ช่องสัญญาณเสร็จตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 7 ให้ออกเลิกการจองเวลาของช่องสัญญาณที่ 8 ซึ่งอัลกอริทึมนี้จะช่วยลดเวลาที่สูญเสียไป 3 ช่องสัญญาณ นั่นคือ เวลาประวิงเท่ากับ 13 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเข้าใช้ช่องสัญญาณของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม

4) ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนนี้ จะเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำเสนอซึ่งได้แก่ อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม

สุดท้าย อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมและอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยมีการทดสอบดังนี้

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่

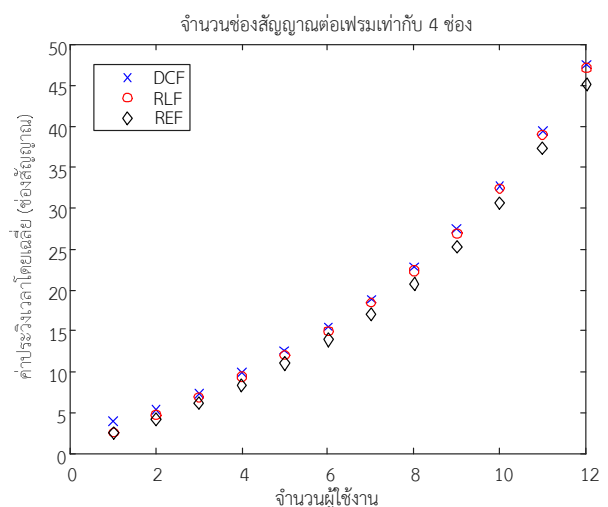
ในการแสดงผลการทดสอบบทความวิจัยนี้ ขอนิยามชื่อย่อดังต่อไปนี้

ให้ DCF ใช้แสดงผลการทดสอบของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่

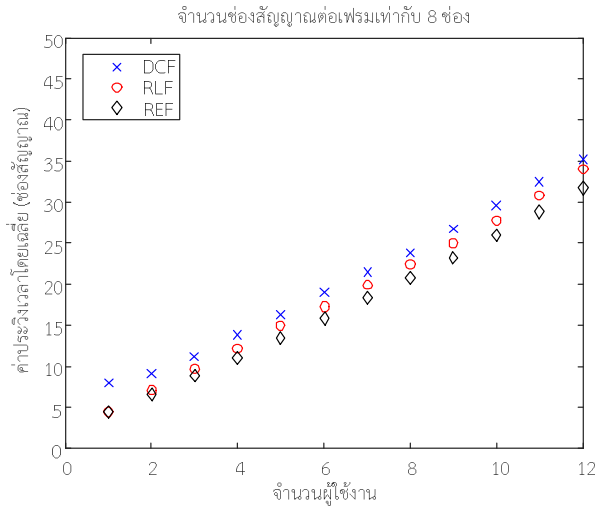
ให้ RLF ใช้แสดงผลการทดสอบของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมสุดท้าย

ให้ REF ใช้แสดงผลการทดสอบของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมอัลกอริทึม

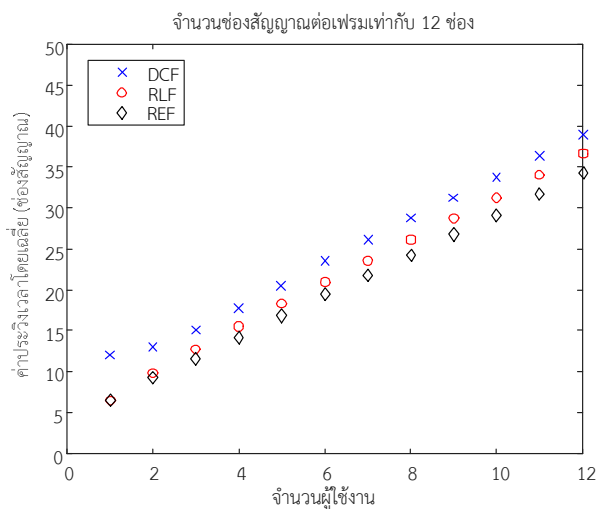
ผลที่ได้พบว่า อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมสุดท้าย และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม สามารถลดเวลาประวิงของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ลงได้เล็กน้อย และเมื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเป็น 8 ช่อง และ 16 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมสุดท้ายให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 4



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 8

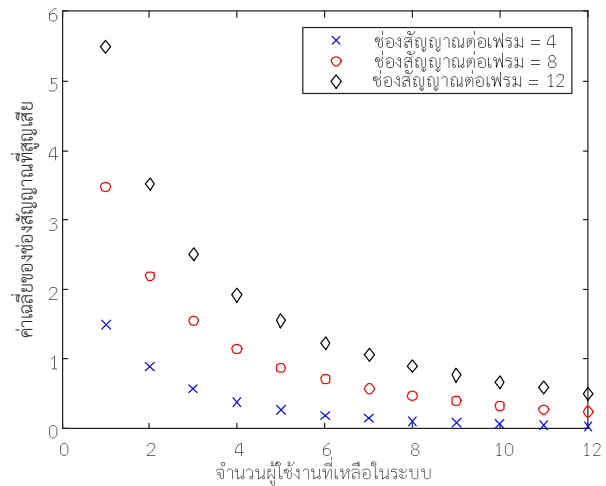


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้ จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 12

สำหรับเหตุผลที่อัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เมื่อจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมีค่ามากขึ้น เนื่องจากในกรณีที่ จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมีค่ามาก อย่างเช่น ในกรณีที่ มี จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 12 ช่อง จำนวน ช่องสัญญาณที่สูญเสียไปตั้งแต่ 0 ช่อง จนถึง 11 ช่อง ในขณะที่กรณีที่ มีจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 4 ช่อง จำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียไปตั้งแต่ 0 ช่อง จนถึง 3 ช่อง ดังนั้นเมื่อจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมีค่ามากก็มีโอกาสที่

จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียมาก อัลกอริทึมที่นำเสนอ สามารถลดจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี

เพื่อยืนยันเหตุผลข้างต้น รูปที่ 7 ได้แสดงผลการทดสอบเพื่อ หาค่าเฉลี่ยของจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียของเฟรมของ อัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ในกรณีที่ มีจำนวนช่องสัญญาณ เท่ากับ 4 8 และ 12 ช่อง ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่า เมื่อมีจำนวน ผู้ใช้งานที่เหลือในเฟรมนั้นน้อย แต่มีจำนวนช่องสัญญาณต่อ เฟรมมาก จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียมาก และเมื่อมี จำนวนผู้ใช้ที่เหลือในเฟรมนั้นมาก จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่ สูญเสียน้อย เนื่องจากกรณีที่ มีผู้ใช้ในระบบเหลือเป็นจำนวนมาก จะมีโอกาสที่ผู้ใช้บางรายเข้าไปใช้ช่องสัญญาณท้าย ๆ ส่งผลให้มี จำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียท้ายเฟรมไม่มาก



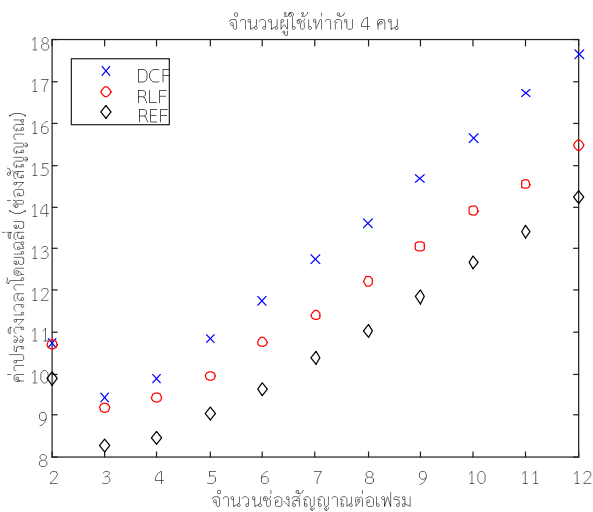
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียของเฟรม ที่มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ 4 8 และ 12 ช่อง

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 4 คน ผลที่ได้คือ ตอน ที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมน้อย ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยจะมี ค่าลดลง จนมีค่าต่ำที่สุดที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมค่าหนึ่ง ซึ่งจะเรียกจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่ให้ค่าประวิงเวลาต่ำ ที่สุดว่าจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม สำหรับเหตุผลที่ มีค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยลดลง เนื่องจากตอนที่กำหนดให้จำนวน ช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 2 ช่อง แต่ผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 4 ราย ซึ่งจำนวนผู้ใช้นั้นมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม จึงมี โอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลสูง การเพิ่มจำนวน

ช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 3 ช่อง จะช่วยลดโอกาสในการชนกันของข้อมูลลงได้ และส่งผลให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น

แต่เมื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมากกว่า จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม ค่าประวิงเวลาจะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม เนื่องจากการกำหนดจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมสูงกว่าจำนวนผู้ใช้งานมาก ก็จะมีโอกาสที่จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียมาก อย่างเช่น กรณีที่มีจำนวนผู้ใช้งานในระบบเท่ากับ 4 คน และมีจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 12 ช่อง จะมีโอกาสที่จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียไม่ได้ใช้งานในท้ายเฟรมมากกว่ากรณีที่กำหนดจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 8 ช่อง

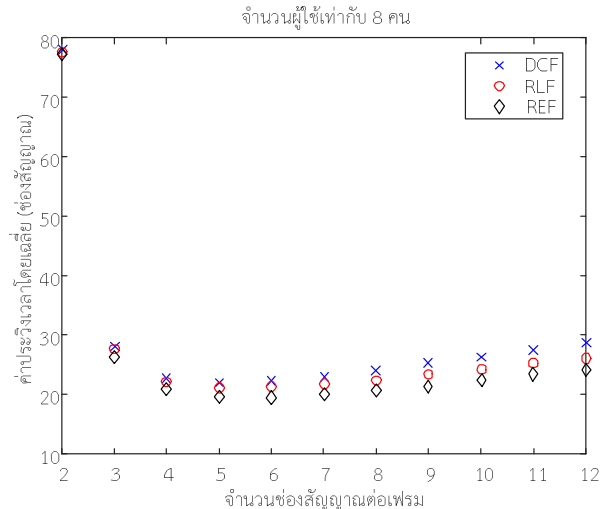
เมื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ พบว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่อย่างชัดเจน



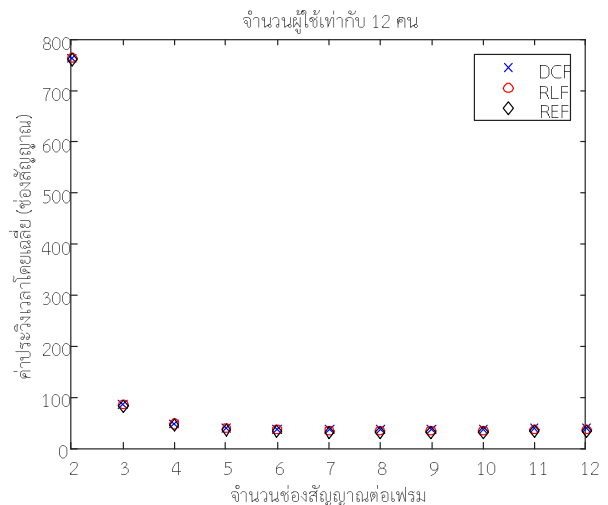
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 4 คน

รูปที่ 9 และ 10 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 8 และ 12 คน ตามลำดับ ผลที่ได้คือ ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยจะมีค่าลดลงที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมน้อย และเพิ่มขึ้นที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมาก เช่นเดียวกับกรณีจำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 4 คน และอัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า

อัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยที่มีค่าจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสมมากขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานในระบบ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 8 คน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเวลาประวิงโดยเฉลี่ยระหว่างอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อกำหนดให้จำนวนผู้ใช้ในระบบเท่ากับ 12 คน

รูปที่ 11 แสดงค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าจำนวนผู้ใช้และจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม

จากรูปพบว่า เมื่อพิจารณาที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมค่าหนึ่ง ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานที่

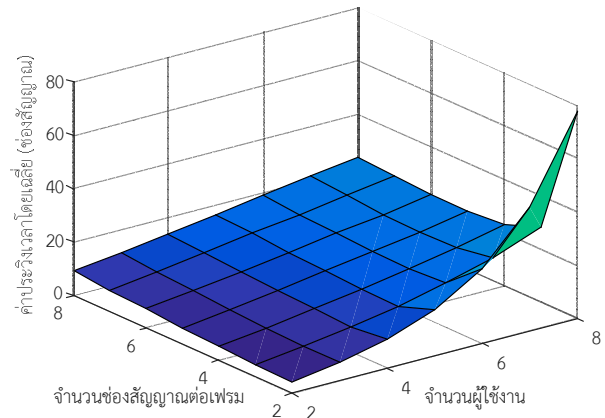
เหลืออยู่ในระบบ เนื่องจากหากมีจำนวนผู้ใช้งานระบบมากขึ้น จะมีโอกาสสูงที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะกรณีที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 2 ช่อง และจำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 8 คน จะให้ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ย สูงที่สุดในกราฟ

เมื่อพิจารณาที่จำนวนผู้ใช้งานค่าหนึ่ง ในช่วงแรกค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยจะลดลงตามจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม เนื่องจากการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม จะช่วยลดโอกาสในการชนกันของข้อมูลลงได้ และเมื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม ค่าประวิงเวลาจะมีความมากขึ้นตามจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม เนื่องจากเมื่อจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมมากก็จะมีโอกาสที่จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียมาก อย่างเช่น กรณีที่มีจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 12 ช่อง จะมีโอกาสที่จะมีจำนวนช่องสัญญาณที่สูญเสียไม่ได้ใช้งานในท้ายเฟรมมากกว่ากรณีที่จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมเท่ากับ 8 ช่อง

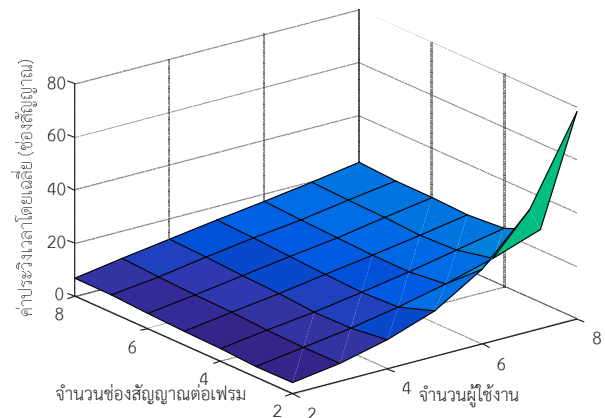
รูปที่ 12 และ 13 แสดงค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในเฟรมสุดท้าย และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในทุกเฟรม เมื่อปรับเปลี่ยนค่าจำนวนผู้ใช้งาน และจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม

จากรูปพบว่า ผลที่ได้จะคล้ายกับผลการทดสอบในรูปที่ 11 แต่อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในทุกเฟรม จะให้ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในเฟรมสุดท้ายจะให้ค่าประวิงเวลาโดยเฉลี่ยที่ต่ำกว่าอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่

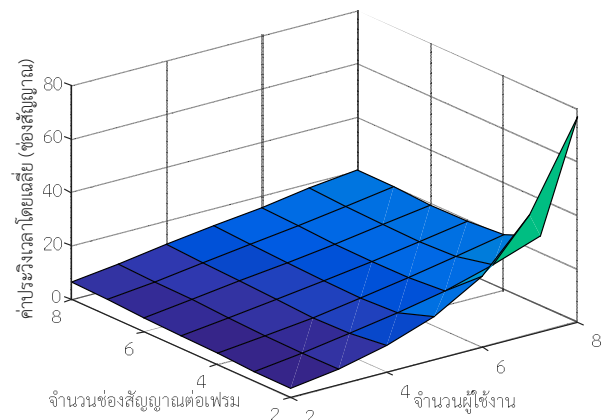
จากรูปที่ 11-13 เมื่อพิจารณาจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสมที่ให้ค่าประวิงเวลาต่ำที่สุด สำหรับจำนวนผู้ใช้งานค่าต่าง ๆ ของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในเฟรมสุดท้าย และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในทุกเฟรม จะให้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 14-16 ซึ่งจะพบว่าค่าจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งาน



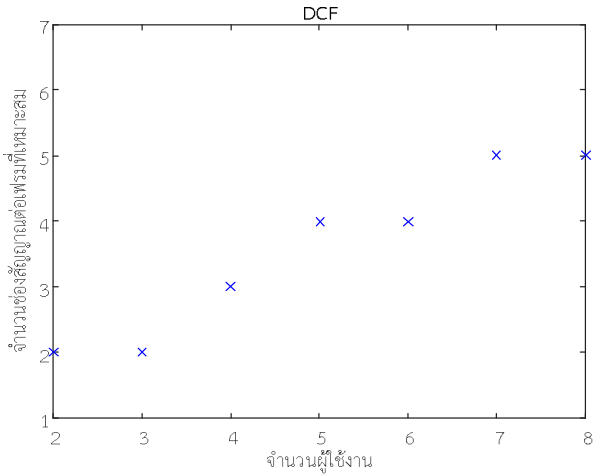
รูปที่ 11 ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าจำนวนผู้ใช้งาน และจำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรม



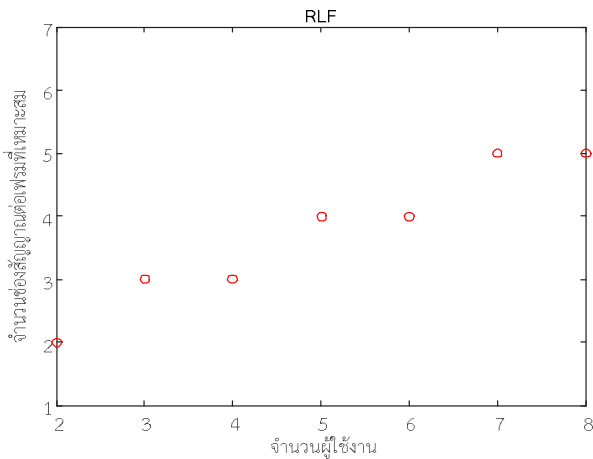
รูปที่ 12 ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในเฟรมสุดท้าย



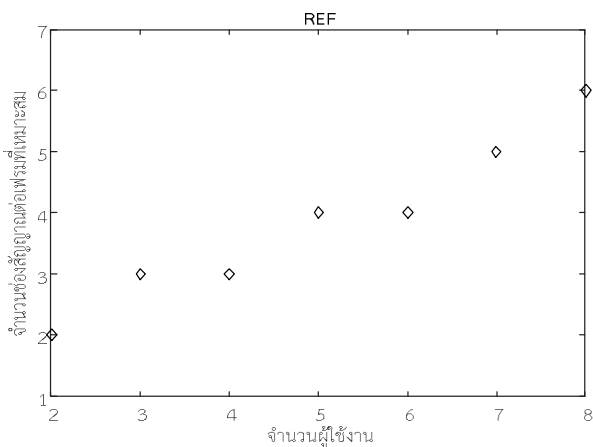
รูปที่ 13 ค่าเวลาประวิงโดยเฉลี่ยของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปล่าในทุกเฟรม



รูปที่ 14 จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม สำหรับจำนวนผู้ใช้งานค่าต่าง ๆ ของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่



รูปที่ 15 จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม สำหรับจำนวนผู้ใช้งานค่าต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียในเฟรมสุดท้าย



รูปที่ 16 จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสม สำหรับจำนวนผู้ใช้งานค่าต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียในเฟรมสุดท้าย

5) บทสรุป

บทความวิจัยฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ โดยการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไป อัลกอริทึมที่นำเสนอมีอยู่ 2 อัลกอริทึมได้แก่ อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในเฟรมสุดท้าย และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรม จากผลการทดสอบพบว่า อัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในทุกเฟรมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และอัลกอริทึมการลดช่องสัญญาณที่สูญเสียไปในเฟรมสุดท้ายมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึม IEEE 802.11 DCF ที่ใช้ขนาดเฟรมคงที่ ทั้งนี้ควรเลือกใช้จำนวนช่องสัญญาณต่อเฟรมที่เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งานในระบบ เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ได้สนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัยในครั้งนี้

REFERENCES

- [1] M. Mitra, *Satellite communication*, India: Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., 2005.
- [2] M. Schwartz, *Mobile wireless communications*, New York, NY, USA: Columbia University Press, 2004.
- [3] A. S. Ling and L. B. Milstein, "The effects of spatial diversity and imperfect channel estimation on wideband MC-DS-CDMA and MC-CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 10, pp. 2988-3000, Oct. 2009.
- [4] H. Baek, J. Lim, and S. Oh, "Beacon-based slotted ALOHA for wireless networks with large propagation delay," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2196-2199, Nov. 2013.
- [5] J. Choi, "Throughput analysis for coded multichannel ALOHA random access," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 8, pp. 1803-1806, Aug. 2017.
- [6] C. Stefanovic, P. Popovski, and D. Vukobratovic, "Frameless ALOHA protocol for wireless networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 2087-2090, Oct. 2012.
- [7] W. S. Jeon and D. G. Jeong, "Combined channel access and sensing in cognitive radio slotted-ALOHA networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 2128-2133, May 2015.

- [8] M. S. Chowdhury, K. Ashrafuzzaman, and K. S. Kwak, "Saturation throughput analysis of IEEE 802.15.6 slotted aloha in heterogeneous conditions," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 257-260, Jun. 2014.
- [9] M. Karaca and B. Landfeldt, "Approaching optimal centralized scheduling with CSMA-based random access over fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1183-1186, Jun. 2016.
- [10] A. Maatouk, M. Assaad, and A. Ephremides, "Energy efficient and throughput optimal CSMA scheme," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 27, no. 1, pp. 316-329, Feb. 2019.
- [11] L. Dai and X. Sun, "A unified analysis of IEEE 802.11 DCF networks: Stability, throughput, and delay," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 8, pp. 1558-1572, Aug. 2013.
- [12] X. Zhang, "A new method for analyzing nonsaturated IEEE 802.11 DCF Networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 243-246, Apr. 2013.
- [13] R. Wang, J. Zhang, and X. Zou, "Performance analysis and optimization of IEEE 802.11 DCF with constant contention window," in *Proc. 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, Guangzhou, China, Aug. 2008, pp. 407-411.



Local Maxima Niching Genetic Algorithm Based Automated Water Quality Management System for *Betta splendens*

Ferdin Joe John Joseph^{1*} Deepali Nayak² Salinla Chevakidagarn³

^{1*,2,3}Faculty of Information Technology, Thai-Nichi Institute of Technology, Bangkok, Thailand

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

Received: 25 September 2020; Revised: 9 November 2020; Accepted: 25 November 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

Rearing *Betta splendens* is one of the most popular aquarium hobbies around the world. There are many IoT solutions done so far to monitor the water quality of the aquarium. Some machine learning and IoT based solutions are also available to do regression on the sensor data. In this paper, we propose a new framework and algorithm to predict the abnormalities in water quality which may affect the health of the fish. The algorithm proposed in this paper uses a local maxima niching genetic algorithm for optimization which effectively finds the local maxima on the new data streaming in and provides the approximate timestamp on the next possible water change or treatment to avoid the fish from getting infected. Many existing timestamp methods are seasonal but in terms of optimization in terms of unpredictable environment such as water, there needs a better technique for optimization. The qualitative and quantitative results proved that the health of fish using the proposed framework had better living conditions and avoided the attack of parasitic infections than those in existing and normal captivity methods. The accuracy of the proposed methodology increased by 5% within the variations made.

Keywords: Smart Aquarium, Genetic Algorithm, Water Quality, *Betta splendens*

I. INTRODUCTION

Aquarium keeping is one of the most affordable and therapeutic hobbies around the world. Hobbyists normally make various types of aquariums like freshwater, marine, aqua-scape and crustaceans. Most of the freshwater aquariums use tropical fish species originated from the south east Asia. There are many instances of creating unsuccessful aquarium where the mortality rate of fish purchased is more. This is mainly due to poor water quality and mismanagement of the aquarium system [1]. The biochemical and ecological factors play a vital role in maintaining the fish stress-free and free from parasitic attacks. There are many tropical fish available in the market but *Betta splendens* is chosen for the experiments in this paper. The technology proposed in this paper will be useful for hobbyists, aquarium retailers and *Betta* breeders to maintain better living condition for the *B. splendens* in captivity.

A. *Betta splendens*

Betta splendens is the scientific nomenclature for the Siamese fighting fish. It is predominantly bred for pet aquariums of hobbyists and for fish fighting as a hobby. It is originated from Thailand. This species is known for its aggression due to low levels of Serotonin [2]. *B.splendens* is an affordable ornamental tropical fresh water fish available in market with various types of fins and vibrant colors. The frequency and intensity of the pelvic fin flickering and tail beating is used for male-male and male-female interactions [3]. Therefore, the health of the fins is more responsible to communication than appearance. This species of aquarium fish is more sensitive towards diseases due to poor water quality [4] like bacteria infected fin rot [5], Ichthyophthirius *multifiliis* and other parasitic infections [1]. Factors like pH, Ammonia, dissolved CO₂ needs to be in the teleost recommended ratio as the excess presence of any of these may turn poisonous for the fish [6].

Table 1 List of Abbreviations

Acronym	Expansion
IoT	Internet of Things
B.splendens	Betta splendens
GA	Genetic Algorithm
SVM	Support Vector Machine
NB IoT	Narrow Band IoT
CO ₂	Carbon dioxide
pH	Hydrogen Ion concentration
H ₂ CO ₃	Carbonic acid
SVR	Support Vector Regression
ESM	Electric Smart Meter
CO	Carbon Monoxide
Cc	Centimeter cube
CSV	Comma Separated Values
Ich	Ichthyophthirius multifiliis

B. Internet of Things

Internet of Things (IoT) is spanning its wings in all domains and transforming the usage of industries and lifestyle. It reduces power consumption and increases the robustness and connectivity to the accessible data across the globe [7]. IoT is used as a bridging tool with Machine learning techniques to manage and predict data in many cases. A new evolutionary algorithm based supervised learning framework is proposed in this paper to maintain water quality and predict the condition of aquarium to prevent parasitic attacks and increase the lifespan of *B.splendens* in captivity. Some external and submersible sensors coupled with ATMEGA microcontrollers are used in this methodology. Normally there is a recommended weekly replacement of water with 20% of the total capacity of the captive aquarium tank [4].

i) *External Sensors*; DHT 11 sensor is used to measure the atmospheric temperature and relative humidity. MQ9 sensor is used to measure the concentration of carbon monoxide in parts per million from the surface of the aquarium.

ii) *Submersible Sensors*; Water temperature and pH are measured using submersible sensors. PHC4502C is used to measure from the pH voltage measured by the potentiometer in the sensor and DS18B20 is used to measure water temperature. Source code is given in <https://github.com/ferdinjoe/Water-Quality-Management>.

C. Multi-Objective Genetic Algorithm

Genetic Algorithm is a widely used evolutionary algorithm which mimics the human evolution theory of Charles Darwin [8]. This algorithm is used to evolve data and speculate the possibilities of future outcomes. Multi objective genetic algorithm is available to evolve based on multi dimensions and multiple fitness functions [9], [10]. Multi objective genetic algorithm has scope in all types of data including images and videos for graph based searching of pattern recognition [11]. There is a need for a local maxima based optimization for time series data obtained for IoT systems in aquarium.

D. Support Vector Machine

Support Vector Machine (SVM) or Support Vector Networks was invented by Vladimir N. Vapnik and Alexey Ya. Chervonenkis in 1963 for linear classifiers. Later Vapnik developed the algorithm to be used by nonlinear classifiers. For this purpose, he developed Support Vector Networks with Corinna Cortes [12]. This formed the base for the modern day Support Vector Machine classifier used for many supervised learning based machine learning applications. LIBSVM toolbox [13] is used for the experiments in this paper.

Let the data fed into SVM is represented as follows.

$$\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\} \dots \{x_n, y_n\} \quad (1)$$

A hyperplane can be drawn over these points in (1) with a normalized vector as in (2).

$$\omega \cdot x - b = 0 \quad (2)$$

The soft margin of this hyperplane is given as

$$\max(0, 1 - y_i(\omega \cdot x_i - b)) \quad (3)$$

Therefore the hard margin is given as

$$(\omega \cdot x_i - b) \geq 1 \quad (4)$$

This applies for the limit of $1 \leq i \leq n$.

The time series data in the IoT sensors are made as vectors in this form. These vectors are converted to the type of chromosomes explained in section III. This is because we propose a new way of creating chromosomes based on the vectors and hyperplanes.

In this paper a new local maxima based niching genetic algorithm is used to manage water quality and predict the quickest possible time to change water in the captive tank is proposed in a framework which has given promising results to increase the lifespan of *B. splendens* in small captive nano tanks. The remaining part of the paper is organized as the existing methods and other related literatures reviewed in related work, proposed methodology and results in qualitative and quantitative aspects. Prior to results, the experimental setup and various algorithm tried for optimization and their performance are listed in Experiments section.

II. LITERATURE REVIEW

IoT based aquaria has been developed and proposed with various technologies and environmental control. Most of the literatures given below are used for monitoring and storing the data collected from the sensors and thereby operating actuators.

A study on *B. splendons* was done by [6] and it used many sensors and actuators to observe the behavior of the fish in a small unheated aquarium tank. This is a controlled environment as it was taken to the region where it is not conducive enough to raise tropical fish. The report on this study says that there is an aggressive behavior in the species where the movement was less and tank size is smaller. This indicated in a dominant – submissive relationship. The same behavior was observed in aggressive Midas cichlids [14] and semi aggressive zebra danios [15]. The most lethal abnormalities include pH going beyond 8, increase in ammonia due to accumulation of fish waste and increase in acidity of water by H_2CO_3 due to dissolved CO_2 .

IoT based aquarium system named FishTalk was proposed in [16]. This is an NB IoT based system developed with various sensors and actuators. This includes water level, temperature and actuators like filters and fish feeders. This is a mobile based monitor for water quality sensors in the aquarium and it is proven cost effective than many other systems developed earlier. This monitoring gave a way of calibrating sensors to work specific to the IoT based aquarium systems, intelligent feeding system and the analytics to understand the effects of IoT message loss and delays in domestic aquarium systems rearing tropical species. Python is used to develop the analytic system of FishTalk. Smart cloud based IoT system for domestic aquarium systems was developed using Arduino Nano [17]. This has limited functionalities but has fully automated system to feed and to change

water periodically. A cloud based system was developed to control the actuators of feeder and water changing model from being in any remote location. This is developed as an application using mobile app with firebase cloud as backend. A smart live aquarium monitoring using Raspberry Pi was developed in [18]. This uses a webcam server of raspberry pi and connects to the heater, feeder and temperature sensor. It is developed as an IoT application to watch the condition of the tank live using the webserver with an android app as front end and thereby doing the necessary actions. Similar IoT based smart fish aquarium is developed in extensively in various literatures like [19].

Application of machine learning techniques in IoT are discussed extensively in [20]. It is a survey which spans over the machine learning in IoT applications using the domain of Edge, Fog, cloud and distributed computing. SVM, Naïve Bayes and K Nearest neighbor algorithms are used in smart agriculture or smart farming. The feature selection or reduction methods like Principal Component Analysis and Canonical Correlation Analysis on time series and sequential data obtained from IoT data. SVR is used to find the future progression of sequential data and single class SVM is used for classification of various conditions in the IoT applications. In a nutshell, analytic algorithms are used to retrieve knowledge from the collected data, feature selection from the given data and the choice of algorithm depends on the data collected. A decision support system for machine learning to improve IoT based smart meter is proposed in [21]. The method proposed to improve decision support was compared using methods like Naïve Bayes, Random Forest and Decision Trees. The data driven decision support system for ESM to work more efficiently using an IoT ecosystem. Most of the existing methodologies in IoT are spanning towards agriculture and even to crop centric domains [22].

IoT system for rearing *B. splendens* is proposed in [16] and [23]. The latter developed as an IoT based application and shows insights on data collected. It also describes about the literatures on how Acquasmart system is developed. The performance metrics used in the literatures discussed in this section includes accuracy, F-score, correlation factor etc. The architecture proposed in this paper is promising enough with the data analytics obtained qualitative and quantitative for data scientists working on smart aquarium and develop monitoring system to have a fully automated system to control the environment of *B. splendens* in small Nano tanks. The performance of this proposed architecture is validated quantitatively against various experimental setup and parameters involved in all phases of the system development. A research on water contamination detection using genetic algorithm is

proposed in [24]. This gives an insight on the optimization approach mentioned in the proposed methodology listed below.

III. RESEARCH METHODOLOGY

The proposed methodology includes an IoT based architecture and a machine learning based evolutionary algorithm to predict the possible abnormalities in the water quality and conduciveness of *B. splendens* to suit the environment.

A. IoT Based Architecture

The IoT based architecture is given in Figure 1. This presents the sensors and actuators attached to the microcontrollers and the means of collecting data from the tank taken for experimentation. The choice of sensors and actuators used in this proposed framework was based on the features to be extracted and the minimum common data collected by most of the frameworks in the existing methodologies.

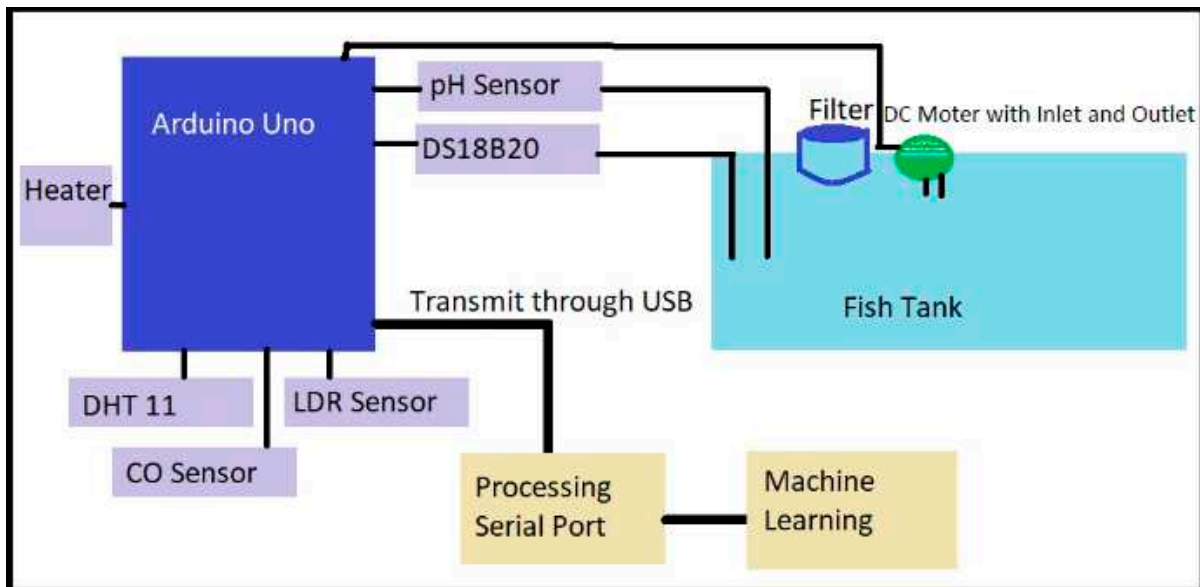


Figure 1 IoT architecture of the proposed methodology

The proposed IoT architecture uses Arduino Uno connected to a PC via USB interface. An external

hanging filter is added with a capacity of 260 liters per hour. This filter is attached to the experimental

aquarium of size 1500 cc. The aquarium has water added to 1000 cc. PHC4502C is used as a probe from the Arduino as a pH sensor. The pH volt from the sensor is calibrated to provide pH values with the range 1-14. This calibration is done with NaOH, distilled RO water and battery acid whose pH values are known. pH, LDR and CO sensors are connected to the analog pins in the microcontroller and other sensors are connected to the digital pins. Adafruit, One Wire and Dallas Temperature libraries are used to get data from DHT 11 PHC4502C and DS18B20 sensors respectively. DHT 11 sensor is used to record the external temperature and relative humidity and DS18B20 is used to record water temperature. MQ-9 sensor is used to record the CO concentration in ppm. LDR sensor is used to record the light intensity on the transparent face of the aquarium. These data are transmitted to a PC via USB interface and connected to Processing software.

B. Machine Learning

The data collected from the sensors are transmitted through USB interfacing in Arduino and read through Processing software which parses the string transmitted.

i) *Data Collection*; The string data obtained from the microcontroller is concatenated with the timestamp and stored in a CSV file. The data stored in the CSV file as database are processed using Python in Jupyter Notebook. Pandas library is used to parse the data stored in the database. This is done simultaneously from all the experimental tanks. Separate CSV files are used for each tank. When it is populated using pandas in python, all the files are taken together with tank ID as identifier. The proposed genetic algorithm is used after taking a minimum of 500 readings. While taking the 501st reading, the previous data form chromosomes in the population set generated for the genetic algorithm proposed. The training and testing data is collected over a span of six

months and each month had an average of one million entries. When the entries are flooding the csv files, they were stored in mongo DB database in json format. Approximately 24 million data entries were stored for producing classifier models and perform optimization. The first four-month data with uncontrolled environment setup is used to label manually and used for training. This accounts to 16 million entries. Labels were required only when abnormality is observed and water change was done due to poor water quality or medication added due to parasitic attacks.

a) *Data Cleaning*; The data collected in the mongo DB database was found to be inconsistent with missing values. These missing values are filled with a median values and those with incomplete or too less data recorded are ignored and removed from the database. Data cleaning is done in this way and made sure that all data entries have all data fields filled.

ii) *Feature Extraction*; Most of the training are done using the evolutionary algorithms like ant colony optimization, particle swarm algorithm and genetic algorithm. The combination of timestamp and data acquired by the sensors are collected. The sensors provided both the internal and external environment of the system. In the preliminary experimentation, the performance of genetic algorithm was found to be better than other algorithms tried. Normal genetic algorithm with every timestamp as chromosome in a population is better in predicting water change but failed to predict the insufficient water quality with respect to the parasites. So we used a niching based genetic algorithm similar to [25] for calculating the environment of the aquarium based on the classes a) normal, b) abnormal water quality and c) parasitic attack based abnormality. The fitness score is done by a hybrid SVM based regression. The machine learning framework is given in the Figure 2 below.

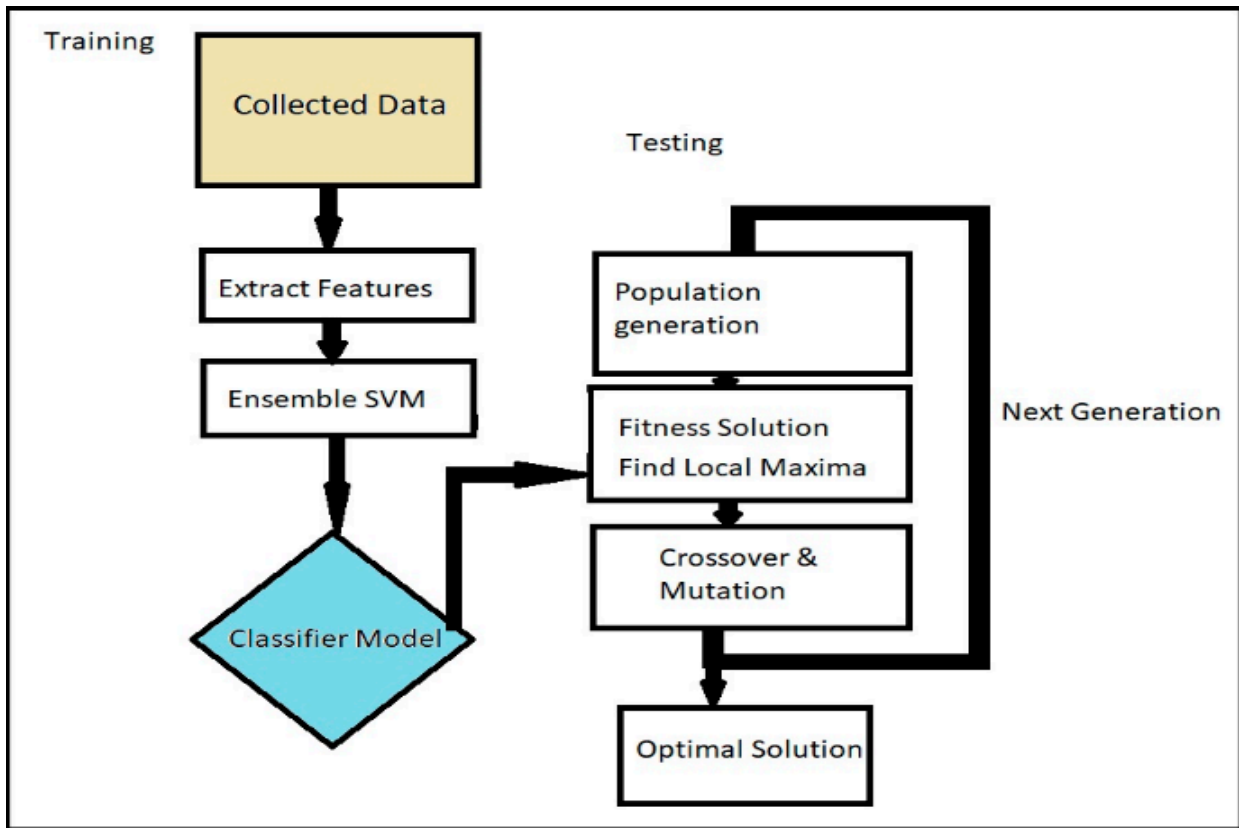


Figure 2 Machine Learning Framework

This framework has the optimization and fitness function applied. The optimization is done using a local maxima niching genetic algorithm where the SVM used finds the fitness score.

iii) *Training Data*; Samples of *B. splendens* in nano size tanks were taken with different sub species and different water conditions by varying the pH values. Some were observed to get affected by fin rot, swim bladder and ich diseases predominantly due to poor water quality and parasitic attacks. These samples were rescued and treated as per expert advice using medications like bath in Potassium permanganate solution, Methylene Blue solution and feeding with spirulina based algae mixture. The water condition and the sensor data obtained are recorded for each disease and subjected to training using an Ensemble SVM. This Ensemble SVM will create a classifier model based on the labels given to training data. This model is used as a map for calculating the fitness score for each

chromosome in the testing data. The genetic algorithm parameters are chosen based on hybrid algorithms reported in [26], [24] and [27].

iv) *Proposed Local Maxima Niching Genetic Algorithm*

Initially the first 500 readings of sensors and timestamp data are taken. Each part of the timestamp like day, hour, minute and sensor data are taken column wise and concatenated for every 50 readings. A sample chromosome in the population is represented below.

<pH1, pH2, pH3...pH50> <iTemp1, iTemp2, iTemp3 ... iTemp50> .. <dayval1, dayval2,dayval50 >

There are 10 parameters with 50 readings each. So there are 500 genes taken in the population. In the above chromosome, the data enclosed in <> corresponds to a particular data. The crossover and

mutation are done within the subset of genes alone. Crossover and mutation does not apply to the genes' subset of timestamp data.

For each generation, the population is taken to Ensemble SVM and fitness score is calculated. Among the scores in the fitness solution, the local maxima are chosen. The chromosomes above the average fitness score are retained for the next generation and the below average chromosomes are subjected to crossover and mutation.

a) *Crossover*; Crossover of the above average chromosomes are done based on a tournament selection process. Initial experimentation showed that tournament selection method is quick enough to converge the population with optimal local maxima than random selection. The subset of gene is selected based on a threshold ratio set for each subset. Timestamp subsets are given negative threshold to avoid those genes' set to perform crossover. A two-point crossover is done and that gives rise to 4 new chromosomes with respect to that gene. This count is a part of the permutation taken for the combination of genes subset performing crossover. As a result of crossover there will be above average chromosomes from previous generation, crossed over chromosomes and below average genes waiting to get mutation.

b) *Mutation*; Mutation is performed on a single gene. The single gene in a gene subset is chosen and it is converted from decimal to binary. Using a random probability, the bit which needs to mutate is identified and flipped. Then the mutated gene's chromosome

will replace the below average chromosome which it actually mutated from. As a result of this mutation there will be same amount of chromosomes in the previous population and the chromosomes obtained using crossover. Therefore, the number of chromosomes increases with each generation forward.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The experiments carried out for the proposed framework consists of internal and external aquarium setup. This setup is done in four tanks for four different samples of fish. The external sensors are used to measure environmental conditions outside the aquarium and internal setup is to measure the water quality and the livable conditions of the fish.

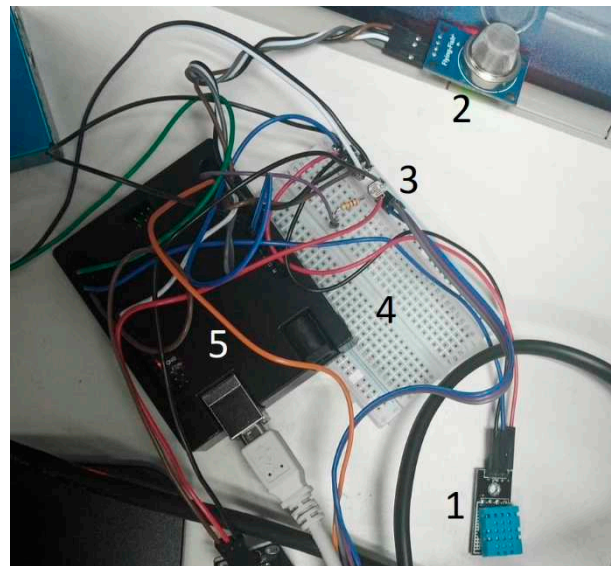


Figure 3 External Aquarium setup. 1. DHT 11 sensor, 2. CO sensor, 3. Light intensity sensor, 4. Breadboard to bridge Arduino with sensors and 5. Arduino Microcontroller

The Figure 3 above shows the external aquarium setup. This includes the sensors and microcontroller used to measure the atmospheric conditions surrounding the aquarium.



Figure 4 Internal Aquarium Setup. 1. pH sensor, 2. Water temperature sensor, 3. Indian Almond leaf, 4. Betta Fish, 5. Coarse gravel and marble base and 6. External hanging filter coupled with surface skimmer.

The internal setup of the experimental aquarium is given in Fig. IV above. It consists of external hanging filter with surface skimmer. Surface skimmer is used to extract the oily substances on the surface of water. The oily substances come from the pheromones secreted by the fish and breaking up of food and fecal wastes of the fish. Oily surface is responsible for the blockade for atmospheric oxygen from mixing with water. This condition is peculiar for Nano sized captive aquaria. The rear and side walls of the aquaria are wrapped with polymer sheets with 100% opacity. This is done to decrease the aggressiveness of betta. *B. splendens* are prone to aggressiveness when they get exposed to mirrors, glasses, other fishes outside and some bright

objects [28]. This aggressiveness is increased due to the drop in serotonin hormone in the fish. When the captive aquaria are covered with opaque polymer sheets, aggression of *B. splendens* males are proved to be controlled [29]. This reduces the stress buildup in the fish taken for experimentation. The total setup of the aquarium is given a polymer shield to limit the light exposure inside the tank. This is a manually controlled environment to aid an environment for the fish to be with less stress and conduciveness to survive. Indian almond leaf is added to provide necessary minerals soluble in water. Moon tail *B. splendens* are used in the experiments. Indian Almond leaf is responsible in maintaining the quality of water conducive for *B. splendens* to survive [30]. Increase in serotonin will effect in lifespan of *B. splendens* within itself. As a result of this controlled environment setup, the water quality and the effect of parasites due to external factors are taken into account for the prediction of water change time using machine learning algorithms. A DC motor is connected with a base sump and water supply. It is automated to change 25% of water weekly by default. It will initiate water change of 30 % when the machine learning module predicts any abnormality and maintains the water quality. The proposed methodology is applied on 3 out of 4 tanks with less control over the environment. The proposed method is validated against the existing methodologies with the following configurations.

Table 2 Experiment configurations

S.No	Evolutionary Technique	Classifier	Classifier Parameter
1	Ant Colony Optimization	SVM in LIBSVM	Radial basis function
2	Ant Colony Optimization	SVM in LIBSVM	Polynomial kernel
3	Ant Colony Optimization	Ensemble SVM	Naïve Bayes for timeseries subset and polynomial kernel for sensor data
4	Ant Colony Optimization	Ensemble SVM	Naïve bayes for timeseries and rbf kernel for sensor data
5	Particle Swarm Optimization	SVM in LIBSVM	Radial basis function
6	Particle Swarm Optimization	SVM in LIBSVM	Polynomial kernel
7	Particle Swarm Optimization	Ensemble SVM	Naïve Bayes for timeseries subset and polynomial kernel for sensor data
8	Particle Swarm Optimization	Ensemble SVM	Naïve bayes for timeseries and rbf kernel for sensor data
9	Proposed Local Maxima Niching GA	SVM in LIBSVM	Radial basis function
10	Proposed Local Maxima Niching GA	SVM in LIBSVM	Polynomial kernel
11	Proposed Local Maxima Niching GA	Ensemble SVM	Naïve Bayes for timeseries subset and polynomial kernel for sensor data
12	Proposed Local Maxima Niching GA	Ensemble SVM	Naïve bayes for timeseries and rbf kernel for sensor data

Identical tanks with same species of fish belonging to the same age group were used to check the performance of the algorithm. Pandas library was used for data collection and cleaning. Numpy was used as a support for ga library used for genetic algorithm. The usage of this library was customized based on the proposed genetic algorithm. Scikit learn was used to create the ensemble classifiers in the fitness solution.

After providing a manually controlled environment to one of the sample aquaria, the vital parameters of the water quality remained constant. Internal and

External temperatures had its ideal variance and pH remained between the range of 6.5 – 7. The water when maintained with lesser transparency and more soluble solids and minerals, the water in the aquarium appeared as in the Figure 5 below. The color of water is not transparent due to the mixing of soluble iron, calcium and other vital minerals from the almond leaf. This is obtained 8 hours after the setup of the aquarium. Remaining three aquaria are not controlled with any of the above factors.



Figure 5 Ideal condition maintained

The tanks with no manual control over environment are taken to collect data and processed to predict the

possible water change. This has been compared with some normal evolutionary methods like Ant colony optimization, particle swarm optimization, normal genetic algorithm and crowding multi objective genetic algorithm coupled with various classifiers and their parameters as shown in the configurations mentioned in the experiments section above. The accuracy obtained for primary experimentations and the proposed methodology is given in Table 3.

Table 3 Accuracy obtained for each experimental configuration

S.No	Evolutionary Technique	Accuracy
1	Ant Colony Optimization with SVM – rbf kernel	66.0%
2	Ant Colony Optimization with SVM – polynomial kernel	63.55%
3	Ant Colony Optimization with Ensemble SVM combination 1	62.67%
4	Ant Colony Optimization with Ensemble SVM combination 2	61.11%
5	Particle Swarm Optimization with SVM – rbf kernel	54.55%
6	Particle Swarm Optimization with SVM – polynomial kernel	58.22%
7	Particle Swarm Optimization with Ensemble SVM combination 1	75.58%
8	Particle Swarm Optimization with Ensemble SVM combination 2	70.22%
9	Proposed Local Maxima Niching GA with SVM – rbf kernel	76.12%
10	Proposed Local Maxima Niching GA with SVM – polynomial kernel	73.77%
11	Proposed Local Maxima Niching GA with Ensemble SVM combination 11	74.55%
12	Proposed Local Maxima Niching GA with Ensemble SVM combination 12	79.70%

The proposed methodologies gave better accuracy with the second combinations of Ensemble SVM. The confusion matrix of the best performing methodology listed in Table 3 is given in Table 4 with the split of class-wise accuracies. Combination 11 and 12 corresponds to the respective ensemble SVM configuration mentioned in Table 2. There are few challenges in the approximation of timestamp data.

Clouding of water due to over feeding, external dust mixing with water changes the condition of water and prepares a non seasonal trend. The proposed methodology is considerably successful in managing this issue by dynamically creating niches by the local maxima. So it will be automated to change niches over the course of time also.

Table 4 Confusion Matrix for Local Maxima Niching GA with Ensemble SVM combination 12. Accuracy listed in percentage of instances tested

	Normal	Water change due to poor water quality	Water change due to parasitic attacks
Normal	88.55	11.45	0
Water change due to poor water quality	11.53	78.69	9.78
Water change due to parasitic attacks	16.68	11.45	71.87

The data collected was huge in number and storage space and the evolutionary algorithms took many generations over time for each decision to make. Despite the fact of time consumption, this methodology used less water consumption than manual water change scheduled once in a week.



Figure 6 Fin rot observed due to fungal attack and parasite ich

Table 5 Vulnerabilities observed with various pH level

S.No	pH value range	Vulnerabilities
1	6.5 – 7.5	Nil
2	7.6 – 11	Irreversible Fin rot, mortality, Parasites
3	<6.5	Poor water quality, ich, fungus, parasites, mortality, inadequate oxygen, increased carbonic acid, increase in CO and methane emission

Various vulnerabilities are listed in table 5. Thought parasites flourished below and above the normal pH range, other sensor data as features

helped to increase the inter class distance between the classes by the classifier used in the proposed methodology.

Table 6 Conditions of fish observed with various methodologies

S.No	Evolutionary Technique	Final status	Diseases observed and treated
1	Ant Colony Optimization with SVM – rbf kernel	Alive	Ich, fin rot
2	Ant Colony Optimization with SVM – polynomial kernel	Died – 1 month	Ich, Nitrate poisoning
3	Ant Colony Optimization with Ensemble SVM combination 1	Alive	Fin rot
4	Ant Colony Optimization with Ensemble SVM combination 2	Died – 2 months	Ich, swim bladder
5	Particle Swarm Optimization with SVM – rbf kernel	Died – 1 month	Ich, Nitrate poisoning
6	Particle Swarm Optimization with SVM – polynomial kernel	Died – 3 months	Fin rot
7	Particle Swarm Optimization with Ensemble SVM combination 1	Alive	Fin rot
8	Particle Swarm Optimization with Ensemble SVM combination 2	Alive	Gasping due to CO2 concentration
9	Proposed Local Maxima Niching GA with SVM – rbf kernel	Alive	NIL
10	Proposed Local Maxima Niching GA with SVM – polynomial kernel	Alive	Gasping due to CO2 concentration
11	Proposed Local Maxima Niching GA with Ensemble SVM combination 11	Alive	NIL
12	Proposed Local Maxima Niching GA with Ensemble SVM combination 12	Alive	NIL
13	Ideal conditions with controlled environment	Alive	NIL
14	Normal instructions followed by beginner in hobby	Died – 1 month	Ich, fin rot, swim bladder

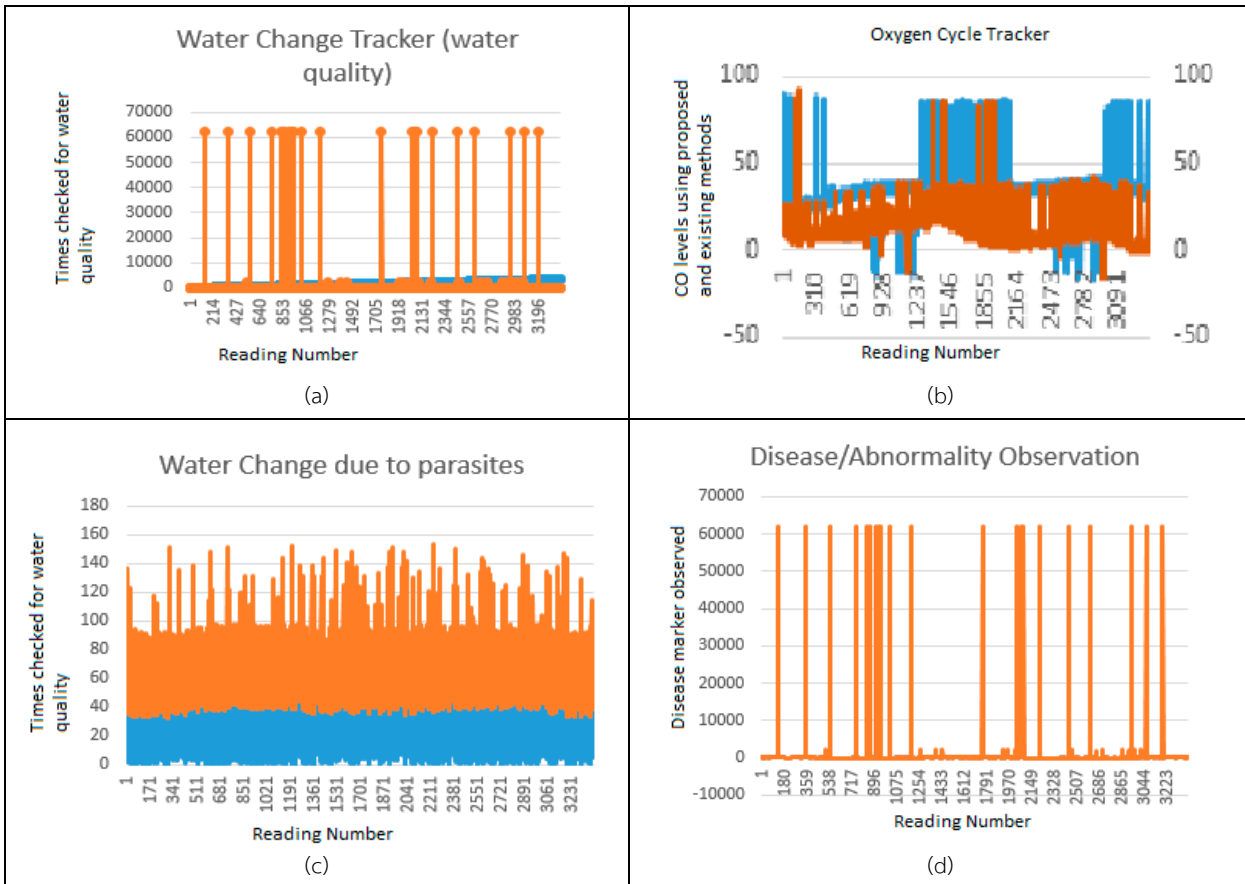


Figure 7 Performance of various water quality parameters of proposed methodology with respect to cumulative mean of all other methodologies. Orange series belongs to proposed and blue belongs to existing methodologies. (a) Total water changes done over every week due to poor water quality, (b) Total water changes done due to parasitic attacks, (c) Oxygen – CO₂ cycle maintained and (d) Diseases observed and treated.

The qualitative results from Figure 7 clearly shows that the proposed methodology hold better in maintaining water quality of the captive aquaria of *B. splendens* when compared to many other methodologies tried. The mean of all the existing methodologies are compared against the performance obtained in proposed methodology. There was less water changes for the tank using proposed methodology which resulted in 80% savings in terms of water usage. The O₂ – CO₂ cycle also maintained optimum using the proposed methodology. This system holds good even to leave the aquaria unattended during vacations provided an automatic digital feeder is attached to the tank. However, the amount of food consumed and wasted also contributes

to decrease in water quality. Water quality due to food wastage is not considered in the experiments reported in this paper.

V. CONCLUSION

The proposed IoT framework and its machine learning approach of genetic algorithm as a product proved to predict abnormalities in water condition and poor water quality. This triggered in necessary water change automatically using a small DC sump motor. The accuracy reported in the results looks promising and increases the healthy lifespan of *B. splendens*. There are still some issues in finding the local maxima niche when it comes to the timestamp data. The local maxima found in one generation has to be constant or

close to the concordant values. Else the accuracy in predicting water change for poor water quality and water change for parasitic attack will have an under-fitting of classification and thereby the accuracy of the proposed methodology dropped considerably. However, with the accuracy factor obtained, the healthy lifespan of *B. splendens* increased when compared to water change and monitoring done by human intelligence as per recommended settings. The proposed method holds good for tanks with single male *B. splendens*. The calibration of the classifier will change for huge water sources housing the fish in large quantities like breeder facilities and retailer's tanks. This research area has scopes to expand to various other species, tanks with mixed species, schooling fish species in fresh, marine and brackish water ecosystems.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper is a combination of research and hobby interests of the author. The results and contributions in this paper are done to express the fun at work and to encourage happiness index among research fraternity. Special thanks to Amalor Sancho Ferdin for permitting to conduct experiments with his favorite betta named Blueberry.

REFERENCES

- [1] J. B. Gratzek, "Parasites associated with ornamental fish," *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, vol. 18, no. 2, pp. 375–399, Mar. 1988.
- [2] E. D. Clotfelter, E. P. O'Hare, M. M. McNitt, R. E. Carpenter, and C. H. Summers, "Serotonin decreases aggression via 5-HT_{1A} receptors in the fighting fish *Betta splendens*," *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, vol. 87, no. 2, pp. 222–231, 2007.
- [3] T. L. Dzieweczynski, R. L. Earley, T. M. Green, and W. J. Rowland, "Audience effect is context dependent in Siamese fighting fish, *Betta splendens*," *Behavioral Ecology*, vol. 16, no. 6, pp. 1025–1030, Sep. 2005.
- [4] F. Dore, L. Lefebvre, and R. Ducharme, "Threat display in *Betta splendens*: Effects of water condition and type of agonistic stimulation," *Animal Behaviour*, vol. 26, pp. 738–745, Aug. 1978.
- [5] R. Schneider and B. L. Nicholson, "Bacteria associated with fin rot disease in hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar*)," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 37, no. 10, pp. 1505–1513, Oct. 1980.
- [6] A. Dolan, "The effects of aquarium size and temperature on color vibrancy size and physical activity in bettasplendens," Maryville College, Maryville, TN, USA, Tech. Rep. 53309811, 2015.
- [7] F. J. J. Joseph, "IoT based weather monitoring system for effective analytics," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 311–315, Apr. 2019.
- [8] S. W. Mahfoud, "Niching Methods for Genetic Algorithms," Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, IL, USA, 1995.
- [9] C. M. Fonseca and P. J. Fleming, "Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization," in *Proc. 5th International Conference on Genetic Algorithms*, Urbana-Champaign, IL, USA, Jun. 1993, pp. 416–423.
- [10] K. Deb, "Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems," *Evolutionary Computation*, vol. 7, no. 3, pp. 205–230, Sep. 1999.
- [11] S. Auwatanamongkol, "Pattern recognition using genetic algorithm," in *Proc. 2000 Congress on Evolutionary Computation*, La Jolla, CA, USA, Jul. 2000, pp. 822–828.
- [12] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, 1995.
- [13] C. Chang and C. Lin, "LIBSVM: A library for support vector machines," *ACM Transaction on Intelligent Systems and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 1–27, Apr. 2011.
- [14] R. G. Oldfield, "Gonad development in Midas cichlids and the evolution of sex change in fishes," *Evolution & Development*, vol. 13, no. 4, pp. 352–360, Jul. 2011.
- [15] S. P. Basquill and J. W. A. Grant, "An increase in habitat complexity reduces aggression and monopolization of food by zebra fish (*Danio rerio*)," *Canadian Journal of Zoology*, vol. 76, no. 4, pp. 770–772, Apr. 1998.

- [16] Y. B. Lin and H. C. Tseng, "FishTalk: An IoT-based mini aquarium system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35457–35469, 2019.
- [17] Y. H. Cheng, W. Q. Chen, K. H. Lin, and Z. Y. Zhou, "Smart cloud IoT aquarium," in *Proc. 13th International Conference on Advanced Information Technologies (AIT 2019)*, Taichung, Taiwan, Mar. 2019, pp. 274–278.
- [18] S. Kori, S. Ayatti, V. Lalbeg, and A. Angadi, "Smart live monitoring of aquarium - An IoT application," in *Information and Communication Technology for Intelligent Systems*, Singapore: Springer, 2019, pp. 1–9.
- [19] Y. Kim, N. Lee, B. Kim, and K. Shin, "Realization of IoT based fish farm control using mobile app," in *Proc. 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung, Taiwan, Dec. 2018, pp. 189–192.
- [20] M. S. Mahdavinjad, M. Rezvan, M. Barekatin, P. Adibi, P. Barnaghi, and A. P. Sheth, "Machine learning for Internet of Things data analysis: A survey," *Digital Communications and Networks*, vol. 4, no. 3, pp. 161–175, Aug. 2018.
- [21] J. Siryani, B. Tanju, and T. J. Eveleigh, "A machine learning decision-support system improves the internet of things' smart meter operations," *IEEE Internet Things Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 1056–1066, 2017.
- [22] S. Trilles, J. T. Sospedra, Ó. Belmonte, F. J. Z. Soria, A. G. Pérez, and J. Huerta, "Development of an open sensorized platform in a smart agriculture context: A vineyard support system for monitoring mildew disease," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28, pp. 1–11, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.suscom.2019.01.011.
- [23] G. S. Sampaio, G. M. F. Correia, and L. A. D. Silva, "AcquaSmart: An environment big data analytics and Internet of Things to education and research," *International Journal for Innovation Education and Research*, vol. 7, no. 1, pp. 93–104, Jan. 2019.
- [24] Y. Xuesong, S. Jie, and H. Chengyu, "Research on contaminant sources identification of uncertainty water demand using genetic algorithm," *Cluster Computing*, vol. 20, no. 2, pp. 1007–1016, Jun. 2017.
- [25] S. Avila, L. Krahenbuhl, and B. Sareni, "A Multi-niching multi-objective genetic algorithm for solving complex multimodal problems," in *Proc. 9th Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetics*, Sorrento, Italy, Sep. 2006, pp. 115–116.
- [26] C. Ding, L. Chen, and B. Zhong, "Exploration of intelligent computing based on improved hybrid genetic algorithm," *Cluster Computing*, vol. 22, no. S4, pp. 9037–9045, Jul. 2019.
- [27] X. Wang and R. Qing-dao-er-ji, "Application of optimized genetic algorithm based on big data in bus dynamic scheduling," *Cluster Computing*, vol. 22, no. S6, pp. 15439–15446, Nov. 2019.
- [28] M. Potegal, "The reinforcing value of several types of aggressive behavior: A review," *Aggressive Behavior*, vol. 5, no. 4, pp. 353–373, Jan. 1979.
- [29] T. Ichihashi, Y. Ichikawa, and T. Matsushima, "A non-social and isolate rearing condition induces an irreversible shift toward continued fights in the male fighting fish (*Betta splendens*)," *Zoological Science*, vol. 21, no. 7, pp. 723–730, Jul. 2004.
- [30] S. W. Lee, R. Farhan, W. Z. M. Wendy Wee, and C. O. Ibrahim, "The effects of tropical almond, *Terminalia catappa* L., leaf extract on breeding activity of Siamese Gourami, *Trichogaster pectoralis*," *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, vol. 4, no. 4, pp. 431–433, 2016.

การทดสอบสมรรถนะระหว่างโครงข่าย ZigBee LoRa และ IEEE1888 สำหรับ การประยุกต์ใช้ในระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชน

ธนากร อินทสุทธิ^{1*} กฤษณะ สุรีย์²

^{1,2}หลักสูตรวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, จังหวัดสงขลา, ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : tanakorn.i@rmutsv.ac.th

รับต้นฉบับ: 28 ตุลาคม 2563; รับประทานฉบับแก้ไข: 2 ธันวาคม 2563; ตอรับบทความ: 8 ธันวาคม 2563

เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

ระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชนตามมาตรฐาน IEEE1888 ประกอบด้วยอาคารต่าง ๆ ที่มีระบบวัดและเกตเวย์ (Gateway, GW) โดยเชื่อมโยงกับระบบเพื่อบริหารข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีระบบไร้สายในสถานที่ต่าง ๆ โดยส่วนมากใช้งาน ZigBee ซึ่งมีข้อจำกัดในการสื่อสารระยะสั้นเท่านั้น ดังนั้นในบทความนี้จึงพัฒนาการขยายระบบระหว่าง ZigBee ไปยัง LoRa ผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (Aggregator, AG) และส่งต่อไปยังระบบในมาตรฐาน IEEE1888 ได้ โดยผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ (1) การวัดดัชนีความแรงสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ในกรณี ZigBee มีค่า RSSI เพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่มเติมภายในอาคารตั้งแต่ 5 ถึง 20 เมตร และกรณี LoRa มีสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ทดสอบสูงสุดที่ระยะ 573 เมตรด้วยค่า RSSI เท่ากับ -95.1 dBm (2) การทดสอบอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลพบว่ากรณีส่งข้อมูลแบบสม่ำเสมอด้วยคาบเวลา 700 มิลลิวินาทีขึ้นไป จะมีอัตราส่งสำเร็จ 100% แต่กรณีแบบสุ่มมีอัตราส่งสำเร็จเพียง 60 % และ (3) การทดสอบเกตเวย์โดยเปรียบเทียบระยะช่วงเชื่อมต่อ (hop) ระหว่างเกตเวย์กับเครื่องบริการ (Server) ในระยะห่าง 1 ช่วง ค่าเวลาไปกลับ (Round Trip Time, RTT) ไม่เกิน 100 มิลลิวินาที แต่กรณี 18 ช่วง พบว่าค่า RTT เพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เท่า ดังนั้นผลทดสอบนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาเพื่อให้มีความเหมาะสมในการขยายระบบต่อไปในอนาคตได้

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบบริหารจัดการพลังงาน อัตราส่วนการส่งกลุ่มข้อมูล IEEE1888

Performance Testing between ZigBee, LoRa and IEEE1888 Networks in Community Energy Management System

Tanakorn Inthasuth^{1*} Kritsana Sureeya²

^{1*,2}*Telecommunication Engineering Program, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: tanakorn.i@rmutsv.ac.th

Received: 28 October 2020; Revised: 2 December 2020; Accepted: 8 December 2020

Published online: 25 December 2020

Abstract

The Community Energy Management System (CEMS) with IEEE1888 standard comprises buildings with metering systems and gateways (GW), which are linked to the system for efficient data management, and wireless systems installed in various places, which ZigBee is mostly used with the limitation only on short-range communication. Therefore, this paper presents the system development that extends the transmission from within ZigBee range to LoRa through aggregator (AG) and enables the transmission to be forwarded to the system with IEEE 1888 standard. The test results can be divided into 3 parts as follows: (1) Received Signal Strength Indicator (RSSI). For ZigBee, RSSI value increases from 5 to 20 meters upon an additional repeater is installed within the building. For LoRa, the maximum coverage in the test area reaches 573 meters with RSSI value equal to -95.1 dBm. (2) AG test. The result finds that in the case of data transmission is consistent with the period of 700 milliseconds and higher, the success rate is 100%. However, in the case of random transmission, the success rate is only 60%. (3) GW test, which is conducted by comparing the hop between GW and server. For the distance of 1 hop, the Round Trip Time (RTT) value does not exceed 100 milliseconds. Nevertheless, for the distance of 18 hops, the RTT value increase more than 4 times. Consequently, the tests in this research can be used as a guideline for design and development to optimize the future system extension.

Keywords: Internet of Things, Energy Management System, Packet Delivery Ratio, IEEE1888.

1) บทนำ

ระบบบริหารการจัดการพลังงานในชุมชน (Community Energy Management System, CEMS) สามารถตอบโจทย์ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ โดยอาศัยเทคโนโลยีสารสนเทศมาผนวกกับระบบไฟฟ้าเดิม เพื่อให้มีการโต้ตอบของข้อมูลระหว่างระบบผลิต ระบบส่ง ระบบจำหน่าย ไฟฟ้า ไปจนถึงผู้ใช้หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างทันสมัยและมีการทำงานร่วมกันได้ในมาตรฐานสื่อสารเดียวกัน ได้แก่ มาตรฐาน IEEE1888 หรือ ETSI M2M [1] ซึ่งจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าหรืออุปกรณ์รับรู้ผ่านโครงข่ายสื่อสาร แต่ในบางพื้นที่อาจจะมีจุดข้อของสัญญาณ ดังนั้นในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถใช้โครงข่ายสื่อสารเฉพาะกิจ (ad-hoc) ได้แก่ ZigBee [2], 6LowPAN [3] ฯลฯ แต่เทคโนโลยีดังกล่าวนี้มีการสื่อสารระยะสั้น (short-range) หรือส่งข้อมูลต่อ ๆ กันระหว่างห้องใน ระยะทางที่จำกัดเท่านั้น โดย แต่ถ้านำมาส่งข้อมูลในระยะไกล (long-range) จำเป็นต้องใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารโครงข่าย บริเวณกว้างกำลังงานต่ำ (Low Power Wide Area Network, LPWAN) จึงเหมาะสมกว่า ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีราคาต้นทุนต่ำ ประหยัดพลังงาน และสื่อสารได้บริเวณที่ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น [4] รวมถึงนำมาขยายโครงข่ายสื่อสารจากระยะสั้นภายในอาคาร ไปเชื่อมต่อกับจุดต่าง ๆ แบบระยะไกลได้ เพื่อขยายระบบวัดได้ กว้างมากขึ้น [5] ดังนั้นการพัฒนาระบบโครงข่ายสื่อสารไร้สายในระบบบริหารการจัดการพลังงานจำเป็นต้องใช้งานเทคโนโลยีให้เหมาะสม

การเลือกใช้งานระบบสื่อสารแบบไร้สายแบบระยะสั้นนั้น ขึ้นกับในแต่ละระบบว่ามีความต้องการแบบใด โดยในงานวิจัย [6] ได้พัฒนาระบบโครงข่ายรับรู้ไร้สายโดยใช้งาน 6LowPAN ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ แต่จำเป็นต้องใช้งานหมายเลข IP ทั้ง IPV4 หรือ IPV6 ในการใช้งาน แต่ขณะที่งานวิจัยที่ได้ใช้งาน ZigBee [7] สามารถเชื่อมโยงโครงข่ายโดยใช้งานหมายเลขระบุตัวตนประจำโครงข่ายส่วนบุคคล (personal area network identification, PAN ID) ซึ่งไม่ต้องใช้หมายเลข IP นอกจากนี้ ZigBee ยังเป็นที่นิยมและได้รับการยอมรับมากกว่าสำหรับของผู้ผลิตหลักในหลายอุตสาหกรรม [8]

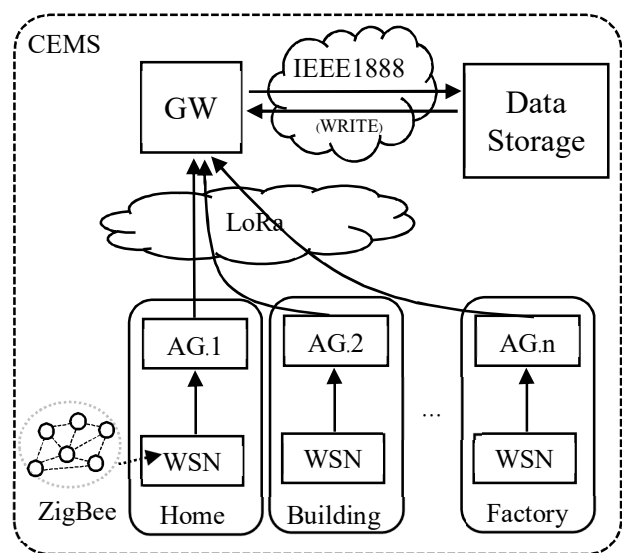
ในการสื่อสารแบบระยะไกลด้วย LPWAN ในประเทศไทยมี ผู้ให้บริการด้านโทรคมนาคมหลัก ได้แก่ บริษัท เอไอเอส (มหาชน) จำกัด และ บริษัท กสท. โทรคมนาคม (มหาชน) จำกัด ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้เริ่มใช้งานอุปกรณ์ NB-IoT [9] และ LoRa [10]

ของผู้ให้บริการทั้งสองตามลำดับ แต่อุปกรณ์นี้ยังต้องอาศัย โครงข่ายโทรคมนาคมเช่นเดิม ดังนั้นในโจทย์ที่สัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้ ณ จุดวัดข้อมูล การออกแบบระบบสื่อสารจึง ต้องเลือกใช้งานระบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง ซึ่งพบว่า มีเทคโนโลยี LoRa ที่รองรับคลื่นย่านความถี่ 433 MHz ซึ่งเป็น ย่านความถี่ร่วมสาธารณะจึงสามารถใช้งานได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย [11]

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบ สำหรับการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารแบบระยะสั้นด้วย ZigBee กับระยะไกลด้วย LoRa พร้อมทำงานร่วมกับระบบบริหารการจัดการพลังงานตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยมีการทดสอบสมรรถนะระบบ ได้แก่ ค่าดัชนีความเข้มสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ของ ZigBee และ LoRa การวัดอัตราส่วนความสำเร็จ ความผิดพลาด และ สูญหายของกลุ่มข้อมูลในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางการประเมินสมรรถนะการรับ-ส่งข้อมูลของระบบต่อไปได้

2) การประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEEE1888 ภายในชุมชน

รูปแบบการสื่อสารสำหรับระบบบริหารการจัดการพลังงาน ในชุมชนนั้นจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบบริหารการจัดการพลังงานในบ้าน อาคาร และโรงงาน (HEMS, BEMS, FEMS) [1] จำเป็นต้องมีมาตรฐานสื่อสารกลางเพื่อรองรับการทำงานที่มี อุปกรณ์ต่างชนิดให้ทำงานร่วมกันได้ด้วยมาตรฐาน IEEE1888 ซึ่งเป็นมาตรฐานเปิด [12]



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของ CEMS โดยใช้มาตรฐาน IEEE1888 ร่วมกับโครงข่ายสื่อสาร ZigBee และ LoRa

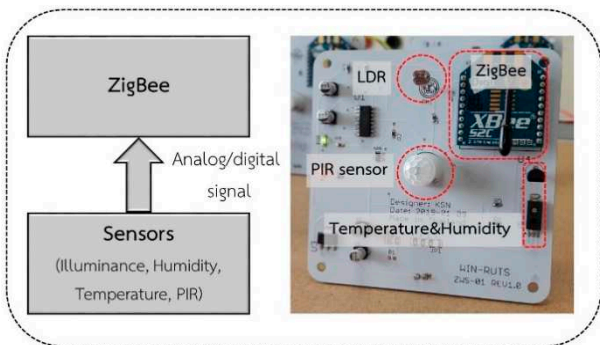
จากรูปที่ 1 เป็นการออกแบบระบบบริหารการจัดการพลังงานเพื่อพิสูจน์แนวคิด CEMS โดยระบบนี้ประกอบด้วยโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย (Wireless Sensor Network, WSN) เพื่อวัดค่าสถานะและรายงานผลที่เกี่ยวข้องกับด้านบริหารการจัดการพลังงาน ได้แก่ ค่าการวัดพลังงานไฟฟ้า ค่าการวัดสภาพแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ดังกล่าวในระบบบริหารการจัดการพลังงานภายในพื้นที่ต่าง ๆ โดยสามารถเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารแบบไร้สายระหว่างเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะสั้นและระยะไกลได้ โดยใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (Aggregator, AG) การสื่อสารทั้งสองแบบนี้มีเงื่อนไขการนำมาใช้งานต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะสั้นจะเหมาะสมกับการใช้งานที่สื่อสารระหว่างห้องต่าง ๆ ภายในอาคารเดียวกันในระยะทางการรับส่งข้อมูลในระดับเมตรภายในอาคาร [13] แต่ในกรณีเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระยะไกลจะสามารถส่งข้อมูลได้ไกลขึ้นระหว่างอาคารต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีระยะทางการรับส่งข้อมูลในระดับกิโลเมตร [11] ถัดจากนั้นเมื่อรวบรวมข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งมายังเกตเวย์ (Gateway, GW) และส่งต่อไปยังส่วนกลางของระบบบริหารการจัดการพลังงานภายในชุมชนตามมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยโพรโทคอล WRITE (WRITE protocol) และบันทึกค่าลงในหน่วยเก็บข้อมูล (Data storage) ตามลำดับต่อไป

3) วิธีดำเนินการวิจัย

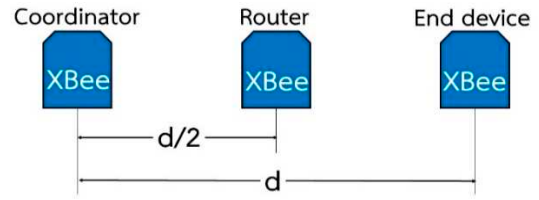
3.1) การพัฒนาระบบในงานวิจัย

3.1.1) การวัดข้อมูลด้วยอุปกรณ์รับรู้แบบไร้สาย

ในส่วนการวัดนี้ข้อมูลสภาพแวดล้อมนี้ คณะวิจัยได้นำอุปกรณ์จากงานวิจัย [14] มาใช้สำหรับทดสอบระบบโดยสามารถวัดค่าสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ค่าแสงสว่าง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และการเคลื่อนไหวของบุคคลโดยอุปกรณ์ที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังการเชื่อมต่อและอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อมด้วย ZigBee [14]



รูปที่ 3 ผังการทดสอบวัดค่า RSSI ของการสื่อสารไร้สาย ZigBee

โดยอุปกรณ์วัดสภาพแวดล้อมที่นำมาใช้ในงานนี้สามารถสื่อสารแบบไร้สายด้วย ZigBee ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารในรูปแบบเมช (mesh) ได้ และเพื่อยืนยันการใช้งานภายในอาคารของอุปกรณ์ดังกล่าว คณะวิจัยจึงได้ทดสอบการวัดค่า RSSI ของอุปกรณ์ ZigBee โดยใช้ผังการทดสอบการวัดค่า RSSI แสดงดังรูปที่ 3 โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ประสาน (coordinator) อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) และอุปกรณ์ปลายทาง (end device) ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ นี้ต้องตั้งค่าการเชื่อมโยงให้เป็นโครงข่ายเดียวกัน

ในการทดสอบการวัดค่า RSSI นี้ได้ทดสอบบริเวณทางเดิน โดยไม่มีสิ่งกีดขวางแบบแนวสายตา (line of sight) ณ ชั้น 10 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม อาคารศรีวิศวรวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีศรีวิชัย โดยบริเวณทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งได้ทดสอบการวัดค่า RSSI โดยใช้โครงข่าย 2 รูปแบบ คือ แบบจุดต่อจุด (point to point) และแบบเมช เพื่อต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระดับสัญญาณ ด้วยกำลังส่ง 2 มิลลิวัตต์ โดยผลการทดสอบพบว่า RSSI มีค่าลดลงเมื่อระยะทางออกห่างขึ้น แต่เมื่อนำอุปกรณ์จัดเส้นทางมาใช้งานทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับทวนสัญญาณ ค่าผลการวัด RSSI มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4 บริเวณที่ทดสอบวัด RSSI ของการสื่อสารไร้สาย ZigBee

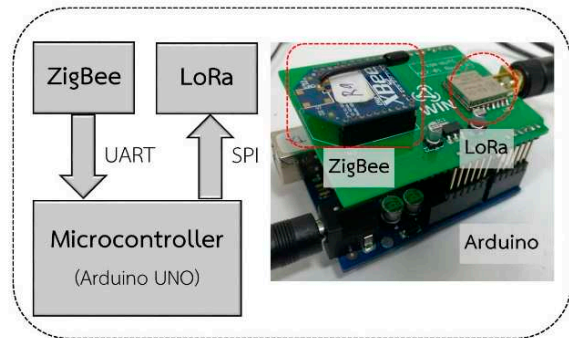
ตารางที่ 1 ผลการวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกรณีโครงข่ายแบบจุดต่อจุด และแบบเมช

ระยะห่าง d (หน่วย: m)	RSSI (หน่วย: dBm)		ส่วนต่าง ของค่า RSSI
	แบบจุดต่อจุด	แบบเมช	
5	-67	-53	14
10	-76	-62	14
15	-81	-72	9
20	-86	-81	5

จากตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบวัดค่า RSSI ภายในอาคาร บริเวณทางเดิน โดยผลการทดสอบได้เปรียบเทียบการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สาย ZigBee ทั้งแบบจุดต่อจุด และแบบเมช โดยแบบเมชในการทดสอบนี้จะเพิ่มการใช้งานอุปกรณ์จัดเส้นทางจำนวน 1 ตัวโดยวางตำแหน่งระหว่างจุดส่งกับจุดรับสัญญาณเพื่อสามารถขยายโครงข่ายได้ โดยผลการทดสอบพบว่าการเชื่อมโยงแบบเมชมีค่าระดับสัญญาณที่รับได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจุดต่อจุด ดังนั้นในผลการทดสอบนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าการสื่อสารด้วย ZigBee ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายแบบระยะสั้นมีความเหมาะสมกับการใช้งานภายในอาคารได้ดี นอกจากนี้การใช้งานภายในอาคารสำหรับกรณีทั่วไป มักจะติดตั้งอุปกรณ์ตามห้องต่าง ๆ กันเป็นโครงข่าย และส่งผลให้การเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สายนี้สามารถขยายได้ครอบคลุมภายในอาคารมากขึ้นอีกเช่นกัน

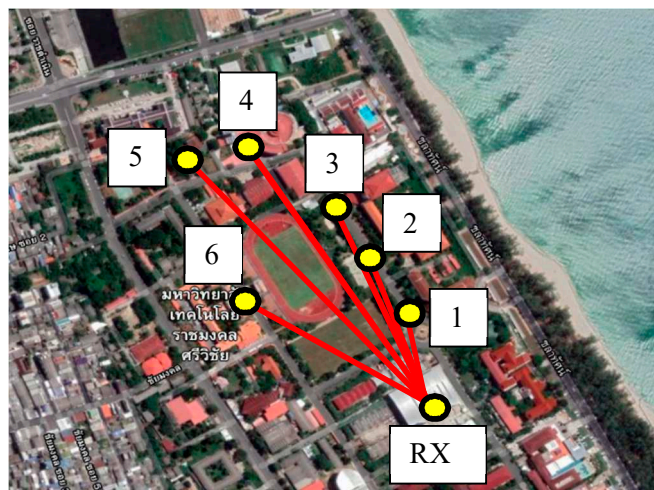
3.1.2) อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการวัดด้านพลังงานจากโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายแบบระยะสั้นด้วย ZigBee ภายในบ้าน อาคาร หรือโรงงานได้ และอุปกรณ์นี้สามารถขยายระยะทางของโครงข่ายสื่อสารระยะทางไกลมากขึ้นด้วยเทคโนโลยี LoRa เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกรวบรวมส่งต่อไปยังศูนย์รวมข้อมูลภายในชุมชนได้ ซึ่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ได้ใช้งาน Arduino สำหรับประมวลผลเพื่อเชื่อมโยงโครงข่าย ZigBee กับ LoRa ได้โดยแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลรองรับการเชื่อมโยง ZigBee - LoRa

นอกจากนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าโครงข่าย LoRa นี้สามารถใช้งานได้ คณะวิจัยจึงได้ทดสอบวัดค่า RSSI ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา เพื่อเป็นแนวทางการใช้งาน โดยแผนผังการทดสอบประกอบด้วยภาคส่งสัญญาณ 6 จุดต่าง ๆ จะอยู่ชั้นล่างสุด และภาครับสัญญาณจะอยู่บริเวณชั้น 10 อาคารศรีวิศวิทยาโดยแสดงแผนผังการทดสอบได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังการทดสอบวัดค่า RSSI ของการสื่อสารไร้สาย LoRa

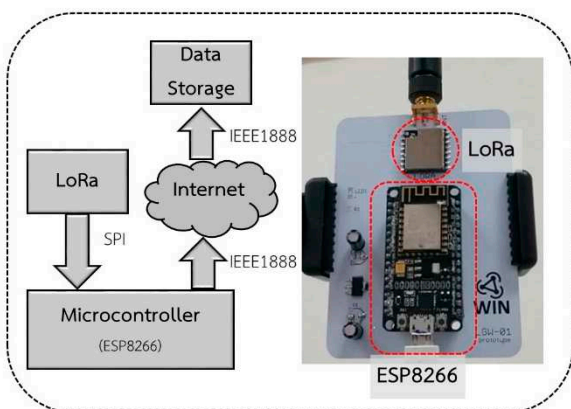
ตารางที่ 2 ผลการวัดค่า RSSI ของการสื่อสารผ่าน LoRa ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา ระหว่างภาคส่งสัญญาณ (บริเวณหน้าอาคารต่าง ๆ) และภาครับสัญญาณ (อาคารศรีวิศวา ชั้น 10)

จุดที่	สถานที่ทดสอบวัด RSSI	ระยะทาง (หน่วย: m)	RSSI (หน่วย: dBm)	
			หน้าอาคาร	ภายในอาคาร
1	อาคาร 58 อาคารศูนย์วิทยบริการ คณะศิลปศาสตร์	183	-79.7	-95.9
2	อาคาร 55 อาคารเรียนรวมฯ คณะศิลปศาสตร์	275	-92.6	-105.3
3	อาคาร 62 อาคารเรียนรวมฯ คณะศิลปศาสตร์	385	-96.2	-97
4	อาคาร 06 อาคารสำนักงานคณะบริหารธุรกิจ	508	-91.6	-105.9
5	อาคาร 63 อาคารเรียนรวมฯ คณะบริหารธุรกิจ	573	-95.1	-103
6	อาคาร 08 สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	373	-92.4	-106.7

จากตารางที่ 2 เป็นผลการวัดค่า RSSI ระหว่างจุดส่งและรับสัญญาณของของอาคารต่าง ๆ ซึ่งจากผลการทดสอบได้เปรียบเทียบค่า RSSI ระหว่างการส่งสัญญาณบริเวณด้านหน้าอาคารกับบริเวณชั้นที่ 1 ภายในอาคารต่าง ๆ โดยผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่าระยะทางการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์ LoRa นี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่มหาวิทยาลัย โดยระยะทางไกลที่สุดการรับส่งข้อมูลยังครบถ้วนและระดับสัญญาณยังอยู่ในเกณฑ์ที่ส่งข้อมูลได้

3.1.3) เกตเวย์

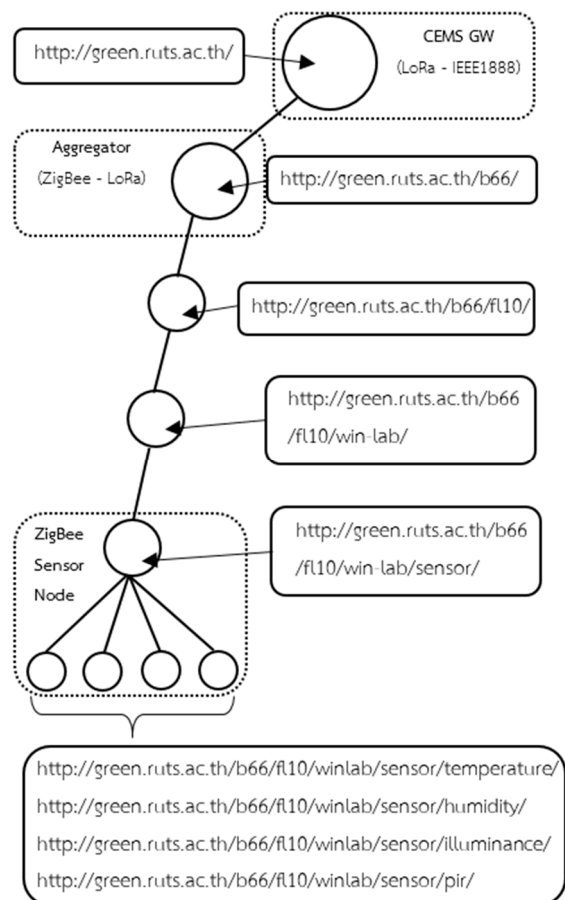
เกตเวย์ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลแต่ละอาคารต่าง ๆ ด้วยรูปแบบการสื่อสาร LoRa ได้ไกล โดยเกตเวย์นี้ได้ใช้งาน ESP8266 เป็นอุปกรณ์ประมวลผลหลักและการใช้งานอุปกรณ์นี้สามารถเชื่อมโยงผ่านอินเทอร์เน็ตได้ พร้อมกับใช้งานตามมาตรฐานการสื่อสาร IEEE1888 ซึ่งได้ถูกออกแบบเป็นมาตรฐานด้านการบริหารจัดการพลังงานโดยเฉพาะและเป็นมาตรฐานเปิด โดยเกตเวย์แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เกตเวย์สำหรับการเชื่อมโยง LoRa – IEEE1888

3.1.4) โครงสร้างข้อมูลสำหรับหน่วยเก็บข้อมูล

หน่วยเก็บข้อมูลทำหน้าที่บันทึกข้อมูลมาจากเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 ด้วยโปรโตคอล WRITE โดยรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลมีโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูล (Point Set ID structure) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูล

โครงสร้างชุดรหัสข้อมูลประกอบด้วยภาพรวมของชุมชน หรือในบทความนี้คือมหาวิทยาลัย โดยตั้งชื่อชุดรหัสข้อมูลเป็น <http://green.ruts.ac.th/> ถัดจากนั้นจะมีระดับย่อยลงไป

ระดับอาคาร โดยจะเพิ่มในส่วนชื่อหมายเลขอาคารหมายเลข 66 ด้วยรหัสข้อมูล <http://green.ruts.ac.th/b66/> จนกระทั่งระดับห้องของอาคาร และชนิดประเภทของอุปกรณ์รับรู้ตามลำดับ

โดยชื่อรหัสข้อมูลของการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงสว่าง และการเคลื่อนไหวของบุคคล ภายในห้อง Win-Lab จะใช้รหัสตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การออกแบบชื่อรหัสข้อมูลกับการวัด

ประเภทการวัด	ชื่อรหัสข้อมูล
อุณหภูมิ	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/temperature/
ความชื้นสัมพัทธ์	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/humidity/
แสงสว่าง	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/illuminance/
การเคลื่อนไหวของบุคคล	http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/winlab/sensor/pir/

จากการออกแบบโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูลในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แนวทางเดียวกันในการออกแบบจากโครงการระบบบริหารการจัดการพลังงานภายในอาคารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chulalongkorn University Building Energy Management System, CU-BEMS) [15] ทั้งนี้สำหรับการออกแบบโครงสร้างชุดรหัสของจุดข้อมูลนี้สามารถกำหนดได้อย่างอิสระเพื่อให้เหมาะสมในแต่ละการพัฒนาาระบบต่อไป

3.2) การตั้งค่าอุปกรณ์และพัฒนาเฟิร์มแวร์

ในหัวข้อนี้อธิบายเกี่ยวกับการตั้งค่าและพัฒนาาระบบ ได้แก่ การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม การพัฒนาเฟิร์มแวร์อุปกรณ์รวบรวมข้อมูล และเกตเวย์

3.2.1) การตั้งค่าอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม

การตั้งค่าการทำงานของอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม ZigBee สามารถใช้งานโปรแกรม X-CTU โดยกำหนดให้อุปกรณ์ ZigBee ทำงานเป็นโหมดอุปกรณ์ปลายทางหรืออุปกรณ์จัดเส้นทางพร้อมกับตั้งค่าให้มี PAN ID ให้เป็นหมายเลขเดียวกับอุปกรณ์ประธานที่ติดตั้งกับฝั่งอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลโดยระยะเวลาการส่งข้อมูลไปยังฝั่งรับสัญญาณ หรืออุปกรณ์รวบรวมข้อมูลได้ นอกจากนี้ในส่วนของการวัดข้อมูลนั้นสามารถตั้งค่าได้โดยกำหนดได้ทั้งแบบแอนะล็อก (analog) และดิจิทัล (digital) รวมถึงสามารถตั้งค่าความเร็วของคาบเวลาเป็นค่าต่าง ๆ ได้

Start	Length	Address: ZigBee	Data	CS
-------	--------	--------------------	------	----

รูปที่ 9 กลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee [14]

จากรูปที่ 9 แสดงรูปแบบกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee โดยมีรูปแบบของข้อมูลเป็นการเชื่อมต่อโปรแกรม (Application Programming Interface, API) ที่ได้กำหนดโดยผู้ผลิต โดยกลุ่มข้อมูลประกอบด้วยส่วนเริ่มต้น (start) ส่วนแสดงความยาวข้อมูล (length) ส่วนแอดเดรส (address) ของอุปกรณ์ ZigBee ส่วนข้อมูล (data) และส่วนผลรวมการตรวจสอบ (checksum, CS) ตามลำดับ

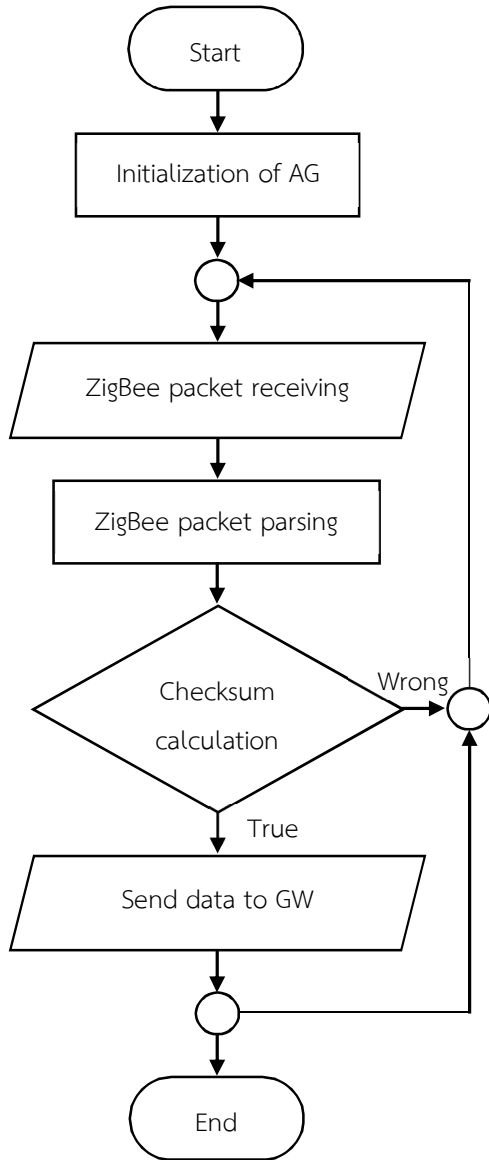
3.2.2) การพัฒนาเฟิร์มแวร์ของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

รูปแบบกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลนี้ ได้ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่เพื่อรองรับการบรรจุข้อมูลของแอดเดรสทั้ง ZigBee และ LoRa เพื่อระบุการเชื่อมโยงโครงข่ายได้อย่างเป็นหมวดหมู่ เพื่อให้สามารถแยกแยะอาคารต่าง ๆ ได้โดยแอดเดรส AG

โดยกลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลนี้ ประกอบด้วย ส่วนเริ่มต้น ส่วนแอดเดรสของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ส่วนของแอดเดรสของอุปกรณ์ ZigBee ส่วนของข้อมูล และส่วนของผลรวมการตรวจสอบตามลำดับ โดยกลุ่มข้อมูลนี้แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10

Start	Address: AG	Address: ZigBee	Data	CS
-------	----------------	--------------------	------	----

รูปที่ 10 กลุ่มข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

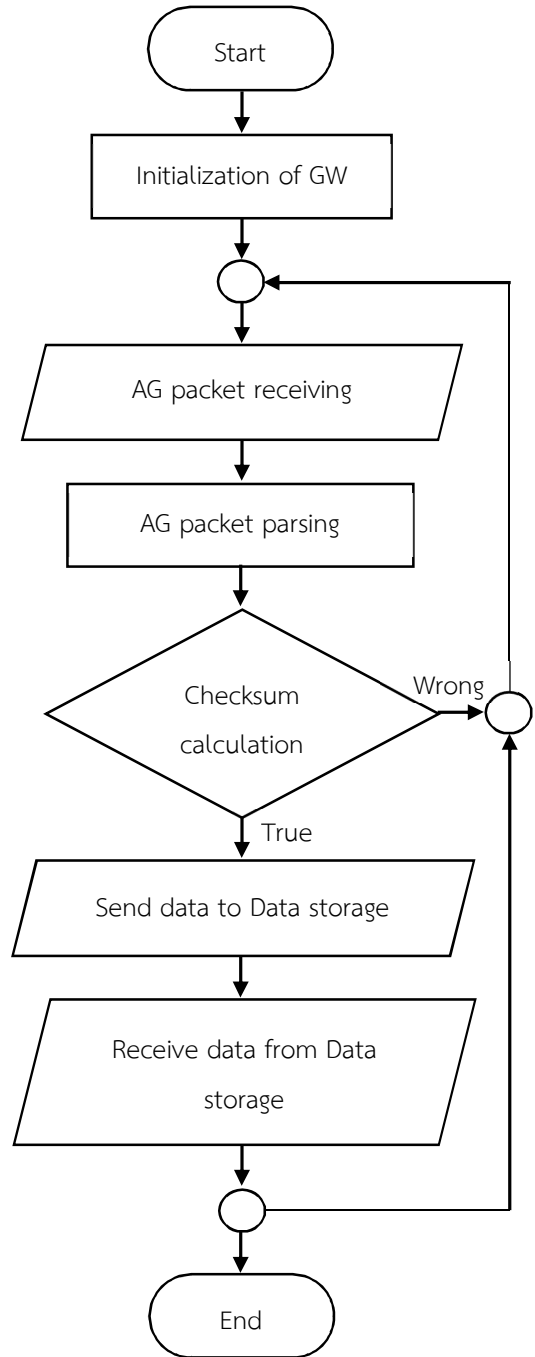


รูปที่ 11 ผังการทำงานของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

จากรูปที่ 11 แสดงผังงานซอฟต์แวร์ของการพัฒนาระบบ เชื่อมโยงโครงข่ายระหว่าง ZigBee กับ LoRa โดยเฟิร์มแวร์ที่ได้ พัฒนานี้จะมามีการทำงานเริ่มจากอุปกรณ์รวบรวมได้รับกลุ่มข้อมูล จากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee ครั้งละหนึ่งชุดข้อมูล จากนั้น กรองข้อมูลในรูปแบบ ZigBee ไปเป็นรูปแบบ LoRa โดยอุปกรณ์ รวบรวมข้อมูลดำเนินการส่งต่อไปยังเกตเวย์ต่อไป

3.2.3) การพัฒนาเฟิร์มแวร์ของเกตเวย์

เกตเวย์ในงานวิจัยนี้ได้แปลงข้อมูลรูปแบบ LoRa ให้เป็นตาม มาตรฐาน IEEE1888 บนพื้นฐานของ HTTP (Hypertext transfer protocol) และ ภาษา XML (Extensible Markup Language)



รูปที่ 12 ผังการทำงานของเกตเวย์

โดยลำดับการทำงานของเกตเวย์แสดงได้ดังรูปที่ 12 โดยเริ่ม จากอุปกรณ์รวบรวมได้รับกลุ่มข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ไร้สาย ZigBee ครั้งละหนึ่งชุดข้อมูล จากนั้นกรองข้อมูลในรูปแบบ ZigBee ไปเป็นรูปแบบ LoRa โดยอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล ดำเนินการส่งต่อไปยังเกตเวย์ โดยส่งข้อมูลและการตอบกลับตาม โพรโทคอล WRITE เพื่อบันทึกข้อมูลพร้อมระบุเวลาจริงลงใน หน่วยเก็บข้อมูล โดยรูปแบบการส่งข้อมูลแสดงดังรูปที่ 13 และ การตอบกลับข้อมูลแสดงดังรูปที่ 14

```
POST /axis2/services/FIAPStorage HTTP/1.1
Content-Type: text/xml charset=UTF-8
User-Agent: FIAPUploadAgent (Arduino HCU)
Host: 192.168.1.10
SOAPAction: "http://soap.fiap.org/data"
Content-Length: 867

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <soapenv:Body>
    <ns2:dataRQ xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/">
      <transport xmlns="http://gutp.jp/fiap/2009/11/">
        <body>
          <pointSet id="http://green.ruts.ac.th">
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/temperature">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">25</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/humidity">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">50</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/illuminance">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">100</value>
            </point>
            <point id="http://green.ruts.ac.th/b66/fl10/win-lab/sensor/pir">
              <value time="2020-03-30T13:00:00+07:00">1</value>
            </point>
          </pointSet>
        </body>
      </transport>
    </ns2:dataRQ>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelop>
```

รูปที่ 13 รูปแบบการส่งข้อมูลจากเกตเวย์ไปยังหน่วยเก็บข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งานโพรโทคอล WRITE

```

HTTP/1.1 200 OK
Content-Type: text/xml charset=UTF-8
User-Agent: FIAPUploadAgent (Arduino HCU)
Host: 192.168.1.10
SOAPAction: "http://soap.fiap.org/data"
Content-Length: 308

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <soapenv:Body>
    <ns2:dataRS xmlns:ns2="http://soap.fiap.org/">
      <transport xmlns="http://gutp.jp/fiap/2009/11/">
        <header>
          <OK/>
        </header>
      </transport>
    </ns2:dataRS>
  </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>

```

รูปที่ 14 รูปแบบการตอบกลับข้อมูลจากหน่วยเก็บข้อมูลไปยังเกตเวย์ตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งานโพรโทคอล WRITE

3.3) การออกแบบระบบทดสอบสมรรถนะระบบ

การทำงานของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและเกตเวย์จะมีข้อกำหนดของอุปกรณ์ในด้านลำดับการรับส่งข้อมูล โดยที่กรณีทีกลุ่มข้อมูลเข้ามามีอัตราเร็วกว่าอัตราการส่งข้อมูลออกส่งผลให้มีความผิดพลาดการอ่านข้อมูลของหน่วยประมวลผล รวมถึงมีกลุ่มข้อมูลที่สูญหายไป ส่งผลให้การออกแบบระบบต้องคำนึงถึงส่วนของการประเมินสมรรถนะด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการประเมินสมรรถนะระบบจากงานวิจัย [15] ที่มีรูปแบบการประเมินสมรรถนะของระบบด้วยการคำนวณค่าอัตราการรับ-ส่งข้อมูล โดยในงานวิจัยนี้ได้วัดสมรรถนะของอุปกรณ์ทั้งสองส่วน ได้แก่ อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลและเกตเวย์

โดยการคำนวณค่าอัตราการส่งข้อมูลมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 - 4

$$PSR = \frac{n_{success}}{n_{total}} \times 100\% \quad (1)$$

$$PER = \frac{n_{error}}{n_{total}} \times 100\% \quad (2)$$

$$PLR = \frac{n_{loss}}{n_{total}} \times 100\% \quad (3)$$

$$n_{total} = n_{success} + n_{error} + n_{loss} \quad (4)$$

เมื่อ

PSR คือ อัตราส่วนความสำเร็จของกลุ่มข้อมูล (Packet success ratio)

PER คือ อัตราส่วนความผิดพลาดของกลุ่มข้อมูล (Packet error ratio)

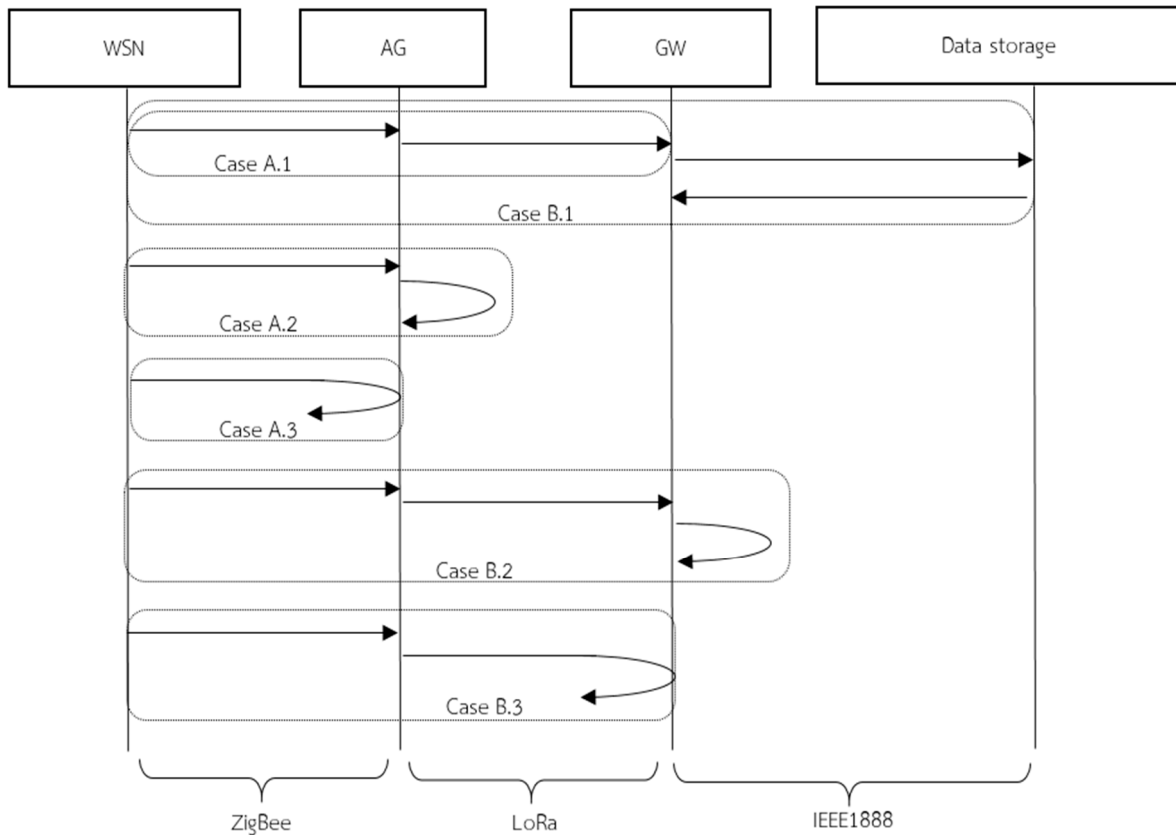
PLR คือ อัตราส่วนการสูญหายของกลุ่มข้อมูล (Packet loss ratio)

$n_{success}$ คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ส่งสำเร็จ

n_{error} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลผิดพลาด

n_{loss} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลสูญหาย

และ n_{total} คือ จำนวนกลุ่มข้อมูลที่ส่งทั้งหมด



รูปที่ 15 เหตุการณ์ของการส่งข้อมูลที่พิจารณาในงานวิจัย

จากรูปที่ 15 แสดงกรณีต่าง ๆ (Cases) ของเหตุการณ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะระบบ

กรณี A.1 : โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลสำเร็จ

กรณี A.2 : โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลไปถึงอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลแต่การคำนวณค่าผลรวมการตรวจสอบผิดพลาด

กรณี A.3: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลออกไปแล้ว แต่อุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไม่สามารถรับข้อมูลได้ เนื่องจากเกิดการล้นของกลุ่มข้อมูล (Packet overflow)

กรณี B.1: การสื่อสารระหว่างโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายไปยังหน่วยเก็บข้อมูลสำเร็จ

กรณี B.2: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์ แต่เกตเวย์คำนวณค่าผลรวมการตรวจสอบผิดพลาด

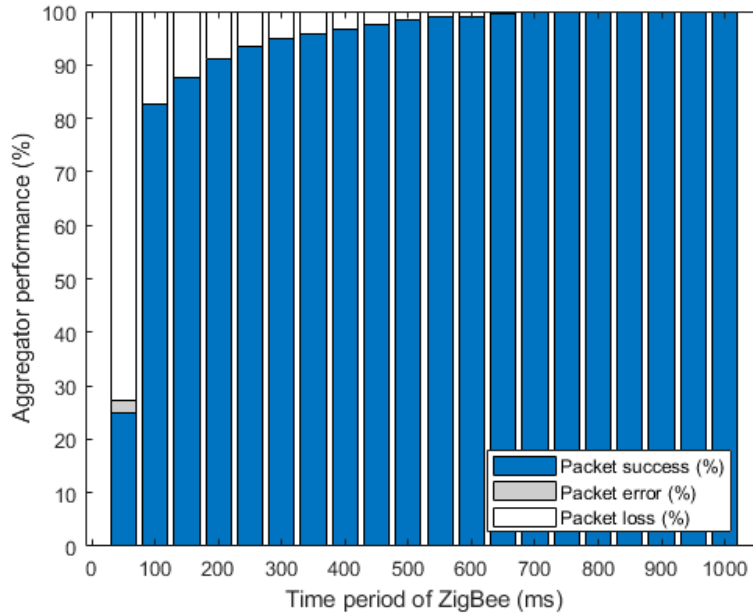
กรณี B.3: โครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์ แต่เกตเวย์ไม่สามารถรับข้อมูลได้ เนื่องจากเกิดการล้นของกลุ่มข้อมูล

4) การทดสอบระบบและผลการวิจัย

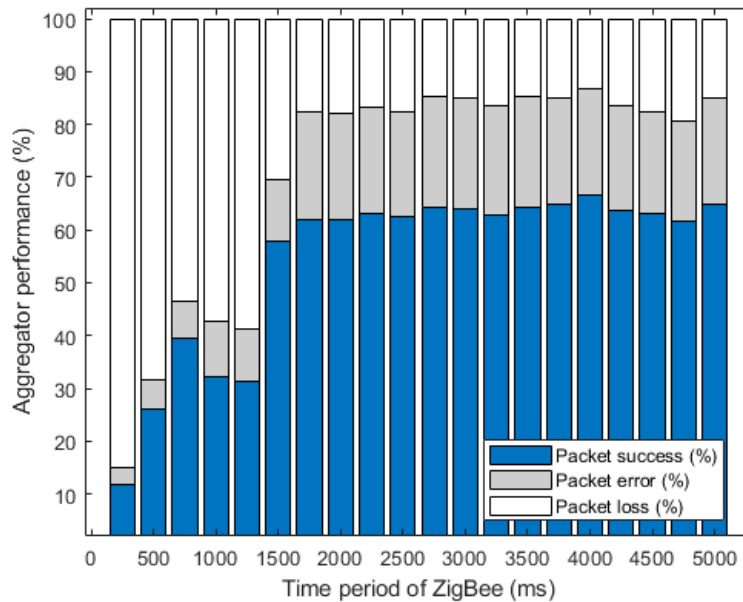
การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ ผิดพลาดและสูญหาย โดยกำหนดอัตราเร็วในการส่งข้อมูลของ ZigBee ในคาบเวลาต่าง ๆ (Time period, T) จนพบค่าสถานะคงตัวของอัตราการส่งข้อมูลที่เหมาะสม โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ได้แก่

4.1) การวัดสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายกับเกตเวย์ ใช้การวิเคราะห์สมรรถนะโดยใช้ 3 กรณีในการวัดสมรรถนะ คือ กรณี A.1, A.2 และ A.3 นอกจากนี้ในการทดสอบได้เปรียบเทียบระหว่างการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัวและ 5 ตัวเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการส่งข้อมูลของ ZigBee แบบกำหนดได้และแบบสุ่ม



รูปที่ 16 สมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัว)



รูปที่ 17 สมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (ใช้งานอุปกรณ์รับรู้ 5 ตัว)

ผลการทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 16 ซึ่งใช้งานอุปกรณ์รับรู้เพียง 1 ตัว เพื่อต้องการให้ลำดับการส่งข้อมูลมีคาบเวลาที่กำหนดได้ (deterministic) และสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งข้อมูลที่มีช่วงวินคาบเวลาเท่ากัน ซึ่งพบว่าสมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเริ่มมีค่าอัตราส่วนการส่งข้อมูลสำเร็จ 100% ที่มีคาบเวลาของอุปกรณ์รับรู้ตั้งแต่ 700 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป ซึ่งในสถานการณ์ทั่วไปอุปกรณ์รับรู้ 1 ตัวจะส่งทุก ๆ 60 วินาทีเท่านั้น ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงสามารถประมาณจำนวนรองรับของอุปกรณ์

รวบรวมข้อมูล 1 ตัวต่อจำนวนอุปกรณ์รับรู้ได้เท่ากับ 60/0.7 หรือ 85 อุปกรณ์ ด้วยเงื่อนไขการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้เข้าจังหวะกัน (synchronous)

การทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 17 เป็นกรณีทั่วไปที่มีการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้มากกว่า 1 ตัว ส่งผลให้มีการส่งข้อมูลแบบสุ่ม (random) ซึ่งเงื่อนไขการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ไม่เข้าจังหวะกัน (asynchronous) โดยผลการทดสอบจะขึ้นกับจังหวะการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้และการประมวลผลของอุปกรณ์รวบรวม

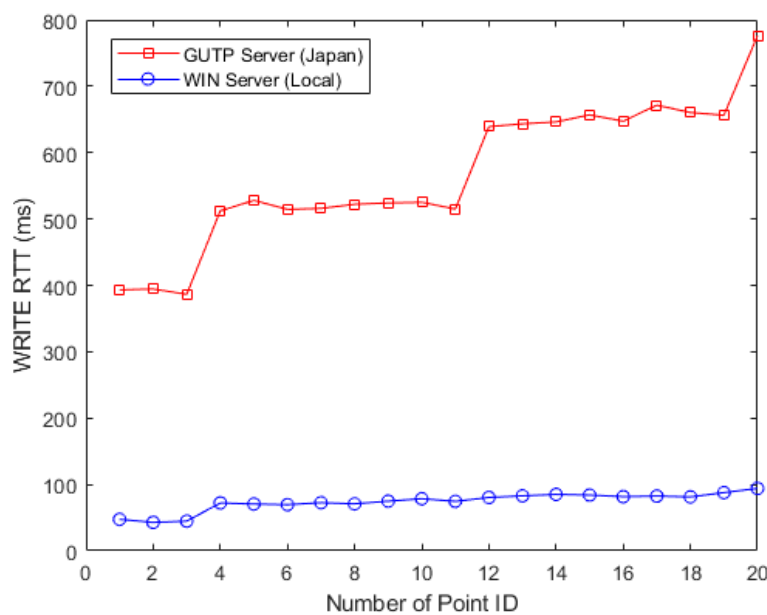
ข้อมูล โดยวิธีการทดสอบนั้นจะเหมือนกับการทดลองที่ 1 แต่จะแตกต่างกันที่จำนวนของอุปกรณ์รับรู้มีจำนวน 5 ตัว ซึ่งจะทดสอบจนกระทั่งหาผลที่คงที่ และผลการทดสอบสมรรถนะกรณีนี้พบว่าตั้งแต่คาบเวลาของอุปกรณ์รับรู้เท่ากับ 1500 มิลลิวินาทีเป็นต้นไปเริ่มคงที่ จึงสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่า ถ้ากรณีคาบเวลาการส่งเข้าจังหวะกันดังการทดลองที่ 1 โดยมีอุปกรณ์รับรู้จำนวน 5 ตัว ที่ค่าคาบเวลา 700 มิลลิวินาทีสามารถคำนวณค่าของคาบเวลาของอุปกรณ์ที่เหมาะสมต้องมีค่าคาบเวลาเป็น 700×5 หรือเท่ากับ 3500 มิลลิวินาที แต่ในผลการทดลองที่ 2 นี้ค่าสมรรถนะยังคงเป็น 60 % เท่านั้น

ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งสองกรณีสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ถ้ากรณีการส่งข้อมูลที่คาบเวลาที่กำหนดได้สามารถประเมินจำนวนการรองรับของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำกว่าการส่งข้อมูลแบบสุ่ม เนื่องจากการส่งแบบสุ่มทำให้มีโอกาสของกลุ่มข้อมูลเข้ามายังอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลมาพร้อมกันส่งผลให้เส้นของกลุ่มข้อมูลได้โดยพิจารณาจากผลการทดลองที่ 1 เมื่อเวลาเว้นช่วงน้อยกว่า 700 มิลลิวินาทีทำให้อุปกรณ์ประมวลผลไม่ทัน

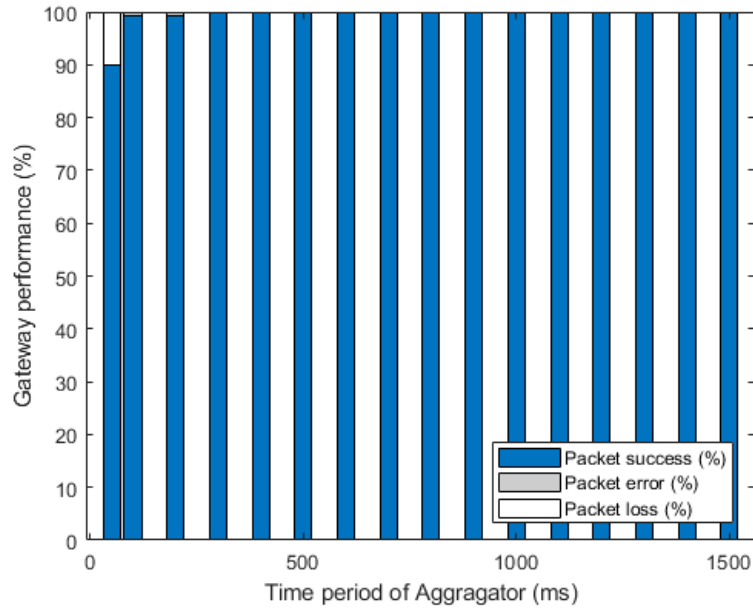
4.2) การวัดสมรรถนะของเกตเวย์

การวัดสมรรถนะของเกตเวย์ ซึ่งเกตเวย์เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลกับหน่วยเก็บข้อมูล โดยการทดสอบประกอบด้วย 3 กรณี ได้แก่ กรณี B.1, B.2 และ B.3

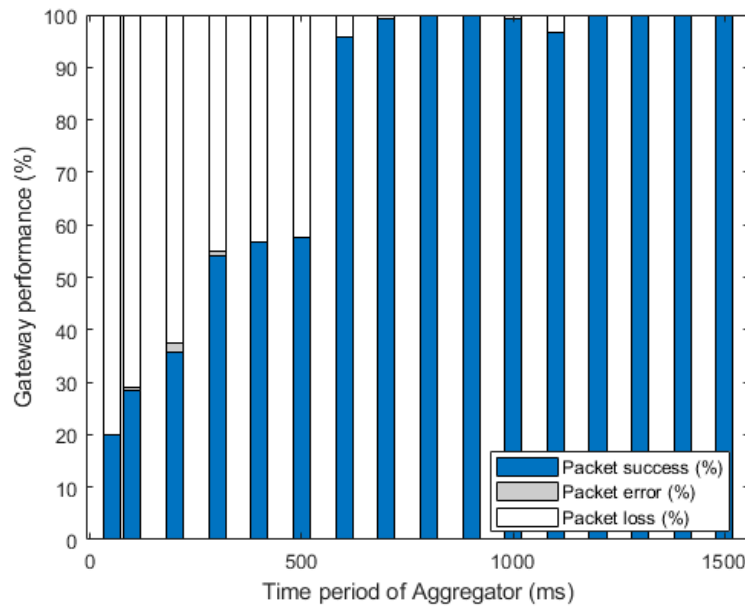
โดยที่ในงานวิจัย [16] พบว่าระยะห่างของโครงข่ายอินเทอร์เน็ตมีผลต่อเวลาไปกลับ (round trip time, RTT) โดยการทดสอบหัวข้อนี้จึงวัดค่า RTT เช่นกัน ด้วยการส่งข้อมูลตามโพรโทคอล WRITE โดยการทดสอบนี้จะเพิ่มจำนวนรหัสชุดข้อมูลจาก 1 ถึง 20 รวมถึงได้เปรียบเทียบจำนวนของช่วงเชื่อมต่อระหว่างเครื่องบริการ (server) ที่ติดตั้งในโครงข่ายเฉพาะที่ (local area network) ซึ่งติดตั้งในห้องเดียวกัน โดยมี 1 ช่วงเชื่อมต่อ และกรณีใช้งานเครื่องบริการจากโครงการมหาวิทยาลัยโตเกียวสีเขียว (Green University of Tokyo Project, GUTP) ซึ่งติดตั้งอยู่ประเทศญี่ปุ่นและมีระยะห่างเป็นจำนวน 18 ช่วงเชื่อมต่อ โดยผลการวัดค่า RTT พบว่ากรณีอยู่ในโครงข่ายเฉพาะที่จำนวนรหัสของจุดข้อมูลเพิ่มขึ้นแต่ค่า RTT เพิ่มขึ้นไม่เกิน 100 มิลลิวินาทีและค่อนข้างคงที่ แต่ในกรณีที่ใช้งานเครื่องบริการ GUTP ในการทดสอบ ผลการวัด RTT มีค่ามากกว่า 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเฉพาะที่ในห้องทดสอบเดียวกัน โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การวัดค่าเวลาไปกลับในการส่งข้อมูลโดยใช้โพรโทคอล WRITE



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของเกตเวย์กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (กรณีใช้งานเครื่องบริการ WIN)



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของเกตเวย์กับคาบเวลาการส่งข้อมูลของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (กรณีใช้งานเครื่องบริการ GUTP)

เมื่อทราบผลการทดสอบวัด RTT แล้ว จึงดำเนินการทดสอบวัดค่าสมรรถนะของเกตเวย์ซึ่งแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีแรกใช้งานเครื่องบริการ WIN และ GUTP โดยขั้นตอนการทดลองนั้นจะใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลเป็นตัวส่งอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับรู้ ซึ่งผลการทดสอบของอัตราการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลไปยังเกตเวย์กรณีใช้งานเครื่องบริการ WIN พบว่าสมรรถนะของเกตเวย์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพโดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 19

และในกรณีใช้งานเครื่องบริการ GUTP พบว่าสมรรถนะของเกตเวย์สามารถทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพในช่วงคาบเวลาการส่งข้อมูลต่ำกว่า 700 มิลลิวินาที โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 20

5) สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารไร้สายทั้ง การสื่อสารแบบระยะสั้นและการสื่อสารระยะไกลสำหรับระบบ บริหารการจัดการพลังงานตามมาตรฐาน IEEE1888 โดยใช้งาน เทคโนโลยี ZigBee และ LoRa ตามลำดับ ซึ่งการเชื่อมโยงทั้ง สองระบบนี้ได้ใช้งานอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลทำหน้าที่แปลงข้อมูล ระหว่างเทคโนโลยีทั้งสองให้ทำงานร่วมกันได้ รวมถึงโครงข่าย สื่อสารนี้ได้เชื่อมโยงกับมาตรฐาน IEEE1888 ผ่านเกตเวย์เพื่อส่ง ข้อมูลต่อไปยังระบบบริหารจัดการพลังงานในชุมชนได้ โดย ในส่วนผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็น การทดสอบได้วัดค่า RSSI ของอุปกรณ์ ZigBee ภายในอาคารศรี วิศวกรรม พบว่าค่า RSSI ลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น แต่สามารถ ขยายโครงข่ายได้ โดยใช้อุปกรณ์จัดเส้นทาง ซึ่งผลการทดสอบ สามารถบ่งชี้ได้ว่าภายในอาคารนั้นสามารถใช้งาน ZigBee สำหรับการวัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องด้านพลังงานได้ รวมถึงการวัด RSSI ของอุปกรณ์ LoRa ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา พบว่าการสื่อสาร LoRa สามารถรับส่ง ข้อมูลได้ครอบคลุมเพียงพอภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งระยะทาง สูงสุดในได้ระยะ 573 เมตร ส่วนที่สองเป็นการทดสอบ สมรรถนะของอุปกรณ์รวบรวมข้อมูลโดยใช้งาน Arduino (ATMEGA328PU) เป็นหน่วยประมวลผลหลักพบว่าการส่งข้อมูล ตามลำดับการส่งข้อมูลมีคาบเวลาที่กำหนดได้และสม่ำเสมอ อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จ 100% ที่มีช่วงเวลาดำเนินการ 700 มิลลิวินาทีเป็นต้นไป แต่กรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบสุ่มโดยใช้ งานอุปกรณ์รับรู้ 5 ตัว โดยผลการทดสอบมีอัตรารับข้อมูลสำเร็จ เพียง 60 % เมื่อ คาบเวลาแต่ละตัวเป็น 5 วินาทีแล้วก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากได้เปิดการทำงานของอุปกรณ์รับรู้พร้อมกันทำให้ การไหลของข้อมูลมาพร้อมกันจึงทำให้ส่งผลให้อุปกรณ์รวบรวมนี้ ไม่สามารถประมวลผลได้ทันเวลา ส่วนสุดท้ายการทดสอบ สมรรถนะเกตเวย์โดยเปรียบเทียบความแตกต่างการใช้งานเครื่อง บริการที่มีสถานที่แตกต่างกัน ซึ่งจำนวนช่วงเชื่อมต่อมีผลต่อ RTT และส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลสำเร็จลดลงเมื่อระยะห่าง ของโครงข่ายมีค่าเป็น 18 ช่วง จึงส่งผลให้การส่งข้อมูลสำเร็จที่มี ค่ามากกว่า 95% จะต้องมีความถี่การส่งข้อมูลของเกตเวย์ ตั้งแต่ 600 มิลลิวินาทีเป็นต้นไปจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6) ข้อเสนอแนะ

ระบบการทดสอบนี้ได้เป็นประโยชน์ให้กับผู้ออกแบบระบบ บริหารการจัดการพลังงานสำหรับบ้าน อาคาร โรงงาน จนกระทั่ง การขยายระบบภายในชุมชนที่เน้นการสื่อสารไร้สาย โดยผลการ ทดสอบระบบในงานวิจัยนี้ได้เป็นแนวทางการพัฒนาระบบต่อไป ในอนาคต โดยเลือกหน่วยประมวลผลเพื่อเพิ่มสมรรถนะการ ทำงานและรองรับจำนวนอุปกรณ์ได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ โดยใช้งานเครื่องบริการและการ พัฒนาต่อยอดเฟิร์มแวร์จาก รศ. ดร.ธิดยา โอชีโอ ในโครงการ GUTP มหาวิทยาลัยโตเกียว รวมถึง รศ. ดร.เชาวนิตศ อัครกุล จากโครงการ CU-BEMS จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำหรับช่วยเหลือใน ทดสอบวัดสัญญาณ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับสถานที่การทดสอบ จึงขอ กราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

REFERENCE

- [1] N. Hoonchareon, *Development of smart grid system: Mae Hong Son case study*. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press (in Thai), 2016.
- [2] S. G. Varghese, C. P. Kurian, V. I. George, A. John, V. Nayak and A. Upadhyay, "Comparative study of zigBee topologies for IoT-based lighting automation," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 201-207, 2019.
- [3] V. Q. Son and N. T. A. Khoa, "Evaluation of full-mesh networks for smart home applications," in *Proc. of (ISEE) International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*, Ho Chi Minh, Vietnam, Oct. 2019, pp. 73-78.
- [4] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 60-67, Oct.. 2016.
- [5] W. San-Um, P. Lekbunyasir, M. Kodyoo, W. Wongsuwan, J. Makfak and J. Kerdri, "A long-range low-power wireless sensor network based on U-LoRa technology for tactical troops tracking systems," in *Proc. of (ACDT) Third Asian Conference on Defense Technology*, Phuket, Thailand, Jan. 2017, pp. 32-35.

- [6] M. Lamkimeh, N. Naja, A. Jamali, and A. Yahyaoui, "The Internet of Things: Overview of the essential elements and the new enabling technology 6LoWPAN," in *Proc 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)*, Marrakech, Morocco, Nov. 2018, pp. 142-147.
- [7] T. Inthasut and C. Aswakul, "Development and reliability testing of IEEE1888 gateway for ZigBee wireless sensor network in Chulalongkorn University's building energy management system," in *Proc. of (ISIPS) 8th International Collaboration Symposium on Information, Production and Systems*, Fukuoka, Japan, Nov. 2014, pp. 1-4.
- [8] Laird Connect, "Zigbee Vs 6Lowpan for sensor networks," LAIRDCONNECT.com. <https://www.Lairdconnect.com/resources/white-papers/zigbee-vs-6lowpan-for-sensor-networks> (accessed Nov. 28, 2020)
- [9] K. Kaewwongsri and K. Silanon, "Design and implement of a weather monitoring station using CoAP on NB-IoT network," in *Proc. of (ECTI-CON) 17th International Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phuket, Thailand, Jun. 2020, pp. 230-233.
- [10] K. Lappanitchayakul, "Anti-theft device for car: Alert system using radio wave," in *Proc. of (ICIBMS) International Conf. on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences*, Shanghai, China, Nov. 2019, pp. 351-355.
- [11] N. Vatcharatiansakul, P. Tuwanut, and C. Pornavalai, "Experimental performance evaluation of LoRaWAN: A case study in Bangkok," in *Proc. of (JCSSE) 14th International Joint Conf. on Computer Science and Software Engineering*, Nakhon Si Thammarat, Thailand, Jul. 2017, pp. 1-4.
- [12] P. Saatwong and S. Suwankawin, "An Interoperable building energy management system with IEEE1888 open protocol for peak-load shaving," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 11-22, Jan. 2020.
- [13] C. Suwannapruk, K. Juntula, and T. Inthasuth, "Development of ZigBee wireless energy instrument for building energy management system with IEEE1888 standard," in *Proc. of (RMUTCON) 11th Rajamangala University of Technology National Conference*, Chaing Mai, Thailand, Jul. 2019, pp. 285-297.
- [14] K. Sureeya and T. Inthasuth, "Packet traffic measurement of IEEE1888 write procedure between ZigBee gateway and storage for building energy management system," in *Proc. of (ITC-CSCC) 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, JeJu, South Korea, Jun. 2019, pp. 1-4.
- [15] T. Inthasut, "Application of ZigBee wireless sensor and actuator network for building energy management system with IEEE1888 protocol," M. Eng. thesis, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [16] K. Sureeya and T. Inthasuth, "Round trip time measurement of embedded proxy gateway communication between IEEE1888 smart energy and IoT cloud smart city platforms," in *Proc. of (ITC-CSCC) 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, Nagoya, Japan, Jul. 2020, pp. 202-206.

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 กองบรรณาธิการไม่มีส่วนรับผิดชอบใดๆ 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. ประเภทของบทความที่รับพิจารณาลงตีพิมพ์

นิพนธ์ต้นฉบับต้องเป็นบทความวิจัย ประกอบด้วย บทความย่อ 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. บรรณาธิการต้องคัดเลือกบทความ โดยพิจารณาจากคุณภาพและความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับขอบเขตของวารสาร
3. บรรณาธิการต้องดำเนินการประเมินบทความอย่างเป็นธรรม ไม่ปฏิบัติเลือกปฏิบัติบทความโดยใช้อคติ
4. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้เขียนบทความ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง
5. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้เขียน และผู้ประเมินบทความ
6. บรรณาธิการต้องใช้โปรแกรมในการตรวจสอบการคัดลอกผลงาน เพื่อป้องกันการตีพิมพ์ผลงานซึ่งคัดลอกมาจากผลงานผู้อื่น หากพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่น บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการพิจารณาบทความทันที และติดต่อผู้เขียนเพื่อขอคำชี้แจง

จริยธรรมและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ

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

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

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]

2. รูปแบบของชื่อหัวข้อใช้รูปแบบตัวอักษร TH Sarabun New ขนาด 14 ตัวธรรมดา ในเนื้อหาขนาด 12 ตัวธรรมดา
3. การอ้างอิงทำยบความ 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 ริจิรวณิช, *การศึกษาการทำงาน: หลักการและกรณีศึกษา*, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ตัวอย่างที่ 2 การอ้างอิงจากวารสาร (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. Dechumpai 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,” *วารสารวิทยาลัยบัณฑิตศึกษาด้านการจัดการมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่7, ฉบับที่2, หน้า 13-27, 2557.

วารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น : วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

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. of (10th UBRC) Ubon Ratchathani University National Research Conf., Ubon Ratchathani, Thailand, Jul. 7-8, 2016, pp. 87-96.
- [3] นุชชรา เกรียงกรกฎ, ปรีชา เกรียงกรกฎ, สกาวเดือน พรหมทุ่ง และวิจิตรา ภิรมย์สุข, "งานวิจัยการลดชิ้นส่วนงานซ่อมในขั้นตอนการเย็บของโรงงานผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป," *การประชุมวิชาการระดับชาติ มอว. วิจัยครั้งที่ 10*, อุบลราชธานี, ประเทศไทย, 7-8 กรกฎาคม 2559, หน้า 87-96.

6. วิธีการจัดส่งบทความ

ผู้เขียนส่งบทความออนไลน์ได้ที่ <https://www.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 ISSN 2672-9989 (Online) เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ให้มีผลตั้งแต่วันที่ 20 มกราคม 2563 เป็นต้นไป

2. ตามประกาศสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ฉบับที่ 005/2563 เรื่อง การเก็บค่าอ่านประเมินค่าอ่านประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น พ.ศ. 2563 มีรายละเอียดให้ ยกเลิกประกาศสถาบันฉบับที่ 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 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

"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)
- หลักสูตรการจัดการการท่องเที่ยวและบริการเชิงนวัตกรรม (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

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