

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 40 ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน 2564

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN TCI (Tier 2)

ISSN (Print Edition) : 1686-9664
ISSN (Online Edition) : 2586-9795

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

EBSCOhost

วัตถุประสงค์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพของนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ โดยเผยแพร่บทความวิจัย (research article) บทความปริทัศน์ (review article) ในสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ไบไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ศิริอมรพรรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิชาติ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอองศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิ พรหมเทศ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อ่านเป็ร้อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนวนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ยืน ภู่วรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริชฎี กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพ็ชรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิญา วงศ์พิริโยธยา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.ณัฐพล ภูมิพันธุ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รัชชจินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Mr.Adrian R. Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ

ฉวีวรรณ อรรถเศรษฐ์

ผู้ช่วยเลขานุการ

พักรวีไล รุ่งวิสัย
จิรารัตน์ ภูสีฤทธิ

กำหนดเผยแพร่

ปีละ 6 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์
ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม-สิงหาคม
ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

เมื่อ “หม่อน” มีใช้เพียงเพื่อ “ม่อน” อีกต่อไป

“หม่อน” เป็นชื่อเรียกพืชชนิดหนึ่ง ในภาษาอังกฤษเรียกพืชชนิดนี้ว่า Mulberry ซึ่งจัดอยู่ในจำพวก *Morus sp.* เป็นพืชที่สามารถพบได้แทบจะในทุกทวีปทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่เคยมีอารยธรรมหรือร่องรอยของการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมมาก่อน ทั้งนี้เพราะใบหม่อนถือเป็นพืชอาหารเพียงชนิดเดียวของ “ตัวม่อน” (ในภาษาอีสาน) หรือหนอนไหม (ในภาษากลาง) ที่เราคุ่นเคยกินดินนั่นเอง นอกเหนือจากใบหม่อนที่เป็นอาหารหลักสำหรับการเลี้ยงหนอนไหมแล้ว ยังมีผลหม่อนซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม “เบอร์รี่” ที่มีสีส้มและรสชาติขวนรับประทานเป็นอย่างยิ่ง แต่สิ่งที่สำคัญยิ่งกว่าไปกว่าสีส้มและรสชาติที่ดีเยี่ยมเหล่านั้น ผลงานวิจัยเกี่ยวกับผลหม่อนจำนวนมากเผยให้เห็นว่า ผลหม่อนอุดมไปด้วยสารอาหารและคุณประโยชน์ต่อร่างกายนานับประการ ในปัจจุบันเราจึงสามารถเห็นผลิตภัณฑ์อันหลากหลายที่แปรรูปจากผลหม่อน อาทิ แยม น้ำผลไม้ ชา ไปจนถึงไวน์ชั้นยอดที่หมักจากผลหม่อนได้ด้วยเช่นกัน การวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารในผลหม่อนอบแห้งในลักษณะเดียวกับลูกเกดจำนวน 17 กรัมจะให้พลังงานเพียง 60 กิโลแคลอรี โดยประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 70 เส้นใยร้อยละ 14 มีโปรตีนร้อยละ 12 และมีไขมันร้อยละ 3 ของน้ำหนัก ซึ่งถือได้ว่ามีโปรตีนสูงเมื่อเทียบกับผลไม้ในกลุ่มเบอร์รี่ด้วยกัน อีกทั้งยังมีเส้นใยทั้งชนิดที่ละลายน้ำได้เช่น เพคตินอยู่ร้อยละ 25 และชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้ซึ่งลิกนินอยู่ร้อยละ 75 ของปริมาณเส้นใยทั้งหมด นอกจากนี้ผลหม่อนยังอุดมไปด้วยวิตามินซี วิตามินเค วิตามินอี และแร่ธาตุจำเป็น เช่น เหล็กและโพแทสเซียม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้ผลหม่อนกลายเป็นผลไม้ที่เป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมไปทั่วโลก ในประเทศไทยเอง เริ่มมีเกษตรกรเพาะปลูกหม่อนเพื่อเก็บเกี่ยวผลหม่อนสำหรับจำหน่ายทั้งในลักษณะของผลสด หรือแปรรูปเป็นน้ำผลไม้ หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยมีกลุ่มเป้าหมายเป็นผู้ที่รักสุขภาพและต้องการผลลัพธ์ในแง่ของการช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ช่วยลดคอเลสเตอรอล ป้องกันโรคความดันโลหิตสูง ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้แข็งแรง ช่วยระบบการไหลเวียนของเลือดและช่วยแก้ปัญหาท้องผูก เป็นต้น โดยปัจจุบันสามารถพบผลหม่อนสดจัดจำหน่ายอยู่ในห้างสรรพสินค้าชั้นนำ โดยมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่กิโลกรัมละ 200 บาท อย่างไรก็ตาม การจะให้เกษตรกรสามารถสร้างรายได้ที่ยั่งยืนจากการปลูกหม่อนเพื่อจำหน่ายผลนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการส่งเสริมและสร้างห่วงโซ่อุปทานที่เป็นธรรม รวมถึงการใช้เทคโนโลยีเพื่อเสริมสร้างให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีนวัตกรรม สอดคล้องกับกระแสรักสุขภาพที่กำลังเกิดขึ้นอยู่ในขณะนี้ และเมื่อผลิตภัณฑ์นวัตกรรมจากหม่อนได้รับการยอมรับทั้งในแง่ของมาตรฐานการผลิตและประสิทธิภาพชั้นเลิศต่อสุขภาพอย่างแท้จริงแล้ว เวลานั้น การปลูก “หม่อน” จะมีใช้เพียงเพื่อเป็นอาหารของตัว “ม่อน” อีกต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิชาการ

Agricultural Science

รูปแบบพฤติกรรมความเฉพาะเจาะจงของการกิน และกลวิธานการถ่ายทอดไวรัสโรคพืช
แบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวรและกึ่งถาวรของแมลงพาหะ

127

**Specific feeding behavior modes and mechanisms of Non-Circulative phytopathogenic
virus transmission in Non-Persistent and Semi-Persistent types of transmission of insect vectors**

ฐานัญ ณ พัทลุง

Thanat Na Phatthalung

บทความวิจัย

Computer and Information Technology

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจ
และหลอดเลือดโดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล

137

Efficiency comparison of cardiovascular risk prediction models using data mining algorithms

นงเยาว์ ไนอรุณ

Nongyao Nai-arun

ระบบสังเกตการณ์การใช้น้ำด้วยการประมวลผลภาพ

148

Water utilization monitoring system by using image processing

ลูกมาน ไชยราบ, เการาบ รุงเยว, ศิริกานต์ ชูเชิด

Lukman Chaiyarab, Gaurav Dhungyel, Sirikan Chucherd

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูลสำหรับพยากรณ์การเกิดโรค

157

The efficiency comparison of data mining techniques for patient incidence

อุกฤษฏ์ ศรีสุข, จารี ทองคำ

Ukrit Srisuk, Jaree Thongkam

Engineering

การศึกษาพฤติกรรมล้าจากการอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050

164

ที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีแก๊สปกคลุม

Study of fatigue behavior of AISI 1050 steel annealing with metal active gas process

นิพนธ์ มณีโชติ, ชัยยุทธ มีงาม

Nipon Maneechot, Chaiyoot Meengam

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบใช้วัสดุกรอง
สำหรับบำบัดน้ำเสียน้ำชะขยะ

173

An economic worthiness assessment of a bio-filter microbial fuel cell for leachate wastewater treatment

วัจสกร กาญจนะ, ฐิติพงศ์ พรหมจอม, วรินทร์ มีสัตย์

Wajussakorn Kanjana, Thitiphong Promjom, Warin Meesat

สารบัญ

- การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า
โดยใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว 181
The cascade PI controller design of a boost converter using an adaptive Tabu search algorithm
วิภูษณะ ฉายินทุ
Wiphusana Chayinthu
- พฤติกรรมการเดินทาง และการเข้าถึงการใช้บริการรถ Shuttle bus ภายใต้มหาวิทยาลัยขอนแก่น 192
Travel behavior and accessibility of shuttle bus in Khon Kaen University
หฤษิต ชาตาทิคุณ, ลัดดา ตันวานิชกุล
Haruesit Chatathicoon, Ladda Tanwanichkul
- Health Science**
คุณภาพอากาศภายในอาคารและความสัมพันธ์กับกลุ่มอาการผิวหนังของนักศึกษาแพทย์
ขณะเรียนมหกายวิภาคศาสตร์ 203
**Indoor air quality and its associations with skin related syndrome among
medical students during gross anatomy dissection**
เสาวนีย์ หน่อแก้ว, ปัทมณรร ธรรมบุตร, รัฐพงษ์ ไชยเดช,
กาญจนา ช้างแก้ว, ณัฐพงษ์ ยมสมิต, อารุญ เกตุสาคร
Saowanee Norkaew, Pannathorn Thammabut, Ratchapong Chaiyadej,
Kanjana Changkaew, Nattapong Yamasamit, Arroon Ketsakorn
- Mathematics**
สมบัติของตัวดำเนินการ \mathcal{N}_m^a ในปริภูมิโครงสร้างเล็กสุดที่มีอุดมคติ 213
Properties of \mathcal{N}_m^a -operator in minimal structure space with an ideal
ยุทธพงศ์ มนต์ทิพารมณ, ดรุณี บุญขารี, โชคชัย วิริยะพงษ์
Yutthapong Manuttiparom, Daruni Boonchari, Chokchai Viriyapong
- Physical Science**
การสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับอย่างง่ายสำหรับการเรียนการสอน 220
Construction of a simple alternative current (AC) magnetic field meter for classroom teaching
ทิพย์วรรณ หงกะเชิฏ, สมประสงค์ โพธิ์สุด, นัตติพร เจริญชีพ, รัตนสุดา สุภคณัยสร, ธนพงษ์ เชื้อจุ่น
Tippavan Hongkachern, Somprasong PhoSud, Nattiporn charcencheep,
Rattanasuda Supadanaisorn, Tanapong Chuachun
- ผลของรูปแบบการไหลแบบธรรมชาติกับการไหลแบบบังคับของน้ำต่อค่าประสิทธิภาพของ
แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง 228
**Effects of natural flow and force flow patterns of water on efficiency of a semi-transparent
photovoltaic thermal module**
เอกภูมิ ใจศิริ, อนุสรณ์ แสงประจักษ์
Akaphoom Jaisiri, Arnusorn Seangprajak

รูปแบบพฤติกรรมความเฉพาะเจาะจงของการกิน และกลวิธานการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชแบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวรและกึ่งถาวรของแมลงพาหะ

Specific feeding behavior modes and mechanisms of Non-Circulative phytopathogenic virus transmission in Non-Persistent and Semi-Persistent types of transmission of insect vectors

ฐานัญ ณ พัทลุง^{1*}

Thanat Na Phatthalung^{1*}

Received: 10 November 2020 ; Revised: 25 January 2021 ; Accepted: 2 March 2021

บทคัดย่อ

การระบาดและการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะนับเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการบริหารจัดการทางการเกษตร เนื่องจากแมลงพาหะมีวงจรชีวิตสั้น สามารถอพยพเคลื่อนย้ายตามลมมรสุมได้ในระยะทางที่ไกลและไกล นอกจากนี้พฤติกรรมของแมลงพาหะสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อความอยู่รอดได้ตามถิ่นอาศัยและสภาพแวดล้อม จึงสามารถผลิตประชากรได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งส่งผลกระทบต่อและก่อให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้างต่อผลผลิตเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก บทความฉบับนี้จึงได้ทบทวนวรรณกรรมและให้มุมมองที่มุ่งเน้นถึงรูปแบบและกลวิธานในการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองรูปแบบหลัก ได้แก่ แบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวรและแบบไม่ไหลเวียนชนิดกึ่งถาวร ตามลำดับ รูปแบบการถ่ายทอดไวรัสแบบไม่ไหลเวียนนี้จะอาศัยปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตีนตัวสื่อสัญญาณบริเวณพื้นผิวอนุภาคไวรัสและโปรตีนตัวรับสัญญาณบริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลงพาหะที่มีความสอดคล้องกับช่วงระยะเวลาการได้รับไวรัสของแมลงพาหะจากพืช การถ่ายทอดไวรัสไปสู่อุปกรณ์โดยแมลงพาหะ และขอบเขตที่จำกัดของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะ ได้แก่ ช่วงวินาทีถึงนาที และช่วงนาทีถึงชั่วโมง ตามลำดับ โดยเฉพาะขอบเขตของการเกิดปฏิสัมพันธ์บริเวณส่วนปลายปาก และบริเวณทางเดินอาหารส่วนหน้าของแมลงพาหะเท่านั้น ทั้งนี้ไวรัสพืชจะไม่มีเพิ่มจำนวนและเคลื่อนย้ายเข้าสู่กระแสโลหิตของแมลง ไม่มีการไหลเวียนเข้าสู่ช่องว่างกลางลำตัว ไม่สามารถถ่ายทอดไวรัสได้ภายหลังจากการลอกคราบของแมลงพาหะ และไม่สามารถถ่ายทอดไวรัสผ่านทางไข่ การเรียนรู้และการเข้าใจถึงพฤติกรรมตามธรรมชาติและความเฉพาะเจาะจงของกระบวนการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชโดยแมลงพาหะจะนำไปสู่การวางยุทธศาสตร์ในระเบียบวิธีและการถ่ายทอดองค์ความรู้ และการปฏิบัติที่มีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลสูงสุดอย่างเป็นรูปธรรมที่ยั่งยืน เพื่อการควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสโรคพืชและแมลงพาหะ และป้องกันผลกระทบเชิงลบต่ออุตสาหกรรมเกษตรทั้งในระดับจุลภาคและมหภาค

คำสำคัญ: ไวรัสพืช แมลงพาหะ การถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียน การถ่ายทอดไวรัสพืชชนิดไม่ถาวร การถ่ายทอดไวรัสพืชชนิดกึ่งถาวร

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

¹ Ph.D. student, Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120 Thailand

* Corresponding author. E-mail: naphatthalung_thanat@hotmail.com

Abstract

The outbreak and transmission of plant viruses by insect vectors present major problems in agricultural management processes. Insects have short reproductive life cycles and both short- and long-distance migrations on monsoon winds. In addition, insect behavior may alter for survival according to habitat and environment, producing populations relatively quickly. This causes widespread damage to agricultural yields for domestic consumption and export. This article reviews the literature, focusing on the perspective of feeding behavior modes and mechanisms of non-circulative plant viral disease transmission by insect vectors. These can be classified into two main types: non-persistent and semi-persistent. Types of transmission may be distinguished by interaction between signaling proteins on viral particle surface areas and receptor proteins in vector mouthparts. These interactions were reported as consistent with feeding periods for vector acquisition and inoculation periods in plants, and with limiting plant viral-vector interaction from seconds to minutes, and minutes to hours respectively. In particular, limiting interaction of the tip and foregut of the vector mouth resulted in plant viruses not multiplying or moving into the circulatory system hemolymph, hemocoel, post-molt transmission, or transovarial transmission. Study and understanding natural behavior and specificity of plant viral diseases transmitted by vectors may lead to strategic planning for methodological knowledge and knowledge transfer. Efficient and effective techniques in practical sustainability should therefore be developed, controlling the spread of plant viral diseases and vectors and preventing negative effects on the agricultural industry at both micro and macro levels.

Keywords: Plant viruses, Insect vectors, Non-circulative plant virus transmission, Non-persistent plant virus transmission, Semi-persistent plant virus transmission

บทนำ

ชนิดของไวรัสพืชและแมลงพาหะมีรูปแบบและกลไกหรือกระบวนการถ่ายทอดเพื่อการก่อโรคที่จำเพาะและหลากหลาย ซึ่งมีการศึกษามายาวนาน ผลจากการศึกษารูปแบบและกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะนี้ถูกใช้เป็นหนึ่งในหลักเกณฑ์สำคัญหลาย ๆ หลักเกณฑ์เพื่อการจัดอนุกรมวิธานของไวรัสพืช (plant virus taxonomy) ผนวกกับการมีเทคโนโลยีการวิเคราะห์ลำดับเบส (sequencing technologies) จึงทำให้สามารถที่จะพิสูจน์ (identification) และทวนสอบ (verification) ความถูกต้องของทฤษฎีต่างๆ ที่มีการนำเสนอเกี่ยวกับรูปแบบและกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสและแมลงพาหะในรูปแบบที่เป็นเอกลักษณ์จำเพาะ (unique relationship) ทั้งปฏิสัมพันธ์เชิงเดี่ยว (single-relationship) และปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน (co-relationship) ในรูปแบบที่เป็นปฏิปักษ์ (antagonistic) และเสริมฤทธิ์ (synergistic) (Syller, 2012) การจัดรูปแบบของการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะจึงมีความสำคัญในการศึกษาเพื่ออธิบายถึงกระบวนการและปฏิสัมพันธ์ของกระบวนการในระดับชีวโมเลกุลเพื่อการถ่ายทอดโรค

ดังนั้น บทความวิชาการฉบับนี้จึงนำเสนอรูปแบบและปฏิสัมพันธ์ของกระบวนการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชแบบไม่ไหลเวียนโดยแมลงพาหะ ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาร่วมกันระหว่างจากไวรัสสาเหตุโรคพืชและแมลงพาหะ (co-evolution)

การรับรู้และการเข้าใจถึงกระบวนการในการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชโดยแมลงพาหะนี้ มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่จะนำไปสู่การต่อยอดทางความคิดในทางทฤษฎีเพื่อที่จะเข้าใจการพัฒนาการและปฏิสัมพันธ์ระหว่างแมลงพาหะและไวรัสโรคพืช และนำไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้นเพื่อป้องกัน ควบคุม และกำจัดแมลงพาหะและไวรัสโรคพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แมลงพาหะและความสำคัญของการถ่ายทอดไวรัสพืช

กระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะได้รับการศึกษาวิจัยเป็นวงกว้าง เนื่องจากมีจำนวนสมาชิก ความหลากหลาย และความจำเพาะของไวรัสพืชและแมลงพาหะมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการถ่ายทอดไวรัสในรูปแบบอื่นๆ ผนวกกับผลกระทบเชิงลบที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรและสภาพรวมในระดับเศรษฐกิจ ซึ่งสามารถพบได้ทั่วทุกภูมิภาคของโลกทั้งพื้นที่เขตอบอุ่น (temperate zone) เขตกึ่งร้อน (subtropical zone) และเขตร้อน (tropical zone) ตัวอย่างของแมลงพาหะที่ถ่ายทอดไวรัสพืช ได้แก่ แมลงจำพวกเพลี้ยอ่อน (aphid หรือ plant lice) เพลี้ยไฟ (thrips) เพลี้ยแป้ง (mealybug) แมลงหรีวขาว (whitefly) ไร (mite) ตัวด้วง (beetle) เพลี้ยกระโดด (planthopper) และเพลี้ยจักจั่น (leafhopper) เป็นต้น (Stafford *et al.*, 2012)

ความสำคัญของการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะนี้ สืบเนื่องจากการระบาดสร้างความเสียหายของแมลงพาหะและไวรัสพืช ซึ่งมีสาเหตุจากกระบวนการและเทคโนโลยีทางการเกษตรแบบสำเร็จรูป (package of technology) ในระดับอุตสาหกรรมทั้งจุลภาคและมหภาคเพื่อผลิตพืชให้ได้ปริมาณมากในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง (monoculture) ทำให้มีปริมาณพืชอาหารและพืชอาศัยของแมลงที่มากเกินไป แมลงจึงมีศักยภาพที่จะปรับตัวตามธรรมชาติเพื่อเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็วและมหาศาล ซึ่งแมลงพาหะมีช่วงอายุขัยที่สั้นและมีการอพยพเคลื่อนที่หรือการอยู่ข้ามฤดูปลูกในพื้นที่เกษตรกรรม เป็นเหตุให้ยากต่อการป้องกัน ควบคุม และกำจัด เมื่อเกิดอุบัติการณ์การระบาดขึ้นจึงนำมาซึ่งกระบวนการผลิตซ้ำเป็นวงจรลูกโซ่อย่างต่อเนื่องของความเสียหายและลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏบนพืชอาศัย ได้แก่ ความเสียหายทางตรงจากการดูดกินน้ำเลี้ยงพืชเพื่อทำลายพืชของแมลงพาหะ ความเสียหายทางอ้อมจากไวรัสก่อโรคพืชที่ถ่ายทอดโดยแมลงพาหะ และลักษณะทางกายภาพบนพืชอาศัยแต่ละชนิดที่ปรากฏความแตกต่างกันอย่างจำเพาะเนื่องมาจากการเข้าทำลายของไวรัสพืชและแมลงพาหะ ลักษณะเช่นนี้ไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นได้หากขาดการพัฒนาาร่วมกัน (coevolution) ของพืชอาศัย แมลงพาหะ และไวรัสก่อโรคเป็นต้น (MacDiarmid *et al.*, 2013)

กระบวนการและรูปแบบของถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะ

กระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะ (plant viral transmission) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ ได้แก่ (1) การรับไวรัส (acquisition) จากพืชที่เป็นโรค (viral infected plants) (2) ความสามารถในการเพิ่มจำนวน (replication) และการฟักตัว (incubation) ของไวรัสพืชในอวัยวะภายในของแมลงพาหะ และ (3) การเคลื่อนย้าย (translocation) ไวรัสพืชไปยังส่วนที่จะทำให้เกิดโรค (inoculation) ตามลำดับ (Drucker & Then, 2015) รูปแบบการเพิ่มจำนวนและการเคลื่อนย้ายของไวรัสพืชในอวัยวะภายในของแมลงพาหะ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ (1) แบบไม่ไหลเวียน หรือไม่มีการเคลื่อนย้ายของไวรัสเข้าสู่อวัยวะภายในของแมลงพาหะ (non-circulative) และ (2) แบบไหลเวียน หรือมีการเคลื่อนย้ายของไวรัสเข้าสู่อวัยวะภายในของแมลงพาหะ (circulative หรือ persistent) โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทั้งสองดังกล่าวนี้ ได้แก่ (1) ลักษณะอวัยวะเพื่อการดูดกินน้ำเลี้ยงพืชของแมลงพาหะ (2) ความถี่และช่วงระยะเวลาปฏิสัมพันธ์ที่แมลงพาหะดูดกินน้ำเลี้ยงจากท่อน้ำและท่ออาหารของพืช (frequency and duration of relationship) และ (3) กระบวนการเคลื่อนย้ายของไวรัสพืช

ไปสู่อวัยวะเป้าหมายภายในอวัยวะภายในของแมลงพาหะ (Dietzgen *et al.*, 2016 ; Gray *et al.*, 2014 ; Ng & Falk, 2006 ; Whitfield *et al.*, 2015) จากรายงานการศึกษาซึ่งมีอยู่มากมายในฐานข้อมูลงานวิจัยทางวิชาการถึงกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสและเนื้อเยื่ออวัยวะภายในของแมลงพาหะนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. การถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน

การเคลื่อนย้ายและการเพิ่มจำนวนของไวรัสพืชในอวัยวะภายในของแมลงพาหะเพื่อการถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียน (non-circulative transmission หรือ cuticle associated) เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างแมลงพาหะและพืชโดยตรง (direct physical contact หรือ mechanical transmission) โดยกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชนี้ แมลงจะใช้ส่วนปาก (mouthparts หรือ oral cavity) ที่มีลักษณะแบบเจาะดูด (piercing-sucking type) (Drucker & Then, 2015) ซึ่งอยู่ทางด้านล่างของส่วนหัว และเป็นบริเวณช่องทางเดินอาหารส่วนหน้า (anterior alimentary canal) ที่ประกบกันเป็นหลอดยาว (stylet) จากรยางค์แหลมและเล็กคล้ายเข็ม (needle) ของกราม (mandible) และฟัน (maxilla) แทะเจาะเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชเพื่อการดูดกินน้ำเลี้ยง โดยโครงสร้างภายในส่วนปากประกอบด้วยช่องปากส่วนรับอาหารเข้า (maxillary stylet food canal) และช่องปากส่วนปล่อยน้ำลาย (maxillary stylet salivary canal) (Powell, 2005) ซึ่งในขณะที่แมลงพาหะใช้ปากแทงเจาะเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชเพื่อการดูดกินน้ำเลี้ยงนี้ ปากของแมลงจะแทงเจาะเซลล์พืชหลายๆ เซลล์ เพื่อทำการสำรวจ (probe หรือ stylet penetration) ความเหมาะสมของพืช (host-plant suitability) ก่อนเริ่มกระบวนการดูดกิน ดังนั้น เซลล์พืชที่ถูกแทงเจาะด้วยปากของแมลงแม้จะไม่มีหลอดดูดกินน้ำเลี้ยงจึงสามารถที่จะได้รับไวรัสจากแมลงพาหะได้ ในขณะที่เดียวกันแมลงก็สามารถได้รับไวรัสจากเซลล์พืชที่เป็นโรคเช่นเดียวกัน หลังจากแมลงได้รับไวรัสจากการแทงเจาะเซลล์พืชของปากแล้ว ไวรัสพืชจะเกิดปฏิสัมพันธ์เฉพาะบริเวณชั้นเยื่อคิวติเคิล (cuticular lining) ของช่องอาหาร (food canal) และ/หรือช่องน้ำลาย (salivary canal) จากนั้นจึงสามารถไหลเวียน (circulation) และเคลื่อนเข้าสู่หลอดอาหาร (esophagus) และบริเวณทางเดินอาหารส่วนหน้า (foregut หรือ stomodeum) เท่านั้น โดยไวรัสพืชไม่มีการเคลื่อนย้ายเข้าสู่กระแสโลหิตของแมลงที่มีระบบหมุนเวียนโลหิตแบบเปิด (open circulatory system) ซึ่งเป็นระบบที่กระแสโลหิตไม่ได้ไหลเวียนไปตามเส้นเลือดตลอดเวลา และไม่มีการไหลเวียนเข้าสู่ช่องว่างกลางลำตัว (haemocoel หรือ vector body cavity) (Haine *et al.*, 2007 ; Viteri & Gordillo, 2009) โดยสามารถแบ่งย่อยได้เป็น

2 ลักษณะ ได้แก่ (1) แบบไม่ถาวร หรือไวรัสไม่คงอยู่ในตัวแมลงพาหะ (non-persistent หรือ stylet-borne transmission) และ (2) แบบกึ่งถาวร หรือไวรัสคงอยู่ในตัวแมลงพาหะเพียงชั่วคราว (semi-persistent หรือ foregut-borne transmission) ตามลำดับ (Pirone & Blanc, 1996 ; Powell, 1991)

1.1 การถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวร

การถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวรโดยแมลงพาหะ (non-circulative หรือ non-persistent หรือ stylet-borne transmission) จะมีช่วงระยะเวลาที่แมลงพาหะได้รับไวรัส (acquisition period) โดยใช้อวัยวะส่วนปาก (stylet) แบบเจาะดูดแทงเจาะเข้าไปในเนื้อเยื่อพืช และพร้อมที่จะถ่ายทอดไวรัส (inoculation) ได้ทันทีอย่างรวดเร็ว (Ammar *et al.*, 1994 ; Berger & Pirone, 1986 ; Brunt *et al.*, 1996 ; Martin *et al.*, 2007 ; Powell, 2005) ภายหลังจากดูดกินน้ำเลี้ยงจากท่อน้ำและท่ออาหารจากพืชที่เป็นโรคเพียงครั้งเดียว ซึ่งไม่มีระยะแฝงตัว (latent period) ของไวรัสในแมลงพาหะ และใช้ระยะเวลาสั้นในช่วงวินาทีถึงนาที (Palacios *et al.*, 2002) อีกทั้งลักษณะขอบเขตที่จำกัดของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสและแมลงพาหะ สามารถพบได้เฉพาะบริเวณส่วนปาก ทำให้เรียกลักษณะดังกล่าวเช่นนี้ว่า stylet-borne transmission นอกจากนี้ลักษณะช่วงระยะเวลาและบริเวณที่จำกัดนี้ ทำให้กระบวนการถ่ายทอดไวรัสถูกยับยั้งโดยสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของน้ำลายแมลง ส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการคงอยู่ภายในอวัยวะภายในและประสิทธิภาพในการถ่ายทอดไวรัสของแมลงพาหะ ทำให้เรียกลักษณะดังกล่าวเช่นนี้ว่า non-persistent ตามลำดับ (Whitfield *et al.*, 2015)

ตัวอย่างการถ่ายทอดไวรัสในลักษณะนี้สามารถพบได้ในไวรัสกลุ่ม double-stranded DNA-reverse transcriptase (dsDNA-RT) สกุล Caulimovirus และไวรัสกลุ่ม positive-sense (+) single-stranded RNA (ssRNA) สกุล Fabavirus, Potyvirus, Carlavirus, Cucumovirus, Potexvirus, Alfamovirus, Machlomovirus และ Macluravirus เป็นต้น (van Bekkum *et al.*, 2014) โดยแมลงจำพวกเพลี้ยอ่อนและเพลี้ยไฟ ได้แก่ เพลี้ยอ่อนยาสูบ (peach-potato aphid) หรือเพลี้ยอ่อนลูกท้อ (green peach aphid) ชนิด Myzus persicae (Sulzer, 1776) เพลี้ยอ่อนฝ้าย (cotton aphid) หรือเพลี้ยอ่อนแตง (melon aphid) ชนิด Aphis gossypii (Glover, 1877) เพลี้ยอ่อนถั่ว (pea aphid) ชนิด Acyrthosiphon pisum (Harris, 1776) เพลี้ยอ่อนกะหล่ำปลี (cabbage aphid) ชนิด Brevycoryne brassicae (Linnaeus, 1758) (Uzest *et al.*, 2010) และเพลี้ยไฟข้าวโพด (corn thrips) ชนิด Frankliniella williamsi (Hood, 1915) (Cabanac *et al.*, 2013)

1.2 การถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนชนิดกึ่งถาวร

การถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียนชนิดกึ่งถาวรโดยแมลงพาหะ (non-circulative หรือ semi-persistent หรือ foregut-borne transmission) ในบางกรณีสามารถพบได้ในไส้เดือนฝอย (nematode) ตัวอย่างการถ่ายทอดไวรัสในลักษณะนี้สามารถพบได้ในไวรัสกลุ่ม dsDNA-RT สกุล Badnavirus และไวรัสกลุ่ม ssRNA สกุล Closterovirus, Sequivirus, Trichovirus และ Waikavirus เป็นต้น โดยแมลงจำพวกเพลี้ยอ่อน เพลี้ยแป้ง แมลงหริ่งขาว และเพลี้ยจักจั่น (Ng & Falk, 2006) เป็นต้น

โดยทั่วไปกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนชนิดกึ่งถาวรนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนชนิดไม่ถาวร แต่จะมีช่วงระยะเวลาที่แมลงพาหะได้รับไวรัสจากพืชที่เป็นโรค (acquisition period) ภายหลังจากดูดกินน้ำเลี้ยงจากท่อน้ำและท่ออาหารพืช โดยใช้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น จัดอยู่ในช่วงระดับปานกลางอยู่ระหว่าง ชั่วโมงถึงวัน แต่ในบางกรณีอาจยาวนานตั้งแต่วันถึงสัปดาห์ และไม่มีระยะแฝงตัว (latent period) ของไวรัสในแมลงพาหะเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของการถ่ายทอดไวรัสจะเพิ่มขึ้นหากแมลงมีระยะเวลาในการถ่ายทอดไวรัสติดต่อกันตั้งแต่ 12-24 ชั่วโมง (หรือมากกว่า) เนื่องมาจากมีขอบเขตที่จำกัดของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสและแมลงพาหะบริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลงและบริเวณทางเดินอาหารส่วนหน้าเท่านั้น จึงทำให้เรียกลักษณะดังกล่าวเช่นนี้ว่า foregut-borne transmission ในทางกลับกันจะมีประสิทธิภาพที่ลดลงหรือสูญเสียความสามารถในการถ่ายทอดโรค เนื่องมาจากการดูดกินน้ำเลี้ยงพืชจากพืชปกตินานประมาณ 2 วัน หรือเกิดจากกระบวนการเผาผลาญสารอาหารของแมลง (Blanc *et al.*, 2014)

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องและกรณีตัวอย่างของรูปแบบการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน

ลักษณะการถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียนทั้งชนิดชนิดไม่ถาวรและกึ่งถาวรดังกล่าวข้างต้นนี้ ไม่สามารถที่จะถ่ายทอดในแบบเชิงกล (mechanical transmission) แต่ต้องอาศัยกระบวนการดูดกินน้ำเลี้ยงพืชโดยแมลงพาหะ โดยมีปัจจัยที่ส่งเสริมการเกิดปฏิสัมพันธ์ที่จำเพาะต่อกันระหว่างองค์ประกอบดังนี้ (1) สารประกอบของแมลงพาหะ (vector-associated compounds) ที่เกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อกระบวนการและพฤติกรรมรับรู้ของไวรัส (virus perceptive behavior) โดยเฉพาะบริเวณส่วนปลายปากของแมลง (specific stylet region) ซึ่งมีโปรตีนตัวรับสัญญาณที่ก่อโรคได้อยู่ (specific

protein receptor) (2) ความเฉพาะเจาะจงกับชนิดของแมลงบริเวณดูดกิน และกระบวนการดูดกินน้ำเลี้ยงพืชของแมลงพาหะ (3) พลวัตของเซลล์พืช (dynamic plant cell) (4) การเคลื่อนที่ของไวรัสในเซลล์สิ่งมีชีวิตให้อาศัย (host cell) จากเซลล์หนึ่งไปอีกเซลล์หนึ่ง (cell-to-cell movement protein) และการแสดงอาการของโรค (symptoms expression) (5) องค์ประกอบของอนุภาคไวรัสพืช และ (6) บริเวณเนื้อเยื่อของพืชที่เป็นโรค (Bak *et al.*, 2013 ; Martinieri *et al.*, 2013)

กระบวนการและพฤติกรรมกรรมกรับรู้ของไวรัส เป็นผลสืบเนื่องจากการแปรผันของรหัสพันธุกรรมของไวรัสที่สามารถแปลรหัสได้เป็นโปรตีน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของอนุภาคไวรัส (Drucker & Then, 2015 ; Lucas *et al.*, 2002 ; Perry *et al.*, 1998 ; Smith *et al.*, 2000) รวมทั้งความรุนแรงของลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นบนพืชอาศัย ได้แก่ (1) โปรตีนโครงสร้างของไวรัส (structural protein, SP) ที่ทำหน้าที่ป้องกันสารพันธุกรรมของไวรัสจากสิ่งแวดล้อม และช่วยในกระบวนการเกาะติดบริเวณผิวเซลล์สิ่งมีชีวิตให้อาศัยของไวรัส (viral attachment หรือ transportation) และ (2) โปรตีนที่ไม่ใช่โครงสร้างของไวรัส (non-structural protein, NSP) ทำหน้าที่ช่วยในกระบวนการเพิ่มจำนวนไวรัสในเซลล์สิ่งมีชีวิตให้อาศัย เช่น reverse transcriptase (RNA-dependent-DNA polymerase), neuraminidase และ lysozyme เป็นต้น (Govier & Kassanis, 1974) นอกจากนี้หากโปรตีนดังกล่าวข้างต้นนี้เกิดการผสมผสาน (combination) ทั้งระหว่างยีนที่คล้ายคลึงกัน (homologous) และต่างกัน (heterologous) จะพบว่าลักษณะการผสมผสานระหว่างยีนที่ต่างกัน (heterologous combination) อาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการถ่ายทอดไวรัสได้มากกว่า 1 ชนิด (Pirone & Blanc, 1996)

3. กรณีตัวอย่างของรูปแบบการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน

ตัวอย่างของรูปแบบการถ่ายทอดไวรัสพืชทั้งชนิด DNA และ RNA โดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนผ่านกลไกและการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของอนุภาคไวรัสและบริเวณรับสัญญาณของแมลงพาหะเพื่อการถ่ายทอดโรค ในลักษณะของโปรตีนโครงสร้างและโปรตีนที่ไม่ใช่โครงสร้างของไวรัสซึ่งทำหน้าที่หลักเพื่อเป็นตัวเชื่อมโมเลกุล (molecular linker) และตัวกลางในการเกิดปฏิสัมพันธ์ (mediates binding) ระหว่างไวรัสและเซลล์สิ่งมีชีวิตให้อาศัย (Blanc *et al.*, 2014 ; Ng & Falk, 2006) หรือเรียกว่าโมเลกุลสองหน้าที่ (bi-functional molecules) (Pirone & Blanc, 1996) ซึ่งสามารถเกิดได้กับรูปแบบการถ่ายทอดไวรัสพืชแบบไม่ไหลเวียนทั้งชนิดชนิดไม่ถาวรและกึ่งถาวร และมีความเฉพาะเจาะจงกับชนิดของแมลง โดยสามารถแบ่งได้สองลักษณะ ได้แก่

3.1 Capsid protein strategy (CPS)

CPS เป็นรูปแบบของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสกับเซลล์สิ่งมีชีวิตให้อาศัยโดยตรง (direct interaction) โดยอาศัยกลไกและความจำเพาะของโปรตีนหน่วยย่อยบริเวณพื้นผิวอนุภาคไวรัส (viral capsid protein, VCP) ร่วมกับโปรตีนตัวรับสัญญาณบริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลง (insect protein receptor, IPR) ที่จำเพาะในการถ่ายทอดไวรัส ซึ่งแบ่งได้สองลักษณะย่อย ได้แก่

(1) อาศัยกลไกและความจำเพาะระหว่างตำแหน่งและชนิดของกรดอะมิโนบน VCP ของอนุภาคไวรัสและ IPR ของแมลงพาหะ ซึ่งหากเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและชนิดของกรดอะมิโนบน VCP ไป จะส่งผลต่อกระบวนการและความจำเพาะของแมลงในการถ่ายทอดโรค ได้แก่ ไวรัสในสกุล Cucumovirus เช่น ไวรัสใบด่างแตง (Cucumber mosaic virus, CMV) จากการรายงานของ Perry *et al.*, (1998) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของตำแหน่งกรดอะมิโนบน VCP ของ CMV ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายทอดโรคโดยเพลี้ยอ่อน ด้วยการเปลี่ยนแปลงชนิดของกรดอะมิโนบน VCP ของ CMV-M ซึ่งเป็นสายพันธุ์ของ CMV ที่ไม่สามารถถ่ายทอดไวรัสได้ด้วยเพลี้ยอ่อนชนิดใดเลยในตำแหน่งที่ 25, 129, 162, 168 และ 214 ตามลำดับ และพบว่า CMV-M สามารถถ่ายทอดโรคได้ด้วยเพลี้ยอ่อน *M. persicae* (Sulzer, 1776) ได้ และเมื่อเปลี่ยนกรดอะมิโนในตำแหน่งที่ 129, 162 และ 168 แล้ว ทำให้ CMV-M สามารถถ่ายทอดโรคได้ด้วยเพลี้ยอ่อน *A. gossypii* (Glover, 1877) ดังนั้นกระบวนการถ่ายทอด CMV ด้วยเพลี้ยอ่อนจึงขึ้นกับตำแหน่งและชนิดของกรดอะมิโนบน VCP เป็นสำคัญ (Liu *et al.*, 2002) (Figure 1A)

(2) อาศัยกลไกและความจำเพาะระหว่าง VCP ของอนุภาคไวรัสและ IPR ของแมลงพาหะ ได้แก่ ไวรัสในสกุล Closterovirus เช่น Lettuce infectious yellows virus (LIYV) ที่มีโปรตีนหน่วยย่อยบริเวณพื้นผิวอนุภาคไวรัสทั้งโปรตีนหน่วยย่อยชนิดหลัก (major capsid protein, CP) และโปรตีนหน่วยย่อยชนิดรอง (minor capsid protein, CPm) โดย LIYV จะอาศัยบริเวณจำเพาะของ CPm ในการเกิดปฏิสัมพันธ์กับ IPR ของแมลงพาหะ (Stewart *et al.*, 2010 ; Tian *et al.*, 1999) (Figure 1C)

3.2 Helper protein strategy (HPS)

HPS เป็นรูปแบบของการเกิดปฏิสัมพันธ์ที่อาศัยโมเลกุลตัวกลางในการสื่อสารสัญญาณระหว่างไวรัสกับแมลงพาหะ (indirect interaction) โดยอาศัยกลไกและความจำเพาะระหว่าง VCP ของอนุภาคไวรัสในลักษณะปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นของลำดับของกรดอะมิโนของโปรตีนทางด้านปลาย

C-terminus และ N-terminus ร่วมกับโปรตีนตัวช่วย [viral helper component protein (HC) หรือ virus-induced factor หรือ virus-encoded nonstructural accessory factor] และ IRP ที่จำเพาะของแมลงพาหะในการถ่ายทอดไวรัส โดยตำแหน่งของกรดอะมิโนของ VCP ของอนุภาคไวรัสทางด้านปลาย C-terminus จะทำหน้าที่หลักเพื่อการจับ (binding) ของอนุภาคไวรัส ในขณะที่กรดอะมิโนทางด้านปลาย N-terminus จะทำหน้าที่หลักในการจับกับ IRP บริเวณปากของแมลงพาหะ ซึ่งแบ่งได้สองลักษณะย่อย ได้แก่

(1) อาศัยกลไกและความจำเพาะในการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง VCP ของอนุภาคไวรัสกับ IRP บริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลง ที่เกิดปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างระดับทุติยภูมิ (secondary structure) ที่ทำหน้าที่ในตำแหน่งของปฏิริยาทางชีวเคมี (motif) ที่จำเพาะเป็นโมเลกุลตัวกลาง โดยมีโมเลกุลของ HC ร่วมในกลไก ซึ่ง HC อาจทำหน้าที่เป็นโมเลกุลตัวกลางโดยตรงในลักษณะโมเลกุลเดี่ยวและสองโมเลกุล หรือ HC อาจทำหน้าที่เป็นโมเลกุลตัวกลางโดยตรงในลักษณะของการรวมกันของโมเลกุลที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย (monomer) ซึ่งอาจจะเหมือนกัน (homomer) หรือไม่เหมือนกัน (heteromer) ก็ได้ 2 หน่วย (dimer) ที่เรียกว่า dimerization ได้แก่ ไวรัสในสกุล Potyvirus เช่น ไวรัสใบด่างของยาสูบ (Tobacco vein mottling virus, TVMV) โดยมีกลไกของปฏิสัมพันธ์ในการถ่ายทอดโรค ดังนี้ ลำดับของกรดอะมิโนทางด้านปลาย N-terminus ของ VCP ของอนุภาคไวรัสมีส่วนอนุรักษ์ที่เรียกว่า DAG (Asp-Ala-Gly)-amino acid motif (Lopez-Moya *et al.*, 1999) ซึ่งเป็น aphid transmission factor (ATF) ของไวรัสจะจับกับโมเลกุล HC ของ IRP ของแมลง โดย N-terminus-DAG motif ของ VCP นี้จะจับกับบริเวณทางด้านปลาย C-terminus ที่มีส่วนอนุรักษ์ที่เรียกว่า PTK (Phe-Thr-Lys) box ของ HC และ บริเวณทางด้านปลาย N-terminus ที่มีส่วนอนุรักษ์ที่เรียกว่า KITC (Lys-Ile-Thr-Cys) box ของ HC จะจับกับ IRP ของแมลง ตามลำดับ (Chen *et al.*, 2011 ; Peng *et al.*, 1998) ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกันนี้แมลงพาหะจึงสามารถถ่ายทอดโรคได้ (Figure 1B)

(2) อาศัยกลไกและความจำเพาะในการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่าง VCP ของอนุภาคไวรัสกับ IRP บริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลง โดยมี HC ทำหน้าที่เป็นโมเลกุลตัวกลาง ได้แก่ ไวรัสในสกุล Caulimovirus เช่น ไวรัสใบด่างของดอกกะหล่ำ (Cauliflower mosaic virus, CaMV) โดยมีกลไกของปฏิสัมพันธ์ในการถ่ายทอดโรค ดังนี้ ลำดับของกรดอะมิโนของ VCP ทางด้านปลาย N-terminus ของโปรตีน P2 ซึ่งเป็น aphid transmission factor (ATF) หรือ HC ของไวรัส ซึ่งได้รับจาก mesophyll ของพืชที่มีไวรัสจะจับกับโมเลกุล

HC ของ IRP ของแมลง ในขณะที่เดียวกัน VCP ทางด้านปลาย C-terminus ของโปรตีน P2 จะจับอยู่กับโปรตีน P3 ของไวรัส ซึ่งเป็น virion-associated packaging protein (VAP) ที่ได้รับจากอนุภาคของไวรัสที่ปะปนมากับ mesophyll หรือ phloem ของพืช และทำหน้าที่จับกับอนุภาคของไวรัส (Espinoza *et al.*, 1991 ; Martiniere *et al.*, 2009 ; Woolston *et al.*, 1983) ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกันนี้แมลงพาหะจึงสามารถถ่ายทอดโรคได้ (Figure 1D)

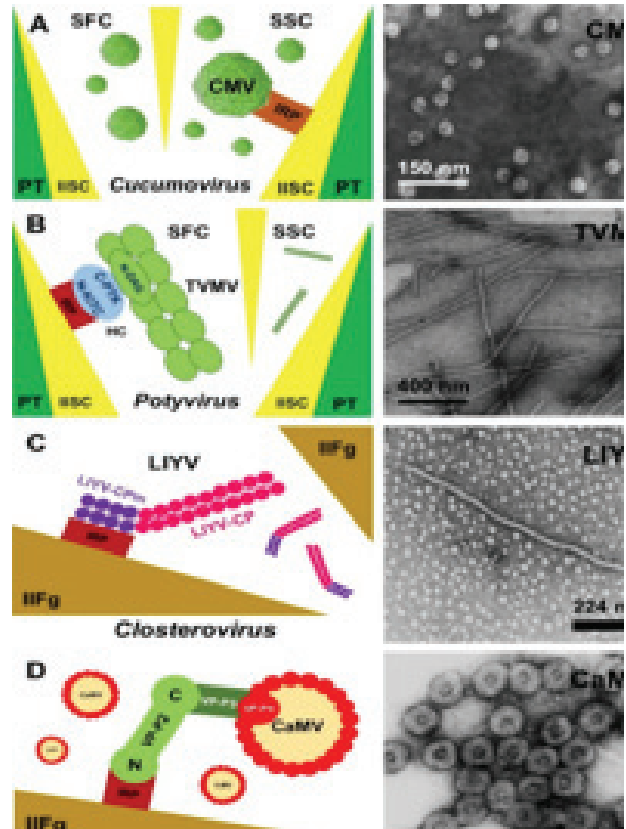


Figure 1 The transmission strategies of non-circulative plant viruses in insect vectors of (A) CMV (El-Borollosy & Waziri, 2013), (B) TVMV (Vincelli, 1994), (C) LIYV (Tian *et al.*, 1999), and (D) CaMV (Gnutova *et al.*, 2002), respectively.

Notes: stylet salivary canal (SSC) ; stylet food canal (SFC) ; plant tissue (PT) ; internal insect stylet canal (IISC) ; internal receptor protein (IRP) ; Cucumber mosaic virus (CMV) ; Lettuce infectious yellows virus (LIYV) ; Tobacco vein mottling virus (TVMV) ; Cauliflower mosaic virus (CaMV) ; major capsid protein (CP) ; minor capsid protein (CPm) ; internal insect foregut (IIFg) ; viral helper component protein (HC) ; DAG (Asp-Ala-Gly)-amino acid motif ; PTK (Phe-Thr-Lys) box ; KITC (Lys-Ile-Thr-Cys) box ; C-terminal viral protein-2 (VP-P2-C) ; N-terminal viral protein-2 (VP-P2-N) ; viral protein-3 (VP-P3) ; viral protein-4 (VP-P4)

กระบวนการถ่ายทอดโดยแมลงพาหะเป็นขั้นตอนสำคัญของวงจรการก่อโรคของไวรัสพืช จากกระบวนการในการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน จะเห็นได้ว่ารูปแบบและปฏิสัมพันธ์ของกระบวนการระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะนี้มีความจำเพาะและแตกต่างกันในแต่ละชนิดของไวรัสพืชและแมลงพาหะ (Whitfield, Falk, & Rotenberg, 2015) รูปแบบและกระบวนการที่ได้มีการนำเสนอดังกล่าวข้างต้นนี้ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาการได้รับไวรัสจากพืชสู่แมลงพาหะและการถ่ายทอดไวรัสจากแมลงพาหะสู่พืช การเพิ่มจำนวนของไวรัสพืชภายในอวัยวะภายในของแมลงพาหะ รูปแบบและตำแหน่งที่เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะ สมบัติทางชีวโมเลกุลของอนุภาคไวรัส และองค์ประกอบที่จำเพาะของการสื่อสารสัญญาณระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะ เป็นต้น

หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างของกระบวนการและปฏิสัมพันธ์ของไวรัสพืชและแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียน คือ ความจำเพาะของ VCP ของอนุภาคไวรัสที่เกิดปฏิสัมพันธ์กับ IPR บริเวณพื้นผิวอวัยวะภายในของแมลงพาหะทั้งชนิด CPS และ HPS ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนที่แตกต่างกันทั้งแบบไม่ถาวรและแบบกึ่งถาวร ดังนั้นความจำเพาะของกระบวนการถ่ายทอดโรคนี้จึงมีความหลากหลายทั้งชนิดของไวรัสและแมลงพาหะ (Table 1)

ทิศทางและแนวโน้มการศึกษาวิจัยเพื่อแก้ปัญหาการระบาดและการถ่ายทอดไวรัสพืชโดยแมลงพาหะแบบไม่ไหลเวียนโดยการศึกษากระบวนการและปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะตามธรรมชาตินี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

สืบเนื่องจากการใช้พันธุ์พืชที่ต้านทานหรือค่อนข้างต้านทานต่อการทำลายของไวรัสและแมลงพาหะในสภาพธรรมชาติ ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เกษตรกรจึงต้องใช้สารเคมีเพื่อการกำจัดแมลงศัตรูพืชในการควบคุมและป้องกันการแพร่ระบาด ในขณะที่เดียวกับการใช้สารเคมีเพื่อการกำจัดแมลงศัตรูพืชไม่สามารถตอบโจทย์ของการแก้ปัญหาการระบาดและสร้างความเสียหายให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรของไวรัสพืชและแมลงพาหะอย่างเป็นทางการที่ยั่งยืนได้ ทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางการเกษตร

ดังนั้นการศึกษาวิจัยเพื่อเข้าใจกระบวนการตามธรรมชาติของการถ่ายทอดโรคจึงเป็นกุญแจสำคัญที่จะไขความลับของธรรมชาติ เมื่อศึกษาและเข้าใจกระบวนการดังกล่าวนี้แล้ว จึงบูรณาการศาสตร์และศิลป์หลากหลายแขนงเพื่อแก้ปัญหาการระบาดของไวรัสและแมลงพาหะ เช่น การนำศาสตร์ทางด้านพันธุวิศวกรรม (genetic engineering) เพื่อปรับปรุงพันธุ์พืชให้ต้านทานต่อการเข้าทำลายของไวรัสและแมลงพาหะ และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในระดับชีวโมเลกุลเพื่อการศึกษาชีววิทยาระบบ (systems biology) ด้วยเทคโนโลยีทางด้านชีวสารสนเทศ (bioinformatics) เป็นต้น และเมื่อมีองค์ความรู้แล้วจึงกำหนดยุทธศาสตร์เพื่อการเผยแพร่ความรู้สู่เกษตรกร การพยากรณ์ และการแก้ไขปัญหาการระบาดของโรคและแมลงพาหะด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และนำไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็นทางการ รวมทั้งมีการติดตาม ประเมินผล และปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป ตามลำดับ

Table 1 Transmission characteristics of non-circulative plant viruses transmitted by insects

Biological characteristic	Non-circulative	
	Non-persistent (NP)	Semi-persistent (SP)
Acquisition period	Seconds to minutes (Brief)	Minutes to hours
Fasting period*	Increase the rate of transmission	No
Retention period	Minutes to hours	Minutes to day
Mechanical transmission	No	
Latent period	None	
Transmission period	Seconds to minutes (Brief)	Minutes to hours
Retention time in lifespan of vector	No	
Transmission after molting	Lost after molting	
Transovarial transmission	No	
Multiplication in vector	No	
Presence in vector's hemolymph	No (Brief)	

Table 1 Transmission characteristics of non-circulative plant viruses transmitted by insects (cont.)

Biological characteristic	Non-circulative	
	Non-persistent (NP)	Semi-persistent (SP)
Specificity of vector for virus	Low	Moderate
Zone of transmitting tissue	Epidermis	Phloem
Region of virus-vector interactions	Mouthparts	Anterior alimentary canal
Cellular barriers	No	
Transmission strategies in vectors	CPS/HPS	

Note: *Pre-acquisition fasting effect on vector/virus/plant combinations

(Berger & Pirone, 1986 ; Ng & Falk, 2006 ; Palacios, Drucker, Blanc *et al.*, 2002 ; Powell, 1991)

สรุป

ชนิดของแมลงพาหะที่อาศัยรูปแบบและกระบวนการในการถ่ายทอดไวรัสโรคพืชแบบไม่ไหลเวียนทั้งชนิดไม่ถาวรและกึ่งถาวรมีปริมาณมากที่สุด และสามารถพบได้บ่อยในแมลงจำพวกเพลี้ยอ่อน เพลี้ยไฟ แมลงหริ่งขาว และเพลี้ยจักจั่น โดยอาศัยปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตีนตัวต่อสัญญาณบริเวณพื้นผิวอนุภาคไวรัสและโปรตีนตัวรับสัญญาณบริเวณอวัยวะส่วนปากของแมลงพาหะอย่างจำเพาะเจาะจง ซึ่งส่งผลต่อช่วงระยะเวลาการรับและถ่ายทอดโรคในช่วงระยะเวลาอันสั้นตั้งแต่วินาทีถึงชั่วโมง เนื่องจากลักษณะที่จำเพาะของโครงสร้างระดับอนุภาคของไวรัสและขอบเขตที่จำกัดของบริเวณการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างไวรัสพืชและแมลงพาหะ จึงส่งผลให้ไวรัสไม่สามารถเพิ่มจำนวนและเคลื่อนย้ายเข้าสู่กระแสโลหิตของแมลงและต่อมน้ำลาย แต่จะจำกัดขอบเขตของการเกิดปฏิสัมพันธ์เฉพาะส่วนปากและลำไส้ส่วนหน้าเท่านั้น ดังนั้นการเรียนรู้ธรรมชาติของปฏิสัมพันธ์ในกระบวนการก่อโรคของไวรัสโรคพืชและแมลงพาหะจะนำไปสู่องค์ความรู้และยุทธศาสตร์ทางการเกษตร ที่จะทำให้สามารถบริหารจัดการทางการเกษตรเพื่อการป้องกันและควบคุมระดับความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการระบาดและการทำลายของไวรัสพืชและแมลงพาหะได้ทั้งในระดับจุลภาคและมหภาคอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลอย่างเป็นรูปธรรมที่ยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

Ammar, E.D., Jarlfors, U., & Pirone, T.P. (1994). Association of Potyvirus helper component protein with virions and the cuticle lining the maxillary food canal and foregut of an aphid vector. *Phytopathology*, 84, 1054-1060.

Bak, A., Gargani, D., Macia, J.L., Malouvet, E., Vernerey, M.S., Blanc, S., & Drucker, M. (2013). Virus factories of Cauliflower mosaic virus are virion reservoirs that engage actively in vector transmission. *Journal of Virology*, 87(22), 12207-12215.

Berger, P.H., & Pirone, T.P. (1986). The effect of helper component on the uptake and localization of potyviruses in *Myzus persicae*. *Virology*, 153(2), 256-261.

Blanc, S., Drucker, M., & Uzeit, M. (2014). Localizing viruses in their insect vectors. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 403-425.

Brunt, A.A., Crabtree, K., Dallwitz, M.J., Gibbs, A.J., & Watson, L. (1996). *Viruses of plants: CAB International, Cambridge*.

Cabanas, D., Watanabe, S., Higashi, C.H., & Bressan, A. (2013). Dissecting the mode of Maize chlorotic mottle virus transmission (Tombrusviridae: Machlomovirus) by *Frankliniella williamsi* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1), 16-24.

Chen, A.Y.S., Walker, G.P., Carter, D., & Ng, J.C.K. (2011). A virus capsid component mediates virion retention and transmission by its insect vector. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(40), 16777-16782.

Dietzgen, R.G., Mann, K.S., & Johnson, K.N. (2016). Plant virus-insect vector interactions: Current and potential future research directions. *Viruses*, 8(11), 303.

Drucker, M., & Then, C. (2015). Transmission activation in non-circulative virus transmission: a general concept?. *Current Opinion in Virology*, 15, 63-68.

- El-Borollosy, A.M., & Waziri, H.M.A. (2013). Molecular characterization of a Cucumber mosaic cucumovirus isolated from lettuce in Egypt. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(1), 105-109.
- Espinoza, A.M., Medina, V., Hull, R., & Markham, P.G. (1991). Cauliflower mosaic virus gene II product forms distinct inclusion bodies in infected plant cells. *Virology*, 185(1), 337-344.
- Gnutova, R.V., Tolkach, V. F., & Bogunov, J. V. (2002). Criteria for identification of Cauliflower mosaic virus's of the far eastern strains. *Plant Protection Science*, 38(2), 258-260.
- Govier, D.A., & Kassanis, B. (1974). Evidence that a component other than the virus particle is needed for aphid transmission of Potato virus Y. *Virology*, 57(1), 285-286.
- Gray, S., Cilia, M., & Ghanim, M. (2014). Circulative, "nonpropagative" virus transmission: an orchestra of virus-, insect-, and plant-derived instruments. *Advances in Virus Research*, 89, 141-199.
- Haine, E.R., Rolff, J., & Siva-Jothy, M.T. (2007). Functional consequences of blood clotting in insects. *Developmental & Comparative Immunology*, 31(5), 456-464.
- Liu, S., He, X., Park, G., Josefsson, C., & Perry, K.L. (2002). A conserved capsid protein surface domain of Cucumber mosaic virus is essential for efficient aphid vector transmission. *Journal of Virology*, 76(19), 9756-9762.
- Lopez-Moya, J.J., Wang, R.Y., & Pirone, T.P. (1999). Context of the coat protein DAG motif affects potyvirus transmissibility by aphids. *Journal of General Virology*, 80(Pt 12), 3281-3288.
- Lucas, R.W., Larson, S.B., Canady, M.A., & McPherson, A. (2002). The structure of Tomato aspermy virus by X-ray crystallography. *Journal of Structural Biology*, 139(2), 90-102.
- MacDiarmid, R., Rodoni, B., Melcher, U., Ochoa-Corona, F., & Roossinck, M. (2013). Biosecurity implications of new technology and discovery in plant virus research. *PLoS Pathog*, 9(8), e1003337.
- Martin, B., Collar, J.L., Tjallingii, W.F., & Fereres, A. (2007). Intracellular ingestion and salivation by aphids may cause the acquisition and inoculation of non-persistently transmitted plant viruses. *Journal of General Virology*, 78(10), 2701-2705.
- Martiniere, A., Bak, A., Macia, J.L., Lautredou, N., Gargani, D., Doumayrou, J., Garzo, E., Moreno, A., Fereres, A., Blanc, S., & Drucker, M. (2013). A virus responds instantly to the presence of the vector on the host and forms transmission morphs. *Elife*, 2, e00183.
- Martiniere, A., Zancarani, A., & Drucker, M. (2009). Aphid transmission of Cauliflower mosaic virus: the role of the host plant. *Plant Signaling & Behavior*, 4(6), 548-550.
- Ng, J.C., & Falk, B.W. (2006). Virus-vector interactions mediating nonpersistent and semipersistent transmission of plant viruses. *Annual Review of Phytopathology*, 44, 183-212.
- Palacios, I., Drucker, M., Blanc, S., Leite, S., Moreno, A., & Fereres, A. (2002). Cauliflower mosaic virus is preferentially acquired from the phloem by its aphid vectors. *Journal of General Virology*, 83(12), 3163-3171.
- Peng, Y.H., Kadoury, D., Gal-On, A., Huet, H., Wang, Y., & Raccach, B. (1998). Mutations in the HC-Pro gene of Zucchini yellow mosaic potyvirus: effects on aphid transmission and binding to purified virions. *Journal of General Virology*, 79(4), 897-904.
- Perry, K.L., Zhang, L., & Palukaitis, P. (1998). Amino acid changes in the coat protein of Cucumber mosaic virus differentially affect transmission by the aphids *Myzus persicae* and *Aphis gossypii*. *Virology*, 242(1), 204-210.
- Pirone, T.P., & Blanc, S. (1996). Helper-dependent vector transmission of plant viruses. *Annual Review of Phytopathology*, 34, 227-247.
- Powell, G. (1991). Cell membrane punctures during epidermal penetrations by aphids: consequences for the transmission of two potyviruses. *Annals of Applied Biology*, 119(2), 313-321.
- Powell, G. (2005). Intracellular salivation is the aphid activity associated with inoculation of non-persistently transmitted viruses. *Journal of General Virology*, 86(2), 469-472.

- Smith, T.J., Chase, E., Schmidt, T., & Perry, K.L. (2000). The structure of Cucumber mosaic virus and comparison to Cowpea chlorotic mottle virus. *Journal of Virology*, 74(16), 7578-7586.
- Stafford, C.A., Walker, G.P., & Ullman, D.E. (2012). Vector feeding and virus transmission. *Communicative & Integrative Biology*, 5(1), 43-49.
- Stewart, L.R., Medina, V., Tian, T., Turina, M., Falk, B.W., & Ng, J.C. (2010). A mutation in the Lettuce infectious yellows virus minor coat protein disrupts whitefly transmission but not in planta systemic movement. *Journal of Virology*, 84(23), 12165-12173.
- Syller, J. (2012). Facilitative and antagonistic interactions between plant viruses in mixed infections. *Molecular Plant Pathology*, 13(2), 204-216.
- Tian, T., Rubio, L., Yeh, H.H., Crawford, B., & Falk, B.W. (1999). Lettuce infectious yellows virus: in vitro acquisition analysis using partially purified virions and the whitefly *Bemisia tabaci*. *Journal of General Virology*, 80(5), 1111-1117.
- Uzest, M., Gargani, D., Dombrovsky, A., Cazevieville, C., Cot, D., & Blanc, S. (2010). The "acrostyle": a newly described anatomical structure in aphid stylets. *Arthropod Structure & Development*, 39(4), 221-229.
- Verbeek, M., van Bekkum, P.J., Dullemans, A.M., & van der Vlugt, R.A. (2014). Torradoviruses are transmitted in a semi-persistent and stylet-borne manner by three whitefly vectors. *Virus Research*, 186, 55-60.
- Vincelli, P.C. (1994). Fundamental principles of plant pathology for agricultural producers. *Agriculture and Natural Resources Publications*, 77, 1-7.
- Viteri, D., & Gordillo, L. (2009). Modelling and control of non-persistent plant virus transmission for annual production cycles. *European Journal of Plant Pathology*, 125(3), 435-444.
- Whitfield, A.E., Falk, B.W., & Rotenberg, D. (2015). Insect vector-mediated transmission of plant viruses. *Virology*, 479-480, 278-289.
- Woolston, C.J., Covey, S.N., Penswick, J.R., & Davies, J.W. (1983). Aphid transmission and a polypeptide are specified by a defined region of the Cauliflower mosaic virus genome. *Gene*, 23(1), 15-23.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล

Efficiency comparison of cardiovascular risk prediction models using data mining algorithms

นงเยาว์ ไนอรุณ^{1*}

Nongyao Nai-arun^{1*}

Received: 20 January 2021 ; Revised: 15 February 2021 ; Accepted: 1 March 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม ฟอเรสต์แบบสุ่ม เค-เนียร์เรสเนเบอร์ นาอีฟเบย์ และต้นไม้ตัดสินใจ (2) ใช้อัลกอริทึมทั้ง 5 วิธี พร้อมการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์ และ (3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือโปรแกรม MySQL และ RapidMiner Studio และชุดข้อมูลเป็นคนที่ผ่านการคัดกรองผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือดที่รวบรวมข้อมูลมาจากสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2561-2562 จากโรงพยาบาลในจังหวัดสระบุรี 12 แห่ง และโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล 126 แห่ง จำนวน 31,929 คน ผลการวิจัย พบว่า แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายดีที่สุดคือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมการเลือกคุณสมบัติ มีค่าความถูกต้อง 99.29% และต่ำสุดคือ แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ มีค่าความถูกต้อง 70.39% งานวิจัยนี้ สรุปผลว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ที่ควรนำไปพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการวินิจฉัยโรคเบื้องต้นเกี่ยวกับความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด

คำสำคัญ: โรคหัวใจและหลอดเลือด เหมืองข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

This research aimed (1) to create cardiovascular risk diagnosis prediction models using algorithms including Neural Network, Random Forest, Naïve Bayes, K-Nearest Neighbors and Decision Tree (2) five algorithms were used with attribute selection and (3) comparing the model performance using 10f Fold cross validation method. Tools use were MySQL and RapidMiner Studio programs. The data see comprised people who had been screened as patients with cardiovascular disease that were collected from the Saraburi Provincial Public Health Office during 2018-2019 from 12 Saraburi hospitals and 126 health promoting hospitals. It was found that the model with the best prediction performance was the neural network model with attribute selection having 99.29% accuracy, and the lowest was the decision tree model with 70.39% accuracy. This research concluded that the neural network model with attribute selection of the best qualification should be further developed for early diagnosis of cardiovascular risk web applications.

Keywords: Cardiovascular Disease, Data Mining, Neural Network

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Assist. Prof., Department of Information Technology, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding author; Department of Information Technology, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University. nongyaonaiarun@gmail.com

บทนำ

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2019) เปิดเผยว่าในปี พ.ศ. 2559 มีผู้เสียชีวิตปีละ 57 ล้านคน ซึ่งกลุ่มโรคหัวใจและหลอดเลือดเป็นสาเหตุของการตายของคนทั่วโลกเป็นอันดับหนึ่ง มีผู้เสียชีวิตจำนวน 9.2 ล้านคนโดยประมาณในประเทศไทยจากการรายงานของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2560 มีผู้เสียชีวิตจากโรคหัวใจและหลอดเลือดประมาณร้อยละ 12 ของสาเหตุของการเสียชีวิตทั้งหมด และยังพบว่าผู้เสียชีวิตจากโรคหัวใจและหลอดเลือดประมาณ 20,746 คน คิดเป็นร้อยละ 21.8 ต่อประชากร 10,000 คน และในปี พ.ศ. 2561 พบอัตราการความชุกของผู้ป่วยจากโรคหัวใจและหลอดเลือดที่สูงกว่าในปี พ.ศ. 2557-2560 มีอัตราการความชุกประมาณ 1,396,400 ต่อประชากร 10,000 คน จากข้อมูลทั้งการตายและป่วยด้วยโรคหัวใจและหลอดเลือด แสดงให้เห็นว่าโรคหัวใจและหลอดเลือดยังคงมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น เพราะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูล จากสถานการณ์ปัจจุบัน และรูปแบบการบริการด้านโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) ของกรมการแพทย์ในปี พ.ศ. 2557 พบประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลเฉลี่ยของผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือดถึงประมาณ 6,906 ล้านบาทต่อปี และยังเป็นสาเหตุของการสูญเสียปีสุขภาวะในอันดับต้น ของประชากรไทยวัยทำงาน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชากร ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจจากการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร ทำให้ส่งผลกระทบต่อระดับต่างๆ ได้แก่ ส่วนบุคคล ครอบครัว สังคม และประเทศชาติ (กรมควบคุมโรค, 2562)

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในกระทรวงสาธารณสุขมีการเก็บรวบรวมข้อมูลสุขภาพ ทุกหน่วยบริการ จะมีการบันทึกข้อมูลการให้บริการประจำวันในโปรแกรมระบบสารสนเทศของหน่วยบริการ (Hospital Information System-HIS) ซึ่งมีหลากหลายโปรแกรม และใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่บันทึกไว้จัดทำเป็นสารสนเทศเพื่อใช้พัฒนาการบริการของหน่วยบริการ จากนั้นให้มีการใช้ประโยชน์ข้อมูลให้มากขึ้น จึงมีการรวบรวมข้อมูลที่หน่วยบริการบันทึกไว้ มารวบรวมไว้ที่ระดับที่สูงขึ้น เช่น อำเภอ จังหวัด กระทรวงฯ เพื่อจัดทำเป็นสารสนเทศในการปฏิบัติตามภารกิจของแต่ละระดับที่เกี่ยวข้องเป็นศูนย์รวมข้อมูลในแต่ละระดับ ในเอกสารฉบับนี้ใช้คำว่า “คลังข้อมูลสุขภาพ (Health Data Center-HDC)” แทนการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยบริการเป็นศูนย์รวมข้อมูลสุขภาพ ตามที่กระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดแนวทางการพัฒนาระบบข้อมูลข่าวสารสุขภาพให้จัดเก็บข้อมูลเป็นฐานข้อมูลรายบุคคลในระดับต่างๆ ประกอบด้วยฐานข้อมูลระดับสถานอนามัย ศูนย์สุขภาพชุมชน รวมทั้งฐานข้อมูลระดับโรงพยาบาล และฐานข้อมูลนั้นได้รับการออกแบบให้มีโครงสร้างได้ระหว่างหน่วยงาน โดยให้สถานบริการส่งออก

ข้อมูลด้านการแพทย์และสุขภาพ ตามมาตรฐานโครงสร้าง 43 แฟ้ม ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลผู้ป่วยนอก ข้อมูลผู้ป่วยใน และข้อมูลด้านการป้องกัน ส่งเสริม และฟื้นฟู เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้ประโยชน์ร่วมกันทั้งระดับสถานบริการ ระดับจังหวัด และส่วนกลาง สามารถเชื่อมโยงข้อมูล นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล คือ HOSxP เป็นโปรแกรมสำหรับสถานพยาบาล โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล และโรงพยาบาล ซึ่งมีเป้าหมายที่จะพัฒนาระบบสารสนเทศที่มีประสิทธิภาพมาก สามารถนำไปใช้งานได้จริงในระดับส่งเสริมสุขภาพตำบล ไปจนถึงโรงพยาบาลศูนย์ ข้อมูลจะมาจากโครงสร้างมาตรฐาน 43 แฟ้มที่สถานบริการทุกที่ในจังหวัดส่งข้อมูลทุกเดือนแล้ว Upload เข้าไปรวบรวมที่คลังข้อมูลระดับจังหวัด (Health Data Center : HDC) (กระทรวงสาธารณสุข, 2561)

มาตรการเชิงรุกในการป้องกันและควบคุมอุบัติการณ์โรคหัวใจและหลอดเลือดของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ได้มอบหมายให้โรงพยาบาลและโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลทำการรวบรวมข้อมูล ด้วยการใช้แบบประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยใช้อิทธิพลของปัจจัยเสี่ยงต่างๆ มีตัวแปร ได้แก่ เพศ ประวัติการสูบบุหรี่ ประวัติการเป็นโรคเบาหวาน อายุ ส่วนสูง เส้นรอบเอว ค่าความดันโลหิต และค่าโคเลสเตอรอลในเลือด เพื่อค้นหากลุ่มเสี่ยงต่อการเกิดโรคดังกล่าว

อัลกอริทึมการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เป็นอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ เพื่อค้นหารูปแบบ (Pattern) หรือกฎ (Rule) ที่มีในฐานข้อมูลขนาดใหญ่ และเป็นกระบวนการดึงข่าวสาร ค้นหาความรู้ที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (Han & Kamber, 2006) การทำเหมืองข้อมูลเกี่ยวข้องกับทฤษฎีและหลักการจากสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ ระบบฐานข้อมูล การจดจำรูปแบบ เทคโนโลยีคลังข้อมูล การวิเคราะห์ทางสถิติ เครือข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้ของเครื่องจักร การค้นคืนข้อมูล การประมวลผลภาพ และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ของเหตุการณ์ (Witten & Frank, 2011) วิธีการทำเหมืองข้อมูลอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนกว่าการวิเคราะห์ทางสถิติ และการสืบค้นแบบสอบถามเชิงโครงสร้างทั่วไป เช่น ภาษา SQL ฯลฯ การทำเหมืองข้อมูลที่นิยม ได้แก่ การหาความสัมพันธ์ (Association) การจัดกลุ่ม (Clustering) การจำแนกประเภทข้อมูล (Classification) การวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Data Analytics) เป็นต้น (เอกสิทธิ์ พัทธวงศ์ศักดิ์, 2563)

จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำข้อมูลจากคลังข้อมูลระดับจังหวัด (HDC) ในส่วนของการ

คัดกรองความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด กรณีศึกษา สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรี มาใช้ในการสร้างแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้ อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล ได้แก่ Neural Network, Random Forest, Naïve Bayes, K-Nearest Neighbors and Decision Tree แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง เพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่และแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่นำไปพัฒนาต่อสำหรับการวินิจฉัยโรคเบื้องต้นเกี่ยวกับความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดต่อไป

การทบทวนวรรณกรรม

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและค้นคว้าเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี เกี่ยวกับโรคหัวใจและหลอดเลือด อัลกอริทึมเหมืองข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. โรคหัวใจและหลอดเลือด

โรคหัวใจและหลอดเลือด(Cardiovascular Disease) เกิดจากมีเนื้อเยื่ออยู่ในผนังของหลอดเลือด ทำให้มีไขมันสะสมเกิดการพอกตัวที่หนาขึ้น ทำให้หลอดเลือดตีบและเกิดการแข็งตัว จนการไหลเวียนของเลือดลดลง ตีบตัน เลือดที่จะไปเลี้ยงกล้ามเนื้อหัวใจมีจำนวนน้อยลง มีผลทำให้เกิดภาวะกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือด อาการของโรคหัวใจและหลอดเลือด ได้แก่ การเจ็บแน่นหน้าอก เหมือนมีอะไรมากดทับหน้าอก ระยะเวลา 15 นาที ถึง 30 วินาที มีอาการหายใจเหนื่อย หอบ หายใจไม่ออก นอนราบไม่ได้ เวียนศีรษะ หน้ามืดจะเป็นลม รวมทั้งมีอาการหมดสติเพราะว่าเลือดไปเลี้ยงสมองไม่เพียงพอ อาการเตือนของโรคหัวใจและหลอดเลือด คือ เจ็บกลางหน้าอกที่บริเวณเหนือลิ้นปี่ขึ้นมาเล็กน้อย เจ็บแบบจุกแน่นๆ เหมือนมีอะไรมากดทับหรือบีบไว้ อาการเจ็บจะร้าวไปที่คอหรือขากรรไกร ขณะออกกำลังกายมักจะเจ็บมากที่ไหล่ซ้าย หรือบางคนมีอาการจุกแน่นลิ้นปี่เหมือนอาหารไม่ย่อย และอาจทำให้เสียชีวิต

หน่วยงานในกระทรวงสาธารณสุขได้รับมอบหมายให้ทำงานร่วมกับภาครัฐบาลและเอกชน เพื่อทำงานด้านการป้องกันโรค การส่งเสริมสุขภาพ และการปรับพฤติกรรมทางสุขภาพ ที่มีผลต่อการเกิดโรคเรื้อรัง (NCDs) ได้แก่ โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งเป็นโรคที่เกิดจากพฤติกรรมการใช้ชีวิต เพื่อทำให้คนไทยไม่เจ็บป่วย มีสุขภาพดี และช่วยลดค่าใช้จ่ายทางการแพทย์ได้ จากการศึกษวิจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ประกอบด้วย ภาวะจากความดันโลหิตสูง ภาวะโรคเบาหวาน ภาวะไขมันในเลือดสูง การสูบบุหรี่ การดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การเป็นโรคอ้วนและลงพุง ไม่ออกกำลังกาย ความเครียด พักผ่อนไม่เพียงพอ และการรับประทานรสเค็ม มัน หวานมากเกินไป ประชาชนจึงควรตระหนักหรือประเมินความเสี่ยงของตัวเอง

รวมทั้งควรตรวจสุขภาพอย่างสม่ำเสมอ (กรมควบคุมโรค, 2562)

แนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อโรคหัวใจและหลอดเลือด ตามแนวทางของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข เพื่อให้บุคลากรทางการแพทย์ใช้ประเมินความเสี่ยงต่อโรค ในบุคคลที่ไม่เคยเป็นโรคนี้อีกก่อน (Primary Prevention) ด้วยแนวทาง 2 ส่วน คือ (1) การประเมินโอกาสเสี่ยงต่อกลุ่มเป็นโรคเบาหวานและโรคความดันโลหิตสูงสามารถใช้ได้ในประชาชนทั่วไป และกลุ่มเสี่ยงสูงต่อการเกิดโรคเบาหวานและโรคความดันโลหิตสูงและผู้มีภาวะอ้วนที่มีอายุ 35 ปีขึ้นไป โดยการคัดกรองด้วยวาจา (Verbal Screening) และ (2) การบริการหลังการประเมินความเสี่ยงโดยวิธีการประเมินความเสี่ยง มีขั้นตอน คือ 1) โรงพยาบาล และโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล หรือสถานบริการทำการตรวจหาค่าโคเรสเตอรอลในเลือด 2) เลือกตารางว่าเป็นโรคเบาหวานหรือไม่ 3) เลือกเพศชายหรือหญิง 4) เลือกการสูบบุหรี่ว่าสูบหรือไม่สูบ 5) เลือกอายุ 6) เลือกค่าความดันโลหิต 7) เลือกส่วนสูง และ 8) เลือกเส้นรอบเอว

2. อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล

อัลกอริทึมเหมืองข้อมูล (Data Mining) เป็นการวิเคราะห์หรือสืบค้นความรู้ที่เป็นประโยชน์และเป็นที่น่าสนใจที่อยู่ในฐานข้อมูลขนาดใหญ่ หรือเป็นวิธีการที่ใช้จัดการกับข้อมูลจำนวนมาก โดยจะนำข้อมูลที่มีอยู่มาทำการวิเคราะห์แล้วดึงความรู้หรือสิ่งสำคัญออกมาเพื่อใช้ในการพยากรณ์หรือทำนายสิ่งที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งวิธีการสืบค้นหาความรู้หรือความจริงที่แฝงอยู่ในฐานข้อมูล เป็นกระบวนการขุดค้นสิ่งที่ยังไม่ทราบมาก่อนที่มีอยู่ในฐานข้อมูลนั้น ซึ่งการทำเหมืองข้อมูลเป็นกระบวนการทำงานที่สกัดหาข้อมูล (Extract Data) จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อให้ได้สารสนเทศที่มีประโยชน์ที่ยังไม่ทราบมาก่อน (สายชล สันสมบุรณ์ทอง, 2560) อัลกอริทึมการทำเหมืองข้อมูลแบ่งเป็นหลายประเภทตามลักษณะของการทำงาน ในการวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมการจำแนกประเภทข้อมูล (Classification) ซึ่งเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์จากการจดจำหรือเรียนรู้จากรูปแบบของข้อมูลในอดีต และมาสร้างเป็นแบบจำลองเพื่อใช้คาดการณ์หรือทำนาย (Predict) ค่าให้กับข้อมูลใหม่ (Chakrabarti, *et al.*, 2009) ในงานวิจัยนี้ใช้ 5 อัลกอริทึม ได้แก่

2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network)

แบบจำลองที่สร้างขึ้นจะจำลองการทำงานของสมองมนุษย์ที่มีการทำงานหลายหลายรูปแบบ ประกอบด้วยเซลล์ประสาท ต่างๆ ที่เชื่อมโยงกันและการส่งกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เซลล์ประสาทถัดไปทำงาน แนวคิดของอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม ใช้การคำนวณที่เรียกว่า ฟังก์ชันการถ่ายโอน

(Transfer Function) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) เป็นส่วนประกอบในการจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท และเซลล์ประสาทหลายๆ ตัวถูกเชื่อมต่อกันทำให้เกิดลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ (Layer) แบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นนำเข้า (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นนำออก (Output Layer) โดยมีลักษณะโครงสร้างดัง Figure 1

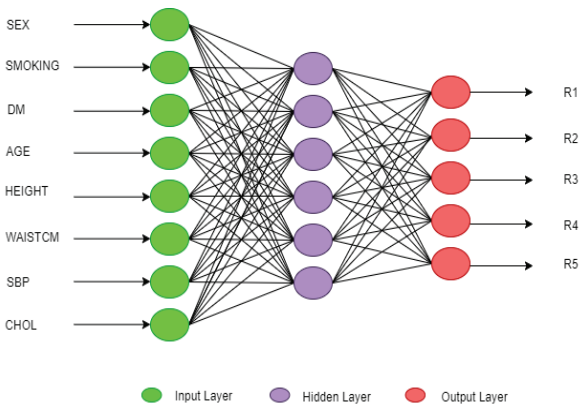


Figure 1 Neural network algorithm

2.2.2 ฟอเรสต์แบบสุ่ม (Random Forest)

อัลกอริทึมฟอเรสต์แบบสุ่มพัฒนาขึ้นมาโดย (Breiman, 2001) เป็นวิธีการจำแนกประเภทข้อมูลซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยจะเพิ่มขั้นตอนการทำการสุ่มเลือกตัวแปรจากตัวแปรทั้งหมดและใช้เฉพาะตัวแปรที่สุ่มได้ในการสร้างโมเดลหลายๆ ครั้ง เช่น สมมุติว่าจะสร้าง K โมเดล โดยจะทำการสุ่มชุดข้อมูลเริ่มต้นแบบใส่กลับ จนได้ข้อมูล K ชุด (D1, D2, ..., Dk) แต่ละชุดข้อมูล ทำการสุ่มตัวแปรมาบางส่วนได้ข้อมูล K ชุด (S1, S2, ..., Sk) แล้วนำมาสร้างโมเดลการจำแนกประเภท K โมเดล (M1, M2, ..., Mk) ใช้แต่ละโมเดลในการทำนายผลที่ได้จากการทำนายของทั้ง K โมเดล (Ali, et al., 2012) และนับโหวตมากที่สุด วิธีการทำงานดัง Figure 2

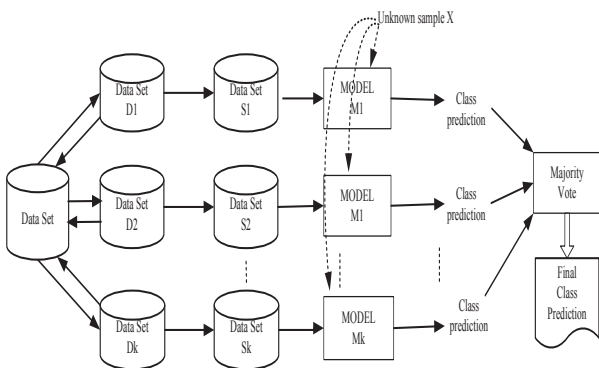


Figure 2 Random forest algorithm

2.2.3 เค-เนียร์เรสเนเบอร์ (K-Nearest Neighbors)

เป็นอัลกอริทึมที่มีหลักการการทำงานและวิธีการจำแนกข้อมูลที่ไม่ซับซ้อน โดยพิจารณาจากชุดข้อมูลใกล้เคียงกับข้อมูลที่กำลังสนใจ เรียกชุดข้อมูลเหล่านี้ว่า เพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor) มีวิธีการเลือกชุดข้อมูลเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดกับค่าของชุดข้อมูลที่กำลังพิจารณาจำนวน K ตัว การคำนวณค่าความคล้ายคลึงด้วยการใช้ค่าระยะทางน้อยที่สุด โดยส่วนมากมักจะใช้วิธีการวัดระยะทาง (Distance) ด้วยยูคลิดีเยน (Euclidean) ดังสมการที่ (1) (Han, et al., 2011)

$$dist(X_1, X_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2} \tag{1}$$

โดยที่ n คือ จำนวนตัวแปรทั้งหมด, $dist(X_1, X_2)$ คือ ค่าระยะทางระหว่างสองตัวแปร, X_1 คือ ค่าตัวแปรที่ 1 และ X_2 คือ ค่าตัวแปรที่ 2

2.2.4 นาอีฟเบย์ (Naïve Bayes)

เป็นอัลกอริทึมในการจำแนกประเภทข้อมูลโดยใช้หลักสถิติในการทำนายความน่าจะเป็น (Probability) ของข้อมูล ด้วยหลักการทฤษฎีของเบย์ (Bayesian Theorem) สามารถทำนายค่าคลาสเป้าหมายของตัวอย่างด้วยการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นมากที่สุดระหว่างทุกค่าคลาสที่เป็นไปได้ การคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยรวม จะต้องคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละคุณสมบัติของแต่ละคลาส ดังสมการที่ (2)

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \tag{2}$$

โดยที่ $P(A | B)$ คือ ความน่าจะเป็นของ A เมื่อกำหนด B, $P(B | A)$ คือ ความน่าจะเป็นของ B เมื่อกำหนด A, $P(A)$ คือ ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ A และ $P(B)$ คือ ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ B

2.2.5 ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree)

เป็นอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการแตกแขนงจากโหนดราก (Root Node) เป็นโหนดภายใน (Branch Node) แตกออกไปตามเงื่อนไขหรือข้อมูล จนไปสูโหนดใบ (Leaf Node) เป็นแบบจำลองที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสิ่งที่สนใจกับผลสรุปที่อาจเกิดขึ้นจากค่าของเหตุการณ์ (Jones, 2008) โหนดภายในของต้นไม้ตัดสินใจจะประกอบเป็นคุณลักษณะของข้อมูล ซึ่งเมื่อสอดคล้องกับข้อมูลใดก็จะใช้คุณลักษณะนั้นเป็นตัวตัดสินใจว่าข้อมูลจะไปทิศทางใด โหนดภายในจะแตกกิ่งเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนค่าของคุณลักษณะในโหนดภายใน

และสุดท้ายคือ โหนดใบ เป็นกลุ่มผลลัพธ์ในการจำแนกประเภทข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแปลงเป็นกฎ (Rule) ได้ การสร้างจะเริ่มพิจารณาที่โหนดรากเป็นอันดับแรกก่อนจะดำเนินการพิจารณา โหนดใบและกิ่งก้านที่แตกแขนงต่อไป โดยต้องคำนวณหาข้อมูลที่เหมาะสมที่จะเป็น โหนดราก ซึ่งพิจารณาจากค่า Information Gain ที่มากที่สุด ที่ได้จากการคำนวณค่า Entropy เพื่อให้การจำแนกและแยกแยะข้อมูลให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันมากที่สุด หลังจากที่ไดโหนดรากแล้วก็จะสร้าง Decision Tree ในลำดับต่อไป จนกระทั่งถึงโหนดใบ และได้ Decision Tree ที่สมบูรณ์ ดังสมการที่ 3 และ 4

$$E(S) = \sum_{i=1}^n -P(V_i) \log_2 P(V_i) \quad (3)$$

โดยที่ $E(S)$ คือ ค่า Entropy ของเซต (S), S คือ ข้อมูลทั้งหมด, $P(V_i)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลที่สนใจ และ V_i คือ คุณลักษณะข้อมูลที่สนใจ

$$Gain(S, A) = E(S) - \sum_{v \in \text{values}(A)} \frac{|S_v|}{S} E(S_v) \quad (4)$$

โดยที่ $Gain(S, A)$ คือ ค่า Gain ของเหตุการณ์ที่สนใจ, $E(S)$ คือ ค่า Entropy ของเซต (S) ก่อนการแบ่งกลุ่มย่อย, $E(S_v)$ คือ ค่า Entropy ของเซตข้อมูลกลุ่มย่อย v, S_v คือ จำนวนข้อมูลในเซตข้อมูลกลุ่มย่อย v, S คือ จำนวนข้อมูลในเซต (S) และ A คือ ตัวแปรที่สนใจ

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุญยานุช ใหม่เงา และคณะ (2560) พัฒนาโปรแกรมสำหรับช่วยวิเคราะห์อัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ด้วย โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) และเพื่อพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์อัตราเสี่ยงการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งในการทดลองสร้างโมเดลของทั้งสองอัลกอริทึมใช้ โปรแกรม WEKA ผลการทดลองสร้างโมเดลพบว่า อัลกอริทึมที่สามารถคาดการณ์จำแนกข้อมูลอัตราเสี่ยงของการเป็น โรคหัวใจและหลอดเลือดได้ดีที่สุดคือ อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งมีค่าที่โปรแกรมจำแนกได้ ถูกต้องสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 97.297

สรารุช มีศรี และคณะ (2560) ทำการศึกษาการวินิจฉัยโรคหัวใจโดยใช้ตัวจำแนกผสม ชุดข้อมูลโรคหัวใจจำนวน 303 เรคคอร์ด 14 แอตทริบิวต์ ในขั้นตอนแรกถูกจำแนกด้วยอัลกอริทึมวิธีเบย์อย่างง่าย ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน และวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดเคตตัว และได้นำมารวมกันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยการเรียนรู้แบบแพร่กระจาย

ย้อนกลับ จากนั้นในขั้นตอนที่สองผลลัพธ์จากตัวจำแนกเดี่ยวจะเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำแนกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม จากผลการทดลองตัวจำแนกผสมให้ความถูกต้องมากกว่า ซึ่งค่าความถูกต้อง 86.16% และอัตราบวกเท็จดีกว่าตัวจำแนกอื่นๆ

Assari *et al.* (2017) นำเสนอการวินิจฉัยโรคหัวใจโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล โดยได้อธิบายว่าที่ผ่านมาโรคหัวใจได้รับการระบุว่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเสียชีวิตทั่วโลก อย่างไรก็ตามโรคนี้ถือได้ว่าเป็นโรคที่สามารถป้องกันได้และควบคุมได้มากที่สุดในเวลาเดียวกัน การทดลองใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูลเดียวกันนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ต่างกันในช่วงข้อมูลที่แตกต่างกัน การศึกษารั้งนี้ได้รับความช่วยเหลือผู้เชี่ยวชาญด้านการดูแลสุขภาพในการวินิจฉัยโรคหัวใจและประเมินปัจจัยเสี่ยง เทคนิคการทำเหมืองข้อมูลได้ถูกนำไปใช้กับชุดข้อมูลที่สัมพันธ์กัน ได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นโดยใช้กฎที่แยกออกมาด้วยโปรแกรม Visual Studio ใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล 4 เทคนิค ได้แก่ Decision Tree, Bayesian Network, K-nearest Neighbors, Support Vector Machines ผลการวิจัยสรุปว่าเทคนิค Support Vector Machines มีความแม่นยำสูงสุด (84.33%)

Suksawatchon *et al.* (2018) พัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านสุขภาพสำหรับผู้ดูแลครอบครัวคนพิการโดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล บทความนี้มีการนำเสนอระบบวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านสุขภาพหรือ HRAS ซึ่งเป็นระบบผู้เชี่ยวชาญใหม่ในการระบุระดับความเสี่ยงต่อสุขภาพใน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านสุขภาพจิต ร่างกาย และสังคม ระบบ HRAS รวบรวมข้อมูลสุขภาพผ่านแบบสอบถามออนไลน์และแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี RAC ใช้อัลกอริทึมการจำแนกข้อมูลด้วย Rule-base และสร้าง RAC ประเมินด้วยวิธี K-Fold Cross Validation และผู้เชี่ยวชาญ ผลการประเมินพบว่า Neural Network มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยรวมซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่า 90% ในชุดข้อมูลสุขภาพทั้งหมด ดังนั้น Neural Network จึงเป็นลักษณะนามที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานนี้

Nai-arun & Moungrmai (2020) นำเสนอบทความวิจัยการแบบจำลองการทำนายการวินิจฉัยความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล ได้แก่ Decision Tree, Logistic Regression, Back-propagation Neural Network, K-nearest Neighbors, Random Forest และ Naïve Bayes ด้วยโปรแกรม WEKA ผลสรุปได้ว่าเทคนิค Logistic Regression (99.940%) ให้ค่าความถูกต้องการทำนายดีที่สุด รองลงมาคือ Back-propagation Neural Network (98.105%) และ Radon Forest (95.627%) ตามลำดับ

วิธีดำเนินการวิจัย

การทำวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยแบบประยุกต์ (Applied Research) โดยขั้นตอนแรกผู้วิจัยได้ดำเนินการขอจริยธรรมในมนุษย์ ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร และได้รับรองโครงการวิจัยตามแนวทางหลักจริยธรรมการวิจัยในคนที่เป็นมาตรฐานสากล หมายเลขโครงการ 095/62 ซึ่งได้ผ่านการรับรองจริยธรรมในมนุษย์ เมื่อวันที่ 6 มีนาคม 2563 เรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นได้ดำเนินการตามขั้นตอนการวิจัยและกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ดัง Figure 3

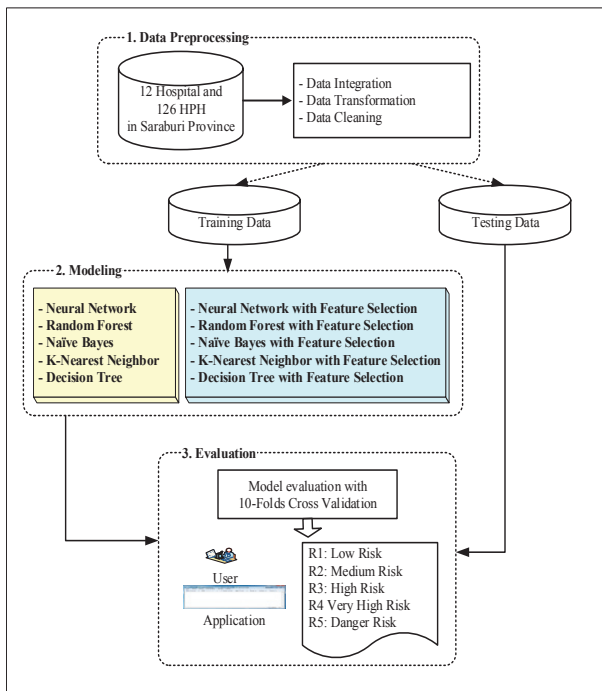


Figure 3 Conceptual framework

จาก Figure 3 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัยและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การจัดเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing)

การรวมข้อมูล (Data Integration) ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรี ที่อยู่ระหว่างปี พ.ศ.2561-2562 เป็นข้อมูลการคัดกรองความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด มาจากโรงพยาบาล 12 แห่ง และโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล 126 แห่ง ในจังหวัดสระบุรี ใช้ตามแนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ของกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล (รพ.สต.) และโรงพยาบาลต่างๆ ใช้ทำการคัดกรองผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือด

การแปลงข้อมูล (Data Transformation) มีขั้นตอนคือ (1) ใช้โปรแกรม MySQL ในการจัดการข้อมูลทั้งหมดที่ได้

มาจากสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรี ทำการรวมและคิวรีข้อมูลจากไฟล์ข้อมูลที่ได้มา ดัง Figure 4

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	CID	BIRTH	SEX	TYPEAREA	nation	source	tb_mlx_dx	t_mlx_dx	type_dx	date_dx	hosp_dx	AGE_Y	SEX_CVD	DM
2	0000xxxx	10/29/1972	2	4	99	chronic	I10	I	1	9/25/2006	10813	46	0	0
3	0000xxxx	9/18/1961	1	4	99	chronic	E149	E	2	12/22/2016	10808	57	1	1
4	0000xxxx	5/2/1985	2	3	99	chronic	I10	I	1	10/15/2009	10810	33	0	0
5	0000xxxx	1/1/1972	1	4	99	chronic	E149	E	2	10/14/2010	10808	47	1	1
6	0012xxxx	12/10/1964	2	4	99	chronic	E149	E	2	12/12/2013	10808	54	0	1
7	0018xxxx	8/2/1966	2	4	99	chronic	I10	I	1	1/10/2013	10861	52	0	0
8	0017xxxx	7/1/1945	2	4	99	chronic	I10	I	1	11/2/2009	1711	73	0	0
9	0017xxxx	7/1/1965	2	4	99	chronic	I10	I	1	2/12/2007	1713	53	0	0
10	0017xxxx	6/12/1960	2	4	99	chronic	I10	I	1	2/7/2006	1713	58	0	0
11	0017xxxx	10/5/1931	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	87	0	0
12	0017xxxx	7/1/1922	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	96	0	0
13	0017xxxx	7/1/1925	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	93	0	0
14	0017xxxx	10/10/1948	1	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	70	1	0
15	0017xxxx	7/1/1951	1	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	67	1	0
16	0017xxxx	7/1/1946	1	4	99	chronic	E119	E	2	7/8/2010	1714	72	1	1
17	0017xxxx	1/1/1935	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	84	0	0
18	0017xxxx	8/31/1964	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	54	0	0
19	0017xxxx	7/1/1967	2	4	99	chronic	I10	I	1	7/8/2010	1714	51	0	0
20	0017xxxx	2/1/1947	1	4	99	chronic	I10	I	1	6/27/2012	1714	71	1	0

Figure 4 Information from the Saraburi Provincial Public Health Office

(2) ทำการแปลงค่าความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด (RISK_SCORE) ข้อมูลค่าระดับความเสี่ยงที่ได้มาเป็นตัวเลข ด้วยสูตรของสำนักงานสาธารณสุข (Thai CV Risk Score) ดังนี้

```

cvd_func(AGE_Y,SEX_CVD,L_SBP,DM,L_SMOKING,L_CHOL,L_WAIST_CM,L_HEIGHT)
DECLARE FullScore DECIMAL(20,9) DEFAULT 0 ;
DECLARE cvd_score DECIMAL(5,2) DEFAULT 0 ;
IF chol > 0 THEN
SET FullScore = (0.08183*age) + (0.39499*sex) + (0.02084*sbp) +
0.69974*dm) + (0.00212*chol) + (0.41916*smoking) ;
SET cvd_score = (1-POWER(0.978296,EXP(FullScore-7.04423)))*100 ;
END IF ;
IF chol = 0 THEN
SET FullScore = (0.079*age) + (0.128*sex) + (0.019350987*sbp) +
(0.58454*dm) + (3.512566 * (waist_cm/height)) + (0.459*smoking) ;
SET cvd_score =(1-POWER(0.978296,EXP(FullScore-7.720484)))*100 ;
END IF ;
IF cvd_score > 0 THEN
RETURN cvd_score ;
ELSE
RETURN 0 ;
END IF ;
    
```

หลังจากนั้นทำการแปลงค่าให้อยู่ในรูปแบบคลาส 5 คลาส ตามหลักการของระบบการเฝ้าระวัง ควคุม ป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด (กระทรวงสาธารณสุข, 2561) ได้แก่

- R1 ความเสี่ยงต่ำ มีค่า RISK_SCORE <=10
- R2 ความเสี่ยงปานกลาง มีค่า RISK_SCORE = 11-20
- R3 ความเสี่ยงสูง มีค่า RISK_SCORE = 21-30
- R4 ความเสี่ยงสูงมาก มีค่า RISK_SCORE = 31-40

R5 ความเสี่ยงอันตราย มีค่า RISK_SCORE >= 41
 (3) ทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลทั้งหมดด้วยโปรแกรม MySQL ได้ชุดข้อมูลทั้งหมด 44,674 คน ดัง Figure 5

	SEX	AGE	DM	SMOKING	SBP	CHOL	WAISTCM	HEIGHT	CLASS
1									
2	F	66	Y	N	147	122	86	156	R3
3	F	62	N	N	102	232	96	165	R1
4	F	45	Y	N	160	153	92	150	R1
5	F	73	N	N	134	179	82	148	R2
6	F	42	N	N	140	202	70	155	R1
7	F	47	Y	N	118	206	78	160	R1
8	F	57	N	N	122	194	90	154	R1
9	F	43	Y	N	120	230	95	150	R1
10	F	53	N	N	139	177	93	150	R1
11	F	55	N	N	140	223	86	152	R1
12	F	38	Y	N	147	191	102	152	R1
13	F	52	N	N	125	223	78	156	R1
14	M	50	N	Y	138	182	86	163	R1
15	F	42	Y	N	146	129	104	157	R1
16	F	48	N	N	128	180	102	165	R1
17	F	52	N	N	121	174	95	160	R1
18	F	46	N	N	128	186	79	152	R1
19	F	52	Y	N	123	209	89	160	R1
20	F	52	Y	N	133	198	82	158	R1
21	F	48	N	N	137	168	82	165	R1
22	F	50	N	N	110	180	86	160	R1
23	F	45	Y	N	115	189	93	160	R1

Figure 5 Data Transformation

การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) นำข้อมูลทั้งหมด 44,674 คน นำมาทำความสะอาด (Data Cleaning) ด้วยการขจัดข้อมูลที่ผิดพลาด (Missing Value) ข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ และข้อมูลที่มีค่าของคุณลักษณะบางอย่างขาดหายไปจำนวน 12,745 คน เหลือข้อมูลที่มีความสมบูรณ์จำนวน 31,929 คน ที่ประกอบด้วยทั้งหมด 9 แอตทริบิวต์ ได้แก่ แอตทริบิวต์นำเข้า (Input) จำนวน 8 แอตทริบิวต์ และแอตทริบิวต์ผลลัพธ์ (Class) จำนวน 1 แอตทริบิวต์ ดัง Table 1

Table 1 Attribute details

No.	Attribute	Detail	Value of attribute
1	SEX	เพศ	Nominal scale M: ชาย F: หญิง
2	SMOKING	ประวัติการสูบบุหรี่	Nominal scale Y: สูบบุหรี่ N: ไม่สูบบุหรี่
3	DM	ประวัติการเป็นโรคเบาหวาน	Nominal scale Y: เคยเป็นโรคเบาหวาน N: ไม่เคยเป็นโรคเบาหวาน
4	AGE	อายุ (ปี)	Numerical scale
5	HEIGHT	ส่วนสูง (ซม.)	Numerical scale
6	WAISTCM	เส้นรอบเอว (ซม.)	Numerical scale
7	SBP	ค่าความดันโลหิต (mmHg หรือ มิลลิเมตรปรอท)	Numerical scale
8	CHOL	ค่าโคเลสเตอรอลรวม (mg/dL หรือ มิลลิกรัม/เดซิลิตร)	Numerical scale
9	CLASS	ค่าระดับความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด	Ordinal scale R1: ความเสี่ยงต่ำ R2: ความเสี่ยงปานกลาง R3: ความเสี่ยงสูง R4: ความเสี่ยงสูงมาก R5: ความเสี่ยงอันตราย

2. การสร้างแบบจำลอง (Modeling)

การสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ (1) สร้างแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยใช้อัลกอริทึมเหมือนข้อมูล ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม ฟอเรสต์แบบสุ่ม เค-เนียร์เรสเนเบอร์ นาอ็ีฟเบย์ และ

ต้นไม้ตัดสินใจ ด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio และได้ทดลองกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม ดัง Figure 6 และ Table 2 จนได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

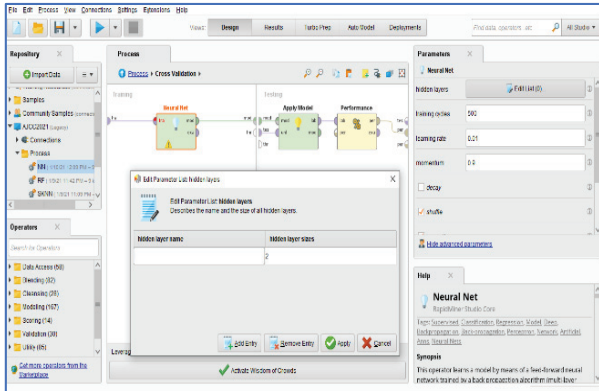


Figure 6 Parameters in the RapidMiner Studio program

Result History		
AttributeWeights (Optimize Weights (Evolutionary))		
	attribute	weight
Data	SEX	1
Weight Visualizations	AGE	0.265
Annotations	DM	0.395
	SMOKING	0.297
	SBP	0.283
	CHOL	0
	WAISTCM	0
	HEIGHT	0

Figure 7 Optimize weights (Evolutionary)

Table 2 Parameter setting details

Algorithm	Parameter setting
Neural Network	Hidden layer sizes = 2 Training cycles = 500 Learning rate = 0.01 Momentum = 0.9
Random Forest	Number of trees = 100 Criterion = gain_ratio Maximal depth = 10 Voting Strategy = Confidence vote
K-Nearest Neighbors	k = 4 Measure type = MixedMeasures Mixed measure = MixedEuclidean Distance
Naïve Bayes	Laplace correction
Decision Tree	Number of trees = 100 Criterion = gain_ratio Maximal depth = 10 Confidence = 0.1 Minimal gain = 0.01 Minimal leaf size = 2 Minimal size for split = 4 Number of prepruning alternatives = 3

(2) ใช้อัลกอริทึมทั้ง 5 วิธีพร้อมการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์ (Attribute Selection) ด้วยโปรแกรม RapidMiner Studio โดยเทคนิคในการเลือกแอตทริบิวต์ ใช้โอเปอเรเตอร์ Optimize Weights (Evolutionary) เป็นการใช้สำหรับคำนวณค่าน้ำหนักของแอตทริบิวต์ต่างๆ ของแต่ละแอตทริบิวต์และเลือกแอตทริบิวต์ที่เหมาะสม โดยมีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งค่าน้ำหนัก 0 หมายถึง ไม่มีความสำคัญและค่าน้ำหนัก 1 หมายถึงสำคัญที่สุด ตัวอย่างดัง Figure 7

3. ประเมินผลโมเดล (Evaluation)

การประเมินผลเพื่อทำการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้อัลกอริทึมที่เหมือนข้อมูล ด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ชุดเท่าๆ กัน และใช้ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองเป็นชุดการเรียนรู้ (Training Data) จำนวน 9 ชุด ข้อมูลสำหรับทดสอบแบบจำลองเป็นชุดทดสอบ (Testing Data) จำนวน 1 ชุด หลังจากนั้นทำการวนรอบจำนวน 10 รอบ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยค่าความถูกต้อง (Accuracy)

ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ผลการวิจัย ประกอบด้วย ผลการเลือกคุณสมบัติแอตทริบิวต์ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยค่า Accuracy และ Confusion Matrix ดังนี้

1. ผลการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์

ผลการสร้างแบบจำลองด้วยการใช้อัลกอริทึม 5 อัลกอริทึม ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียม ฟอเรนส์แบบสุ่มเค-เนียร์เรสเนเบอร์ นาอ์ฟเบย์ และต้นไม้ตัดสินใจ และอัลกอริทึม 5 วิธีพร้อมการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์ (Attribute Selection) ดัง Figure 8

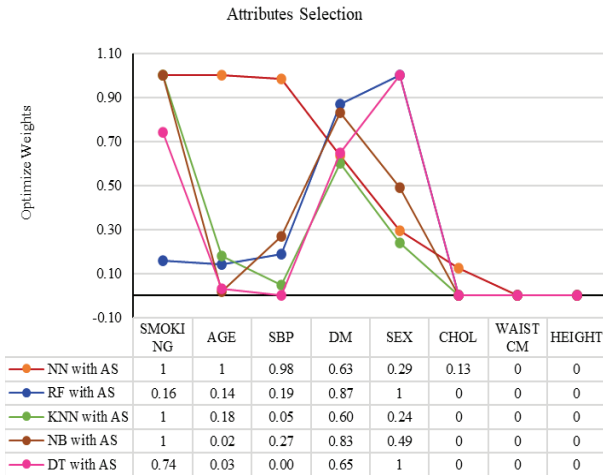


Figure 8 Efficiency attributes selection results

จาก Figure 8 แสดงผลการเลือกแอตทริบิวต์ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองร่วมกับ 5 อัลกอริทึม ได้แก่ Neural Network with Attribute Selection (NN with AS), Random Forest with Attribute Selection (RF with AS), K-Nearest Neighbors with Attribute Selection (KNN with AS), Naïve Bayes with Attribute Selection (NB with AS) และ Decision Tree with Attribute Selection (DT with AS) เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนัก (Weight) ของแอตทริบิวต์ต่างๆ และแต่ละอัลกอริทึมเลือกแอตทริบิวต์ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองแตกต่างกัน ผลการวิจัย พบว่า แอตทริบิวต์ที่มีความสำคัญทำการเรียงลำดับได้ดังนี้ SMOKING, DM, SEX, AGE, SBP, CHOL, WAISTCM และ HEIGHT ตามลำดับ

2. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation หลังจากนั้นทำการหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลแสดงดัง Figure 9

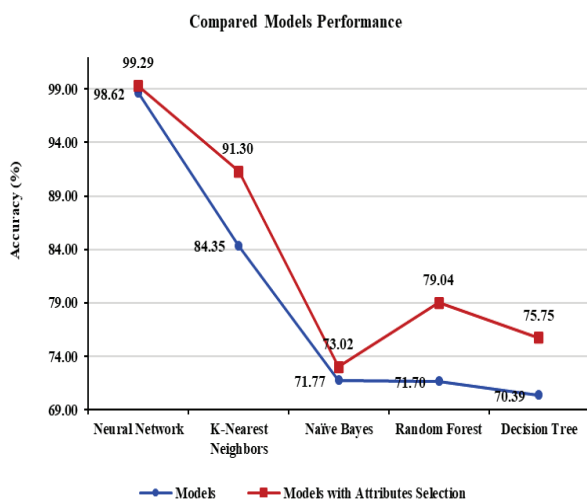


Figure 9 Results of the model performance efficiency

จาก Figure 9 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดโดยใช้ 5 อัลกอริทึมเหมือนข้อมูล และใช้อัลกอริทึมทั้ง 5 วิธีพร้อมการเลือกคุณสมบัติของแอตทริบิวต์ รวมเป็นทั้งหมด 10 แบบจำลอง ผลการวิจัย พบว่า แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายสูงที่สุดคือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมการเลือกคุณสมบัติ มีค่าความถูกต้อง 99.29% และต่ำสุดคือ แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ มีค่าความถูกต้อง 70.39%

3. ผลการเปรียบเทียบ Confusion Matrix

ผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง ด้วยการใช้ค่าในตาราง Confusion Matrix เพื่อประเมินผลลัพธ์การทำนายและการเปรียบเทียบกับค่าจริง ของแบบจำลองที่ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมการเลือกคุณสมบัติ และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมดัง Table 3 และ 4

Table 3 The confusion matrix of a neural network model with selection of properties

R1	Predicted value					
	R2	R3	R4	R5		
Actual value	R1	14983	57	0	0	0
	R2	29	8215	16	0	0
	R3	0	41	3986	29	0
	R4	0	0	22	2027	18
	R5	0	0	0	14	2492

Table 4 The confusion matrix of a neural network model

R1	Predicted value					
	R2	R3	R4	R5		
Actual value	R1	14978	62	0	0	0
	R2	81	8112	67	0	0
	R3	0	68	3950	38	0
	R4	0	0	46	1967	54
	R5	0	0	0	25	2481

สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองที่สร้างอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมการเลือกคุณสมบัติ (Neural Network with Attribute Selection) ได้ค่าประสิทธิภาพการ

ทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดที่ดีที่สุด ซึ่งได้ผลคล้ายกับงานวิจัยของบุญยานุช ใหม่เงาและคณะ และ Suksawatchon และคณะ ที่ได้ผลการทดลองว่าอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมได้ค่าการจำแนกและมีประสิทธิภาพการวิเคราะห์ในงานนั้นๆ ได้สูงสุด ด้วยเหตุผลที่ว่าวิธีการของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการเรียนรู้แบบต้องมีผู้สอน โดยจะหาผลลัพธ์ของโครงข่ายแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าจริงของข้อมูล หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าความผิดพลาด (Error) แล้วใช้ค่าความผิดพลาดนี้เป็นการเรียนรู้ของโครงข่ายแบบย้อนกลับ เพื่อทำการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) เส้นเชื่อมต่อ แล้วทำการเรียนรู้ซ้ำๆ จนกระทั่งค่าความผิดพลาดน้อยลงมากที่สุด จะทำให้ได้ค่าน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดในที่สุด พร้อมทั้งได้ทำการคัดเลือกแอตทริบิวต์ที่เหมาะสมและสำคัญมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง จึงทำให้ได้แบบจำลองที่ดีที่สุดในการนำไปใช้พัฒนาระบบแอปพลิเคชันต่างๆ ในการคัดกรองผู้ป่วยใหม่ที่มีความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือด เพื่อให้บุคลากรทางการแพทย์ใช้ประเมินโอกาสเสี่ยงต่อโรคหัวใจและหลอดเลือดในบุคคลที่ไม่เคยเป็นโรคนี้มาก่อน และเมื่อพบผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงก็จะนำไปสู่การตรวจและรักษาโรคได้อย่างทัน่วงที่ และทำให้ลดอัตราการเสียชีวิตลงได้

จากผลการวิจัยที่ได้ในการคัดเลือกแอตทริบิวต์ที่สำคัญในการนำมาสร้างแบบจำลองร่วมกับ 5 อัลกอริทึมเพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักของแอตทริบิวต์ต่างๆ พบว่าแอตทริบิวต์ที่มีความสำคัญโดยเรียงลำดับได้ดังนี้ ประวัติการสูบบุหรี่ ประวัติการเป็นโรคเบาหวาน เพศ อายุ ค่าความดันโลหิต ค่าโคเลสเตอรอลรวม เส้นรอบเอว และส่วนสูง แต่อย่างไรก็ตามแนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดของกระทรวงสาธารณสุขก็ให้ใช้ปัจจัยเสี่ยงทั้งหมดดังกล่าวในการคัดกรองผู้ป่วยเป็นปัจจัยสำคัญ รวมทั้งการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมด้านสุขภาพที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม เช่น การรับประทานอาหารที่ไม่สมดุลหรือมากเกินไป อดใจ ไม่ออกกำลังกาย ความเครียด และการพักผ่อนที่ไม่เพียงพอ การสูบบุหรี่ การดื่มเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ ส่งผลให้อ้วน น้ำหนักเกิน มีความดันโลหิตสูง ไขมันในเลือดสูง โรคเบาหวาน และเป็นผลที่นำไปสู่ความเสี่ยงการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด

ข้อเสนอแนะการทำวิจัยครั้งต่อไป ควรนำอัลกอริทึมเหมือนข้อมูลอื่นๆ มาสร้างโมเดล เช่น เทคนิคการเรียนรู้ร่วมกัน (Ensemble Learning) ได้แก่ อัลกอริทึม Vote, Bagging, Boosting เพื่อหาประสิทธิภาพการทำนายที่เหมาะสมกว่า เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์และสามารถนำไปใช้สำหรับการทำนายความเสี่ยงโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลของการคัดกรองผู้ป่วยโรคหัวใจและหลอดเลือด โดยผู้วิจัยได้หนังสือขอความอนุเคราะห์และผ่านการอนุญาตให้นำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาและการวิจัยครั้งนี้แล้ว และขอขอบพระคุณคณะกรรมการจริยธรรมในมนุษย์เครือข่ายภูมิภาค มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้รับรองโครงการวิจัยตามแนวทางหลักจริยธรรมการวิจัยในคนที่เป็นมาตรฐานสากล ของหมายเลขโครงการ 095/62 ซึ่งได้ผ่านการรับรองจริยธรรมในมนุษย์ เมื่อวันที่ 6 มีนาคม 2563

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. (2562). *แนวทางการเฝ้าระวังโรค ของกระทรวงสาธารณสุข*. องค์การรับส่งสินค้าและวัสดุภัณฑ์.
- กระทรวงสาธารณสุข. (2561). *ระบบการเฝ้าระวัง ควบคุม ป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด* โรงพิมพ์สำนักพระพุทธรศาสนาแห่งชาติ.
- บุญยานุช ใหม่เงา และคณะ. (2560). โปรแกรมช่วยวิเคราะห์อัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 5(1), 55-65.
- สายชล สิ้นสมบุรณ์ทอง. (2560). *การทำเหมืองข้อมูล เล่ม 1 : การค้นหาความรู้จากข้อมูล*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จามจุรีโปรดักส์.
- สรารุช มีศรี, ศุภกานต์ พิมลธเรศ และ อัจฉรา มหาวีรวัฒน์. (2560). *การวินิจฉัยโรคหัวใจโดยใช้ตัวจำแนกผสม*. [ปริญาณานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกสิทธิ์ พัทธวงศ์ศักดา. (2563). *Big Data and Machine Learning*: อดีซี พรีเมียร์.
- Ali, J., Khan, R., Ahmad, N., & Maqsood, I. (2012). Random forests and decision tree. *International Journal of Computer Science*, 9(5), 272-278.
- Assari, R., Azimi, P., & Taghva, M. R. (2017). Heart Disease Diagnosis Using Data Mining Techniques. *International Journal of Economics & Management Science*, 6(3), 72-79.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Journal of Machine Learning*, 45, 5-32.
- Chakrabarti, S., Cox, E., Frank, E., Guting, R. H., Han, J., Jiang, X., Kamber, M. & Lightstone, S. S. (2009). *Data mining: Know it all*. Morgan Kaufmann.

- Han, J. & Kamber, M. (2006). *Data mining: Concepts and techniques (2nd ed.)*. Morgan Kaufmann.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data mining concepts and techniques*. (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
- Jones, M. T. (2008). *Artificial intelligence*. Infinity Science Press.
- Nai-arun N., & Moungrmai M. (2020). Diagnostic Prediction Models for Cardiovascular Disease Risk using Data Mining Techniques. *Journal of ECTI TRANSACTIONS ON COMPUTER AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 14(2), 113-121.
- Suksawatchon, U., Suksawatchon J., & Lawang W. (2018). Health Risk Analysis Expert System for Family Caregiver of Person with Disabilities using Data Mining Techniques. *Journal of ECTI TRANSACTIONS ON COMPUTER AND INFORMATION TECHNOLOGY*. 12(1), 62-72.
- Witten, I. H. & Frank, E. (2005). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*. (2nd ed.). USA: Morgan Kaufmann.
- World Health Organization. (2019, November 15th). *Cardiovascular Diseases*rom https://www.who.in/Cardiovascular_Disease/.

ระบบสังเกตการณ์การใช้น้ำด้วยการประมวลผลภาพ

Water utilization monitoring system by using image processing

ลुकมาน ไชยราบ^{1*}, เการาบ รุงเยว¹, ศิริกานต์ ชูเชิด²

Lukman Chaiyarab^{1*}, Gaurav Dhungyel¹, Sirikan Chucherd²

Received: 23 January 2021 ; Revised: 15 February 2021 ; Accepted: 1 March 2021

บทคัดย่อ

การขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาใหญ่ในฤดูแล้งทั่วโลก หลายประเทศพยายามจัดการและลดการใช้น้ำให้น้อยที่สุด การบริหารจัดการน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยลดปัญหานี้ได้ ตัวอย่างเช่นการหมั่นตรวจสอบความสมบูรณ์ของระบบประปาไม่ให้เกิดการชำรุดเสียหาย คณะผู้แต่งจึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ เพื่อตรวจสอบหน้าปัดมิเตอร์น้ำประปา รูปภาพมิเตอร์ถูกเตรียมและกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน จากนั้นภาพที่กรองแล้วจะถูกแปลงจากภาพสีเป็นภาพขาวดำด้วยวิธีการของฮออสสุ จากนั้นสัญญาณวิทยุถูกนำไปใช้เพื่อแยกส่วนที่สนใจ (ROI) สุดท้ายวิธีการ Python-tesseract ซึ่งเป็นเครื่องมือจดจำอักขระด้วยแสง (OCR) ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงสตริงเป็นข้อความ(ตัวเลข) หลังจากนั้นผลลัพธ์จะถูกส่งผ่านระบบ WIFI เพื่อไปจัดเก็บและแสดงผลแบบกราฟบนหน้าเว็บ หากเกิดความผิดปกติของข้อมูลการใช้น้ำ จากการอ่านค่ามิเตอร์ ระบบจะทำการส่งอีเมลแจ้งเตือนไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอมีความแม่นยำด้วยเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความแม่นยำสำหรับภาพแต่ละประเภท (มีรอยขีดข่วนมาก น้อย และไม่มี) คือ 48%, 75.1% และ 91.64% ตามลำดับ

คำสำคัญ: คอนโซลไฟเบส การจดจำอักขระด้วยแสง รัสเบอร์รี่ไพ ระบบบริหารจัดการน้ำ

Abstract

Water scarcity is a big problem in dry seasons around the world. Many countries are trying to manage and minimize the use of water and Water management is essential to help reduce this problem ; For example, by regularly checking the integrity of the plumbing system to prevent damage. the authors have an idea for applying image processing technology to check the water meter page. Meter images were prepared and noise eliminated by a Gaussian filter. Then, the filtered images were binarized from color images by Otsu's algorithm. Next, the morphological was applied to extract the region on interest (ROI). Finally, the Python-tesseract which is an optical character recognition (OCR) tool was implemented to convert string to text(numbers). After that the results were be sent via WIFI to be stored and displayed in graphs on a web page. If there is any abnormality in water consumption data from the meter reading, the system will send notification emails to the relevant department. The experimental results shown that the average percentage of recognition accuracy for each image types was 48%, 75.1%, and 91.64% respectively.

Keywords: Firebase console, Optical Character Recognition (OCR), Raspberry pi, Water Management System

¹ นักศึกษาปริญญาตรี, ศูนย์ความเป็นเลิศด้านปัญญาประดิษฐ์และเทคโนโลยีก่อกำเนิด, สำนักวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, เชียงราย, 57100, ประเทศไทย

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ศูนย์ความเป็นเลิศด้านปัญญาประดิษฐ์และเทคโนโลยีก่อกำเนิด, สำนักวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, เชียงราย, 57100, ประเทศไทย

¹ Undergraduate students, Center of Excellence in AI and Emerging Technology, School of information technology, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, 57100, Thailand

² Asst.Prof, Center of Excellence in AI and Emerging Technology, School of information technology, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, 57100, Thailand

* Corresponding author ; Lukman Chaiyarab, School of information technology, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, 57100, Thailand. manchaiyarab@gmail.com

Introduction

Water and minerals are essential for living. Without water it is impossible for living organisms to survive. Water is the basic component of life. It is used for drinking, cooking, cleaning our bodies and many more purposes. Our body requires water to cellular function and to operate the organs inside our body. Therefore, we must learn how to manage the usage of water and use this resource efficiently. The basic principle of using water efficiently is that the user should be using an approximate amount of water for doing any kind of activity. For instance, when the reader brushes teeth in the restroom, we recommend that water is not allowed to flow while performing this activity. By stopping the flow of water, people can reduce the volume of excess water going to waste in a year. The objectives of this research were to monitor and control the water usage of a building by using image processing technology to extract the number of the water meter that represents water usage. If there are any unexpected changes, the system will send a notification e-mail to the relevant department. The model used in this study consists of three parts. The first part was the image preparation. The water meter images were taken and processed for noise reduction. Then, color images were converted and thresholded to binary images. Morphology technique was applied to get the preprocessed images. The second part was the character recognition process. Optical Character Recognition (OCR) by Pytesseract was implemented to extract the water meter images as numbers. After successfully extracting the numbers, the third part of the system was automatically sending the water meter data to be displayed as a graph on a web page. If there were any unexpected changes in the usage of water, the system will send a notification e-mail to the water resource department.

Literature Review

The most accurate Optical Character Recognition (OCR) engine is Pytesseract (Lee, 2020). Many languages and numbers can be recognized by this OCR engine. The licence was released under the Apache V2.0 open source. The development of the software is sponsored by Google.

In the area of water monitoring systems, there are a number of organizations that have operated the application, particularly in the field of surveillance technologies. For instance, the approach for remote capturing of a water meter involves a mechanical water meter, camera, digital media processor, GSM modem and TFT display (Kashie *et al.*, 2015). The approach works by requesting action from the central server. The camera was activated to capture images and then they were processed by DSP processor to extract a meter reading. In addition, the extracted meter reading was sent to the server by GSM network. Also, their experiment used a DSP processor for implementation which is expensive and difficult to code and implement.

Gosavi *et al.* (2017) proposed a model that consisted of Raspberry pi and Arduino Uno. They were used with the Hall effect sensor to measure the flow rate of water. The Raspberry pi uploaded data onto cloud infrastructure where databases are set. The end user is enabled to view the data via the web interface. Nevertheless, the system is different from the one we proposed since they measured the flow rate and collected data. Furthermore, the flow rate is not always constant and might cause some inaccuracies in reading.

Triantor *et al.* (2014) implemented with Matlab R2011b software toolbox where the application runs with Windows 7 operating system on a Pentium Dual Core 3.00 Ghz processor. Capturing images with Lenovo mobile Phone A800 taken from 10:00 Am to 15:00 Pm in sunny weather conditions. Firstly, three-element of colors Red Green Blue (RGB) images are processed by converting them into gray scale images and then using a median low-pass filter, contrast enhancement, histogram equalization and binarization to obtain a black and white binary image. At a later time, a segmentation process is performed to get the number as a region of interest (ROI) from line segment and the background. However, the system is manually operated and needs additional software tools and more hardware equipments.

Sisinn, *et al.* (2015) made a model using smartglass (Vuzix M100) to automate the meter reading. Particularly, it was divided into three parts. First, it automatically recognised the universal barcode that

is acquired by the smartglass camera. Secondly, the Pytesseract application performed the recognition of digits meter via SmartGlass. In The last step, an internet connection was needed in order to download a read out into a cloud-based respository. The drawback is that the recognized text is mismatched with the actual text that was on the meter.

Somyat & Nakariyakul (2018) proposed the lottery number reader from Tesseract engine digit recognition for blind people by mobile phone application (LottoTU). They segmented, thresholded, and converted the lottery number images into text by the Tesseract engine (OCR). The recognised numbers are read by Android text-to-speech (TTS) API. they achieved a satisfying result by capturing images at six locations under different illumination conditions, orientation and distance. 59 out of 60 test images were correctly read out loud for bliness seller. However, LottoTU failed to detect images with dark or light conditions.

Another system (Fikejz & Rolecek, 2018) used the Raspberry pi zero which is a single core mini

computer expanded by a real-time unit (RTC) using the standard Linux Raspbian environment. The equipment provides information of flow rate from the water meter. dAlternatively, a software system build in a Java platform by using MySQL database and Pi 4 were used to evaluate the leakage detection. However, the system focuses on the flow rate via the inner pipline not the meter reading.

Methodology

The proposed system diagram is shown in Figure 1. The preparation of the image works by requesting action from the central server (left hand side of the Figur.1. The Raspberry Pi v2 camera module will activate to capture images from water meter. Later those images are processed by Raspberry Pi 4 to extract the meter reading. The region of interest is converted from string to text. Finally, the results are sent over the internet to be stored in two databases and displayed in the webpage. In case of a possible water leak situation, a message will be sent via E-mail to the concerned authority.

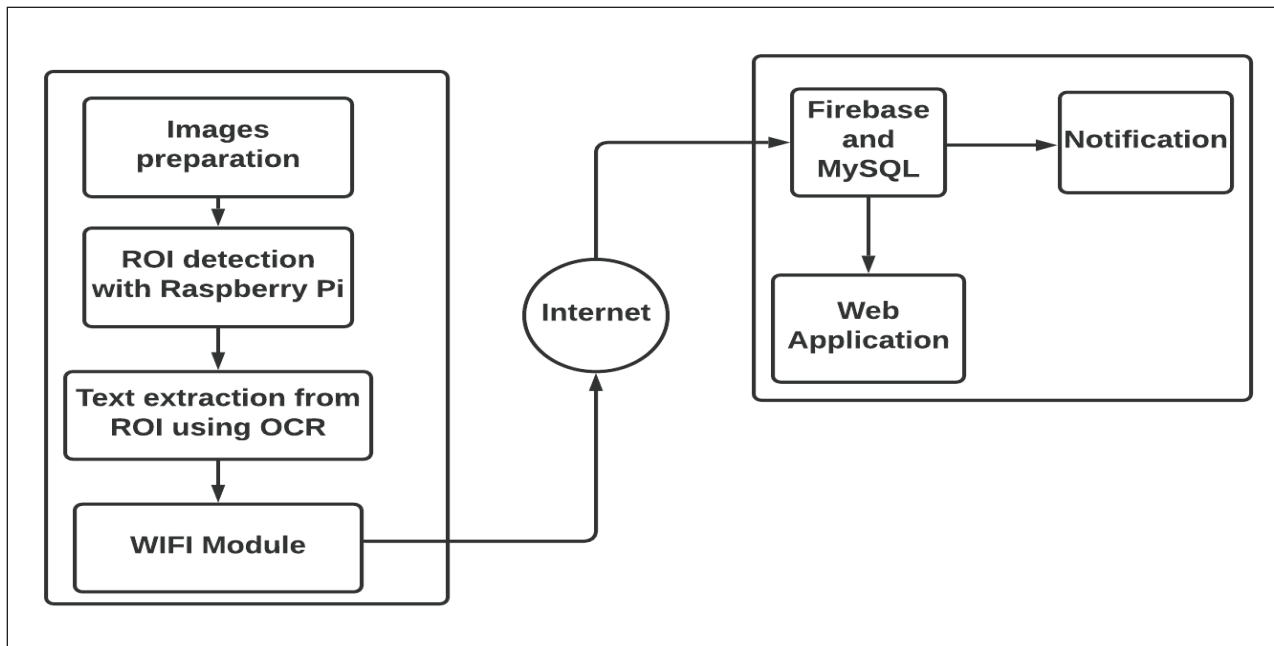


Figure 1 System diagram.

Image Processing

Figure 2 explains about the image preparation steps through the character recognition. The system captures the images of the water meter using the

Raspberry-Pi camera module V2. Then, the captured images are pre-processed. Firstly, the RGB image is converted to a grayscale image. Secondly, the system specifies the width and height of the kernel. This system

works best with a (3,4) kernel. Third, Gaussian filtering is applied since it is very effective in removing noise from the image. Fourth, Otsu's thresholding is used for image binarization. The value of the threshold is determined automatically. Next, morphological erosion is applied so that the size of the foreground object increases. Morpho-

logical dilation is also used to discard the pixels near the boundary to get a clearer binary image. Finally, the region of interest (ROI) is extracted by using the Pytesseract Optical Character Recognition (OCR). It works better with black extracted text and a white background. It inverses the process to get the desired text results.

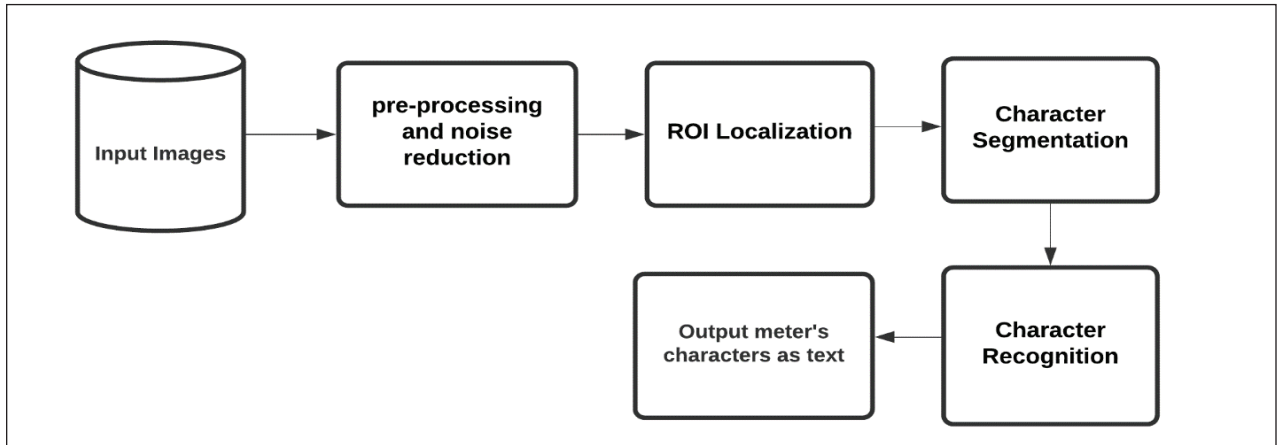


Figure 2 Image processing.

Data storage and display

Two back end programs MySQL and Firebase database which are maintained by Google are used for the data storage of the system. After the completion of image processing, the system transfers the fetched output to the above-mentioned programs as shown in Figure.3. The program initializes the connection with two of these databases. Then, it saves the text along with the date and time. For web application, the Google chart is used to plot result data into graphs. The reason for using google charts is because of its simplicity in terms of coding, and modifying, making it more attractive. The charts are based on pure HTML5 technology. They are interactive and zoomable. There are a few simple steps to add this chart to web page.

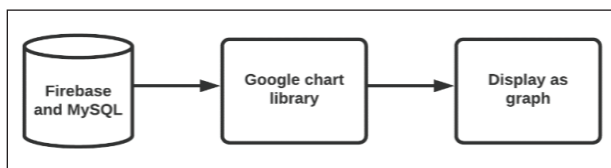


Figure 3 Data storage and display.

User Authentication and Login

For client side, PHP is implemented for the user authentication and login. Firstly, a new user has to

be registered to the system by the admin so that only authorized people can access it. After that the system verifies the username and password by comparing the values stored in a database to the input value. After the verification is complete, the user is redirected to the main page of the system.

Notification

MySQL is used because it is easier to code and implement. The system retrieves the last data along with the 2nd last data and calculates the difference to gain a view of how much water has been consumed during the time frame i.e. in one hour throughout the day. By the end of the day there will be 24 records. The reason for making it hourly is because we can quickly identify if there is a problem because the data comes hourly, making it daily or monthly will be too late if there is a problem in the pipes or if there is over-usage. The consumption water data at 10 cubic meters is used as the threshold because it is the average amount of normal water usage of that building. If there is a possible leakage somewhere in the pipes, an alert e-mail is sent right away to the authorities in that case to check for a possible leakage.

Results and discussions

System breakdown

The system comprises a Raspberry Pi 4 with 3GB Ram and a Pi v2 Camera Module. Raspberry Pi 4 has an ARM Cortex-A72 processor. The Pi 4 is also powered via a USB-C port, enabling additional power to be provided to downstream peripherals, when used with an appropriate PSU. The v2 Camera Module has a Sony IMX219 8-megapixel sensor which is capable of taking very high-resolution pictures which is exactly what is required for the system.

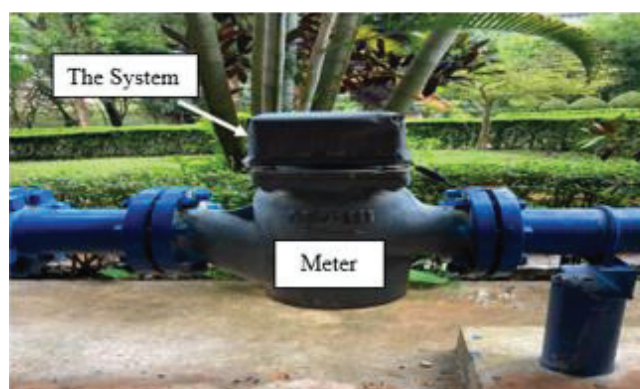
Implementation of the system

The system is composed of a Raspberry Pi and Raspberry Pi camera enclosed within a box with fixed lighting conditions. Therefore, the variation of lighting during the day will not alter the system and the brightness inside the box remains constant. The system is placed

above the meter and the location depends on the user. The outer box is made of PVC and it is covered with a black cloth to prevent exterior light from outside the box. The dimensions of the box are 15cm*11cm*10cm which are the length, the width and the height of the box respectively. Every component inside the box is tightly sealed to make it to remain functional in harsh weather. The system has to be placed perpendicular to the water meter at an approximate height of 7 cm. The side view and the top view of device installation are as shown in Figure 4 (a) and (b) respectively.

Image processing

This section shows example images of the experimental results on the real water meter. First, a raw image of the water meter in Figure 5(a) is captured by the Raspberry Pi camera.



(a)



(b)

Figure 4 Device installation. a) Side view and b) top view.

Next, the result of the conversion of raw input image to gray scale image and tilt by 90 degrees to get a perpendicular view is shown in Figure 5(b). Then, the Gaussian filtering technique and the Otsu's thresholding are applied to remove excess noise (Figure 5(c)). After

that, the ROI is extracted by performing the morphological operations as in Figure 5(d). Finally, the Pytesseract OCR converts string to text and the result is presented in console (see Figure 5(e)).



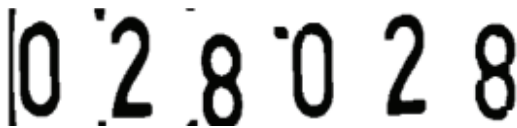
a) Input image



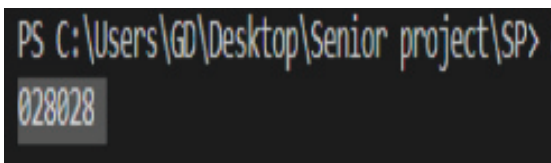
b) Gray scale image



c) Binarized and threshold image



d) ROI extracted image



e) Output in console

Figure 5 Experimental results. a) Input image, b) gray scale image, c) binarized and threshold image, d) ROI extracted image, and e) output in console.

Experimental results

This section shows the experimental results on 302 of water meter images. The region of interest (ROI) in this system is only the first 6 digits of the water meter. The seventh digit was ignored because it is the least significant part. The segmentation results were evaluated based on the recognition accuracy as

$$Recognition\ accuracy\ \% = \frac{Recognized\ Images * 100}{Tasting\ Images}$$

Table 1 presents the accuracy of input images in recognizing the digits. The experiment was divided into three types depending on the noise level of the images. Table 2 shows the categories of images of each type. The number of testing images of each number varies from 0-9 and depends on the occurrence in the water meter. The average percentage of the recognition accuracy for each image type (major, minor, and no scratches on the glass) are 48%,75.1%, 91.64% respectively. The results are better when the level of noise in the image is low. The lower the noise on the image, the better the result.

Web Application

The main page of the web application is shown in Figure 6. The example of recognition results will be stored and retrieved from Firebase DB shown in Figure 7. These data are plotted as a graph in Figure 8 using the Google charts library. The username and password for all users are assigned by admin. All the passwords are securely stored in MySQL. Once a user logs in to the system, the user can view the statistics for the water consumption of each building. In the case of an unusual situation, such as the water leak, a notification E-mail will be sent to the responsible staff as show in Figure 9. For more information, please access this link (<https://youtu.be/CYjQt993toA>).

Table 1 An example of each category of images to be tested.


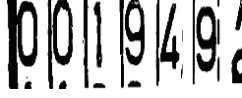
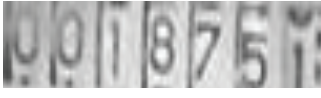
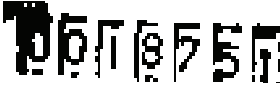
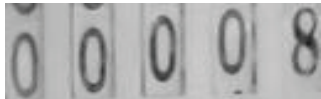
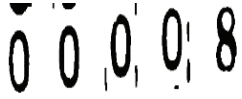
	Region of interest	Noise reduction on ROI	Comments
Water meter with minor scratches on the front glass			Minor noises. Difficult to remove the lines in between. Unable to read 0.
Water meter with major scratches on the front glass			Major scratches and erosion 0 is non readable even after noise reduction
Water meter images with no scratches on the front glass			No noise. All the numbers are distinctly recognizable. A new water meter

Table 2 Accuracy measurement for 302 water meter images.

Type of image	Digits	No. Testing Images	No. of Recognized Images	Recognition accuracy
Water meter with major scratches on the front glass	0	10	6	60%
	1	15	10	66%
	2	12	6	50%
	3	12	4	33%
	4	7	3	42%
	5	8	4	50%
	6	10	3	33%
	7	7	3	42.8%
	8	6	5	83%
Water meter with minor scratches on the front glass	0	7	6	85.7%
	1	9	9	100%
	2	11	9	81.8%
	3	14	11	78.5%
	4	13	10	76.92%
	5	12	8	66.67%
	6	7	4	57.14%
	7	9	6	66.67%
	8	11	8	72.72%
Water meter images with no scratches on the front glass	0	10	10	100%
	1	7	7	100%
	2	9	9	100%
	3	10	10	100%
	4	11	12	91.6%
	5	16	14	87.5%
	6	10	9	90%
	7	9	7	77%
	8	13	11	84.6%
9	7	6	85.7%	

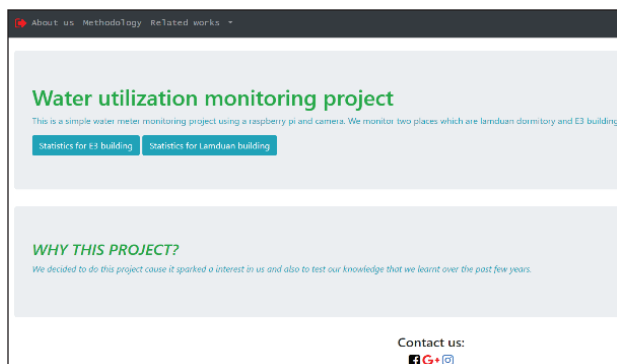


Figure 6 Main page of web application.

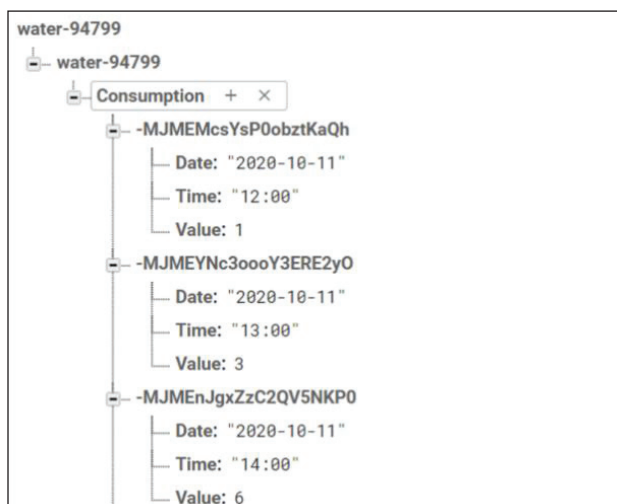


Figure 7 Data store in Firebase.

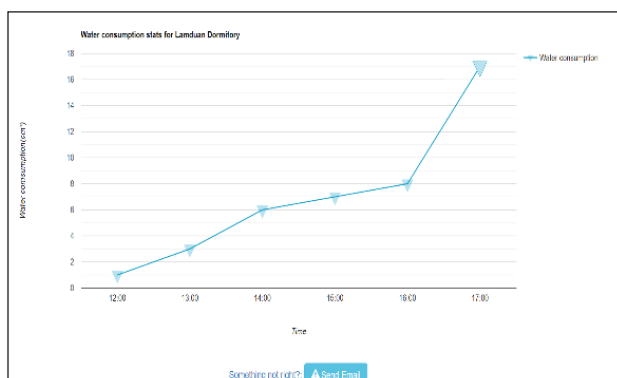


Figure 8 Water consumption graph of each building.

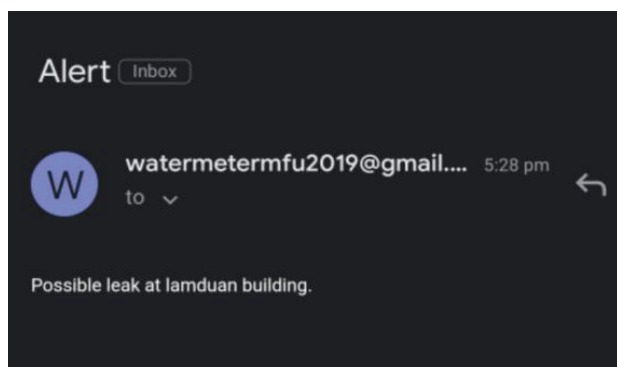


Figure 9 Email Notification.

Conclusion

This paper proposes a simple and efficient concept to read a water meter and monitor its usage. The framework first makes use of image preprocessing techniques followed by Optical character recognition (OCR). After the digits of a water meter have been detected, the graph of water utilization is presented via a web application. In the case of excess usage of water, the system sends a notification E-mail to the staff responsible. The experimental results demonstrated that the system achieved good performance with a low noise water meter.

From the experimental results, it is safe to conclude that the proposed system is capable of detecting numbers on water meters and calculating usage of water. It is suitable for those meters which have less noise i.e., new meters yield better results. The pi camera and raspberry pi 4 is capable of fast processing. Moreover, the software the system uses are easy and great sources to build webpages as well as sending notifications. They are reliable tools that work well without technical error and are free for everyone.

However, the condition of the water meter plays an important role in the output of the meter. More scratches minimize the accuracy of digit recognition. Apart from that, the proposed system is integrated in a robust way where it continuously captures images with system code to work hourly. With great accuracy in good condition meters, the system needs low maintenance with the physical hardware equipment (raspberry pi board), but the users should consider checking and maintaining the raspberry camera and network connection in order to make the system work properly. Lastly, it is budget friendly for any people who is interested to invest with in system. Also the system can be modified for other meters such as gas and electricity meters. It is easy to implement and build the system.

Acknowledgement

The author would like to express our gratitude to our advisors (Dr. Sirikan Chucherd, Dr. Tossapon Boongoen and Dr. Surapol Vorapatratron) without their supports this work would not have been possible. Their immense support along with our hard work made this project possible. We would like to acknowledge the Center

of Excellence in AI and Emerging Technology, School of Information Technology of Mae Fah Luang University for allowing us to conduct our experiments without any interference and giving all supports and guidance they can.

References

- Depari, A., De Dominicis, C.M., Flammini.A., Sisinni, E., Fasanotti, L. and Gritti, P. (2015). *Using smartglasses for utility-meter reading*. 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Zadar. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7133649>
- Fikejz, J. and Roleček, J. (2018, May 21-23). *Proposal of a smart water meter for detecting sudden water leakage*. 2018 ELEKTRO. Mikulov. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8398316>
- Gosavi, G., Gawde, G. and Gosavi, G. (2017). Smart water flow monitoring and forecasting system. *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8256792>
- Kashid, S.G., Pardeshi, S.A., Sirsat, S.D. and Bonge, V.H. (2015). Remote capturing of water meter reading using DSP processor. *Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP), Wagnaghat*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7414738>
- Lee, M. (2020). *Pytesseract 0.3.6. PYPI*. <https://pypi.org/project/pytesseract/>
- Somyat, N. and Nakariyakul, S. (2018). Thai Lottery Number Reader App for Blind Lottery Ticket Sellers. *10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST), Chiang Mai*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8426096>
- Triantor, T.R., Batubara, F. and Fahmi, F. (2014). Image based water gauge reading developed with ANN Kohonen. *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Kuta*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7045223>.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูลสำหรับพยากรณ์การเกิดโรค

The efficiency comparison of data mining techniques for patient incidence

อุกฤษฏ์ ศรีสุข^{1*}, จารี ทองคำ¹
Ukrit Srisuk^{1*}, Jaree Thongkam¹

Received: 8 November 2020 ; Revised: 15 February 2021 ; Accepted: 1 March 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูลในข้อมูลที่หลากหลาย ข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ข้อมูลผู้ป่วยโรคมะเร็งเต้านม ผู้ป่วยโรคเบาหวาน และผู้ป่วยโรคไฮโปไทรอยด์ โดยข้อมูลทั้งหมดถูกรวบรวมมาจากฐานข้อมูล UCI จำนวนทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิค Machine Learning มาใช้กับการทำเหมืองข้อมูล 5 เทคนิค ได้แก่ Decision Tree C4.5, Naïve Bayes, Neural Networks, Random Forest, Deep Learning มาทำการสร้างแบบจำลองเพื่อการพยากรณ์การเกิดโรค โรคมะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคไฮโปไทรอยด์ ในการวัดประสิทธิภาพ 10-fold cross validation ได้ถูกนำมาใช้ในการแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มฝึกสอน และ กลุ่มทดสอบ ค่าความถูกต้อง ค่าความไว และค่าจำเพาะ ได้ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์ของแต่ละแบบจำลอง จากการทดลองพบว่า เทคนิค Decision Tree C4.5 เป็นเทคนิคที่ดีที่สุดในการสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์โรคไฮโปไทรอยด์ โดยให้ค่าความถูกต้อง 99.86 % ค่าความไว 99.85 % และค่าจำเพาะ 100 %

คำสำคัญ: เหมืองข้อมูล มะเร็งเต้านม เบาหวาน ไฮโปไทรอยด์

Abstract

This research aims to study the performance of data mining techniques in medical datasets. The data in this research contains information of patients with breast cancer, diabetics and patients with hyperthyroidism. All datasets were collected from UCI database. Machine learning, in particular Decision Tree C4.5, Naïve Bayes, Neural Networks, Random Forest and Deep Learning techniques were used to create the models of disease Breast cancer, diabetes and hypothyroidism prediction models. In order to measure the performance of prediction models, 10-fold cross validation was utilized to divide the data into training and testing sets. Accuracy, sensitivity and specificity of the prediction models were used to compare the prediction performance of each model. The experimental results showed that the Decision Tree C4.5 technique was the best technique in modeling the prognosis of hypothyroidism. It provided 99.86 % accuracy, 99.85 % sensitivity and 100 % specificity.

Keywords: Data mining, Breast cancer, Diabetics, Hypothyroid

¹ กลุ่มสารสนเทศเชิงประยุกต์ ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Applied Informatics Group, Information Technology, Faculty of Informatics, Mahasarakham University

* Corresponding author: Ukrit Srisuk , E-mail: ozillmammoth39@gmail.com

บทนำ

มะเร็งเต้านม เป็นมะเร็งที่พบบมากที่สุดเป็นอันดับ 1 ของผู้หญิงไทย และเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตอันดับต้นๆ ในผู้หญิงแนวโน้มคนไทยป่วยเป็นโรคมะเร็งสูงขึ้นทุกปี แต่อัตราการเป็นโรคน้อยกว่าประเทศทางตะวันตก หญิงไทยมีอัตราการพบมะเร็งประมาณ 40 คน ในสตรีวัยเจริญพันธุ์ 100,000 คน ซึ่งถ้าเทียบกับประเทศตะวันตกพบมะเร็งเต้านมได้มากกว่า 100 คน ในสตรีวัยเจริญพันธุ์ 100,000 คน ในผู้ชายพบมะเร็งเต้านมได้เช่นกัน แต่ไม่บ่อยนัก โดยมีอุบัติการณ์ของโรคนี้น้อยกว่าผู้หญิงเกือบ 100 เท่า (ณัฐพร นันทิวัดนา, 2563) ส่วนโรคเบาหวาน เกิดจากเซลล์ร่างกายมีความผิดปกติในกระบวนการเปลี่ยนน้ำตาลในเลือดให้เป็นพลังงาน โดยกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับอินซูลินซึ่งเป็นฮอร์โมนที่สร้างจากตับอ่อนเพื่อใช้ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด เมื่อน้ำตาลไม่ได้ถูกใช้จึงทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นกว่าระดับปกติ (พิมพ์ใจ อันทานนท์, 2563) ยิ่งไปกว่านั้นโรคไฮโปไทรอยด์ หมายถึง ภาวะที่ต่อมไทรอยด์ มีการหลั่งฮอร์โมนไทรอยด์ออกมามากเกินไป กระตุ้นให้วัยวัยทั่วร่างกายมีการเผาผลาญสูงกว่าปกติ เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการเจ็บป่วยๆ ต่างขึ้นตามมา เช่น เหนื่อยง่าย ใจสั่น ชีวรัวง่าย เหงื่อออกมาก หงุดหงิด นอนไม่หลับ น้ำหนักตัวลดลงอย่างรวดเร็วแบบผิดปกติ เป็นต้น สาเหตุของไทรอยด์เป็นพิษเกิดจากการที่ต่อมไทรอยด์ทำงานมากเกินไปจนทำให้ร่างกายมีปริมาณของฮอร์โมนไทรอยด์มากเกินไปจนความต้องการของร่างกายและมีสภาวะเป็นพิษจนส่งผลต่อร่างกายในด้านต่างๆ (เมตไทย, 2563)

การทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) (Schuh *et al.*, 2020) คือ กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อค้นหารูปแบบและความสัมพันธ์ที่ซ่อนอยู่ในชุดข้อมูลนั้นๆ ในปัจจุบันการทำเหมืองข้อมูลได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท เช่น การพยากรณ์พันธุ์ต้นไม้ การพยากรณ์ผู้ใช้บัตรเครดิต รวมถึงการพยากรณ์ผู้ป่วยเพื่อพยากรณ์การเกิดโรคของโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคอื่นๆ เป็นต้น มีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการพยากรณ์โรคมะเร็งเต้านม เช่น Fan, Zhu และ Yin (Qi *et al.*, 2010) ได้ศึกษาการทำนายการกลับเป็นซ้ำของมะเร็งเต้านม ด้วยเทคนิค Decision Tree C4.5, CHAID, QUEST, CART, ANN พบว่า เทคนิค Decision Tree C4.5 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ 71.17% ส่วน Balpande และ Wajgi (Balpande & Wajgi, 2017) ได้ศึกษาการคาดคะเนและการประมาณความรุนแรงของโรคเบาหวาน โดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล ด้วยเทคนิค CHAID, Naïve Bayes, K-Nearest, Decision Tree ปัจจัยที่มีผลต่อการคาดคะเน คือ อายุ, เพศ และ ดัชนีมวลกาย พบว่า เทคนิค Decision Tree มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ที่ 72% จะเห็นได้ว่าแต่ละเทคนิคมีประสิทธิภาพที่ไม่แน่นอน ในข้อมูลที่แตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิค Decision Tree C4.5, Naïve Bayes, Neural Networks, Random Forest และ Deep Learning ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์การเกิดโรค มะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคไฮโปไทรอยด์ โดยวัดประสิทธิภาพด้วยเทคนิค 10-fold cross validation และแสดงค่าความถูกต้อง ค่าความไว และ ค่าจำเพาะ

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการในการทำเหมืองข้อมูลซึ่งมี 4 ขั้นตอนมาใช้ คือ การเตรียมข้อมูล การคัดเลือกตัวแปร การสร้างแบบจำลอง และการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

1. การเตรียมข้อมูล

การเตรียมข้อมูลในงานวิจัยนี้ ข้อมูลประกอบด้วยชุดข้อมูลที่มีชนิดตัวแปรที่แตกต่างกันจำนวน 3 ชุดข้อมูลคือ ชุดที่ 1 คือโรคมะเร็งเต้านม มีชนิดตัวแปรเป็น Nominal ทั้งหมด จำนวน 10 ตัวแปร ชุดที่ 2 คือโรคเบาหวาน มีชนิดตัวแปรเป็น Numeric ทั้งหมด จำนวน 9 ตัวแปร และชุดที่ 3 โรคไฮโปไทรอยด์ มีชนิดตัวแปรเป็น Nominal และ Numeric จำนวน 30 ตัวแปร จากฐานข้อมูล UCI

ชุดที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยโรคมะเร็งเต้านม

1. อายุ (age) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
2. สตรีวัยหมดประจำเดือน (menopause) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
3. ขนาดของเนื้องอก (tumor-size) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
4. ช่วงของมะเร็ง (inv-nodes) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
5. การกระจายตัวของมะเร็ง (node-caps) มีชนิดข้อมูล Nominal
6. ระดับความร้ายแรง (deg-malig) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
7. ตำแหน่งของมะเร็ง (breast) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
8. ตำแหน่งของมะเร็ง (breast-quad) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
9. การฉายรังสี (Irradiat) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal
10. เหตุการณ์ (class) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

ชุดที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยโรคเบาหวาน

1. จำนวนครั้งที่ตั้งครรภ์ (preg) มีชนิดข้อมูลเป็น

Numeric Min=0, Max=17, Mean=3.845, SD.=3.37

2. ระดับน้ำตาลในเลือด (plas) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0, Max=199, Mean=120.895, SD.=31.973

3. ความดันโลหิต (pres) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0, Max=122, Mean=69.105, SD.=19.356

4. ความหนาของไขมันใต้ผิวหนังกล้ามเนื้อส่วนหลัง (skin) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0, Max=99, Mean=20.536, SD.=15.952

5. ปริมาณอินซูลินที่ได้รับภายใน 2 ชั่วโมง (insu) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0, Max=846, Mean=79.799, SD.=115.244

6. ดัชนีมวลกาย (mass) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0, Max=67.1, Mean=31.993, SD.=7.884

7. การติดต่อกายสาวยืด (pedi) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0.078, Max=2.42, Mean=0.472, SD.=0.331

8. อายุ (age) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=21, Max=81, Mean=33.241, SD.=11.76

9. ตัวแปรคลาส (class) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal **ชุดที่ 3** ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยโรคไฮโปไทรอยด์

1. อายุ (age) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=1, Max=455, Mean=51.783, SD.=20.124

2. เพศ (sex) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

3. ฮอร์โมนที่หลั่งออกมาจากต่อมไทรอยด์ (on thyroxine) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

4. คำถามของฮอร์โมนที่หลั่งออกมาจากต่อมไทรอยด์ (query on thyroxine) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

5. การใช้ยาด้านไทรอยด์ (on antithyroid medicate) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

6. อาการไข้ (sick) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

7. การตั้งครรภ์ (pregnant) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

8. การตัดต่อมไทรอยด์บางส่วน (thyroid surgery) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

9. การรักษาด้วยแร่ไอโอดีน 131 (I131 treatment) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

10. โรคไทรอยด์ชนิดอ้วน (query hypothyroid) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

11. ภาวะที่ต่อมไทรอยด์สร้างและปล่อยฮอร์โมนออกมามากเกินไป (query hyperthyroid) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

12. การใช้ยาทางจิตเวชที่ใช้รักษาอาการคลุ้มคลั่ง (lithium) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

13. ภาวะที่มีการโตขึ้นของต่อมไทรอยด์ (goitre) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

14. เนื้องอก (tumor) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

15. ภาวะที่ร่างกายขาดฮอร์โมนที่สร้างจากต่อมใต้สมอง (hypopituitary) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

16. อัจฉริยะ (psych) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

17. ค่าของฮอร์โมนกระตุ้นต่อมไทรอยด์ (TSH measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

18. ฮอร์โมนกระตุ้นต่อมไทรอยด์ (TSH) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0.005, Max=145, Mean=2.596, SD.=6.27

19. ค่าของไทรอยด์ฮอร์โมนที่ได้จากสองแหล่ง (T3 measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

20. ไทรอยด์ฮอร์โมนที่ได้จากสองแหล่ง (T3) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0.05, Max=10.6, Mean=2.045, SD.=0.812

21. ค่าของฮอร์โมนทั้งหมดที่จับกับโปรตีน (TT4 measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

22. ฮอร์โมนทั้งหมดที่จับกับโปรตีน (TT4) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=19, Max=430, Mean=110.344, SD.=33.692

23. ค่าของการใช้ไทรอกซิน (T4U measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

24. การใช้ไทรอกซิน (T4U) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=0.25, Max=2.32, Mean=0.994, SD.=0.196

25. ค่าของฮอร์โมนไทรอกซินชนิดอิสระ (FTI measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

26. ฮอร์โมนไทรอกซินชนิดอิสระ (FTI) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric Min=17, Max=395, Mean=112.522, SD.=30.871

27. ค่าของโปรตีนที่สร้างจากตับ (TBG measured) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

28. โปรตีนที่สร้างจากตับ (TBG) มีชนิดข้อมูลเป็น Numeric

29. แหล่งอ้างอิง (referral source) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

30. ตัวแปรคลาส (Class) มีชนิดข้อมูลเป็น Nominal

2. การคัดเลือกตัวแปร

การคัดเลือกตัวแปรเป็นวิธีการในเลือกตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม และยิ่งช่วยในการลดจำนวนตัวต้นที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวแปรตามออกจากชุดข้อมูลที่จะนำไปสร้างแบบจำลองได้ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Chi-Square

Chi-Square เป็นการประเมินค่าของคุณลักษณะโดยการใช้การคำนวณค่า Chi-Square ทางสถิติเพื่อศึกษาว่าการแจกแจงความถี่ของตัวแปรคุณลักษณะเป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้หรือไม่ ดังสมการ

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

โดยที่

$O_1, O_2 \dots O_n$ เป็นความถี่ของตัวแปรที่ได้จากการศึกษา

$E_1, E_2 \dots E_n$ เป็นความถี่ที่คาดหวัง (หรือความถี่ที่ควรจะเป็น)

3. การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเป็นขั้นตอนที่นำเอาเทคนิคใน Machine Learning มาใช้มาทำการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการพยากรณ์ ด้วยโปรแกรม Weka โดยใช้เทคนิคดังต่อไปนี้

เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 (Decision Tree C4.5) (ชณิตาภา บุญประสม, 2563) เป็นอัลกอริทึม ที่พัฒนามาจากอัลกอริทึม ID3 เป็นอัลกอริทึมในการจำแนกประเภทข้อมูล ใช้หลักการสร้างต้นไม้โดยคัดเลือกคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดมาเป็นโหนดราก (Root Node) โดยใช้ค่า Gain Ratio ที่สูงที่สุดเป็นโหนดราก และโหนดถัดไป และต้องหาค่า Entropy, Information Gain และ Split Information

เทคนิคการพยากรณ์ข้อมูลแบบจำลองเบย์ (Naïve Bayes) (Kaur *et al.*, d.) เป็นการพยากรณ์ประเภทโดยใช้กฎของเบย์หรือเป็นการพยากรณ์ประเภทโดยใช้หลักสถิติในการพยากรณ์ความน่าจะเป็น

เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) (ทิพย์หทัย ทองธรรมชาติ, 2560) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียมคือ ความพยายามที่จะลอกเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์เพื่อทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (multilayer) มีลักษณะเช่นเดียวกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว แต่จะมีชั้นแอบแฝง (hidden) เพิ่มขึ้น โดยอยู่ส่วนกลางระหว่างชั้นนำข้อมูลป้อนเข้าและชั้นส่งข้อมูลออกทั้งนี้ชั้นแอบแฝงอาจมีมากกว่า 1 ชั้น

เทคนิคต้นไม้ป่าสุ่ม (Random Forest) (Rastgou *et al.*, 2020) เป็น Model ประเภทหนึ่งของ Machine Learning ถูกพัฒนาขึ้นจาก Decision Tree ต่างกันที่ Random Forest เป็นการเพิ่มจำนวน Tree เป็น Tree หลายๆ ต้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น แม่นยำมากขึ้น ซึ่งโมเดล Random Forest เป็นโมเดลที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการใช้ Machine Learning

เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) (Dogan & Birant, 2021) เป็นส่วนหนึ่งของ Machine Learning บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมและการเรียนเชิงคุณลักษณะ การเรียนรู้สามารถเป็นได้ทั้งแบบการเรียนรู้แบบมีผู้สอน การเรียนรู้แบบกึ่งมีผู้สอน และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน โดยงานวิจัยนี้เป็น การเรียนรู้ Machine Learning แบบมีผู้สอน (Supervised learning)

4. การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเสร็จแล้วนำแบบจำลองมาทดสอบประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการของ 10-fold cross validation โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 กลุ่มเท่าๆ กันและทำการเปรียบเทียบค่าด้วยการพยากรณ์กลุ่มข้อมูล คือ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความไว (Sensitivity) และค่าจำเพาะ (Specificity) ดังสมการ

1.ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถพยากรณ์ข้อมูลผู้ป่วยที่เกิดโรค และไม่เกิดโรคได้อย่างถูกต้องต่อข้อมูลทั้งหมด ดังสมการที่ 1

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

2.ค่าความไว (Sensitivity) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถพยากรณ์ข้อมูลผู้ป่วยที่เกิดโรค ได้อย่างถูกต้องต่อผู้ป่วยที่เกิดโรคจริง ดังสมการที่ 2

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

3.ค่าจำเพาะ (Specificity) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถพยากรณ์ข้อมูลผู้ป่วยที่ไม่เกิดโรค ได้อย่างถูกต้องต่อผู้ป่วยที่พยากรณ์ว่าเกิดโรค ดังสมการที่ 3

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

เมื่อ TP คือ จำนวนข้อมูลที่แบบจำลองพยากรณ์การเกิดโรคได้อย่างถูกต้อง

TN คือ จำนวนข้อมูลที่แบบจำลองพยากรณ์การไม่เกิดโรคได้อย่างถูกต้อง

FP คือ จำนวนข้อมูลที่ไมเกิดโรคแต่แบบจำลองพยากรณ์ว่าเกิดโรค

FN คือ จำนวนข้อมูลที่เกิดโรคแต่แบบจำลองพยากรณ์ว่าไม่เกิดโรค

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิค

Machine Learning ของการทำเหมืองข้อมูล ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์การเกิดโรค มะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคไฮเปอร์ไทรอยด์ ด้วยเทคนิค Decision Tree C4.5, Naïve Bayes, Neural Networks, Random Forest, และ Deep Learning ผ่านการใช้งานโปรแกรม WEKA เวอร์ชัน 3.9.3 ในการทำการทดลอง ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บรวบรวมจากฐานข้อมูล UCI จำนวน 3 ชุดข้อมูล ชุดที่ 1 คือโรคมะเร็งเต้านม มีชนิดตัวแปรเป็น Nominal ทั้งหมด ชุดที่ 2 คือโรคเบาหวาน มีชนิดตัวแปรเป็น Numeric และ Nominal ชุดที่ 3 โรคไฮโปไทรอยด์ มีชนิดตัวแปรเป็น Numeric และ Nominal โดยใช้การทดสอบโมเดลด้วยวิธีการ 10-Fold Cross Validation ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็นชุดข้อมูลเรียนรู้ และชุดข้อมูลทดสอบ และวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่าความถูกต้อง ค่าความไว และค่าจำเพาะ ดังแสดงใน Figure 1-3

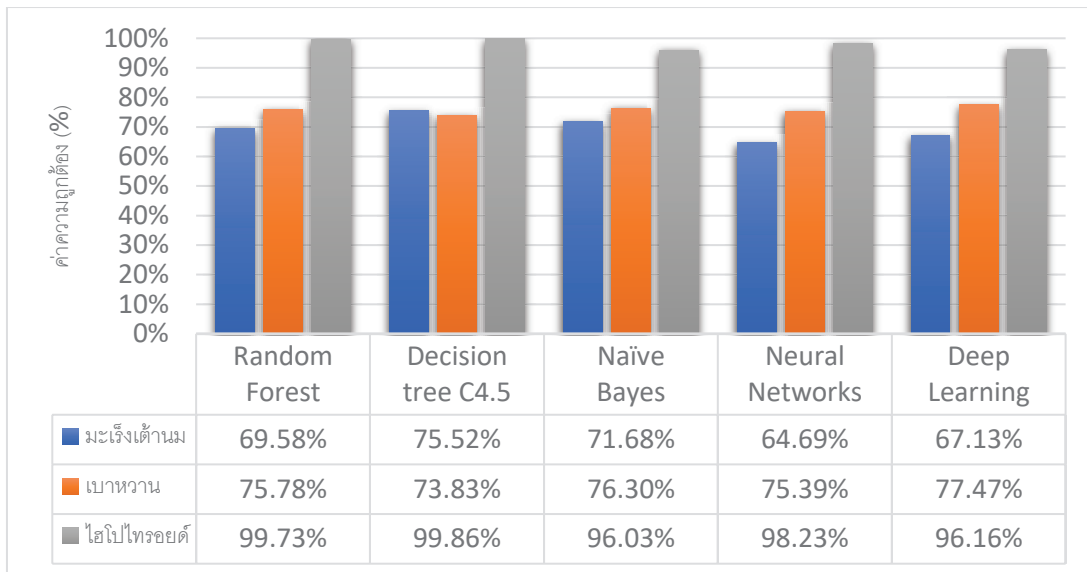


Figure 1 Accuracy comparison

Figure 1 การเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง (Accuracy) โดยใช้เทคนิค Decision Tree C4.5, เทคนิค Random Forest เทคนิค Naïve Bayes เทคนิค Artificial Neural Networks และเทคนิค Deep Learning ในการพยากรณ์การเกิดโรค ผลปรากฏว่า ในข้อมูลโรคมะเร็งเต้านม ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 75.52% และน้อยที่สุดใน เทคนิค Artificial Neural Networks ให้ค่าความถูกต้องที่ 64.69% ในข้อมูลโรคเบาหวาน

ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Numeric เทคนิค Deep Learning สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 77.47% และน้อยที่สุดในเทคนิค Decision Tree C4.5 ให้ค่าความถูกต้องที่ 73.83% และโรคไฮโปไทรอยด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal และ Numeric เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 99.86% และน้อยที่สุดในเทคนิค Naïve Bayes ให้ค่าความถูกต้อง ที่ 96.03%

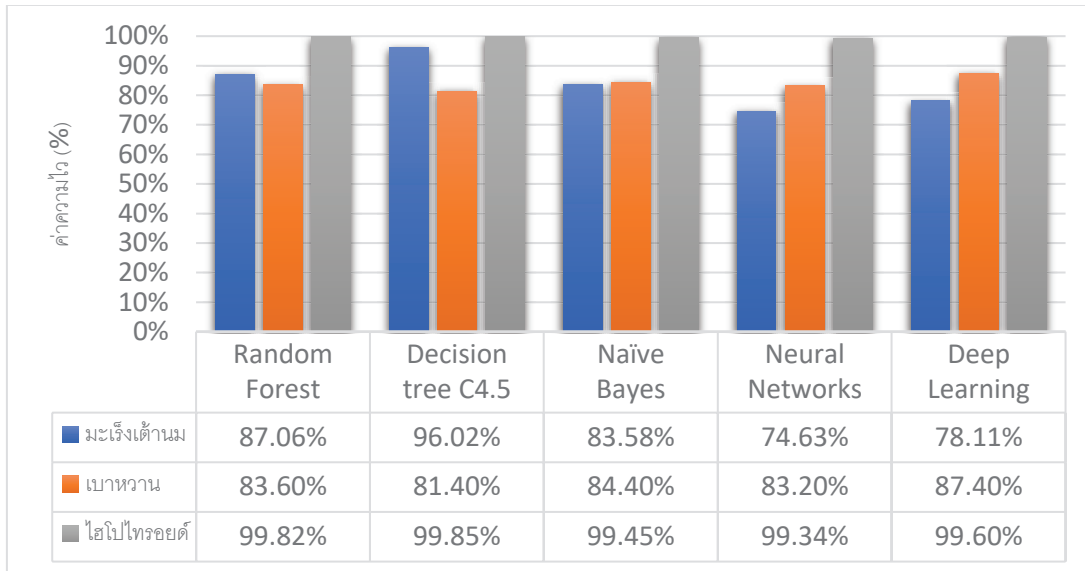


Figure 2 Sensitivity comparison

Figure 2 การเปรียบเทียบค่าความไว (Sensitivity) โดยใช้เทคนิค Decision Tree C4.5, เทคนิค Random Forest, เทคนิค Naïve Bayes, เทคนิค Artificial Neural Networks และเทคนิค Deep Learning ในการพยากรณ์การเกิดโรค ผลปรากฏว่า ในข้อมูลโรคมะเร็งเต้านมซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความไวในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 96.02% และน้อยที่สุดในเทคนิค Artificial Neural Networks ให้ค่าความไวที่ 74.63% ในข้อมูลโรคเบาหวานซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปร

เป็นแบบ Numeric เทคนิค Deep Learning สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความไวในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 87.40% และน้อยที่สุดในเทคนิค Decision Tree C4.5 ให้ค่าความไวที่ 81.40% และ โรคไฮโปไทรอยด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal และ Numeric เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความไวในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 99.85% และน้อยที่สุดในเทคนิค Artificial Neural Networks ให้ค่าความไวที่ 99.34%

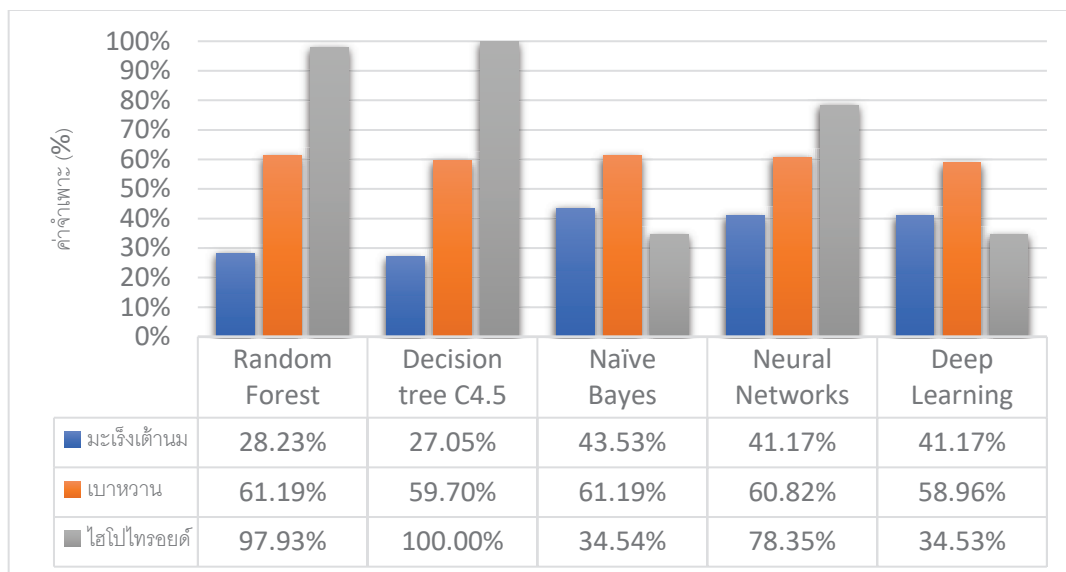


Figure 3 Specific value comparison

Figure 3 การเปรียบเทียบค่าจำเพาะ (Specificity) โดยใช้เทคนิค Decision Tree C4.5, เทคนิค Random Forest, เทคนิค Naïve Bayes, เทคนิค Artificial Neural Networks และเทคนิค Deep Learning ในการพยากรณ์การเกิดโรค ผลปรากฏว่า ในข้อมูลโรคมะเร็งเต้านมซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal เทคนิค Naïve Bayes ให้ค่าจำเพาะในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 43.53% และน้อยที่สุดในเทคนิค Decision Tree C4.5 ให้ค่าจำเพาะ ที่ 27.05% ในข้อมูลโรคเบาหวานซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Numeric เทคนิค Random Forest กับ เทคนิค Naïve Bayes ให้ค่าจำเพาะในการพยากรณ์สูงที่สุดเท่ากันที่ 61.19% และน้อยที่สุดในเทคนิค Deep Learning ให้ค่าจำเพาะที่ 58.96% และ โรคไฮโปไทรอยด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal และ Numeric เทคนิค Decision Tree C4.5 ให้ค่าจำเพาะในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 100% และน้อยที่สุดในเทคนิค Deep Learning ให้ค่าจำเพาะที่ 34.53%

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเทคนิคเหมืองข้อมูลในข้อมูลที่หลากหลาย โดยการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์การเกิดโรคมะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคไฮโปไทรอยด์ จากฐานข้อมูล UCI จำนวนทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล ด้วยเทคนิค Random Forest เทคนิค Decision Tree C4.5 เทคนิค Naïve Bayes เทคนิค Artificial Neural Networks และเทคนิค Deep Learning จากการทดลองพบว่า ในข้อมูลโรคมะเร็งเต้านมซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 75.52% ในข้อมูลโรคเบาหวานซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Numeric เทคนิค Deep Learning สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 77.47% และ โรคไฮโปไทรอยด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีตัวแปรเป็นแบบ Nominal และ Numeric เทคนิค Decision Tree C4.5 สามารถสร้างแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงที่สุดถึง 99.86% จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าเทคนิค Decision Tree C4.5 มีความเหมาะสมในการนำสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์การเกิดโรคมะเร็งเต้านม โรคเบาหวาน และโรคไฮโปไทรอยด์ เพราะ สามารถจัดการกับข้อมูลที่มีหลายมิติหรือข้อมูลที่มีหลายตัวแปรได้ และ ผลการพยากรณ์ข้อมูลมีความถูกต้องค่อนข้างสูง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเว็บไซต์ UCI ที่ให้ข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชนิดาภา บุญประสม. (2563). การวิเคราะห์การทำนายการลาออกกลางคันของนักศึกษาระดับปริญญาตรีโดยใช้เทคนิควิธีการทำเหมืองข้อมูล. <http://research.fte.kmutnb.ac.th/download.php?filename=620701000056&filepath=20190701155744.pdf>.
- ณัฐพร นันทิวัฒนา. (2563). มะเร็งเต้านม. <https://www.sikarin.com/content/detail/461/โรคมะเร็งเต้านม-มะเร็งอันดับ-1-ของผู้หญิง>.
- ทิพย์หทัย ทองธรรมชาติ. (2560). การคัดเลือกคุณลักษณะเพื่อสร้างโมเดลสำหรับการพยากรณ์ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล. <https://research.kpru.ac.th/sac/fileconference/10912018-05-01.pdf>.
- พิมพ์ใจ อันทานนท์. (2563). โรคเบาหวาน. <https://www.dmtai.org/index.php/knowledge/for-normal-person/health-information-and-articles/health-information-and-articles-old-3/846-2019-04-20-01-49-18>.
- เมตไทย. (2563). ไทรอยด์เป็นพิษ. <https://medthai.com/ไทรอยด์เป็นพิษ>.
- Balpande, V.R. and Wajgi, R.D. (2017). Prediction and severity estimation of diabetes using data mining technique. *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 576-580.
- Dogan, A. and Birant, D. (2021). Machine learning and data mining in manufacturing. *Expert Systems with Applications*, 166, 114060.
- Kaur, A.G. M. (n.d.). *A Framework for the Indirect Assessment Tool for Outcome Based Education Using Data Mining*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8782336>.
- Qi, F., Chang-jie, Z. and Liu, Y. (2010). Predicting breast cancer recurrence using data mining techniques. *International Conference on Bioinformatics and Biomedical Technology*, 310-311.
- Rastgou, M., Bayat, H., Mansoorizadeh, M. and Gregory, A.S. (2020). Estimating the soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105502.
- Schuh, G., Prote, J.-P. and Hünnekes, P. (2020). Data mining methods for macro level process planning. *Procedia CIRP*/03/15/ 2021.

การศึกษาพฤติกรรมล้าจากการอบอ่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีแก๊สปกคลุม

Study of fatigue behavior of AISI 1050 steel annealing with metal active gas process

นิพนธ์ มณีโชติ^{1*}, ชัยยุทธ มีงาม²

Nipon Maneechot^{1*}, Chaiyoot Meengam²

Received: 10 November 2020 ; Revised: 8 February 2021 ; Accepted: 1 March 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบอ่อนที่ส่งผลต่อความล้าของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 จากชิ้นส่วนเพลลาที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีแก๊สปกคลุม ตัวแปรคงที่ในการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สปกคลุมที่ตัวแปรคือ กระแสไฟฟ้าเชื่อม 130 แอมแปร์ ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ความเร็วเดินเชื่อม 250 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นงานเชื่อมให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากการเชื่อมจะอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งถูกกำหนดเป็นตัวแปรตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอบอ่อนชิ้นงานหลังการเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภาคบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณอิทธิพลทางความร้อน อุณหภูมิอบอ่อนชิ้นงานที่สูงส่งผลให้ขนาดของเกรนโตขึ้น พบว่าอุณหภูมิอบอ่อน 900 องศาเซลเซียส บริเวณรอยเชื่อมมีขนาดความโตของเกรนเฉลี่ย 22.43 ไมโครเมตร และบริเวณอิทธิพลจากความร้อนขนาดของเกรนโตขึ้น มีขนาดเกรนเฉลี่ย 254.41 ไมโครเมตร นอกจากนี้เฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ผสมด้วยกัน ส่งผลให้ได้สมบัติทางด้านความเหนียวและแข็งแรงที่ดี สำหรับการทดสอบความล้าพบว่าความเค้นทดสอบที่ 100 MPa ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่ 900 องศาเซลเซียส สามารถรับความล้าก่อนชิ้นงานเกิดการเสียหายที่ 235,780 รอบ อายุการล้าเพิ่มขึ้น 53.40 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมแก๊สปกคลุม เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ความล้า การอบอ่อน

Abstract

The purpose of this research was to study the influence of annealing temperature on the fatigue of AISI 1050 carbon steel from the shaft with gas metal arc welding. The constant parameters in the experiments were the electric current at 130 amperes, ER70S-6 type of electrodes, welding speed of 250 mm/min, and the samples were pre-heated in a furnace at 300 °C for a holding time 30 min. After welding, the samples were annealed at 700, 800, and 900 °C respectively, which are defined as dependent parameters. The results showed that the annealed temperature affected changes of microstructures weld zone and heat affect zone. A high annealing temperature resulted in the size of the grain to increase and the annealing temperature at 900 °C resulted in an average grain size at 22.43 μm in the weld zone and the grain size of heat affect zone increased around 254.41 μm. Additionally, it was found that the ferrite and pearlite phases were mixed together, resulting in good toughness and strength properties. For the fatigue test, it was found that the stress at 100 MPa and annealing temperature at 900 °C can be reached up to 235,780 fatigue cycles before pre-damaged. The fatigue life increased 53.40 percent.

Keywords: Gas Metal Arc Welding; GMAW, Carbon Steel AISI 1050, Fatigue, Annealing.

¹ อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

¹ Lecture, Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

² Assist. Prof., Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

* Corresponding author ; Nipon.ma17@gmail.com

บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 นิยมใช้เป็นชิ้นส่วนส่งกำลังในเครื่องจักร อาทิ เช่น เพลลา (Sari & Yilmaz, 2006) เกียร์ เป็นต้น ชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนหมุนได้รับภาวะวัฏจักรตลอดเวลาใช้งานและมีบริเวณเข้มข้นความเค้น หรือบริเวณความเค้นสะสม จึงมักชำรุดจากการล้า (Sitthipong, *et al.*, 2016 ; Sitthipong, *et al.*, 2017a ; Sitthipong, *et al.*, 2017b) มีอายุการใช้งานจำกัด เพื่อนำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเพลลาเกรด AISI 1050 ทั้งนี้ วิธีการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนเพลลาที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ต้องคำนึงถึงความร้อนป้อนเข้าชิ้นงานที่ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบซีเมนไตท์ (Cementite Phase) ทำให้เกิดความแข็งสูง นำไปสู่ชิ้นงานเปราะ (Brittle) หลังการเชื่อม เป็นสาเหตุให้ความสามารถในการรับแรงบิดลดลง (Cryderman *et al.*, 2011) เพราะชิ้นส่วนรับแรงบิดต้องมีคุณลักษณะแข็งเหนียว ดังนั้นการเลือกวิธีการเชื่อมซ่อมจึงสำคัญ อย่างไรก็ตามหลังจากการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนเพลลาจะเกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) บริเวณรอยเชื่อม (Shiozaki *et al.*, 2015 ; Kumar & Singh, 2014) ส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงล้าต่ำลง การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความเค้นตกค้างและเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นงานหลังการเชื่อมซ่อมจึงมีความน่าสนใจ ซึ่งอาจนำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของเพลลา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการการอบอ่อนเพลลาที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 หลังผ่านการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) และประเมินอายุการล้า นอกจากนี้จะประเมินโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (Microstructure) และบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อน (Heat Affected Zone) ผลที่ได้จะประเมินผลและนำเสนอต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการยืดอายุการล้าและโครงสร้างจุลภาคของเพลลาเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ด้วยกรรมวิธีการอบอ่อนหลังการเชื่อมแก๊สปกคลุม

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุ

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ใช้ในการทดลองเชื่อม เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS-S50C และมาตรฐานเยอรมัน DIN 1.1206 (CK50/C50E) มีความต้านทานแรงดึงที่ 636 MPa และมีความแข็งแบบวิกเกอร์ที่ 280 HV โดยส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Chemical compositions of AISI 1050 Steel (Peasura & Sumarn, 2010) (mass fraction %)

Materials	Element (Wt%)		
	C	Mn	Si
AISI 1050	0.47-0.55	0.60-0.90	0.40
	S	P	
	0.035	0.03	

วิธีการทดลอง

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ถูกเตรียมเป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม รอยต่อของชิ้นงานต่อชนแบบตัววีเดี่ยวแบบหน้าราก (Single V-Butt with Root Face Joint) ภากร่องมุมรวม 60 องศา ที่ความลึก 7 มิลลิเมตร (Face Surface) สำหรับด้านล่างของชิ้นงาน (Root Surface) มีความหนา 3 มิลลิเมตร ตามลำดับขนาดตัวอย่างชิ้นงานทดลอง 75x250x10 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxหนา) การเตรียมชิ้นงานเชื่อมเตรียมตามมาตรฐานงานเชื่อม AWS D1.1/D1.1 M: 2010 (American Welding Society, 2010) ดังแสดงใน Figure 1

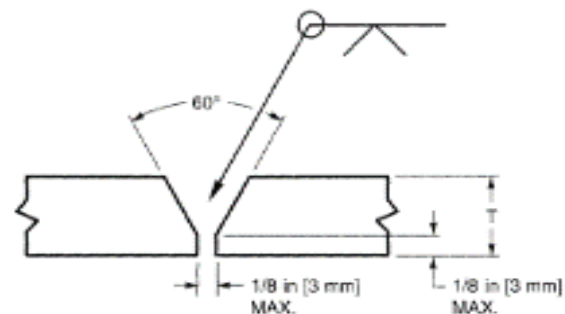


Figure 1 shows the American Welding Standard of AWS D1.1/D1.1M: 2010

การเชื่อมจะเชื่อมซ้อนแนวเชื่อม จำนวนแนวเชื่อมของทดลองแต่ละการทดลองจะมีจำนวน 8 แนว ในลักษณะซ้อนทับกันจนเต็มรอยเชื่อม ดังแสดงใน Figure 2

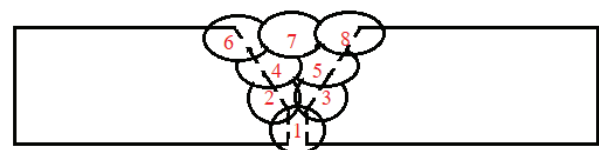


Figure 2 shows the layer of Welding

การทดลองนี้จะใช้เครื่องเชื่อมมิก-แมก ยี่ห้อ Fronius รุ่น TransPulsSynergi 2700 Alu-Edition สำหรับการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม การเชื่อมจะออกแบบชุดเชื่อมด้วยการ

ประยุกต์หัวเชื่อมให้เดินเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยหัวเชื่อมจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ออกแบบไว้ ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ก่อนการเชื่อมจะนำชิ้นงานทดลองให้ความร้อนก่อนการเชื่อม (Preheat) ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทดลองเชื่อมตามตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการศึกษาเบื้องต้นและกำหนดเป็นตัวแปรคงที่ในการทดลอง ดังแสดงใน Table 2 หลังจากนั้นชิ้นงานหลังการเชื่อมถูกนำไปให้ความร้อนเพื่ออบอ่อนชิ้นงานตามตัวแปรตาม โดยอุณหภูมิในกระบวนการอบอ่อนชิ้นงานเชื่อมแตกต่างกัน ได้แก่ 700, 800, 900 องศาเซลเซียส และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนตามลำดับ เวลาในการอบอ่อน 60 นาที ชิ้นงานหลังอบอ่อนปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกระบวนการทางความร้อน การอบอ่อนจะช่วยลดความเค้นตกค้างหลังจากการเชื่อมและเพิ่มสมบัติทางด้านความเหนียว สำหรับการทดลองนี้จะใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 3 ชิ้น ทำการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ใช้ตัวอย่างในการทดลอง 60 ชิ้นงาน โดยขั้นตอนการเชื่อม ดังแสดงใน Figure 3

Table 2 Parameters and electrodes in the experiment

Parameter	Unit	GMAW
Electrode Types	-	ER70S-6
Welding Angle	°	75
Preheat temperature	°C	300
Shielding gas	-	80%Ar+20%CO ₂
Mixer gas flow rate	l/min.	12
Filler diameter	mm	1.2
Current	A	130
Voltage	V	23.5
Welding speed	mm/min.	250

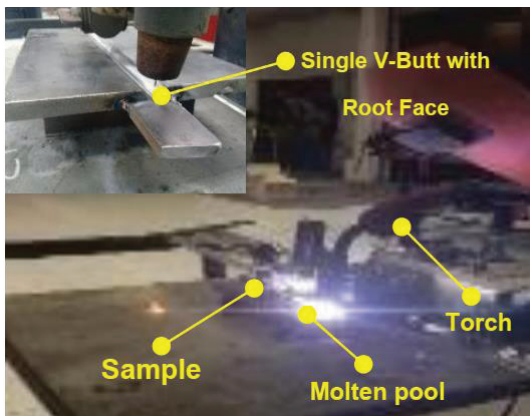


Figure 3 shows steps of AISI 1050 with the metal active gas welding process

การทดสอบความล้า

ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแล้วผ่านการอบอ่อนถูกนำมาเตรียมชิ้นงานทดสอบความล้าด้วยเครื่องกลึงแบบอัตโนมัติ (CNC) สำหรับการทดสอบความล้าจะเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E606 (American Society for Testing and Materials, 2012) (Figure 4) เพื่อวิเคราะห์จำนวนรอบต่อการเสียหายของชิ้นงานทดสอบ สำหรับความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ 100, 200, 300, 400 และ 500 MPa ตามลำดับ โดยความเค้นทดสอบถูกกำหนดมาจากกระดิ่งที่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเดิม โดยเป็นการจำลองการรับความเค้นของชิ้นส่วนเพลาระดับที่แตกต่างกัน ดังแสดงขั้นตอนการทดสอบความล้าใน Figure 5

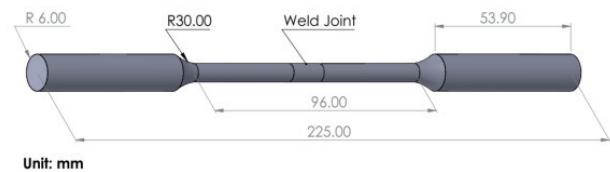


Figure 4 The specimen of fatigue follows ASTM E606 standard

การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา

ชิ้นงานบางส่วนถูกเตรียมเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา โดยตัดแบ่งชิ้นงานตามแนวขวางกับรอยเชื่อม การตัดแบ่งชิ้นงานใช้เลื่อยสายพาน และใช้น้ำหล่อเย็นระบายความร้อน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะตัดแบ่งชิ้นงาน จากนั้นขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายหยาบ เบอร์ 220, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วนำชิ้นงานไปขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงขัดอะลูมินา (Alumina Oxide) ขนาด 0.05 ไมโครเมตร เป็นสารขัดผิวงานและชิ้นงานที่ได้หลังการขัดผิวนำไปกัดด้วยกรดผสม (Etching) ระหว่างกรดไนตริก ร้อยละ 2.5 ผสมกับแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ เวลาในการกัดกรด 5 วินาทีสุดท้ายทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ แล้วใช้ลมร้อนเป่าให้ผิวหน้าชิ้นงานแห้ง ชิ้นงานที่เตรียมสำหรับตรวจสอบโครงสร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ต่อไป

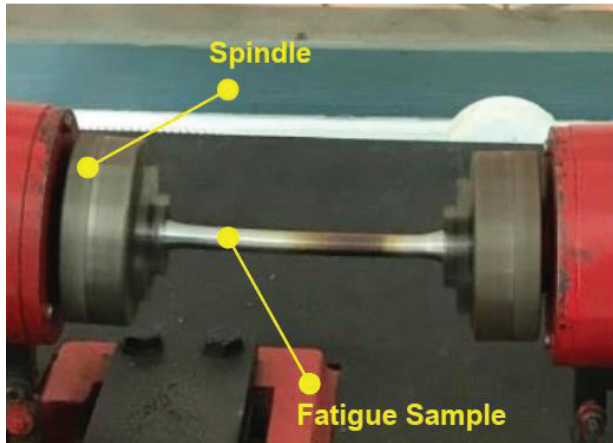


Figure 5 shows the step for fatigue test of AISI 1050 Steel

ผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการยืดอายุการล้าและโครงสร้างจุลภาคของเพลาลูกกลิ้งคาร์บอนเกรด AISI 1050 ด้วยกรรมวิธีการอบอ่อนหลังการเชื่อมแก๊สพลาสมา สามารถแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบความล้า

อายุการล้าที่ได้จากการทดสอบที่ความเค้นและอุณหภูมิอบอ่อนแตกต่างกันแสดงใน Table 3 ผลที่ได้ชี้ชัดว่าอุณหภูมิอบอ่อนกับอายุการล้าของเพลาลูกกลิ้งคาร์บอนเกรด AISI 1050 แปรผันตามกัน โดยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบอ่อนหลังการเชื่อมด้วยแก๊สพลาสมาที่อุณหภูมิอบอ่อนที่สูงมีแนวโน้มที่ดีต่อพฤติกรรมล้า สังเกตได้จากการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ความเค้นทดสอบที่ 100 MPa แสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย มีค่า 235,780 รอบ ในทางตรงกันข้าม การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความเค้นทดสอบเดียวกัน พบว่าจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายมีค่า 112,966 รอบ เนื่องจากการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง สามารถลดความเค้นตกค้างหลังการเชื่อม (Fan et al., 2015)นอกจากนั้นเมื่อประเมินจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายต่อความเค้นทดสอบในการทดลองอื่นๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเพลาลูกกลิ้งที่ทดสอบด้วยความเค้นทดสอบสูงส่งผลให้เกิดวิบัติของชิ้นงานอย่างรวดเร็ว สังเกตได้ว่าความเค้นทดสอบก็เป็นอีกสาเหตุของการวิบัติของชิ้นงาน (Das et al., 2017) ดังแสดงใน Figure 6

Table 3 The values of stress and life cycle that cause damage

Stress (MPa)	Number of cycles that have been damage (rounds)			
	Not annealed	700 °C	800 °C	900 °C
100	109,853	112,966	177,802	235,780
200	44,881	46,398	55,329	76,126
300	5,333	6,640	7,687	10,755
400	2,728	3,354	4,561	6,564
500	1,110	1,350	1,412	2,190

Original metal over 500,000

หมายเหตุ: เนื้อโลหะเดิมทดสอบความเค้นที่ 500 MPa

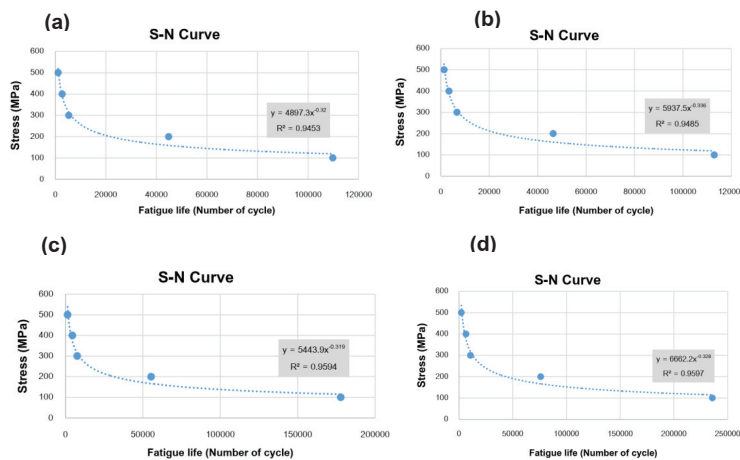


Figure 6 shows the relationship graphs of stress with fatigue life of AISI 1050 steel: (a) not annealing, (b) 700 °C, (c) 800 °C, and (d) 900 °C respectively

การวิเคราะห์อายุการล้าจะใช้สมการของ Basquin ซึ่งจะแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น สามารถพิจารณาจากได้ด้วยสมการที่ 1 (Basquin, 1910)

$$\sigma_R = AN_R^B \quad (1)$$

สำหรับการพยากรณ์ทำนายอายุการล้าสามารถประเมินได้จากสมการที่ 2 (Das *et al.*, 2017)

$$N = 10^{\left(\frac{1}{b}\right)(\log \sigma - \log a)} \quad (2)$$

อายุการล้าของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบอ่อนแสดงในสมการที่ 3 และอายุการล้าของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส แสดงในสมการที่ 4-6 ตามลำดับ

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.32}\right)(\log \sigma - \log 4897)} \quad (3)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.336}\right)(\log \sigma - \log 5937)} \quad (4)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.319}\right)(\log \sigma - \log 5444)} \quad (5)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.328}\right)(\log \sigma - \log 6662)} \quad (6)$$

จากสมการที่ 3-6 สามารถนำไปพยากรณ์อายุการล้าของเพลลาที่ทำจากเหล็กกล้า เกรด AISI 1050 ได้ จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสามารถรับอายุการล้าเพิ่มขึ้นได้ 53.40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลักษณะผิวยรอยแตก

จากการตรวจพินิจพบว่าจุดเริ่มต้นของรอยแตก (Initiation Crack) มีการขยาย มีการลุกลามเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Propagation Crack) กระทั่งพื้นที่หน้าตัดไม่สามารถรับภาระจากความเค้นและนำไปสู่การแตกหักแบบทันทีทันใด (Overload) ซึ่งลักษณะการแตกที่ปรากฏเป็นพฤติกรรมการวิบัติจากการล้า ดังแสดงใน Figure 7

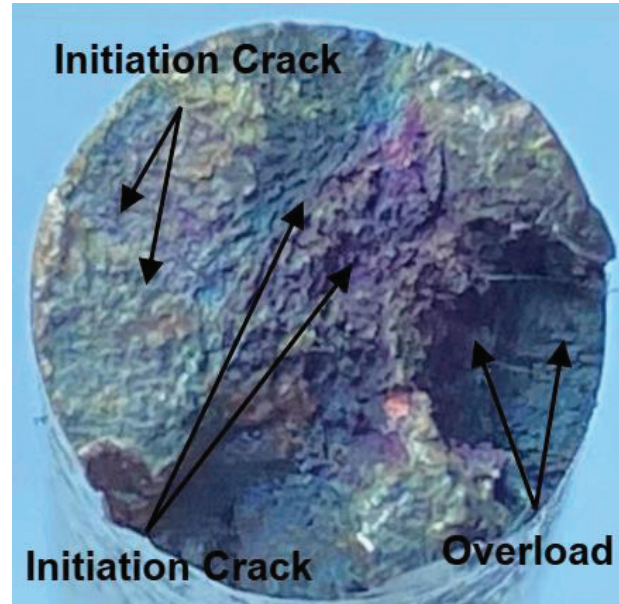


Figure 7 The fracture surface of AISI 1050 Steel

ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะพิจารณาจากลักษณะเกรนบริเวณรอยเชื่อม (Weld Metal ; WM) และบริเวณอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) เพื่อประเมินขนาดของเกรนและลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 50 เท่า ตรวจสอบบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณอิทธิพลจากความร้อน ตรวจสอบด้วยกำลังขยาย 100 เท่า ผลการทดลองพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ที่ผ่านการเชื่อม แต่ชิ้นงานไม่ผ่านการอบอ่อนรอยเชื่อมมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ละเอียด (Ferrite) ขนาดความโตเกรนเฉลี่ยที่ 10.21 ไมโครเมตร (ลักษณะสีขาว) และมีโครงสร้างซีเมนต์ไต์ (Cementite)แทรกตัวระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (ลักษณะสีดำ) ดังแสดงใน Figure 8(a) ขณะที่บริเวณอิทธิพลจากความร้อนแสดงให้เห็นว่ามีเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ลักษณะสีขาวสลับสีดำ ส่งผลให้บริเวณอิทธิพลจากความร้อนมีความแข็งสูง นำไปสู่การแตกหักแบบเปราะได้ง่าย (Sivam *et al.*, 2019) ซึ่งเกรนมีลักษณะที่หยาบ ขนาดของเกรนเฉลี่ยที่ 133.33 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 8(b) ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบความล้าแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบมีการแตกหักบริเวณอิทธิพลจากความร้อน อย่างไรก็ตามเหล็กกล้า เกรด AISI 1050 ที่ผ่านการเชื่อม แต่ไม่ผ่านการอบอ่อนจะเกิดความเค้นตกค้างหลังจากการเชื่อมที่สูง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุของการแตกหักแบบเปราะหลังการทดสอบความล้า (Lin *et al.*, 2008)

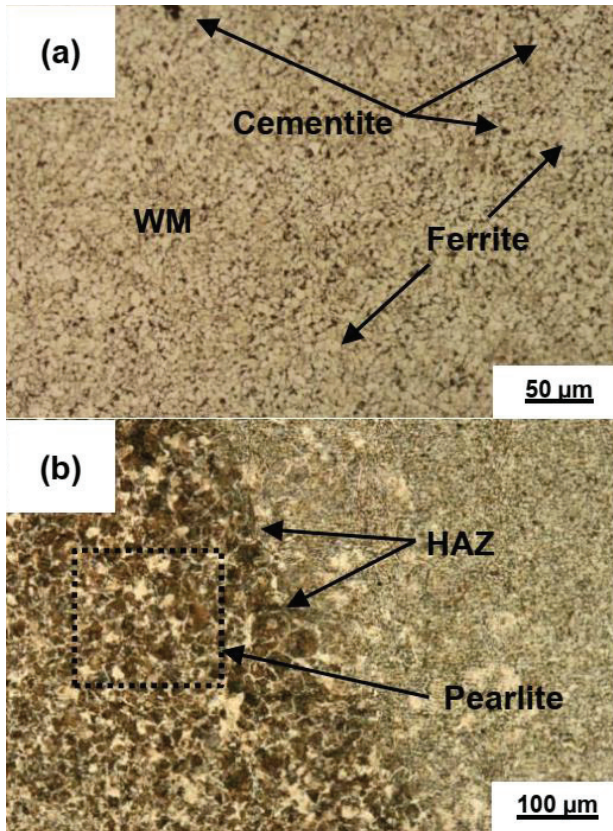


Figure 8 Shows the microstructure of the weld zone at not annealing

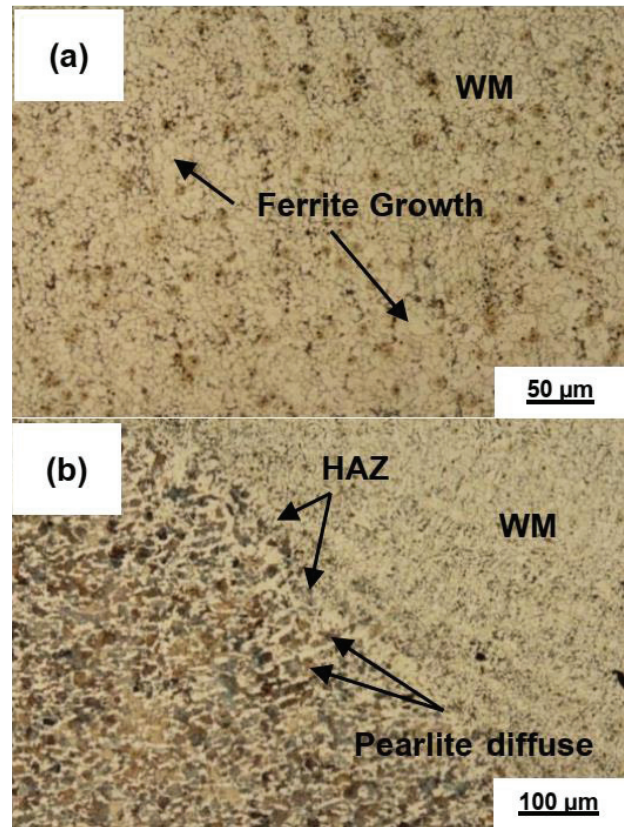


Figure 9 Shows the microstructure of the weld zone at 700 °C

Figure 9 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ที่ผ่านการอบอ่อนหลังการ เชื่อมที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าบริเวณรอยเชื่อม มีการเติบโตของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 16.66 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่อบอ่อน ดังแสดงใน Figure 9(a) ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบอ่อนทำให้เกิดพลังงานกระตุ้น นำไปสู่การเชื่อมต่อกันของเกรนบริเวณ ขอบเกรน ส่งผลให้เกรนมีขนาดที่โตขึ้น (Shibata *et al.*, 1996) ในทำนองเดียวกันโครงสร้างเฟอร์ไรต์บริเวณอิทธิพล จากความร้อนก็มีการเติบโตของเกรนเช่นกัน พบว่าขนาด ของเกรนมีค่าเฉลี่ยที่ 211.07 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 9(b) โดยโครงสร้างเฟอร์ไรต์บางส่วนมีการตกตะกอนของ สารละลายของแข็ง (Solid Solution) และละลายในบริเวณ ของขอบอิทธิพลจากความร้อนเข้าไปยังบริเวณรอยเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลที่ดีต่อการรับแรงกระทำแบบความล้า (Okuda *et al.*, 2019)

สังเกตได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนให้สูงขึ้นส่งผล ให้เกิดการเติบโตของเกรนบริเวณรอยเชื่อมและทำให้โครง สร้างเฟอร์ไรต์บริเวณอิทธิพลจากความร้อนแพร่เข้าสู่รอย เชื่อม ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิ อบอ่อนสูงขึ้นทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์รวมตัวและมีลักษณะ เป็นแบบแผ่น ความร้อนทำให้อะตอมภายในวัสดุเกิดการ เคลื่อนที่ นำไปสู่การเชื่อมต่อกันบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) โดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าบริเวณรอยเชื่อมโครงสร้างเฟอร์ไรต์มีขนาดเกรนเฉลี่ย 19.75 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 10(a) เมื่อเปรียบ เทียบกับชิ้นงานที่ไม่อบอ่อนและชิ้นงานที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าเกรนมีขนาดโตขึ้น ในขณะที่ บริเวณอิทธิพลจากความร้อนพบว่าขนาดของเกรนมีค่าเฉลี่ย ที่ 222.92 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 10(b) นอกจากนั้น การอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงทำให้ชิ้นงานลดความเค้นตกค้าง หลังการเชื่อม (Lin & Chang, 2010)

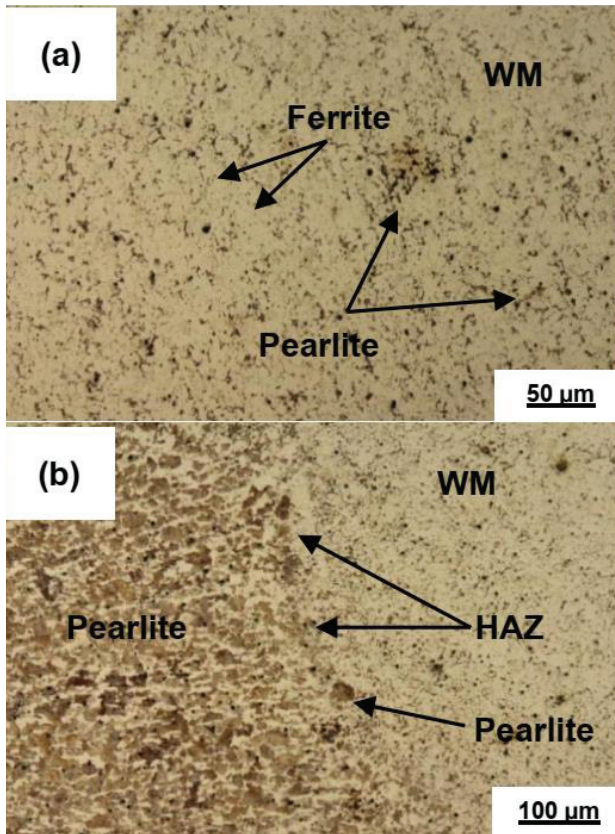


Figure 10 Shows the microstructure of the weld zone at 800 °C

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 900 องศาเซลเซียสแสดงในรูป Figure 11 ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์เริ่มมีการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ สังเกตได้จากโครงสร้างเพิร์ลไลต์แพร่เข้าสู่บริเวณรอยเชื่อมอย่างสมบูรณ์ โครงสร้างผสมเป็นเนื้อเดียวกันจนมีลักษณะสีเทา จากการวัดขนาดเกรนบริเวณรอยเชื่อมพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ย 22.43 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 11(a) คล้ายๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเพิร์ลไลต์บริเวณอิทธิพลจากความร้อนก็มีการเติบโตของเกรนเช่นกัน พบว่าขนาดของเกรนมีค่าเฉลี่ยที่ 254.41 ไมโครเมตร ดังแสดงใน Figure 11(b) ซึ่งผลของโครงสร้างจุลภาคในทุกการทดลองมีทิศทางไปทางเดียวกัน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบอ่อนที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาเปลี่ยนแปลงด้วย ผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางด้านความล้าด้วยเช่นกัน (Zhao *et al.*, 2019) ซึ่งชิ้นส่วนเพลลาเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงกระทำจากการบิดตัวและรับภาระแบบความล้าที่ถูกกระทำแบบต่อเนื่อง จึงต้องการลักษณะของชิ้นงานที่มีความแข็งแรงที่ผิวนอกและมีความเหนียวที่เนื้อด้านในวัสดุ(Zulmiardi & Meriatna, 2017) อย่างไรก็ตามการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง

เกินไป อาจนำไปสู่การเสีรูปของชิ้นงานหรือการสูญเสียความแข็งแรง แต่จะได้สมบัติทางด้านความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะไม่ส่งผลในทางที่ต่อต้านรับแรงบิดได้เช่นกัน (Michel *et al.*, 2006)

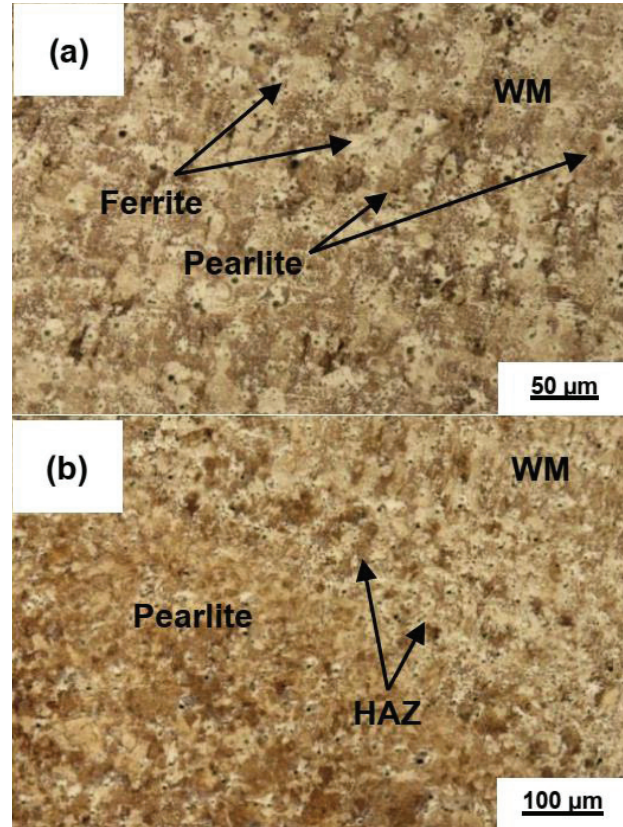


Figure 11 Shows the microstructure of the weld zone at 900 °C

สรุปผล

การศึกษาวิธีการยืดอายุการล้าและโครงสร้างจุลภาคของเพลลาเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ด้วยกรรมวิธีการอบอ่อนหลังการเชื่อมแก๊สปกคลุม สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

- (1) โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณอิทธิพลจากความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากอบอ่อนโครงสร้างเพอร์ไรต์มีการเติบโตของเกรนที่อุณหภูมิสูง พบว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมในบริเวณรอยเชื่อมที่ไม่อบอ่อนมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 10.21 ไมโครเมตร แต่เมื่อผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ขนาดเกรนจะโตขึ้นอยู่ที่ความยาว 22.43 ไมโครเมตร ในขณะที่บริเวณอิทธิพลจากความร้อนของรอยเชื่อมที่ไม่อบอ่อนมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่ 133.33 ไมโครเมตร และการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกรนโตขึ้นเช่นกัน มีขนาดเกรนที่ 254.41 ไมโครเมตร ตามลำดับ

(2) ผลการทดสอบความล้าแสดงให้เห็นว่าภายใต้การทดสอบความล้าที่ภาวะความเค้นทดสอบเดียวกัน การอบอ่อนชิ้นงานเพลลาที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 อุณหภูมิอบอ่อนที่ 900 องศาเซลเซียส สามารถรับแรงล้าได้ 235,780 รอบ ก่อนการเสียหาย ซึ่งสามารถประเมินอายุการล้าได้จากสมการ $N = 10^{\left(\frac{1}{-0.328}\right)(\log \sigma - \log 6662)}$ และสามารถเพิ่มอายุการล้าได้ 53.40 เปอร์เซ็นต์

(3) ผิวยรอยแตกหลังการทดสอบความล้ามีการขยายจากขอบชิ้นงานทดสอบ โดยมีการลุกลามเข้าไปในเนื้อวัสดุจนกระทั่งพื้นที่หน้าตัดที่เหลือไม่สามารถรับภาวะความเค้นทดสอบได้ จึงเกิดการแตกหักแบบทันทีทันใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองวิจัยจากคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาและได้รับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบความล้าจากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยสงขลา ซึ่งทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM E606/E606M-12, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing*, American Society for Testing and Materials.

American Welding Society. (2010). *Structural welding code-steel. AWS D1.1 D1.1M:2010 (22nd Edition)*. An American National Standard.

Basquin, O.H. (1910). "The exponential law of endurance tests: American Society of Testing Materials". *ASTM, 10*, 625-630.

Cryderman, R., Shamsaei, N. & Fatemi, A. (2011). "Effects of continuous cast section size on torsion deformation and fatigue of induction hardened 1050 steel shafts". *Journal of Materials Processing Technology*, 211(1), 66-77.

Das, B., Bakkar, A., Khutia, N. & Das, D. (2017). "Low Cycle Fatigue Performance Evaluation of TMT rebar." *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2554-2563.

Fan, K.L., Liu, X. S., He, G.Q., Cheng, H., & Zhang, Z. (2015). "Influences of strain rate on the low cycle fatigue behavior of gravity casting Al alloys". *Materials Characterization*, 107, 239-248.

Kumar, P. & Singh. A. (2014). "Experimental and numerical investigation of strain rate effect on low cycle fatigue behaviour of AA 5754 alloy". *Materials Science and Engineering*, 364, 1-7.

Lin, C.Y. & Chang, K.Y. (2010). "Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide multi-pass cladding on AISI 1050 steel". *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 219-225.

Lin, C.Y. ; Hung, J.P. & Hsu, T.C. (2008). "Failure Analysis of Reverse Shaft in the Transmission System of All-Terrain Vehicles". *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 8, 75-80.

Michel, S., Kieselbach, R. & Martens, H. (2006). "Fatigue strength of carbon fibre composites up to the gigacycle regime (gigacycle-composites)," *International Journal of Fatigue*, 28(3), 261-270.

Okuda, K., Ogawa K. & Ichikawa Y. (2019). "Influence of microstructure on fatigue property of ultra-high-strength steels". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 48, 125-134.

Peasura, P. & Sumarn, L. (2013). "Effect of Post Weld Heat Treatment on Carbon Steel AISI 1050 in Heat Effected Zone". *Advanced Materials Research*, 650, 612-615.

Sivam S.P.S.S., Loganathan, G.B., Umasekar, V.G., Kumar, P.S.S. & Raja, S. (2019). "Study on Microstructural Characteristics and Mechanical Behaviour of AISI1050 Steel under Various Heat Treatments". *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 11,15-20.

Sari, N.Y & Yilmaz, M. (2006). "Investigation of abrasive + erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel". *Materials & Design*, 27(2), 470-478.

Shibata, H., Tokaji, K., Ogawa, T. & Shiota, H. (1996). "Microstructure dependence of fatigue strength and fatigue crack propagation in titanium aluminide". *International Journal of Fatigue*, 18(2), 119-125.

Shiozaki, T., Tamai, Y. & Urabe, T. (2015). "Effect of residual stresses on fatigue strength of high strength steel sheets with punched holes". *International Journal of Fatigue*, 80, 324-331.

- Sitthipong, S., Towatana, P., Sitticharoenchai, P. & Meengam, C. (2017). "Abrasive Wear Behavior of Surface Hardfacing on Propeller Shafts AISI 4140 Alloy Steel". *Materials Today: Proceedings*, 4, 1492–1499.
- Sitthipong, S., Towatana, P., Sitticharoenchai, A. & Meengam, C. (2017). "Fatigue Life Evaluation of Weld Surfacing LB 52 Grade". *Key Engineering Materials*, 744, 259-263.
- Sitthipong, S., Towatana, P., Sitticharoenchai, A. & Meengam, C. (2016). "Life Extension of Propeller Shafts by Hardfacing Welding," *Materials Science Forum*, 872, 62-66.
- Zhao, Z., Xu, P.F., Cheng, H., Miao, J. & Xiao, F.R. (2019). "Characterization of Microstructures and Fatigue Properties for Dual-Phase Pipeline Steels by Gleeble Simulation of Heat-Affected Zone". *Materials*, 12(12), 1-13.
- Zulmiardi & Meriatna. (2017). "Study on Impact Strength Against Welding Smaw on Hardening Steel AISI 1050". *Emerald Publishing Limited*, 1, 259-264.

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบใช้วัสดุกรองสำหรับบำบัดน้ำเสียห้ำชะขยะ

An economic worthiness assessment of a bio-filter microbial fuel cell for leachate wastewater treatment

ว้จัสกร กาญจนะ^{1*}, จฐติพงศ์ พรหมจอม², วรินทร มีสตัย²

Wajussakorn Kanjana^{1*}, Thitiphong Promjom², Warin Meesat²

Received: 10 July 2020 ; Revised: 9 October 2020 ; Accepted: 16 November 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) สำหรับบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจการลงทุนระบบผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่โดยพิจารณารายได้จากปริมาณกำลังไฟฟ้าจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์และปริมาณคาร์บอนเครดิตจากการติดตั้งระบบเผาก๊าซชีวภาพเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อบำบัดน้ำเสียขนาดถึง 7.8 ลิตร ใช้วัสดุกรอง ไบโอบอลโดยมีอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% ใช้ทดสอบช่วงระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียแตกต่างกันระหว่าง 24-96 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าถึงปฏิกรณ์ที่มีเก็บกัก 96 ชั่วโมงที่อัตราการกรองน้ำเสีย 16 ลิตร/วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและผลิตกำลังไฟฟ้าสูงที่สุด โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้เท่ากับ 76% และให้ความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 41.67 มิลลิโวลต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกถึงปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวสำหรับการประเมินการขายไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิตของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จากการศึกษาพบว่ารายได้หลักของระบบเกิดจากการขายคาร์บอนเครดิตเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 1,079 บาท/ถึง/ปี เทียบจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงเท่ากับ 2.2 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ถึง/ปี และพบว่าไม่เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญโดยที่มีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถึง/ปี ผลวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ข้างต้นจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปีโดยคิดอัตรามูลค่าลดต่อปีคงที่ 7.73% พบว่าถึงปฏิกรณ์ดังกล่าวไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ -27,106 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ -22% จากต้นทุนวัสดุอุปกรณ์และเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท ทั้งนี้หากวิเคราะห์แนวโน้มการลงทุนจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นหากเพิ่มจำนวนถึงปฏิกรณ์ในระบบให้มากขึ้นและพัฒนาาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ การเพิ่มจำนวนถึงปฏิกรณ์เป็น 10 ถึง (อัตราการไหลรวม เท่ากับ 160 ลิตร/วัน) จะส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 37,537 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 16% จากต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี หากประกอบกับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบจาก 76% เป็น 90% อัตราผลตอบแทนภายในจะเพิ่มเป็น 22% จากผลการทดลองข้างต้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ผู้สนใจลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาปัจจัยด้านกำลังการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับเก็บกักก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการประกอบการตัดสินใจ

คำสำคัญ: ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ การประเมินก๊าซเรือนกระจก

¹ อาจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Lecturer, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

² Undergraduate Student, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* Corresponding author: Wajussakorn Kanjana, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

Abstract

This research assessed economic worthiness of a microbial fuel cell (MFC) for wastewater treatment in order to provide information for investment guidance on new renewable fuel. Key financial parameters were incomes from electricity production from microbial activity and carbon credits earned from burning released biogas, which reduces greenhouse gas emission. Researchers operated a laboratory-scale reactor of MFC model, with a volume of 7.8 liters, for landfill leachate wastewater treatment, filled with Bioballs as bio-filter (10% void ratio) and then varying hydraulic retention time (HRT) in a range of 24-96 hours. The results showed that the reactor with HRT of 96 hours, operated with a filtration rate of 16 liters/day, had the highest efficiency of COD removal and electricity potential difference, which were 76% and 41.67 millivolt, respectively. Therefore, the reactor with HRT of 96 hours was selected to assess incomes from electricity sale and carbon credit from the MFC. The analysis pointed out that the most profitable revenue from the MFC was caused from only carbon credit, 1,079 baht/reactor/year, derived from greenhouse gas emission reduction of 2.2 ton-carbon dioxide equivalent/reactor/year, while electricity sale did not significantly make revenue by producing electricity of 0.03 watt-hour/reactor/year. From the results of worthiness analysis for the MFC system, to meet criteria of net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) for 10-year operating period with an constant discounted rate of 7.73%, it was concluded that the MFC reactor was not worthy of an investment with NPV and IRR of -27,106 Baht and -22%, respectively, from all equipment and operation costs of 35,000 baht. Nevertheless, when considering the analysis of an investment, it would be more worthy by increasing the number and improving treatment efficiency of reactors. Increasing the number of reactors to 10 reactors (equivalent to a filtration rate of 160 liters/day) effected a change of NPV and IRR to 37,537 Baht and 16%, respectively, from all investment costs of 41,404 upon 10-year operating period. If increasing the number of reactors featuring improving COD treatment efficiency from 76% to 86%, IRR would increase to 22%. From the abovementioned results, the researchers suggested that those interested in MFC investment, for now, should consider factors, such as treatment capacity and efficiency of the system for purpose of wastewater treatment together with a biogas collecting system for utilization, as information for an investment decision making.

Keywords: Economic worthiness analysis, Microbial Fuel Cell, Greenhouse gas assessment

บทนำ

โลกมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสิ่งอำนวยความสะดวกทั้งหลายในปัจจุบันซึ่งมนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาล้วนแต่ต้องการพลังงานมากขึ้นในรูปแบบต่างๆ ซึ่งพลังงานที่ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกส่วนใหญ่นั้นได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ และน้ำมัน เป็นต้น ประกอบกับจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดลดน้อยลง อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะภาวะโลกร้อน ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพการผลิตพลังงานสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีแนวโน้มที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Fuel Cell, MFC) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจพัฒนา เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอาหารของจุลินทรีย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้นานตราบเท่าที่มี

สารอินทรีย์ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาออกแบบถึงปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อบำบัดและผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำชะขยะสังเคราะห์ โดยมีหลักการ คือ เติมน้ำชะขยะเข้าไปยังถึงปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วลบหรือแอโนด (Anode) จุ่มอยู่เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะแล้วปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอิเล็กตรอนจะผ่านขั้วไฟฟ้าขั้วลบเข้าสู่วงจรไฟฟ้าแล้วจึงถูกปล่อยสู่ถึงปฏิกรณ์ที่มีขั้วไฟฟ้าขั้วบวกหรือแคโทด (Cathode) จุ่มอยู่ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ (Voltage) ที่อิเล็กตรอนไหลเวียนไป ขณะที่โปรตอนซึ่งเป็นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Ionized hydrogen) จะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปยังขั้วไฟฟ้าขั้วบวกและทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen) ก่อเกิดเป็นน้ำเพื่อทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง (ขั้วลบลดค่าพลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แต่ทั้งนี้พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับปริมาณ

กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากถึงปฏิกรณ์ที่ ออกแบบขึ้นยังเป็นสภาวะจำลองและยังมีงานวิจัยอยู่อย่าง จำกัดที่ศึกษาสภาวะธรรมชาติของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย แหล่งน้ำเสียจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า (ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และ กันยรัตน์ โหละสุต, 2558) ตลอดจน วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เช่น ขั้วไฟฟ้า และ เยื่อเลือกผ่านไอออน มีราคาสูง (กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ, 2554) จากสาเหตุดังกล่าวการศึกษาเพื่อ ประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จากเซลล์เชื้อเพลิง จุลินทรีย์จึงมีความจำเป็นเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความคุ้ม ค่าในการลงทุนและเสนอแนะแนวทางพัฒนาตามหลักทาง เศรษฐศาสตร์ (ชนิษฐา หมูโสภิญ, 2554 ; ณัฐสิริ แสงธรรมธร, 2552)

เป็นที่ทราบกันว่าการลงทุนโครงการส่วนใหญ่มักก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อมและ ทรัพยากรธรรมชาติ ดังนั้นการดำเนินงานโครงการใด ๆ นอกจากความคุ้มค่าทางการเงินแล้วจำเป็นต้องมีการประเมิน ถึงผลกระทบทางลบที่เกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย

ดังนั้น “การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม” (Environmental economics valuation) จึงเป็นวิธีการประเมินมูลค่าผลกระทบทั้งทางบวกและทางลบเป็นตัว เงินเพื่อนำไปประเมินความคุ้มค่าของโครงการโดยพิจารณา ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย (Bateman & Turner, 1993) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าทาง เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมของเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบจากผล ตอบแทนทางการเงินโดยการขายไฟฟ้า และผลตอบแทนใน การลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการขายคาร์บอนเครดิตจาก การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศจากการ บำบัดน้ำเสียด้วยจุลินทรีย์โดยการรวบรวมและเผาก๊าซมีเทน ที่ปลดปล่อยมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เพื่อเป็นข้อมูล ประกอบการตัดสินใจต่อการลงทุนต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ถูกออกแบบจากถังปฏิกรณ์ กรองชีวภาพไม่เติมอากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow non-aerobic bio filter) ทำจากถังพลาสติกใสเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม. โดยแบ่งช่องเป็น 2 ช่อง ได้แก่ ช่องรูปกระบอกด้านล่างใส่วัสดุกรองที่ทำจากเส้นกระสอบปุ๋ยและขั้วไฟฟ้าแอโนด และช่องรูปกรวยด้านบนใส่ขั้วไฟฟ้าแคโทด ขั้วไฟฟ้าทำจาก

ผ้าแกรไฟต์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 10 ซม. ยาว 10 ซม. น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้าระบบทางน้ำเข้าด้านบนแล้วไหล ย้อนจากด้านล่างผ่านวัสดุกรองไหลล้นออกตรงทางน้ำเข้าและ ออกจากระบบผ่านทางน้ำออก ดัง Figure 1

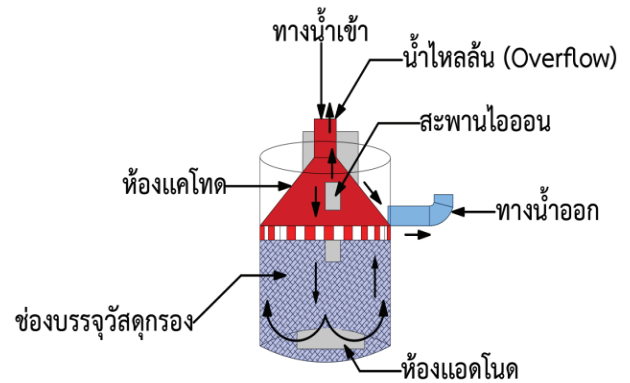


Figure 1 Configuration of Microbial Fuel Cell (MFC)

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและผลิต ไฟฟ้าทำโดยเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง (Con- tinuous flow) ที่อัตราการไหล 16 ลิตร/วัน น้ำเสียเป็นน้ำ ชะขะจากบ่อฝังกอบ ตำบลหนองปลิง อำเภอเมือง จังหวัด มหาสารคาม มีค่าซีโอดี 128-240 กรัม/ลิตร ที่อัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุด (ขวัญฤดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประทุม, 2560) แล้วนำมาทดสอบปัจจัยระยะ เวลาเก็บกักน้ำเสียที่ 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อเลือก ระยะเวลากักน้ำเสียที่ทำให้ระบบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเซลล์เชื้อ เพลิงจุลินทรีย์จะพิจารณาแยกเป็น 2 รูปแบบการลงทุน ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบเก็บกัก ก๊าซชีวภาพ โดยแต่ละแบบการลงทุนจะวิเคราะห์ความคุ้มค่า จากต้นทุนรวมต่อปี เทียบกับรายได้รวมต่อปีที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดใน Table 1 ผลตอบแทนจากปริมาณคาร์บอน เครดิตได้จากการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อย จากถังปฏิกรณ์จากระบบเก็บกักก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ เป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด ค่าวัสดุอุปกรณ์ระบบเก็บกักก๊าซมีเทน ได้จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ โดยมีวัสดุ อุปกรณ์ ได้แก่ ถังพลาสติก ท่อพีวีซี และวาล์วกันย้อน ดัง Figure 2

Table 1 Scenarios of Microbial Fuel Cell (MFC) investment

Investment scenario	Cost (C)	Return (B)
Microbial fuel cell without biogas holder	- Equipment cost for microbial fuel cell - Labor cost for system operation	-Electricity power quantity
Microbial fuel cell with biogas holder	- Equipment cost for microbial fuel cell - Equipment cost for biogas holder - Labor cost for system operation	- Electricity power quantity - Carbon credit quantity

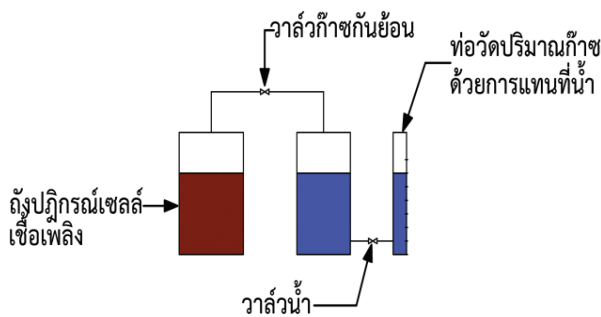


Figure 2 Configuration of water replacement biogas holder

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ปริมาณกำลังไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงเข้าสู่ภาวะเสถียรภาพ (Steady state) ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าประเมินจากการตรวจวัดค่าความต่างศักย์วงจรมืด (Open Circuit Voltage, OCV) จนมีค่าคงที่แล้วจึงนำตัวต้านทานภายนอก 500 โอห์ม มาต่อเพื่อวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณเป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

การประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆขณะที่ถังปฏิกรณ์เข้าสู่ภาวะเสถียรภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยประเมินได้จากสูตร ดังนี้ (UNFCCC, 2019)

$$BE_y = MEP_{ww,treatment,y} \times GWP_{CH_4}$$

$$MEP_{ww,treatment,y} = \sum_i (Q_{ww,i,y} \times COD_{inflow,i,y} \times \eta_{COD,BL,i} \times MCF_{ww,treatment,BL,i}) \times B_{O,ww} \times UF_{BL}$$

โดยที่

BE_y คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ปลดปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย (ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า/ปี)

GWP_{CH_4} คือ ค่าศักยภาพการก่อให้เกิดโลกร้อนของก๊าซมีเทนเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (เท่ากับ 25)

$MEP_{ww,treatment,y}$ คือ ปริมาณก๊าซมีเทนที่ปลดปล่อยจากระบบบำบัดน้ำเสีย i (ตัน/ปี)

$Q_{ww,i,y}$ คือ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดน้ำเสีย i (ลบ.ม./ปี)

$COD_{inflow,i,y}$ คือ ปริมาณซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย i (ตัน/ลบ.ม./)

$\eta_{COD,BL,i}$ คือ ประสิทธิภาพการบำบัดการบำบัดซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสีย i (%)

$MCF_{ww,treatment,BL,i}$ คือ ค่าปัจจัยการแก้ไขสำหรับก๊าซมีเทน (Methane correction factor) (เท่ากับ 0.8)

$B_{O,ww}$ คือ ค่าการเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายซีโอดี (เท่ากับ 0.25 ตันมีเทน/ตันซีโอดี)

UF_{BL} คือ ปัจจัยค่าความคลาดเคลื่อน (เท่ากับ 0.89)

ดัชนีชี้วัดในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) โดยจะพิจารณาว่าการลงทุนคุ้มค่าเมื่อ NPV มากกว่า 0 และ IRR มากกว่าอัตราดอกเบี้ยหรือเงินเฟ้อในปีที่ลงทุน (7.73%) โดยคำนวณได้ตามสูตร ดังนี้ (Main, 2019 ; นิษานันท์ ทองนาค, 2540)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}$$

$$IRR = NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0$$

โดยที่

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุการลงทุน (บาท)

B_t คือ ผลตอบแทนของการลงทุนในปีที่ t (บาท/ปี)

C_t คือ ต้นทุนของการลงทุนในปีที่ t (บาท/ปี)

i คือ อัตราส่วนลดต่อปี (7.73%/ปี)

IRR, r คือ อัตราผลตอบแทนภายในหรืออัตราส่วนลดเมื่อ $NPV = 0$ ตลอดอายุการลงทุน (%)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกถังปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีอัตราส่วนช่องว่างวัสดุกรอง 10% ที่ระยะเวลาเก็บกักแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) ในน้ำชะขยะและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ผลของประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงเสถียรภาพของการบำบัดพบว่าถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 96 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพการบำบัด SCOD สูงสุดเท่ากับ 76% โดยมีค่า SCOD ของน้ำชะขยะเข้าถังปฏิกรณ์ 112,000 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากถังปฏิกรณ์ 27,200 มิลลิกรัม/ลิตร ดังแสดงใน Figure 3 โดยที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวระบบให้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 41.67 มิลลิโวลต์ และ 0.083 มิลลิแอมแปร์ ที่ค่าความต้านทานที่ 500 โอห์ม (ขวัญลดา พลสมบัติ และ สุภาวดี ศิริประที, 2560) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ สุจิตรา สุกรณ์นิมา (2553) พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จาก 12 เป็น 24 และ 36 ชั่วโมง จะทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 34 มิลลิโวลต์ เป็น 81-106 มิลลิโวลต์ ที่ความต้านทาน 300 กิโลโอห์ม ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับงานของผู้วิจัย ส่วนค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะองค์ประกอบระบบเซลล์เชื้อเพลิงและน้ำเสียที่ใช้ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ใช้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบตนเองที่ทราบต้นทุนมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

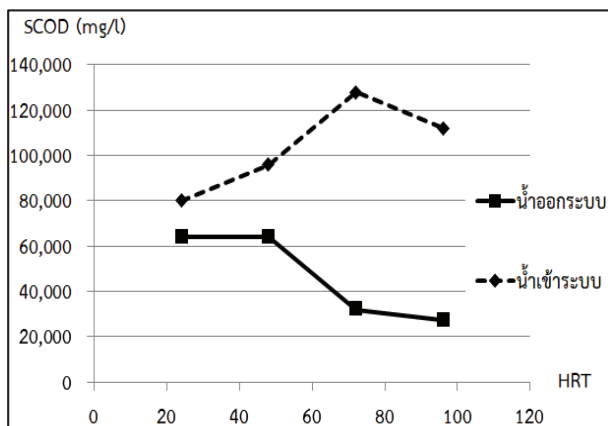


Figure 3 Profile of Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) in influent and effluent from microbial fuel cell for different hydraulic retention time (HRT)

จากการประเมินผลตอบแทนการลงทุนถึงปฏิกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์พบว่าในระยะเวลาการลงทุน 10 ปี จากเงินลงทุนการก่อสร้างและเดินระบบทั้งหมด 35,000 บาท โดยมีรายละเอียดดังที่แสดงใน Table 2 ปรากฏว่าถึงปฏิกรณ์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าวรวม

0.0003 กิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยที่อัตราคิดลด 7.73% มีมูลค่าผลตอบแทนจากการขายไฟฟ้าทั้งหมด 0.0009 บาท จากราคาขายไฟฟ้าจากพลังงานเชื้อเพลิงทดแทน 2.8 บาท/หน่วย (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน, 2562) และสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกรวม 22.12 ตัน-คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยที่อัตราคิดลด 7.73% มีมูลค่าผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิตทั้งหมด 7,894 บาท ซึ่งมีผลตอบแทนสุทธิปีแรกของการลงทุนเท่ากับ 1,079 บาท จากราคาขายคาร์บอนเครดิต 487.7 บาท/ตัน-คาร์บอนไดออกไซด์ (บุญรอด เยาวพฤกษ์, 2562)

Table 2 Equipment and labor costs for microbial fuel cell investment

Item List	unit	Cost (Baht)	Salvage cost* (Baht)	Depreciated cost (Baht)
Investment cost for microbial fuel cell				
Plastic bucket 7.8 liter	1 bucket	60	6.6	53.4
Wastewater influent tank 120 liter	1 tank	183	19.8	163.2
Wastewater effluent tank 10 liter	1 tank	45	4.9	40.1
PVC pipe	8 me-ters	87	9.6	77.4
PVC pipe components	10 units	102	11.2	90.8
Computer	1 unit	3,000	330	2,670
Voltmeter	1 unit	390	42.9	347.1
Currentmeter	1 unit	23,040	2,534.4	20,505.6
PH and ORP meter	1 unit	8,200	902	7,298
Tank iron stand	1 unit	300	33	267
Total depreciated cost				31,512.6
Investment for biogas holder				
Check value	1 unit	490	53.9	436.1
PVC pipe components	5 units	57	6.3	50.7
Total depreciated cost				486.8
Labor cost for operating system				
Lump sum payment	10 times	3,000	-	3,000

Remark: *Referred from The Army Comptroller (2015) หรือ สบช. (2558)

จากมูลค่าผลตอบแทนรวมเทียบกับต้นทุนทำให้ถึง
 ปฏิกรณ์ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนจากค่า NPV และ IRR เท่ากับ
 -27,106 และ -22% ตามลำดับ ดังรายละเอียดผลตอบแทนที่
 แสดงใน Figure 4 ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการ
 ลงทุนอาจพิจารณาลดต้นทุนโดยการเช่าแทนการซื้อเครื่อง
 มือตรวจวัดทางไฟฟ้าซึ่งมีราคาสูงเพื่อเพิ่มความคุ้มค่าทาง
 เศรษฐศาสตร์

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์การประหยัดต่อขนาด (Economic
 of scale) โดยทำการประเมินแนวโน้มความคุ้มค่าของการ
 ลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบถึงปฏิกรณ์ 10 ถัง
 ต่อขนาดกันหรืออัตราการกรองรวม 160 ลิตร/วัน ตามขนาด
 ชุดทดลองขนาดเล็ก (Bench-scale pilot plant) ที่ได้วางแผน
 ไว้โดยประเมินเงินลงทุนทั้งหมดเท่ากับ 41,404 บาท โดย
 มีต้นทุนเพิ่มจากชุดประกอบถึงปฏิกรณ์อีก 9 ชุดปรากฏว่า
 ระบบได้ผลตอบแทนจากการขายไฟฟ้ามูลค่ารวม 0.009 บาท
 และได้ผลตอบแทนสุทธิจากการขายคาร์บอนเครดิตมูลค่ารวม
 78,941 บาท

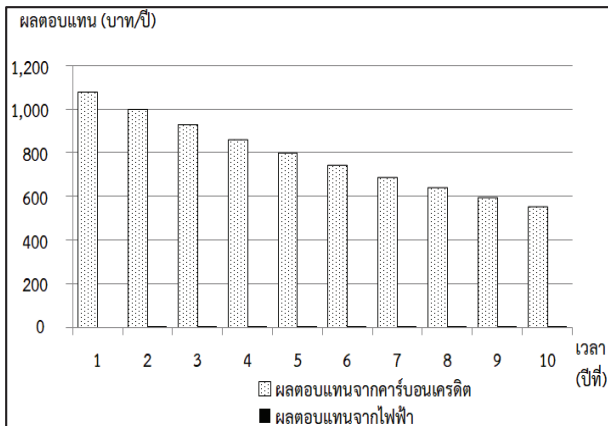


Figure 4 Financial returns of electricity and carbon credit sale from a microbial fuel cell with biogas holder

เมื่อเทียบมูลค่าผลตอบแทนรวมกับต้นทุน ปรากฏว่า
 ถึงปฏิกรณ์แบบ 10 ถัง มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนสูงกว่าระบบ
 แบบถึงเดี่ยวโดยมีค่า NPV และ IRR เท่ากับ 37,537 และ 16%
 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 5 เนื่องจากระบบมีต้นทุนเพิ่ม
 ขึ้นไม่มากจากต้นทุนถังพลาสติก ท่อพีวีซีและส่วนประกอบ
 ท่อพีวีซี โดยที่ไม่จำเป็นต้องลงทุนคอมพิวเตอร์และเครื่องมือ
 ตรวจวัดต่างๆ ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed cost) เพิ่มเติม ทั้งนี้
 ค่า NPV และ IRR อาจไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณหาก
 จำนวนถัง อัตราการกรอง และองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลินทรีย์ที่ออกแบบเปลี่ยนแปลงไปจากงานวิจัยนี้

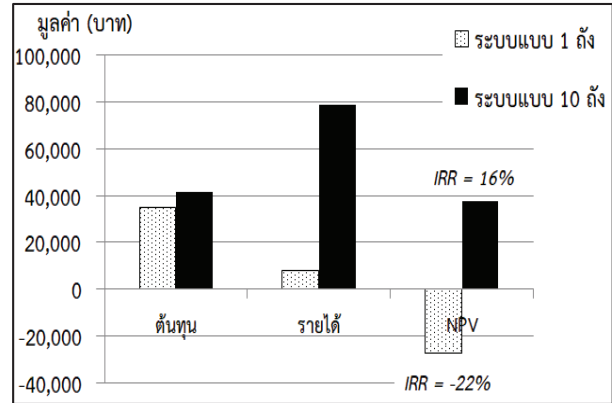


Figure 5 Comparison of investment cost, return and worthiness between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองข้างต้นผลตอบแทนทั้งหมดของ
 การลงทุนมาจากการขายคาร์บอนเครดิตซึ่งปริมาณคาร์บอน
 เครดิตที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการบำบัดซี
 โอดี ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ
 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบที่มีผลต่อค่า IRR พบ
 ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพตั้งแต่ 76% ถึง 90% ซึ่ง
 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ เช่น การเดินระบบ
 ด้วยอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม การเปลี่ยน
 วัสดุกรองที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และอาจทำการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า
 เป็นแท่งแกรไฟต์กึ่งวงหรือผ้าคาร์บอนเคลือบแพลตตินัมเพื่อ
 เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์ให้ดียิ่ง
 ขึ้น (ภาคภูมิ อัดตสิริลักษณ์, 2554) ผลการประเมินของระบบ
 แบบ 1 ถึงปฏิกรณ์ พบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพไม่มีผลทำให้
 เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีค่าระหว่าง IRR -22% ถึง
 -20% ตามความสัมพันธ์ $y = 0.39x - 0.14$ แต่การเปลี่ยนแปลง
 ค่าประสิทธิภาพของระบบแบบ 10 ถึงปฏิกรณ์ตั้งแต่ 76% ถึง
 90% ขึ้นไปทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มขึ้นถึงค่า IRR
 สูงสุด 22% ตามความสัมพันธ์ $y = 0.14x - 0.33$ ดังที่แสดงใน
 Figure 6

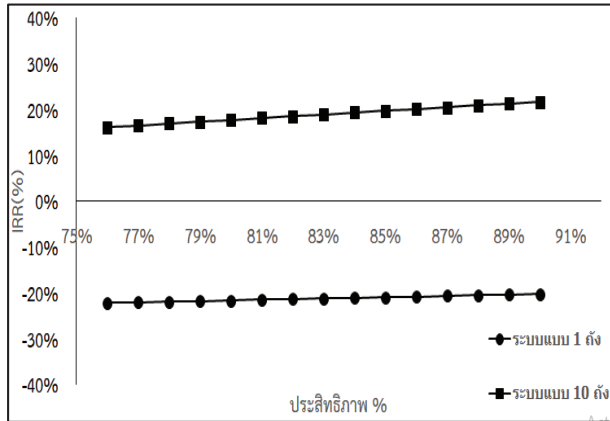


Figure 6 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and Soluble Chemical Oxygen Demand (sCOD) removal efficiency between 1 tank and 10 tanks microbial fuel cell system

จากผลการทดลองที่พบว่าผลตอบแทนจากการกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีมูลค่าน้อยซึ่งไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความคุ้มค่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ระบบแบบ 1 ถึงปฏิกรณ์ (อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน) ควรผลิตได้เพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าทั้งในกรณีที่รวมและไม่รวมผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต ดังที่แสดงใน Figure 7 และ 8

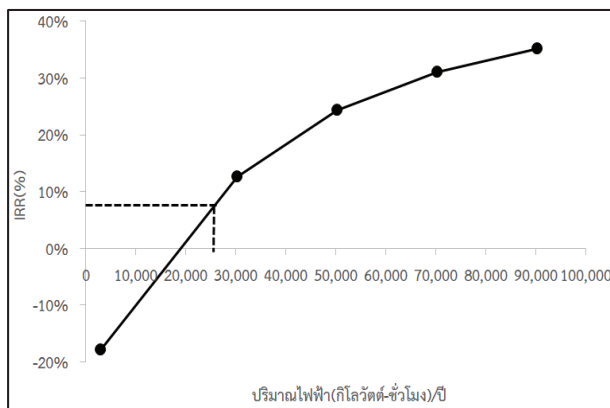


Figure 7 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, not including carbon credit return

ผลการประเมินพบว่าในกรณีที่ไม่นรวมผลตอบแทนจากคาร์บอนเครดิต ระบบควรผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 30,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี เพื่อให้ IRR มีค่าอย่างน้อย 13% (หรืออย่างน้อย 25,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี จึงคุ้มค่าต่อการลงทุนที่ค่า IRR เท่ากับ 7.73%) ส่วนในกรณีที่รวมผลตอบแทนจากคาร์บอนเครดิต พบว่าระบบสามารถลดปริมาณผลิตไฟฟ้าได้อย่างน้อยเหลือประมาณ 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี เพื่อให้ IRR มีค่าอย่างน้อย 7%

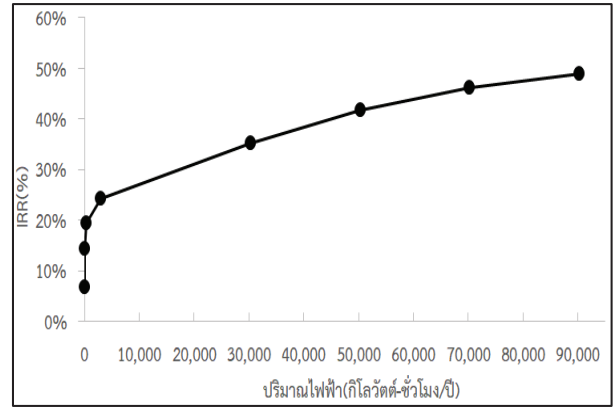


Figure 8 Relationship of Internal Rate of Return (IRR) and electricity production from a microbial fuel cell, including carbon credit return

สรุป

ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับการผลิตไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าและมีแนวโน้มที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต จึงทำให้เห็นถึงความสำคัญของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนโดยพิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตจากการลงทุนระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย การประเมินรายได้จากถึงปฏิกรณ์ต้นแบบเพื่อบำบัดน้ำชะขยะพบว่า ถึงปฏิกรณ์ไม่สามารถสร้างรายได้จากการผลิตไฟฟ้าซึ่งได้กำลังไฟฟ้าเพียง 0.03 วัตต์-ชั่วโมง/ถึง/ปี แต่รายได้ทั้งหมดมาจากผลตอบแทนจากการขายคาร์บอนเครดิต โดยถึงปฏิกรณ์จะมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเมื่อเดินระบบที่อัตราการกรองที่สูงขึ้นตั้งแต่ 160 ลิตร/วัน ขึ้นไป ซึ่งจะทำให้ระบบมีมูลค่ากำไร 37,537 บาท และมีผลตอบแทนภายใน 16% ในระยะเวลาเดินระบบ 10 ปี ที่อัตราลด 7.73%

การพัฒนาารบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาเพื่อเพิ่มรายได้จากการผลิตไฟฟ้าและคาร์บอนเครดิต หากประสิทธิภาพการบำบัดชีโอติของระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มค่า IRR เพิ่มขึ้น เมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 160 ลิตร/วัน โดยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 90% จะทำให้ค่าผลตอบแทนภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 22% การพัฒนาเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความคุ้มค่าต่อการลงทุน หากไม่พิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยพบว่า ระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่อัตราการกรอง 16 ลิตร/วัน ควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 25,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี แต่หากพิจารณารายได้จากคาร์บอนเครดิตร่วมด้วยควรพัฒนาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 3 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/

ปี จากผลการทดลองข้างต้นหากผู้ที่สนใจจะลงทุนระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในปัจจุบันควรพิจารณาติดตั้งระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต รวมถึงการเพิ่มขนาดหรืออัตราการกรองของระบบเพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพและการผลิตไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อพัฒนาระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้เป็นระบบผลิตเชื้อเพลิงทดแทนเชิงพาณิชย์ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ภายใต้โครงการทุนอุดหนุนงานวิจัยอาจารย์รุ่นใหม่ งบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2562 และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เพชร เพ็งชัย นางสาวขวัญฤดา พลสมบัติ และ นาวาสงสุมวดี ศิริประทุม เป็นอย่างสูงที่เอื้อเฟื้อข้อมูลประกอบการทำวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- กันยรัตน์ โหละสุด และคณะ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ วิศวนาการ การผลิตไฟฟ้าจากน้ำเสีย*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ขนิษฐา หมูโสภัญ. (2554). *เซลล์เชื้อเพลิง: แนวทางใหม่เพื่อการผลิตพลังงาน*. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ขวัญฤดา พลสมบัติ และ สุมวดี ศิริประทุม. (2560). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดชีโอดีและบีโอดีในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เต็มอากาศแบบไหลขึ้น*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
- คณะทำงานเพื่อพิจารณากำหนดอายุการใช้งานสินทรัพย์ของ อผศ. (2562). *ปรับปรุงหลักเกณฑ์การคำนวณค่าเสื่อมราคาสินทรัพย์ถาวร*. พ.ศ.2562. จาก <http://www.wvo.thaigov.net/ตารางอายุการใช้งานสินทรัพย์ถาวรของ%20อผศ.pdf>.
- ณิชนันท์ ทองนาค. (2540). *การศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในเขตพื้นที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี*. ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.
- ณัฐวุฒิ คล้ายสงคราม และกันยรัตน์ โหละสุด. (2558). การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้ต้นกกราชินี. *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 42(1), 117-124.

- ณัฐสิริ แสงธรรมธร. (2552). *การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญรอด เยาวพฤษ. (2562). *ราคาของคาร์บอนเครดิต*. พ.ศ. 2562. ; จาก <http://siamcarbonmarkets.blogspot.com>.
- ภาคภูมิ อัดตสิริลักษณ์. (2554). *ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุก*. วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. (2562). *ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก*. พ.ศ.2562. จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/private/vspp>.
- สำนักงานปลัดบัญชีกองทัพบก (สบช.). (2555). *ปรับปรุงหลักเกณฑ์การคำนวณค่าเสื่อมราคาทรัพย์สินถาวร*. แผนกบัญชีทรัพย์สินและเงินกองทุน กบช.ฟป.
- สุจิตรา ศุภร์นิมิต. (2553). *การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม่กระป๋อง*. วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทอร เข็มมา และณัฐวรรณ รักษา. (2561). *ผลของอัตราส่วนช่องว่างชั้นกรองที่มีต่อการบำบัดฟอสเฟตและซิลเฟตในน้ำชะขยะด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่สร้างจากถังกรองชีวภาพไม่เต็มอากาศแบบไหลขึ้น*. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- Bateman, I.J., & Turner, R.K. (1993). *Valuation of the environment, methods and techniques: The contingent valuation method, Sustainable Environmental Economics and Management*. Principles and Practice, Belhaven Pre.
- Main, M.A. (2019). *Project Economics and Decision Analysis, Volume I, Deterministic Mode*.
- UNFCCC. (2019). *Small-scale Methodology, Methane Recovery in Wastewater Treatment AMS-III-H*. Version 19.0 Sectoral scope(s): 01 and 13, United Nation Framework Convention on Climate.

การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

The cascade PI controller design of a boost converter using an adaptive Tabu search algorithm

วิภุษณะ ฉายินทุ^{1*}

Wiphusana Chayinthu^{1*}

Received: 15 October 2020 ; Revised: 26 October 2020 ; Accepted: 10 November 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว แบบจำลองทางพลวัตของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถหาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้แบบจำลองที่ผ่านคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ผลการตอบสนองของแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินน้อยกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44 วินาที 2 วินาที และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทความนี้ยังเป็นวิธีการที่มีความสะดวกและมีความยืดหยุ่นสำหรับวิศวกรรมไฟฟ้าในการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน ตามูเชิงปรับตัว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

Abstract

This paper presents the cascade PI controllers design for a boost converter using an adaptive tabu search algorithm. The dynamic model of the power electronic system derived from the generalized state-space averaging method is used as an objective function instead of the model from software packages. intensive time-domain simulation results show that the offered methods can provide a better response to the output voltage of the boost converter than the conventional method. In terms of the faster rise-time and settling time and lesser percent overshoot, which were 1.44 seconds, 2 seconds, and 0 percent, respectively. Also, this approach is useful and flexible for electrical engineering to design a controller of power electronic systems with good performances.

Keywords: Boost Converter, Cascade PI Controller, Adaptive Tabu Search, Generalized State-Space Averaging method

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 ติดต่อ: E-mail, wiphusana.c@rmutsb.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-979-6999

¹ Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding author: Wiphusana Chayinthu.

บทนำ

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายทางด้านวิศวกรรมหลายด้านเช่น การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว (Puangdownreong, *et al.*, 2012 ; Sujitjorn *et al.*, 2006 ; Puangdownreong *et al.*, 2005 ; Kulworawanichpong *et al.*, 2005 ; Kulworawanichpong, *et al.*, 2004 ; Udomsak, *et al.*, 2017) (Adaptive Tabu Search: ATS) การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ควบคุมได้ในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว (Suyapan, *et al.*, 2017) การออกแบบวงจรกรองกำลังไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Narongrit, *et al.*, 2010) (Genetic Algorithm: GA) การจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่โดยใช้การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (นันทนันท์ พลพันธ์ และประชา คำภักดี, 2562) (Particle Swarm Optimization: PSO) และการประยุกต์การค้นหาแบบแก๊ง (Gang Search: GS) เพื่อออกแบบตัวควบคุม PI แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับตัวควบคุมค่าแรงดันอัตโนมัติ (เดชา พวงดาวเรือง, 2557)

ในบทความนี้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้จะถูกเรียกว่าอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวสำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Boost converter) ตัวควบคุมของวงจรดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ ดังนั้น อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันซึ่งทำให้ได้ผลการตอบสนองทางด้านแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยโครงสร้างภายในของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันประกอบไปด้วยรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าและรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยปกติแล้วบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional method) ด้วยเหตุนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Method: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (Emadi, 2004 ; Salem *et al.*, 2014 ; Sarwar *et al.*, 2017 ; Azer & Emadi, 2020 ; Pakdeeto *et al.*, 2017) (DC to DC Converter) นอกจากนี้เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบผ่านอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว กระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจำเป็นต้องจำลองบนระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ปรับจูนตัวควบคุมจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันที่มีตัวควบคุมนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญก็คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำให้ได้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (Time-varying model) ซึ่งถ้านำแบบจำลองไปใช้กับอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่นานและการหาแบบจำลองค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงต้องนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาวิเคราะห์โดยผ่านวิธีเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดผลของสวิทช์ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Chonsatidjamroen *et al.*, 2012 ; Chayinthu *et al.*, 2017 ; Chanpittayagit *et al.*, 2017) (Time-invariant model) เป็นผลให้เวลาในการจำลองสถานการณ์มีความไวมากขึ้น และเหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมและการใช้งานกับอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB จากผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบทั้งสองที่ได้ให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวได้ ลำดับต่อไปนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้าสู่กระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งพบว่า การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการออกแบบดั้งเดิมในเรื่องของช่วงเวลารูปร่างขึ้น (Rise-time) เวลาเข้าที่ (Settling-time) เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent Overshoot) น้อยกว่า ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับวิศวกรในการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่วิศวกรสามารถกรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้แสดงได้ดัง Figure 1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_{dc} , ตัวเหนี่ยวนำ L_c , ตัวเก็บประจุ C_c , โหลดตัวต้านทาน R_c และตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันซึ่งภายในมีรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นรูปด้านใน (Inner loop) และรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปด้านนอก (Outer loop) (Tsang & Chan, 2005 ; Rabiaa *et al.*, 2018 ; Moutaki *et al.*, 2018) ซึ่ง

แทนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยค่า $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ตามลำดับ แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีโอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ใน Figure 2

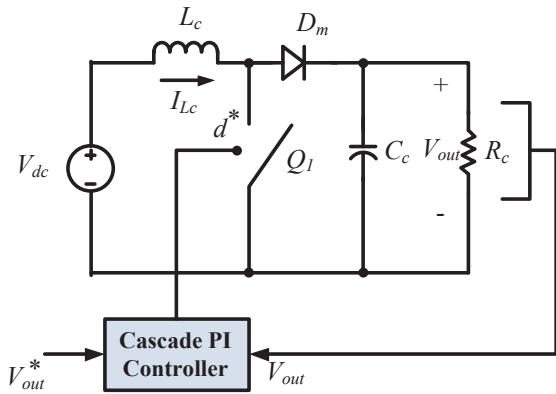


Figure 1 The considered system

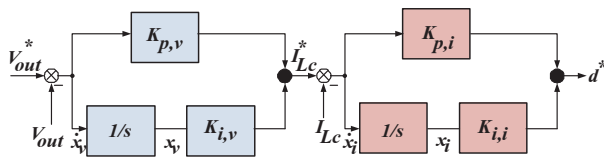


Figure 2 The schematic of the cascade PI controllers

จาก Figure 1 และ Figure 2 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีโอที่ต่อเรียงกันของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขึ้นอยู่กับค่าของวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: d^*) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้า ค่า d^* สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$d^* = \frac{K_{p,i}L_c - K_{p,v}K_{p,i}V_{out} + K_{i,v}K_{p,i}X_v}{K_{i,i}X_i - K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*} \quad (1)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบใน Figure 1 สามารถวิเคราะห์หาโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งเมื่อหาแบบจำลองได้แล้วจะนำมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เพื่อใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model) ดังนั้นจึงต้องทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้น (Linear model) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง เพื่อให้แบบจำลองที่ได้เปรียบเสมือนได้แบบจำลองที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งง่าย

ต่อการใช้กับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \dot{\delta x} &= A(x_0, u_0)\delta x + B(x_0, u_0)\delta u \\ \delta y &= C(x_0, u_0)\delta x + D(x_0, u_0)\delta u \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ

$$\delta x = [\delta I_{Lc} \ \delta V_{out} \ \delta x_v \ \delta x_i]^T, \delta u = [\delta V_{dc} \ \delta V_{out}^*]^T, \delta y = [\delta I_{Lc} \ \delta V_{out}]^T$$

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} & a(1,2) & \frac{K_{i,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} & \frac{K_{i,i}V_{out,0}}{L_c} \\ a(2,1) & \frac{K_{p,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} & \frac{1}{R_c C_c} & -\frac{K_{i,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{p,v} & K_{i,v} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

$$a(1,2) = \frac{1}{L_c} - \frac{K_{p,i}I_{Lc,0}}{L_c} - \frac{2K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} + \frac{K_{i,v}K_{p,i}x_{v,0}}{L_c} + \frac{K_{i,i}x_{i,0}}{L_c} + \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*}{L_c}$$

$$a(2,1) = \frac{1}{C_c} + \frac{2K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} + \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{C_c} - \frac{K_{i,v}K_{p,i}x_{v,0}}{C_c} - \frac{K_{i,i}x_{i,0}}{C_c} - \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*}{C_c}$$

$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} & \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} \\ 0 & -\frac{K_{p,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{p,v} \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

$$C(x_0, u_0) = [1 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 4} \quad D(x_0, u_0) = [0 \ 0]_{1 \times 2}$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) สังเกตได้ว่าแบบจำลองมีค่า $I_{Lc,0}$, $V_{out,0}$, $X_{v,0}$ และ $X_{i,0}$ ประกอบอยู่ในสมการซึ่งค่าที่กล่าวมาเรียกว่าการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state operation) การคำนวณหาทั้ง 4 ค่านี้สามารถหาได้จาก

$$V_{out,0} = V_{out}^* \quad (3)$$

$$I_{Lc,0} = \frac{V_{out,0}}{R_c(1-d)} \quad (4)$$

$$x_{v,0} = \frac{I_{Lc,0}}{K_{i,v}} \quad (5)$$

$$x_{i,0} = \frac{d}{K_{i,i}} \quad (6)$$

โดยที่ $d = \frac{V_{out} - V_{dc}}{V_{out}}$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน

การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จะใช้การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมตามทฤษฎีทางระบบควบคุมซึ่งพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลา และวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว เมื่อได้ผลของการออกแบบตัวควบคุมจากระบวนการทั้งสอง นำมาเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่อยู่บนพื้นฐานทางระบบควบคุม

1. การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมทางระบบควบคุม แสดงได้ใน Figure 3 โดยค่า $K_{p,v}$ และ $K_{i,v}$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในลูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่เป็นวงรอบปิดแสดงได้ดังสมการที่ (7)

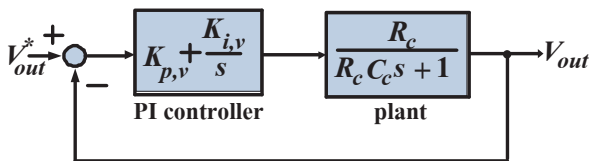


Figure 3 The block diagram of voltage loop control

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{out}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{p,v}s + K_{i,v}}{C_c}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{p,v}R_c + 1}{R_c C_c}\right)s + \left(\frac{K_{i,v}}{C_c}\right)} \quad (7)$$

เมื่อได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแล้ว ต้องนำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบสมการอันดับสองมาตรฐาน ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมในลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จาก นำสมการที่ (7) เทียบกับสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\begin{cases} K_{p,v} = \frac{2\zeta_v \omega_{n,v} R_c C_c - 1}{R_c} \\ K_{i,v} = \omega_{n,v}^2 C_c \end{cases} \quad (9)$$

1.2 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมทางระบบควบคุมเช่นเดียวกับลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า แสดงได้ใน Figure 4 โดยค่า $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในลูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่เป็นวงรอบปิดแสดงได้ดังสมการที่ (10)

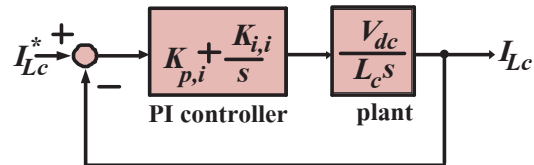


Figure 4 The block diagram of current loop control

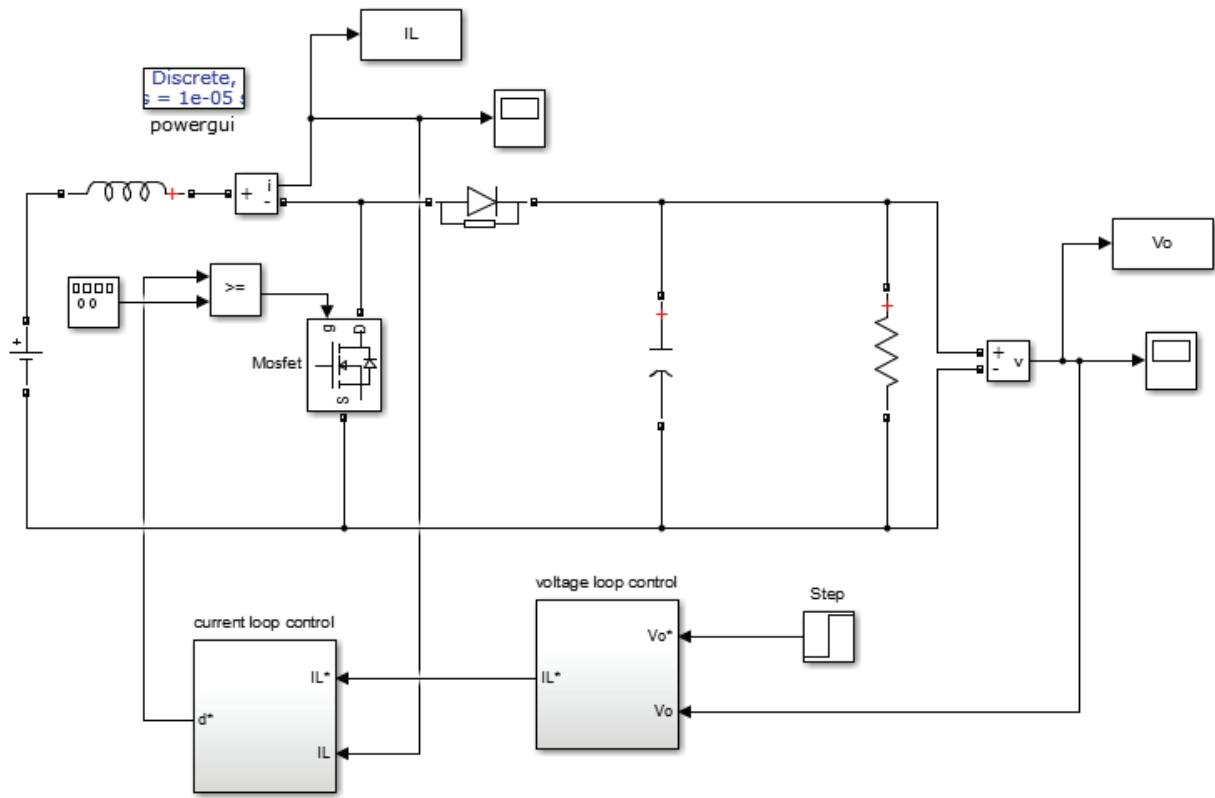


Figure 5 The exact topology model in the SimPowerSystem™ of MATLAB

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{out}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{p,i}s + K_{i,i}}{L_c}\right)V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{p,i}V_{dc}}{L_c}\right)s + \left(\frac{K_{i,i}V_{dc}}{L_c}\right)} \quad (10)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากการนำสมการที่ (10) เทียบกับสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\begin{cases} K_{p,i} = \frac{2\zeta_i \omega_{n,i} L_c}{V_{dc}} \\ K_{i,i} = \frac{\omega_{n,i}^2 L_c}{V_{dc}} \end{cases} \quad (11)$$

ในบทความนี้ตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของลูประแสไฟฟ้าและลูประแสไฟฟ้าที่ถูกออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอาศัยสมการที่ (9) และสมการที่ (11) โดยกำหนดให้ $V_{dc} = 24V$, $\omega_{nv} = 80 \text{ rad/s}$, $\omega_{ni} = 800 \text{ rad/s}$, $\zeta_v = 0.8$, $\zeta_i = 0.8$, $L_c = 15\text{mH}$, $C_c = 1000\mu\text{F}$, และ $R_c = 50\Omega$ ดังนั้น ผลการออกแบบตัวควบคุมที่ได้จากวิธีดั้งเดิมคือ $K_{p,v} = 0.108$, $K_{i,v} = 6.4$, $K_{p,i} = 0.8$, และ $K_{i,i} = 400$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันทั้ง 4 ค่า คือ $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ขั้นตอนต่อไปนำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่านี้ไปใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) ซึ่งต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะนำแบบจำลองไปออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว ผลการจำลองสถานการณ์จะพิจารณาเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของการจำลองสถานการณ์ด้วยระบบจริง (exact topology model) ผ่านบล็อกสำเร็จรูป SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดัง Figure 5 เทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น (GSSA model) โดยเงื่อนไขของการตรวจสอบความถูกต้องจะกำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{out}^* จาก 200 V เป็น 220 V ที่เวลา 1.5 วินาที แสดงได้ดัง Figure 6

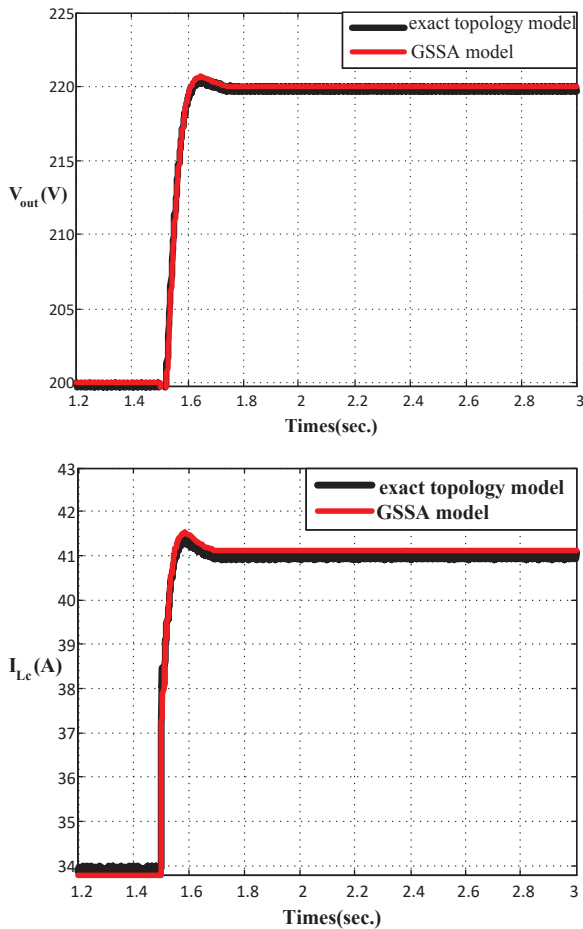


Figure 6 Response of V_{out} and I_{Lc}

จาก Figure 6 ผลการตอบสนองทางพลวัตของ V_{out} และ I_{Lc} ของทั้งสองแบบจำลองมีการตอบสนองในโดเมนเวลา ทั้งสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ที่สอดคล้องกันซึ่งหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถนำไปใช้ร่วมกับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวได้

2. การออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวนั้น อันดับแรกต้องมีความรู้ความเข้าใจหลักการ ทำงานของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถ ออกแบบตัวควบคุมและได้ผลการตอบสนองทางพลวัตตาม ที่ต้องการ ซึ่งรายละเอียดของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวและการออกแบบตัวควบคุม มีดังต่อไปนี้

2.1 อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวถูกประยุกต์และพัฒนา มาจากอัลกอริทึมแบบตามู โดยมีการเพิ่มเติมอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาคำตอบเดิมได้ (Back-tracking) และส่วน ที่ 2 การปรับลดค่ารัศมีของคำตอบในวงรอบนั้นๆ (Adaptive

radius) (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ซึ่งกระบวนการใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดค่าเริ่มต้นของรายการตามู (Tabu list: TL) และจำนวนรอบของการค้นหา (Count) ให้เท่ากับ 0

ขั้นตอนที่ 2: สุ่มค่าโดยการเลือกคำตอบเริ่มต้น S_0 จากพื้นที่การค้นหา (Search space) ซึ่งค่า S_0 ถูกตั้งไว้เป็นค่าต่ำสุดที่สุดของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local minimum) และกำหนดให้ S_0 เท่ากับค่าที่ดีที่สุดที่สุดของการค้นหาคำตอบรอบข้าง (Best neighbor) แสดงได้ใน Figure 7

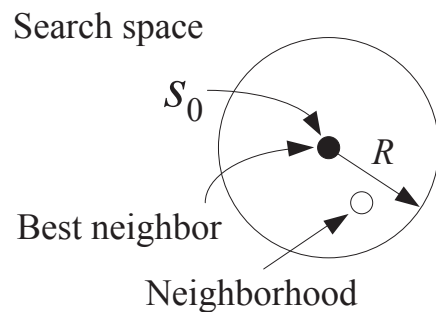


Figure 7 Random S_0 in search space

ขั้นตอนที่ 3: ทำการสุ่มเลือกคำตอบใหม่ N คำตอบ (Neighborhood) โดยทำการเดินรอบๆ คำตอบ S_0 ภายในพื้นที่ ค้นหา กำหนดให้ $S_1(r)$ เป็นเซตของคำตอบที่ประกอบไปด้วย คำตอบใหม่ทั้งหมด N คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4: ประเมินค่าของคำตอบที่อยู่ภายในเซต คำตอบ $S_1(r)$ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้คำตอบนั้นเป็นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด (Best neighbor 1) แสดงได้ใน Figure 8

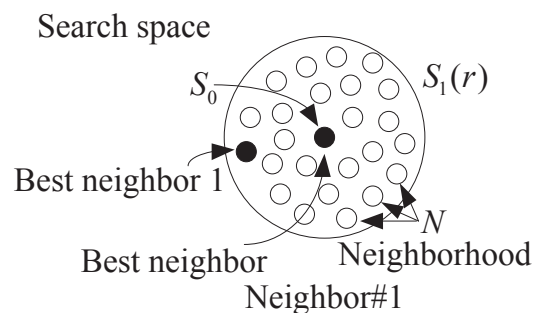


Figure 8 Neighborhood around S_0

ขั้นตอนที่ 5: ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ถ้า Best neighbor 1 < Best neighbor จากนั้นเก็บค่าของ Best neighbor ไว้ในรายการตาม และกำหนดให้ค่าของ Best neighbor = Best neighbor 1 แสดงได้ดัง Figure 9 และตั้งค่า $S_0 = \text{Best neighbor}$ แสดงได้ดัง Figure 10 ส่วนค่า Best neighbor 1 ให้เก็บไว้ในรายการของตาม

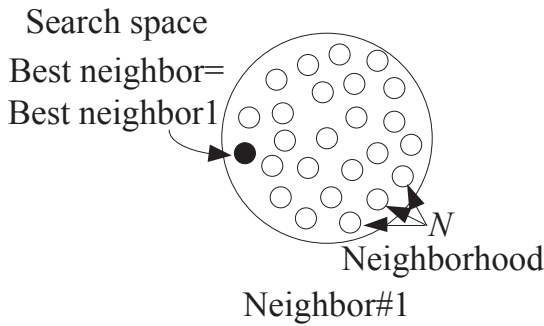


Figure 9 Assign a new Best neighbor

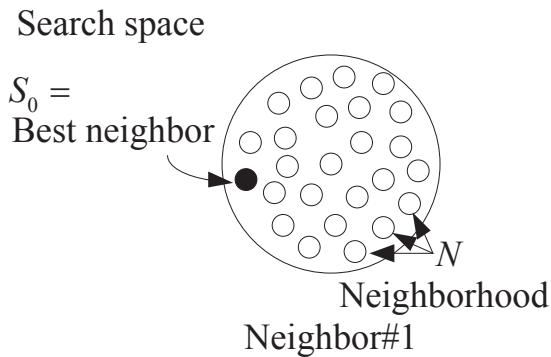


Figure 10 Assign a new S_0

ขั้นตอนที่ 6: ประเมินเกณฑ์การยุติการค้นหา (Termination criteria: TC) และเกณฑ์ปรารถนา (Aspiration criteria: AC) ถ้าจำนวนรอบการค้นหา (Count) \geq จำนวนรอบการค้นหาสูงที่สุด (Max Count) ให้หยุดกระบวนการค้นหา ค่าตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ค้นหามา ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นไปตามข้างต้น ให้กลับไปขั้นตอนที่ 2 และเริ่มกระบวนการค้นหาอีกครั้งจนกว่าเกณฑ์ที่พอใจ แสดงได้ดัง Figure 11

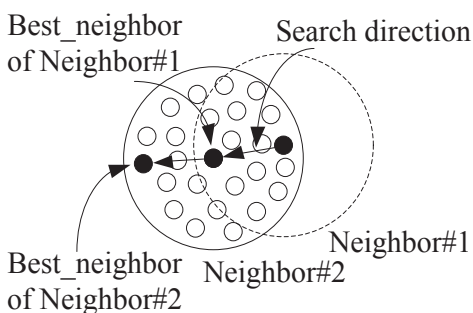


Figure 11 Searching process in the next iteration

สำหรับกระบวนการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิมได้ช่วยให้ระบบสามารถกลับไปในพื้นที่การค้นหาค่าตอบก่อนหน้านั้นได้ ซึ่งคำตอบอยู่ในรายการตาม คำตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกจากพื้นที่คำตอบที่ถูกย้อนรอยนี้และคำตอบปัจจุบันที่มีอยู่ แสดงใน Figure 12 รายละเอียดของการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิม เริ่มจากการกำหนดคำตอบใหม่ ให้เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหาพื้นที่ในการค้นหาใหม่ก็จะเกิดขึ้นด้วย นั่นคือการค้นหาโอกาสที่จะหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) คำตอบใหม่ที่ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่ปัจจุบัน กระบวนการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิมสามารถเพิ่มลงไปในช่วงขั้นตอนที่ 5 ทำให้ประสิทธิภาพของการค้นหาดียิ่งขึ้น

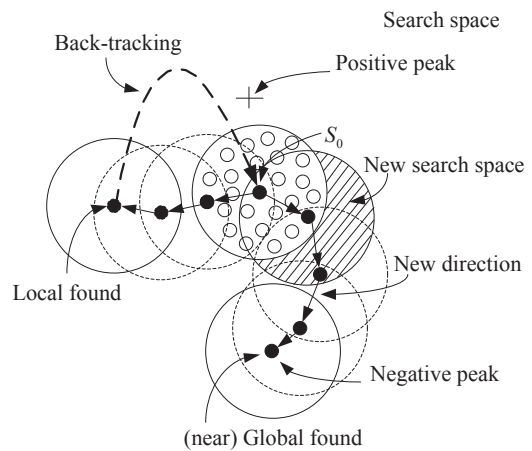


Figure 12 Back-tracking in ATS algorithm

กระบวนการปรับลดค่ารัศมีของการค้นหาค่าตอบตามที่แสดงใน Figure 13 โดยหลักการของกระบวนการนี้สามารถที่จะลดพื้นที่การค้นหาในระหว่างกระบวนการได้ กลไกการปรับลดรัศมีได้มีการพัฒนาเพื่อให้ปรับรัศมี (R) โดยใช้ค่าการประเมินเป็นองค์ประกอบในการปรับค่ารัศมี กล่าวคือเมื่อคำตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น รัศมีการค้นหาจะลดลงตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (12) กระบวนการปรับลดค่ารัศมีของการค้นหาค่าตอบสามารถเพิ่มลงไปในช่วงขั้นตอนที่ 6 ทำให้ประสิทธิภาพของการค้นหาดียิ่งขึ้น

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{12}$$

เมื่อ DF เป็นตัวประกอบการลดค่าของรัศมี (decreasing factor)

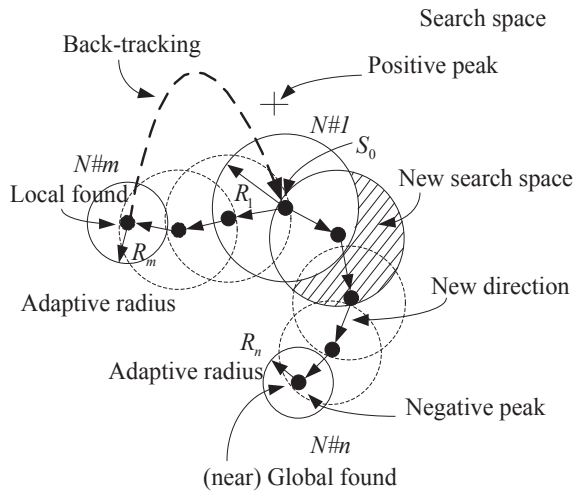


Figure 13 ATS algorithm with adaptive search radius

2.2 การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดัง Figure 14

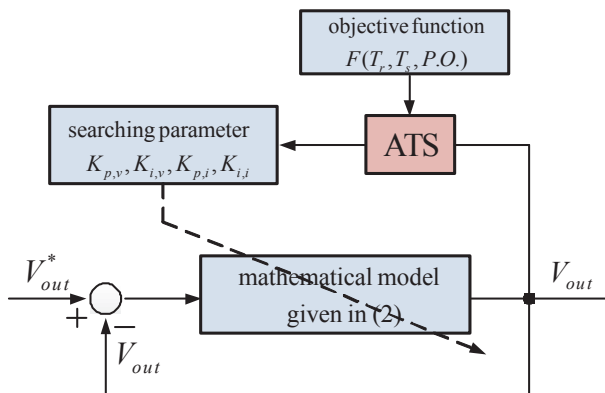


Figure 14 ATS methods for cascade PI controllers

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมใน Figure 14 เป็นกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว สำหรับค้นหาพารามิเตอร์ $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ซึ่งมีตัวชี้วัดของระบบด้วยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W พิจารณาได้ดังสมการที่ (13)

$$W = F(T_r, T_s, P.O.) = \sigma T_r + \alpha T_s + \gamma P.O. \quad (13)$$

และ

$$\sigma + \alpha + \gamma \quad (14)$$

เมื่อ

$P.O.$ = คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้า V_{out} ฟุงเกิน

T_r = คือ ค่าเวลาขาขึ้นของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

T_s = คือ ค่าเวลาเข้าที่ของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

ในบทความนี้ค่าของ σ , α และ γ ถูกตั้งค่าเป็น 0.34, 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว จะพยายามค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ดีที่สุดจะเท่าที่ทำได้ จนกว่าจะมี ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ W น้อยที่สุดนั่นคือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากกระบวนการค้นหาคำตอบให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (V_{out}) แสดงได้ดัง Figure 14 ขั้นตอนของการค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว มีวิธีการดังนี้:

ขั้นที่ 1: กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ให้มีค่าเท่ากับ [0.02 1], [1 20], [0.01 2] และ [100 2000] ตามลำดับ

ขั้นที่ 2: กำหนดให้ค่าเริ่มต้นสำหรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยการสุ่มค่าภายในพื้นที่การค้นหาตามที่กำหนดไว้ในขั้นที่ 1

ขั้นที่ 3: กำหนดให้ค่ารัศมีการค้นหาคำตอบ $R = 4$ และตัวประกอบการลดค่าของรัศมี $DF = 1.3$

ขั้นที่ 4: กำหนดเงื่อนไขของการปรับลดค่ารัศมีการค้นหาคำตอบและการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาคำตอบเดิม

ขั้นที่ 5: กำหนดให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W ซึ่งหาได้จากสมการที่ (13) และสามารถคำนวณได้จากผลการตอบสนองแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดในสมการที่ (2)

ขั้นที่ 6: กำหนดค่าสูงสุดของจำนวนรอบการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Max count) ในบทความนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 รอบ

ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใน Figure 1 ตัว

ควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว และการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม จะถูกจำลองสถานการณ์บนบล็อกสำเร็จรูป Sim Power System™ ในโปรแกรม MATLAB ที่แสดงไว้ดังFigure 5 โดย จุดมุ่งหมายของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว คือสามารถลดค่า ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W เพื่อให้บรรลุผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่ดีที่สุด ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบของ พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบจากวิธีดั้งเดิมและ อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว แสดงได้ดัง Table 1

Table 1 The comparison between ATS and conventional methods

Controller parameters	Design method	
	ATS algorithm	Conventional method
$K_{p,v}$	0.0825	0.108
$K_{i,v}$	3.8345	6.4
$K_{p,i}$	0.3873	0.8
$K_{i,i}$	564.5035	400
W	0.8574	1.2183

จาก Table 1 จะสังเกตได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว ทำให้ได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการค้นหาจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว และวิธีดั้งเดิม มาจำลองสถานการณ์ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} โดยกำหนดให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า V_{out}^* ของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จาก 200 V เป็น 220 V ที่เวลา 1.5 วินาที ได้ผลการตอบสนองทางพลวัต แสดงได้ดัง Figure 15 และผลการลู่เข้าหาค่าตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W แสดงได้ดัง Figure 16

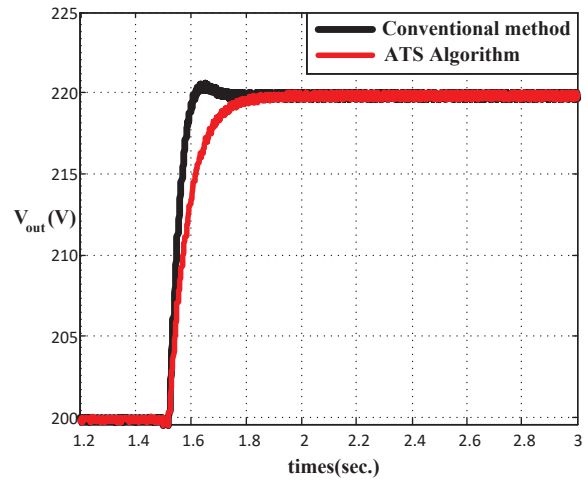


Figure 15 The comparison results of V_{out}

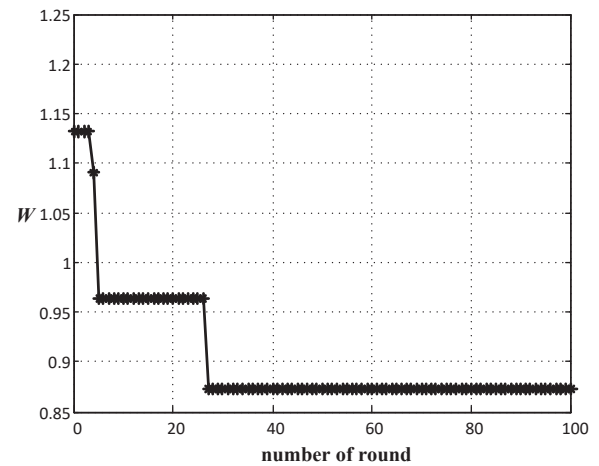


Figure 16 The convergence of W value from ATS algorithm

จาก Figure 15 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} ได้ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ทั้งในสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ซึ่งบ่งบอกในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้น (Rise-time) เวลาเข้าที่ (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent Overshoot) น้อยกว่า แสดงการเปรียบเทียบได้ดัง Table 2

Table 2 The comparison of rise-time (t_r), settling-time (t_s), and percent overshoot ($P.O.$) between ATS and conventional methods

Time-domain responses	Design method	
	ATS algorithm	Conventional method
t_r (sec.)	1.44	1.56
t_s (sec.)	1.85	2.23
$P.O.$ (%)	0	3.015

สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัว ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน จากการออกแบบตัวควบคุมพบว่า การออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัวมีผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้อัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัวช่วยให้ช่วงเวลาขาขึ้นกับเวลาเข้าที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินน้อยกว่า ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอจึงเหมาะสมสำหรับมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด เทคนิคการออกแบบที่นำเสนอเป็นประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกรสำหรับออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่ให้วิศวกรสามารถกรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

เดชา พวงดาวเรือง. (2557). การประยุกต์การค้นหาแบบแก๊งเพื่อออกแบบตัวควบคุม PI แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับตัวคุมค่าแรงดันอัตโนมัติ. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37)*, จังหวัดขอนแก่น, 801-804.

นนทพันธ์ พลพันธ์ และประชา คำภักดี. (2562). เทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคสำหรับการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON-42)*, จังหวัดนครราชสีมา.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). *ปัญญาเชิงคำนวณ* (พิมพ์ครั้งที่ 1). สำนักวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Azer, P., & Emadi, A. (2020). Generalized State Space Average Model for Multi-Phase Interleaved Buck, Boost and Buck-Boost DC-DC Converters: Transient, Steady-State and Switching Dynamics. *IEEE Access*, 77735-77745.

Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). Modeling of AC-DC Power System Feeding a Controlled Buck-Boost Converter. *Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014)*, Nakhon Ratchasima.

Chayinthu, W., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). The Dynamic Model of Electrical Aircraft System Feeding a Buck-Boost Converter. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya, 61-64.

Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., & Areerak K-L. (2012). The Optimal Cascade PI Controller Design of buck converters. *The 9th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012)*, Phetchaburi.

EL Moutaki, S., Abouloifa A., & Lachkar, I. (2018). Double loop nonlinear PI-Controller Strategy of the Boost Inverter. *Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE 2018)*, Casablanca.

Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 51(3), 661-668.

Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., & Sujitjorn S. (2004). *Harmonic Identification for Active Power Filters Via Adaptive Tabu Search Method*, LNCS (Lecture Notes in Computer Science), Springer-Verlag Heidelberg 2004, 3215, 687-694.

Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., Pao-la-or, P., Puangdownreong, D., & Sujitjorn S. (2005). Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques. *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck.

- Narongrit, T., Areerak, K-L., & Areerak, K-N. (2010). Design of an Active Power Filter using Genetic Algorithm Technique. *The 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED'10)*, Cambridge, 20-22.
- Pakdeeto, J., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). Large-signal model of DC micro-grid systems feeding a constant power load. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Kulworawanichpong, T., & Sujitjorn S. (2005). Application of adaptive tabu search to system identification. *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S. & Totarong, P. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. *In Proceedings IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT02)*, 915-920.
- Rabibaa, O., Mouna, B., Lassaad, S., Aymen, F. & Aicha, A. (2018). Cascade Control Loop of DC-DC Boost Converter Using PI Controller. *International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT 2018)*, Rabat.
- Salem, M., Jusoh, A., Rumzi, N., Idris, N., & Alhamrouni, I. (2014). Modeling and Simulation of Generalized State-Space Averaging for Series resonant converter. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2014)*, Perth.
- Sarwar, A., Shahid, A., Hudaif, A., Gupta, U., & Wahab, M. (2017). Generalized State-Space Model for an n-phase Interleaved Buck-Boost Converter. *4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON 2017)*, Mathura.
- Sujitjorn, S., Kulworawanichpong, T., Puangdownreong, D., & Areerak, K-N. (2006). Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design, *Book Chapters in Integrated Intelligent Systems for Engineering Design (ed. X. F. Zha and R. J. Howlett)*, IOS Press.
- Suyapan, A., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). A Controller Design of More Electric Aircraft Power Systems Using an Adaptive Tabu Search Algorithm. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.
- Tsang, K.M., & Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck converter. *IEE Proc.- Electr. Power*, 152(4), 827-831.
- Udomsak, S., Areerak, K-L., Areerak, T., & Areerak, K-N. (2017). Power Loss Identification of Three-phase Induction Motor Using Adaptive Tabu Search. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.

พฤติกรรมการเดินทาง และการเข้าถึงการใช้บริการรถ Shuttle bus ภายในมหาวิทยาลัย ขอนแก่น

Travel behavior and accessibility of shuttle bus in Khon Kaen University

หฤษิต ชาตาทิคุณ^{1*}, ลัดดา ตันวานิชกุล²
Haruesit Chatathicoon^{1*}, Ladda Tanwanichkul²

Received: 22 December 2019 ; Revised: 19 February 2021 ; Accepted: 12 March 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง ความพึงพอใจ แรงจูงใจของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus รวมทั้งนำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงแก้ไขการให้บริการรถให้มีประสิทธิภาพ และปริมาณการใช้บริการเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยสำรวจข้อมูลโดยการสำรวจกายภาพ และทำการสัมภาษณ์ข้อมูลด้วยแบบสอบถามจำนวน 920 ชุด ใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ปัจจัยตามด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว และการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกส์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้วิธีการวิเคราะห์ปัจจัย ที่ส่งผลต่อความพึงพอใจและแรงจูงใจของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ด้านการให้บริการ กายภาพ และเวลา นอกจากนี้พบว่า รถ Shuttle bus ที่ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขมากที่สุด ได้แก่ สายสีแดง รองลงมาคือ สายสีน้ำเงินและสายสีเขียวตามลำดับ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์การพยากรณ์ด้วยแบบจำลองถดถอยโลจิสติกส์ พบว่า ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ปัจจัยด้านกายภาพ กล่าวถึง หากแรงจูงใจทางด้านกายภาพเพิ่มขึ้น 1 คะแนน โอกาสที่ผู้ไม่ใช้จะอยากใช้บริการเพิ่มขึ้น 6.3 เท่า ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มปริมาณการใช้บริการ ควรให้ความสำคัญในการปรับปรุงด้านกายภาพ อาทิเช่น การปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกที่จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร การปรับปรุงช่องจอด และการปรับปรุงเส้นทางรถให้ครอบคลุมพื้นที่เพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: พฤติกรรมการเดินทาง แรงจูงใจ Shuttle bus

Abstract

This research studied the traveling behavior, satisfaction and motivation of users and non-users of a shuttle bus, and presents a concept of improving the efficiency of the service and increasing the number of users. Data were obtained by conducting a physical survey of parking areas, bus routes and current service problems. Interviews were conducted with 920 questionnaires and analysed for factors analysis techniques, one-way analysis of variance and logistic regression analysis. The results of the study, when using the factor analysis method to find the factors affecting the satisfaction and motivation of users and non-users, indicated that service, physical and time were statistically significant. It was found that the shuttle buses that should be improved the most were red lines, blue lines and green lines, respectively. However, the logistic regression model analysis showed that the physical factor is the factor that was significantly correlated. However, when physical incentives increased by 1 point, the chances of non-users wanting to use the service increased by 6.3 times. Therefore, in order to increase efficiency and increase users, it is important to focus on physical enhancements such as improving the facilities at the bus stop, bay parking lane improvements and improving the bus routes to cover more areas.

Keywords: Traveling behavior, Motivation, Shuttle bus

¹ นักศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

² รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

¹ Student, Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000

² Assoc. Prof., Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000

* Corresponding author ; Haruesit Chatathicoon, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40000, Thailand.

Haruesit.ch@kkumail.com

บทนำ

มหาวิทยาลัยขอนแก่นเป็นมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ มีจำนวนนักเรียน นักศึกษา อาจารย์ และบุคลากรที่มาเรียนและทำงานจำนวนมาก โดยในปี พ.ศ. 2561 ประชากรภายในมหาวิทยาลัยประกอบไปด้วย บุคลากรจำนวน 11,106 คน นักศึกษามีจำนวน 27,687 คนและนักเรียนโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น จำนวน 3,632 คน (Bureau of Academic Administration and Development, 2018) จึงทำให้เกิดความต้องการในการเดินทาง และทำกิจกรรมต่างๆ ในมหาวิทยาลัยเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน และทำให้เกิดปัญหาด้านการจราจรตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะในช่วงโมงเร่งด่วนเช้าและเย็น ในปี พ.ศ.2552 มหาวิทยาลัยขอนแก่น นำรถขนส่งมวลชน (KKU Shuttle bus) เข้ามาให้บริการแก่บุคลากรและนักศึกษาภายในมหาวิทยาลัย โดยไม่คิดค่าบริการ เพื่อลดการใช้รถส่วนบุคคล บรรเทาปัญหาการจราจรติดขัด อุบัติเหตุการจราจร และมลพิษภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยเริ่มแรกมีรถขนส่งมวลชนให้บริการจำนวน 5 คัน (ปัทมา อยู่เย็น, 2555) จนกระทั่งในปัจจุบันมีการเปลี่ยนชื่อเรียกเป็นรถ Shuttle bus และมีการเพิ่มจำนวนให้บริการเป็น 20 คัน (ฐานุตรา จันทระเกตุ, 2554) (Figure 1)



Figure 1 KKU Shuttle bus (ฐานุตรา จันทระเกตุ, 2554)

โดยเส้นทางการให้บริการรถ Shuttle bus ประกอบด้วย 6 สาย ได้แก่ (1) สายสีน้ำเงิน (2) สายสีแดง (3) สายสีส้ม (4) สายสีเขียว (5) สายสีเหลือง และ (6) สายสีม่วง มีตำแหน่งจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร 75 สถานีภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น แต่ในสภาพปัจจุบัน พบว่า รถ Shuttle bus ยังมีปัญหาและข้อบกพร่องบางประการ เช่น (1) ความถี่ที่ให้บริการไม่เพียงพอต่อผู้ใช้บริการ (2) จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร และไม่เข้าถึงผู้ใช้บริการ เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุให้รถ Shuttle bus มีผู้ใช้บริการไม่มากนัก

ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหาข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง ความพึงพอใจ และแรงจูงใจของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus (อาริยา หมัดหลี, 2559 ; KKU Smart Transit, 2015) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทาง ความพึงพอใจ และแรงจูงใจของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus เพื่อทำการนำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงแก้ไขการให้บริการรถ Shuttle bus ให้มีประสิทธิภาพ และเพิ่มปริมาณการใช้บริการรถ Shuttle bus ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่นให้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาการจราจรติดขัดในมหาวิทยาลัยขอนแก่น และสอดคล้องกับนโยบาย Green and smart Campus นำไปสู่เป้าหมายการเป็นมหาวิทยาลัยแนวหน้าในระดับสากลในอนาคต

วัตถุประสงค์

เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง ทศนคติ ความพึงพอใจและแรงจูงใจของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus เพื่อทำการนำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงแก้ไขการให้บริการรถ Shuttle bus ให้มีประสิทธิภาพ และเพิ่มปริมาณการใช้บริการรถ Shuttle bus ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่นให้มากขึ้น

วิธีการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยได้ศึกษาการให้บริการรถ Shuttle bus ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น จำนวนทั้งหมด 6 สาย ประกอบด้วย สายสีน้ำเงิน สายสีแดง สายสีส้ม สายสีเขียว สายสีเหลือง และสายสีม่วง ที่มีให้บริการภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (Figure 2)

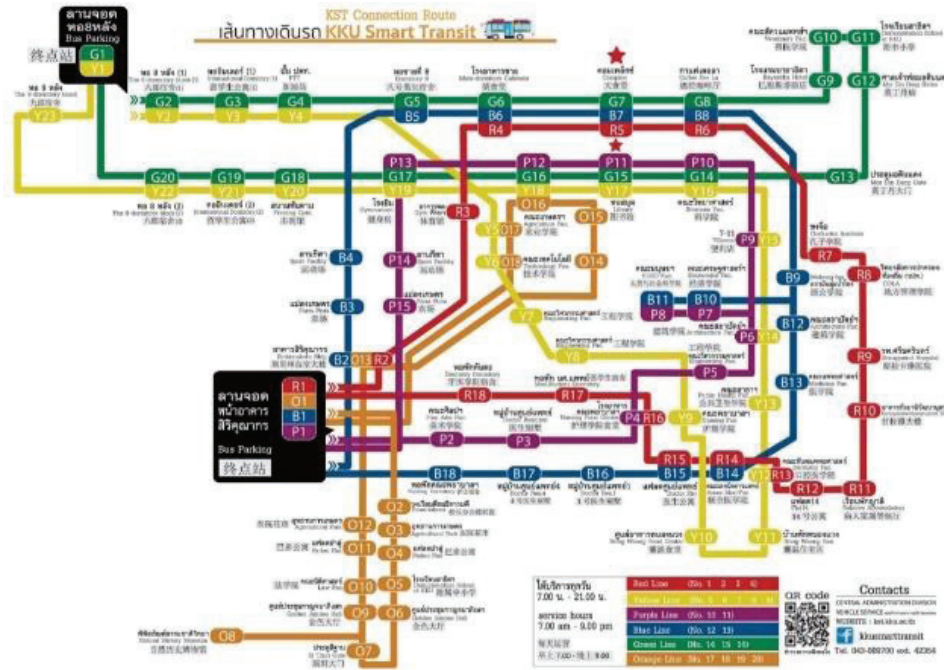


Figure 2 Shuttle bus routes in KKU [2]

สำรวจและรวบรวมข้อมูล

1. การสำรวจข้อมูลกายภาพ

จากการสำรวจข้อมูลกายภาพ คือ ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสารภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีจำนวนทั้งหมด 75 สถานี สามารถแบ่งประเภทป้ายออกเป็น 6 ประเภท มีรายละเอียดแต่ละประเภทดังต่อไปนี้

Table 1 Details of the bus stop type

Bus Stop type	Facilities	Figure
S	มีเพียงเฉพาะป้ายหยุดรถเท่านั้น	
S+	มีเพียงเฉพาะป้ายหยุดรถและมีช่องจอด (Bay parking)	
M	(1) ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร (2) ที่นั่งพักพิง และ(3) หลังคากันแดดกันฝน	
M+	(1) ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร (2) ที่นั่งพักพิง (3) หลังคากันแดดกันฝน และ(4) ช่องจอด	
L	(1) ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร (2) ที่นั่งพักพิง (3) หลังคากันแดดกันฝน และ (4) หน้าจอ LED แสดงเวลาการเดินทาง	
L+	(1) ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร (2) ที่นั่งพักพิง (3) หลังคากันแดดกันฝน (4) หน้าจอ LED แสดงเวลาการเดินทาง และ (5) ช่องจอด (Bay parking)	

2. การสำรวจข้อมูลผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการ

งานวิจัยนี้ใช้การสัมภาษณ์ด้วยแบบสอบถาม ซึ่งได้ทำการออกแบบจากการทบทวนการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ (กาญจน์กรอง สุอังคะ และคณะ, 2557 ; ปรีณา คำพุกกะ, 2559 ; ศรัญญา แก้วศรี, 2554 ; ศิเมวิชญ์ เรืองขำ, 2560 ; อนุภาค เสาร์เสาวภาคย์ และคณะ, 2554 ; Scott *et al.*, 2011) โดยเลือกใช้คำถามแบบปลายปิดในการสอบถามนักศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่นและนักเรียนโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยขอนแก่น จำนวน 920 ชุด ซึ่งเครื่องมือแบบสอบถาม สำหรับผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป ส่วนที่ 2 พฤติกรรมการเดินทางจุดต้นทาง-จุดปลายทาง (Scott *et al.*, 2011 ; Volosin, 2014 ; Jolaoe & Salawu, 2017) ส่วนที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle Bus และแบบสอบถามสำหรับผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป ส่วนที่ 2 พฤติกรรมการเดินทางจุดต้นทาง-จุดปลายทาง ส่วนที่ 3 แรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle Bus

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบด้วย 2 ส่วน (1) แบบสอบถามผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus จำนวน 460 ตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) (2) แบบสอบถามผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus จำนวน 460 ตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ได้แก่ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) และการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกส์ (Logistic Regression Analysis)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์กายภาพ

จากการสำรวจข้อมูลกายภาพของรถ Shuttle bus พบว่าป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร มีกระจายอยู่ทั่วบริเวณภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีจุดตั้งจุดการเดินทาง

ของผู้ใช้บริการ ได้แก่ โรงอาหาร หอพักภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น และคณะต่างๆ เป็นต้น ในขณะที่ป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ในบางจุดไม่มีการให้บริการหรือให้บริการน้อย โดยเฉพาะประเภทป้ายที่มีให้บริการเป็นประเภท S และ S+ ซึ่งไม่มีสิ่งอำนวยความสะดวกให้บริการแก่ผู้โดยสาร และป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ประเภท S กับ S+ วางอยู่ในตำแหน่งที่ผู้โดยสารไม่มีพฤติกรรมการเดินทางหรือใช้บริการป้ายจอดรับ-ส่งผู้โดยสารน้อย (Figure 3)

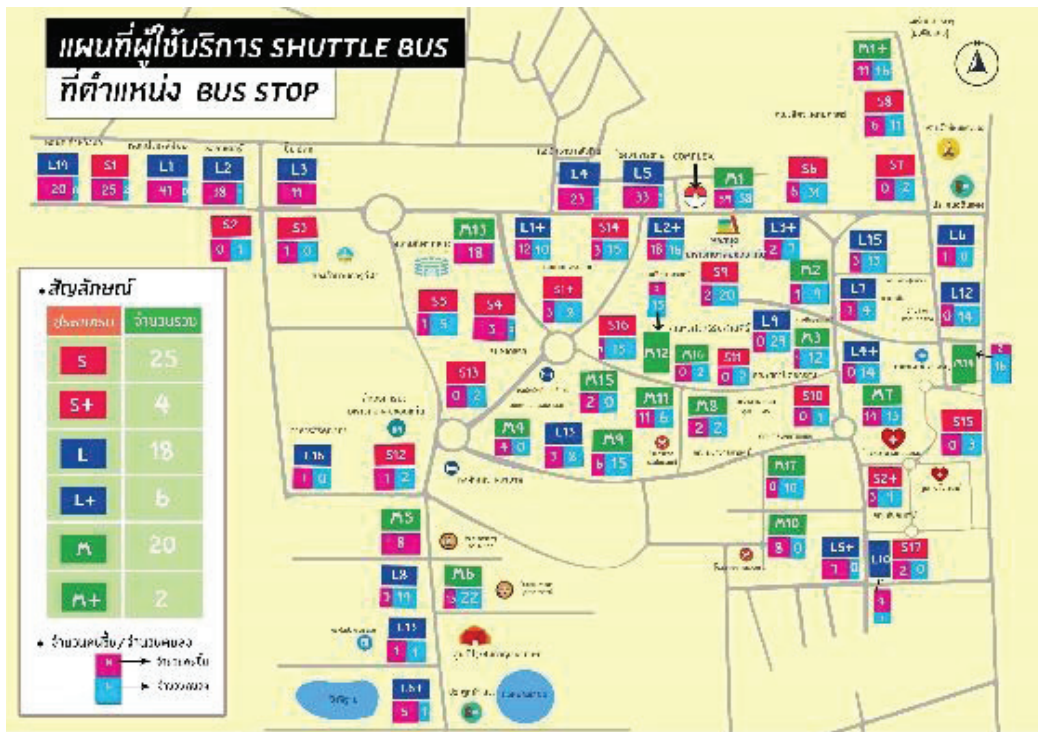


Figure 3 Bus stop

2. ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้รถ Shuttle bus

2.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้รถ Shuttle bus

จากการสำรวจพฤติกรรมการเดินทางจุดต้นทางของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus และตำแหน่งค่าพิกัดจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร พบว่า จุดต้นทางของผู้ใช้บริการ มีการกระจายตัวตามที่พักอาศัย และทำการเปรียบเทียบเทียบกับตำแหน่งจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ที่มีการให้บริการ สามารถแบ่งกลุ่มจำนวนผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus หอพักภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่นกับจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารของผู้ใช้บริการต้นทางเป็น 3 กลุ่ม

- กลุ่ม A (สีฟ้า) คือบริเวณหอพัก 8 หลัง หอพัก 9 หลัง และหอพักอินเตอร์
- กลุ่ม B (สีชมพู) คือบริเวณหอพักชายและหอพักหญิง

- กลุ่ม C (สีเทา) คือบริเวณหอพักนักศึกษาแพทยศาสตร์ หอพักคณะทันตะ และหอพักพยาบาล

ผลวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus หอพักในมหาวิทยาลัยขอนแก่นกับจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ดังนี้

- (1) ผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus โดยส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม A กลุ่ม B และกลุ่ม C ซึ่งเป็นผู้ที่พักอาศัยอยู่ในหอพักของมหาวิทยาลัยขอนแก่น เพราะระยะทางสามารถเดินไปยังจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารได้สะดวกและระยะทางไม่ห่างไกลมาก
- (2) ผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus ที่พักอาศัยอยู่นอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีระยะทางจากที่พักอาศัยไปยังจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารค่อนข้างห่างจากที่พักอาศัย จึงทำให้ไม่สามารถเดินทางมาใช้บริการจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ค่อนข้างน้อย (Figure 4)

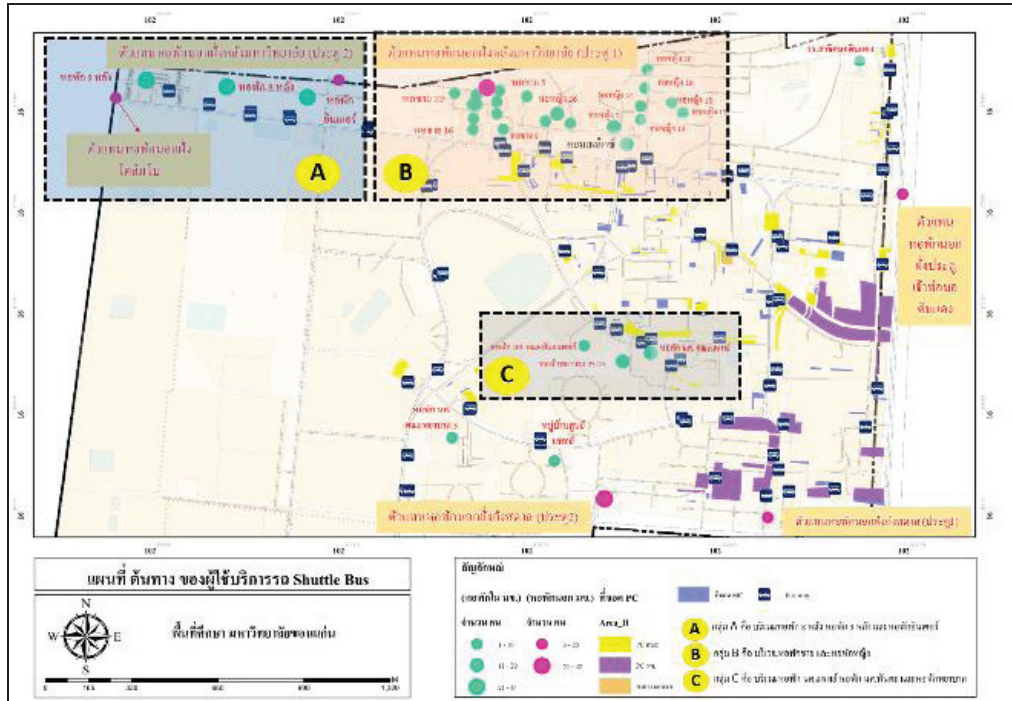


Figure 4 Map of the travel origin and bus stop (Shuttle bus user)

2.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ไม่ใช้รถ Shuttle bus

จากการสำรวจพฤติกรรมการเดินทางจุดต้นทางของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus นำข้อมูลไปกำหนดตำแหน่งค่าพิกัดจุดต้นทางของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus ลงในแผนที่ภูมิศาสตร์ พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลพฤติกรรมเดินทางส่วนใหญ่มีจุดต้นทางอยู่หอพักรอบมหาวิทยาลัย โดยแบ่งเป็น

หอพักในกับหอพักนอกมหาวิทยาลัยขอนแก่น และได้ทำการแบ่งสี เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวกับจำนวนที่แตกต่างกันของผู้ไม่ใช้บริการที่ตำแหน่งจุดต้นทาง ซึ่งจำนวนของผู้ที่พักอาศัยอยู่หอพักนอกบริเวณมหาวิทยาลัย มีจำนวนมากกว่าจำนวนของผู้ที่พักอาศัยอยู่ในบริเวณหอพักในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (Figure 5)

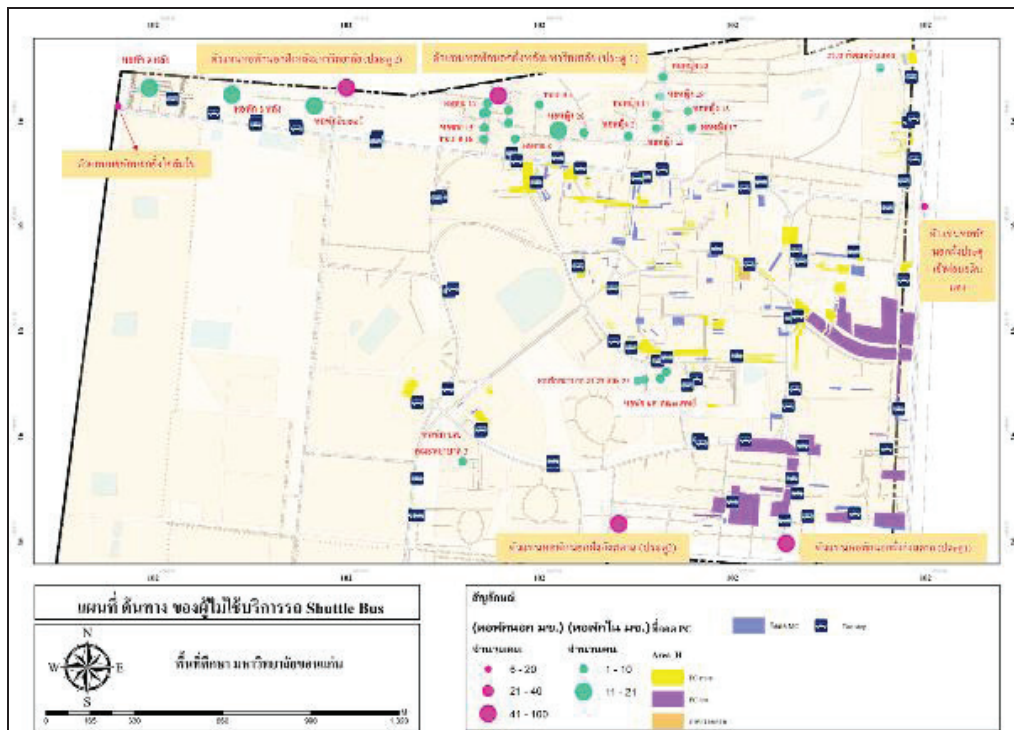


Figure 5 Map of the travel origin and bus stop (Shuttle bus non-user)

4.3 ข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

4.3.1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถ shuttle bus

ข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้ใช้บริการรถ shuttle bus จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 460 ชุด สามารถสรุปได้ดัง Table 2

Table 2 General information of shuttle bus users

Topics	frequency	%
เพศ		
ชาย	167	36
หญิง	293	64
อายุ		
13-15 ปี	20	4
16-18 ปี	83	18
19-22 ปี	303	66
22 ปีขึ้นไป	54	12
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน		
น้อยกว่า 5,000 บาท	204	44
5,000-10,000 บาท	216	47
15,000-20,000 บาท	30	7
มากกว่า 20,000 บาท	10	2
รถส่วนบุคคลที่มีครอบครอง		
รถจักรยาน	54	12
รถจักรยานยนต์	203	44
รถยนต์	56	12
ไม่มี	147	32
เหตุผลที่เลือกใช้รถ Shuttle bus		
ไม่มียานพาหนะส่วนบุคคล	159	35
ไม่มีที่จอดรถภายในคณะ	87	19

2. ข้อมูลทั่วไปของผู้ไม่ใช้บริการรถ shuttle bus

ข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้ไม่ใช้บริการรถ shuttle bus จากการสุ่มตัวอย่างจำนวน 460 ชุด สามารถสรุปได้ดัง Table 3

Table 3 General information of shuttle bus non-users

Topics	frequency	%
เพศ		
ชาย	200	43
หญิง	260	57
อายุ		
13-15 ปี	28	6
16-18 ปี	67	15
19-22 ปี	342	74
22 ปีขึ้นไป	23	5
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน		
น้อยกว่า 5,000 บาท	135	29
5,000-10,000 บาท	261	57
15,000-20,000 บาท	50	11

Table 3 General information of shuttle bus non-users (cont.)

Topics	frequency	%
มากกว่า 20,000 บาท	14	3
รถส่วนบุคคลที่มีครอบครอง		
รถจักรยาน	59	13
รถจักรยานยนต์	304	66
รถยนต์	80	17
ไม่มี	17	4
สาเหตุที่ไม่ใช้รถ Shuttle bus		
ไม่ทราบเส้นทางภายในมหาวิทยาลัย	79	17
ขออนุญาต		
รถ Shuttle bus ไม่วิ่งผ่านที่พักอาศัย	133	29
สถานที่เรียน มีที่จอดรถรองรับเพียงพอ	32	7
ใช้รถส่วนบุคคลประหยัดเวลาในการเดินทาง	155	34
มากกว่าใช้รถ Shuttle bus		
มีคณคอยมารับและไปส่งตลอดทั้งวัน	61	13

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ Shuttle bus และแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus

การวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยเกี่ยวกับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus และแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus ทั้งหมด 27 ข้อ มีการพิจารณาองค์ประกอบ KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) และ Bartlett's Test of Sphericity ในการทดสอบความเหมาะสมของตัวแปรอิสระของปัจจัยเกี่ยวกับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus และแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus ซึ่งความเหมาะสมที่จะใช้สกัดปัจจัยมีค่า KMO ที่ยอมรับได้ คือ 0.5-1 (อาริยา หมัดหลี, 2559) มีความหมายว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์ข้อมูล และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ไม่มีความสัมพันธ์กันและที่มีอิสระต่อกัน โดยพิจารณาจากค่าไอเกน (Eigenvalue) ตั้งแต่ 1.00 ขึ้นไป (อาริยา หมัดหลี, 2559) ทำให้ได้การสกัดปัจจัยแล้วจะเหลือเพียง 5 กลุ่มปัจจัย ซึ่งสามารถทำการจัดกลุ่มได้ใหม่ทั้งหมด 5 กลุ่มปัจจัย ประกอบด้วย (1) ด้านการให้บริการ (2) ด้านกายภาพ (3) ด้านความสะดวกสบาย (4) ด้านเวลา และ (5) ด้านความคุ้มค่า แสดงดัง Table 4

การเปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus กับสายบริการรถ Shuttle bus

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus กับสายบริการรถ Shuttle bus โดยการใช้ปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบปัจจัย (Factor Analysis) เพื่อยืนยันข้อคำถามเหล่านั้นอยู่ในองค์ประกอบ

ที่ถูกต้อง จากนั้นรวมคะแนนแต่ละด้านโดยใช้ค่าเฉลี่ย แล้วนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus กับสายบริการรถ Shuttle bus ในแต่ละด้านของเส้นทางที่ให้บริการ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ของความพึงพอใจผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus โดยการทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Bonferoni และในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติที่มีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ผลการเปรียบเทียบความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus ทั้ง 5 ด้าน และจำนวนสายรถ Shuttle bus 6 เส้นทางในการให้บริการ พบว่า ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus มีความแตกต่างกัน ในด้านการให้บริการ ด้านกายภาพ และด้านเวลา โดยที่ความพึงพอใจในด้านการให้บริการ มีเส้นทางสายสีส้ม มีความพึงพอใจเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาเส้นทางสายสีเหลืองและสายสีแดง ส่วนเส้นทางที่มีคะแนนน้อยที่สุด คือ เส้นทางสายสีม่วง ดังนั้นผู้ที่ให้บริการรถ

Shuttle bus สายสีม่วง ควรได้รับการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพงานบริการให้ได้มาตรฐานสูงขึ้น อาทิเช่น จัดให้มีกรอบรถงานบริการเส้นทางสายนี้เป็นอย่างแรก ในขณะที่ความพึงพอใจด้านกายภาพ พบว่า เส้นทางสายสีเขียว มีคะแนนความพึงพอใจสูงสุด รองลงมาเส้นทางสายสีน้ำเงิน และสายสีม่วง ส่วนเส้นทางที่ได้คะแนนน้อยที่สุด คือ เส้นทางสายสีเหลือง ดังนั้นเส้นทางสายสีเหลืองควรได้รับการจัดสรรงบประมาณ เพื่อที่จะพัฒนาปรับปรุงที่จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร

ความพึงพอใจด้านเวลา พบว่า ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจทางด้านเวลาในสายสีส้มสูงที่สุด รองลงมาเส้นทางสายสีม่วง และสายสีเหลือง ส่วนเส้นทางที่ได้คะแนนความพึงพอใจน้อยที่สุด คือ เส้นทางสายสีแดง เมื่อพิจารณาจากผู้ใช้บริการ ให้ความคิดเห็นอย่างชัดเจนว่า เวลารอคอยนาน และความถี่ที่ให้บริการน้อย ทำให้ถึงจุดหมายปลายทางล่าช้า จึงควรปรับปรุงเส้นทางสายสีแดงอย่างเร่งด่วน ดัง Table 5

Table 4 Satisfaction and motivation factors of the shuttle bus users and non-users

Details of satisfaction factors and motivation	Factor loading	Eigen values	% of Variance	Cumulative %
ด้านการให้บริการ		4.354	17.414	17.414
สภาพภายนอกรถ Shuttle bus นำให้บริการ	0.624			
เครื่องยนต์ไม่ส่งเสียงรบกวนผู้ใช้บริการภายในตัวรถ Shuttle bus	0.552			
ภาพรวมของ Shuttle bus ใน ด้านความสะดวกสบาย ของจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร	0.526			
ป้ายแผนที่บอกเส้นทางเดินรถแต่ละสายภายในรถ Shuttle bus มีความชัดเจนและเข้าใจง่าย	0.711			
อุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ภายในรถ Shuttle bus อยู่ในสภาพดี และพร้อมที่จะใช้งาน	0.642			
ภายในรถ Shuttle bus มีความเป็นระเบียบเรียบร้อย และมีการรักษาความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ	0.756			
พนักงานมีความเอื้อเฟื้อในการให้บริการเป็นอย่างดี เช่น เด็ก คนชรา คนพิการ เป็นต้น	0.671			
การให้บริการรถ Shuttle bus มีความปลอดภัยบนท้องถนน	0.91			
พนักงานขับรถ มีการแต่งกายสุภาพเรียบร้อย	0.718			
ด้านกายภาพ		2.262	9.048	41.901
จำนวนจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร เพียงพอ	0.748			
จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร มีตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมต่อการให้บริการ	0.812			
เส้นทางในการเดินรถ Shuttle bus มีความครอบคลุมพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น	0.804			
ช่องจอด มีขนาดเพียงพอต่อการเข้าจอดรถ Shuttle bus	0.788			
ด้านความสะดวกสบาย		3.860	15.438	32.852
ความสะดวกในการขึ้น-ลง รถ Shuttle bus	0.622			
มีจำนวนที่นั่งคอยบริเวณจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร เพียงพอต่อการให้บริการ	0.741			
ที่นั่งคอยจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร มีพนักงานสำหรับผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอ	0.825			
จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร มีหลังคาคลุมกันแดดกันฝน	0.803			
จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ป้ายแนะนำเส้นทางมีความชัดเจนและเข้าใจง่าย	0.818			

Table 4 Satisfaction and motivation factors of the shuttle bus users and non-users (cont.)

Details of satisfaction factors and motivation	Factor loading	Eigen values	% of Variance	Cumulative %
ด้านเวลา		1.437	5.748	54.370
รถ Shuttle bus มีการเดินรถตรงตามเวลาที่ประชาสัมพันธ์	0.668			
ความถี่ในการให้บริการรถ Shuttle bus เหมาะสม	0.818			
เวลาที่ใช้รอคอยรถ Shuttle bus ไม่นานจนเกินไป	0.773			
ด้านความคุ้มค่า		1.680	6.721	48.621
สามารถบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่นในช่วงโมงเร่งด่วน	0.620			
ลดจำนวนรถส่วนบุคคลที่เข้ามาใช้พื้นที่จอดรถ ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น	0.730			
การใช้บริการรถ Shuttle bus มีส่วนช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางในชีวิตประจำวัน	0.738			
สามารถลดมลภาวะทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ	0.653			

Table 5 Compare the satisfaction of shuttle bus users in various aspects

Users satisfaction	Mean satisfaction of Shuttle bus						F	p-value
	Yellow line	Red line	Orange line	Blue line	Purple line	Green line		
ด้านการให้บริการ	4.08	3.95	4.27	3.91	3.85	3.92	5.717	0.000
ด้านกายภาพ	3.33	3.54	3.41	3.69	3.61	3.71	3.665	0.003
ด้านความสะดวกสบาย	3.56	3.51	3.63	3.36	3.32	3.45	1.372	0.234
ด้านเวลา	3.89	3.58	3.97	3.66	3.91	3.73	4.079	0.001
ด้านความคุ้มค่า	3.94	4.01	4.05	3.98	4.00	4.06	0.519	0.762

ผลการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ของแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus

ในการวิเคราะห์ปัจจัยแรงจูงใจที่มีผลต่อการใช้บริการรถ Shuttle bus เพื่อทำนายโอกาสในการใช้บริการรถ Shuttle bus ด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกส์ โดยมีตัวแปรตาม (Y) 2 ค่า คือ ผู้ที่อยากใช้บริการรถ Shuttle bus (Y=1) และ ไม่อยากใช้บริการรถ Shuttle bus (Y=0) โดยทำนายจากแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการ 5 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านการให้บริการ (2) ด้านกายภาพ (3) ด้านความสะดวกสบาย (4) ด้านเวลา และ (5) ด้านความคุ้มค่า

สมการพยากรณ์ที่ได้มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากการทดสอบของ Hosmer and Lemeshow (p-value = 0.00) และค่า B ที่ได้จากการวิเคราะห์ Variables in the Equation คือ ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรสมการความถดถอยโลจิสติกส์ โดยสมการพยากรณ์ที่เหมาะสมพิจารณาจาก p-value น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า ด้านกายภาพมีค่า p-value เท่ากับ 0.00 สามารถอธิบายโอกาสที่จะเลือกใช้บริการรถ Shuttle bus ได้ร้อยละ 34.6 (R²=0.486) รายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

Table 6 Logistic regression analysis for the service selection of KKU shuttle bus

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)
ด้านการให้บริการ (X ₁)	0.240	0.210	1.301	0.254	1.271
ด้านกายภาพ(X ₂)	1.841	0.207	79.291	0.000	6.300
ด้านความสะดวกสบาย(X ₃)	0.151	0.172	0.772	0.380	1.163
ด้านเวลา (X ₄)	0.262	0.184	2.019	0.155	0.770
ด้านความคุ้มค่า (X ₅)	0.144	0.187	0.592	0.442	1.155
ค่าคงที่	6.383	1.428	19.976	0.000	0.002

N = 460, -2 Log likelihood = 454.729, Nagelkerke R Square = 0.346

เมื่อสามารถสร้างสมการพยากรณ์เพื่อทำนายโอกาสที่เลือกใช้บริการรถ Shuttle bus ของผู้ไม่ใช้บริการ โดยทำนายได้จากตัวแปรพยากรณ์ 1 ตัว ได้แก่ แรงจูงใจด้านกายภาพ (X₂) (ดังสมการที่ 1) นอกจากนี้พบว่า หากแรงจูงใจด้านกายภาพ มีระดับคะแนนความสำคัญเพิ่มขึ้น 1 ระดับคะแนน

โอกาสที่ผู้ไม่ใช้จะอยากใช้บริการรถ Shuttle bus เพิ่มขึ้น 6.3 เท่า ซึ่งพิจารณาจากค่า $\text{Exp}(B)$ รายละเอียดดังสมการที่ (2)

$$Z \text{ (ความต้องการใช้บริการ)}$$

$$= -6.383 + 1.841 (X_2) \quad (1)$$

$$P \text{ \{เลือกใช้บริการรถ Shuttle bus\}}$$

$$= \frac{1}{1+e^{-(6.383+1.841(X_2))}} \quad (2)$$

ตัวอย่าง สมการถดถอยโลจิสติกส์ สามารถนำมาทำนายการเกิดเหตุการณ์การเลือกใช้บริการรถ Shuttle bus เมื่อผู้ไม่ใช้บริการให้ระดับคะแนนของแรงจูงใจด้านกายภาพ (X_2) เท่ากับ 4 คะแนน ความน่าจะเป็นของผู้ไม่ใช้จะอยากใช้บริการรถ Shuttle bus จะได้ดังนี้

$$P \text{ \{เลือกใช้บริการรถ Shuttle bus\}}$$

$$= \frac{1}{1+e^{-(6.383+1.841(X_2))}}$$

$$= \frac{1}{1+e^{-(6.383+1.841(4))}}$$

$$= 0.727$$

แสดงว่าโอกาสของผู้ไม่ใช้จะอยากใช้บริการรถ Shuttle bus เท่ากับ 0.727

สรุป

พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้และผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus

ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus พบว่า ผู้ใช้ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 64 และเพศชายร้อยละ 36 สำหรับอายุโดยส่วนใหญ่มีช่วงอายุ 19-22 ปี คิดเป็นร้อยละ 66 และผู้ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพนักศึกษาร้อยละ 88 มีรายได้ต่อเดือน 5,000-10,000 บาท ในขณะที่มีรถส่วนบุคคลที่ครอบครองโดยส่วนใหญ่เป็นรถจักรยานยนต์ร้อยละ 44 และเหตุผลที่ผู้ใช้เลือกใช้บริการรถ Shuttle bus โดยส่วนใหญ่ใช้เพราะประหยัดค่าใช้จ่าย

ข้อมูลทั่วไปของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus พบว่า ผู้ไม่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง ร้อยละ 57 และเพศชายร้อยละ 43 สำหรับอายุโดยส่วนใหญ่มีช่วงอายุ 19-22 ปี คิดเป็น

ร้อยละ 74 และผู้ไม่ใช้โดยส่วนใหญ่ประกอบอาชีพนักศึกษา ร้อยละ 89 มีรายได้ต่อเดือน 5,000-10,000 บาท ในขณะที่มีรถส่วนบุคคลที่ครอบครองโดยส่วนใหญ่เป็นรถจักรยานยนต์ร้อยละ 66 และสาเหตุที่ไม่เลือกใช้บริการรถ Shuttle bus โดยส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องจากมีทางเลือกที่ดีกว่าใช้บริการรถ Shuttle bus เพราะการใช้รถส่วนบุคคลประหยัดเวลาในการเดินทางมากกว่าใช้บริการรถ Shuttle bus

จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารมีจำนวน 75 สถานี กระจายอยู่ทั่วมหาวิทยาลัย และมีการจำแนกประเภทออกเป็น 6 ประเภท ประกอบด้วย ประเภท S ประเภท S+ ประเภท M ประเภท M+ ประเภท L และประเภท L+ จำแนกตามสิ่งอำนวยความสะดวกสบายแก่ผู้มาใช้บริการรถ Shuttle bus

ข้อมูลเส้นทางเดินรถ Shuttle bus จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูล ทำให้ทราบถึงสถานที่ที่เป็นจุดดึงดูดการเดินทางของผู้ใช้บริการ ประกอบด้วย (1) โรงอาหารเป็นสถานที่ที่มีการเดินทางมากที่สุด (2) โรงพยาบาลศรีนครินทร์ มีการเดินทางมายังสถานที่นี้โดยรวมรองลงมา และ (3) อาคารจอดรถบริเวณคณะบริหารธุรกิจ ซึ่งสถานที่ข้างต้นเป็นจุดดึงดูดการเดินทางที่มีปริมาณคนขึ้น-ลง เป็นจำนวนมาก

ผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus ส่วนใหญ่เป็นผู้ที่พักอาศัยอยู่ในหอพักของมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้บริการจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ที่มีระยะทางใกล้เคียงในการเลือกใช้บริการ สำหรับผู้ไม่ใช้บริการ ส่วนใหญ่พักอาศัยอยู่หอพักนอกของมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีระยะทางจากที่พักอาศัยไปยังจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารที่ค่อนข้างไกล เนื่องจากจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร อยู่ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น ส่งผลให้ถ้าต้องการเลือกใช้บริการรถ Shuttle bus จำเป็นต้องเดินทางมาใช้บริการ ทำให้ไม่สามารถเข้าถึงจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารได้ไม่สะดวก จึงใช้การเดินทางด้วยรูปแบบอื่น

สรุปผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถ Shuttle bus

ปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความพึงพอใจ ประกอบด้วย 1) ด้านการให้บริการ 2) ด้านกายภาพ และ 3) ด้านเวลา ซึ่งสอดคล้องกับหลายการศึกษาก่อนหน้า ปัจจัยด้านการให้บริการและด้านเวลาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการอย่างมาก (ปัทมา อยู่เย็น, 2555 ; ฐานุตรา จันทระเกตุ, 2554 ; อาริยา หมัดหลี่, 2559 ; KKU Smart Transit, 2015 ; กาญจนกรรณ สุอังคะ และคณะ, 2557 ; ปวีณา คำพุกกะ, 2559 ; ศรีัญญา แก้วศรี , 2554 ; ศิณวิชัย เรืองขำ, 2560 ; อนุภาค เสาร์เสาวภาคย์ และคณะ, 2554) โดยภาพรวมความพึงพอใจด้านการให้บริการของเส้นทางสายสีส้มและสายสีเหลือง สร้างความพึงพอใจให้กับผู้ใช้บริการสูงสุด ส่วนเส้นทางสายสีแดง สายสีม่วง และสายสี

เขียว เป็นกลุ่มที่ควรได้รับการพัฒนาปรับปรุงในงานบริการมากกว่าสายสีเหลือง

ในขณะที่ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจทางด้านกายภาพในเส้นทางสายสีเขียวและสายสีน้ำเงินสูงที่สุด ในขณะที่สายอื่นๆ ควรพัฒนาปรับปรุงด้านกายภาพหรือจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

จากสภาพปัญหาด้านกายภาพและการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้ สามารถเห็นถึงสภาพปัญหาของที่พักอาศัยหอพักในมหาวิทยาลัย พบว่า บริเวณหอพักยังไม่มีความสะดวกสบายที่จะเดินทางไปใช้บริการรถ Shuttle bus

นอกจากนี้ผู้ใช้บริการเส้นทางสายสีส้ม สายสีม่วง และสายสีเหลือง มีความพึงพอใจในด้านเวลาสูงกว่าค่าเฉลี่ยรวมทุกสาย ในขณะที่เส้นทางสายสีแดง น้ำเงิน และสายสีเขียว ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ควรมีการจัดการเส้นทางเดินรถใหม่ เพื่อให้ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจมากขึ้นและสามารถเดินทางได้รวดเร็วมากขึ้น

สภาพปัญหาด้านเวลาและการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้ สามารถเห็นถึงกลุ่มผู้ใช้บริการที่พักอาศัยอยู่ห่างจากจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ทำให้ต้องเดินทางมาใช้บริการที่สถานีหน้าคอมเพล็กซ์ ส่งผลให้ใช้เวลาในการเดินทางเพิ่มมากขึ้น ทำการปรับปรุงเส้นทางของสายสีเขียว

สรุปปัจจัยที่มีผลต่อแรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ Shuttle bus

ผลการวิเคราะห์การพยากรณ์แรงจูงใจของผู้ไม่ใช้บริการรถ shuttle bus ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติกส์ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แรงจูงใจทางด้านกายภาพเพิ่มขึ้น 1 คะแนน โอกาสที่ผู้ไม่ใช้จะอยากใช้บริการรถ Shuttle bus เพิ่มขึ้น 6.3 เท่า และสามารถสร้างสมการพยากรณ์ เพื่อทำนายโอกาสที่จะเลือกใช้บริการรถ Shuttle bus ของผู้ไม่ใช้บริการ จากตัวแปรพยากรณ์ 1 ตัวแปร คือ แรงจูงใจด้านกายภาพ ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และเพิ่มปริมาณการใช้บริการ ควรให้ความสำคัญในการปรับปรุงด้านกายภาพ อาทิ เช่น

(1) การปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกที่จุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร ได้แก่ หลังคากันแดดกันฝน และหน้าจอแสดงสถานะของรถ Shuttle bus

(2) การปรับปรุงจุดจอดรับ-ส่งผู้โดยสารให้มีช่องจอด (Bay parking) ที่มีขนาดเพียงพอต่อการเข้าจอดรถ Shuttle bus และ

(3) ปรับปรุงเส้นทางเดินรถ Shuttle bus ให้ครอบคลุมพื้นที่เพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนงบประมาณจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- กาญจน์กรอง สุธังคะ และคณะ. (2557). ระบบขนส่งสาธารณะสำหรับผู้สูงอายุในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. สำนักวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จันทรา จันทร์เกต. (2554). ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการต่อคุณภาพของการให้บริการรถยนต์โดยสารประจำทางของบริษัทขนส่ง จำกัด ณ สถานีขนส่งผู้โดยสารจังหวัดสระบุรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ปวีณา คำพุกกะ. (2559). ความเต็มใจของนักศึกษาและบุคลากรในการจ่ายค่าบริการรถตู้โดยสารสาธารณะเส้นทางมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีปลายทางสถานีขนส่งอุบลราชธานี. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยฟาร์อีสเทอร์น, 10(1), 21-32
- ปัทมา อยู่เย็น. (2555). การจัดตารางเวลาเดินรถขนส่งมวลชนภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้โปรแกรมเอกเซลโซลเวอร์. [ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น].
- ศรัญญา แก้วศรี. (2554). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้ใช้บริการรถโดยสารปรับอากาศเส้นทางสุราษฎร์-กรุงเทพฯ ในจังหวัดสุราษฎร์ธานี. [บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี].
- ศิมวิษญ์ เรืองขำ. (2560). ทศนคติและพฤติกรรมของผู้ใช้บริการรถตู้โดยสารเส้นทางกรุงเทพฯ (เอกมัย)-บางแสน. [รัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยบูรพา].
- อนุภาค เสาร์เสาวภาคย์ และคณะ. (2554). ปัจจัยที่มีผลต่ออุปสงค์การใช้บริการรถสาธารณะ (สีล้อแดง) กรณีศึกษา : กลุ่มวัยรุ่นในจังหวัดเชียงใหม่. วารสารวิทยาการจัดการ, 28(1), 17-31.
- อาริยา หมัดหลี. (2559). ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการรถโดยสารประจำทางของบริษัท วีระกร จำกัด เส้นทางหาดใหญ่-สุโขทัย. [ปริญญารัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยหาดใหญ่].
- Bureau of Academic Administration and Development. (2018). Number of students and personnel of Khon Kaen University. [Online]. <https://registrar.kku.ac.th/home/>.

Jolaoye, A.A. & Salawu, A.O. (2017). Assessment of Students Satisfaction And Propensity of Patronage of Intra-Campus Shuttling Bus in Hussainiadamu Federal Polytechnic Kazaure: A Qualbus Approach. Kazaure. *Journal Of Humanities And Social Science*, 22(12), 15-22.

KKU Smart Transit. (2015). *KKU Smart Transit*. [Online]. <http://kst.kku.ac.th/>.

Scott M., Sarker M., Peterson D., Hough J. (2011). *University of North Dakota Campus Shuttle Study, Final report*. Small Urban & Rural Transit Center Upper Great Plains Transportation Institute North Dakota State University Fargo, ND.

Volosin, S.E. (2014). *A Study of University Student Travel Behavior* A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the [Degree Doctor of Philosophy, University of Arizona state].

คุณภาพอากาศภายในอาคารและความสัมพันธ์กับกลุ่มอาการผิวหนังของนักศึกษาแพทย์ขณะเรียนมหกายวิภาคศาสตร์

Indoor air quality and its associations with skin related syndrome among medical students during gross anatomy dissection

เสาวนีย์ นน่อแก้ว¹, ปณิตธร ธรรมบุตร¹, รัชชพงศ์ ไชยเดช¹,
กาญจนา ช้างแก้ว¹, ณัฐพงศ์ ยมสมิต¹, อารุญ เกตุสาคร^{1*}
Saowanee Norkaew¹, Pannathorn Thammabut¹, Ratchapong Chaiyadej¹,
Kanjana Changkaew¹, Nattapong Yamasamit¹, Arroon Ketsakorn^{1*}

Received: 9 September 2019 ; Revised: 23 December 2019 ; Accepted: 4 January 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบภาคตัดขวางโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารปฏิบัติการกายวิภาคและหาความสัมพันธ์กับกลุ่มอาการผิวหนังของนักศึกษาแพทย์ขณะเรียนมหกายวิภาคศาสตร์ซึ่งดำเนินการเก็บข้อมูลระหว่างเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 4 เดือน เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากผู้วิจัยและใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์สำหรับตรวจวัดพารามิเตอร์อากาศภายในอาคาร แบบสอบถามประกอบด้วยลักษณะของประชากร ลักษณะของอาคาร และกลุ่มอาการผิวหนัง ใช้สถิติสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สันและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมนสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามี 12 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มอาการผิวหนังของนักศึกษาแพทย์ขณะเรียนมหกายวิภาคศาสตร์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเห็นได้ชัดเจนว่ามี 3 ปัจจัยจาก 12 ปัจจัย(ความชื้นสัมพัทธ์ จำนวนแบคทีเรียทั้งหมดในอากาศ และความเข้มของแสงสว่าง) ที่มีอิทธิพลกับกลุ่มอาการผิวหนังโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยพยากรณ์การเกิดกลุ่มอาการผิวหนังโดยพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยสามารถทำนายการเกิดกลุ่มอาการผิวหนังได้อย่างแม่นยำร้อยละ 99.1 ดังนั้น ควรดำเนินการจัดการทั้ง 3 ปัจจัยโดยการประยุกต์หลักวิศวกรรมเพื่อควบคุมคุณภาพอากาศภายในอาคารปฏิบัติการทางกายวิภาคให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: กลุ่มอาการผิวหนัง คุณภาพอากาศภายในอาคาร มหกายวิภาคศาสตร์ ห้องปฏิบัติการ นักศึกษาแพทย์

Abstract

The purpose of this cross-sectional study was to assess associations of skin related syndrome (SRS) related to indoor air concentration in a dose-dependent manner among medical students during gross anatomy dissection at a university in Thailand. The study was conducted between August and November 2018. Data collection involved using questionnaires which were developed by the researchers and used appropriate analytical instruments for the measurements of indoor air parameters. The questionnaires contained items related to population characteristics, building characteristics, and SRS. Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation were used to analyze data. The results showed that there were 12 factors significantly associated with SRS during gross anatomy dissection by medical students ($P < 0.05$). Apparently, there were three influencing variables which included relative humidity, total bacteria in indoor air, and light intensity as tested using regression analysis. A regression model was run to predict the SRS of medical students from the 3 variables. These variables could significantly predict the SRS of medical students with a total success rate of 99.1% ($R^2 = 0.991$). Therefore, efforts should be made to manage those

¹ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

¹ Faculty of Public Health, Thammasat University Rangsit Center, Phahon Yothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani, 12121, Thailand

* Corresponding Author: Asst. Prof. Dr. Arroon Ketsakorn, Faculty of Public Health, Thammasat University Rangsit Center, Phahon Yothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani, 12121, Thailand, Email: arroon.k@fph.tu.ac.th; Phone: +66 2564 4440 ext. 7422; Fax: +66 2516 2708

variables by applying an engineering approach to controlling the environmental parameters related to indoor air quality in the gross anatomy laboratory room.

Keywords: skin-related syndrome ; indoor air quality ; gross anatomy dissection ; laboratory room ; medical students

Introduction

In Thailand, indoor air pollution is a topic of interest. Due to economic growth and urban development, construction of high-rise buildings as well as department stores, schools and offices may cause indoor air pollution. The Environmental Protection Agency (EPA), a Federal agency of the United States of America, stated that workers spent up to 90% time in an indoor environment each day (US Environmental Protection Agency, 2020). Notably, improper ventilation in the building leads to sick building syndrome (Zamani *et al*, 2013 ; Ponsoni & Raddi, 2010). According to a Public Health Statistics report, the morbidity rate of respiratory diseases has increased more over the past decade as has the mortality rate (Ministry of Public Health, 2018). Indoor air quality and sick building syndrome (SBS) are related to various illnesses (Zamani *et al*, 2013). SBS is a group of non-specific symptoms of general complaints such as skin related symptoms (SRS), general-ill related symptom (GRS) and mucosal related symptom (MRS) (Reuben *et al*, 2019). Previous literature indicated an association between environmental indoor air concentrations of gasses such as carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), as well as total volatile organic compounds: VOCs (ppm), temperature (°C), relative humidity (RH%), microorganisms and SBS (Sahlberg *et al*, 2013 ; Sun *et al.*, 2013 ; Lu *et al.*, 2016). The World Health Organization (WHO) defined SBS as an excess of building related irritations of the skin, mucosal membranes and others, including headache, fatigue, eye irritation, cough, tight chest, nasal stuffiness, wheeze and difficulty in breathing (Ponsoni & Raddi, 2010).

Indoor air quality concerns the air quality in and around gross anatomy laboratory buildings and facilities, which certainly affect the health and comfort of staff and medical students (Merrill, 2008). Poor air quality poses enormous health problems to workers, medical students and the environment as it may cause SRS (Reuben *et al*, 2019). The purpose of this cross-sectional study was to assess associations of SRS related to the concentration

of contaminants in indoor air in a dose-dependent manner among medical students during gross anatomy dissection in a university in Thailand.

Materials and methods

Study area

The study area was a gross anatomy dissection study room located on the 1st floor of a building a, Thammasat University, Thailand. This gross anatomy dissection room was ventilated naturally as shown in Figure 1. Indoor air quality monitoring areas were set as 4 areas as shown in Figure 2 ;

Area A: contain 1 group of students (Group 1)

Area B: contain 3 groups of students (Group 2, 5, and 8)

Area C: contain 4 groups of students (Group 3, 4, 6, and 7)

Area D: No students



Figure 1. Gross anatomy dissection study room.

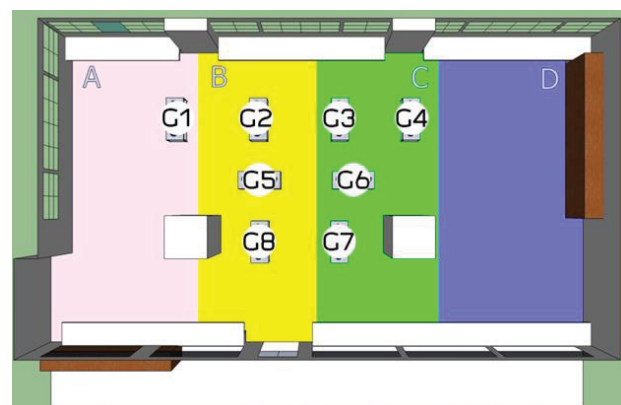


Figure 2 Indoor air quality monitoring area.

Study design and participants

A cross-sectional study was conducted between August and November 2018. The study was carried out among students who studied gross anatomy dissection.

All participants were over 18 years old students and were chosen through random sampling. The recruitment process was based on the inclusion and exclusion criteria. As a result, 53 students were recruited as participants and were separated to work on 6 anatomical parts as follows ;

1) Anatomy of back and suboccipital region: designated 'Back'

2) Pectoral region, axilla and upper extremities: designated 'Upper limb'

3) Muscle of facial expression and mastication: designated 'Superficial face'

4) Dissection of temporal region and TMJ: designated 'Deep face'

5) Dissection of triangle of neck: designated 'Anterior Neck'

6) Anterior abdominal wall and abdominal organs: designated 'Abdominal'.

Data collection and Instruments

Questionnaires were completed by face-to-face interviews with all participants after class had finished. General information and SRS during gross anatomy dissection were assessed via questionnaires. The questionnaires were developed and adopted from previous studies by researchers based on the severity level which was approved by 3 experts before data collection with IOC ; 0.70-1.00.

The environmental parameters related to indoor air quality, total fungi and bacteria in ambient air were measured using IAQ meter and impactors. The Indoor air quality meter (Q-TRAK Indoor Air Quality Monitor Model 7575) was calibrated to measure carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), total volatile organic compounds (TVOCs), temperature and relative humidity (RH%). An impactor (Bio Sampler: SAS SUPER ISO 100) was calibrated and set up at flow 100 liters/minute with a dish containing trypticase soy agar for bacteria and malt

extract agar for fungi. A Personal pump with sorbent tube (10% ; 2- hydroxyethyl) piperidine on XAD-2, 120 mg/60 mg) was used for all area and personal formaldehyde concentration in the air sampling. Personal pumps were calibrated and set up at for 0.01 to 0.10 liters/minute ; NIOSH Method 254 using gas chromatography with FID detector was used for analyzing the formaldehyde concentration in the air.

After environmental samples were completed, questionnaires were collected and analyzed.

Data analysis

The data were analyzed with the statistical program Statistical Package for Social Sciences (SPSS version 23). Descriptive statistics such as frequency and percentage were used for analyzing the socio-demographic of the respondents as well as gender, age, and underlying diseases. The analysis also included the number of hours the students spent studying daily and weekly. Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation were used to determine the association between those variables, and SRS. Furthermore, regression analysis was used to identify the factors significantly associated with SRS and predict its possible occurrence. regression analysis was also performed to predict SRS.

Before using regression analysis, several key assumptions were considered. The linear correlation was confirmed between SRS and the independent variables. The use of scatter plots showed whether there was a linear correlation. There was no multivariate normality and multicollinearity. Variance Inflation Factor (VIF) values and homoscedasticity were used to test assumptions. A plot of standardized residuals versus predicted values was used to show whether points were equally distributed across all values of the independent variables. All key assumptions were passed for testing.

Ethical consideration

Ethical approval to conduct this study was received from the Human Research Ethics Committee of Thammasat University, No.3. Ethical approval number is 061/2561 and the date of approval was September 5, 2018.

Results and Discussion

General information

Table 1 demonstrates the general profile and SRS of the sample population. There were 53 respondents including 37 females and 16 male. The results showed that 69.8% of the female participants were between 19-26 years old and 88.7% were non-contact lens

wearers. About 81.1% of the respondents had no underlying diseases and more than 88.0% took 3 hours for gross anatomy dissection class each time (day/week), 28.3%, 20.8%, 18.9%, 17.0%, 17.0%, and 11.3% of the respondents reported that they had SRS symptoms in part of back, anterior neck, upper limb, superficial face, abdominal, and deep face dissection, respectively.

Table 1 General characteristics and SRS of the respondents (n=53)

Characteristics	Part of Gross Anatomy Dissection, n (%)						
	Back	Upper limb	Superficial face	Deep face	Anterior neck	Abdominal	
Gender	Male	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)
	Female	37 (69.8)	37 (69.8)	37 (69.8)	37 (69.8)	37 (69.8)	37 (69.8)
Age (Years old) (Mean ± SD: 20.45 ± 2.074)	19	24 (45.3)	24 (45.3)	24 (45.3)	24 (45.3)	24 (45.3)	24 (45.3)
	20	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)	16 (30.2)
	21	3 (5.7)	3 (5.7)	3 (5.7)	3 (5.7)	3 (5.7)	3 (5.7)
	23	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)
	24	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)	2 (3.8)
	25	5 (9.4)	5 (9.4)	5 (9.4)	5 (9.4)	5 (9.4)	5 (9.4)
Contact lens wearing	No	48 (90.6)	47 (88.7)	45 (84.9)	47 (88.7)	48 (90.6)	48 (90.6)
	Yes	5 (9.4)	6 (11.3)	8 (15.1)	6 (11.3)	5 (9.4)	5 (9.4)
Underlying Diseases	No	43 (81.1)	43 (81.1)	43 (81.1)	43 (81.1)	43 (81.1)	43 (81.1)
	Yes	10 (18.9)	10 (18.9)	10 (18.9)	10 (18.9)	10 (18.9)	10 (18.9)
Time of Gross Anatomy Dissection class (Hours/time) (Mean ± SD: 3.12 ± 0.334)	3	50 (94.3)	37 (69.8)	45 (84.9)	52 (98.1)	51 (96.2)	44 (83.0)
	4	3 (5.7)	15 (28.3)	8 (15.1)	1 (1.9)	2 (3.8)	9 (17.0)
	5	0 (0)	1 (1.9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Skin-related syndrome (SRS)	No	38 (71.7)	43 (81.1)	44 (83.0)	47 (88.7)	42 (79.2)	44 (83.0)
	Yes	15 (28.3)	10 (18.9)	9 (17.0)	6 (11.3)	11 (20.8)	9 (17.0)

Environmental and indoor air concentrations

The indoor air concentrations for biological parameters in Table 2 ranged in a dose-dependent manner from 122.5 to 535.0 CFU/m³, 137.5 to 775.0 CFU/m³ for total fungi and total bacteria in indoor air, respectively. Most of the high number of colony counts per 1 m³ of air were in anatomy of back and suboccipital region dissections. The results showed that two areas for fungal content in indoor air and three areas for bacteria in indoor air were found to be higher than WHO

Guideline 2010(World Health Organization, 2010) Table 3 describes the environmental parameters related to the indoor air quality result. For TVOC, the mean indoor air concentration was 1.60 ppm (range 1-2 ppm). All of the sampling areas were below the recommended limits of the Department of Health (Thailand) (less than 2 ppm).

Based on formaldehyde concentration measurement in both the laboratory environment and in personal sampling, the mean formaldehyde concentration in laboratory area was 0.5312 ppm (range 0.0421-1.0801

ppm). More than 75% of the area points were below the recommended limits of Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Standard (≤ 0.75 ppm). However, half of them were found to be higher than OSHA Standard with the mean formaldehyde concentration 0.6655 ppm (range 0.0437– 1.3841 ppm). The highest concentration was in group 7 (area B) in anatomy of back and suboccipital region dissection.

The results demonstrated that the temperature and relative humidity in sampling areas were higher than the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) Standard 55-2010 (range 22.0-26.1 °C and range 30.0-65.0%, respectively). The mean temperature of sampling areas was 31.06 °C, in muscle of facial expression and mastication dissection were found highest temperature in area A and C. Relative

humidity measured ranged from 64.0 to 82.6 % (mean 72.8 %). The highest located in area D with Anatomy of back and suboccipital region dissection.

This study found that carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) concentration were below the recommended limits of ASHRAE 62 (less than 700 ppm and less than 9 ppm, respectively). The mean CO₂ concentration was 459.5 ppm with range from 423.0-511.0 ppm while CO concentration range from 0.60-3.80 ppm (mean 1.72 ppm).

In addition, more than 60.0% of light intensity sampleg areas were found below the Department of Thai Labour Standard (>400 lux) with range from 311.6-532.8 Lux. The lowest level located in area B while learning anatomy of back and suboccipital region dissection.

Table 2 Biological parameters

Part of Gross Anatomy Dissection	n=20	Area	Colony counts per 1 m ³ of air (CFU/m ³)	
			Fungal in indoor air	Bacteria in indoor air
Back and suboccipital region	1	A	357.5	737.5*
	1	B	507.5*	775.0*
	1	C	387.5	732.5*
	1	D	255.0	480.0
Upper limb	1	A	262.5	225.0
	1	B	440.0	150.0
	1	C	535.0*	197.5
	1	D	442.5	137.5
Superficial face	1	A	315.0	232.5
	1	B	382.5	302.5
	1	C	337.5	172.5
	1	D	322.5	197.5
Deep face	1	A	267.5	262.5
	1	B	337.5	202.5
	1	C	295.0	207.5
	1	D	270.0	200.0
Anterior neck	1	A	390.0	240.0
	1	B	147.5	295.0
	1	C	220.0	182.5
	1	D	122.5	180.0

Noted: * means higher than WHO Standard 2010 (≤ 500 CFU/m³)

Table 3 The environmental parameters related to indoor air quality

Part of Gross Anatomy Dissection	Area	Total VOCs concentration (ppm) n=20	Formaldehyde concentration (ppm)		Temp (C) n=20	Relative Humidity (%) n=20	CO ₂ (ppm) n=20	CO (ppm) n=20	Light (lux) n=20		
			Area sampling n=12	Personal sampling n=12							
Back and suboccipital region	A	1.0	0.7324 to 0.9667 ^a	G1	0.7656 ^a	28.1 ^b	81.8 ^c	451	2.4	339.8 ^d	
	B	2.0		G5	1.0707 ^a	28.4 ^b	82.4 ^c	511	1.3	311.6 ^d	
	C	2.0		G3 G7	0.8900 ^a 1.3841 ^a	28.3 ^b	82.5 ^c	436	1.5	314.8 ^d	
	D	2.0		There are no study groups in this area.		Not applicable	28.3 ^b	82.6 ^c	451	1.8	342.1 ^d
Upper limb	A	1.0	0.5330 to 1.0801 ^a	Not applicable		Not applicable	31.8 ^b	69.9 ^c	435	1.9	420.2
	B	2.0		G2 G8	1.3581 ^a 0.9209 ^a	31.8 ^b	70.1 ^c	465	1.5	345.8 ^d	
	C	2.0		Not applicable		Not applicable	31.8 ^b	70.2 ^c	473	0.6	336.5 ^d
	D	2.0		There are no study groups in this area.		Not applicable	31.7 ^b	69.9 ^c	453	1.1	259.7 ^d
Superficial face	A	1.0	0.0421 to 0.1177	Not applicable		Not applicable	32.4 ^b	71.4 ^c	466	1.2	532.8
	B	1.0		Not applicable		Not applicable	32.3 ^b	70.2 ^c	460	1.2	514.5
	C	2.0		G4 G6	0.0437 0.0858	32.4 ^b	70.1 ^c	462	1.2	502.5	
	D	1.0		There are no study groups in this area.		Not applicable	32.3 ^b	69.3 ^c	464	1.1	362.4 ^d
Deep face	A	1.0	0.4809 to 0.5511	Not applicable		Not applicable	31.7 ^b	64.6 ^c	423	3.7	444.6
	B	1.0		Not applicable		Not applicable	31.9 ^b	64.1 ^c	438	3.7	403.0
	C	2.0		G4 G7	0.6982 0.5608	31.9 ^b	64.4 ^c	449	3.8	392.7 ^d	
	D	1.0		There are no study groups in this area.		Not applicable	31.9 ^b	64.0 ^c	436	3.7	263.0 ^d
Anterior neck	A	2.0	0.2372 to 0.5338	G1	0.0865	31.1 ^b	76.4 ^c	451	0.7	368.0 ^d	
	B	2.0		G5	0.1218	31.1 ^b	77.2 ^c	481	0.6	328.4 ^d	
	C	2.0		Not applicable		Not applicable	31.0 ^b	77.2 ^c	485	0.6	392.1 ^d
	D	2.0		There are no study groups in this area.		Not applicable	31.0 ^b	77.6 ^c	500	0.7	307.7 ^d

Notes: a means higher than OSHA Standard (≤ 0.75 ppm), b means higher than ASHRAE Standard 55-2010 (range 22.0-26.1 °C), c means higher than ASHRAE Standard 55-2010 (range 30.0-65.0%), d means lower than Department of Thai Labour Standard (≥ 400 lux)

Association between independent variables and SRS

Independent variables included anatomical part subject to gross anatomy dissection, study duration of gross anatomy dissection class, number of microbial colonies, formaldehyde concentration both of personal and area sampling, light intensity, carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), total volatile organic compounds (TVOCs), temperature and relative humidity (RH%). The association between independent variables and SRS were analyzed using Spearman’s rank correlation coefficients and Pearson’s correlation coefficient as shown in Table 4-5.

The results showed that the correlations between anatomical part of gross anatomy dissection, temperature, light intensity and SRS were highly negative. In addition, the correlation between carbon monoxide (CO) and SRS was low negative.

In contrast there was a highly positive correlation between relative humidity and SRS. In terms of bacteria in indoor air, formaldehyde concentration in area samples and SRS, there was a positive correlation (Spearman’s rank correlation coefficient 0.481 and 0.498 respectively at *p-value*<0.01) while the correlation between fungi in indoor air, formaldehyde concentration in personal samples, total VOCs, CO₂ and SRS was low positive.

Table 4 Association between part of gross anatomy dissection and skin-related syndrome (SRS)

Independent variables	Pearson’s Correlation Coefficient	<i>p-value</i>
Part of gross anatomy dissection	-0.996	<0.001*

* *p-value*<0.05

Table 5 Association between independent variables (Internal scale) and skin-related syndrome (SRS)

Independent variables	Spearman’s Correlation Coefficient	<i>p-value</i>
Time of gross anatomy dissection class	0.047	0.443
Fungi in indoor air	0.212	0.001*
Bacteria in indoor air	0.481	<0.001*
Formaldehyde concentration (personal sampling)	0.359	<0.001*
Formaldehyde concentration (area sampling)	0.498	<0.001*
Total VOCs	0.146	0.018*
Temperature	-0.906	<0.001*
Relative Humidity (%RH)	0.894	<0.001*
CO ₂	0.341	<0.001*
CO	-0.281	<0.001*
Light intensity	-0.872	<0.001*

* *p-value*<0.05

Socio-demographic, environmental and indoor air monitoring was included into the model to test their correlation with SRS. Regression analysis covered twelve affected variables from those analyses. Only three influencing variables were tested by using regression analysis as shown in Table 6. The regression analysis model formula is shown in Equation (1).

$$Y = 0.055 + 0.093X_1 + 0.013X_2 + 0.006X_3 \quad (1)$$

Where

Y= SRS prevalence rate

X₁ = Total bacteria in indoor air evaluation (1 = Pass, 2 = Not pass)

X₂ = Light intensity evaluation (1 = Pass, 2 = Not pass)

X₃ = Relative humidity evaluation (1 = Pass, 2 = Not pass)

Table 6 Regression analysis model for predicting SRS prevalence rate

Independent variables	Unstandardized Coefficients		t	p-value*
	B	Std. Error		
Constant	0.055	0.001	50.559	<0.001*
Total bacteria in indoor air evaluation: X ₁	0.093	0.001	131.813	<0.001*
Light intensity evaluation: X ₂	0.013	0.001	24.729	<0.001*
Relative humidity evaluation: X ₃	0.006	0.001	10.498	<0.001*

R=0.996 R²=0.991 Std.Error=0.00390 F=10011.290 Sig=0

* p-value<0.05

This study found that 28.3%, 20.8%, 18.9%, 17.0%, 17.0%, and 11.3% of the respondents reported that they had SRS symptoms in part of back, anterior neck, upper limb, superficial face, abdominal, and deep face dissection respectively which supported the results of one previous study (Takaoka *et al.*, 2016). Two areas with fungi in indoor air and three areas with bacteria in indoor air were found to be higher than WHO Standard. Similarly, research in 2010 in the USA found that the mean concentration in indoor airborne culturable bacteria and fungi was similar while other studies found values more than 10 times higher (Mainelis & Yao, 2004; Madureira *et al.*, 2015). According to formaldehyde concentration measured in both laboratory environment and personal sampling, about 25% of the area points had higher concentration than the recommended limits of the OSHA Standard. The highest concentration was in anatomy of back and suboccipital region dissection sections. This affirms a similar study in formaldehyde exposure among medical students during anatomy laboratory which reported that sections of anatomy regions related to higher formaldehyde concentrations (Promtes *et al.*, 2014). Moreover, half of the personal samples had formaldehyde concentration higher than OSHA standards. The highest concentration was in group 7 (area B) in anatomy of back and suboccipital region dissection.

The results demonstrated that temperature and relative humidity sampling areas were higher than ASHRAE Standard 55-2010. This may be according to the natural ventilation in the laboratory. In addition, more than 60.0% of light intensity measurements in sampling areas were below the Department of Labour Protection and Welfare standard.

The results further showed that between environmental factors including temperature, light intensity and SRS, there was a high negative correlation while between carbon monoxide (CO) and SRS. However, the correlation between relative humidity and SRS was found to have a high positive correlation. The association between bacteria in indoor air, formaldehyde concentration in area samples and SRS had a positive correlation while the association between fungi in indoor air, formaldehyde concentration in personal samples, total VOCs, CO₂ and SRS had low positive correlation. This is found to be similar to other studies on indoor air quality and SRS (Sahlberg *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2016; Yeo *et al.*, 2009; Crook & Burton, 2010). A regression analysis model was ran to predict SRS prevalence rate of medical students from three influencing factors successfully predicted 99.1% (R²=0.991) which was a good fit for the data. Based on previous literature, there were risk factors for symptom groups and indoor air quality associated with SBS which can be used for predicting SBS by multiple logistic regression analysis (Bak *et al.*, 1997; Arikan *et al.*, 2018).

Conclusions

This study found that in some areas of gross anatomy dissection study rooms, the levels of fungi and bacteria in indoor air were higher than WHO Guideline 2010 and more than 50.0 % of formaldehyde concentration of personal samples were found to be higher than OSHA Standard. In addition, temperature and relative humidity sampling areas were higher than ASHRAE Standard 55-2010 and most of light intensity sampling areas were found to be below the Department of Labour Protection and Welfare standard. The 12 factors significantly associated with SRS during gross anatomy dissection of medical

students. Only 3 variables ; relative humidity, total bacteria in indoor air, and light intensity could significantly predict SRS of medical students.

A cross-sectional study can only show a snapshot in time, with an underestimation of the actual situation because data are collected from a small population and small numbers of study sites. This study concentrated on medical students, and can serve as a baseline for relevant agencies. Thus, university policy implementation and risk communication will be introduced to the students and staff to develop safety programs and sustain improvement of behavior. Future directions of this research include applying the engineering approach to controlling the environmental parameters related to indoor air quality in the gross anatomy laboratory room.

Acknowledgements

This study was funded by the Thammasat University's Research Administration Division. We would like to thank medical students for their participation and faculty of medicine, Thammasat University Rangsit Center for supporting facilities and data collection.

References

- Arikan, I., Tekin, Ö. & Erbas, O. (2018). Relationship between sick building syndrome and indoor air quality among hospital staff. *La Medicina del lavoro*, 109(6), 435-443.
- Bak, J. J., Cho, S. H., Park, B. J. & Kang, D. H. (1997). Sick Building Syndrome and the Related Factors in Office Workers. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 30(1), 157-170.
- Crook, B. and Burton, N. C. (2010). Indoor moulds, sick building syndrome and building related illness. *Fungal Biology Reviews*, 24, 106-113.
- Lu, C., Deng, Q., Li, Y., Sundell, J. and Norbäck, D. (2016). Outdoor air pollution, meteorological conditions and indoor factors in dwellings in relation to sick building syndrome (SBS) among adults in China. *Science of the Total Environment*, 560, 186-196.
- Madureira, J., Paciência, I., Rufo, J. C., Pereira, C., Teixeira, J. P. and De Oliveira Fernandes, E. (2015). Assessment and determinants of airborne bacterial and fungal concentrations in different indoor environments: Homes, child day-care centres, primary schools and elderly care centres. *Atmospheric Environment*, 109, 139-146.
- Mainelis, An, H., G. & Yao, M. (2004). Evaluation of a high-volume portable bioaerosol sampler in laboratory and field environments. *Indoor air*, 14, 385-393.
- Merrill, R. M. (2008). *Environmental epidemiology: principles and methods*. Jones & Bartlett Learning.
- Ministry of Public Health. (2018). *Public Health Statistics A.D.2018*. https://bps.moph.go.th/new_bps/sites/default/files/statistic%2061.pdf
- Ponsoni, K. and Raddi, M. S. G. (2010). Indoor Air quality related to occupancy at an air-conditioned public building. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(1), 99-103.
- Promtes, K., Harncharoen, K., Ekpanyaskul, C. (2014). Cancer risk assessment of inhalation formaldehyde exposure among medical students during anatomy laboratory. *Thai Journal of Toxicology*, 29(1-2), 8-22.
- Reuben, U., Ismail, A. F., Ahmad, A. L., Maina, H. M. and Daud, A. (2019). Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome Among Nigerian Laboratory University Workers. *Journal of Physical Science*, 30(1), 179-195.
- Sahlberg, B., Gunnbjörnsdóttir, M., Soon, A., Jogi, R., Gislason, T., Wieslander, G., Janson, C. & Norback, D. (2013). Airborne molds and bacteria, microbial volatile organic compounds (MVOC), plasticizers and formaldehyde in dwellings in three North European cities in relation to sick building syndrome (SBS). *Science of the total environment*, 444, 433-440.
- Sun, Y., Zhang, Y., Bao, L., Fan, Z., Wang, D. & Sundell, J. (2013). Effects of gender and dormitory environment on sick building syndrome symptoms among college students in Tianjin, China. *Building and Environment*, 68, 134-139.

- Takaoka, M., Suzuki, K. and Norbäck, D. (2016). Sick building syndrome among junior high school students in Japan in relation to the home and school environment. *Global Journal of Health Science*, 8(2), 165-177.
- US Environmental Protection Agency. (2020). *Sources of indoor air pollution-biological pollutants*. <http://www.epa.gov/iaq/biologic.html>
- World Health Organization. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*.
- Yeo, Y., Lee, S., Lim, C., Quek, L. & Ooi, S. (2009). A review of elderly injuries seen in a Singapore emergency department. *Singapore medical journal*, 50(3), 278-283.
- Zamani, M. E., Jalaludin, J. & Shaharom, N. (2013). Indoor air quality and prevalence of sick building syndrome among office workers in two different offices in Selangor. *American Journal of Applied Sciences*, 10(10), 1140-1147.

สมบัติของตัวดำเนินการ \mathcal{R}_m^a ในปริภูมิโครงสร้างเล็กสุดที่มีอุดมคติ

Properties of \mathcal{R}_m^a -operator in minimal structure space with an ideal

ยุทธพงศ์ มนต์พิพารมณ¹, ดรุณี บุญชารี^{2*}, โชคชัย วิริยะพงษ์³,
Yutthapong Manuttiparom¹, Daruni Boonchari^{2*}, Chokchai Viriyapong³

Received: 19 October 2020 ; Revised: 20 December 2020 ; Accepted: 8 January 2021

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอเซตเปิดแบบ δ - m เซตเปิดแบบ a - m ฟังก์ชันแบบ δ - m -local ตัวดำเนินการแบบ R_m^a บนปริภูมิโครงสร้างเล็กสุดที่มีอุดมคติพร้อมทั้งศึกษาสมบัติของฟังก์ชัน และตัวดำเนินการนี้

คำสำคัญ: เซตเปิดแบบ δ - m เซตเปิดแบบ a - m ฟังก์ชันแบบ δ - m -local ตัวดำเนินการแบบ R_m^a ปริภูมิโครงสร้างเล็กสุดที่มีอุดมคติ

Abstract

In this article, the concepts of δ - m -open sets, a - m -open sets in a minimal structure space with an ideal are introduced. In addition, we present an a - m -local function and an R_m^a -operator in a minimal structure space with an ideal. We studied the properties of the function and this operator.

Keywords: δ - m -open sets, a - m -open sets, δ - m -local functions, R_m^a -operator, a minimal structure space with an ideal.

¹ นิสิตปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Master degree student, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

² Asst. Prof., Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

³ Asst. Prof., Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* Corresponding author ; Daruni Boonchari, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand. daruni.b@msu.ac.th.

Introduction

In 1945, Vaidyanathaswamy (1945) defined a local function in an ideal topological space and studied some properties of this function. In 1996, Maki, Umehara and Noiri (1996) defined a minimal structure and studied some properties of this structure. In 2014, Al-Omeri *et al.* (2014) defined an *a-local* function in an ideal topological space and also studied some properties of an *a-local* function. Later in 2016, Al-Omeri *et al.* (2016) defined an R_a -operator in an ideal topological space and studied some properties of this operator. In this article, we introduce the concepts of δ -*m-open* sets and δ -*m-closed* sets in a minimal structure space with an ideal and study some fundamental properties. Moreover, we introduce the notions of δ -*m-local* functions and R_m^a -operators in minimal structure spaces, along with studying some properties related to an δ -*m-local* function and an R_m^a -operator defined above.

Preliminaries

Definition 2.1⁵ Let X be a nonempty set and $P(X)$ the power set of X . A subfamily m of $P(X)$ is called a minimal structure (briefly *MS*) on X if $\emptyset \in m$ and $X \in m$.

By (X, m) we denote a nonempty set X with a minimal structure m on X and it is called a minimal structure space. Each member of m is said to be *m-open* and the complement of *m-open* is said to be *m-closed*.

Definition 2.2 (Noiri & Popa, 2009) Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The *m-closure* of A , denoted by $CI_m(A)$ and the *m-interior* of A , denoted by $Int_m(A)$, are defined as follows ;

- 1) $CI_m(A) = \bigcap \{F : A \subseteq F, X \setminus F \in m\}$,
- 2) $Int_m(A) = \bigcup \{U : U \subseteq A, U \in m\}$.

Lemma 2.3 (Maki & Gani, 1999) Let (X, m) be a minimal structure space and $A, B \subseteq X$, the following properties hold ;

- (1) $CI_m(X \setminus A) = X \setminus Int_m(A)$ and $Int_m(X \setminus A) = X \setminus CI_m(A)$.
- (2) If $X \setminus A \in m$, then $CI_m(A) = A$ and if $A \in m$, then $Int_m(A) = A$.
- (3) $CI_m(\emptyset) = \emptyset$, $CI_m(X) = X$, $Int_m(\emptyset) = \emptyset$, and $Int_m(X) = X$.

(4) If $A \subseteq B$, then $CI_m(A) \subseteq CI_m(B)$ and $Int_m(A) \subseteq Int_m(B)$.

(5) $A \subseteq CI_m(A)$ and $Int_m(A) \subseteq A$.

(6) $CI_m(CI_m(A)) = CI_m(A)$ and $Int_m(Int_m(A)) = Int_m(A)$.

Lemma 2.4 (Maki & Gani, 1999) Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X, x \in X$. Then $x \in CI_m(A)$ if and only if $U \cap A \neq \emptyset$ for every an *m-open* set U containing x .

Definition 2.5 (Rosas *et al.*, 2009) Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$.

(1) A is called *m-regular open* if $A = Int_m(CI_m(A))$

(2) A is called *m-regular closed* if $X \setminus A$ is *m-regular open*.

The family of all *m-regular open* sets of X is denoted by $r(m)$ and the family of all *m-regular closed* sets of X is denoted by $rc(m)$.

Definition 2.6 (Ozbakir & Yildirim, 2009) An ideal \mathcal{I} on a minimal structure space (X, m) is a nonempty collection of subsets of X which satisfies the following properties ;

- (1) $A \in \mathcal{I}$ and $B \subseteq A$ implies $B \in \mathcal{I}$ (heredity),
- (2) $A \in \mathcal{I}$ and $B \in \mathcal{I}$ implies $A \cup B \in \mathcal{I}$ (finite additivity).

The set \mathcal{I} together with a minimal structure space (X, m) is called a minimal structure space with an ideal, denoted by (X, m, \mathcal{I}) .

Main Results

Definition 3.1 Let (X, m) be a minimal structure space. A subset A is said to be δ -*m-open* if for each $X \in A$ there exists an *m-regular open* set G such that $X \in G \subseteq A$. The complement of δ -*m-open* set is called δ -*m-closed*. The family of all δ -*m-closed* sets of X , denoted by $\delta C_m(X)$.

Theorem 3.2 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The arbitrary union of δ -*m-open* sets is a δ -*m-open* set.

Proof Let B_α be a δ -*m-open* set for all $\alpha \in J$ where J is an index set and let $x \in \bigcup_{\alpha \in J} B_\alpha$. There exists $\beta \in J$ such that $x \in B_\beta$. Since B_β is δ -*m-open*, there exists an *m-regular open* set G_β such that $x \in G_\beta \subseteq B_\beta$. Then $x \in G_\beta \subseteq B_\beta \subseteq \bigcup_{\alpha \in J} B_\alpha$. Therefore $\bigcup_{\alpha \in J} B_\alpha$ is δ -*m-open*.

Definition 3.3 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. A point $x \in X$ is called a δ - m -cluster point of A if $U \cap A \neq \emptyset$ for each m -regular open set U containing x .

Definition 3.4 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The set of all δ - m -cluster points of A is called δ - m -closure of A and is denoted by $C_{\delta m}(A)$ and the union m -regular open sets contained in A is called the δ - m -interior of A , denoted by $I_{\delta m}(A)$.

Theorem 3.5 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. Then A is δ - m -open if and only if $I_{\delta m}(A) = A$.

Proof (\Rightarrow) Suppose that A is δ - m -open. By definition of δ - m -interior, $I_{\delta m}(A) = A$. Let $x \in A$. Since A is δ - m -open, there exists an m -regular open set O such that $x \in O \subseteq A$. This implies that $x \in I_{\delta m}(A)$. Then $A \subseteq I_{\delta m}(A)$. Hence $A = I_{\delta m}(A) = A$. (\Leftarrow) It follows from Theorem 3.2.

Theorem 3.6 Let (X, m) be a minimal structure space and $A, B \subseteq X$. The following property hold ;

- (1) If $A \subseteq B$, then $I_{\delta m}(A) \subseteq I_{\delta m}(B)$,
- (2) If $A \subseteq B$, then $C_{\delta m}(A) \subseteq C_{\delta m}(B)$.

Proof (1) Assume that $A \subseteq B$ and $x \in I_{\delta m}(A)$. Then, there exists an m -regular open set G such that $x \in G \subseteq A$. Since $A \subseteq B$, we have $x \in G \subseteq A \subseteq B$. This implies that $x \in I_{\delta m}(B)$. Hence $I_{\delta m}(A) \subseteq I_{\delta m}(B)$.

(2) Let $A \subseteq B$. Assume that $x \notin C_{\delta m}(B)$. Then there exists an m -regular open set U containing x such that $U \cap B = \emptyset$. Since $A \subseteq B$, we have $U \cap A \subseteq U \cap B = \emptyset$. Thus $x \notin C_{\delta m}(A)$. Therefore $C_{\delta m}(A) \subseteq C_{\delta m}(B)$.

Theorem 3.7 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) $C_{\delta m}(A) = X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A)$,
- (2) $I_{\delta m}(A) = X \setminus C_{\delta m}(X \setminus A)$.

Proof (1) We will show that $C_{\delta m}(A) = X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A)$ by contrapositive. Assume that $x \notin X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A)$. We get that $x \in I_{\delta m}(X \setminus A)$. So there exists an m -regular open set G such that $x \in G \subseteq X \setminus A$. Then $G \cap A = \emptyset$ and $x \notin C_{\delta m}(A)$. Thus $C_{\delta m}(A) \subseteq X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A)$.

Next, we show that $X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A) \subseteq C_{\delta m}(A)$ by contrapositive. Assume that $x \notin C_{\delta m}(A)$. Then x is not a δ - m -cluster point of A . There exists an m -regular open set G containing x such that $G \cap A = \emptyset$.

So $x \in G \subseteq X \setminus A$ and we get that $x \in I_{\delta m}(X \setminus A)$. Hence $x \notin X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A)$. Thus $X \setminus I_{\delta m}(X \setminus A) \subseteq C_{\delta m}(A)$.

(2) Since $X \setminus A \subseteq X$, we have $C_{\delta m}(X \setminus A) = X \setminus I_{\delta m}(X \setminus (X \setminus A))$ by (1) and we get $C_{\delta m}(X \setminus A) = X \setminus I_{\delta m}(A)$. Therefore $I_{\delta m}(X \setminus A) = X \setminus C_{\delta m}(X \setminus A)$.

Definition 3.8 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$.

- (1) A is called a - m -open if $A \subseteq \text{Int}_m(CI_m(I_{\delta m}(A)))$. The family of all a - m -open sets of X is denoted by \mathcal{M}^a .
- (2) A is called a - m -closed if $CI_{\delta m}(\text{Int}_m(C_{\delta m}(A))) \subseteq A$.

Theorem 3.9 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. Then A is a - m -open if and only if $X \setminus A$ is a - m -closed.

Proof Assume that A is a - m -open. Then $A \subseteq \text{Int}_m(CI_m(I_{\delta m}(A)))$. and $X \setminus A \supseteq X \setminus (\text{Int}_m(CI_m(I_{\delta m}(A))))$. By Lemma 2.3 and Theorem 3.7, $X \setminus A \supseteq CI_m(\text{Int}_m(C_{\delta m}(X \setminus A)))$. Therefore, $X \setminus A$ is a - m -closed.

Conversely, assume that $X \setminus A$ is a - m -closed. Then $CI_m(\text{Int}_m(C_{\delta m}(X \setminus A))) \subseteq X \setminus A$ and $X \setminus CI_m(\text{Int}_m(C_{\delta m}(X \setminus A))) \supseteq X \setminus (X \setminus A)$. By Lemma 2.3 and Theorem 3.7, $\text{Int}_m(CI_m(I_{\delta m}(A))) \supseteq A$. Hence A is a - m -open.

Example 3.10 Let $X = \{a, b, c, d\}$ with a minimal structure $m = \{\emptyset, \{a, b\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{a, d\}, x\}$. Then $r(m) = \{\emptyset, \{a, b\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{c, d\}, x\}$, and $\delta O_m(x) = \{\emptyset, \{a, b\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{a, b, c\}, \{a, b, d\}, \{a, c, d\}, \{b, c, d\}, x\}$, $\mathcal{M}^a = \{\emptyset, \{a, b\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{a, b, c\}, \{a, b, d\}, \{a, c, d\}, \{b, c, d\}, x\}$. In this example $\{a, b\}, \{a, d\} \in \mathcal{M}^a$ but $\{a, b\} \cap \{a, d\} = \{a\} \notin \mathcal{M}^a$, that means \mathcal{M}^a does not have the property that any finite intersection of a - m -open sets is a - m -open.

Definition 3.11 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The a - m -closure of A , denoted by $aC_m(A)$ and the a - m -interior of A , denoted by $aI_m(A)$, are defined as follows ;

- (1) $aC_m(A) = \bigcap \{F : X \setminus F \in \mathcal{M}^a \text{ and } A \subseteq F\}$,
- (2) $aI_m(A) = \bigcup \{U : U \in \mathcal{M}^a \text{ and } U \subseteq A\}$.

Theorem 3.12 Let (X, m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$, $x \in X$, Then $x \in aC_m(A)$ if and only if $U \cap A \neq \emptyset$ for every a - m -open set U containing x .

Proof (\Rightarrow) Suppose that there exists an a - m -open set U containing x such that $U \cap A = \emptyset$. So $A \subseteq X \setminus U$ and $X \setminus U$ is a - m -closed. Since $aC_m(A)$ is the intersection of

all a - m -closed sets containing A , $aC_m(A) \subseteq X \setminus U$. Since $x \notin X \setminus U$, we have $x \notin aC_m(A)$.

(\Leftarrow) Assume that $x \notin aC_m(A)$. Then there exists an a - m -closed set F such that $A \subseteq F$ and $x \notin F$. Choose $U = X \setminus F$. Then U is a - m -open and $x \in X \setminus F = U$. Moreover, $U \cap A \subseteq (X \setminus F) \cap F = \emptyset$.

Theorem 3.13 Let (X,m) be a minimal structure space and $A, B \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) If $A \subseteq B$, then $aC_m(A) \subseteq aC_m(B)$.
- (2) If $A \subseteq B$, then $aI_m(A) \subseteq aI_m(B)$.

Proof (1) Assume that $A \subseteq B$ and $x \notin aC_m(B)$. Then there exists an a - m -open set U containing x such that $U \cap B = \emptyset$. Since $A \subseteq B$, $U \cap A = \emptyset$. Hence $x \notin aC_m(A)$.

(2) Let $A \subseteq B$ and $x \in aI_m(A)$. Then there exists an a - m -open set U such that $x \in U \subseteq A$. Since $A \subseteq B$, $x \in U \subseteq B$. Therefore $x \in aI_m(B)$.

Proposition 3.14 Let (X,m) be a minimal structure space. Then $\emptyset \in \mathcal{M}^a$ and $X \in \mathcal{M}^a$.

Proof Since $\emptyset \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(\emptyset)))$, \emptyset is a - m -open, and so $\emptyset \in \mathcal{M}^a$. Clearly $X = Int_m(CI_m(X))$, so X is an m -regular open. Then X is δ - m -open, that is $I_{\delta m}(X) = X$, and so $X \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(X)))$. Therefore $X \in \mathcal{M}^a$.

Theorem 3.15 Let (X,m) be a minimal structure space. Then the arbitrary union of elements of \mathcal{M}^a belongs to \mathcal{M}^a .

Proof Let V_α be a - m -open for all $\alpha \in J$ and $G = \bigcup_{\alpha \in J} V_\alpha$. Then $V_\alpha \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(V_\alpha)))$ for all $\alpha \in J$. Since $V_\alpha \subseteq G$, it follows that $I_{\delta m}(V_\alpha) \subseteq I_{\delta m}(G)$ and so $CI_m(I_{\delta m}(V_\alpha)) \subseteq CI_m(I_{\delta m}(G))$. Then $Int_m(CI_m(I_{\delta m}(V_\alpha))) \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(G)))$. This implies that $V_\alpha \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(G)))$ for all $\alpha \in J$. Thus $\bigcup_{\alpha \in J} V_\alpha \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(G)))$. Therefore $G \subseteq Int_m(CI_m(I_{\delta m}(G)))$.

Corollary 3.16 Let (X,m) be a minimal structure space. Then the arbitrary intersection of a - m -closed sets is an a - m -closed set.

Proof Let G_α be a - m -closed for all $\alpha \in J$. Then $X \setminus G_\alpha$ is a - m -open and so $\bigcup_{\alpha \in J} (X \setminus G_\alpha)$ is a - m -open. Since $X \setminus \bigcap_{\alpha \in J} G_\alpha = \bigcup_{\alpha \in J} (X \setminus G_\alpha)$, $\bigcap_{\alpha \in J} G_\alpha$ is a - m -closed.

Remark 3.17 In a minimal structure space, by Corollary 3.16, $aC_m(A)$ is a - m -closed.

Theorem 3.18 Let (X,m) be a minimal structure space and $A \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) $aC_m(aC_m(A)) = aC_m(A)$,
- (2) $aI_m(aI_m(A)) = aI_m(A)$.

Proof (1) Clearly $aC_m(A) \subseteq aC_m(aC_m(A))$. Since $aC_m(A)$ is a - m -closed, $aC_m(aC_m(A)) \subseteq aC_m(A)$. Therefore $aC_m(aC_m(A)) = aC_m(A)$.

(2) Clearly $aI_m(aI_m(A)) = aI_m(A)$. Since $aI_m(A)$ is a - m -open, $aI_m(A) \subseteq aI_m(aI_m(A))$. Therefore $aI_m(aI_m(A)) = aI_m(A)$.

Let (X,m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal. For each $x \in X$, let $\mathcal{M}^a(x) = \{U : x \in U, U \in \mathcal{M}^a\}$ be the family of all a - m -open sets that contain x .

Definition 3.19 Let (X,m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal and $A \subseteq X$. Then $A_m^a(\mathcal{I}, m) = \{x \in X : U \cap A \notin \mathcal{I}, \text{ for every } U \in \mathcal{M}^a(x)\}$ is called a - m -local function of A with respect to \mathcal{I} and m . We denote simply A_m^a for $A_m^a(\mathcal{I}, m)$.

Remark 3.20 The minimal ideal is $\{\emptyset\}$ and the maximal ideal is $P(x)$ in any minimal structure space with an ideal (X,m, \mathcal{I}) . It can be deduced that $A_m^a(\{\emptyset\}, m) = aC_m(A)$ and $A_m^a(P(x), m) = \emptyset$ for every $A \subseteq X$.

Remark 3.21 In general, $A \not\subseteq A_m^a$ and $A_m^a \not\subseteq A$. The next example shows that $A \not\subseteq A_m^a$.

Example 3.22 Let $X = \{a,b,c,d\}$ with a minimal structure $m = \{\emptyset, \{a,b\}, \{b,c\}, \{c,d\}, \{a,d\}, X\}$ and $\mathcal{I} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a,b\}\}$, $A = \{a,b\}$. Then $\mathcal{M}^a = \{\emptyset, \{a,b\}, \{a,d\}, \{b,c\}, \{c,d\}, \{a,b,c\}, \{a,b,d\}, \{a,c,d\}, \{b,c,d\}, X\}$ and $A_m^a = \emptyset$.

Theorem 3.23 Let (X,m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal and $A, B \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) $(\emptyset)_m^a = \emptyset$.
- (2) If $A \subseteq B$, then $A_m^a \subseteq B_m^a$.
- (3) $(A_m^a)_m^a \subseteq A_m^a$.
- (4) $A_m^a \cup B_m^a \subseteq (A \cup B)_m^a$.
- (5) $(A \cap B)_m^a \subseteq A_m^a \cap B_m^a$.
- (6) $(A \setminus B)_m^a \setminus (B)_m^a \subseteq A_m^a \setminus B_m^a$.

Proof (1) Assume $(\emptyset)_m^a \neq \emptyset$. Then there exists $x \in (\emptyset)_m^a$. Since $X \in \mathcal{M}^a(X)$, $X \cap \emptyset \notin \mathcal{I}$. It contradicts with $X \cap \emptyset = \emptyset \in \mathcal{I}$. Therefore $(\emptyset)_m^a = \emptyset$.

(2) Assume that $A \subseteq B$. We will show that $A_m^a \subseteq B_m^a$ by contrapositive. Suppose that $x \notin B_m^a$. Then there exists $U \in \mathcal{M}^a(X)$ such that $U \cap B \in \mathcal{I}$. From $A \subseteq B$ and the property of \mathcal{I} , $U \cap A \in \mathcal{I}$. Therefore $x \notin A_m^a$.

(3) Assume that $x \in (A_m^a)_m^a$, and $U \in \mathcal{M}^a(X)$. Then $A_m^a \cap U \notin \mathcal{I}$ and so $A_m^a \cap U \neq \emptyset$. Thus there exists $y \in A_m^a \cap U$, and so $y \in U \in \mathcal{M}^a(y)$. This implies that $A \cap U \notin \mathcal{I}$. Therefore $x \in A_m^a$.

(4) Since $A \subseteq A \cup B$ and $B \subseteq A \cup B$, by (2) $A_m^a \subseteq (A \cup B)_m^a$ and $B_m^a \subseteq (A \cup B)_m^a$. So $A_m^a \cup B_m^a \subseteq (A \cup B)_m^a$.

(5) Since $A \cap B \subseteq A$ and $A \cap B \subseteq B$, by (2) $(A \cap B)_m^a \subseteq A_m^a$ and $(A \cap B)_m^a \subseteq B_m^a$. So $(A \cap B)_m^a \subseteq A_m^a \cap B_m^a$.

(6) Since $A \setminus B \subseteq A$, by (2) $(A \setminus B)_m^a \subseteq A_m^a$. So $(A \setminus B)_m^a \setminus B_m^a \subseteq A_m^a \setminus B_m^a$.

Theorem 3.24 Let (X, m) be a minimal structure space and \mathcal{I}, \mathcal{J} are ideals on X where $\mathcal{I} \subseteq \mathcal{J}$. Then $A_m^a(\mathcal{I}, m) \subseteq A_m^a(\mathcal{J}, m)$ for all $A \subseteq X$.

Proof Let $A \subseteq X$. Assume that $x \in A_m^a(\mathcal{I}, m)$. Then $U \cap A \notin \mathcal{I}$ for every $U \in \mathcal{M}^a(x)$. Since $\mathcal{I} \subseteq \mathcal{J}$, $U \cap A \notin \mathcal{J}$ for every $U \in \mathcal{M}^a(x)$. Thus $x \in A_m^a(\mathcal{J}, m)$. Hence $A_m^a(\mathcal{I}, m) \subseteq A_m^a(\mathcal{J}, m)$.

Theorem 3.25 Let (X, m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal and $A \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) $A_m^a \subseteq aC_m(A)$,
- (2) $A_m^a = aC_m(A)$, (i.e., A_m^a is an a - m -closed subset).

Proof (1) Assume that $x \notin aC_m(A)$. Then there exists an a - m -closed set F such that $A \subseteq F$ and $x \notin F$. Thus $x \in X \setminus F$, and so $X \setminus F \in \mathcal{M}^a(x)$. Hence $(X \setminus F) \cap A = \emptyset \in \mathcal{I}$, and so $x \notin A_m^a$. This implies that $A_m^a \subseteq aC_m(A)$.

(2) It is clear that $A_m^a \subseteq aC_m(A_m^a)$. Next, we will prove that $aC_m(A_m^a) \subseteq A_m^a$. Let $x \in aC_m(A_m^a)$ and $U \in \mathcal{M}^a(x)$. Then $A_m^a \cap U \neq \emptyset$. Therefore there exists $y \in A_m^a \cap U$, so $U \in \mathcal{M}^a(y)$. Since $y \in A_m^a$, $A \cap U \notin \mathcal{I}$, and so $x \in A_m^a$. Then $A_m^a = aC_m(A_m^a)$.

Theorem 3.26 Let (X, m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal and $A \subseteq X$. The following properties hold ;

- (1) If $A \in \mathcal{I}$, then $A_m^a = \emptyset$.
- (2) If $U \in \mathcal{I}$, then $A_m^a = (A \cup U)_m^a$.
- (3) If $U \in \mathcal{I}$, then $A_m^a = (A \setminus U)_m^a$.

Proof (1) Assume that $A_m^a \neq \emptyset$. Then there exists $x \in A_m^a$. Since $X \in \mathcal{M}^a(x)$, $A = X \cap A \in \mathcal{I}$.

(2) Assume that $U \in \mathcal{I}$. Since $A \subseteq A \cup U$ by Theorem 3.23(2), we get $A_m^a \subseteq (A \cup U)_m^a$. Next, we will prove that $(A \cup U)_m^a \subseteq A_m^a$ by contrapositive. Suppose that $x \notin A_m^a$. Then there exists $V \in \mathcal{M}^a(x)$ such that $A \cap V \in \mathcal{I}$. Since $(A \cup U) \cap V = (A \cap V) \cup (U \cap V) \in \mathcal{I}$, $(A \cup U) \cap V \in \mathcal{I}$. Therefore $x \notin (A \cup U)_m^a$.

(3) Assume that $U \in \mathcal{I}$. Since $A_m^a = (A \cap X)_m^a = (A \cap ((X \setminus U) \cup U))_m^a = ((A \setminus U) \cup (A \cap U))_m^a$ and $A \cap U \subseteq U \in \mathcal{I}$, by (2) $A_m^a = (A \setminus U)_m^a$.

Definition 3.27 Let (X, m, \mathcal{I}) be a minimal structure with an ideal. An operator $\mathfrak{R}_m^a : P(X) \rightarrow P(X)$ is defined as follows ; for every $A \in P(X)$, $\mathfrak{R}_m^a(A) = \{x \in X : \text{there exists } U \in \mathcal{M}^a(x) \text{ such that } U \setminus A \in \mathcal{I}\}$.

Theorem 3.28 Let (X, m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal and $A \in P(X)$. Then $\mathfrak{R}_m^a(A) = X \setminus (X \setminus A)_m^a$.

Proof Let $x \in \mathfrak{R}_m^a(A)$. Then there exists an a - m -open set U containing x such that $U \setminus A \in \mathcal{I}$. Thus $U \cap (X \setminus A) \in \mathcal{I}$. So $x \notin (X \setminus A)_m^a$ and hence $x \in X \setminus (X \setminus A)_m^a$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq X \setminus (X \setminus A)_m^a$.

For the reverse inclusion, let $x \in X \setminus (X \setminus A)_m^a$. Then $x \notin (X \setminus A)_m^a$. Thus there exists an a - m -open set U containing x such that $U \cap (X \setminus A) \in \mathcal{I}$. This implies that $U \setminus A \in \mathcal{I}$. Hence $x \in \mathfrak{R}_m^a(A)$. So $X \setminus (X \setminus A)_m^a \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A)$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A) = X \setminus (X \setminus A)_m^a$.

Example 3.29 Let $X = \{a, b, c, d\}$ with a minimal structure $m = \{\emptyset, \{a, b\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{a, d\}, X\}$ and $\mathcal{I} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}$, $A = \{a, b\}$. Then $\mathfrak{R}_m^a(A) = \{\emptyset, \{a, b\}, \{a, d\}, \{b, c\}, \{c, d\}, \{a, b, c\}, \{a, b, d\}, \{a, c, d\}, \{b, c, d\}, X\}$ and $\mathfrak{R}_m^a(A) = \{a, b\}$.

Theorem 3.30 Let (X, m, \mathcal{I}) be a minimal structure space with an ideal, and $A \subseteq X$. Then $\mathfrak{R}_m^a(A)$ is a - m -open.

Proof We know that $\mathfrak{R}_m^a(A) = X \setminus (X \setminus A)_m^a$ and $(X \setminus A)_m^a$ is *a-m-closed*. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A)$ is *a-m-open*.

Theorem 3.31 Let (X, m, \mathcal{S}) be a minimal structure space with an ideal and $A, B \subseteq X$. Then the following properties hold ;

- (1) If $A \subseteq B$, then $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(B)$.
- (2) If $A \subseteq B$, then $\mathfrak{R}_m^a(A \cap B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A) \cap \mathfrak{R}_m^a(B)$.
- (3) If $A \subseteq B$, then $\mathfrak{R}_m^a(A) \cup \mathfrak{R}_m^a(B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A \cup B)$.
- (4) If $A \in \mathcal{M}^a$, then $A \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A)$.
- (5) If $A \subseteq B$, then $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(\mathfrak{R}_m^a(A))$.

Proof (1) Assume that $A \subseteq B$. Then $X \setminus B \subseteq X \setminus A$. By Theorem 3.23(2), $(X \setminus B)_m^a \subseteq (X \setminus A)_m^a$ and hence $X \setminus (X \setminus A)_m^a \subseteq X \setminus (X \setminus B)_m^a$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(B)$.

(2) Since $A \cap B \subseteq A$ and $A \cap B \subseteq B$, $\mathfrak{R}_m^a(A \cap B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A)$ and $\mathfrak{R}_m^a(A \cap B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(B)$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A \cap B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A) \cap \mathfrak{R}_m^a(B)$.

(3) Since $A \subseteq A \cup B$ and $B \subseteq A \cup B$, $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A \cup B)$ and $\mathfrak{R}_m^a(B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A \cup B)$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A) \cup \mathfrak{R}_m^a(B) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(A \cup B)$.

(4) Assume that $A \in \mathcal{M}^a$. Then $X \setminus A$ is *a-m-closed*. By Theorem 3.25(1), we get that $(X \setminus A)_m^a \subseteq aC_m(X \setminus A) = X \setminus A$. Therefore $A = X \setminus (X \setminus A) \subseteq X \setminus (X \setminus A)_m^a = \mathfrak{R}_m^a(A)$.

(5) By Theorem 3.30, we get that $\mathfrak{R}_m^a(A)$ is *a-m-open*. By (4), we get that $\mathfrak{R}_m^a(A) \subseteq \mathfrak{R}_m^a(\mathfrak{R}_m^a(A))$.

Theorem 3.32 Let (X, m, \mathcal{S}) be a minimal structure space with an ideal and $A, B, U \subseteq X$. Then the following properties hold ;

- (1) If $U \in \mathcal{S}$, then $\mathfrak{R}_m^a(A \setminus U) = \mathfrak{R}_m^a(A)$.
- (2) If $U \in \mathcal{S}$, then $\mathfrak{R}_m^a(A \cup U) = \mathfrak{R}_m^a(A)$.
- (3) If $(A \setminus B) \cup (B \setminus A) \in \mathcal{S}$, then $\mathfrak{R}_m^a(A) = \mathfrak{R}_m^a(B)$.
- (4) If $A \in \mathcal{S}$, then $\mathfrak{R}_m^a(A) = X \setminus X_m^a$.

Proof (1) Assume that $A \subseteq X$, $U \in \mathcal{S}$. By Theorem 3.26(2) and 3.28, we have $\mathfrak{R}_m^a(A \setminus U) = X \setminus (X \setminus (A \setminus U))_m^a = X \setminus ((X \setminus A) \cup U)_m^a = X \setminus (X \setminus A)_m^a$. Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A \setminus U) = \mathfrak{R}_m^a(A)$.

(2) Assume that $U \in \mathcal{S}$. By Theorem 3.26(3), we have $\mathfrak{R}_m^a(A \cup U) = X \setminus (X \setminus (A \cup U))_m^a = X \setminus ((X \setminus A) \setminus U)_m^a = X \setminus (X \setminus A)_m^a = \mathfrak{R}_m^a(A)$.

(3) Assume that $(A \setminus B) \cup (B \setminus A) \in \mathcal{S}$.

Thus

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_m^a(A) &= \mathfrak{R}_m^a(A \setminus (A \setminus B)) \\ &= \mathfrak{R}_m^a((A \setminus (A \setminus B)) \cup (B \setminus A)) \\ &= \mathfrak{R}_m^a(B). \end{aligned}$$

(4) Assume that $A \in \mathcal{S}$. By Theorem 3.26(3), we get that $\mathfrak{R}_m^a(A) = X \setminus (X \setminus A)_m^a = X \setminus X_m^a$.

Theorem 3.33 Let (X, m, \mathcal{S}) be a minimal structure space with an ideal and $A \subseteq X$. Then $\mathfrak{R}_m^a(A) = \mathfrak{R}_m^a(\mathfrak{R}_m^a(A))$ if and only if $(X \setminus A)_m^a = ((X \setminus A)_m^a)_m^a$.

Proof It follows from the facts that,

$$\begin{aligned} \text{I) } \mathfrak{R}_m^a(A) &= X \setminus (X \setminus A)_m^a \text{ and } \mathfrak{R}_a \\ \text{II) } \mathfrak{R}_m^a(\mathfrak{R}_m^a(A)) &= X \setminus [X \setminus (X \setminus (X \setminus A)_m^a)]_m^a \\ &= X \setminus ((X \setminus A)_m^a)_m^a. \end{aligned}$$

Therefore $\mathfrak{R}_m^a(A) = \mathfrak{R}_m^a(\mathfrak{R}_m^a(A))$ if and only if $(X \setminus A)_m^a = ((X \setminus A)_m^a)_m^a$.

Discussion and Conclusion

The aim of this article is to introduce the results of properties of some sets in a minimal structure space with an ideal. In addition, we study some properties of δ -*m-open* sets, *a-m-open* sets in a minimal structure space with an ideal. Moreover, we define an δ -*m-local* function and an R_m^a -operator in a minimal structure space with an ideal. Some properties of them are obtained.

Acknowledgements

The authors would like to thank the referees for helpful comments suggestions on the manuscript. It has received help from seniors, juniors, and friends in mathematics as well.

References

Vaidyanathaswamy, R. (1945). The localization theory in set-topology. Proc. Indian Acad. Sci. 20, 51-61.
 Al-Omeri, W, Noorani, M. & Al-Omari, A. (2014). a-local function and it's properties in ideal topological space. Fasc. Math, 53, 1-15.
 Al-Omeri, W., Noorani, M. & Al-Omari, A. (2016). The operator in ideal topological space. Creat. Math, 25, 1-10.

- Noiri, T. & Popa, V. (2009). A generalization of some forms of g-irresolute functions. *European j. of Pure and Appl. Math*, 2(4): 473-493.
- Maki, H., Nagoor & Gani, K.C. (1999). On generalized semi-open and preopen sets. *Pure Appl. Math*, 49, 17-29.
- Rosas, E., Rajesh, N. & Carpintero, C. (2009). Some new type of open and closed sets in minimal structure-II. *International Mathematical Form*, 44, 2185-2198.
- Ozbakir, O.B. & Yildirim, E.D. (2009). On some closed sets in ideal minimal spaces. *Acta Math. Hungar*, 125(3), 227-235.
- Maki, H, Umehara, T. & Noiri, T. (1996). Every topological space in pre $T_{1/2}$. *Mem. Fac. Sci. Kochi Univ. Ser. A Math*. 17, 33-42.

การสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับอย่างง่ายสำหรับการเรียนการสอน

Construction of a simple alternative current (AC) magnetic field meter for classroom teaching

ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ^{1*}, สมประสงค์ โพธิ์สุต², นัตติพร เจริญชีพ², รัตนสุดา สุภคณัยสร¹, ธนพงษ์ เชื้อฉุน¹
Tippavan Hongkachern^{1*}, Somprasong PhoSud², Nattiporn charcencheep², Rattanasuda Supadanaison¹,
Tanapong Chuachun¹

Received: 14 December 2020 ; Revised: 17 February 2021 ; Accepted: 2 March 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ประกอบไปด้วย 1) หัววัดสร้างจากลวดทองแดงอาน้ำยาพันรอบแกนเหล็กทำหน้าที่รับสัญญาณสนามแม่เหล็กกระแสสลับ 2) กล่องแสดงผลทำหน้าที่วัดสัญญาณที่ได้จากหัววัด ประมวลผลข้อมูลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (NodeMCU) และแสดงผลการวัดแบบดิจิทัล (Digital) บนจอแอลซีดี (LCD) ในหน่วยมิลลิเทสลา ศึกษาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานเทสลามิเตอร์ และศึกษาคุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการเรียนการสอนฟิสิกส์ จำนวน 3 ท่าน

ผลการศึกษาพบว่าเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับอย่างง่ายที่สร้างขึ้น สามารถวัดและแสดงผลค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับได้ใกล้เคียงกับเครื่องวัดมาตรฐาน มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับในช่วง 2.3-5.1 มิลลิเทสลา ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ และมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก

คำสำคัญ: สนามแม่เหล็กกระแสสลับ ขดลวดเหนี่ยวนำ การเรียนการสอน

Abstract

An alternative electromagnetic field meter which consisted of 1) a probe made of an iron core, which is wrapped around by copper wire that is a function of receiving AC magnetic field signals, and 2) a display box having the function of taking signals from the probe to process with Node MCU and displaying the measuring results on a digital LED screen in a millitesla unit. The percentage error of measured results using the invented magnetometer are compared with ones obtained with the standard tesla meter. The efficiency of the magnetic field meter is considered for physics teaching management specialists.

The results of study showed that the simple AC magnetic field meter invented here can measure and display the AC electromagnetic field from the coil. The results were close to those obtained from the standard meter. We found that the percentage error is not more than 6 % of the measured magnetic field in the range of 2.3-5.1 mT and in the frequency of 50 Hz, and that the level of quality of the invented meter is very good.

Keywords: AC magnetic field, Induction coil, Learning Teaching

¹ อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

² นักศึกษา, คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

¹ Lecturers, Faculty of Science and Technology, Bangsomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600

² Student, Faculty of Education, Bangsomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600

* Corresponding author email: Tippavan.phy@gmail.com

บทนำ

การจัดการเรียนรู้ในรายวิชาวิทยาศาสตร์ เป็นการจัดการเรียนรู้ที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญเรียนรู้ด้วยการคิด การปฏิบัติให้เกิดการเรียนรู้ด้วยตนเอง สื่อการสอนจะช่วยกระตุ้นให้เกิดสถานการณ์การเรียนรู้การพัฒนา ศักยภาพในการคิด และเพิ่มพูนทักษะประสบการณ์ ส่งผลให้เกิดความคงทนในการเรียนรู้ตามทฤษฎีกรวยประสบการณ์ของเอ็ดการ์ เดล (Edgar Dale) โดยเฉพาะในรายวิชาฟิสิกส์การใช้สื่อประกอบการเรียนการสอนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อช่วยอธิบายหลักการ ทฤษฎีและปรากฏการณ์ต่างๆ ในทางธรรมชาติ เนื่องจากเนื้อหาในรายวิชาส่วนมากค่อนข้างยากและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (มนต์ชัย สิทธิจันทร์, 2547) ดังนั้นการใช้สื่อประกอบการเรียนการสอนจะช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจในเนื้อหาวิชาได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะในหัวข้อ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดปริมาณต่างๆ ออกมา เพื่อตรวจสอบการมีอยู่ของสนามแม่เหล็กและหลายโรงเรียนยังขาดอุปกรณ์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูงและมีการใช้งานที่ยุ่งยาก (ศุภกร กตาทิการกุล, 2556) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ได้สร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้หัววัดฮอลล์เป็นเซ็นเซอร์ ซึ่งมีกระบวนการสร้างค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากต้องมีการต่อวงจรและประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (ชญาณิช ทองมาก, 2553)

การวัดค่าสนามแม่เหล็กอย่างง่ายสามารถใช้หลักการเหนี่ยวนำในขดลวดซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ได้ซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Conduction Coil) เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Tumanski, 2007) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยการสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กอย่างง่ายโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ (ทวีชัย เชื้อจีน, 2553) พบว่าค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดแสดงผลเป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อต้องการทราบค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้ต้องนำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าไปคูณกับค่าคงที่ของขดลวดจึงได้ค่าสนามแม่เหล็กออกมา แสดงให้เห็นว่าการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำสามารถทำได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวไม่สามารถอ่านค่าสนามแม่เหล็กจากมิเตอร์ได้โดยตรง

งานวิจัยนี้จึงได้สร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กสลับที่มีกระบวนการสร้างที่ง่ายและสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่องวัด เพื่อใช้สำหรับการจัดการเรียนการสอนเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างชุดวัดสนามแม่เหล็กจากหลักการเหนี่ยวนำ และเพื่อศึกษาคุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แม่เหล็กไฟฟ้า เป็นอำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวัตถุตัวนำ ซึ่งค้นพบโดย ฮันส์ คริสเตียน เออร์สเตด นักวิทยาศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ในปี ค.ศ.1819 เขาได้ทำการทดลองที่ยืนยันได้ว่าสนามแม่เหล็กสามารถขึ้นได้จากการไหลของกระแสไฟฟ้าในเส้นลวด โดยสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบๆ เส้นลวดตามกฎมือขวา

สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดโซลินอยด์จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบการพันของขดลวด (N) ปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) ความยาวของขดลวดโซลินอยด์ (L) และค่าสภาพซึมซับได้ของตัวกลาง (μ) ค่าสนามแม่เหล็กตามแนวแกนกลางภายในขดลวดโซลินอยด์ยาว (Hugh & Roger, 2011) แสดงดังนี้

$$B = \mu \frac{NI}{L} \quad (1)$$

ขดลวดโซลินอยด์ใดๆ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจะเกิดสนามแม่เหล็กโดยทิศของสนามแม่เหล็กที่เป็นไปตามกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าแบบสลับจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสลับ

กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law) กล่าวว่า "เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ผ่านวงรอบปิดใดๆ ต่อเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น" โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (\mathcal{E}) จะต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ) ดังสมการที่ (2)

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของขดลวด เครื่องหมายลบบอกทิศของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะมีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) โดย $\Phi = BA \cos\theta$ เมื่อสนามแม่เหล็ก (B) และพื้นที่หน้าตัด (A) อยู่ในทิศเดียวกัน และพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ จะได้

$$\mathcal{E} = - \frac{NAd(B)}{dt} \quad (3)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดวงปิดใดๆ จะแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก จาก $B = B_{max} \sin(2\pi ft)$ จะได้

$$\varepsilon_{max} = -2\pi fNAB_{max} \quad (4)$$

โดย f คือ ความถี่ของสนามแม่เหล็กกระแสสลับ

B_{max} คือ ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด

ในการทดลองวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และ สนามแม่เหล็กถูกวัดเป็นค่าเฉลี่ยแบบรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square, rms) และพิจารณาเพียงขนาด จึงได้สมการ

$$\varepsilon_{rms} = 2\pi fNAB_{rms} \quad (5)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแปรผันตามสนามแม่เหล็กกระแสสลับ (Alternative Current (AC) Magnetic Field) แบบเชิงเส้น

วิธีการดำเนินการ

วัสดุ/อุปกรณ์

- 1) แกนพลาสติกทรงกระบอก และแกนเหล็กทรงกระบอก
- 2) ลวดทองแดงอบน้ำยา เบอร์ 26 และ 38
- 3) เครื่องพันเส้นลวด
- 4) เทสลา มิเตอร์ และหัววัดฮอลล์ (Teslameter with Hall probe) ยี่ห้อ Phywe
- 5) โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแส ใช้ IC MAX471/472
- 6) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เอ็มซียู (NodeMCU ESP8266)
- 7) หน้าจอแอลซีดี (Liquid Crystal Display, LCD)
- 8) มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ยี่ห้อ AMPROBE รุ่น 5 XP-A

วิธีการศึกษา

(1) สร้างขดลวดหัววัด โดยนำลวดทองแดงอบน้ำยา เบอร์ 38 พันเป็นขดลวดโซลินอยด์เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.20 เซนติเมตร สูง 2.50 เซนติเมตร มีแกนกลางเป็นเหล็กเพื่อช่วยเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

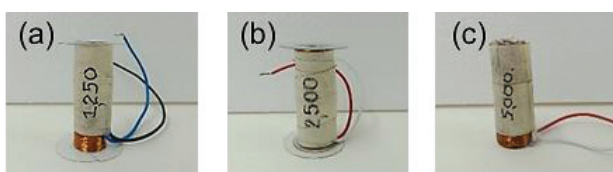


Figure 1 Probe coils with number of turns (a) 1,250 (b) 2,500 and (c) 5,000

(2) ทดสอบค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดหัววัด

เป็นการศึกษาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดลวดหัววัดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กกระแสสลับเพื่อเลือกขดลวดหัววัดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างหัววัดสนามแม่เหล็ก ในการทดสอบใช้สนามแม่เหล็กกระแสสลับ (AC Magnetic Field) จากขดลวดกำเนิดสนาม (Filed Coil) ซึ่งสร้างจากลวดทองแดงอบน้ำยา เบอร์ 26 พันรอบแกนพลาสติกทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรและยาว 10 เซนติเมตร จำนวนรอบการพัน (N) 200 รอบ

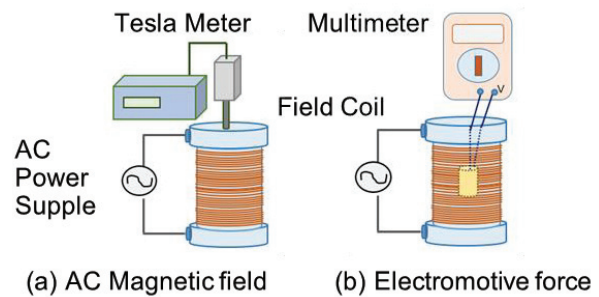


Figure 2 Schematic diagram of the measurement (a) AC Magnetic field and (b) Electromotive force

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative Current, AC) ในช่วง 0.05-0.5 มิลลิแอมแปร์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ให้กับขดลวดกำเนิดสนาม และใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานเทสลา มิเตอร์ และหัววัดฮอลล์ วัดค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ณ จุดกึ่งกลางภายในขดลวดกำเนิดสนาม ดัง Figure 2 (a) หลังจากนั้นวางขดลวดหัววัด ภายในขดลวดกำเนิดสนาม ณ ตำแหน่งเดียวกัน และใช้มัลติมิเตอร์ (Multimeter) โหมดการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดหัววัด แสดงใน Figure 2 (b)

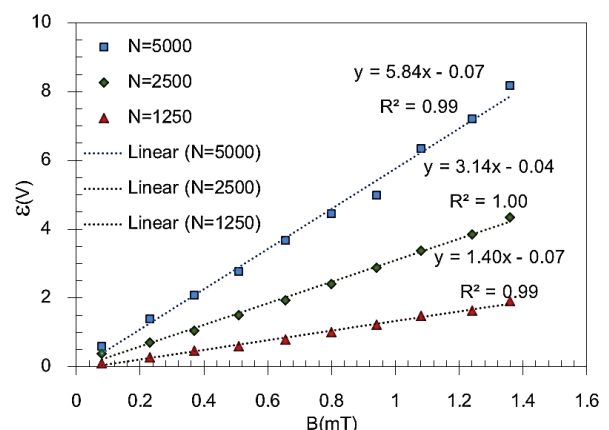


Figure 3 Relationship between electromotive force and electromagnetic field of probe coils

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) ของขดลวดหัววัดแปรผันตามปริมาณสนามแม่เหล็กกระแสสลับ (B) เป็นเชิงเส้นโดยจำนวนรอบของขดลวด (N) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อัตราการเพิ่มของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามทฤษฎีของฟาราเดย์พบว่าขดลวดหัววัดขนาด 5000 รอบ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงที่สุด ประมาณ 0.5-8.0 โวลต์ เหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ

(3) สร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่

3.1) หัววัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ สร้างจากขดลวดหัววัดหุ้มด้วยพลาสติกทรงกลมเชื่อมกับด้ามจับพลาสติกทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ขั้วของขดลวดหัววัดเชื่อมต่อกับสายไฟยาว 1 เมตร ปลายเป็นปลั๊กเสียบตัวผู้ หัววัดสนามแม่เหล็กใช้วัดสนามแม่เหล็กที่ติดตามแนวแกนขดลวด ดังภาพ Figure 4

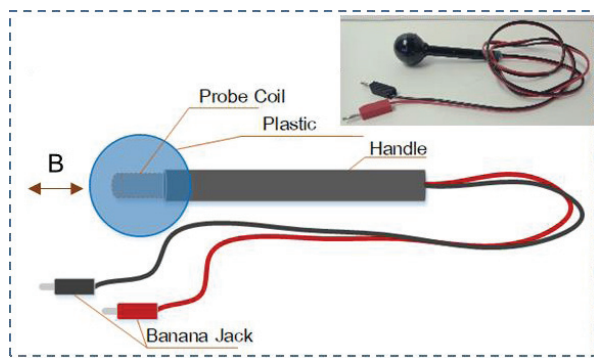


Figure 4 AC Magnetic field Probe

3.2) กล่องเครื่องวัด ใช้ไฟ 5 โวลต์ ต่อผ่านตัวแปลงไฟจาก 220V 50Hz เป็นไฟ DC 5 โวลต์ ด้านหน้ากล่องประกอบไปด้วยช่องเชื่อมต่อกับหัววัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ปุ่มเปิด-ปิด และจอแสดงผล LCD แสดงใน Figure 5

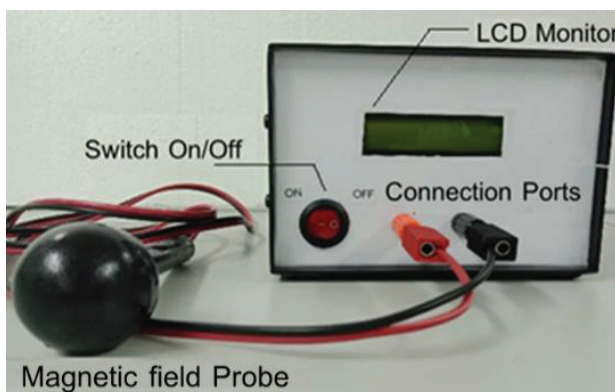


Figure 5 AC Magnetic field meter

ภายในกล่องเครื่องวัดเป็นวงจรทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่วัดได้ให้แสดงผลในหน่วยเทสลาส่วนประกอบในวงจรแสดงใน Figure 6

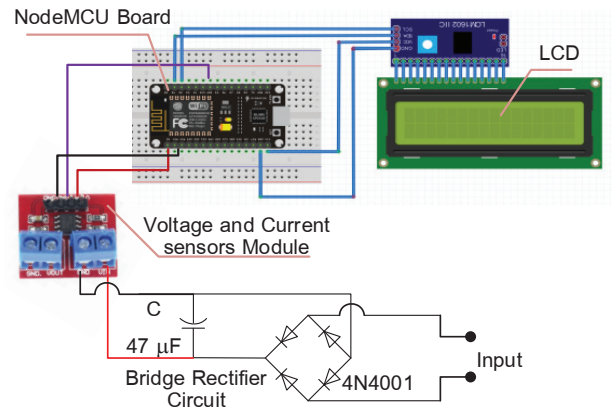


Figure 6 Diagram of Circuit

จาก Figure 6 สัญญาณจากหัววัดสนามแม่เหล็กเข้าวงจร (Input) ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์โดยใช้ไดโอดเบอร์ 4N4001 และตัวเก็บประจุ 47 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่แปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้กับโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแส ชนิด DC (Voltage and Current sensors Module) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้า DC ช่วง 3-25V และกระแสไฟฟ้าในช่วง 0-3A (Maximintegrated, 2021) จากนั้นส่งค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Node MCU ผ่านพอร์ตตอนาลอก (A0) เพื่อประมวลผลและแสดงค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับผ่านหน้าจอ LCD

(4) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กกระแสสลับของขดลวดหัววัดเป็นการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแส เปรียบเทียบกับการใช้มัลติมิเตอร์

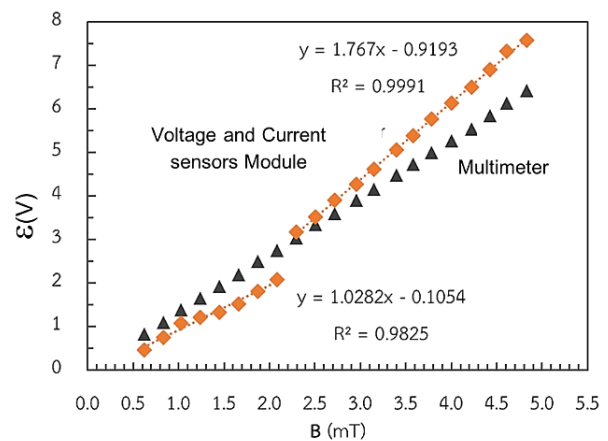


Figure 7 Relationship between electromotive force and AC magnetic field

จาก Figure 7 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กกระแสสลับซึ่งวัดโดยโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสมีแนวโน้มต่างจากกราฟซึ่งวัดได้จากมัลติมิเตอร์เล็กน้อย โดยแนวโน้มกราฟข้อมูลจากโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงสนามแม่เหล็กต่ำกว่า 2.3 มิลลิเทสลา และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำกว่า 3 โวลต์ แต่แสดงความเป็นเชิงเส้นในช่วงสนามแม่เหล็ก 2.3-4.8 มิลลิเทสลา และแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3.0-7.5 โวลต์ เนื่องมาจากข้อจำกัดของเซนเซอร์ในการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ในช่วง 3-25 โวลต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการความสัมพันธ์ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กกระแสสลับในช่วงแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3.0-7.5 โวลต์ และนำสมการความสัมพันธ์ $y = 1.767x - 0.9193$ ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ด้วยโปรแกรม Arduino (IDE) โดยผังงาน (Flowchart) แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดัง Figure 8

(5) ศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เป็นการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน เทสลามิเตอร์และหัววัดฮอลล์

(6) ประเมินคุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประเมิน จากผู้เชี่ยวชาญทางด้านฟิสิกส์จำนวน 3 ท่าน ประเมินจากแบบประเมินคุณภาพแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ แบบประเมิน แบ่งเป็น 3 ด้านได้แก่ 1) ด้านลักษณะกายภาพทั่วไป การบำรุงรักษาและซ่อมแซม 2) ด้านลักษณะการใช้งาน และ 3) ด้านความเหมาะสมด้านการนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอน

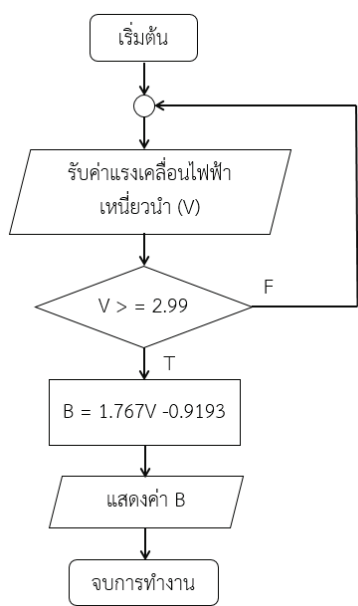


Figure 8 Flow chart of program

ผลการศึกษา

(1) ผลการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error %) ของสนามแม่เหล็กที่วัดจากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับที่สร้างขึ้น (B_{test}) และเครื่องวัดมาตรฐาน เทสลามิเตอร์และหัววัดฮอลล์ (B_{lab}) โดยทำการทดสอบจำนวน 9 ครั้ง ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่าง 2.39 ถึง 5.81 มิลลิเทสลา

Table 1 Magnetic field test

Times	B_{lab} (mT)	B_{test} (mT)	Error (%)
1	2.39	2.48	3.77
2	2.68	2.69	0.37
3	2.81	2.85	1.42
4	2.89	3.04	5.19
5	3.16	3.24	2.53
6	3.87	3.97	2.58
7	4.15	4.3	3.61
8	4.68	4.87	4.06
9	5.81	6.06	4.30

Table 2 AC magnetic field meter quality assessment results

Assessment list	\bar{x}	SD	Meaning
1. General physical maintenance and repair	4.78	0.31	Very good
2. Usage characteristics	4.67	0.47	Very good
3. In terms of use in teaching and learning	4.44	0.78	good
Average	4.63	0.52	Very good

จาก Table 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสนามแม่เหล็กกระแสสลับซึ่งวัดได้จากเครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็กกระแสสลับที่สร้างขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.37 ถึง 5.19 เปอร์เซ็นต์

(2) ผลการประเมินคุณภาพเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ

คุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับ ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านฟิสิกส์จำนวน 3 ท่านแสดงผลดัง Table 1 พบว่าการประเมินคุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านลักษณะทางกายภาพทั่วไปการบำรุงรักษาและซ่อมแซม ด้านลักษณะการใช้งาน และความเหมาะสม และด้านการนำไปใช้ประกอบการเรียน

การสอน โดยภาพรวมมีคะแนนเฉลี่ย ($\bar{X} = 4.63$) จากคะแนนเต็ม 5.00 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.52) ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก โดยผู้เชี่ยวชาญได้แสดงความคิดเห็นว่าเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบดิจิทัลโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน มีต้นทุนต่ำสามารถหาอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย ขนาดพกพาง่ายสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก

สรุปและอภิปรายผล

1. ได้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับเทสลามิเตอร์ โดยใช้วัดค่าสามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กขนาด 2.3 มิลลิเทสลา ขึ้นไป มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน ไม่เกิน 6% คืออยู่ในช่วงประมาณ 0.37-5.19 % สอดคล้องกับผลงานวิจัยของนายทวีชัย เชื้อจิ้น (2553) ที่การสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณจากทฤษฎีไม่เกิน 10%

2. คุณภาพของเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญมีผลการประเมินอยู่ในระดับดีมาก อาจเนื่องมาจาก เครื่องที่พัฒนาขึ้นมามีกระบวนการจัดหา สร้าง และซ่อมแซม มีราคาถูกและมีการใช้งานง่าย

ข้อเสนอแนะ

1. การใช้งานเครื่องวัดสนามแม่เหล็กต้องวางหัววัดสนามแม่เหล็กให้ระนาบพื้นที่หน้าตัดของขดลวดหัววัดตั้งฉากกับทิศของสนามที่วัดเสมอ

2. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้นใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับเพียงอย่างเดียวไม่สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กกระแสตรงได้

3. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กกระแสสลับที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วัดสนามแม่เหล็กขนาด 2.3 มิลลิเทสลา ขึ้นไปได้ หากต้องการให้สามารถวัดค่าได้ต่ำกว่า อาจต้องเพิ่มวงจรรขยายสัญญาณ หรือเปลี่ยนตัวโมดูลที่ใช้วัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้วัดค่าได้ที่แรงดันต่ำกว่า 3 โวลต์

4. หากต้องการสร้างสนามแม่เหล็กกระแสสลับที่มีค่าสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มกระแสหรือเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดกำเนิดสนาม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ในการสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ชญาณิต ทองมาก. (2553). *อุปกรณ์หัววัดฮอลล์ที่ผลิตขึ้นสำหรับการเรียนการสอนฟิสิกส์ เรื่อง สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำตรงและขดลวดโซลินอยด์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทวีชัย เชื้อจิ้น. (2553). *การสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มนต์ชัย สิทธิจันทร์. (2547). *ผลของการฝึกจินตนาการในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและความสามารถในการจินตนาการของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5*. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภกร กตาริการกุล, สุเจนต์ พรหมเหมือน และปิติ พานิชายุนนท์. (2556). *ชุดทดลองแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำกระแส*. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 16(1), 9-15.
- Hugh D.Y. & Roger A.F. (2011). *University physics with modern physics*. 13th ed. Addison-Wesley.
- Maximintegrated. (1996). *Precision, High-side current-sense amplifiers*. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX471-MAX472.pdf>.
- Tumanski S. (2007). *Induction Coil Sensors—a Review*. *Measurement Science and Technology*, 18(3), R31-R46.

ผลของรูปแบบการไหลแบบธรรมชาติกับการไหลแบบบังคับของน้ำต่อค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง

Effects of natural flow and force flow patterns of water on efficiency of a semi-transparent photovoltaic thermal module

เอกภูมิ ใจศิริ¹, อนุสรณ์ แสงประจักษ์²
Akaphoom Jaisiri¹, Arnusorn Seangprajak²

Received: 13 aUGUST 2020 ; Revised: 17 November 2020 ; Accepted: 25 December 2020

บทคัดย่อ

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent photovoltaic thermal module, SPVT) เป็นแผงที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และให้แสงส่องสว่างด้านล่างไปพร้อมกัน เป็นการเพิ่มการประโยชน์ของรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่รับรังสีให้มากขึ้น บทความนี้นำเสนอการศึกษาการไหลเวียนน้ำแบบธรรมชาติ (passive flow) และแบบบังคับ (active flow) ที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ ในแผง SPVT ว่าส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของแผง SPVT อย่างไร ซึ่งทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบแผง SPVT ขนาด 100 W พื้นที่ 0.72 m² ณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยวัดค่าอุณหภูมิแผง อุณหภูมิน้ำ อุณหภูมิแวดล้อม ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ทุก 15 นาที ผลการวิเคราะห์การทำงานของของแผง SPVT แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบบังคับสามารถควบคุมอุณหภูมิแผงได้ดีกว่าแบบธรรมชาติ โดยการไหลเวียนน้ำแบบบังคับที่อัตราไหล 0.02 kg/s ให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงที่สุด เท่ากับ 12.73% และให้ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพรวมสูงที่สุด เท่ากับ 49.36% และ 62.09% ตามลำดับ นอกจากนี้แผง SPVT ที่ทำการศึกษาให้ค่าความส่องสว่างช่วงกลางวันเพียงพอต่อการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป

คำสำคัญ: แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดกึ่งโปร่งแสง ประสิทธิภาพแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

The semi-transparent photovoltaic thermal module (SPVT) is a solar module that can generate electricity, heat and part of sun light through the module while operating, which is beneficial for improving of solar utilization per area of the module. This paper presents the effects of the natural and force flow patterns on the efficiency of the SPVT module. The 100 W SPVT module had an area of 0.72 m² and was designed, studied and experimented at Mahasarakham University. The solar module temperature, water temperature, ambient temperature, solar irradiation and electrical parameters were measured every 15 minutes. The analysis of results shows that the water with active flow pattern induces a module temperature lower than in the passive flow pattern. The active flow of water at 0.02 kg/s causes maximum electrical efficiency, thermal efficiency and overall efficiency of SPVT module by 12.37%, 49.36% and 62.09% respectively. Moreover, the SPVT module provides sufficient illuminance for the general area during the day.

Keywords: Semi-Transparent Photovoltaic/Thermal module (SPVT), SPVT Efficiency, Solar cell

¹ นิสิตปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Master degree student, Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.

² Assist. Prof., Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.

* Corresponding author ; Arnusorn Seangprajak, Energy Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand. arnusorn.s@msu.ac.th, Tel: 043754322, Fax: 043754379

บทนำ

ประเทศไทยอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตร มีศักยภาพพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยสูงถึง 18.0 MJ/m²/day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) พลังงานแสงอาทิตย์จึงได้รับการส่งเสริมจากรัฐและมีการใช้อย่างแพร่หลายในประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พลังงาน, 2552) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic module, PV module) เป็นรูปแบบการใช้พลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมในประเทศ เนื่องจากต้นทุนที่ถูกลง เข้าถึงได้ง่ายขึ้น มีความสะดวกในการใช้งาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้าน ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่มีค่าเพียง 6-20% (Dubey *et al.*, 2013) และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนบนแผงขณะใช้งาน (Dubey *et al.*, 2013)

การดึงเอาความร้อนสะสมบนแผงดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อนพร้อมกันกับการผลิตไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อพื้นที่รับแสง เรียกแผงที่ทำงานในลักษณะดังกล่าวว่า แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (photovoltaic thermal module, PVT module) นิยมใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการนำความร้อนออกจากแผง และแผง PVT โดยมากเซลล์ที่ใช้ผลิตจากผลึกซิลิคอน เนื่องจากให้สัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าต่อความร้อนออกมาได้มากกว่ากรณีของฟิล์มบางซิลิคอน

(Dubey *et al.*, 2013) นอกจากการพยายามพัฒนาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีอาทิตย์ของแผง PV ให้สูงขึ้นโดยใช้หลักการของแผง PVT แล้ว ยังมีกลุ่มของนักวิจัยที่ทำการศึกษการประยุกต์ใช้แผง PV ที่ติดตั้งกับอาคารให้สามารถทำงานร่วมกับการปรับสภาวะความสบายอาคารอีกทางหนึ่งด้วย เรียกแผง PV ที่ปรับปรุงขึ้นเพื่องานลักษณะดังกล่าวว่าแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent photovoltaic thermal module, SPVT module) โดยแผงจะสามารถผลิตไฟฟ้า ความร้อน และให้แสงส่องผ่านด้านล่างได้ด้วย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเน้นไปที่การใช้อากาศนำเอาความร้อนออกจากแผงไปให้ความอบอุ่นภายในอาคาร (building integrated semi-transparent photovoltaic thermal, BISPVT) เช่น

Arjun Deo และคณะ (Deo *et al.*, 2014) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองคาบของความร้อนในอากาศที่เกิดจากแผง BISPVT โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สำหรับการประเมินค่ารังสีและอุณหภูมิของอากาศจากแผง โดยการศึกษาดังกล่าวสามารถทำอุณหภูมิห้องสูงสุดได้เท่ากับ 44.6 °C

Firehun Taffesse และคณะ (Taffesse *et al.*, 2015) ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำงานของแผง BISPVT ร่วมกับผนังแบบทรอมบ์ (trombe wall) เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่องของผนังที่เหมาะสมควรมีขนาด 0.3-0.4 m

Ankita Gaur และคณะ (Gaur *et al.*, 2016) ทำการติดตั้งแผง BISPVT เพื่อช่วยระบายอากาศในห้อง ผลการศึกษาของเขาแสดงให้เห็นว่าการใช้แผง BISPVT ช่วยให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในห้องลดลง และทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์สูงขึ้น ดีกว่ากรณีของการใช้แผง PV ธรรมดาทุกกรณี

Aloys Matial และคณะ (Martial *et al.*, 2015) ทำการศึกษาคัดลอกติดตั้งเครื่องระบายความร้อนในแผง BISPVT ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน มีพื้นที่ระบบรวม 36.45 m² โดยพบว่าระบบดังกล่าวสามารถผลิตความร้อนได้ 76.66 kWh/yr และมีประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเท่ากับ 56.07%

Deepali Kamthania และ G. N. Tiwari (Kamthania & Tiwari, 2014) ทำการวิเคราะห์พลังงานในทอมต่าง ๆ ที่ได้จากแผง SPVT ที่ใช้อากาศในการดึงความร้อนออกทั้งด้านหน้าและด้านหลัง (double pass) โดยใช้เซลล์ชนิดผลึกซิลิกอนและชนิด HIT เปรียบเทียบกัน โดยทำการต่อแผง 3 กรณีคือ แบบอนุกรม-ขนาน แบบขนาน และแบบอนุกรม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การต่อแผงแบบขนานเหมาะสำหรับการเน้นให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุด ส่วนการต่อแบบอนุกรมเหมาะสำหรับการเน้นให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า แผงที่ใช้เซลล์ชนิด HIT จะให้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี ค่าการชดเชยการปลดปล่อยแก๊ส CO₂ สูงกว่ากรณีใช้ผลึกซิลิกอนธรรมดา

T.T. Chow และคณะ (Chow *et al.*, 2009) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ BIPV ที่ติดตั้งกับอาคารเพื่อการผลิตน้ำร้อน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 37.5% และ 9.35% ต่อปีตามลำดับ โดยระบบที่ติดตั้งสามารถลดความร้อนเข้าออกอาคารได้ 38%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับแผง SPVT นั้นเน้นไปที่การใช้อากาศในการระบายความร้อนและติดตั้งเพื่อใช้งานกับอาคาร มีเพียงงานวิจัยของ T.T. Chow เท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำ แต่แผงดังกล่าวยังไม่ใช่แผง SPVT ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและศึกษาแผง SPVT ที่เน้นใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากแผง โดยทำการออกแบบโครงสร้างและประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาใหม่ ให้มีลักษณะเป็นกึ่งโปร่งแสงเพื่อให้แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่าน

ด้านล่างของแผงได้ และมีช่องให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผงเพื่อระบายความร้อน โดยนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบยึดหยุ่นชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนที่โครงสร้างเดิมมีแผ่นปิดด้านหลังเป็นโพลีเมอร์แผ่นบาง (tedlar) มีลักษณะที่บดแสง โดยแผงที่ใช้มีขนาด 100 W นำมาประกอบเป็นแผง SPVT เพื่อศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ของแผง SPVT สูงที่สุด อีกทั้งทำการศึกษาอุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่ได้ต่อวัน และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แผง SPVT สามารถผลิตได้ และเพื่อทำการศึกษาค่าความส่องสว่างที่แผง SPVT สามารถทำได้ที่ระยะสูงจากพื้นถึงแผง 0.40, 1.50 และ 2.60 m ตามลำดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้น้ำมาช่วยในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสง สมการและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง SPVT มีดังนี้

พลังงานรังสีอาทิตย์ที่แผง SPVT ได้รับประเมินหาได้จากสมการ

$$E = GA \times dt \quad (1)$$

โดยที่ E คือพลังงานรังสีอาทิตย์ (J), G คือความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), A คือพื้นที่รับแสงของแผง SPVT (m^2), คือช่วงเวลาแผงรับรังสีอาทิตย์ (s)

การหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง SPVT ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 2 และ 3 (Kumar & Rosen, 2010)

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{GA_c} \quad (2)$$

$$\eta_{el} = FF \left(\frac{V_{oc} I_{sc}}{GA_c} \right) \quad (3)$$

โดยที่ η_{el} คือประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (%), V_{oc} , V_m คือค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับ (V), I_{sc} , I_m คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับ (A), G คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), A_c คือ พื้นที่รับแสงแผงเซลล์แสง

อาทิตย์ (m^2) และ FF คือค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (กำหนดที่ 0.8 สำหรับเซลล์จากซิลิกอน (Javed, 2014))

ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT หาได้จากสมการที่ 4 (Badescu *et al.*, 1997 ; Duffie & Beckman, 1991) โดยที่ η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT, Q_u คือ พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากแผง SPVT (kJ), A_c คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2), G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s), C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($kJ/kg \cdot C$), ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำ ณ ตำแหน่งเข้าและออกจากแผง

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T dt}{A_c G dt} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_c G} \quad (4)$$

นอกจากนี้ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT ยังสามารถหาได้จากสมการ 5 (Badescu *et al.*, 1997) นั่นคือ

$$\eta_{th} = \frac{F_R [G(\tau \cdot \alpha) - U_L (T_{fi} - T_a)]}{G} \quad (5)$$

โดย U_L คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot C$) t คือค่าการส่องผ่านด้านบนของแผ่นปิดด้านบน a คือค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดด้านบน T_{fi} คือค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผง ($^{\circ}C$) และ T_a คือค่าอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}C$) และ F_R คือแฟกเตอร์การดึงความร้อนของแผง ซึ่งหาได้จากสมการ

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [G - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (6)$$

T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผง ($^{\circ}C$)

ในส่วนของประสิทธิภาพรวม (η_o) นั้นหาได้จากสมการที่ 7 (Diwania *et al.*, 2020) นั่นคือ

$$\eta_o = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (7)$$

วิธีการวิจัย

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบแผง SPVT โดยใช้น้ำในการระบายความร้อน ได้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบยึดหยุ่น ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนขนาด กว้าง 540 mm ยาว

1,200 mm หนา 2 mm แผงมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 W ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 18 V และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 5.6 A การออกแบบประกอบแผง และการทดสอบ แผง SPVT มีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ออกแบบแผง SPVT โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline ขนาด 100 W มาตัดแยกเซลล์แต่ละแถวออกจากกันแล้วนำมาประกอบเป็นแผง SPVT โดยด้านหน้าแผงเซลล์ใช้แผ่นกระจกหนา 3 mm ขนาดกว้าง 600 mm ยาว 1,200 mm ส่วนด้านหลังใช้แผ่นอะคริลิกหนา 2 mm ขนาดเท่ากับกระจกแผ่นหน้า มีช่องน้ำไหลเวียนผ่านเซลล์ทั้งด้านหลังและด้านหน้าแผงเซลล์ โดยใช้แผ่นอะคริลิกหนา 2 mm กว้าง 10 mm มากั้นแต่ละแถว โดยช่องกันห่างจากตัวแผ่นเซลล์ประมาณ 1 mm แผง SPVT ออกแบบให้ช่องน้ำเข้าและออกจะอยู่ด้านบน การไหลเวียนน้ำจะให้ผ่านไปแต่ละสตริ่งดัง Figure 1 และ Figure 2

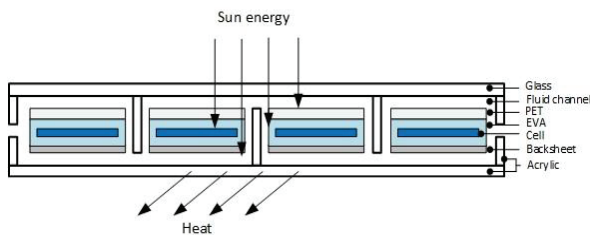
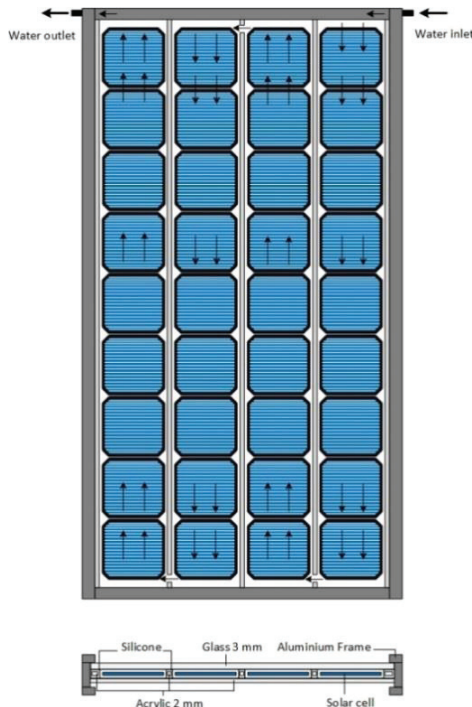
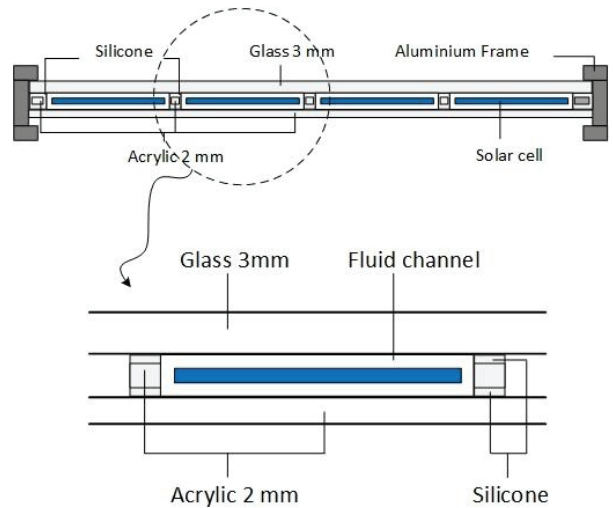


Figure 1 The cross-section SPVT module structure



(a)



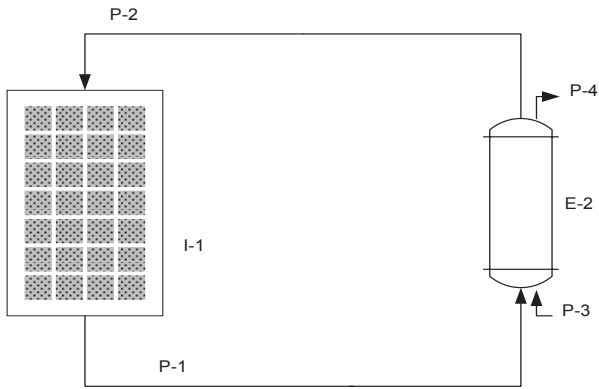
(b)

Figure 2 (a) Fluid flow diagram in the SPVT module (b) Dimension details of the SPVT module

ช่องน้ำเข้า-ออกจากแผงทำจากอลูมิเนียมตัว U ขนาด 10 mm และกรอบแผงเซลล์ใช้อลูมิเนียมฉากหนา ขนาด 25 mm กับขนาด 20 mm ดัง Figure 3 ขนาดท่อส่งน้ำจากถึงน้ำและถึงเก็บน้ำใช้ท่อพีวีซีขนาด 1/2 in ท่อส่งน้ำเข้า-ออกจากแผงใช้ท่อทองแดงขนาด 3/8 in โดยด้านน้ำเข้าด้านบน 1 ช่อง และน้ำออกด้านล่าง 1 ช่อง การติดตั้งแผงทดสอบ SPVT แสดงไว้ใน Figure 4 และ Figure 5

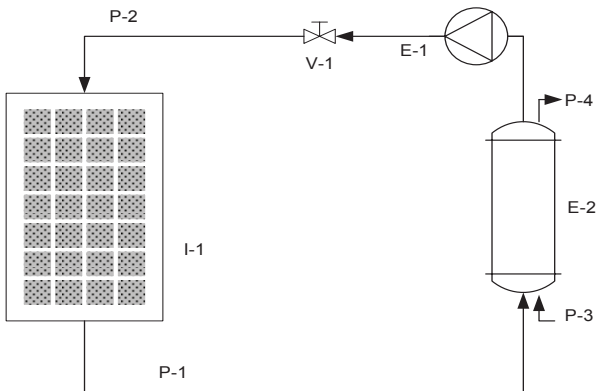


Figure 3 Construction details of the SPVT module



P-1 = water outlet SPVT
 P-2 = water inlet SPVT
 P-3 = water inlet storage tank
 P-4 = water outlet storage tank
 E-2 = storage tank
 I-1 = SPVT module

Figure 4 The experimental setup diagram of the SPVT system (passive flow)



P-1 = water outlet SPVT
 P-2 = water inlet SPVT
 P-3 = water inlet storage tank
 P-4 = water outlet storage tank
 E-2 = storage tank
 E-1 = pump
 I-1 = SPVT module
 V-1 = screw-down valve

Figure 5 The experimental setup diagram of the SPVT system (active flow)

โดยในการศึกษานี้ตัวแปรต้นได้แก่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย (G) ค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผง (T_{in}) และค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) และค่าอัตราการไหล ส่วนตัวแปรตามที่ทำกรวัดเพื่อนำไปสู่การหาค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของแผงได้แก่ค่าอุณหภูมิแผง อุณหภูมิน้ำออกจากแผง ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc})

2. ทำการทดลองและวัดค่าข้อมูลทางไฟฟ้าและความร้อน โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น Agilent 34970A Data acquisition & switching unit เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ใช้สายวัดอุณหภูมิเป็นสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (type K) ใช้เครื่องวัดความเข้มแสง Hukseflux รุ่น LP02 มัลติมิเตอร์รุ่น seaward PV 150 ทำการทดลองเก็บข้อมูลตั้งแต่วเวลา

08.00 น.-16.30 น. บันทึกค่าทุกๆ 15 นาที อัตราการไหลของน้ำที่ทำการทดลอง กรณีการไหลโดยธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 0.005 kg/s โดยเฉลี่ย ส่วนการไหลแบบบังคับ กำหนดการไหลในการทดสอบเท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.04 kg/s ทำการวัดอุณหภูมิ น้ำเข้า-ออกแผงทดสอบ (T_{in} , T_{fo}) อุณหภูมิแผงทดสอบ (T_{spvt}) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย (G) ค่าแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ในการทดสอบระบบ ทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิแผง (T_{spvt}) 6 ตำแหน่ง คือด้านบนและด้านล่างแผงอย่างละ 3 ตำแหน่ง (บน กลาง ล่าง) ส่วนค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าใช้มิเตอร์วัดจดบันทึกข้อมูล

3. ทำการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple linear regression, MLR) เพื่อจำลองการทำงานของแผง SPVT โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างสมการถดถอยแบบเส้นตรงหลายตัวแปร แล้วนำสมการที่ได้ไปประเมินการทำงานของแผง SPVT ที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขของแสงและอุณหภูมิแวดล้อมเดียวกัน เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างๆ และประสิทธิภาพที่ได้

4. ทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากแผง SPVT โดยจำลองสภาพของหลังคาบ้านและทำการติดตั้งแผง SPVT ทำให้เป็นห้องปิดไม่ให้แสงภายนอกรบกวนโดยใช้ผ้าทึบคลุมปิดไว้ ตำแหน่งในการวัดค่าความส่องสว่างใต้แผง SPVT นั้นมี 3 จุด คือที่ระยะความสูงจากพื้น 0.40, 1.50 และ 2.60 m พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดความเข้มแสง อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิภายในห้อง ดัง Figure 6 และ Figure 7

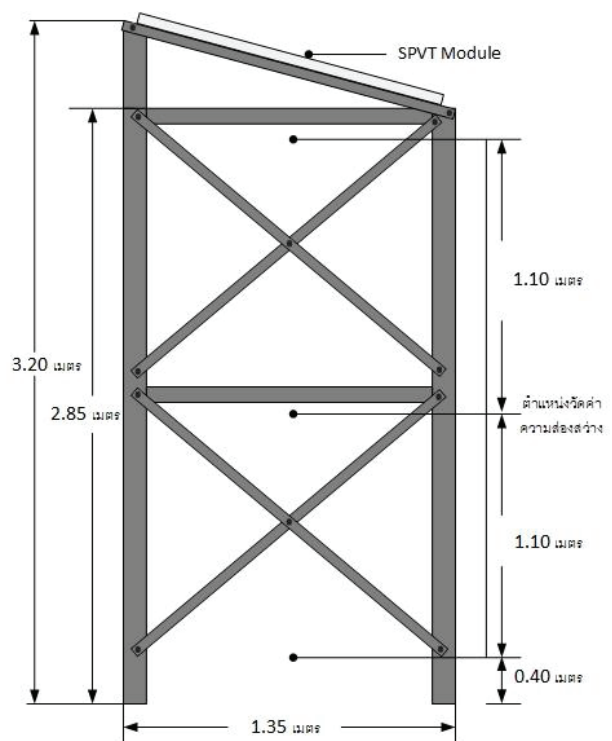


Figure 6 Design of measuring light transmittance



Figure 7 Photograph of measuring light transmittance

ผลการวิจัย

ข้อมูลจากการทดลองได้ถูกนำมาสร้างสมการถดถอยพหุคูณ โดยสมการที่ได้แสดงใน Table 1 ผลการประเมินอุณหภูมิแผง (T_{spvt}) ที่ได้จากการใช้น้ำไหลเวียนแบบธรรมชาติและไหลแบบบังคับที่อัตราการไหลต่างๆ ดังแสดงใน Figure 8 จากรูปจะเห็นได้ว่าการไหลของน้ำโดยธรรมชาติ (0.005 kg/s) ส่งผลให้อุณหภูมิแผง (T_{spvt}) มีค่าสูงกว่าการไหลแบบบังคับทุกกรณี ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการผลิตไฟฟ้าของแผง แต่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการระบายความร้อนก็จะดีขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแผงลดลง อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลที่สูงเกินไปก็ทำให้อุณหภูมิน้ำที่ได้มีค่าต่ำลง อีกทั้งไม่ได้ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด

Table 1 Multiple regression equations

Variable	Equation	R ²
T_{spvt}	$= -3.541 + (0.00735 * G) + (0.758 * Twi) + (0.426 * Ta) - (200.713 * m)$	0.90
T_{wo}	$= -1.298 + (0.00402 * G) + (0.0576 * Twi) + (0.0457 * Ta) + (0.977 * Tspvt) - (96.968 * m)$	0.96
V_{oc}	$= 22.117 + (0.00184 * G) - (0.102 * Twi) - (0.0517 * Tspvt) + (0.0854 * Ta) + (9.560 * m)$	0.73
I_{sc}	$= 2.143 + (0.00530 * G) + (0.0574 * Twi) - (0.114 * Tspvt) + (0.00538 * Ta) - (4.674 * m)$	0.93

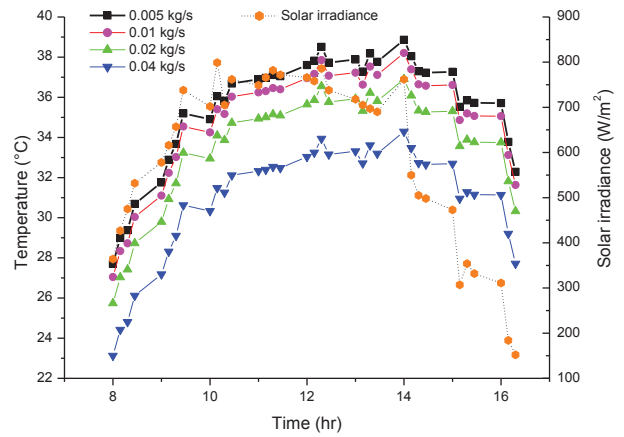


Figure 8 SPVT temperature towards water mass flow rate at solar irradiance

ในส่วนของการนำความร้อนออกจากแผง โดยในการใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้น การประเมินอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง SPVT ที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ได้ผลดังแสดงใน Figure 9 จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไหลเวียนแบบธรรมชาติ (0.005 kg/s) ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิน้ำสูงที่สุดที่ 43.08 °C ที่เวลา 14.00 น. ความเข้มข้นรังสีอาทิตย์เท่ากับ 769 W/m² โดยอุณหภูมิน้ำเข้าแผงทดสอบเท่ากับ 32.75 °C โดยได้ค่าเฉลี่ยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้า-น้ำออก (ΔT) ตลอดวันสูงสุดที่ 8.04 °C

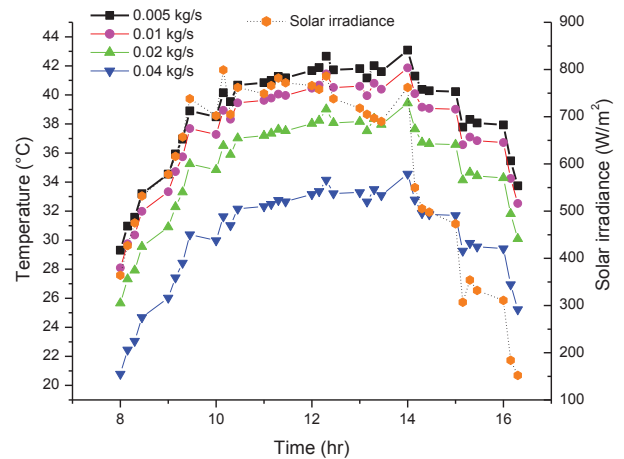


Figure 9 Outlet temperature towards water mass flow rate at solar irradiance

ในส่วนของคุณค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้แสดงผลการศึกษาใน Figure 10 และ Figure 11 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไหลเวียนน้ำแบบบังคับให้ค่า V_{oc} และ I_{sc} สูงกว่าการไหลเวียนแบบธรรมชาติ โดยค่า V_{oc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหล ส่วนค่า I_{sc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหลตั้งแต่ 0.005 kg/s จนถึง 0.02 kg/s เมื่อเกินไปกว่านั้น I_{sc} จะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหล เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิแผงลดต่ำลง (Figure 8) ส่งผลต่อพลังงานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่รอยต่อ P-N ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดต่ำลงเล็กน้อย (Javed, 2014 ; เชนนิตริธ อิมปริดา และ วันชัย ททรัพย์สิงห์, 2554) แต่อย่างไรก็ดีหากพิจารณาข้อมูลใน Figure 10-12 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่อัตราการไหลต่าง ๆ นั้นมีนัยสำคัญน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าที่ค่าอัตราการไหลที่สูงเกินไปนั้นส่งผลน้อยมากต่อการเพิ่มขึ้นของค่าทางไฟฟ้าของ

แผงเซลล์ โดยอัตราการไหลที่เหมาะสมทำให้เกิดความโดดเด่นที่ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพรวมของแผง

จาก Figure 10 อัตราการไหลของน้ำที่ 0.04 kg/s จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ยตลอดการทดลองสูงที่สุดที่ 21.58 V ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 592 W/m² ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแสดงไว้ใน Figure 11 มีค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 4.29 A ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.02 kg/s ณ เวลา 10.15 น. ค่าความเข้มแสง 799 W/m² โดยที่อัตราการไหล 0.005 kg/s ให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำที่สุด

ผลการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง SPVT โดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน แสดงใน Figure 12 และ Figure 13 ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 12.73% ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.02 kg/s เช่นเดียวกับประสิทธิภาพทางความร้อนที่ให้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุด 49.36% ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน

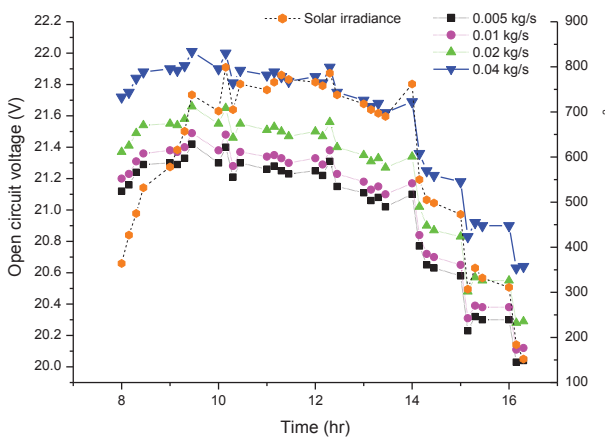


Figure 10 Open circuit voltage characteristic towards water mass flow rate at solar irradiance

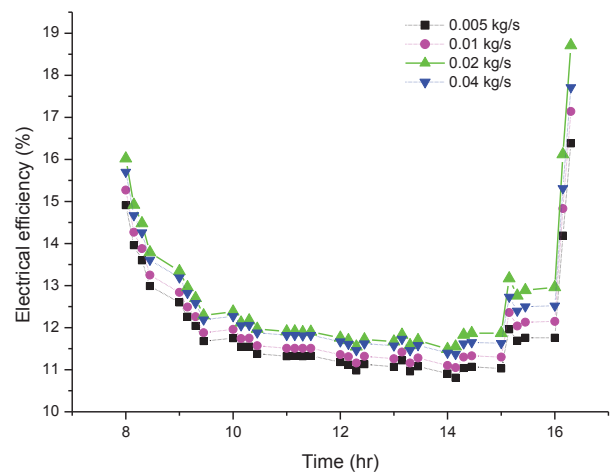


Figure 12 Electrical efficiency towards water mass flow rate

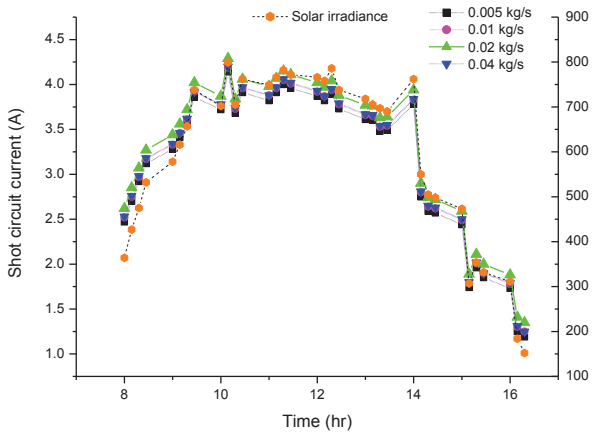


Figure 11 Short circuit current characteristic towards water mass flow rate at solar irradiance

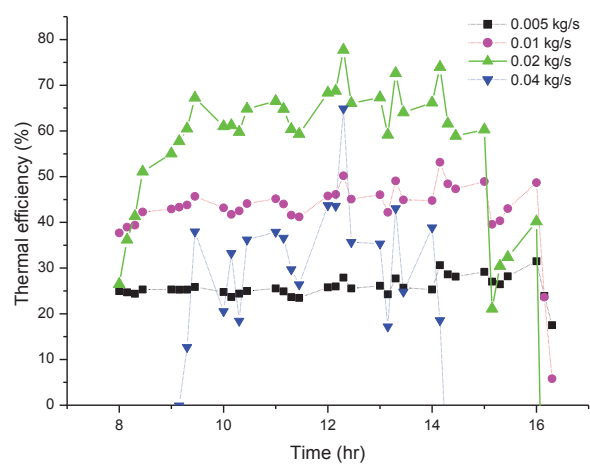


Figure 13 Thermal efficiency towards water mass flow rate

โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพรวมของแผง SPVT พบว่า ค่าประสิทธิภาพรวม ณ เวลาใด ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.02 kg/s มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพรวมของแผงที่ใช้อัตราการไหลอื่นๆ รวมทั้งสูงกว่าที่ใช้การไหลเวียนแบบธรรมชาติอย่างชัดเจน ดัง Figure 14 โดยมีประสิทธิภาพรวมตั้งแต่เวลา 9:00-15:00 น. โดยเฉลี่ยเท่ากับ 74.75% สูงกว่าการใช้น้ำไหลเวียนแบบธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพรวมเพียง 27.5%

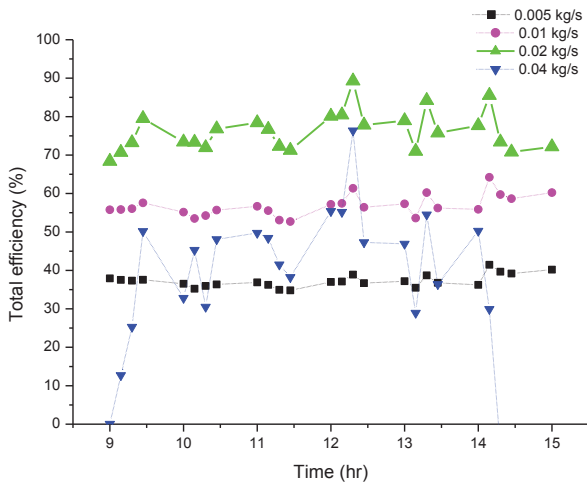


Figure 14 Total efficiency towards water mass flow rate

ส่วนการตรวจวัดค่าการส่องสว่างภายในห้องใต้แผง SPVT ตั้งแต่เวลา 8.00 น.-16.30 น. ที่ระยะความสูงจากพื้น 2.60, 1.50 และ 0.40 m ทำการทดลองวัดค่าเก็บข้อมูลแล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าการส่องสว่างดังแสดงตัวอย่างไว้ใน Table 2 โดยค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์การส่องสว่าง (ปริมาณแสง) กับกำลังงานที่ทำให้เกิดฟลักซ์การส่องสว่าง (lm/W) จากผลการทดลองได้ค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35% ระดับความสว่างที่ได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป (ฉัตรวัฒน์ จิตศีล, 2562)

Table 2 Light transmittance

Time (hr)	G _{avg.} (w/m ²)	Illuminance (E, (Lux))			Illuminance E _{avg.} (Lux)
		2.60 m	1.50 m	0.40 m	
9.15	317	1,100	398	141	546
9.30	327	1,263	402	116	594
9.45	392	1,286	440	126	617
10.00	613	1,480	490	129	699
10.15	900	1,770	495	140	802
10.30	620	2,500	632	172	1,101
10.45	763	2,100	615	176	964
11.00	780	3,000	690	182	1,291
Average	605	2,169	609	147	1,021

สรุปผล

การศึกษารูปแบบการไหลเวียนของน้ำที่ต่างกัน ในแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง โดยใช้ น้ำไหลผ่านด้านบนและด้านล่างของแผงเซลล์เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากแผงเซลล์ ซึ่งใช้รูปแบบการไหลเวียนแบบธรรมชาติ และรูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยทำการทดลองระบบและเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 08.00-16.30 นาฬิกาตั้งแต่เดือน ตุลาคม-พฤศจิกายน 2562 ที่มหาวิทยาลัยมหาสารคาม แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าการส่องสว่างดังแสดงตัวอย่างไว้ใน Table 2 โดยค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์การส่องสว่าง (ปริมาณแสง) กับกำลังงานที่ทำให้เกิดฟลักซ์การส่องสว่าง (lm/W) จากผลการทดลองได้ค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35% ระดับความสว่างที่ได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป (ฉัตรวัฒน์ จิตศีล, 2562)

ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบธรรมชาติ ให้ความร้อนสะสมบนแผงถูกส่งผ่านออกไปได้น้อยกว่าแบบบังคับ ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิน้ำออกจากแผง SPVT สูงกว่าในรูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับ อย่างไรก็ตาม ด้วยค่าอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดเพียง 0.005 kg/s โดยเฉลี่ย ทำให้รูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับมีความโดดเด่นมากกว่าเมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของแผง SPVT ซึ่งจากผลการศึกษพบว่า รูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบบังคับที่ค่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.02 kg/s เป็นอัตราการไหลที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพรวมของแผง SPVT เฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 12.73% 49.36% และ 62.09% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพรวมของแผงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับแผง PVT ที่เคยมีผู้ทำการศึกษไว้คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 50-68% (14) และ 60-80% (Radziemsk, 2019) ตาม

ลำดับ ในส่วนของค่าความส่องสว่างได้แก่ SPVT นั้น (Table 2) ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 605 W/m^2 ที่ความสูงจากพื้นถึงแผงที่ระยะ 2.60, 1.50 และ 0.40 m มีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 2,169, 609 และ 147 Lux ตามลำดับ ซึ่งค่าความส่องสว่างภายในห้องมีประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยที่ 1.35% ระดับความสว่างที่ได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป แนวคิดของแผง SPVT ที่ทำการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์ชนิดอื่นๆ ได้ ทั้งนี้แนวทางการศึกษาต่ออาจเป็นรูปแบบของช่องแสงส่องผ่านที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ให้ตรงกับความต้องการของแสงที่แตกต่างกันออกไปหรือทำการศึกษาวิจัยเพื่อป้องกันการรั่วซึมของของไหลในแผงในระยะยาว จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า แผง SPVT เป็นอุปกรณ์พลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแสงได้มากขึ้น สามารถประยุกต์ใช้กับอาคารต่างๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). รายงานประจำปี 2559. กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). ศักยภาพรังสีรวมปี 2552. กระทรวงพลังงาน.

ณัฐวัฒน์ จิตศีล. (2562). แนวทางการปรับปรุงแสงสว่างเพื่อความสม่ำเสมอในการส่องสว่างกรณี ศึกษาอาคารตลาดเชิงวัฒนธรรมองค์การบริหาร ส่วนตำบลพระธาตุอำเภอนาดูนจังหวัด มหาสารคาม. วารสารสถาปัตยกรรม การออกแบบ และการก่อสร้าง, 1(1), 65-76.

เดชนิติธร อิมปริดา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์. (2554). แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. ลำปาง.

Badescu V, Landsberg PT, Devos A. (1997). Statistical thermodynamic foundation for photovoltaic and photothermal conversion III: application to hybrid solar converters. *J Appl. Phys.*, 81, 3692-3699

Chow TT, Chan ALS, Fong KF, Lin Z, He W, Ji J. (2009). Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application. *Applied Energy*, 86(5), 689-696.

Deo A, Mishra GK, Tiwari GN. (2017). A thermal periodic theory and experimental validation of building integrated semi-transparent photovoltaic thermal (BiSPVT) system. *Solar Energy*, 155, 1021-1032.

Diwania S, Agrawal S, Siddiqui AS. (2020). Photovoltaic-thermal(PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *Int J Energy Environ Eng*, 11, 33-54.

Dubey S, Sarvaiya, JN, Seshadri B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia*, 33, 311-321.

Duffie J.A., Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes (2nd ed)*. John Wiley and Sons Inc..

Gaur A, Tiwari G.N., Ménézo C, Al-Helal I.M. (2016). Numerical and experimental studies on a Building integrated Semi-transparent Photovoltaic Thermal (BiSPVT) system: Model validation with a prototype test setup. *Energy conversion and management*, 129, 329-343.

Javed A. (2014). The Effect of Temperatures on the Silicon Solar Cell. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, 9, 305-308.

Kamthania D, Tiwari G.N. (2014). Energy metrics analysis of semi-transparent hybrid PVT double pass facade considering various silicon and non-silicon based PV module Hyphen is accepted. *Solar energy*, 100, 124-140.

Kumar R, Rosen M.A. (2011). Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins Appl. *Therm. Eng.* 31, 1402-1410.

Martial A, Akata EA, Njomo D, Agrawal B. (2015). Thermal Energy Optimization of Building Integrated Semi-Transparent Photovoltaic Thermal Systems. *International Journal of Renewable Energy Development*, 4(2).

Radziemsk E. (2019). Performance Analysis of a Photovoltaic-Thermal Integrated System. *International Journal of Photoenergy*.

Taffesse F, Verma A, Singh S, Tiwari G.N. (2016). Periodic modeling of semi-transparent photovoltaic thermal-trombe wall (SPVT-TW). *Solar Energy*, 135, 265-273.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 6 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) ฉบับที่ 2 (มีนาคม-เมษายน) ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม-มิถุนายน) ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม) ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม) ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลงแก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล และนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่จะเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษร่วมกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษ ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน

2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt. ตัวบาง**

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt.

ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้พิมพ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ “.doc” (MS Word) และ “.pdf” (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

6. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)

7. การส่งบทความ ส่ง online ผ่านระบบ ThaiJo โดยสามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ www.journal.msu.ac.th

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช่คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้พิมพ์ [Author(s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงบรรณของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

บทคัดย่อ (Abstract) เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 300 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาท่อนหน้า

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods) ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งื่อนำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปลผล

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อน และมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้พิมพ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือตั้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams) ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุงานการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ www.journal.msu.ac.th

เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). *ชื่อเรื่อง* (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒิ. (2547). *หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่*. ปิตติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, เลขของปีที่(เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /<https://doi.org/เลขdoi>

ตัวอย่าง:

มานะ สิ้นฐานษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, 18(2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณานุกรม (บ.ก.), ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชราภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (บ.ก.), *การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ* (น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

ชื่อสกุล. (ปี, /วัน/เดือน). ชื่อคอลัมน์. ชื่อหนังสือพิมพ์, เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เติลนิวิส์ว่าไรดี: 'สื่อพิพิธภัณฑน์' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต. *เติลนิวิส์*, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

ชื่อ สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). URL

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี*. http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73h VYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Intruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are accepted from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be revised as appropriate to the standard. The manuscript must be interesting topic, review knowledge, modern knowledge, and academic comments that are beneficial to readers. The journal publishes 6 issues a year. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December).

Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. The use of Thai language adheres to the principles of vocabulary, transliteration in English according to the principles of the Royal Society of Thailand. Manuscript should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. Mixing Thai and English should be avoided except for the case of necessity, such as academic vocabulary with no translation or mixing words for easier understanding. English vocabulary written in Thai must use all lowercase except for unique names. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscript should be on A4 standard size paper. Each side must have 1" margins with 2 columns.

3. Browallia New font is required with font size as follows:

3.1 Title of the article: **18 pt. Bold**

3.2 Name(s) of the authors: **16 pt. Unbold**

3.3 Main Heading: **16 pt. Bold**

3.4 Sub-heading: **14 pt. Bold**

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**

3.6 Footnotes for authors and their affiliations: **12 pt. Unbold**, must be cited at the bottom of the first page. Academic position and corresponding author must be added at footnotes.

4. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" and ".pdf" (Portable Document Format)

5. The number of pages are limited to 12 pages, including references, tables, graphs, or pictures.

6. Types of manuscripts: research articles and review articles.

7. Manuscript submission: online submission via www.journal.msu.ac.th

8. Manuscript with uncorrected format will be sent back to the author before review process which can delay the publication process.

Research article / review article must be in sequence as follows:

Title: denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

Name(s) of the author(s): denoted with affiliation must be in Thai and English, academic position must be specified, and email address for contact the author.

Abstract: This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **300 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

Keywords: Give 4-5 concise words to specify your article

Introduction: This section is the initial part of the article, contain information about background, reasons, purposes, and review section.

Materials and Methods: A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation

Results: Present the output. Li the information in complicated, add tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

Discussion and Conclusion: Discuss how the results are relevant/oppose to the objective and hypothesis. How the result is different/relevant when comparing to the former findings. Give us your reason why result is like that base on reliable researches. This part should end with suggestions for research utilization or providing questions for future studies.

Tables, figures, diagrams: Selected only necessary objects to insert in the body of manuscript in accordance with the description in the text. The short description is required in English with completely meaningful. For figures and diagrams, the description is below the picture. But, for table, the description is on top of the table.

Acknowledgement: the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

References: listed and referred in APA.

Reference are written in “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. Book

Mertens, D.M. (2014). *Research and evaluation in education and psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods* (4th ed.). SAGE.

2. Academic Journal

Herbst-Damm, K.L., & Kulik, J.A. (2005). Volunteer support, marital status, and the survival times of terminally ill patients. *Health Psychology*, 24, 225-229. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.24.2.225>

3. Conference Proceeding

Katz, I., Gabayan, K., & Aghajan, H. (2007). A multi-touch surface using multiple cameras. In J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, & P. Scheunders (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4678. Advanced concepts for intelligent vision systems* (pp. 97-108). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2_9

4. Newspaper / Online Newspaper

Brody, J.E. (2007, December 11). Mental reserves keep brain agile. *The New York Times*. <http://www.nytimes.com>

5. E-book

Dahlberg, G., & Moss, P. (2005). *Ethics and politics in early childhood education*. <https://epdf.tips/ethics-and-politics-in-early-childhoodeducation-contesting-early-childhood.html>

Aim and Scope:

The Journal of Science and Technology aims to disseminate of scientific knowledge in the discipline of Mathematics, Science, Technology, Engineering, Agriculture, Medicine, Health Science, Interdisciplinary in science and technology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership

Maharakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-distict, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4375 4238 ext. 1754

Advisors

President of Maharakham University
Professor Dr. Visut Baimai
Professor Dr. Vichai Boonsaeng

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

Professor Dr.Pairot Pramual
Maharakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Maharakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Maharakham University

Editorial Board

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Supannee Promthet
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University
Professor Dr.Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Anongrit Kangrang
Maharakham University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee
Khon Kaen University

Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Terdsak Khammeng
Khon Kaen University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr.Orawich Goompol
Maharakham University
Associate Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Chawalit Boonpok
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Apinya Wongpiriyayothar
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Maharakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University
Dr.Adrian R. Plant
Maharakham University

Secretary

Chaweewan Akkasesthang

Assistant secretary

Phakwilai Rungwisai
Jirarat Puseerit

Six issues per year

Number 1 January-February
Number 2 March-April
Number 3 May-June
Number 4 July-August
Number 5 September-October
Number 6 November-December