วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์ 2564
ISSN (Print Edition) : 1686-9664
ISSN (Online Edition) : 2586-9795

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

DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS

EBSCOhost

ขอบคุณภาพจาก : ผศ.ดร. สมชาย แก้ววังชัย
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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 โทรศัพท์/โทรสาร 0-4375-4416

ที่ปรึกษา
อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ใบไม้
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง

บรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ
ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละออศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณี พรหมเทศ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อ่านเปรื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒ 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
สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรวรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิชญ์ กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิญญา วงศ์พิริยโยธา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.ณฐพล ภูมิพันธุ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม
Mr.Adrian R. Plant
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เลขานุการ
ฉวีวรรณ อรรคะเศรษฐัง

ผู้ช่วยเลขานุการ
พักตร์วิไล รุ่งวิสัย
จิรารัตน์ ภูสีฤทธิ์

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 การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาติเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

กัญชง (Hemp) กัญชา (Marijuana): พืชมหัศจรรย์ผนวกกับภูมิปัญญาท้องถิ่นเพื่อมวลมนุษยชาติ

ปกวารสารฉบับนี้ ได้นำภาพต้นกัญชา จากห้องปฏิบัติการวิจัยของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม นำเสนอให้ผู้อ่านได้เห็นความสวยงามของต้นกัญชา ที่มีความสลับซับซ้อน มีปริศนา ซ่อนอยู่ภายใน ที่ผู้คนที่เพิ่งพบเห็นและพิจารณาข้อมูลต่างๆ ทั้งแง่บวก แง่ลบ จากสื่อต่างๆ ทั้งบนดินและใต้ดิน มีคำถามมากกมายเกี่ยวกับอดีต ปัจจุบัน และอนาคตของพืชชนิดนี้ ที่สำคัญคือพืชชนิดนี้ยังคงถูกกำหนดเป็นพืชที่เป็นยาเสพติดประเภทที่ 5 ต้นกำเนิดของพืชชนิดนี้อยู่บริเวณเอชียกลาง มีการใช้ประโยชน์มานานหลายพันปี ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 13 มีการนำเข้ามาปลูกในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก ทั้งเขตร้อนและเขตอบอุ่น และมีการใช้ประโยชน์ในหลายมิติทั้งเป็นยารักษาโรค ใช้เส้นใยสำหรับตัดเย็บเป็นเครื่องนุ่งห่มชั้นดี

กัญชง (*Cannabis sativa* subsp. sativa) กัญชา (*Cannabis sativa* subsp. indica) จากข้อมูลทางอนุกรมวิธาน กัญชงและกัญชา เป็นพืชชนิดเดียวกัน (same or single species) ในทางชีววิทยาพืชชนิดเดียวกันจะมีความหมายว่า เป็นพืชสปีชีส์เดียวกัน ถ้าเป็นเช่นนี้ กัญชงและกัญชา จึงผสมพันธุ์กันได้ มีเมล็ดที่สมบูรณ์ เพาะพันธุ์ต่อไปได้ ข้อมูลที่ใช้แยกปัจจุบันคือใช้ปริมาณสาร THC (d9- tetrahydrocannabinol) ถ้ามีปริมาณสารชนิดนี้น้อยกว่า 0.3% ถือว่าต้นนั้นเป็นกัญชง THC มีทั้งคุณและโทษ เหมือนสารอินทรีย์อื่น ถ้านำเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป ในกัญชา มีสาร THC อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง มากกว่า 20% ขึ้นอยู่กับ “พันธุ์” (varieties หรือ strains) สัดส่วนที่เหลือคือ สารสำคัญทางการแพทย์ คือ CBD (cannabidiol) เป็นสารอินทรีย์มหัศจรรย์ ใช้ในทางการแพทย์มานาน พิสูจน์แล้วว่าได้ผลสำหรับรักษาผู้ป่วยเป็นโรคต่างๆ มากมาย มีรายงานทางการแพทย์ที่เชื่อถือได้เผยแพร่ในวรสารทางการแพทย์ที่ยอมรับกันจากนักวิชาการด้านเภสัชวิทยาว่า “ยอมรับโดยดุษฎี” ปัจจุบันมีหลายบริษัทที่ดำเนินธุรกิจด้าน Cannabis เสนอตำรับอาหาร ของขบเคี้ยว ที่มีส่วนผสมของสาร CBD

ประเทศไทย มีความอุดมสมบูรณ์ทางทรัพยากรธรรมชาติ ดิน น้ำ ป่า ผู้คนที่อาศัยในขวานทองแห่งนี้ มีความหลากหลายของเผ่าพันธุ์ทางพันธุกรรมที่มีความเฉพาะตัวของ “ภูมิปัญญาชนเผ่า” กัญชา รู้จักกันโดยทั่วไปของ “หมอยาพื้นบ้าน” มีการใช้ประโยชน์ทางยา ใน “ตำรับ” ยาโบราณมากกว่าร้อยตำรับ ภูมิปัญญาเหล่านั้นฝังตัวในชุมชนที่มีการปลูกกัญชามานานหลายชั่วคน บำบัดทุกข์ของผู้คนให้พ้นจากความทุกข์ ทรมานจากการเจ็บป่วยจากการใช้กัญชามาหลายร้อยปี ก่อนที่จะมีการกำหนดว่ากัญชาคือยาเสพติดประเภทที่ 5 เป็นกฎหมายใช้บังคับปัจจุบัน อนาคตของพืชมหัศจรรย์ที่ผ่านการคัดสรรจากบรรพบุรุษของคนไทยในถิ่นสยามประเทศ ถ่ายทอดมาถึงปัจจุบัน เป็นความท้าทายของผู้กำหนดนโยบายว่าจะเดินต่อไปอย่างไร ที่ผลลัพธ์สุดท้ายคือ การใช้ประโยชน์จากพืชชนิดนี้ผสมผสานกับภูมิปัญญาของบรรพบุรุษ ก่อให้เกิดประโยชน์กับมวลมนุษยชาติอย่างยั่งยืน ต่อไป

ศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ประเทพา

บรรณาธิการ

สารบัญ

Biological Science

ปริมาณ และแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอด (Solen spp.) บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี **1**

Quantity and habitation of Razor Clam (Solen spp.) at the new mudflat area of Laem Phak Bia, Phetchaburi province

เสถียรพงษ์ ขาวหิต

Satienpong Khowhit

การผลิตมวลเซลล์ Bacillus sp. ที่ความเข้มข้นสูงโดยเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์พิเศษแทนวิธีเฟดแบตช์ **11**

The production of Bacillus sp. cell biomass at high concentration by special batch cultivation technique instead of fed-batch mode

จตุพร สุขหนา, ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์

Jatuporn Sukna, Kwanruthai Malairuang, Seathawat Chamsart

การส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวดอกมะลิ 105 โดยแบคทีเรีย ที่ปลูกภายใต้สภาวะความเค็ม **21**

Promoting rice seedling Khao Dawk Mali 105 growth by Pseudomonas putida grown under saline condition

จิราวรรณ สิทธิสวนจิก, ทิราภรณ์ กนกฉันท์, เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, จันทรา อินทนนท์

Jirawan Sitisuanjik, Tiraporn kanokchan, Saethawat Chamsart, Chantra Indananda

การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชภายใต้สภาวะความเค็ม โดยแอคติโนมัยสีทที่คัดแยกจากมูลไส้เดือนดิน **30**

Plant growth promoting activity under saline conditions by actinomycetes isolated from vermicast of earthworm

ทิราภรณ์ กนกฉันท์, จิราวรรณ สิทธิสวนจิก, เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, จันทรา อินทนนท์

Tiraporn Kanokchan, Jirawan Sitisuanjik, Saethawat Chamsart, Chantra Indananda

Computer and Information Technology

การวิเคราะห์หาค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการยืนยันตัวตนผ่านม่านตา **40**

Finding of suitable and secure threshold value for an iris authentication

วิชริณี สวัสดี, ณรงค์ฤทธิ์ วังคีรี

Vicharinee Sawasdee, Narongrit Wangkeeree

การใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลในการวิเคราะห์สารสนเทศเพื่อการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา **50**

Application of data mining techniques in analysis of information to develop decision support systems in selecting programs under Thai University Central Admission System

อนันต์ ปินะเต

Anan Pinate

สารบัญ

การเปรียบเทียบประสิทธิผลการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ **63**

Comparison of the effectiveness of application development on android operating system between visual programming of game engine on unreal engine and java on eclipse program

อิทธิศักดิ์ ศรีดำ, ศักดา สาครตานันท์

Idhisak Sridam, Sakda Sakorntanant

Engineering

การพัฒนาสมการในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในประเทศไทยโดยวิธีวัดค่าความจุสูงสุดจากแบบจำลองการจราจร **73**

Development of equations to estimate the capacity of two-lane rural highways in Thailand by measuring the maximum capacity using the traffic model

วุฒิไกร ไชยปัญหา, ปฏิภาณ แก้ววิเชียร

Wuttikrai Chaipanha, Patiphan Kaewwichian

ผลของการใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต **82**

Effect of gravel from the Mekong River as coarse aggregate to concrete properties

สิทธิรักษ์ แจ่มใส, ภาคิณ ลอยเจริญ

Sittiruk Jamsai, Phakin Loyjaroen

Mathematics

การหาค่าเหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ดแบบอลวน สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันเชิงตัวเลข **90**

Chaotic satin bowerbird optimization for improving the efficiency of numerical function optimization

ธนัชพงษ์ วังคำหาญ, อนงค์นาถ โรจนกร วังคำหาญ

Tanachapong Wangkhamhan, Anongnart Rotjanakorn Wangkhamhan

Physical Science

การประเมินความเสี่ยงของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน: กรณีศึกษาอาคารเก็บสารเคมี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. **111**

Risk assessment of hazardous waste in a basic chemistry laboratory: The case study of a chemical storage building, Faculty of Applied Science, KMUTNB

จิตมณี พ่วงปิ่น, วราภรณ์ บุญโต, โกวิทย์ ปิยะมังคลา

Jitmanee Puangpin, Waraporn Boonto, Kowit Piyamongkala

กัมมันตภาพรังสีในเบริลหลังถูกปรับปรุงคุณภาพโดยการฉายด้วยลำอิเล็กตรอน **120**

Radioactivity in improved beryl by electron irradiation

อมรา อิทธิพงษ์, วิชาญ เลิศลพ, ธนัฐ กรอบทอง

Ammara Ittipongse, Wichan Lertlope, Thanat Krobtong

ปริมาณและแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอด (*Solen* spp.) บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี

Quantity and habitation of Razor Clam *(Solen spp.)* at the new mudflat area of Laem Phak Bia, Phetchaburi province

เสถียรพงษ์ ขาวหิต[1*]
Satienpong Khowhit[1*]

Received: 11 November 2019 ; Revised: 20 June 2020 ; Accepted: 4 August 2020

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่อแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอด (*Solen* spp.) บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี ในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคม 2555 ถึงเดือนเมษายน 2556 โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างหอยตลับพื้นที่หาดเลนแบ่งเป็น 10 แนว แต่ละแนวห่างกัน 100 เมตร พบว่าหอยหลอดอาศัยฝังตัวในดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) เนื้อดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 27 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 59 เปอร์ เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 14 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั้งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) หอยหลอดมีอัตราความหนาแน่นค่าเท่ากับ 14.19 ตัว/ตารางเมตร เดือนมิถุนายนพบมากที่สุด 31.60 ตัว/ตารางเมตร ฤดูฝนพบมากที่สุด 21.48 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 36.39 ตันต่อปี จำนวนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 511.94 ล้านตัวต่อปี

คำสำคัญ: ปริมาณ แหล่งอาศัย หอยหลอด (*Solen* spp.)

Abstract

The study on Influence of environment factor on habitation of Razor Clam (*Solen* spp.) in the New Mudflat Area of Laem Phak Bia at Phetchaburi Province during May 2012 to April 2013. Field collection of the hard clams were carried out by line transect sampling method, using 10 line of a 100 meters transect (L1–L10). The result showed that the Razor Clam occur in silt loam sediment in the depth of 15 to 30 centimeters which composed of 27% sandy 59% siltand 14% clay. A total density of 14.19 individuals/sq.m. of Razor Clam were obtained in this study. Our survey demonstrates that the highest numberof the Razor Clam was 31.61 individuals/sq.m. in June, 21.48 individuals/sq.m. in the rainy season, 36.39 tonnes per year in the total weight and 511.94 million individuals per year in the total number.

Keywords: quantity, habitation, Razor Clam (*Solen* spp.)

[1] อาจารย์, สาขาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 44150

[1] Lecture, Department of Natural Resources and Environment Management, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University 44150

* Corresponding author: Satienpong Khowhit, Department of Natural Resources and Environment Management, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University 44150, puiku1213@gmail.com

บทนำ

หอยหลอดเป็นหอยสองฝาที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและพบตามชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติเท่านั้นประเทศไทยมีการแพร่กระจายอยู่บริเวณชายฝั่งทะเลอันดามันและชายฝั่งทะเลด้านอ่าวไทยหลายชนิด หอยหลอดอ่าวไทยตอนบนตั้งแต่บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสงคราม และจังหวัดเพชรบุรี มีพื้นที่รวมกัน 22,000 ไร่ จะมีหอยหลอดด้วยกัน 4 ชนิด ได้แก่ *Solen strictus* Gould 1861, *Solen coneus* Lamarck, 1818, *Solen regularis* Dunker, 1861, *Solen thailandicus* Cosel, 2002 โดยที่บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดจังหวัดสมุทรสงครามจะเป็นบริเวณที่พบหอยหลอดมากที่สุด 320 ตันต่อปี มีแพลงก์ตอนพืชที่สะสมในกระเพาะอาหารประกอบด้วย *Coscinodiscus* sp., *Planktoniella* sp. ชนิดหอยหลอดที่พบมากและมีผลผลิตสูงคือหอยหลอดชนิด *Solen strictus* (รังสิมา, 2540 ; สุนันท์และอำนวย, 2548 ; อภิญญา, 2555 ; Tuaycharoen, 1999 ; Worrapimphong, 2010)

หอยหลอดมีลักษณะของเปลือกผิวเปลือกด้านนอกเป็นเงามีสีขาวอมเหลืองหรือเขียวอ่อนๆ ที่ห่อหุ้มลำตัวเป็นรูปทรงกระบอกเปลือกบางลักษณะเหมือนกันและมีขนาดเท่ากัน มีเอ็นยึดฝาทั้งสองข้าง มีช่องเปิดด้านหัวและท้าย มีท่อน้ำเข้าและออกแยกจากกันมีผนังกั้นและอยู่ส่วนปลาย จะมีเท้าจะอยู่ส่วนปลายอีกด้าน หอยหลอดมีพฤติกรรมและวงจรชีวิตฝังตัวอยู่ในดินที่เป็นดอนดินตะกอนเป็นชนิดดินทรายปนโคลน ที่ระดับความลึกจากผิวดินตะกอนประมาณ 1-12 นิ้ว อาหารที่พบในกระเพาะหอยหลอดส่วนใหญ่เป็นสัตว์และพืชขนาดเล็กที่เรียกว่าแพลงก์ตอน จำพวกไดอะตอม รวมทั้งอินทรียวัตถุที่เน่าเปื่อย (Detritus) (กรมประมง, 2538 ; วันทนา อยู่สุข, 2541) พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวในรัชกาลที่ 9 ทรงมีพระราชดำริ ก่อตั้งโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริในปี พ.ศ. 2533 เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาน้ำเสียแม่น้ำเพชรบุรีที่ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี มีปริมาณน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีที่ถูกสูบมาบำบัดที่โครงการฯ เฉลี่ยประมาณ 6,167 ลูกบาศก์เมตร/วัน ด้วยอัตราการไหล 303.15 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง เข้าบ่อบำบัด 268.55 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (ธนวัฒน์, 2557 ; Satreethai, *et al*, 2013 ; Chunkao, *et al*, 2014) ปัจจุบันหอยหลอดมีจำนวนลดลงเป็นเข้าขั้นวิกฤต อันเนื่องเกิดจากการทำประมงหอยหลอดไม่ถูกวิธี เช่น การใช้ปูนขาว และทรัพยากรชายฝั่งทะเลเสื่อมโทรมลงอันเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอดตามไป

ดังนั้นการศึกษาปริมาณและแหล่งที่อยู่อาศัยของหอยหลอด บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย ซึ่งมีลักษณะของดินตะกอนที่เป็นแหล่งอยู่อาศัยฝังตัวของหอยหลอดที่แตกต่างต่างจากธรรมชาติทั่วๆ ไปคือเป็นดินตะกอนที่เกิดจากน้ำเสียจากชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีผ่านการบำบัดแล้ว จะทำทราบถึงปัจจัยทางด้านแวดล้อมที่มีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตฝังตัวในดินตะกอนและการเติบโตรวมถึงวงจรชีวิตของหอยหลอดเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติทั่วๆ ไป รวมถึงหาแนวทางในการป้องกันและอนุรักษ์หอยหลอดต่อไป

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

หาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยที่รองรับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตั้งอยู่ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ตั้งอยู่บนพิกัดละติจูด 14°42.240′ เหนือถึง 14°43.480′ เหนือและ ลองจิจูด 06°17.780′ ตะวันออกถึง 06°19.271′ ตะวัน ออก การดำเนินงานของโครงการฯ โดยมีการรวบรวมน้ำเสียที่สถานีสูบน้ำคลองยาง และสูบด้วยเครื่อง สูบน้ำแรงดันสูงการวางท่อส่งน้ำเสีย High Density Polyethylene ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร เป็นระยะทาง 18.50 กิโลเมตร เข้าระบบบำบัดของโครงการฯ ประกอบด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชและหญ้ากรอง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบป่าชายเลนซึ่งมีการปลูกพืชป่าชายเลน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกสู่หาดทรายเลนงอกใหม่และทะเลอ่าวไทยต่อไป (Satreethai, *et al*., 2013) (Figure 1)

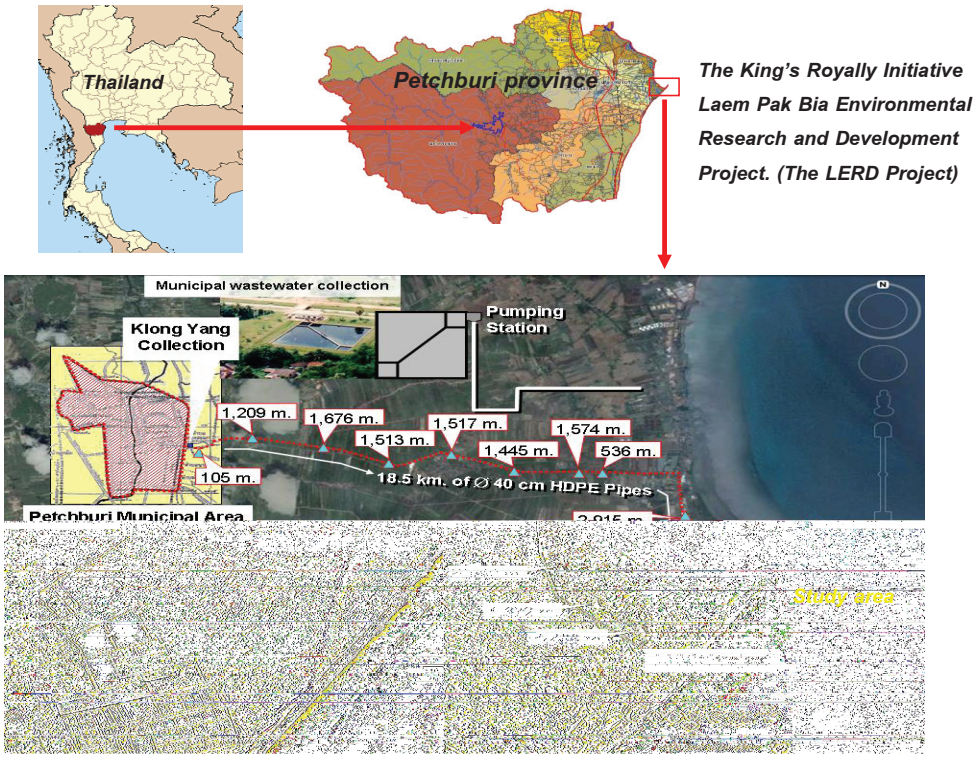


Figure 1 Localization of the new mudflat area of Laem Phak Bia receiving effluent from phetchaburi municipal wastewater treatment system, the LERD Project

2. การศึกษาปริมาณหอยหลอด

ทำการเก็บตัวอย่างหอยหลอดบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยในช่วงระหว่างเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2556 กำหนดจุดเก็บตัวอย่างหอยหลอดออกเป็น 10 แนวแต่ละแนวห่างกัน 100 เมตร (L1-L10) ครอบคลุมหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยจำนวน 1,250 ไร่ (Figure 2) ซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่งทะเลห่างกัน 100 เมตร เลือกช่วงเวลาที่น้ำทะเลลงต่ำที่สุดของเดือนนั้นๆ โดยทำการเก็บตัวอย่างหอยหลอดในกรอบสี่เหลี่ยม (quadrate) เท่านั้น 1 จุด ที่มีความกว้าง x ความยาวเท่ากับ 1 x 1 เมตร ที่ความลึก 2 ระดับ คือระดับบนที่ระดับเสมอกับผิวดินตะกอนจนกระทั่งความลึกไม่เกิน 15 เซนติเมตร (0-15 เซนติเมตร) และระดับล่างที่ดินตะกอนระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั่งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) นำตัวอย่างหอยหลอดเก็บได้ใส่ในถุงเก็บตัวอย่างที่เตรียมไว้ (Figure 3) ทำการจำแนกชนิดหอยหลอด (สุนันท์ และอำนวย, 2548) และมีสูตรคำนวณปริมาณหอยหลอดดังนี้

2.1) อัตราความหนาแน่นหอยหลอด (ตัวต่อตารางเมตร)=จำนวนตัวหอยหลอดที่เก็บได้หารด้วย ขนาดพื้นที่เก็บหอยหลอด x จำนวนจุดที่เก็บหอยหลอด (น้ำทะเลลงต่ำสุด)

2.2) ปริมาณหอยหลอด (ตัว) = 1,250 ไร่ x 1,600 ตารางเมตร x ข้อ 2.1

2.3) น้ำหนักหอยหลอด (ตัน)=ข้อ 2.2 x น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/เดือน) หารด้วย 1,000 (กิโลกรัม)

3. การเก็บตัวอย่างดินตะกอน

ทำการเก็บรวบรวมตัวอย่างดินตะกอนในช่วงน้ำทะเลลงต่ำสุด 2 ครั้ง ที่ระดับความลึก 2 ระดับ คือที่ระดับเสมอกับผิวดินตะกอนจนกระทั่งความลึกไม่เกิน 15 เซนติเมตร (0-15 เซนติเมตร) และที่ระดับ 15 เซนติเมตร จนกระทั่งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) ครอบคลุมพื้นที่หาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยโดยใช้ท่อพีวีซีกว้าง 60 เซนติเมตร ประ กอบด้วยเดือนกันยายน 2555 (ฤดูฝน) และเดือนมีนาคม 2556 (ฤดูร้อน) นำตัวอย่างดินตะกอนที่เก็บรวบรวมได้ผึ่งแดดในที่ร่มเป็นระยะเวลา 2 เดือนหลังจากนั้นนำตัวอย่างดินตะกอนบดให้ละเอียดชั่งดินตะกอนจำนวน 300 กรัม ใส่ถุงพลาสติกที่ติดฉลากไว้ทำการวิเคราะห์ดิน ได้แก่ ขนาดของดินตะกอนและประเภทของดินตะกอน (Figure 4) (ทัศนีย์ และจงรักษ์, 2532)

ผลการทดลอง

1. ปริมาณหอยหลอด

1.1 อัตราความหนาแน่นหอยหลอด

อัตราความหนาแน่นหอยหลอดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.19 ตัวต่อตารางเมตร พบว่าเดือนมิถุนายนหอยหลอดมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 31.60 ตัวต่อตารางเมตร รองลงมา

เดือนกรกฎาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.00 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนสิงหาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.20 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนกันยายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.90 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนตุลาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.90 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนพฤศจิกายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.80 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนธันวาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.90 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนมกราคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.30 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนกุมภาพันธ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.10 ตัวต่อตารางเมตร, เดือนมีนาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.10 ตัวต่อตารางเมตร และเดือนเมษายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.10 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ (Figure 4)

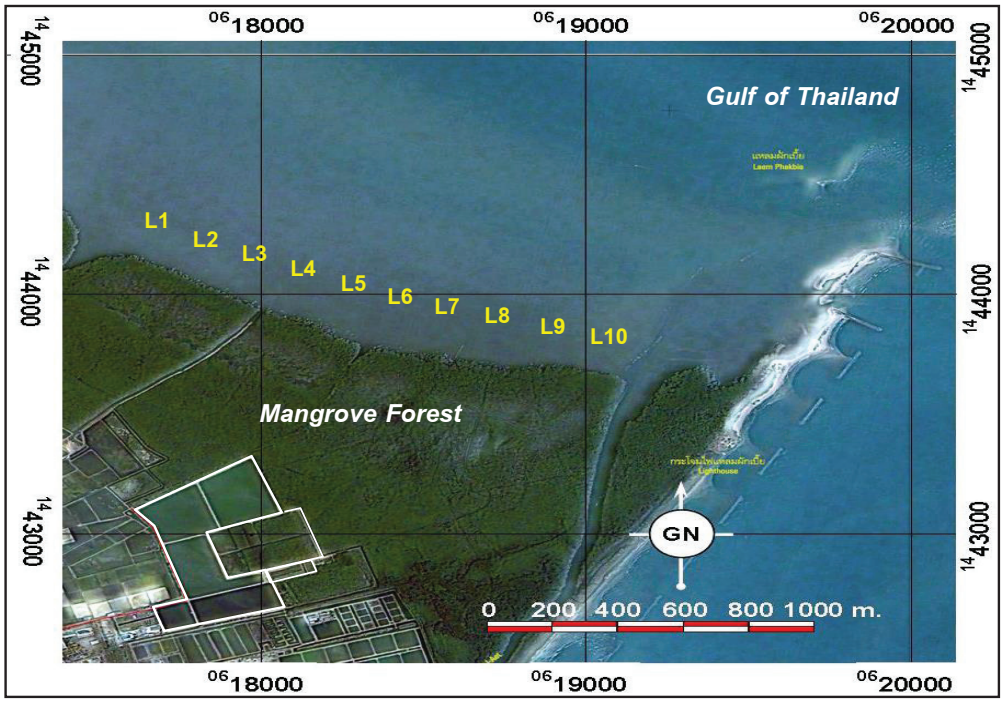


Figure 2 Sample point of *Razor Clam (Solen spp.)* at Laem Phak Bia

Figure 3 Sample of Razor Clam (*Solen* spp.) and Sediment at Laem Phak Bia

1.2 ปริมาณหอยหลอดแบ่งตามฤดูกาล

ปริมาณหอยหลอดมีค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 14.19 ตัวต่อตารางเมตร พบว่าในช่วงฤดูฝน (เดือนมิถุนายน ถึงเดือนกันยายน) หอยหลอดมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 21.48 ตัวต่อตารางเมตร รองลงมาในช่วงฤดูร้อน (เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.95 ตัวต่อตารางเมตร ในช่วงฤดูหนาว (เดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.15 ตัวต่อตารางเมตร ตามลำดับ

1.3 ปริมาณหอยหลอดตามระดับความลึก

หอยหลอดมีจำนวนทั้งหมด 1,703 ตัว หรือ มีค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 14.19 ตัวต่อตารางเมตร พบว่าไม่พบหอยหลอดที่ที่ระดับเสมอกับผิวดินตะกอนจน กระทั่งความลึกไม่เกิน 15 เซนติเมตร (0-15 เซนติ เมตร) และหอยหลอดทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.19 ตัวต่อตารางเมตร พบที่ระดับล่างที่ดินตะกอนระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั้งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร)

1.4 ปริมาณน้ำหนักหอยหลอดกรัมต่อตัว

หอยหลอดมีปริมาณน้ำหนักค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.52 กรัมต่อตัวต่อเดือนพบว่าเดือนธันวาคมหอยหลอดมีปริมาณน้ำหนักค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 1.94 กรัมต่อตัว รองลงมาเดือนกันยายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.60 กรัมต่อตัว, เดือนเมษายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.60 กรัมต่อตัว, เดือนกรกฎาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.59 กรัมต่อตัว, เดือนพฤษภาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.53 กรัมต่อตัว, เดือนตุลาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 กรัมต่อตัว, เดือนมกราคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 กรัมต่อตัว, เดือนมิถุนายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.48 กรัมต่อตัว, เดือนสิงหาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 กรัมต่อตัว, เดือนมีนาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.37 กรัมต่อตัว, เดือนกุมภาพันธ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 กรัมต่อตัวและเดือนพฤศจิกายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 กรัมต่อตัว ตามลำดับ (Figure 5)

1.5 ปริมาณน้ำหนักหอยหลอดทั้งหมด

หอยหลอดมีปริมาณน้ำหนักรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 36.39 ตันต่อปีและมีค่าเฉลี่ย 3.03 ตันต่อเดือนพบว่าเดือนธันวาคมมีปริมาณน้ำหนักหอยหลอดมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 3.87 ตันต่อเดือน รองลงมาเดือนเมษายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.20 ตันต่อเดือน, เดือนกันยายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.19 ตันต่อเดือน, เดือนกรกฎาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.18 ตันต่อเดือน, เดือนพฤษภาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.06 ตันต่อเดือน, เดือนตุลาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.98 ตันต่อเดือน, เดือนมกราคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.98 ตันต่อเดือน, เดือนมิถุนายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 ตันต่อเดือน, เดือนสิงหาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.93 ตันต่อเดือน, เดือนมีนาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.74 ตันต่อเดือน, เดือนพฤศจิกายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.65 ตันต่อเดือน และเดือนกุมภาพันธ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.65 ตันต่อเดือน ตามลำดับ (Figure 6)

1.6 จำนวนหอยหลอดทั้งหมด

หอยหลอดมีจำนวนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 511.94 ล้านตัวต่อปีและมีค่าเฉลี่ย 42.66 ล้านตัวต่อเดือนพบว่าเดือนมิถุนายนหอยหลอดมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 93.45 ล้านตัวต่อเดือนรองลงมาเดือนกรกฎาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82.68 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนมีนาคมค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66.31 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนเมษายนค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.08 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนกันยายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.34 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนสิงหาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.19 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนพฤษภาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 39.47 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนกุมภาพันธ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.57 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนมกราคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.71 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนธันวาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.87 ล้านตัวต่อเดือน, เดือนตุลาคมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.26 ล้านตัวต่อเดือนและเดือนพฤศจิกายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.92 ล้านตัวต่อเดือน ตามลำดับ (Figure 7)

2. ดินตะกอน

2.1 ดินตะกอนบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลม ผักเบี้ย ทั้งสองระดับความลึก (0-30 เซนติเมตร)พบว่าเป็นดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) มีร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 34 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 53 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 12 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 0.60 เปอร์เซ็นต์

2.2 ดินตะกอนบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย ระดับบนที่ระดับเสมอกับผิวดินตะกอนจนกระทั่งความลึกไม่เกิน 15 เซนติเมตร (0-15 เซนติเมตร) ดินตะกอนชนิดดินร่วนทราย (sandy loam) มีร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 42 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 46 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 12 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 0.64 เปอร์เซ็นต์

2.3 ดินตะกอนบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย ระดับล่างที่ดินตะกอนระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั่งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) ดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) มีร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 27 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 59 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 14 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 0.56 เปอร์เซ็นต์

วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการศึกษาแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอด (*Solen* spp.) บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี พบว่า

หอยหลอดจะอาศัยฝังตัวที่ดินตะกอนระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั่งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) ดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) มีร้อยละ

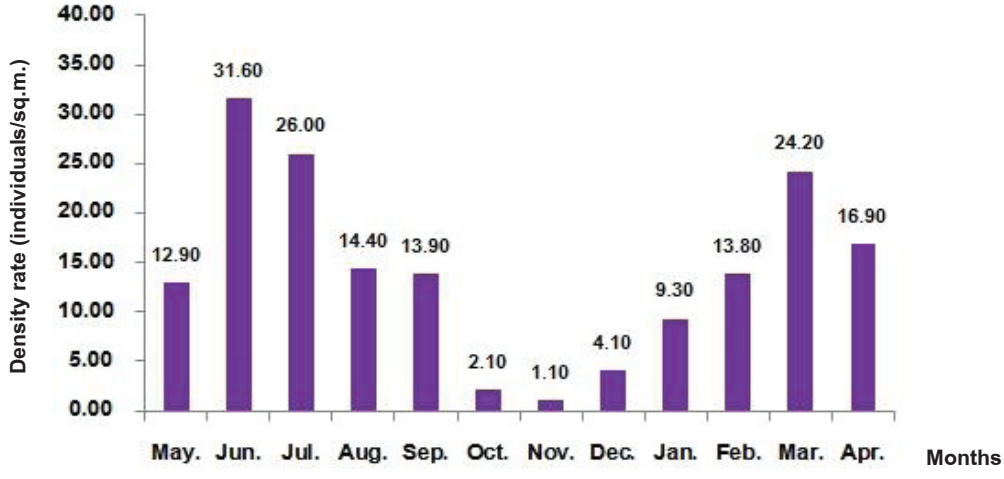


Figure 4 Density rate of Razor Clam (*Solen* spp.)

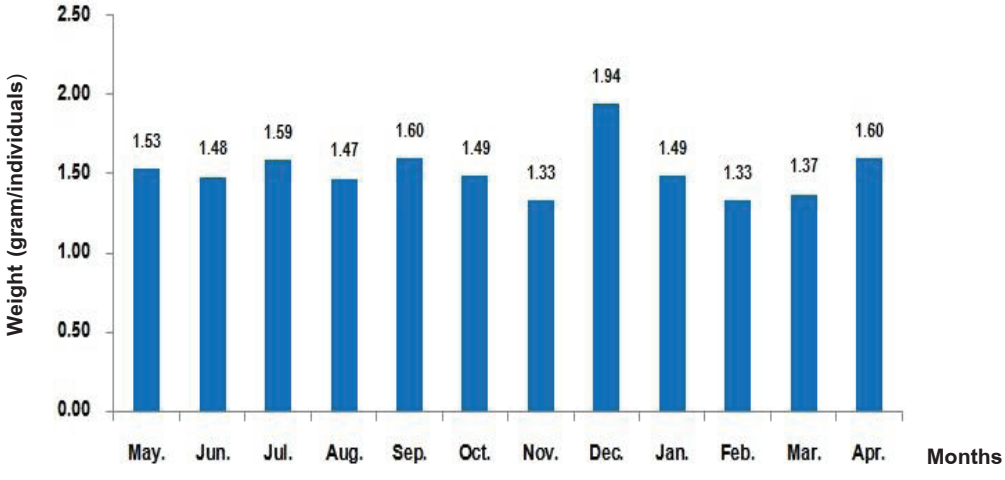


Figure 5 Weight of Razor Clam (*Solen* spp.)

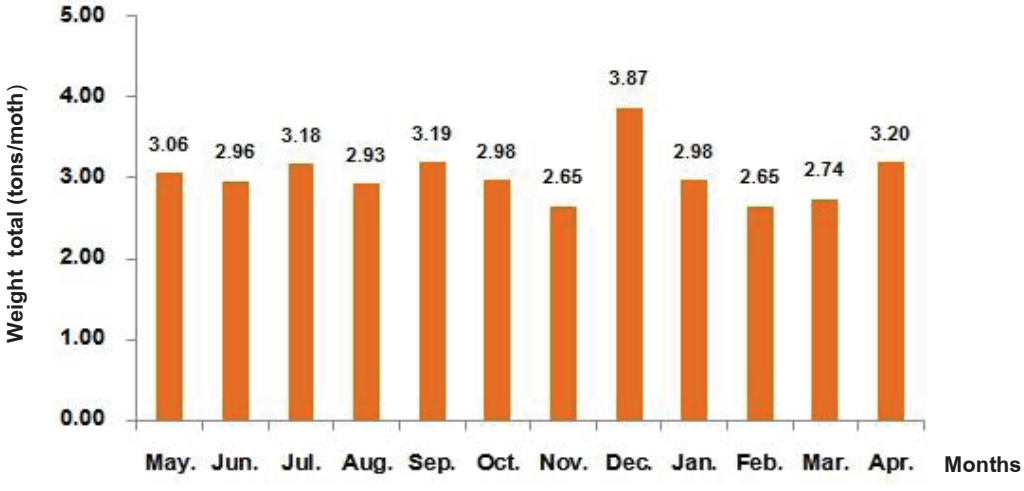


Figure 6 Weight total of Razor Clam (*Solen* spp.)

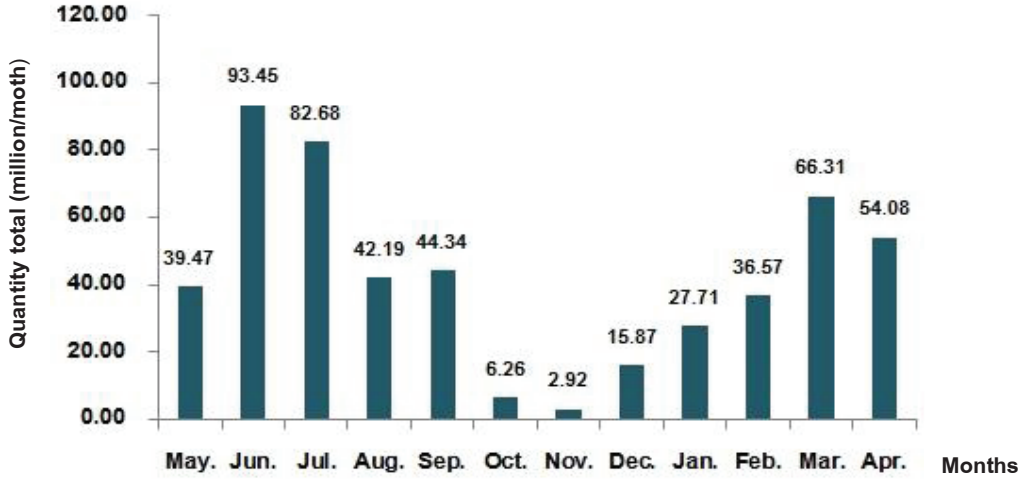


Figure 7 Quantity total of Razor Clam (*Solen* spp.)

อนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 27 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 59 เปอร์เซ็นต์ ดิน เหนียว (clay) 14 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 0.56 เปอร์เซ็นต์ น้ำทะเลขึ้นลงแบบน้ำคู่ (Semidiurnal tide) ใช้เวลามากกว่า 12 ชั่วโมง หาดเลนมีความลาดเอียงทำมุม 5 จนกระทั่งถึง 15 องศา มีความเค็มอยู่ในช่วงระหว่าง 24.10-28.60 psu เท่านั้น รวมถึงคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (เสถียรพงษ์, 2559 ; เสถียรพงษ์ และเกษม, 2559 ; เสถียรพงษ์ และเกษม, 2560) ซึ่งดินตะกอนพื้นที่บริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยเป็นการรวมกันระหว่างน้ำทิ้งจากชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีที่ผ่านการบำบัดแล้วกับดินตะกอนตามธรรมชาติที่มีลักษณะพิเศษไม่ว่าน้ำทะเลขึ้นลงกระแสน้ำจะไหลแบบทิศตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาจะมีการพัดพาธาตุอาหารและตะกอนสารแขวนลอย แม่น้ำเพชรบุรี แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำเจ้าพระยา รวมถึงแม่น้ำบางปะกงจะไหลมารวมกันบริเวณหน้าหาดแหลมผักเบี้ยก่อให้เกิดเป็นเป็นหาดทรายยื่นออกไปจากชายฝั่งทะเลเรียกว่าแหลมผักเบี้ย (เสถียรพงษ์ และเกษม, 2559) พื้นที่ทั้งหมด 394 ไร่ การเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 23 ไร่ต่อปี (เกษมและชาตรี, 2549 ; Buranapratheprat, 2008) ไม่มีความแตกต่างความชุกชุมของหอยหลอด (*Solen* spp.) กับพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร ที่พบหอยหลอดอาศัยฝังตัวในดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) ร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 32 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 48 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว (clay) 20 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ หาดเลนมีความลาดเอียงทำมุม 0-15 องศา น้ำทะเลขึ้นลงแบบผสม (mixed tide) 6 ชั่วโมง (สุนันท์ และอำนวย ; 2546) มีความแตกต่างความชุกชุมของหอยหลอด (*Solen* sp.) กับพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดเพชรบุรีตั้งแต่บ้านบางขุนไทร ถึงบ้านพะเนิน พบหอยหลอดอาศัยฝังตัวในดินตะกอนชนิดดินทรายปนตะกอน (Sandy loam) ร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 59 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 36 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว (clay) 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 1.3 เปอร์เซ็นต์ (สุนันท์ และมงคลรัตน์, 2540) มีความแตกต่างความชุกชุมของหอยหลอด (*Solen* spp.) พื้นที่บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม ที่พบเป็นพบบริเวณที่เป็นสันทรายหรือดอนมีระดับที่สูงกว่าผิวดินตะกอนจนกระทั่งทำมุมลาดเอียง 30 องศา ลักษณะดินตะกอนชนิดดินทรายร่วน (loamy sand) ร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 88 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 9 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอินทรียวัตถุมีค่าเท่ากับ 0.82 เปอร์เซ็นต์น้ำทะเลขึ้นลงแบบผสม (mixed tide) 6 ชั่วโมง (นภดล และคณะ, 2546) เพราะว่าพื้นที่บริเวณดอนหอยหลอด ลักษณะดินเกิดจากการทับถมของตะกอนแม่น้ำ และที่ตั้งของดอนหอยหลอดเป็นโค้งบริเวณรูปหัวกอไก่เป็นมุมอับและเป็นร่องน้ำ เมื่อได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เกิดการสะสมของดินตะกอนระหว่างร่องน้ำจากปากแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีนทำให้กลายเป็นดอนสูงขึ้นประมาณ 0.15-1.23 เมตร กว่าพื้นที่ชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติทั่วๆ ไป จำนวน 5 ดอน มีเนื้อที่ประมาณ 15,056 ไร่ (23,994,000 ตารางเมตร) (ชาติ, 2544 ; พิศิษฐ์ 2548) รวมถึงทำให้เกิดการขยายเนื้อที่ของแผ่นดินเข้าไปในทะเล กลายเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและผลผลิตหอยหลอดเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่ท้องถิ่นและมีชื่อเสียงของจังหวัดสมุทรสงคราม ดังนั้นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อปริมาณและแหล่งที่อยู่อาศัยหอยหลอด (*Solen* spp.) ประกอบด้วยชนิดของดินตะกอน สัดส่วนของดินตะกอน ความลาดเอียง และการขึ้นลงของน้ำทะเลมีผลต่อความอุดมสมบูรณ์และแหล่งที่อยู่อาศัยหอยตลอดส่งผลทำให้บริเวณพื้นที่หาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยหอยหลอดจึงไม่ได้เป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจและหอยหลอดมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ตามธรรมชาติ

ปริมาณของหลอดบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย พบว่าหอยหลอดมีปริมาณน้ำหนักค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.52 กรัมต่อตัว มีค่าเฉลี่ยอัตราความหนาแน่นเท่ากับ 14.19 ตัว/ตารางเซนติเมตร เดือนมิถุนายนมีอัตราความหนาแน่นหอยหลอดมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.60 ตัว/ตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่บริเวณดอนหอยหลอดจังหวัดสมุทรสงครามพบว่า หอยหลอดมีอัตราความหนาแน่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.02±3.57 ตัวต่อตารางเมตร มีอัตราความหนาแน่นสูงที่สุดเดือนกันยายนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.35±4.29 ตัวต่อตารางเมตร จำนวนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 511.94 ล้านตัวต่อปี ซึ่งบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยมีอัตราความหนาแน่นที่สูงกว่าเพราะว่าไม่ดินตะกอนที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยไม่เป็นอันตรายต่อหอยตลอด (เสถียรพงษ์ และคณะ, 2555) แต่หอยหลอดจะมีขนาดความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 2.76-4.25 เซนติเมตร ซึ่งหอยหลอดมีความยาวขนาดเล็กและมีปริมาณเนื้อของหอยหลอดจำนวนไม่มาก จึงส่งผลทำให้ชาวประมงไม่นิยมทำประมงหอยหลอด ไม่มีความแตกต่างความชุกชุมของหอยหลอดกับพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดเพชรบุรีตั้งแต่บ้านบางขุนไทร ถึงบ้านพะเนิน พบว่าหอยหลอดมีขนาดความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 2.56-4.10 เซนติเมตร (*Solen* sp.) (สุนันท์ และมงคลรัตน์, 2540) มีความแตกต่างกับบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม พบว่าหอยหลอดมีขนาดความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 3.96±0.99 เซนติเมตร อัตราความหนาแน่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.60±3.70 ตัวต่อตารางเมตร (รังสิมา, 2540) ซึ่งเป็นหอยหลอดความยาวขนาดใหญ่มากและมีปริมาณเนื้อมาก ส่งผลทำให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคมีการทำประมงหอยหลอด (ชยารัตน์, 2550) ซึ่งในช่วงฤดูหนาวในช่วงฤดูร้อน (เดือนกุมภาพันธ์ ถึงเดือนพฤษภาคม) ในบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ยเป็นช่วงเวลาที่หอยหลอดผสมพันธุ์กันส่งผลทำให้ระยะหลังการสผมพันธุ์กันในช่วงฤดูฝน (เดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน) พบอัตราความหนาแน่นมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 21.48 ตัวต่อตารางเมตร ส่งผลทำให้พบหอยหลอดเป็นจำนวนมากและเป็นหอยหลอดขนาดเล็ก สอดคล้องกับการศึกษาฤดูสืบพันธุ์ของหอยหลอด (*Solen thailandiscus* Cosel, 2002) บริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดสมุทรสงครามและจังหวัดสมุทรสาครพบว่าอยู่ในช่วงระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม (ทวีวงศ์ และนันทนา, 2539 ; สุนันท์ และคณะ, 2549) มีความแตกต่างกับฤดูสืบพันธุ์ของหอยหลอด (*Solen* sp.) บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม พบว่าอยู่ในช่วงระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนสิงหาคม (รังสิมา, 2540 ; Veeravaitaya, 2010) ดังนั้นปริมาณหอยหลอดจะมีความสัมพันธ์กับวงจรชีวิตการสืบพันธุ์ของหอยหลอดและช่วงระยะหลังการสผมพันธุ์หอยหลอด (*Solen* sp.) จะพบหอยหลอดขนาดเล็กและมีจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ตามธรรมชาติ

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

หอยหลอดบริเวณหาดเลนงอกใหม่แหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี จะอาศัยฝังตัวที่ดินตะกอนระดับความลึก 15 เซนติเมตร จนกระทั่งความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร (15-30 เซนติเมตร) ดินตะกอนชนิดดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam) มีร้อยละอนุภาคดินตะกอนประกอบด้วยดินทราย (sand) 27 เปอร์เซ็นต์ ดินทรายแป้ง (silt) 59 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (clay) 14 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอินทรียวัตถุ 0.56 เปอร์เซ็นต์ หอยหลอดมีอัตราความหนาแน่นค่าเท่ากับ 14.19 ตัว/ตารางเมตร เดือนมิถุนายนพบมากที่สุด 31.60 ตัว/ตารางเมตร ฤดูฝนพบมากที่สุด 21.48 ตัว/ตารางเมตร น้ำหนักรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 36.39 ตันต่อปี จำนวนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 511.94 ล้านตัวต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติแล้วยังมีปริมาณน้ำหนักและความยาวของหอยหลอดที่ต่ำกว่าพื้นที่ชายฝั่งทะเลตามธรรมชาติ ทั้งนี้ควรงดทำประมงหอยหลอดในช่วงเวลาที่หอยหลอดมีการผสมพันธุ์พันธุ์กันตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม

รหัสนักวิจัยได้รับอนุญาตใช้สัตว์เพื่อการทดลอง

นายเสถียรพงษ์ ขาวหิต รหัส U1084032562

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิชัยพัฒนาและเจ้าหน้าที่โครงการศึกษาและพัฒนาวิจัยสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมประมง. (2538). *หอยหลอด Razor Clam* (*Sloen strictus* Gould). ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสมุทรสาคร กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

เกษม จันทร์แก้ว และชาตรี นิ่มปี. (2549). การศึกษาสำรวจการ เพิ่มขึ้นของพื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. รายงานประจำปีโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพมหานคร:

ชยารัตน์ ตันธนะสฤษดิ์. (2550). *ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมและศักย์การผลิตหอยหลอด (Solen spp.) บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาติ มงคลมาลย์. (2544). *ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ที่มีต่อผลการกระจายเชิงพื้นที่ของหอยหลอด อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ทวีวงศ์ ศรีบุรี และนันทนา คชเสนี. (2539). *การทำแผนการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมธรรมชาติ บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม.* (รายงานวิจัย). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์, และจงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. (2532). *การวิเคราะห์ดินและพืช.* กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนวัฒน์ จินดารักษ์. (2557). *สมดุลน้ำในระบบบ่อผึ่งบำบัดน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นภดล ภูวพานิช สุทธินี ลิ้มธรรมมหิศร และหร้อหวี ทองด้วง. (2546). การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชุกชุมของหอยหลอดกับสภาวะแวดล้อม บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม. *เอกสารวิชาการฉบับที่ 7/2546.* ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสมุทรสาคร กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

ปริญ หล่อพิทยากร. (2558). รูปแบบการไหลเวียนกระแสน้ำในอ่าวไทยจากแบบจำลอง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 23*(3), 446-465.

พิศิษฐ์ ธุดี. (2548). *แบบจำลองกระแสน้ำขึ้นลงในร่องน้ำเดินเรือบริเวณอ่าวไทยตอนบนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์.* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รังสิมา บัวทอง. (2540). *ความสัมพันธ์ระหว่างประชากรแพลงก์ตอนกับความหนาแน่น และฤดูกาลสืบพันธุ์ของหอยสกุล Solen ณ ดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม.* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วันทนา อยู่สุข. (2541). *หอยทะเล.* กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนันท์ ทวยเจริญ และผานิต วรอินทร์. (2534). ชีววิทยาการสืบพันธุ์ของหอยหลอด และสภาพแวดล้อมบริเวณแหล่งเลี้ยงตัวหอยที่บางบ่อ จังหวัดสมุทรสงคราม. *เอกสารวิชาการฉบับที่10/2534.* ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสมุทรสาคร กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

สุนันท์ ทวยเจริญ และมงคลรัตน์ เจริญพรทิพย์. (2540). สภาพพื้นที่และความชุกชุมของหอยหลอดที่ จังหวัดเพชรบุรี. *เอกสารวิชาการฉบับที่ 27/2540.* ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสมุทรสาคร กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

สุนันท์ ทวยเจริญ และอำนวย คงระเบียบ. (2546). พื้นที่แหล่งกระจายตัวและความชุกชุมของหอยหลอด (Solen sp.1) ใน จังหวัดสมุทรสาคร. *เอกสารวิชาการฉบับที่ 16/2546.* สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

สุนันท์ ทวยเจริญ และอำนวย คงระเบียบ. (2548). การแยกชนิดของหอยหลอดในอ่าวไทยตอนบน โดยวิธีอีเลคโตรโฟเรซีส. *เอกสารวิชาการฉบับที่ 3/2548.* ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสมุทรสาคร กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

สุนันท์ ทวยเจริญ อนันต์ สุนทร และเรวัตร ยอดสุรางค์. (2549). ฤดูสืบพันธุ์ของหอยหลอด (*Solen thailandiscus* Cosel, 2002) บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดสมุทรสงครามและจังหวัดสมุทรสาคร. *เอกสารวิชาการฉบับที่ 42/2549.* สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.

เสถียรพงษ์ ขาวหิต. (2559). *อิทธิพลของน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดต่อลักษณะนิเวศวิทยาสิ่งแวดล้อมเฉพาะทางการเติบโตและวงจรชีวิตของหอยตลับ* (*Meretrix* spp.) (วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร

เสถียรพงษ์ ขาวหิต และเกษม จันทร์แก้ว. (2559). การประเมินการปนเปื้อนแบคทีเรียบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลแหลมผักเบี้ย ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 8* (15), 78-87.

เสถียรพงษ์ ขาวหิต และเกษม จันทร์แก้ว. (2560). การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศวิทยาชายฝั่งทะเลแหลมผักเบี้ย ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว., 33*(2), 159-170.

เสถียรพงษ์ ขาวหิต เกษม จันทร์แก้ว วศิน อิงคพัฒนากุล อรอนงค์ ผิวนิล และอนุกรณ์ บุตรสันติ์. (2556). การศึกษาความเข้มข้นโลหะหนัก (As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb) ในดินตะกอนบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่รองรับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี. *วารพิษวิทยาไทย, 28*(2), 27-36.

อภิญญา คณาวัลย์. (2555). *ผลกระทบต่อการทรัพยากรประมงจากการพัฒนาพื้นที่ชุ่มน้ำดอนหอยหลอด* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Buranapratheprat A. (2008). Circulation in the upper gulf of Thailand: A Review. *Burapha Science Journal, 13*(1), 75-83.

Chunkao, K., Tarnchalanukit, W., Prabuddham, P., Phewnil, O., Bualert, S., Duangmal, K., Attamapitoon, T. & Nimpee, C. (2014). H.M. The king's royally initiated LERD project on community wastewater treatment through small wetlands and oxidation pond in Phetchaburi, Thailand. *Modern Applied Science, 8*(5), 233-246.

Satreethai, P., Kasem, C., Narauchid, D., Saowalak, B. & Chatri, N. (2013). Determining the In-pipe anaerobic processing distance before draining to oxidation pond of municipal wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Development*, *4*(2), 157-162.

Tuaycharoen, S. (1999). Distribution of razor clams in the Gulf of Thailand. *Phuket Marine Biological Center Special Publication*, 19, 173-176.

Veeravaitaya, N. (2010). *Interactions between razor clams* (*Solen* spp.) *and environmental factors at Don Hoi Lot Tidal Flat, Samut Songkhram Province, Thailand*. (Philosophy of Doctor degree). Nakhonpathom: Mahidol University.

Worrapimphong, K. (2010). *Integrated and collaborative ecological and socio-economic modeling for sustainable razor clam management at Don Hoi Lord Ramsar Site* (Philosophy of Doctor Degree). Bangkok: Chulalongkorn University.

การผลิตมวลเซลล์ *Bacillus* sp. ที่ความเข้มข้นสูงโดยเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์พิเศษแทนวิธีเฟดแบตช์

The production of *Bacillus* sp. cell biomass at high concentration by special batch cultivation technique instead of fed-batch mode

จตุพร สุขหนา[1], ขวัญฤทัย มาลัยเรือง[2], เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์[3*]
Jatuporn Sukna[1], Kwanruthai Malairuang[2], Seathawat Chamsart[3*]

Received: 18 July 2020 ; Revised: 25 August 2020 ; Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

การผลิตเซลล์ของ *Bacillus* sp. ที่ความเข้มข้นสูง ด้วยอาหารที่ทราบองค์ประกอบแน่นอน (defined medium) โดยการใช้เดกซทริน ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ของกลูโคสที่ได้จากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ที่ความเข้มข้นสูงเป็นแหล่งคาร์บอน ร่วมกับเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์พิเศษ (Special batch) ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงอย่างง่ายและราคาถูก จากการศึกษาในระดับฟลาสก์พบว่า อาหารสูตร Batch Production Medium (BPM) ที่ใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอน มีประสิทธิภาพดี โดยผลิตมวลเซลล์ได้ 12.93 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่า การเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ระดับถังหมัก 5 ลิตร สามารถใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้นได้สูงถึง 100 กรัมต่อลิตร โดยไม่เกิดการยับยั้งการเจริญของเซลล์ (ซึ่งไม่สามารถทำได้หากใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบ) โดยพบว่าผลผลิตมวลเซลล์สูงถึง 31.98 กรัมต่อลิตร ต่อมาศึกษาขยายขนาดการเพาะเลี้ยงที่ระดับถังหมัก 30 และ 300 ลิตร เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการขยายขนาดการผลิตไปสู่ระดับอุตสาหกรรม ให้ผลปรากฏชัดว่า มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากเซลล์มีการเจริญดีมาก และผลิตมวลเซลล์ที่ความเข้มข้นสูงถึง 43.45 และ 47.03 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อัตราการผลิต (productivities) สูงสุดถึง 2.94 และ 3.72 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แสดงถึงประสิทธิภาพการผลิต โดยสามารถพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรม และใช้แทนการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ (Fed-batch) ซึ่งเป็นวิธีการที่ซับซ้อนยุ่งยากและต้นทุนสูงได้

คำสำคัญ: เซลล์ความเข้มข้นสูง เดกซ์ทริน การเพาะเลี้ยงแบบแบตช์ บาซิลัส

Abstract

This work describes production of *Bacillus sp.* cell biomass at high concentration with defined medium, using dextrin (glucose oligomer) from cassava starch hydrolysis, at high concentrations as the carbon source together with a special batch cultivation technique which is simple and inexpensive. The study in flask using Batch Production Medium (BPM) with dextrin as the carbon source showed an efficient biomass yield of 12.93 g/l. Furthermore, in 5-liter fermenter cultivation, dextrin could be used at a very high concentration up to 100 g/l without growth inhibition (this cannot be done, if using sugar as the carbon source) and enhanced cell biomass concentration to 31.98 g/l. Further scaled-up studies of the cultivation in 30 and 300-liter fermenters were carefully performed in order to test the feasibility for production at an industrial scale. They clearly generated excellent results because of good cell growths and producing biomass yields at the very high concentrations of 43.45 and 47.03 g/l with the maximum cell productivities (cell production rates) at 3.11 and 3.92 g/l/h, respectively. The results of this study importantly demonstrate highly effective production which is able to be developed to industrial scales and substitute the usual fed-batch cultivation technique which is a complicated method and high cost.

Keywords: High-Cell-Density Cultivation, HCDC, Dextrin, Batch Cultivation, *Bacillus* sp.

---

[1] นิสิตปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20130
[2] นิสิตปริญญาเอก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20130
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20130
[1] Master degree student, Faculty of Science, Muang District, Chon Buri, 20130.
[2] Doctoral student, Faculty of Science, Muang District, Chon Buri, 20130.
[3] Assist. Prof., Faculty of Science, Muang District, Chon Buri, 20130.
* Corresponding author ; Seathawat Chamsart, Faculty of Science, Muang Chonburi District, Chon Buri, 20130.

บทนำ

การเพาะเลี้ยงเซลล์จุลินทรีย์ให้ได้ความเข้มข้นสูง (High-Cell-Density Cultivation, HCDC) เป็นเทคนิคการเพาะเลี้ยงที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลผลิตมวลเซลล์ (cell biomass yield) และเพิ่มอัตราการการผลิต (production rate หรือ productivity) ของจุลินทรีย์ (Lee, 1996 ; Shojaosadati *et al*., 2008) โดยทั่วไป เทคนิคการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงจะนิยมใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ (Fed-batch) ซึ่งมีข้อเสียหลายประการ คือ เป็นวิธีการที่ซับซ้อน ควบคุมยาก ใช้เวลาเพาะเลี้ยงนาน โอกาสการปนเปื้อนสูง รวมทั้งต้นทุนที่สูง ส่วนเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์ (Batch) แม้เป็นเทคนิคการเพาะเลี้ยงที่มีวิธีการไม่ซับซ้อนง่ายต่อการควบคุม โอกาสในการปนเปื้อนน้อย ใช้เวลาสั้น และต้นทุนต่ำ แต่มีข้อจำกัด คือไม่สามารถใช้แหล่งของคาร์บอนที่มีความเข้มข้นสูงได้ เพราะจะทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ (Crebtree effect) คือ น้ำตาลคั่งในเซลล์ ในขณะที่ระบบไม่สามารถให้อากาศได้เพียงพอ ทำให้จุลินทรีย์ผลิตสารพิษ เช่น อะซีเตท กรณีที่เป็นแบคทีเรีย หรือเอทานอล กรณีที่เป็นยีสต์ออกมา เป็นผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญของเซลล์ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้เดกซ์ทริน (โอลิโกเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส) เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งสามารถใช้ที่ความเข้มข้นสูงได้ถึง 100 กรัมต่อลิตรในการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์ ซึ่งปกติถ้าใช้น้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสจะไม่สามารถใช้ได้ที่ความเข้มข้นสูงเช่น เกินกว่า 40 กรัมต่อลิตร

จากผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตมวลเซลล์ด้วยการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 5 ลิตร ซึ่งให้อัตราการผลิตเซลล์ที่ดีกว่าการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ถึง 16 เท่า (Zhu and Xu, 2010) ปัจจัยที่สำคัญในการผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงประกอบไปด้วย สูตรอาหารที่มีประสิทธิภาพโดยส่วนใหญ่จะใช้อาหารสังเคราะห์ที่ทราบองค์ประกอบทางเคมีทั้งชนิดและปริมาณ (defined medium) ที่แน่นอน และสามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการเพาะเลี้ยงได้ดี สำหรับ *Bacillus* sp. เป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญทางด้านอุตสาหกรรมชีวภาพเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น เอนไซม์โปรติเอส อะไมเลส ไลเพส ไคติเนส เป็นต้น (เสาวนีย์ ธรรมสถิติ, 2547) นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์อย่างกว้างขว้างในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการเกษตร และการแพทย์

Bacillus sp. เป็นแบคทีเรียแกรมบวก สามารถเจริญได้ทั้งที่มีอากาศและไม่มีอากาศ เพาะเลี้ยงได้ง่าย ระยะเวลาในการเจริญไม่นาน สามารถใช้แหล่งคาร์บอนจากอาหารเพาะเลี้ยงได้หลากหลายชนิด (Rosovitz *et al*., 1998) ในการทดลองนี้มีความตั้งใจใช้ *Bacillus* sp. เพื่อมาศึกษาวิธีการการผลิตเซลล์ให้ได้ความเข้มข้นสูง โดยใช้สูตรอาหารสังเคราะห์ที่ทราบองค์ประกอบแน่นอนโดยมีโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง (เดกซ์ทริน) เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งผลิตได้เอง ผลิตง่ายราคาถูก และสามารถใช้ได้ที่ความเข้มข้นสูงโดยไม่ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญของเซลล์จากการคั่งของน้ำตาลภายในเซลล์ เนื่องจากสายเดกซ์ทรินซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสจะค่อยๆ ถูกตัดและทยอยลำเลียงเข้าเซลล์ เสมือนว่าเป็นการทำการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ที่ระดับเซลล์ (Fed-Batch at Cell Level, FBC) (Malairuang *et al*., 2020) เทคนิคการเพาะเลี้ยงเซลล์ให้ได้ความเข้มข้นสูงนี้สามารถขยายขนาดการผลิตเซลล์ชีวมวลขึ้นสู่ระดับโรงงานต้นแบบ และระดับอุตสาหกรรมได้

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้เดกซ์ทรินจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ที่ความเข้มข้นสูงสำหรับการเพาะเลี้ยง *Bacillus* sp. ด้วยวิธีแบบแบตช์พิเศษเพื่อผลิตมวลเซลล์ให้ได้ความเข้มข้นสูงแทนการใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบและแทนวิธีการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ที่ใช้กันทั่วไป โดยศึกษาถึงระดับโรงงานต้นแบบโดยการใช้ถังหมักขนาด 30 และ 300 ลิตร

วิธีการวิจัย

สายพันธุ์จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่ *Bacillus* sp. ที่คัดแยกจากดิน และเก็บรักษาในอาหารเหลวที่มีกลี เซอรอล ความเข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ภายในหน่วยวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

การเตรียมหัวเชื้อ

เตรียมอาหารสำหรับหัวเชื้อ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในบัฟเฟิลฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร เทเชื้อจากหลอดเก็บใส่ลงในบัฟเฟิลฟลาสก์ที่มีอาหาร จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงโดยการบ่มบนเครื่องเขย่า ด้วยความเร็วที่ 200 รอบต่อนาทีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สูตรอาหาร

สูตรอาหาร Nutrient Broth (NB) ประกอบด้วย (ต่อลิตร) เพปโตน 5 กรัม และสารสกัดจากเนื้อสัตว์ (beef extract) 3 กรัม ใช้เป็นอาหารสำหรับเตรียมหัวเชื้อ

สูตรอาหาร Batch Production Medium (BPM) (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561) ประกอบด้วย (ต่อลิตร) แหล่งคาร์บอน 20 กรัม $(NH_4)_2SO_4$ 2.2 กรัม KH_2PO_4 1.5 กรัม Na_2HPO_4 1.8 กรัม $MgSO_4.7H_2O$ 0.2 กรัม สารละลาย trace elements 1 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย (ต่อลิตร) NH_3SO_4 3 มิลลิกรัม $CaCl_2$ 10 มิลลิกรัม $BoCl_2$ 0.3 มิลลิกรัม Co_3Cl_3

0.2 มิลลิกรัม $ZnSO_4$ 0.1 มิลลิกรัม $MnCl_2$ 0.03 มิลลิกรัม Na_2MoO_4 0.03 มิลลิกรัม $NiSO_4$ 0.02 มิลลิกรัม และ $CuSO_4$ 0.01 มิลลิกรัม

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอนในการเพาะเลี้ยงระดับฟลาสก์

เตรียมอาหารสูตร BPM โดยแทนที่แหล่งคาร์บอนในสูตรอาหารที่แตกต่างกัน 3 แหล่งแก่ด้วย กลูโคสทางการค้า (Sigma-Aldrich) กลูโคสจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง และเดกซ์ทรินจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ปรับ pH เท่ากับ 6.5 ใส่ลงในบัฟเฟิลฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาตรอาหาร 95 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที เมื่ออาหารเย็น เติมหัวเชื้อที่เตรียมไว้ร้อยละ 5 ของปริมาตรอาหาร จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 36 ชั่วโมง บนเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส อัตราเขย่า 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างทุกๆ 6 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ผลและทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การศึกษาการใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้นสูงในการเพาะเลี้ยงด้วยเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 5 ลิตร

เตรียมอาหารสูตร BPM โดยใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอนที่เข้มข้นที่ต่างกัน 3 ความเข้มข้นแก่คือ 20, 40 และ 100 กรัมต่อลิตร (เพื่อให้เร็วสำหรับการขยายขนาดการเพาะเลี้ยงขึ้นสู่ระดับโรงงานต้นแบบ จากประสบการณ์ จึงข้ามไปที่ความเข้มข้นสูงก่อน เพราะเมื่อประสบความสำเร็จจึงไม่จำเป็นที่จะต้องลงมาทำการทดลองที่ความเข้มข้นต่ำๆ ซ้ำอีก) เตรียมอาหารสูตร BPM ใส่ในถังหมักขนาด 5 ลิตร ปริมาตรการทำงาน 3 ลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆ ของระบบควบคุมเข้ากับถังหมักและตั้งค่าต่างๆ สำหรับสภาวะเพาะเลี้ยง โดยให้ค่า pH เท่ากับ 6.5 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการกวนของใบพัด (impeller speeds) เป็น 500, 600 และ 700 รอบต่อนาที และอัตราการเติมอากาศเป็น 1, 2 และ 3 ปริมาตรของอากาศต่อปริมาตรของอาหารต่อนาที (vvm) อัตราทั้งสองสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของเดกซ์ทริน ตามลำดับ และเติมหัวเชื้อร้อยละ 5 ของปริมาตรต่อปริมาตรอาหารเพาะเลี้ยง เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ 6 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ผลและทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การศึกษาการขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 30 ลิตร

เตรียมอาหารสูตร BPM ลงในถังหมักขนาด 30 ลิตร โดยใช้เดกซ์ทรินความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาตรอาหาร 13.5 ลิตร นึ่งฆ่าเชื้อด้วยระบบฆ่าเชื้อในตัวที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนึ่งฆ่าเชื้อเรียบร้อยแล้ว ทำการต่ออุปกรณ์ระบบควบคุมต่างๆ เข้ากับถังหมักและตั้งค่าสภาวะเพาะเลี้ยง ให้ค่า pH เท่ากับ 6.5 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เติมหัวเชื้อปริมาตร 1.5 ลิตร ลงในถังหมัก จากนั้นปรับให้อัตราการกวนของใบพัดที่ 500 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรอาหารต่อนาที เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ผลและทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

การศึกษาการขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 300 ลิตร

เตรียมอาหารเหลวสูตร BPM ซึ่งมีเดกซ์ทรินเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 180 ลิตร ลงในถังหมักขนาด 300 ลิตร แล้วนึ่งฆ่าเชื้อด้วยระบบฆ่าเชื้อในตัว ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นต่ออุปกรณ์ระบบควบคุมต่างๆ เข้ากับถังหมักและตั้งค่าสภาวะเพาะเลี้ยงให้ค่า pH เท่ากับ 6.5 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เติมหัวเชื้อปริมาตร 20 ลิตร (จากถังหมักกล้าเชื้อ 30 ลิตร) ลงในถังหมัก ปรับอัตราการกวนของใบพัดที่ 300 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศเท่ากับ 2 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรอาหารเพาะเลี้ยงต่อนาที เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ผลและทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

เมื่อเก็บตัวอย่างจากแต่ละการหมักมาแล้ว นำน้ำหมักมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสม และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวเปรียบเทียบ และนำไปคำนวณค่าการดูดกลืนแสง

การวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง (Dry Cell Weight)

ทำการชั่งหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 1.5 มิลลิลิตร เป็นค่าน้ำหนักหลอดเปล่า จากนั้นนำตัวอย่างน้ำหมักใส่ในหลอดปั่นเหวี่ยงที่ผ่านการชั่งน้ำหนักมาแล้ว ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่อัตรา 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง แล้วนำหลอดที่มีตะกอนเซลล์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง หลังจากนั้นนำมาคำนวณค่าน้ำหนักเซลล์แห้งตามสูตรดังนี้

น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร) = [((น้ำหนักเซลล์ (กรัม) + น้ำหนักหลอด (กรัม)) - น้ำหนักหลอด (กรัม)) x 1,500)]/1.5

การวิเคราะห์ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์คงเหลือ

1. การทำกราฟมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส นำสารละลายมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เจือจางให้มีความเข้มข้นเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัมต่อลิตร เติมสารละลาย DNS ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที และนำไปแช่น้ำเย็น 5 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐานกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ จากนั้นหาค่าความชันของกราฟ

2. การวัดน้ำตาลคงเหลือ นำตัวอย่างส่วนใสของน้ำหมักที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงมาเจือจางให้เหมาะสม จากนั้นนำ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองและเติมสารละลาย DNS 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปต้มในน้ำเดือด 5 นาที จากนั้นนำไปแช่น้ำเย็นต่ออีก 5 นาที เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงแสงที่ได้มาคำนวณเป็นปริมาณน้ำตาลคงเหลือโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานน้ำตาลกลูโคสจากสูตร

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์คงเหลือ (กรัมต่อลิตร) = (ค่าการดูดกลืนแสง x ค่าการเจือจาง) / ความชันของกราฟมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way analysis of variance;วน 3 ซ้ำทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของชุดการทดลองแต่ละชุดด้วยวิธี Tukey's Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab version 17 ที่ระดับนัยสำคัญ *p*-value 0.05

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอนในการเพาะเลี้ยงในระดับฟลาสก์

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้เดกซ์ทรินจากการย่อยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน โดยเปรียบเทียบกับแหล่งคาร์บอนอื่น ได้แก่ กลูโคสทางการค้า (Sigma-Aldrich) และกลูโคสจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้อาหารสูตร BPM พบว่า *Bacillus* sp. มีการเจริญได้ดีในอาหารที่มีเดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอน โดยการเจริญสูงสุดที่ 18 ชั่วโมง มีน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุด เท่ากับ 12.93 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด 24.47 และน้ำตาลคงเหลือเท่ากับเท่ากับ 2.09 กรัมต่อลิตร ในชั่วโมงสุดท้ายของการเพาะเลี้ยง (Figure 1) และเมื่อพิจารณาแหล่งคาร์บอนจากกลูโคสทางการค้า พบว่า การเจริญสูงสุดที่ 9 ชั่วโมง ให้ผลน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 5.13 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 8.10 และปริมาณน้ำตาลคงเหลือในชั่วโมงสุดท้ายเท่ากับ 10.05 กรัมต่อลิตร และพิจารณาการใช้กลูโคสจากการย่อยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า การเจริญสูงสุดที่ 9 ชั่วโมง ให้น้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 4.70 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 6.29 และปริมาณน้ำตาลคงเหลือเท่ากับ 5.94 กรัมต่อลิตร

ซึ่งเมื่อเทียบเทียบค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การเจริญที่ได้จากการคำนวณ (Table 1) พบว่า การใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอนมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการเพาะเลี้ยง *Bacillus* sp. ให้ผลการเจริญดีที่สุดโดยมีค่ามวลเซลล์ (x) เท่ากับ 12.93 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.18 ต่อชั่วโมง ผลผลิตของมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.57 กรัมต่อกรัม อัตราการสร้างมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 0.72 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 0.99 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง รองลงมาเป็นการใช้แหล่งคาร์บอน

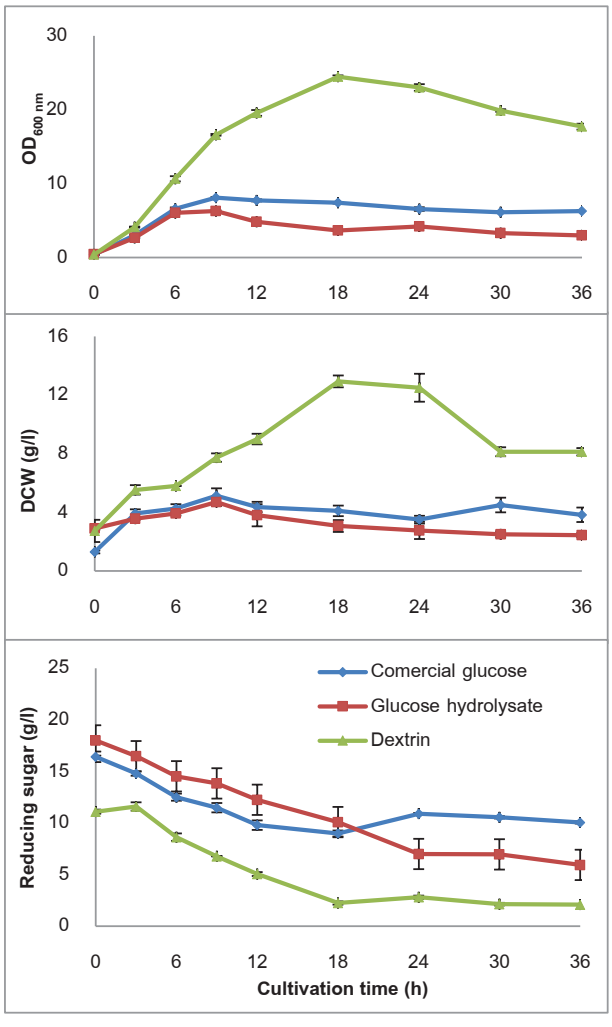


Figure 1. Growth, dry cell weight, and reducing sugar during cultivations of *Bacillus* sp. With different carbon sources

จากกลูโคสทางการค้า ซึ่งมีค่ามวลเซลล์ (x) เท่ากับ 5.13 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.15 ต่อชั่วโมง

ผลผลิตของมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.45 กรัมต่อกรัม อัตราการสร้างมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 0.57 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 0.94 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมงและลำดับสุดท้ายเป็นการใช้แหล่งคาร์บอนจากกลูโคสจากการย่อยแป้ง โดยมีค่ามวลเซลล์ (x) เท่ากับ 4.70 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.05 ต่อชั่วโมง ผลผลิตของมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.29 กรัมลำดับ

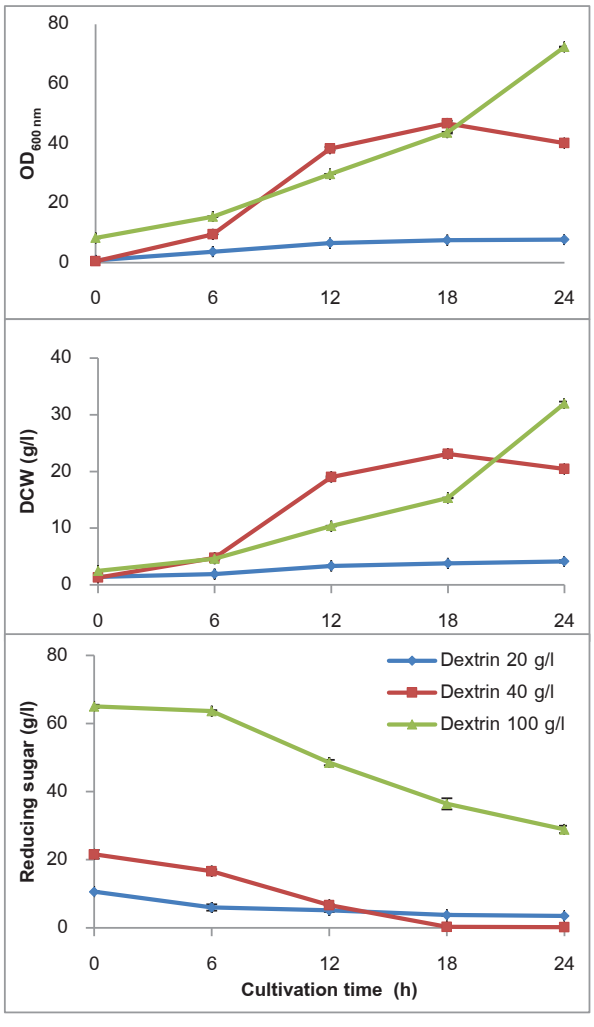


Figure 2. Growth, dry cell weight, and reducing sugar during cultivation of *Bacillus* sp. with dextrin at concentrations of 20, 40 and 100 g/l

อัตราการสร้างมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 0.52 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 0.68 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ผลการศึกษาการใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้นสูงในการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยเทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 5 ลิตร

จากผลการศึกษาข้างบน แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเดกซ์ทรินใช้เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยดีกว่าการใช้น้ำตาลกลูโคสจากทั้งสองแหล่ง ดังนั้นจึงทำการศึกษาต่อมา เพื่อหาระดับความเข้มข้นที่สูงและเหมาะสมของเดกซ์ทรินต่อการเจริญของ *Bacillus* sp. โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยอาหารสูตร BPM ผสมเดกซ์ทรินที่ความเข้มข้น 20, 40 และ 100 กรัมต่อลิตร ในถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่ควบคุมสภาวะ พบว่าการใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ให้ผลการผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงได้ดีที่สุดและเป็นความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนที่มากที่สุดและมากกว่าความเข้มข้นของการเพาะเลี้ยงแบบกะโดยใช้น้ำตาลโดยทั่วไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า *Bacillus* sp. มีความสามารถในการใช้ทั้งน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดจากการสลายเด็กซ์ทรินก่อนแล้วและเดกซ์ทรินที่เหลือเป็นแหล่งคาร์บอนได้ดี โดยที่ 24 ชั่วโมง โดยให้ความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 31.98 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืน 72.42 ถัดมาเป็นการใช้เดกซ์ทรินที่ความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ซึ่งการเจริญสูงสุดที่ 18 ชั่วโมง ให้ความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 23.10 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 46.75 ที่ความเข้มข้นของการใช้เดกซ์ทริน 40 กรัมต่อลิตร ช่วงก่อน 24 ชั่วโมง ให้ผลการเจริญดีกว่าที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร เพราะช่วงแรกขอการเจริญ น้ำตาลที่ความเข้มข้นต่ำกว่าย่อมก่อให้เกิดความเครียดของเซลล์ (cell stress) น้อยกว่า ลำดับสุดท้ายเป็นการใช้เดกซ์ทรินความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ผลการเจริญสูงสุดที่ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 4.13 กรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 7.74 (Figure 2)

เมื่อคำนวณค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การเจริญของ *Bacillus* sp. (Table 2) พบว่าการเพาะเลี้ยงที่ใช้เดกซ์ทรินความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยให้ค่าเข้มข้นมวลเซลล์ (x) เท่ากับ 31.98 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.19 ต่อชั่วโมง สัมประสิทธิ์มวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.45 กรัมต่อกรัม อัตราการผลิตมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 1.33 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 2.96 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ลำดับถัดมาเป็นการใช้เดกซ์ทรินที่ระดับความเข้มข้น 40 กรัมต่อลิตร ให้ค่าความเข้มข้นของมวลเซลล์ (x) เท่ากับ 23.10 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.16 ต่อชั่วโมง สัมประสิทธิ์มวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.58 กรัมต่อกรัม อัตราการผลิตมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 1.29 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 2.21 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และลำดับสุดท้าย ได้แก่ การใช้เดกซ์ทรินความ

เข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของมวลเซลล์ (x) เท่ากับ 4.13 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.04 ต่อชั่วโมง สัมประสิทธิ์มวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.25 กรัมต่อกรัม อัตราการผลิตมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 0.17 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 0.69 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ผลการศึกษาการขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 30 ลิตร

จากผลการศึกษาความเข้มข้นของเดกซ์ทรินที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูง ซึ่งพบว่าที่ระดับความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงได้ดีที่สุดในถังหมักขนาด 5 ลิตร จากนั้นจึงนำสภาวะดังกล่าวมาขยายขนาดการผลิตที่ถังหมักขนาด 30 ลิตร ผลปรากฏชัดว่า *Bacillus* sp. มีการเจริญสูงสุดที่ 14 ชั่วโมง โดยให้ความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้งสูงถึง 43.45 กรัมต่อลิตร ที่ค่าการดูดกลืนแสง 96.55 (Figure 3) ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการเจริญ พบว่าค่าความเข้มข้นของมวลเซลล์ (x) เท่ากับ 43.45 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.21 ต่อชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์ของมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.85 กรัมต่อกรัม อัตราการผลิตมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 3.11 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 3.63 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

ผลการศึกษาการขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบบกะในถังหมักขนาด 300 ลิตร

ผลจากการศึกษาการเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ระดับถังหมักขนาด 30 ลิตร ผลปรากฏชัดว่า ระบบนี้สามารถผลิตเซลล์ที่ความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงได้ขยายขนาดการผลิตเพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้สำหรับการผลิตเซลล์ที่ระดับอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาการเพาะเลี้ยงเซลล์ในถังหมักขนาด 300 ลิตร ที่ควบคุมสภาวะ ผลจากการศึกษาปรากฏว่า เซลล์การเจริญสูงสุดที่ 12 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าใช้เวลาสั้นมากเมื่อเทียบกับเวลาการเพาะเลี้ยงปกติที่ผ่านมา โดยให้ค่าความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดถึง 47.03 กรัมต่อลิตร ที่ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 104.50 (Figure 4) และเมื่อพิจารณาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการเจริญ พบว่า ให้ความเข้มข้นของมวลเซลล์ (x) เท่ากับ 47.03 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญจำเพาะ (μ) เท่ากับ 0.25 ต่อชั่วโมง สัมประสิทธิ์การผลิตมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.63 กรัมต่อกรัม อัตราการผลิตมวลเซลล์ (r_x) เท่ากับ 3.92 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (โดยยังไม่มีการพบจากรายงานการวิจัยอื่นที่ให้ค่าสูงกว่านี้มาก่อน) (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง และเศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, 2557 ; ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561 ; Lee, 1996 ; Rosovitz *et al*., 1998 ; Gill and Kaur, 2004 ; Kunamneni and Singh, 2006 ; Shojaosadati *et al*., 2008 ; Kulpreecha *et al*., 2009 ; Zhu and Xu, 2010 ; Barros *et al*., 2013 ; Raul *et al*., 2014 ; Malairuang *et al*., 20) และอัตราการใช้น้ำตาล (r_s) เท่ากับ 6.26 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตเซลล์ *Bacillus* sp. เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสูง ซึ่งวิธีการผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงนั้นจะต้องใช้อาหารสังเคราะห์ (defined medium) ที่ทราบองค์ประกอบและความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งสามารถนำไปปรับปรุงดัดแปลงได้ง่ายเพื่อให้เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงเซลล์แบคทีเรีย (Shojaosadati *et al*., 2008) โดยอาหารสูตร BPM ซึ่งเป็นอาหารพื้นฐานมีองค์ประกอบอย่างง่ายราคาถูกเหมาะสำหรับการผลิตเซลล์ในระดับอุตสาหกรรม (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง และเศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, 2557 ; ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561) และได้รายงานการใช้เพื่อผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงทั้งในการเพาะเลี้ยง *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae* และ *Aspergillus oryzae* ซึ่งประสบความสำเร็จอย่างสูง (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง และเศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, 2557 ; ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561) ซึ่งเมื่อใช้อาหารสูตร BPM โดยมีเดกซ์ตรินจากการย่อยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าให้ผลผลิตเซลล์สูงกว่าการใช้กลูโคสทางการค้า (Sigma-Aldrich) และกลูโคสจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของมวลเซลล์ 12.93 กรัมต่อลิตร และอัตราการผลิตมวลเซลล์ 0.72 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

การเลือกใช้แหล่งคาร์บอนนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงประสบความสำเร็จ จากการค้นพบนี้ชัดเจนว่า เดกซ์ทรินจากการย่อยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเดกซ์ทรินเป็นองค์ประกอบของกลูโคสหลายๆ โมเลกุล (ไม่เกิน 10 โมเลกุล) เรียงต่อกันเป็นสาย ทำให้การเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตเซลล์สามารถผลิตได้ในปริมาณที่สูง ซึ่งการเพาะเลี้ยงโดยทั่วไปนิยมใช้แหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาลกลูโคส ซึ่งนอกจากจะมีราคาสูงแล้วยังมักก่อให้เกิดการคั่งของกลูโคสภายในเซลล์ ส่งผลให้ยับยั้งการเจริญของเซลล์เนื่องจากในสภาวะนี้เซลล์จะผลิตอะซีเตทหรือ เอทานอลออกมา (Crebtree effect) (Kanjanachumpol *et al*., 2013 ; Kulpreecha *et al*., 2009): ซึ่งจะเป็นพิษต่อเซลล์มีผลให้ยับยั้งการเจริญ แต่การใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอน เดกซ์ทรินจะค่อยๆ ทยอยถูกย่อยให้เป็นกลูโคสโมเลกุลเดียวๆ แล้วค่อยๆ ลำเลียงเข้าเซลล์เพื่อไปใช้เพื่อการเจริญได้เรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง เสมือนหนึ่งว่าเป็นการทำการเพาะเลี้ยงแบบ fed-batch ที่ระดับเซลล์ (Fed-Batch at Cell Level, FBC)

Table 1. Calculated growth kinetic parameters of *Bacillus* sp. Cultivations in BPM medium with different carbon sources

Carbon sources	x (g/l)	μ (h^{-1})	$Y_{x/s}$ (g/g)	r_x (g/l/h)	r_s (g/l/h)
Commercial glucose	5.13 ± 0.50[b]	0.15 ± 0.02[a]	0.45 ± 0.05[b]	0.57 ± 0.06[b]	0.94 ± 0.05[a]
Glucose hydrolysate	4.70 ± 0.27[b]	0.05 ± 0.01[b]	0.29 ± 0.05[c]	0.52 ± 0.03[b]	0.68 ± 0.02[b]
Dextrin	12.93 ± 0.40[a]	0.18 ± 0.03[a]	0.57 ± 0.04[a]	0.72 ± 0.03[a]	0.99 ± 0.00[a]

Statistic comparisons of those mean values within their own columns (among treatments of cultivation conditions) at *p*-values of ≤0.05 show different characters, a, b, and c, which mean statically significant differences.

Table 2. Calculated growth kinetic parameters of *Bacillus* sp. Cultivations in BPM medium with dextrin at concentrations of 20, 40, and 100 g/l in 5-L fermenters, and 100 g/l of dextrin in 30-L and 300-L fermenters

Dextrin concentrations (g/l)	Fermenter volumes (L)	x (g/l)	μ (h^{-1})	$Y_{x/s}$ (g/g)	r_x (g/l/h)	r_s (g/l/h)
20	5	4.13 ± 0.21[e]	0.04 ± 0.01[d]	0.25 ± 0.01[d]	0.17 ± 0.01[d]	0.69 ± 0.00[e]
40	5	23.10 ± 0.36[d]	0.16 ± 0.01[c]	0.58 ± 0.01[b]	1.29 ± 0.02[c]	2.21 ± 0.00[d]
100	5	31.98 ± 0.34[c]	0.19 ± 0.00[b]	0.45 ± 0.01[c]	1.33 ± 0.02[c]	2.96 ± 0.04[c]
100	30	43.45 ± 0.07[b]	0.21 ± 0.00[b]	0.62 ± 0.00[a]	3.11 ± 0.02[b]	3.63 ± 0.03[b]
100	300	47.03 ± 0.15[a]	0.25 ± 0.01[a]	0.63 ± 0.00[a]	3.92 ± 0.01[a]	6.26 ± 0.03[a]

Statistic comparisons of those mean values within their own columns (among treatments of cultivation conditions) at *p*-values of ≤0.05 show different characters, a, b, c, d, and e, which mean statically significant differences.

Note x : Cell biomass concentration (g/l)
μ : Specific growth rate (h^{-1})
$Y_{x/s}$: Yield coefficient of cell biomass per unit of carbon source substrate (g/g)
r_x : Production rate of cell biomass or cell biomass productivity (g/l/h)
r_s : Rate of carbon source substrate utilization (g/l/h)

เนื่องจากในสภาวะนี้เซลล์จะผลิตอะซีเตทหรือเอทานอลออกมา (Crebtree effect) (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง และเศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์, 2557 ; ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561) ซึ่งจะเป็นพิษต่อเซลล์มีผลให้ยับยั้งการเจริญ แต่การใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอน เดกซ์ทรินจะค่อยๆ ทยอยถูกย่อยให้เป็นกลูโคสโมเลกุลเดียวๆ แล้วค่อยๆ ลำเลียงเข้าเซลล์เพื่อไปใช้เพื่อการเจริญได้เรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง เสมือนหนึ่งว่าเป็นการทำการเพาะเลี้ยงแบบ fed-batch ที่ระดับเซลล์ (Fed-Batch at Cell Level, FBC) (ขวัญฤทัย มาลัยเรือง, 2561)

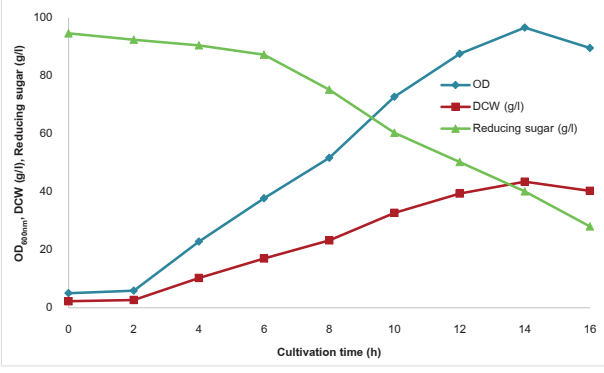


Figure 3. Growth, dry cell weight and reducing sugar during Cultivation of *Bacillus* sp. in BPM medium with 100 g/l of dextrin in 30-L fermenter

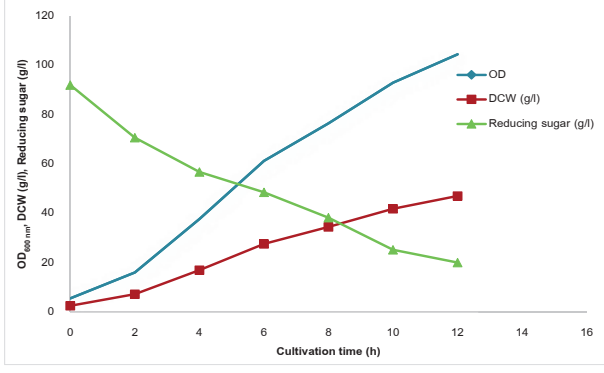


Figure 4. Optical density, dry cell weight and reducing sugar during cultivation of *Bacillus* sp. in BPM medium with 100 g/l of dextrin in 300-L fermenter

ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่า *Bacillus* sp. มีความสามารถในการใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งของคาร์บอนที่ความเข้มข้นสูงมากได้ในการเพาะเลี้ยงแบบกะที่ให้อากาศ ซึ่งโดยทั่วไปการใช้แหล่งคาร์บอนในรูปของน้ำตาล เช่น กลูโคส และซูโครส สำหรับการเพาะเลี้ยงแบบกะที่ให้อากาศ แบคทีเรียหรือจุลินทรีย์อื่นจะสามารถใช้น้ำตาลได้ที่เข้มข้นไม่เกิน 30–50 กรัมต่อลิตร เช่น การเพาะเลี้ยง *E. coil* สามารถใช้กลูโคสความเข้มข้นมากที่สุดเพียงได้ 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งจะเกิดการยับยั้งการเจริญของเซลล์แล้ว (Raul *et al*., 2014) แต่วิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์ในงานวิจัยนี้สามารถทำให้แบคทีเรีย *Bacillus* sp. ใช้แหล่งคาร์บอนราคาถูกซึ่งเป็นเดกซ์ทรินที่ได้จากการย่อยแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นสูงถึง 100 กรัมต่อลิตร เหตุผล คือ *Bacillus* sp. เป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถในการสร้างเอนไซม์ได้หลายชนิด เช่น อะไมเลส (Raul *et al*., 2014) กลูโคสอะไมเลส (Gill and Kaur, 2004) พลูลูลาเนส (Kunamneni and Singh, 2006) รวมไปถึงโปรติเอส และไลเพส (Barros *et al*., 2013) ซึ่งเอนไซม์สามชนิดแรกมีความสามารถย่อยเดกซ์ทรินให้เป็นกลูโคสได้ดี ซึ่งจะค่อยๆ ย่อยให้เป็นกลูโคสพร้อมกับการเจริญที่เพิ่มขึ้น และค่อยๆ ลำเลียงกลูโคสเข้าเซลล์ ซึ่งสามารถลดปัญหาการคั่งของกลูโคสภายในเซลล์ได้ และเรียกการย่อยเดกซ์ทรินเป็นกลูโคส และค่อยๆ นำกลูโคสเข้าเซลล์ว่า “การเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ในระดับเซลล์ (FBC)” (Malairuang *et al*., 2020) ทำให้แบคทีเรียสามารถเจริญได้ดีและผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงเป็นสัดส่วนสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่สูงของแหล่งคาร์บอนเดกซ์ทรินที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ เห็นชัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การผลิตมวลเซลล์ต่อการใช้น้ำตาล ($Y_{x/s}$) ที่สูงมากกว่า 0.5 กรัมต่อกรัม โดยร่วมกับการใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์แบบให้อากาศและใช้อาหาร BPM ราคาถูก ซึ่งมีข้อดี คือเป็นเทคนิคที่ง่ายไม่ซับซ้อน ระบบควบคุมง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น ลดการปนเปื้อน และที่สำคัญคือลดแรงงานและต้นทุนการผลิต ซึ่งเมื่อเทียบกับการเพาะเลี้ยง *B. subtilis* ที่ใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์ (Fed-batch) ซึ่งใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร ในถังหมักขนาด 7 ลิตร สามารถผลิตเซลล์ได้ความเข้มข้นเพียง 9.46 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาการเพาะเลี้ยง 120 ชั่วโมง โดยคิดเป็นอัตราการผลิตมวลเซลล์เท่ากับ 0.079 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (Zhu and Xu, 2010) เมื่อเทียบกับผลงานวิจัยที่ดีที่สุดในครั้งนี้ที่ให้ค่าให้ความเข้มข้นของมวลเซลล์สูงถึง 47.03 กรัมต่อลิตร (มากกว่า 5 เท่า) และ อัตราการผลิตมวลเซลล์สูงมากถึง 3.92 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (มากกว่า 50.25 เท่า) งานวิจัยนี้บ่งบอกถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สำหรับการขยายขนาดการผลิตขึ้นสู่ระดับอุตสาหกรรม

เห็นได้ว่าแม้การเพาะเลี้ยงแบบเฟดแบตช์จะสามารถใช้แหล่งคาร์บอนที่มีความเข้มข้นสูงได้ แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือใช้ระยะเวลายาวนานและข้อเสียอีกหลายประการที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น แต่การเพาะเลี้ยงแบบแบตช์ด้วยวิธีการปกติที่ใช้อยู่กันทั่วไปก็ไม่สามารถใช้แหล่งคาร์บอนในรูปของน้ำตาลเข้มสูงได้ ทำให้ไม่สามารถผลิตเซลล์ที่ความเข้มข้นสูงได้ เช่น การเพาะเลี้ยง *B. megaterium* แบบกะโดยใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้น 25 กรัมต่อลิตร ในถังหมักขนาด 5 ลิตร ให้ผลผลิตมวลเซลล์เพียง 8.24 กรัมต่อลิตร ที่ อัตราการผลิตมวลเซลล์ 0.68 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่เวลาเพาะเลี้ยง 12 ชั่วโมง (Kulpreecha *et al*., 2009) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นชัดเจนว่า การเพาะเลี้ยงเซลล์แบคทีเรียสกุล *Bacillus* sp. สามารถใช้เดกซ์ทรินเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้นสูงได้ ส่งผลให้ได้ผลผลิตมวลเซลล์ที่ความเข้มข้นสูงกว่างานวิจัยอื่นๆ ที่อัตราการผลิตสูงกว่ามาก ในกรณีจุลินทรีย์ที่ไม่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ย่อยแป้งมันสำปะหลังนั้นจึงต้องมีการเติมเอนไซม์เพื่อให้กระบวนการย่อยเดกซ์ทรินให้เป็นกลูโคสและนำกลูโคสมาใช้ได้ เช่น รายงานวิจัยการผลิตเซลล์ยีสต์ *Kluyveromyces marxianus* SS106 ที่มีการผลิตเซลล์ให้มีความเข้มข้นสูงเพื่อนำไปเป็นหัวเชื้อในการผลิตเอทานอล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยีสต์ไม่สามารถผลิตเอนไซม์กลูโคอะไมเลสได้ ดังนั้นจึงมีการเติมเอนไซม์ชนิดนี้ลงไปด้วยในการเพาะเลี้ยงเพื่อให้เดกซ์ทรินถูกย่อยเป็นกลูโคสและยีสต์สามารถนำไปใช้ในการเจริญต่อไปได้ (Malairuang *et al*., 2020a) และ *S. cerevisiae* โดยระหว่างการเพาะเลี้ยงได้มีการเติมเอนไซม์ช่วยย่อยร่วมกับการเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญและสร้างผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย (Shi *et al*., 2019)

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจากวิธีการเพาะเลี้ยงในถังหมักขนาด 5 ลิตร ต่อมาจึงทำการศึกษาขยายขนาดการผลิตในระดับถึงหมักขนาด 30 ลิตร ผลการทดลองปรากฏว่า ให้ผลผลิตความเข้มข้นของน้ำหนักเซลล์แห้ง 43.45 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการผลิตมวลเซลล์ 3.11 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงในถังหมักขนาด 5 ลิตรที่ผ่านมา พบว่าการเพาะเลี้ยงในถังหมักขนาด 30 ลิตร มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากมีระบบการกวนผสมที่ดีส่งผลให้มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอและยังลดการรวมกลุ่มของเซลล์ที่ส่งผลให้เกิดตะกอน ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับรายการวิจัยที่เพาะเลี้ยงในถังหมักระดับใกล้เคียงกัน พบว่า การเพาะเลี้ยง *B. megaterium* ในถังหมักขนาด 10 ลิตร ใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อลิตร ใช้เทคนิคการเพาะเลี้ยงแบบกะ สามารถผลิตเซลล์ได้ในปริมาณ 32.48 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาการเพาะเลี้ยง 12 ชั่วโมง ผลผลิตมวลเซลล์

ที่ได้เท่ากับ 2.71 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (Kanjanachumpol *et al.,* 2013) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้ว การศึกษาครั้งนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาการขยายขนาดการผลิตในที่ระดับโรงงานต้นแบบที่ใหญ่ขึ้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการขยายขนาดการผลิตขึ้นสู่ระดับอุตสาหกรรม โดยเพาะเลี้ยงเซลล์ *Bacillus* sp. ในถังหมักขนาด 300 ลิตร ผลการทดลองปรากฏว่า ให้ความเข้มมวลเซลล์สูงถึง 47.03 กรัมต่อลิตร และอัตราการผลิตมวลเซลล์สูงสุดถึง 3.92 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมงในเวลาเพียง 12 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยอื่นๆ ทั้งหมดดังที่กล่าวแล้ว

จากผลงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า การเพาะเลี้ยง *Bacillus* sp. แบบแบตช์และให้อากาศ โดยการใช้อาหารสูตร BPM ที่เป็นอาหารทราบองค์ประกอบแน่นอน (defined medium) สูตรอย่างง่ายราคาถูก โดยการใช้เดกซ์ทรินที่ได้จากการย่อยแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่ความเข้มข้นสูง เพื่อผลิตมวลเซลล์ให้ได้ความเข้มข้นสูงประสบความสำเร็จอย่างดีเยี่ยมและมีประสิทธิภาพสามารถพัฒนาการผลิตเซลล์แบคทีเรียความเข้มข้นสูงขึ้นสู่ระดับอุตสาหกรรมได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยนี้ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวภาพและโรงงานต้นแบบทางวิศวกรรมทางชีวภาพ และภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่อนุเคราะห์สถานที่ห้องปฏิบัติการ และตลอดจนอำนวยความสะดวกในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ขวัญฤทัย มาลัยเรือง และเศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์. (2557). การเพาะเลี้ยงเซลล์ความเข้มข้นสูงด้วยการเพาะเลี้ยงแบบหลายกะเป็นลำดับต่อเนื่อง. ใน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (บ.ก.), *การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่15 (*น. 793-797). มหาวิทยาลัยขอ่น.

ขวัญฤทัย มาลัยเรือง. (2561). *การผลิตเซลล์ความเข้มข้นสูงด้วยการเพาะเลี้ยงแบบกะโดยใช้แหล่งคาร์บอนความเข้มข้นสูง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี:มหาวิทยาลัรพา.

เสาวนีย์ ธรรมสถิติ. (2547). *แบคทีเรียทางเทคโนโลยีชีวภาพ: เซลล์และผลิตภัณฑ์ของเซลล์*. นครปฐม: โรงพิมพ์สถาบันพัฒนาสาธารณสุขอาเซี่ยน มหาวิทยาลัยมหิดล.

Barros, F.F., Simiqueli, A.P., de Andrade, C.J., & Pastore, G.M. (2013). Production of Enzymes from Agroindustrial Wastes by Biosurfactant-Producing Strains of *Bacillus subtilis*. *Biotechnology Research International*, 2013, 103960. DOI: 10.1155/2013/960

Gill, R.K., & Kaur, J. A. (2004). thermostable glucoamylase from a thermophilic *Bacillus* sp.: characterization and thermostability. *Journal of Industrial and Microbiology and Biotechnology*, *31*(11), 540-543. DOI: 10.1007/s10295-004-5-y

Kanjanachumpol, P., Kulpreecha, S., Tolieng, V., & Thongchul, N. (2013). Enhancing polyhydroxybutyrate production from high cell density fed-batch fermentation of *Bacillus megaterium* BA-019. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *36*(10), 1463-1474. DOI: 10.1007/s00449-013-5-7

Kulpreecha, S., Boonruangthavorn, A., Meksiriporn, B., & Thongchul, N. (2009). Inexpensive fed-batch cultivation for high poly(3-hydroxybutyrate) production by a new isolate of *Bacillus megaterium*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *107*(3), 240-245. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2008..006

Kunamneni, A., & Singh, S. (2006). Improved high thermalstability of pullulanase from a newly isolated thermophilic *Bacillus* sp. AN-7. *Enzyme and Microbial Technology*, *39*, 1399-1404. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.023

Lee, S.Y. (1996). High-cell-density culture of *Escherichia coli*. *Trends in Biotechnology*, *14*(3), 98-105. DOI:10.1016/0167-7799(96)809

Malairuang, K., Krajang, M., Sukna, J., & Chamsart, S. (2020). High-Cell-Density Cultivation of *Saccharomyces cerevisiae* with Intensive Multiple Sequential Batches Together with a New Technique of Fed-Batch at Cell Level. *Processes*, 8(10), 1321. https://doi.org/10.3390/pr821

Malairuang, K., Krajang, M., Rotsattarat, R., & Chamsart, S. (2020a). Intensive Multiple Sequential Batch Simultaneous Saccharification and Cultivation of *Kluyveromyces marxianus* SS106 Thermotolerant Yeast Strain for Single-Step Ethanol Fermentation from Raw Cassava Starch. *Processes*, 8, 898. https://doi.org/10.3390/pr898

Raul, D., Biswas, T., Mukhopadhyay, S., Kumar Das, S., & Gupta, S. (2014). Production and partial purification of alpha amylase from *Bacillus subtilis* (MTCC121) using solid state fermentation. *Biochemistry Research International*, 2014, 1-5. https://doi.org/10.1155/2014/41

Rosovitz, M.J., Voskuil, M.I., & Chambliss, G.H. (1998). *Bacillus*. Topley and Wilson's Microbiology and microbial infections.9th ed. *In*: *Collier J, Balows A, Sussman M, editors*. London: Edward Arnold, p. 79.

Shi, X., Liu, Y., Dai, J., Liu, X., Dou, S., Teng, L., Meng, Q., Lu, J., Ren, X., & Wang, R. A. (2019). novel integrated process of high cell-density culture combined with simultaneous saccharification and fermentation for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 121,115-121. DOI:10.1016/j. biombioe.2018.10

Shojaosadati, S.A., Kolaei, S.M.V., Babaeipour, V., & Farnoud, A.M. (2008). Recent advances in Hgh cell density cultivation for production of recombinant protein. *Iranian Journal of Bioteno*, *200 ; 6*(2), 5.

Zhu, B.F., & Xu, Y. (2010). Producion of tetramethyl-pyrazine by batch culture of *Bacillus subtilis*with optimal pH control strategy. *Journal Industrial Microbiology and Biotech* . 201037(8),:815-821. DOI:10.1007/s10295-010-15-121.

การส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวดอกมะลิ 105 โดยแบคทีเรีย ที่ปลูกภายใต้สภาวะความเค็ม

Promoting rice seedling Khao Dawk Mali 105 growth by *Pseudomonas putida* grown under saline condition

จิราวรรณ สิทธิสวนจิก[1], ทิราภรณ์ กนกฉันท์[1], เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์[2*], จันทรา อินทนนท์[3]
Jirawan Sitisuanjik[1], Tiraporn kanokchan[1], Saethawat Chamsart[2*], Chantra Indananda[3]

Received: 22 July 2020 ; Revised: 13 August 2020 ; Accepted: 21 September 2020

บทคัดย่อ

ดินเค็มเป็นปัญหาสำคัญในการปลูกข้าว ความเค็มของดินส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชลดลง กลยุทธ์หนึ่งที่ช่วยพืชให้สามารถทนทานต่อสภาวะความเค็มของดินได้คือ การใช้แบคทีเรียที่มีคุณสมบัติส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGPR) การศึกษาครั้งนี้จึงนำแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 มาทดสอบความสามารถสร้างสารไซเดอโรฟอร์ ฮอร์โมนพืช IAA และเอนไซม์ ACC deaminase (ACCD) ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 200-1,000 มิลลิโมลาร์ และศึกษาความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบเติบโตของต้นข้าว (*Oryza sativa* L. cv. KDML105) ผลทดสอบคุณสมบัติในการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ ฮอร์โมนพืช IAA และเอนไซม์ ACCD ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้ สามารถทนเกลือโซเดียมคลอไรด์ได้ที่ความเข้มข้น 5% (w/v) และพบว่าแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นข้าวได้ โดยมีความยาวราก ความยาวลำต้น น้ำหนักสดลำต้น และน้ำหนักแห้งลำต้นเพิ่มขึ้นดีกว่าต้นข้าวที่ไม่ได้รับเชื้อ แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีคุณสมบัติเป็น PGPR ที่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นข้าวในสภาวะดินเค็มได้

คำสำคัญ: แบคทีเรียซูโดโมแนส พูทิด้า ไซเดอโรฟอร์ ฮอร์โมนพืช IAA เอนไซม์ ACCD สภาวะความเค็ม

Abstract

Soil salinity is a serious problem in rice cultivation causing plants to stop growing and resulting in reducing crop yields. One of the strategies to enable plants to tolerate saline soils is to use plant growth-promoting bacteria (PGPR). In this study, *Pseudomonas putida* ATCC 17484 was used to test the ability to produce siderophore, indole-3-acetic acid (IAA) and 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase (ACCD), in the broth media supplemented with 200-1,000 mM NaCl solution, and to evaluate the ability to promote the growth of rice plant (*Oryza sativa* L. cv. KDML105). The results showed that the bacteria produced siderophore, IAA and ACCD in the presence of 200-1000 mM of NaCl solution, under 5% (w/v) NaCl. It was found that *P. putida* ATCC 17484 could promote the growth of rice seedlings. The root length, shoot length, shoot fresh weight and shoot dry weight were higher than those of rice seedlings grown without bacteria. This study shows that this bacterium is a PGPR and can promote the growth of rice seedling in saline soil conditions.

Keywords: *Pseudomonas putida*, Siderophores, Indole-3-acetic acid, ACC deaminase, Saline condition

---

[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[3] อาจารย์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[1] Master's Degree Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University
[2] Assistant professor, Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University
[3] Lecturer, Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University
* Corresponding Author: saethawa@buu.ac.th

บทนำ

ปัญหาความเค็มของดิน เนื่องจากปริมาณเกลือในดินสูงเป็นหนึ่งปัจจัยความเครียดที่สำคัญสำหรับพืช (Yan *et al*., 201) เกลือในดินทำให้เกิดความดันออสโมติก ส่งผลให้การดูดซึมน้ำสารอาหารของรากพืชลดลง และพืชที่ปลูกในพื้นที่ดินเค็มลำต้นจะมีลักษณะแคระแกร็น ส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตพืชลดลง (Paul & Lade, 2014 ; Patil, 2015) นอกจากนี้การใช้สารเคมีหรือปุ๋ยเคมีทำการเกษตรสะสมเป็นระยะเวลายาวนานยังส่งผลต่อสภาพแวดล้อมและความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง (Rütting *et al*., 2018) การแก้ปัญหาดินเค็มนั้นอาจใช้วิธีการพันธุวิศวกรรมสร้างพืชที่ต้านทานต่อความเครียดพืชได้ (Honma & Shimomura, 1978 ; Vaishnav *et al*., 2016) เช่นรายงานวิจัยของ (Grover *et al*., 2003) พัฒนายีนที่ทนต่อความเครียดในพืชต้นแบบเช่น ยาสูบ, ต้นอะราบิดอฟซิส (*Arabidopsis*) และข้าว ซึ่งวิธีทางพันธุวิศวกรรมนี้อาจใช้ระยะเวลานานและมีต้นทุนสูง ดังนั้นการใช้จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยอาศัยแบคทีเรียที่มีชีวิตอิสระในดินและบริเวณรอบรากพืช Plant Growth-promoting Rhizobacteria (PGPR) ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตรอบรากพืชได้อย่างรวดเร็วและช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชผ่านกลไกทางตรงและทางอ้อมหลายอย่าง (Kloepper & Schroth, 1978 ; Kloepper, 1993 ; Ahemad & Kibret, 2014 ; Goswami *et al*., 2016) โดยการสร้างสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulators) เช่น ฮอร์โมนพืช IAA (indole-3-acetic acid), จิบเบอเรลลิน (gibberellins) และไซโตไคนิน (cytokinins) (Patten & Glick, 2002 ; Kang *et al*., 2014) ช่วยลดระดับเอทิลีนในพืชโดยการย่อยสลายเอนไซม์ 1-aminocyclo-propane-1-carboxylate (ACC) deaminase (Han *et al*., 2015 ; Wang *et al*., 2018) ละลายฟอสเฟต (Srivastava & Srivastava, 2020) ช่วยดูดซับละลายสารอาหารและการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพ (Richardson *et al*., 2009) สร้างไซเดอโรฟอร์ (siderophore) เพื่อจับอิออนของเหล็กในสิ่งแวดล้อม (Haas & Défago, 2005 ; Neal & Ton, 2013) สามารถผลิตยาปฏิชีวนะหรือสารต้านเชื้อราภายนอกเซลล์เช่น กลูแคเนส, ไคติเนส, ซาลิไซลิก, แอซิด และไซยาไนด์ (Bakker *et al*., 2013 ; Kamou *et al*., 2015)

PGPR ที่มีการศึกษาแล้วว่าสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้แก่สกุล *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Pseudomonas* และ *Serratia* (Glick, 1995; Jones *et al*., 2007; Barea, 2015) และหนึ่งสายพันธุ์ที่โดดเด่นคือ *Pseudomonas putida* ซึ่งเป็น Rhizobacterium ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทางการเกษตร (Hassan *et al*., 2011) มีรายงานว่าแบคทีเรีย *P. putida* สายพันธุ์ TSAU1 สามารถสร้างฮอร์โมนพืช IAA และส่งเสริมการเจริญเติบโตพืชได้ (Hernández-Montiel *et al*., 2017) เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Egamberdieva *et al* (2009) พบว่า *P. putida* สร้างฮอร์โมนพืช IAA และสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตข้าวสาลีในสภาวะความเค็มได้

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกตรวจสอบแบคทีเรีย PGPR ที่มีคุณสมบัติในการเป็นแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและช่วยพืชทนทานต่อสภาวะความเค็มได้

วิธีการทดลอง

1. ตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียและการทำให้เชื้อบริสุทธิ์ เชื้อแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 (ATCC: The American Type Culture Collection) ถูกทำให้บริสุทธิ์บนอาหารแข็งสูตร Nutrient agar (NA) บ่มที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant growth promoting; PGP) ทดสอบการสร้างสารไซเดอโรฟอร์ตามวิธีการของ Rungin *et al* (2012) นำเชื้อแบคทีเรียที่เจริญบนอาหารแข็งสูตร NA (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร) ไปวางในจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็งสูตร Chrome azurol S (CAS) (Schwyn & Neiland, 1987) และเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ (ทำ 3 ซ้ำ) บ่มที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เชื้อแบคทีเรียที่สร้างไซเดอรโรฟอร์ได้จะปรากฏฮาโลโซนรอบ ๆ โคโลนีเป็นสีส้ม จากนั้นทดสอบการสร้างฮอร์โมนพืช IAA ในอาหารเหลวสูตร Yeast extract-Dextrose (YD) ที่เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ ตามวิธีการของ Sadeghi *et al* (2012) บ่มบนเครื่องเขย่าตลอดเวลาที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียสในที่มืดเป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อเก็บสารละลายส่วนใสไปทดสอบการสร้างฮอร์โมนพืช IAA ด้วยสารละลาย Salkowski reagent ตามวิธีการของ Ahmad *et al* (2008) จากนั้นวัดการเจริญของเชื้อ โดยการหาน้ำหนักแห้ง ทดสอบการสร้างเอนไซม์ ACCD ในอาหารที่มี ACC เป็นแหล่งไนโตรเจนเพียงแหล่งเดียว (Honma & Shimomur, 1978) โดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียบนอาหารแข็งสูตร Minimal medium (Hopwoo, 1967) Minimal medium ที่เติม 0.1% $(NH_4)_2SO_4$ และ Minimal medium ที่เติม ACC 0.3 มิลลิโมลาร์ (ทำ 3 ซ้ำ) บ่มที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ เชื้อที่สามารถเจริญได้ในอาหาร Minimal medium ที่เติม ACC แสดงว่ามีการสร้างเอนไซม์ ACCD ตามวิธีการของ El-Tarabil (2008) จากนั้นทดสอบกิจกรรมการสร้างเอนไซม์ ACCD ตามวิธีการของ Jaemsaeng *et al* (2018)

นำเชื้อแบคทีเรียที่เจริญในอาหารเหลวสูตร YD มาล้างเซลล์ด้วย 0.9% Normal Saline และดูดเซลล์ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ไปเลี้ยงต่อในอาหาร Minimal medium ที่เติม ACC 0.3 มิลลิโมลาร์ นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อเก็บสารละลายส่วนใสและย้ายใส่หลอดทดลองใหม่ แล้วจึงเติมสารละลาย 2,4-Dinitro-phenylhydrazine และวัดปริมาณการสร้างเอนไซม์ ACCD ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ค่าการดูดกลืนแสง 540 นาโนเมตร

3. ทดสอบความสามารถทนเค็ม 0-7% (w/v) ด้วยการนำเชื้อแบคทีเรียไปเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร YD ที่เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 1-7% (w/v) (ทำ 3 ซ้ำ) บ่มที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์

4. การศึกษากิจกรรมการส่งเสริมการเจริญเติบโตข้าว (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) ทำการฆ่าเชื้อบนผิวเมล็ดข้าวด้วย 70% เอทานอล เป็นเวลา 5 นาที และ 1% โซเดียมไฮเปอคลอไรด์ เป็นเวลา 5 นาที ล้างให้สะอาดอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ และแช่เมล็ดในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเมล็ดมาคลุกกับเชื้อ (10^6 CFU/ml) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามวิธีของ Rungin *et al*. (2012) จากนั้นนำไปทดสอบอัตราการงอกเมล็ด ซึ่งเมล็ดที่ไม่ได้รับเชื้อเป็นชุดควบคุม โดยนำเมล็ดมาเรียงในเพลทที่มีกระดาษเยื่อและเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0, 75 และ 150 มิลลิโมลาร์ ทำการทดลองชุดละ 30 เมล็ด (ทำ 5 ซ้ำ) ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 3 วันและอีก 4 วันในที่มีแสงตามวิธีของ Ramadoss *et al*. (2013) สำหรับกิจกรรมการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวในสภาวะโรงเรือนจะคัดเลือกต้นข้าวที่มีความแข็งแรงอายุ 1 สัปดาห์มาทำการตัดปลายรากด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ แล้วจึงย้ายต้นข้าวที่ได้รับเชื้อและไม่ได้รับเชื้อไปปลูกในกระถางที่มีดินและเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0, 75 และ 150 มิลลิโมลาร์ โดยแต่ละชุดการทดลองถูกนำมาเก็บรักษาไว้ภายใต้สภาวะโรงเรือนและรดน้ำวันละ 1 ครั้งหลังจากครบ 15 วัน จึงใส่ปุ๋ย และเมื่อครบระยะเวลา 30 วัน จึงวัดความยาวราก ความยาวลำต้น และชั่งน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง

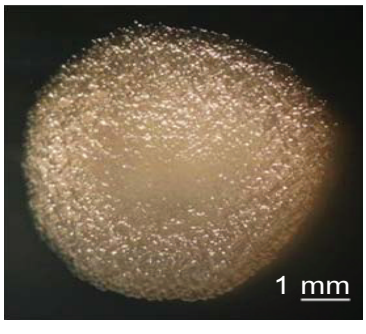


Figure 1 Colony of *P. putida* ATCC 17484 on NA agar, incubated at 29 ºC for 24 h.

5. การวิเคราะห์ข้อมูลผลทางสถิติ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เวอร์ชั่น 18 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดทดลองโดยใช้ Tukey Multiple Comparison ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. การทำให้เชื้อบริสุทธิ์พบว่า สามารถทำให้เชื้อแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 แยกเป็นโคโลนีเดียวและบริสุทธิ์ได้ (Figure 1)

2. การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGP) พบว่าแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สร้างไซเดอโรฟอร์ได้สูงสุด 2.20 เซนติเมตร ในอาหารแข็งสูตร CAS ที่ไม่เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แต่เมื่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการสร้างไซเดอโรฟอร์จะค่อยๆ ลดลงคือ 1.33, 1.20, 0.77, 0.47 และ 0.33 เซนติเมตร ที่ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ (Table 1, Figure 2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Deshwal *et al*. (2013) พบว่าแบคทีเรีย *P. putida* สร้างสารไซเดอโรฟอร์ได้ในอาหารแข็งสูตร CAS ที่เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงถึง 2.25% ผลการสร้างฮอร์โมนพืช IAA สำหรับเชื้อแบคทีเรียที่สร้างฮอร์โมนพืช IAA ได้สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีส้มอมชมพูและหากไม่มีการสร้างฮอร์โมนพืช IAA สารละลายจะไม่เปลี่ยนสีหรือยังคงสีน้ำตาลอมเหลืองของอาหารเมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยพบว่าแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สร้างฮอร์โมนพืช IAA ได้สูงสุด 17.18 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 400 มิลลิโมลาร์ และการเจริญเติบโตสูงสุด 109.33 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 800 มิลลิโมลาร์ นั่นคือเมื่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นการสร้างฮอร์โมนพืช IAA และการเจริญเติบโตจะค่อยๆ ลดลง (Table 1, Figure 3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Deshwal *et al*. (2013) รายงานว่าแบคทีเรีย *P. putida* สร้างฮอร์โมนพืช IAA ได้และสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ 2.25 และ 2.50% ตามลำดับ เช่นเดียวกับ *P. putida* สายพันธุ์ R4 สามารถสร้างฮอร์โมนพืช IAA ได้ 8.9 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1.5% หรือ 257 มิลลิโมลาร์ (Egamberdieva *et al*., 2015) ผลการสร้างเอนไซม์ ACCD พบว่าแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สามารถเจริญเติบโตได้ในอาหารแข็งสูตร Minimal medium ที่เติม ACC สามารถเปลี่ยน ACC โดยใช้เอนไซม์ ACCD ให้เป็นแอมโมเนียและ Ketobutyrate ซึ่งนำไปใช้เพื่อดำรงชีวิตและเจริญได้ (El-Tarabily, 2008) และพบว่ามีกิจกรรมการสร้างเอนไซม์ ACCD ได้สูงถึง 126.50 nmol α-keto mg protein^{-1}h^{-1} ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ในขณะที่

ระยะเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง สร้างเอนไซม์ ACCD ได้ 9.40 และ 79.60 nmol α-keto mg protein^{-1}h^{-1} ตามลำดับ (Figure 4) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pastor *et al*. (2016) พบว่า *P. putida* PCI2 มีการเจริญได้ดีในอาหารที่มี ACC ซึ่งเป็นแหล่งไนโตเจนเพียงแหล่งเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารที่ไม่มี ACC พบว่า *P. putida* PCI2 ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และงานวิจัยของ Nadeem *et al*. (2010) พบว่า *P. putida* W2 สร้างเอนไซม์ ACCD ได้ 364 μmol kg^{-1} h^{-1} และสร้างฮอร์โมนพืช IAA สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ภายใต้สภาวะความเค็ม

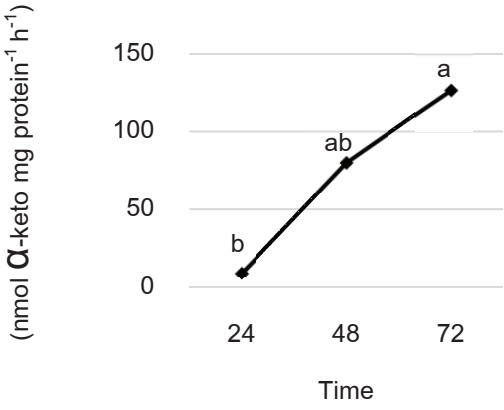


Figure 4 ACC deaminase production.

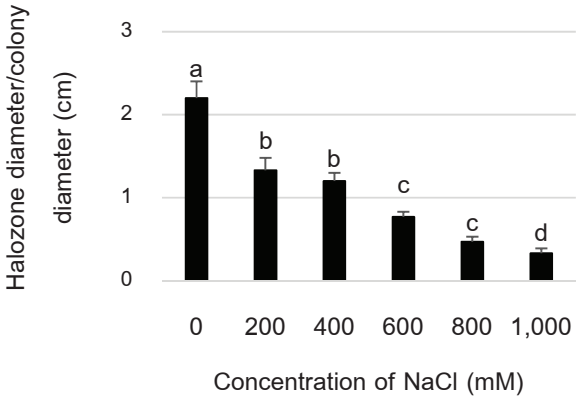
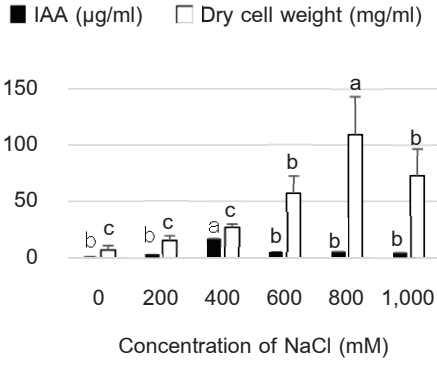


Figure 2 The effect of NaCl on siderophore production *P. putida* ATCC 17484 Halo zone diameter/colony diameter.



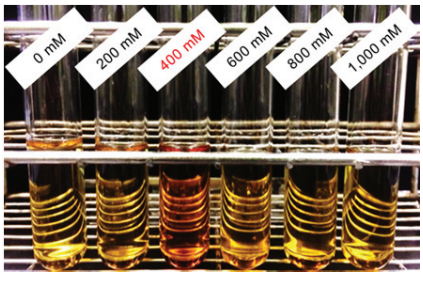


Figure 3 The effect of NaCl on IAA production *P. putida* ATCC 17484.

Table 1 Determination of plant growth promoters production.

NaCl (mM)	Plant growth promoting		
	Siderophore (cm)	IAA (μg/ml)	Dry cell weight (mg/ml)
0	2.20±0.20a	1.07±0.02b	6.96±3.86c
200	1.33±0.15b	3.77±0.01b	15.77±4.03c
400	1.20±0.10bc	17.18±0.12a	27.11±2.86c
600	0.77±0.06c	5.82±0.01b	57.31±15.94b
800	0.47±0.06cd	5.58±0.01b	109.33±34.17a
1,000	0.33±0.06d	4.75±0.01b	72.89±23.76b

Values are means ± standard deviation, different letters indicate significant difference between means at $P<0.05$

3. ความสามารถในการทนเค็ม 0-7% (w/v) พบว่าแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สามารถเจริญได้สูงสุดบนอาหารแข็งสูตร YD ที่เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 5% (w/v) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ He *et al*. (2018) พบว่า *P. putida* Rs-198 ทนเค็มได้ 5% (w/v)

4. กิจกรรมการส่งเสริมการเจริญเติบโตข้าว (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) พบว่าที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0, 75 และ 150 มิลลิโมลาร์ แบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 สามารถส่งเสริมความยาวราก ความยาวลำต้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของลำต้นเพิ่มสูงขึ้นได้ดีกว่าต้นข้าวที่ไม่ได้รับเชื้อ (ชุดควบคุม) (Table 2) ซึ่งมีความยาวราก 11.59, 14.48 และ 13.15 เซนติเมตร ความยาวลำต้น 36.26, 34.06 และ 33.71 เซนติเมตร (Figure 6) น้ำหนักสดลำต้น 2.17, 1.63 และ 1.70 กรัม (Figure 7) น้ำหนักแห้งลำต้น 0.35, 0.25 และ 0.28 กรัม ตามลำดับ (Figure 8) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yan *et al*. (2014) ศึกษาแบคทีเรียที่มีกิจกรรมการส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum* L.) ในสภาวะที่มีความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0, 90 และ 190 มิลลิโมลาร์ พบว่าต้นมะเขือ

เทศที่ได้รับเชื้อแบคทีเรีย *P. putida* UW4 เจริญเติบโตสูงกว่าต้นมะเขือเทศที่ไม่ได้รับเชื้อ และเมื่อระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นทั้งในต้นที่ไม่ได้รับเชื้อและต้นที่ได้รับเชื้อ ความยาวลำต้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลดลง แต่ที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 90 มิลลิโมลาร์ ต้นที่ได้รับเชื้อมีความยาวลำต้นเพิ่มสูงขึ้น 34.3 มิลลิเมตร ซึ่งยาวกว่าต้นที่ไม่ได้รับเชื้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 190 มิลลิโมลาร์ พบว่าความยาวลำต้น 22.7 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับต้นที่ไม่ได้รับเชื้อ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0, 75 และ 150 มิลลิโมลาร์ ต้นข้าวที่ได้รับเชื้อแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 และไม่ได้รับเชื้อมีอัตราการงอกเมล็ด (Figure 5) และน้ำหนักสดรากไม่แตกต่างกัน (Figure 7) และที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรค์ 0 และ 75 มิลลิโมลาร์ ต้นข้าวที่ได้รับเชื้อแบคทีเรียและไม่ได้รับเชื้อมีน้ำหนักแห้งรากไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอร์ 150 มิลลิโมลาร์ ต้นข้าวที่ได้รับเชื้อมีน้ำหนักแห้งรากเพิ่มขึ้นสูงกว่าต้นข้าวที่ไม่ได้รับเชื้อ (Figure 8)

Table 2 Effect of the application of *P. putida* ATCC 17484 on growth characteristics of rice plants grown in normal and salt (75 and 150 mM NaCl) stress conditions.

Bacteria	Promote plant growth	Concentration of NaCl (mM)		
		0	75	150
Control	Germination (%)	80.67±8.63a	62.00±1.82a	43.33±11.30a
P. putida		68.67±11.93a	54.000±10.11a	50.67±10.38a
Control	Root length (cm)	9.96±0.30b	7.33±0.29b	6.46±0.19b
P. putida		11.59±0.30a	14.48±0.75a	13.15±0.79a
Control	Shoot length (cm)	32.51±0.90b	26.96±0.47b	19.96±0.71b
P. putida		36.26±2.13a	34.06±2.04a	33.71±2.56a
Control	Root fresh weight (g)	1.10±0.29a	0.90±0.19a	0.67±0.10a
P. putida		1.25±0.09a	0.82±0.22a	0.87±0.22a
Control	Shoot fresh weight (g)	1.37±0.12b	0.75±0.15b	0.51±0.05b
P. putida		2.17±0.08a	1.63±0.19a	1.70±0.09a
Control	Root dry weight (g)	0.10±0.03a	0.09±0.01a	0.06±0.01b
P. putida		0.11±0.01a	0.08±0.01a	0.10±0.01a
Control	Shoot dry weight (g)	0.23±0.01b	0.15±0.02b	0.13±0.02b
P. putida		0.35±0.01a	0.25±0.03a	0.28±0.02a

Values are means ± standard deviation, different letters indicate significant difference between means at $P<0.05$

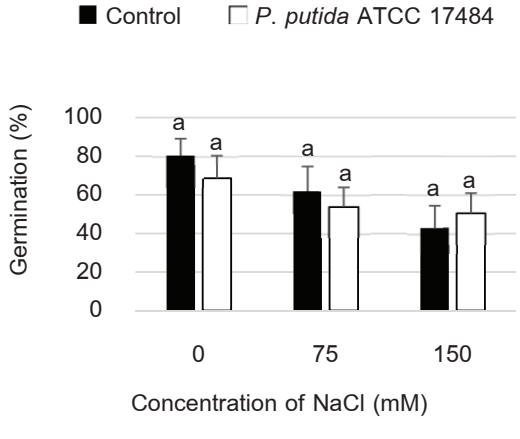


Figure 5 Effects of bacterial inoculation on germination percentage of rice seedlings at 0, 75 and 150 mM NaCl concentration along with control (sterilized water).

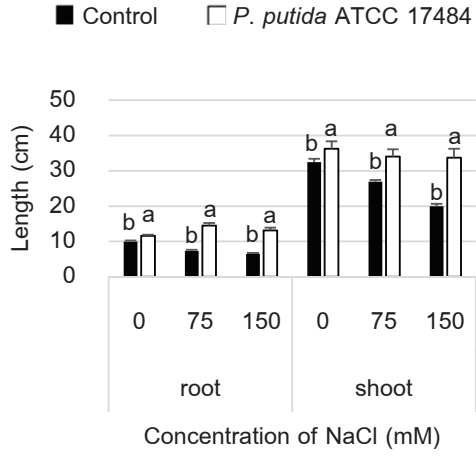


Figure 6 Effect of bacterial inoculation on root and length (cm) of rice under different concentrations of NaCl.

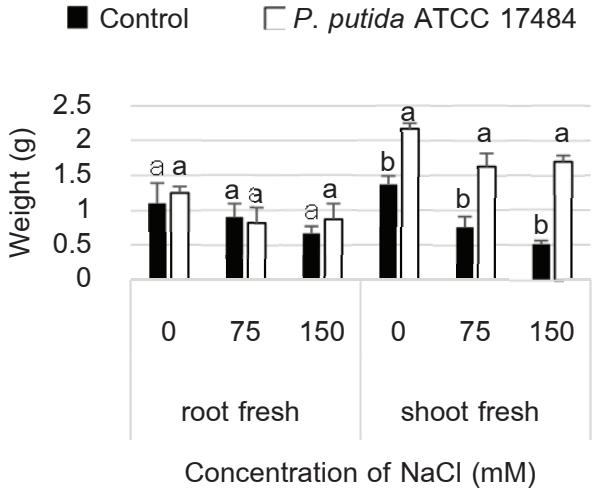


Figure 7 Effect of bacterial inoculation on fresh weight (g) of rice under different concentrations of NaCl.

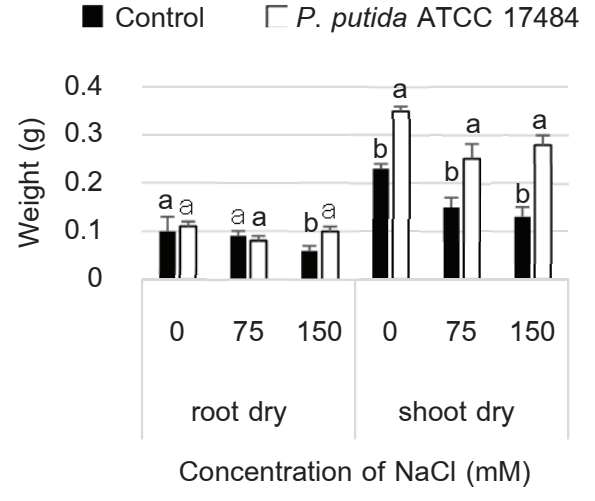


Figure 8 Effect of bacterial inoculation on dry weight (g) of rice under different concentrations of NaCl.

สรุปผลการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชของแบคทีเรีย *P. putida* ATCC 17484 พบว่าสร้างสารไซเดอโรฟอร์ได้ โดยการเกิดวงใสสีส้มรอบๆ โคโลนีบนอาหารแข็งสูตร CAS ที่ไม่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้สูงสุด 2.20 เซนติเมตร สร้างฮอร์โมนพืช IAA ได้สูงสุด 17.18 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 400 มิลลิโมลาร์ และเจริญเติบโตได้สูงสุดคือ 109.33 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 800 มิลลิโมลาร์ สามารถสร้างเอนไซม์ ACCD ได้และมีกิจกรรมเอนไซม์สูงสุด 126.50 nmol α-keto mg protein^{-1}h^{-1} ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ความสามารถในการทนเค็มซึ่งเจริญได้ในอาหารแข็งที่เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงสุด 5% (w/v) และสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตข้าวได้ โดยต้นข้าวมีความยาวราก ความยาวลำต้น น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลำต้นเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราการงอกเมล็ด น้ำหนักสดรากไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับต้นข้าวที่ไม่ได้รับเชื้อ (ชุดควบคุม) ที่ระดับความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 0, 75 และ 150 มิลลิโมลาร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M.S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, *163*(2), 173-181. https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.04.001

Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University Science*, *26*(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001

Bakker, P.A.H.M., Doornbos, R.F., Zamioudis, C., Berendsen, R.L., & Pieterse, C.M.J. (2013). Induced systemic resistance and the rhizosphere microbiome. *The Plant Pathology Journal*, *29*(2), 136-143. https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.07.2012.0111

Barea, J.M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *15*(2), 261-282. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000021

Dalvand, M.G., Y., & Askari, H. (2012). Plant growth promoting activity of an auxin and siderophore producing isolate of Streptomyces under saline soil conditions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *28*(4), 1503-1509. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0952-7

Deshwal, V.K., & Kumar, P. (2013). Effect of salinity on growth and PGPR activity of Pseudomonads. *Journal of Academia and Industrial Research*, *2*(6), 353-356. http://www.jairjp.com/NOVEMBER%202013/10%20VISHAL.pdf

Egamberdieva, D. (2009). Alleviation of salt stress by plant growth regulators and IAA producing bacteria in wheat. *Act Physiologiae Plantarum*, *31*(4), 861-864. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0297-0

Egamberdieva, D., Jabborova, D., & Hashem, A. (2015). Pseudomonas induces salinity tolerance in cotton (*Gossypium hirsutum*) and resistance to *Fusarium* root rot through the modulation of indole-3-acetic acid. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(6), 773-779. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.04.019

El-Tarabily, K.A. (2008). Promotion of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plant growth by rhizosphere competent 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase-producing streptomycete actinomycetes. *Plant and Soil*, *308*(1), 161-174. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9616-2

Glick, B.R. (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, *41*(2), 109-117. https://doi.org/10.1139/m95-015

Goswami, D., Thakker, J.N., & Dhandhukia, P.C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, *2*(1), 1127500. https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500

Grover, A., Aggarwal, P.K., Kapoor, A., Katiyar-Agarwal, S., Agarwal, M., & Chandramouli, A. (2003). Addressing abiotic stresses in agriculture through transgenic technology. *Current Science*, *84*(3), 355-367. https://www.researchgate.net/publication/237284788

Haas, D., & Défago, G. (2005). Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, *3*(4), 307-319. https://doi.org/10.1038/nrmicro1129

Han, Y., Wang, R., Yang, Z., Zhan, Y., Ma, Y., Ping, S., Zhang, L., Lin, M., & Yan, Y. (2015). 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from *Pseudomonas stutzeri* A1501 facilitates the growth of rice in the presence of salt or heavy metals. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *25*(7), 1119-1128. https://doi.org/10.4014/jmb.1412.12053

Hassan, M.N., Afghan, S., & Hafeez, F.Y. (2011). Biological control of red rot in sugarcane by native pyoluteorin-producing *Pseudomonas putida* strain NH-50 under field conditions and its potential modes of action. *Pest Management Science*, *67*(9), 1147-1154. https://doi.org/10.1002/ps.2165

Hernández-Montiel, L.G., Chiquito Contreras, C.J., Murillo Amador, B., Vidal Hernández, L., Quiñones Aguilar, E.E., & Chiquito Contreras, R.G. (2017). Efficiency of two inoculation methods of *Pseudomonas putida* on growth and yield of tomato plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *17*(4), 1003-1012. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000400012

He, Y., Wu, Z., Wang, W., Ye, B.C., Zhang, F., & Liu, X. (2018). Different responses of *Capsicum annuum* L. root and shoot to salt stress with *Pseudomonas putida* Rs-198 inoculation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 799-811. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9891-y

Honma, M., & Shimomura, T. (1978). Metabolism of 1-aminocyclopropane-1-carboxylicacid. *Agricultural and Biological Chemistry*, *42*(10), 1825-1831. http://dx.doi.org/10.1080/00021369.1978.10863261

Hopwood, D.A. (1967). Genetic analysis and genome structure in *Streptomyces coelicolor*. *Bacteriological Reviews*, *31*(4), 373-403. https://mmbr.asm.org/content/mmbr/31/4/373.full.pdf

Jaemsaeng, R., Jantasuriyarat, C., Thamchaipenet, A. (2018). Molecular interaction of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase (ACCD)-producing endophytic *Streptomyces* sp. GMKU 336 towards salt-stress resistance of *Oryza sativa* L.cv.KDML 105. *Scientific Reports*, 8, 1950. https://doi.org/10.1038/s41598-018-19799-9

Jones, K.M., Kobayashi, H., Davies, B.W., Taga, M. E., & Walker, G.C. (2007). How rhizobial symbionts invade plants: the Sinorhizobium-Medicago model. *Nature Reviews Microbiology*, *5*(8), 619-633. https://doi.org/10.1038/nrmicro1705

Kamou, N.N., Karasali, H., Menexes, G., Kasiotis, K.M., Bon, M.C., Papadakis, E.N., Tzelepis, G.D., Lotos, L., & Lagopodi, A.L. (2015). Isolation screening and characterization of local beneficial rhizobacteria based upon their ability to suppress the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicislycopersici* and tomato foot and root rot. *Biocontrol Science and Technology*, *25*(8), 928-949. https://doi.org/10.1080/09583157.2015.1020762

Kang, S.M., Radhakrishnan, R., Khan, A.L., Kim, M.J., Park, J.M., Kim, B.R., & Lee, I.J. (2014). Gibberellin secreting rhizobacterium, *Pseudomonas putida* H-2-3 modulates the hormonal and stress physiology of soybean to improve the plant growth under saline and drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 84, 15-124. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.09.001

Kloepper, J.W. (1993). Plant-growth-promoting rhizobacteria as biological control agents. In E.B. Metting (Eds.), *Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management* (pp. 255-274). New York: Marcel Dekker.

Kloepper, J.W., & Schroth, M. (1978). Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. In *Proceedings of the 4th international conference on plant pathogenic bacteria* (pp. 879-882). France: Angers. http://www.bashanfoundation.org/contributions/Kloepper-J/kloepperradish.pdf

Nadeem, S.M., Zahir, Z.A., Naveed, M., Asghar, H., & Arshad, M. (2010). Rhizobacteria capable of producing ACC deaminase may mitigate salt stress in wheat. *Soil Science Society of America Journal*, *74*(2), 533-542. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0240

Neal, A.L., & Ton, J. (2013). Systemic defense priming by *Pseudomonas putida* KT2440 in maize depends on benzoxazinoid exudation from the roots. *Plant signaling & behavior*, *8*(1), e22655. https://doi.org/10.4161/psb.22655

Patten, C.L., & Glick, B.R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*, *68*(8), 3795-3801. https://doi.org/10.1128/aem.68.8.3795-3801.2002

Patil, A. D. (2015). Alleviating salt stress in crop plants through salt tolerant microbes. *International Journal of Science and Research*, *4*(1), 1297-1302. https://www.ijsr. net/search_index_results_paperid.php?id=SUB15417

Pastor, N., Masciarelli, O., Fischer, S., Luna, V., & Rovera, M. (2016). Potential of *Pseudomonas putida* PCI2 for the protection of tomato plants against fungal pathogens. *Current Microbiology*, *73*(3), 346-353. https://doi.org/10.1007/s00284-016-1068-y

Paul, D., & Lade, H. (2014). Plant-growth-promoting rhizobacteria to improve crop growth in saline soils: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, *34*(4), 737-752. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0233-6

Ramadoss, D., Lakkineni, V.K., Bose, P., Ali, S., & Annapurna, K. (2013). Mitigation of salt stress in wheat seedlings by halotolerant bacteria isolated from saline habitats. *SpringerPlus*, *2*(1), 6. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-6

Richardson, A.E., Barea, J.M., McNeill, A.M., & Combaret, C.P. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 305-339. https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2

Rungin, S., Indananda, C., Suttiviriya, P., Kruasuwan, W., Jaemsaeng, R., & Thamchaipenet, A. (2012). Plant growth enhancing effects by a siderophore-producing endophytic streptomycete isolated from a Thai jasmine rice plant (*Oryza sativa* L. cv. KDML105). *Antonie van Leeuwenhoek*, *102*(3), 463-472. https://doi.org/10.1007/s10482-012-9778-z

Rütting, T., Aronsson, H., & Delin, S. (2018). Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *110*(1), 1-5. https://doi.org/10.1007/s10705-017-9900-8

Sadeghi, A., Karimi, E., Dahaji, P.A., Javid, Schwyn, B., & Neilands, J.B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophore. *Analytical Biochemistry*, *160*(1), 47-56. https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9

Srivastava, S., & Srivastava, S. (2020). Prescience of endogenous regulation in Arabidopsis thaliana by *Pseudomonas putida* MTCC 5279 under phosphate starved salinity stress condition. *Scientific Reports*, *10*(1), 5855. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62725-1

Vaishnav, A., Varma, A., Tuteja, N., & Choudhary, D.K. (2016). PGPR-Mediated amelioration of crops under salt stress. In D. K. Choudhary, A. Varma & N. Tuteja (Eds.), *Plant-Microbe Interaction: An approach to sustainable agriculture* (pp. 205-226). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2854-0_10

Wang, L., Fu, B., Chen, X., & Wang, W. (2018). Isolation and identification of *Pseudomonas putida* from *Medicago sativa* rhizosphere soil. *Bangladesh Journal of Botany*, *47*(3), 779-784. http://www.bdbotsociety.org/journal/journal_issue/2018%20September%20(Special)/27.pdf

Yan, K., Shao, H., Shao, C., Chen, P., Zhao, S., Brestic, M., & Chen, X. (2013). Physiologicaladaptive mechanisms of plants grown in saline soil and implications for sustainable saline agriculture in coastal zone. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 2867-2878. https://doi.org/10.1007/s11738-013-1325-7

Yan, J., Smith, M., Glick, B., Liang, Y. (2014). Effects of ACC deaminase containing rhizobacteria on plant growth and expression of Toc GTPases in tomato (*Solanum lycopersicum*) under salt stress. *Botany*, *92*(11), 775-781. https://doi.org/10.1139/cjb-2014-0038.

การส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชภายใต้สภาวะความเค็ม โดยแอคติโนมัยสีทที่คัดแยกจากมูลไส้เดือนดิน

Plant growth promoting activity under saline conditions by actinomycetes isolated from vermicast of earthworm

ทิราภรณ์ กนกฉันท์[1], จิราวรรณ สิทธิสวนจิก[1], เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์[2*], จันทรา อินทนนท์[3]
Tiraporn Kanokchan[1], Jirawan Sitisuanjik[1], Saethawat Chamsart[2*], Chantra Indananda[3]

Received: 22 July 2020 ; Revised: 13 August 2020 ; Accepted: 21 September 2020

บทคัดย่อ

แอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดิน นำมาจัดจำแนกสกุลโดยใช้ยีน *16S rRNA* พบว่า ลำดับนิวคลีโอไทด์มีค่าความคล้ายคลึงกับแอคติโนมัยสีทในสกุล *Streptomyces* จากนั้นตรวจสอบการเจริญภายใต้การเติมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ ตรวจสอบการผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา พบว่า สามารถเจริญได้ดีที่สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) และเจริญได้ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ โดยมีค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง161020 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 65.70 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ ไม่มีการผลิตฮอร์โมนออกซิน ผลิตไซเดอโรฟอร์ได้ดีที่สุดในสภาวะที่ไม่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวัดขนาดโซนสีส้มได้ 4.70 เซนติเมตร ผลิตเอนไซม์ ACC deaminase ได้ดีที่ 72 ชั่วโมง ในสภาวะที่ไม่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ และให้ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus cereus, Staphylococcus aureus* และเชื้อรา *Penicillium* sp. ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า สามารถนำแบคทีเรียแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ใช้ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชภายใต้สภาวะความเค็มและป้องกันพืชจากเชื้อก่อโรคได้

คำสำคัญ: แอคติโนมัยสีท แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช มูลไส้เดือนดิน สภาวะความเค็ม

Abstract

Actinomycetes BBUU157 isolated from the vermicast of earthworms was identified to genus level using the *16S rRNA* gene. The results showed that the nucleotide sequence was very similar to that of the genus *Streptomyces*. Growth of the organism under NaCl addition, production of plant growth-promoting agents, antibacterial and antifungal activities were tested. It could grow with 7% (w/v) NaCl and grew well in 800 and 1,000 mM NaCl solutions with a dry cell weight of 61.20 mg/ml and 65.70 mg/ml, respectively. There was no production of auxin hormones but it did produce a maximum siderophore when grown without NaCl. The orange zone size measured was 4.70 cm. It produced a maximum ACC deaminase at 72 hours in the absence of NaCl. It showed the actinomycetes's antagonistic activities against *B. cereus, S. aureus* and *Penicillium* sp. It was concluded that the actinomycetes isolate BBUU157 can promote plant growth under saline conditions and protect plants from phyto-pathogenic microorganisms.

Keywords: Actinomycetes, Plant growth promoting bacteria, Vermicast of earthworms, Saline conditions

---

[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาชีววิทยา คณะวทิยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวทิยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131
[3] อาจารย์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวทิยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131
[1] Master's Degree, Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand 20131
[2] Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand 20131
[3] Lecturer, Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand 20131
* Correspondent author: saethawa@buu.ac.th

บทนำ

ความเค็มส่งผลให้สภาวะแวดล้อมของดินไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้รากพืชไม่เจริญ และแร่ธาตุบางอย่างละลายออกมาจากดินจนเป็นพิษต่อพืช พืชแต่ละชนิดปรับตัวเข้ากับสภาพความเค็มได้ต่างกัน หากพืชปรับตัวไม่ได้พืชอาจจะตายได้ (วิชิตพล มีแก้ว และคณะ, 2553) มีการแก้ปัญหาโดยการใช้ปุ๋ยชีวภาพในการปรับปรุงดิน การเพิ่มแร่ธาตุอาหารในดิน การดัดแปลงปรับปรุงพันธุ์พืชให้มีความต้านทานต่อสภาวะดินเค็มได้ดีขึ้น และการประยุกต์ใช้วิธีทางธรรมชาติโดยการใช้แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant growth Promoting Bacteria, PGPB) เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการส่งเสริมและป้องกันพืชจากสภาวะความเครียดต่างๆ เช่น ความเค็ม เชื้อก่อโรคพืช รวมทั้งการใช้ปุ๋ยเคมีเร่งการเจริญเติบโตของพืช

ไส้เดือนดินถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อย่อยสลายอินทรียวัตถุอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ รวมถึงการแก้ปัญหาของเสียจากอุตสาหกรรมและสารอินทรีย์ (Hickman and Reid, 2009) ไส้เดือนดินสามารถย่อยและเปลี่ยนแปลงอินทรียวัตถุคุณภาพต่ำให้เป็นปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดินที่อุดมไปด้วยธาตุอาหาร โดยทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ในดิน (Dominguez *et al*., 2010 ; Goswami *et al*., 2014 ; (Singh *et al*., 2018) มูลไส้เดือนจะทำให้เกิดตะกอนอินทรีย์ทับถมในดิน ตะกอนอินทรีย์เหล่านี้จะช่วยเพิ่มการหมุนเวียนของธาตุอาหารในดินและปรับปรุงโครงสร้างของดิน (Singh *et al*., 2018) มูลไส้เดือนดินเป็นผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายอินทรียวัตถุต่างๆ ผ่านกระบวนการย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ของไส้เดือน (Huang *et al*., 2013) ซึ่งจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ เอนไซม์ จุลินทรีย์ และฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Singh *et al*., 2018) พบการรายงานเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในมูลไส้เดือนดิน เช่น จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจน จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต (Gopal *et al*., 2009) แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Pathma and Sakthivel, 2012) แบคทีเรียต้านเชื้อรา (Yasir *et al*., 2009 ; Pathma and Sakthivel, 2012) และแบคทีเรียผลิตเอนไซม์ (Pathma and Sakthivel, 2012 ; Singh *et al*., 2015) ความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่กล่าวมานี้ ช่วยปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและต้านทานเชื้อก่อโรคในดิน (Chaoui *et al*., 2003 ; Arancon *et al*., 2005 ; Pathma and Sakthivel, 2012) มีการรายงานการพบแอคติโนมัยสีทในสกุล *Streptomyces* ในมูลไส้เดือนดิน (Parthasarathi *et al*., 2007 ; Gopalakrishnan *et al*., 2011 ; Pathma and Sakthivel, 2012 ; Singh *et al*., 2015) ซึ่งเป็นสกุลที่มีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง และพบมากที่สุดในดินทุกประเภท (Kämpfer, 2012) และมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช *Streptomyces* ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดิน สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยการผลิตไซเดอโรฟอร์ โดยสารกลุ่มนี้ช่วยพืชทนทานต่อโรค ผลิตฮอร์โมนออกซิน (auxin) ซึ่งเป็นฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโต และการละลายฟอสเฟต (Gopalakrishnan *et al*., 2011 ; Gopalakrishnan *et al*., 2014 ; Singh *et al*., 2015) ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช การผลิตฮอร์โมนออกซิน ซเดอโร-ฟอร์ และเอนไซม์ 1-amino-cyclopropane-1-carboxylate (ACC) ของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดิน

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตัวอย่างแบคทีเรีย

นำแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่คัดแยกไว้แล้วจากมูลไส้เดือนดิน (จากศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดฉะเชิงเทรา) โดยเก็บรักษาไว้ในหน่วยวิจัยแอคติโนแบคทีเรีย ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี มาตรวจสอบความบริสุทธิ์บนอาหารแข็งสูตร MS

การจัดจำแนกโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

นำแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 มาศึกษาลักษณะของเส้นใยใต้ผิวอาหาร เส้นใยเหนือผิวอาหาร สีสปอร์ และรงควัตถุ บนอาหาร International *Streptomyces* Project (ISP) ได้แก่ Yeast Extract-Malt Extract Agar (ISP2), Oatmeal Agar (ISP3), Inorganic Salts-Starch Aga (ISP44) และ Glycerol-Asparagine Agar (ISP5) (Shirling and Gottlieb, 1966) โดยบ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ เปรียบเทียบสีกับ Color Harmony Manual (Jacobson *et al*., 1958) และศึกษาลักษณะของสปอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การจัดจำแนกโดยการวิเคราะห์ยีน *16S rRNA* และสร้างแผนภูมิวิวัฒนาการชาติพันธุ์

เพาะเลี้ยงแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ในอาหารเหลวสูตร YD (Yeast extract D-glucose) จนกระทั่งเจริญดี นำเซลล์ที่ได้มาสกัดดีเอ็นเอใน lysozyme solution ปริมาตร 500 ไมโครลิตร และบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติม 2% SDS ปริมาตร 250 ไมโครลิตร และ Phenol-chloroform (25 phenol: 24 chloroform: 1 isoamyl alcohol) ปริมาตร 250 ไมโครลิตร นำไปปั่นเหวี่ยง ที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที สารละลายที่ได้ จะถูกตกตะกอนดีเอ็นเอ ด้วย 3 โมลาร์ sodium acetate pH8 ปริมาตร 0.1 เท่าของดีเอ็นเอ และ Isopropanol ปริมาตร 1 เท่าของดีเอ็นเอ จากนั้นล้างตะกอนดีเอ็นเอด้วย 70% EtOH

และปล่อยดีเอ็นเอให้แห้ง แล้วจึงละลายตะกอนดีเอ็นเอด้วยบัฟเฟอร์ 1X TE นำไปตรวจสอบดีเอ็นเอด้วยวิธี Agarose gel electrophoresis และย้อมด้วย Ethidium bromide แล้วตรวจสอบดีเอ็นเอภายใต้ UV illumination

การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอส่วนของยีน *16S rRNA* โดยวิธี PCR ใช้ไพรเมอร์ STR1F (5'-TCACGGAGAGTTT-GATCCTG-3') และ STR1530R (5'-AAGGAGATCCAGC-CGCA-3') (Kataoka *et al*., 1997) ปฏิกิริยา PCR ถูกทำที่: 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และ 72 องศาเซลเซียส 1 นาที และรอบสุดท้ายที่ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที โดยทำ 35 รอบ นำผลิตภัณฑ์ PCR ที่ได้ไปทำให้บริสุทธิ์โดย QIAquick PCR Purification Kit (QIAGEN, Germany) และส่งไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริษัท First Base Laboratories Sdn Bhd ประเทศมาเลเซีย จากนั้นนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้ไปเปรียบเทียบค่าความคล้ายคลึงกับลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูล EZbiocloud (https://www.ezbiocloud.net/identify) และสร้างแผนภูมิวิวัฒนาการชาติพันธุ์ในโปรแกรม MEGA โดยใช้วิธี Neighbour-Joining Method (Saitou and Nei,987) 20Maximum likelihood และ Maximum parsimony วิเคราะห์ Bootstrap 1,000 ครั้ง คำนวณระยะห่างระหว่างลำดับเบสโดยใช้ Kimura two-parameter (K2P) (Kimura, 1980)

การเจริญเติบโตบนสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

นำแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่เจริญบนอาหารแข็งสูตร MS มาศึกษาการเจริญเติบโตบนอาหารแข็งสูตร YD agar ที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอ-ไรด์ ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7% (w/v) บ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์

การเจริญเติบโตในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์[22]

เจือจางเซลล์แอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ให้อยู่ในช่วง 10^{-1}-10^{-6} ดูดเซลล์แขวนลอยแต่ละระดับการเจือจาง ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เกลี่ยลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็งสูตร YD แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ นับจำนวนโคโลนี เพื่อเลือกระดับการเจือจางที่เหมาะสม จากนั้นนำเซลล์ที่ระดับการเจือจางที่เหมาะสม มาล้างเซลล์ด้วย 0.9% normal saline solution จนสะอาด แล้วจึงดูดเซลล์แขวนลอย ปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) (Sadeghi *et al*., 2012) นำหลอดทดลองไปเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นกรองเซลล์ด้วยกระดาษกรอง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง

การผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

การผลิตฮอร์โมนออกซิน

ดูดเซลล์แขวนลอยของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่เจริญในอาหารเหลวสูตร YD ปริมาตร 1,000 ไมโครลิตร มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร YD ที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ และมี L-tryptophan (0.2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นตรวจสอบการผลิตฮอร์โมนออกซิน (Patten and Glick, 2002) ด้วย Salkowski reagent และวัดปริมาณการผลิตฮอร์โมนออกซินด้วย spectrophotometer สร้างกราฟมาตรฐานของ การผลิตฮอร์โมนออกซินเพื่อใช้เปรียบเทียบ

การผลิตเอนไซม์ ACC deaminase

นำแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่เจริญในอาหารแข็งสูตร MS มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Minimal Medium ที่ไม่มีสารเคมี $(NH_4)_2SO_4$ และไม่มี ACC อาหารเหลวสูตร Minimal Medium ที่มี $(NH_4)_2SO_4$ และอาหารเหลวสูตร Minimal Medium ที่มี ACC บ่มในที่มืดบนเครื่องเขย่าที่ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นตรวจสอบการมียีน ACC deaminase (*acdS*) ซึ่งเป็นยีนควบคุมการผลิตเอนไซม์ ACC deaminase ตรวจสอบด้วยวิธี PCR โดยใช้ Degenerate Primer ATT082F และ ATT082R (Indanand 2013)24 และตรวจสอบการผลิตเอนไซม์ ACC deaminase (Penrose and Glick, 2003) โดยเลี้ยงแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ในอาหารเหลวสูตร YD บ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ล้างเซลล์ด้วย 0.1 โมลาร์ Tris-HCl (pH 8.5) และเลี้ยงต่อในอาหารเหลวสูตร Minimal Medium ที่มี ACC ปริมาตร 0.3 มิลลิโมลาร์ และที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) บ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง ดูดส่วนใส ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เติม ACC ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หยุดการทำงานของเอนไซม์ด้วยสารละลาย HCL ความเข้มข้น 0.56 โมลาร์ ปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร และ 0.1%

(w/v) 2,4-dinitrophenylhydrazine (ที่ละลายใน HCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์) ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และเติม NaOH ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน α-ketobutyrate

การผลิตสารไซเดอโรฟอร์

ตรวจสอบการผลิตสารไซเดอโรฟอร์ในอาหารสูตร Chrome Azurol S (CAS) agar (Schwyn and Neilands, 1987) ตัดชิ้นวุ้นที่มีแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 เจริญอยู่บนอาหารแข็งสูตร MS ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นวุ้นไปวางบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็งสูตร CAS ที่ผสมเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) แล้วนำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ หากมีการผลิตสารไซเดอโรฟอร์ จะปรากฏฮาโลโซนรอบๆ โคโลนีเป็นสีส้ม

การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียมเชื้อแบคทีเรียทดสอบ

นำเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *S. aureus* มาเลี้ยงบนอาหารแข็ง NA บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เลือกโคโลนีลงในอาหารเหลว Nutrient Broth (NB) บ่มที่อุณหภูมิห้องบนเครื่องเขย่าที่ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเชื้อที่ได้มาเจือจางให้มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นเท่ากับสารละลายมาตรฐาน McFarland No.0.5 (1.5×10^8 CFU/ml) โดยวัดความขุ่นที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร ให้ได้ค่าเท่ากับ 0.08

การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Agar Disc Diffusion

เตรียมอาหารแข็ง NA ในจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียทดสอบแต่ละชนิดที่ปรับความขุ่นไว้ เกลี่ยให้ทั่วบนผิวอาหาร NA จากนั้นตัดชิ้นวุ้นของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 บริเวณที่เชื้อเจริญหนาแน่น (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร) ไปวางในจานเพาะเชื้อที่เกลี่ยด้วยเชื้อแบคทีเรียทดสอบ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) นำจานเพาะเชื้อ ไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้ง (Inhibition zone)

การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อรา

นำเชื้อรา *Aspergillus* sp., *Pennicillium* sp. และ *Fusarium* sp. เลี้ยงบนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) บ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ตัดชิ้นวุ้น บริเวณที่เชื้อราเจริญหนาแน่น (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร) นำไปวางตรงกลางในจานเพาะเชื้อ และนำชิ้นวุ้นของแอคติโนมัยสีท (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร) วางด้านตรงข้าม 2 ชิ้นให้มีระยะห่างระหว่างเชื้อราและแอคติโนมัยสีท 3 เซนติเมตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) แล้วนำจานเพาะเชื้อ ไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ และวัดบริเวณยับยั้ง (%) โดยวัดได้จาก C-T/C x 100 เมื่อ C คือ การเจริญของโคโลนีในชุดควบคุม และ T คือ การเจริญของโคโลนีในชุดทดสอบ

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ผลการวิเคราะห์ ANOVA และ Tukey's multiple ในโปรแกรม Minitab 17 และนำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (คำนวณได้จากทดลอง 3 ซ้ำ) ที่ระดับนัยสำคัญ $P<0.05$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

การจัดจำแนกโดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

แอคติโนมัยสีทส่วนใหญ่ผลิตเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยใต้ผิวอาหารและเส้นใยเหนือผิวอาหาร หรืออาจผลิตเฉพาะเส้นใยใต้ผิวอาหารอย่างเดียว เมื่อเส้นใยเกิดการรวมตัวทำให้เส้นใยมีความหนาแน่นเกิดเป็นโคโลนี จากนั้นเส้นใยจะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นสปอร์ (Barka *et al*., 2016) โคโลนีของแอคติโนมัยสีทมีสีที่แตกต่างกันออกไป เช่น สีขาว สีเหลือง สีส้ม สีแดง สีม่วง สีเขียว สีน้ำเงิน สีน้ำตาล และสีดำ (รัตนาภรณ์ ศรีวิบูลย์, 2548) และจะผลิตรงควัตถุ ซึ่งอาจเป็นสีแดง สีเหลือง สีส้ม สีชมพู สีน้ำตาล สีน้ำเงิน หรือสีดำ ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย อาหารที่ใช้เลี้ยง และจำนวนวันเวลาที่เลี้ยง (Barka *et al*., 2016) จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 โดยศึกษาเส้นใยใต้ผิวอาหาร เส้นใยเหนือผิวอาหาร สีสปอร์ และสีรงควัตถุ บนอาหาร ISP2, ISP3, ISP4 และ ISP5 ผลแสดงดัง Table 1 และสปอร์มีลักษณะเป็นรูปท่อนสั้นๆ เรียงตัวเป็นเส้นยาว (Rectiflexibiles) ผิวสปอร์เรียบ ขนาดประมาณ 0.9-1 ไมโครเมตร (Figure 1)

Table 1. Morphological characteristics of the isolate BBUU157

ISP	Aerial mycelium	Substrate mycelium	Spores	Soluble pigment
ISP2	white	apricot	grey	grey
ISP3	grey	thistle	grey	grey
ISP4	red-violet	purple	grey	grey
ISP5	heliotrope	purple	-	-

- indicates no production

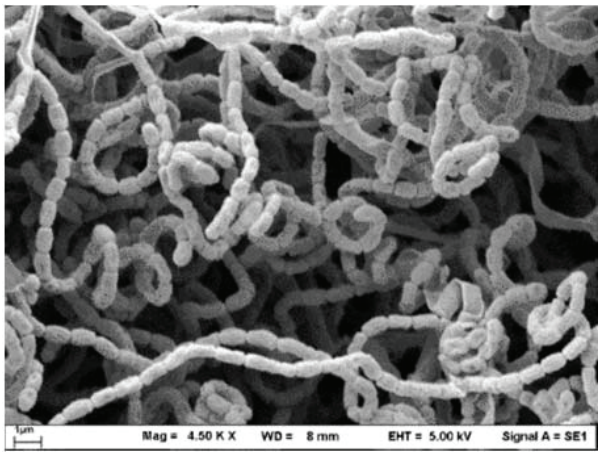


Figure 1. Scanning electron micrograph of BBUU157 cultured on ISP3 medium at 28 °C for 28 days

การจัดจำแนกโดยการวิเคราะห์ยีน *16S rRNA* และสร้างแผนภูมิวิวัฒนาการชาติพันธุ์

จากการสกัด DNA และเพิ่มปริมาณยีน *16S rRNA* ของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า ลำดับนิวคลีโอไทด์มีขนาด 780 นิวคลีโอไทด์ และเมื่อนำลำดับนิวคลีโอไทด์ไปเปรียบเทียบกับลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูล EZbiocloud พบว่า มีค่าความคล้ายคลึงมากกับแอคติโนมัยสีทในสกุล *Streptomyces* (Figure 2) ซึ่งเป็นสกุลที่มีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง โดยพบมากที่สุดในดินทุกประเภท (Kämpfer, 2012) และสามารถพบได้ในมูลไส้เดือน (Parthasarathi *et al*., 2007 ; Pathma and Sakthivel, 2012 ; Singh *et al*., 2015)

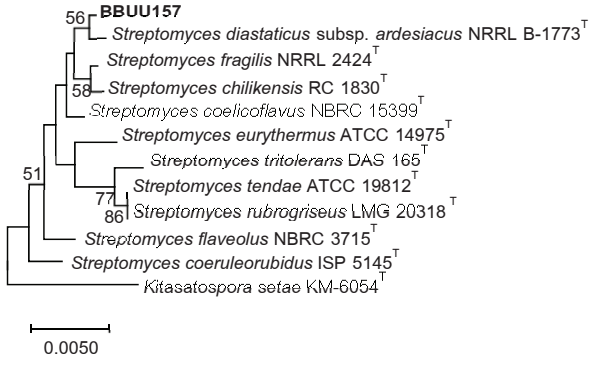


Figure 2. Neighbour-joining tree, based on *16S rRNA* gene sequencing, showing the position of BBUU157 and closely related species of the genus *Streptomyces*. *Kitasatospora setae* KM-6054^T was used as the outgroup.

การเจริญเติบโตบนอาหารที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

จากการศึกษาการเจริญเติบโตในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า สามารถเจริญได้สูงสุดที่สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) (Figure 3) (Gopalakrishnan *et al*., 2014) รายงานว่า *Streptomyces* สามารถเจริญได้ที่ความเข้มข้นเกลือโซเดียมคลอไรด์ 12% (w/v)

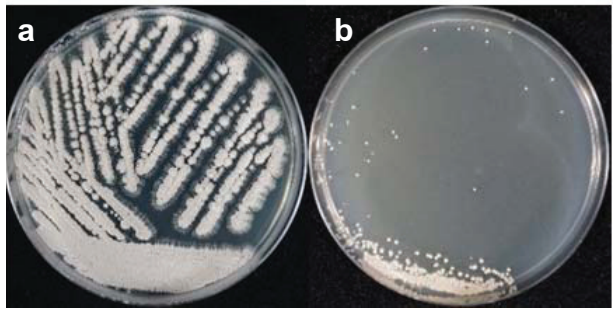


Figure 3. Growth in NaCl (a) no sodium chloride and (b) concentration of NaCl at 7% (w/v)

การเจริญเติบโตในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

จากการศึกษาการเจริญของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เซลล์เริ่มต้นที่ระดับการเจือจางที่ 10^{-3} (1.4 X 10^6 CFU/ml) พบว่าสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ มีค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง 65.70 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร (Figure 4) (Sadeghi *et al*., 2012) รายงานว่า *Streptomyces* ไอโซเลต C เจริญเติบโตได้ดีในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงเกิน 300 มิลลิโมลาร์

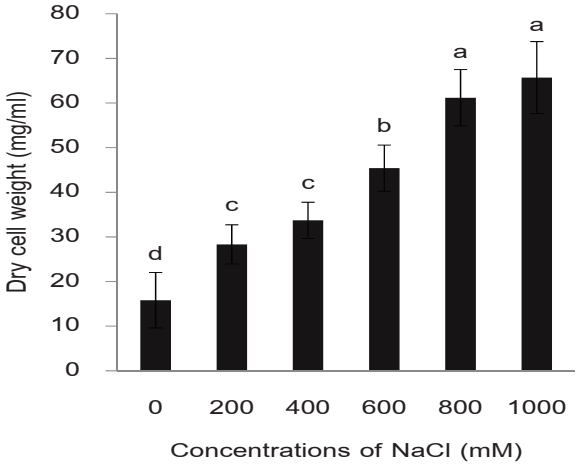


Figure 4. Growth in NaCl 0-1,000 mM of BBUU157

จากอักษร a, b, c และ d อักษรต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*P<0.05*)

การผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

การผลิตฮอร์โมนออกซิน

จากการตรวจสอบการผลิตฮอร์โมนออกซินของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า ตรวจไม่พบการผลิตฮอร์โมนออกซิน

การผลิตสารไซเดอโรฟอร์

จากการตรวจสอบการผลิตสารไซเดอโรฟอร์ของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า สามารถผลิตสารไซเดอโรฟอร์ได้ดีที่สุดในสภาวะที่ไม่มีเกลือโซเดียม-คลอไรด์ โดยวัดขนาดโซนสีส้มได้ 4.70 ± 0.10 เซนติเมตร (Figure 5) และจะผลิตสารไซเดอโรฟอร์ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น (Figure 6) Argandona *et al*. (2010) รายงานว่า *Chromohalobacter salexigens* ผลิตสารไซเดอโรฟอร์ได้ดีที่สุดในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่ำสุด และจะผลิตได้ลดลงเมื่อความเข้มข้นสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้น และ Gopalakrishnan *et al*. (2014) รายงานว่า *Streptomyces* ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดิน (*Eisenia foetida*) สามารถผลิตสารไซเดอโรฟอร์ และช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในข้าวสายพันธุ์ Sampada ในประเทศอินเดีย โดยจะช่วยเพิ่มในส่วนของ ความยาวต้นข้าว จำนวนเมล็ดที่งอก น้ำหนักของเมล็ด จำนวนราก ความยาวรากและน้ำหนักแห้งราก เป็นต้น

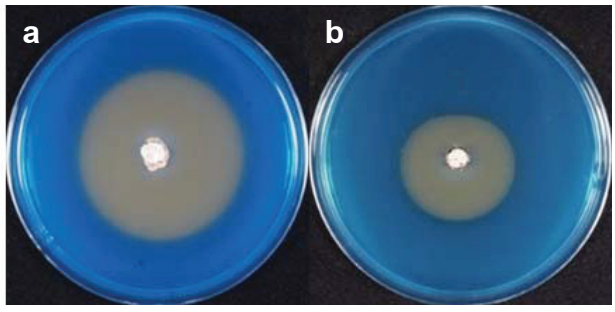


Figure 5. Siderophore production of BBUU157 on CAS agar (a) no NaCl and (b) concentration of NaCl 1,000 mM

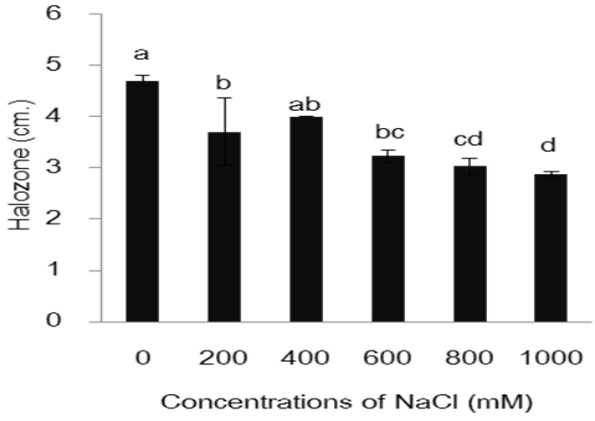


Figure 6. Siderophore production of BBUU157 in NaCl 0-1,000 mM

จากอักษร a, b, c และ d อักษรต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*P<0.05*)

การผลิตเอนไซม์ ACC deaminase

จากการตรวจสอบการมียีน *acdS* ของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณชิ้นยีน *acdS* ได้และเป็นแถบเดียว มีขนาดความยาวประมาณ 600 นิวคลีโอไทด์ (Figure 7) และสามารถผลิตเอนไซม์ ACC deaminase ได้ดีที่สุด ที่เวลา 72 ชั่วโมง (Figure 8) ในความเข้มข้นที่ไม่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Figure 9) ซึ่งแบคทีเรียที่สามารถผลิต ACC deaminase ได้ จะช่วยให้พืชทนทานต่อสภาวะเครียดต่างๆ เช่น ดินเค็ม และยังมีคุณสมบัติไปลดปริมาณฮอร์โมน เอทิลีน (ethylene) ในพืช ทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโตได้ Gopalakrishnan *et al*. (2014) รายงานว่า *Streptomyces* ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดิน (*Eisenia foetida*) สามารถผลิตสารไซเดอโรฟอร์ และช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในข้าวสายพันธุ์ Sampada ในประเทศอินเดีย โดยจะช่วยเพิ่มในส่วนของ ความยาวต้นข้าว จำนวนเมล็ดที่งอก น้ำหนักของเมล็ด จำนวนราก ความยาวรากและน้ำหนักแห้งราก เป็นต้น

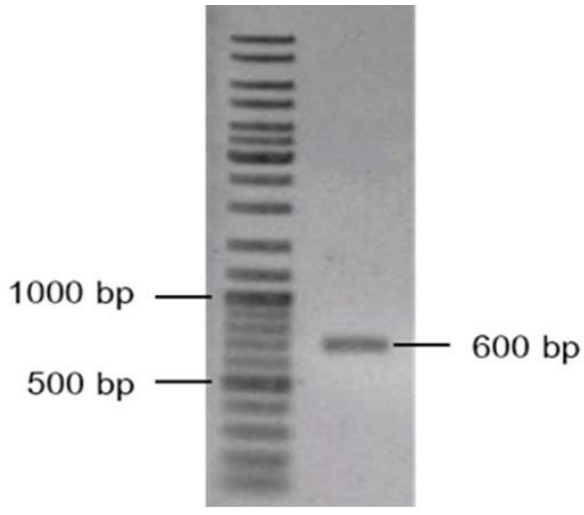


Figure 7. *acdS* gene fragments has a length of 600 nucleotides of BBUU157

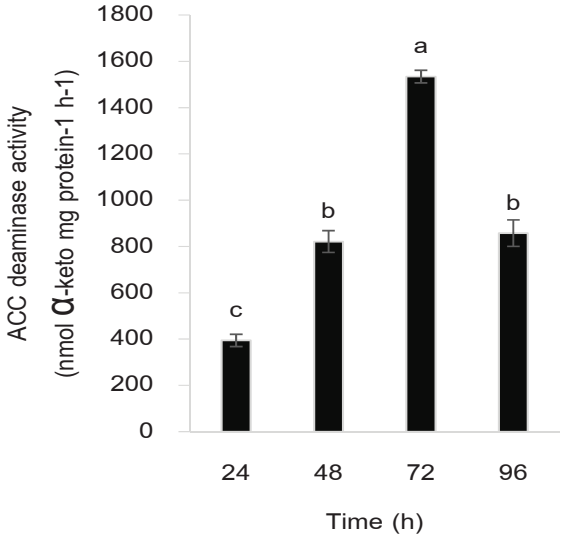


Figure 8. ACC deaminase production of BBUU157 at 24, 48, 72 and 96 h

จากอักษร a, b และ c อักษรต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*P<0.05*)

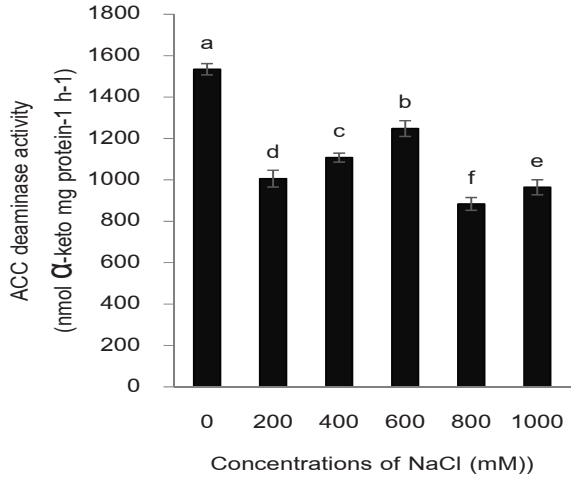


Figure 9. ACC deaminase production at 72 h in NaCl 0-1,000 mM of BBUU157

จากอักษร a, b, c, d, e และ f อักษรต่างกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (*P<0.05*)

การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* (1.03 ± 0.12 เซนติเมตร) และมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* (0.53 ± 0.06 เซนติเมตร) (Figure 10) Kruasuwan and Thamchaipenet (2016) รายงานว่า *Streptomyces* มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* ATCC 1178, *E. coli* ATCC 8739 และ *S. aureus* เช่นเดียวกับ Shaik *et al*. (2017) รายงานว่า *Streptomyces* มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* NCIM-2063 และ *E. coli* NCIM-2065

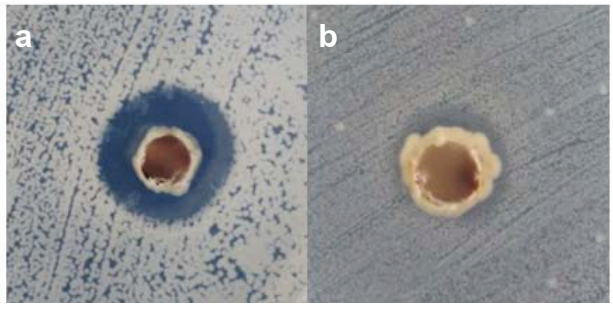


Figure 10. Antibacterial activity of BBUU157 (a) *B. cereus* and (b) *S. aureus*

การทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อรา

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อราของแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 พบว่า มีฤทธิ์ต้านเชื้อราเพียงชนิดเดียวคือเชื้อรา *Penicillium* sp. (36.5 ± 0.5 %) (Figure 11) Kruasuwan and Thamchaipenet (20160 รายงานว่า *Streptomyces* มีฤทธิ์ต้านเชื้อรา *Aspergillus niger* ATCC 6275 และเชื้อรา *Fusarium moniliforme* DOAC 1224 เช่นเดียวกับ Khamna *et al*. (2009) รายงานว่า *Streptomyces* มีฤทธิ์ต้านเชื้อรา *Fusarium oxysporum* และเชื้อรา *Penicillium digitatu*

Figure 11. Antifungal activity of BBUU157 (a) control and (b) BBUU157+*Penicillium* sp.

สรุปผลการวิจัย

จากการนำแอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 ที่คัดแยกได้จากมูลไส้เดือนดินที่เก็บรักษาไว้ในหน่วยวิจัยแอคติโนแบคทีเรีย ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา พบว่า มีความคล้ายคลึงกับแอคติโนมัยสีทในสกุล *Streptomyces* และสามารถเจริญได้มากสุดในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 7% (w/v) และเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 800 และ 1,000 มิลลิโมลาร์ โดยมีค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง 61.20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 65.70 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ ไม่มีการผลิตฮอร์โมนออกซิน แต่มีการผลิตไซเดอโรฟอร์ และผลิตเอนไซม์ ACC deaminase โดยผลิตไซเดอโรฟอร์ได้ดีที่สุดในสภาวะที่ไม่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวัดขนาดโซนสีส้มได้ 4.70 เซนติเมตร และผลิตเอนไซม์ ACC deaminase ได้ดีที่สุดที่เวลา 72 ชั่วโมง ในสภาวะที่ไม่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ แอคติโนมัยสีทไอโซเลต BBUU157 นี้ มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* แบคทีเรีย *S. aureus* และมีฤทธิ์ต้านเชื้อรา *Penicillium* sp. จากผลการศึกษานี้ สามารถนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชในระบบการทำเกษตรอินทรีย์ให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเคมีสังเคราะห์หรือสารพิษตกค้างในพืชผล และยังปกป้องพืชจากเชื้อที่ก่อโรคได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ทุนการศึกษาบางส่วนกับผู้วิจัยแรก นางสาวทิราภรณ์ กนกฉันท์

เอกสารอ้างอิง

วิชิตพล มีแก้ว ณัฐพล ขันธปราบ และสุรศักดิ์ ละลอกน้ำ. (2553). *การปรับตัวของพืชภายใต้สภาวะที่มีความเค็ม*. *ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์* 10(2), 28-37.

รัตนาภรณ์ ศรีวิบูลย์. (2548). *แอคติโนมัยสีท (Actinomycete)*. ชลบุรี: สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา.

Hickman, Z.A. and Reid, B.J. (2009). Earthworm assisted bioremediation of organic contaminant. *Environment International,* 34, 1072-1081.

Domínguez, J., Aira, M. and Gómez-Brandón M. (2010). Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes. In: Insam, H., Franke-Whittle, I., Goberna, M. (Eds.), Microbes at Work: From Wastes to Resources. Berlin Heidelberg: *Springer,* 93-114.

Goswami, L., Sarkar, S., Mukherjee, S., Das, S., Barman, S., Raul, P., Bhattacharyya, P., Mandal, N.C., Bhattacharya, S. and Bhattacharya, S.S. (2014). Vermicomposting of Tea Factory Coal Ash: Metal accumulation and metallothionein response in *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg), *Bioresource Technology* ; 166, 96-102.

Singh, J., Singh, S., Vig, A.P., Bhat, S.A., Hundal, S.S., Yin, R. and Schädler, M. (2018). Conventional farming reduces the activity of earthworms: Assessment of genotoxicity test of soil and vermicast, *Agriculture and Natural Resources* ; 52(4), 366-370.

Huang, K., Li, F., Wei, Y., Chen, X. an, Fu, X. (2013). Changes of bacterial and fungal community compositions during vermicomposting of vegetable wastes by *Eisenia foetida*, *Bioresource Technology*, 150, 235-241.

Gopa, M., Gupta, A., Sunil, E. an, Thomas, G.V. (2009). Amplification of plant beneficial microbial communities during conversion of coconut leaf substrate to vermicompost by *Eudrilus* sp., *Current Microbiolog*, 59(1), 15-20.

Pathma, J. an, Sakthivel, N. (2012). Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential, *SpringerPlus*, 1(26), 1-19.

Yasir, M., Aslam, Z., Song, G.C., Bibi, F., Jeon, C.O, and Chung, Y.R. (2009). *Chitinophaga vermicomposti* sp. nov., with antifungal activity, isolated from vermicompost, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 60(1), 268.

Singh, S.P., Gupta, R., Gaur, R. an, Srivastava, A.K. (2015). Antagonistic actinomycetes mediatedresistance in *Solanum lycopersicon* Mill. Against *Rhizoctonia solani* Kühn, Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: *Biological Sciences*5 87(3): 789-798.

Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Metzger, J.D. an, Lucht, C. (2005). Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field, *Pedobiologi* ; 49(4): 297-306.

Chaoui, H.I., Zibilske, L.M. an, Ohno, T. (2003). *Effects* of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability, *Soil Biology and Biochemistry* ; 35, 295-302.

Parthasarathi, K., Ranganathan, L.S., Anandi, V. and Zeyer, J. (2007*).* Diversity of microflora in the gut and casts of tropical composting earthworms reared on different substrates, *Journal of Environmental Biology*, 28(1), 87-97.

Gopalakrishnan, S., Pande, S., Sharma, M., Humayun, P., Kiran, B.K., Sandeep, D., Vidya, M.S., Deepthi, K. and Rupela, O. (2011). *Evaluation* of actinomycete isolates obtained from herbal vermicompost for the biological control of *Fusarium* wilt of chickpea, *Crop Protectio*, 30(8), 1070-1078.

Kämpfer, P. (2012). *Genus Streptomyces*. In Goodfellow, M., Kämpfer, P., Busse, H.J., Trujillo, M.E., Suzuki, K.-i., Ludwig, W. and Whitman, W.B., (Eds.). New York: *Springe2*.

Gopalakrishnan, S., Vadlamudi, S., Bandikinda, P., Sathya, A., Vijayabharathi, R., Rupela, O., Kudapa, H., Katta, K. and Varshney R.K. (2014). Evaluation of *Streptomyces* strains isolated from herbal vermicompost for their plant growth-promotion traits in rice, *Microbiological Research,* 169(1), 40-48.

Shirling, E.B. and Gottlieb, D. (1966). Methods for characterization of *Streptomyces* species1. *International journal of systematic bacteriology*6, 16(3), 313-340.

Jacobson, E., Granville. W.C. and Foss, C.E. (1958). Color Harmony Manual, 4th edn. Chicago: Container Corporation of Americ8.

Kataoka, M., Ueda, K., Kudo, T., Seki, T. and Yoshida, T. (1997). Application of the variable region in 16S rDNA to create an index for rapid species identification in the genus *Streptomyces, FEMS Microbiology Letters,* 151, 249-255.

Saitou, N. an, Nei, M. (1987). *The* neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees, *Molecular Biology and Evolution*, 4, 406-425.

Kimura, M.A. (1980). simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences, *Journal of Molecular Evolution*, 16, 111-120.

Sadeghi, A., Karimi, E., Dahaji, P.A., Javid, M.G., Dalvand, Y. and Askari, H. (2012). Plant growth promoting activity of an auxin and siderophore producing isolate of *Streptomyces* under saline soil conditions, *World Journal of Microbiology and Biotechnology,* 28(4), 1503-1509.

Patten, C.L. and Glick, B.R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system, Applied and Environmental Microbiology, 68, 3795-3801.

Indananda, C. (2013). *Characterization and Identifica tion of Novel Taxa, Plant Growth Promoting Properties and New Compound from Endophytic Actinomycetes*. Doctoral Dissertation, Doctor of Philosophy Genetics, Department of Genetics, Graduate School, Kasetsart University.

Penrose, D.M. and Glick, B.R. (2003). Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria, *Physiologia Plantarum*, 118(1), 10-5.

Schwyn, B. and Neilands, J.B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophore, *Analytical Biochemistry,* 160, 47-56.

Barka, E.A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Meier-Kolthoff, J.P., Clement, C., Ouhdouch, Y. and Van-Wezel, G.P. (2016). Taxonomy, physiology, and natural products of actinobacteria, *Microbiology and Molecular Biology Reviews,* 80(1), 1-43.

Argandona, M., Nieto, J.J., Iglesias-Guerra, F., Calderon, M.I., Garcia-Estepa, R. and Vargas, C. (2010). Interplay between iron homeostasis and the osmotic stress response in the halophilic bacterium *Chromohalobacter salexigens*, *Applied and environmental microbiologo*, 76(11), 3575-3589.

Kruasuwan, W. and Thamchaipenet, A. (2016). Diversity of culturable plant growth-promoting bacterial endophytes associated with sugarcane roots and their effect of growth by co-inoculation of Ddazotrophs and actinomycetes, *Journal of Plant Growth Regulati,* 6(3), 1074-1087.

Shaik, M., Girija-Sankar, G., Iswarya, M. and Rajitha, P. (2017). Isolation and characterization of bioactive metabolites producing marine *Streptomyces parvulus* strain sankarensis-A10, *Journal of Genetic Engineering and Biotechnolog,* 15(1), 87-94.

Khamna, S., Yokota, A. and Lumyong, S. (2009). Actinomycetes isolated from medicinal plant rhizosphere soils: diversity and screening of antifungal compounds, indole-3-acetic acid and siderophore production, *World Journal of Microbiology and Biotechnolog,* 2, 649-655.

การวิเคราะห์หาค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการยืนยันตัวตนผ่านม่านตา
Finding of suitable and secure threshold value for an iris authentication

วิชริณี สวัสดี[1], ณรงค์ฤทธิ์ วังคีรี[2]
Vicharinee Sawasdee[1], Narongrit Wangkeeree[2]

Received: 4 February 2019 ; Revised: 7 June 2019 ; Accepted: 2 October 2020

บทคัดย่อ

การยืนยันตัวตนเป็นกระบวนการเบื้องต้นของการรักษาความปลอดภัยทางเทคโนโลยีสารสนเทศ ซึ่งปัจจุบันระบบ Biometric นิยมนำมาใช้เพื่อการยืนยันตัวตน โดย Biometric ในส่วนของม่านตาถือว่ามีความปลอดภัยสูง อย่างไรก็ตามค่า Threshold ซึ่งเป็นเกณฑ์เพื่อการยืนยันตัวตน ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาอย่างละเอียด โดยค่า Threshold คือค่าที่กำหนดจากจำนวนเปอร์เซ็นที่ยอมรับของค่าที่ถูกต้องหรือที่ตรงกันระหว่าง Iris ที่อยู่ในฐานข้อมูลกับ Iris ที่นำมายืนยันตัวตน ดังนั้นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการวิเคราะห์หาค่า Threshold ที่เหมาะสมและปลอดภัย เพื่อการยืนยันตัวตนจากม่านตา โดยการตรวจสอบภาพดวงตาใช้เทคนิค Circle Hough Transform และภาพดวงตาที่ใช้ในงานวิจัยมาจาก CASIA V.4 และในส่วนของการวัดประสิทธิภาพได้แก่ ค่าถูกต้องของการยอมรับม่านตาที่ถูกต้อง Genuine Acceptance Rate (GAR), ค่าผิดพลาดของจากการยอมรับม่านตาที่ถูกต้อง False Non-Match Rate (FMRMR) และค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจากม่านตาไม่ถูกต้อง False Match Rate (FMR) ผลการวิจัย พบว่าค่า Threshold 72.9246 เปอร์เซ็นต์มีค่า GAR 77.50, FMRMR 22.50 และ FMR 1.00 ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมและปลอดภัย

คำสำคัญ: การยืนยันตัวตน ม่านตา ค่า Threshold Circle Hough Transform

Abstract

Authentication is the first line of defense of any information technology system. One of the popular methods used today is biometric, and iris authentication is gaining popularity. However, the threshold value that is deemed to be secure and appropriate has not been thoroughly studied. The threshold is a value that defines the acceptable amount of the correct bits of the image before securely passing the authentication process. Therefore, the main aim of this research was to find a secure and suitable threshold value used in iris authentication system, where iris localization was done by using Circle Hough Transform technique. Iris image databases v.4 from the CASIA were used in this research. The way to find the appropriate threshold was to test for the right balance of the GAR, FMRMR and FMR values when trying to verify the person's identity. The results of the test revealed that the appropriate threshold had the value of 72.9246 percent of all the available bits of the iris image. Both had GAR 77.50, FMRMR 22.50 and FMR 1.00 values. It can be concluded that the obtained threshold value was suitable and secure.

Keywords: Authentication, Iris, Attacks, Threshold Value, Circle Hough Transform

[1] สาขาระบบสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
[2] ศูนย์ไซเบอร์ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย
[1] Information System, Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi Campus, Vicharinee_sa@rmutto.ac.th
[2] Cyber Security Center, Royal Thai Armed Forces Headquarter, narongritptu@gmail.com

บทนำ

การยืนยันตัวตน (Authentication) และการระบุตัวตน (Identity) ในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปหน้า ลายนิ้วมือ ลักษณะมือ และม่านตา (Shay *et al*., 2010 ; Leng and Zhang, 2011 ; Darwaish *et al*., 2014) และลักษณะพฤติกรรม เช่น ลายเซ็น การเดิน การกดแป้นพิมพ์ เสียงพูด (Garg *et al*., 2012 ; Nandakumar, 2007 ; Nagar *et al*., 2016) ซึ่งระบบ Biometric สามารถใช้ในการยืนยันตัวตนและระบุตัวตนได้อย่างปลอดภัยมากกว่าการใช้รหัสผ่าน ซึ่งอาจลืม สูญหายและถูกขโมยได้ (Jorgensen and Yu, 2011 ; Miyazawa *et al*., 2008) โดยม่านตา (Iris) เป็นระบบ Biometric ที่นิยมและมีความปลอดภัยสูง (Verma *et al*., 2012 ; Jan *et al*., 2013a ; Jan *et al*., 2013) ซึ่งจำเป็นต้องมีเทคนิคการรู้จำม่านตา เพื่อสกัดลักษณะพิเศษของแต่ละคนออกมา (Jan *et al*., 2013 ; Pallav and Granorkar, 2013) ซึ่งส่วนที่สามารถนำมาใช้ในการยืนยันตัวตนหรือระบุตัวตนคือม่านตา (Iris) ที่อยู่ระหว่างรูม่านตา (Pupil) และส่วนของตาขาว (Sclera) สำหรับประสิทธิภาพการรู้จำ ขึ้นอยู่กับขนาดของรูม่านตาและคุณภาพของรูปภาพดวงตาที่ใช้ ส่วนขนาดของข้อมูลที่ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของภาพและกระบวนการสกัดข้อมูล (Jan *et al*., 2013b)

การยืนยันตัวตนด้วย Iris Recognition System จะต้องมีการสกัดข้อมูลม่านตาตั้งต้นและข้อมูลม่านตาที่ใช้ในการทดสอบออกมาในรูปแบบของบิตและนำมาเปรียบเทียบกันทุกตำแหน่ง ซึ่งโอกาสที่จะตรงกันทุกตำแหน่งเป็นไปได้น้อยมาก ถึงแม้จะเป็น Iris คนเดียวกันก็ตาม (Jan *et al*., 2013) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าของความคลาดเคลื่อนระหว่าง Iris Template และ Iris Test เพื่อการยืนยันตัวตน ซึ่งการยืนยันตัวตนด้วย Iris ค่าความถูกต้องที่ใช้คือค่าร้อยละ 60 หรือการใช้สูตรทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบ (Min and Park, 2009) แต่ถ้าสนใจด้านความปลอดภัย ค่าถูกต้องดังกล่าวไม่สามารถใช้ได้ เพราะมีโอกาสที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสูง งานวิจัยนี้จึงได้สนใจค่า Threshold ซึ่งเป็นค่าความถูกต้องจากการเปรียบเทียบระหว่าง Iris Template และ Iris Test ที่สามารถยอมรับในการยืนยันตัวตนได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย ในการวัดประสิทธิภาพจะวัดด้วยกัน 3 ค่า ได้แก่ ค่า Genuine Acceptance Rate (GAR) คือค่าความถูกต้องของการยอมรับจากม่านตาที่ถูกต้อง โดยที่ GAR=100-FMRMR การยืนยันตัวตนจากม่านตาที่ถูกต้อง แล้วระบบยอมรับม่านตานั้น และค่า False Non-Match Rate (FMRMR) หรือ False Rejection Rate (FRR) คือค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจากม่านตาที่ถูกต้อง มาจากการยืนยันตัวตนจากม่านตาที่ถูกต้อง แต่ระบบปฏิเสธม่านตานั้น และค่า False Match Rate (FMR) หรือ False Acceptance Rate (FAR) คือค่าผิดพลาดของการยอมรับจากม่านตาที่ไม่ถูกต้อง มาจากการยืนยันตัวตนจากม่านตาที่ไม่ถูกต้อง ระบบยอมรับม่านตานั้น โดยถ้า Threshold Value ต่ำเกินไป จะส่งผลให้การตรวจสอบการยืนยันตัวตนมีค่า Genuine Acceptance Rate (GAR) สูง และค่า False Non-Match Rate (FMRMR) ต่ำและทำให้ค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจาก Iris ไม่ถูกต้อง False Match Rate (FMR) สูงตามไปด้วย จะส่งผลทำให้การกรองมีประสิทธิภาพในแง่ของเอาไปใช้งาน มีความถูกต้องสูงในการยืนยันตัวตนที่เป็นบุคคลนั้นๆ แต่จะเกิดค่าผิดพลาดสูงตามไปด้วย ถ้าสนใจในแง่การนำความปลอดภัยไม่สามารถใช้งานได้ และถ้าค่า Threshold สูงเกินไปจะส่งผลให้การตรวจสอบการยืนยันตัวตนมีค่า Genuine Acceptance Rate (GAR) ต่ำ และค่า False Non-Match Rate (FMRMR) สูงและทำให้ค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจาก Iris ไม่ถูกต้อง False Match Rate (FMR) ต่ำตามไปด้วยการยืนยันด้วยค่า Threshold สูงเกินไปถึงแม้จะตอบโจทย์ในแง่ของความปลอดภัยแต่ไม่สามารถนำมาใช้งานจริง (Arvacheh, 2006 ; Daugman, 2013)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบ Iris Recognition เพื่อวิเคราะห์หาค่า Threshold ที่มีความเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับนำไปใช้ในการยืนยันตัวตน โดยโครงสร้างบทความประกอบด้วย ส่วนที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน ส่วนที่ 4 ผลลัพธ์และส่วนที่ 5 สรุปผล

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การยืนยันตัวตนด้วยระบบ Biometric มุ่งวิเคราะห์หา Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย นั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ Iris Recognition System และ Circle Hough Transform และ Threshold Value

1. Iris Recognition System และ Circle Hough Transform

การยืนยันตัวตนหรือการระบุตัวตนด้วยระบบม่านตาถือว่าเป็น Biometric ที่มีความปลอดภัยสูง (Pallav and Granorkar, 2013 ; Arvacheh, 2006) ซึ่งประสิทธิภาพการ Detect ขึ้นอยู่กับขนาดของรูม่านตาและคุณภาพของภาพดวงตาที่นำไปใช้ในการรู้จำ ตลอดจนแสงที่น้อยและมากเกินจะส่งผลทำให้การ Detect ผิดพลาด ฉะนั้นก่อนนำภาพดวงตามาทดสอบหรือรู้จำ ควรมีการลดสิ่งที่มีผลกระทบต่อความผิดพลาดในการรู้จำเสียก่อน เช่น การปรับภาพดวงตาเป็นภาพสีขาวดำเพื่อลดปัญหาสีของม่านตาเป็นต้น ซึ่งภาพดวงตาจะประกอบด้วย รูม่านตา ม่านตา ตาขาว ขนตา ขนคิ้ว ด้านบนของตา แต่ส่วนที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการยืนยันตัวตนได้ คือส่วนของตาดำหรือ

ม่านตาซึ่งอยู่ระหว่างรูม่านตา และตาขาว (Daugman, 2013) ดัง Figure 1.

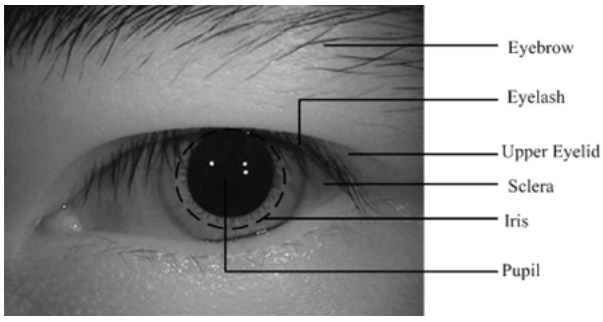


Figure 1 Eye of Research

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการทำงานของ Iris Recognition System ด้วยการใช้เทคนิค Circle Hough Transform เพื่อ Detect รูปดวงตา สามารถแบ่งส่วนทำงานหลักๆ ของ Iris Recognition System ได้ดังต่อนี้ 1. Image Eye Acquisition 2. Segmentation Iris และ Pupil 3. Noise in the Eye และ 4. Feature Extraction และ Encoding

1.1 การได้มาของรูปภาพดวงตา (Image Eye Acquisition)

รูปภาพที่ใช้ใน ระบบ Iris Recognition System ได้จากฐานข้อมูลเพื่อการวิจัยทาง Biometric จากฐานข้อมูล CASIA (Arvacheh, 2006) เป็นรูปภาพดวงตาที่มีคุณภาพสูง ซึ่งได้จากกล้องที่ใช้ถ่ายภาพรูปดวงตาเพื่อการวิจัยโดยเฉพาะ จำเป็นต้องมีความละเอียดและความคมชัด และแสงสว่างที่เพียงพอ โดยกล้องมีลักษณะการทำงานแบบ Near-infrared หรือ LED ระยะห่างของดวงตากับกล้องประมาณ 3 เมตร (Arvacheh, 2006)

1.2 เทคนิค Circle Hough Transform

เทคนิคCircle Hough Transform (CHT) เป็นหลักการทางเทคนิคด้าน feature extraction เพื่อการ Detect ด้วยลักษณะภาพที่มีวงกลม เช่น ดวงตา ลูกฟุตบอล ฯลฯ โดยนำรูปภาพที่มีลักษณะที่มีวงกลมอยู่ในภาพ และทำการปรับคุณภาพและสีของภาพก่อนเข้าสู่หลักการของ CHT ตามหลักการของ Daugman's (Jan *et al*., 2013a ; Jan *et al*., 2013b ; Pallav and Granorkar, 2013 ; Min and Par, 1988) ตามสมการที่ 1

$$|\nabla G(x,y) * I(x,y)|, \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$\nabla \equiv (\partial/\partial x\,, \partial/\partial y\,)$ and $G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}.G(x,y)$ เป็น Function เพื่อการปรับให้ Smooth โดยขนาด σ ที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ edge

Edge map คือ ขั้นตอนการเลือกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Circle Hough Transform ให้ได้รูปร่างที่เด่นชัดมากขึ้น โดยพิจารณาจาก edge points ได้แก่ (x_j, y_j), j=1, 2,..., n, a ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H(x_c, y_c, r) = \sum_{j=0}^{n} h(x_j, y_j\,, x_c, y_c, r), \quad (2)$$

โดยที่

$$h(x_j, y_j, x_c, y_c, r) = \begin{cases} 1 & if\ g(x_j, y_j, x_c, y_c, r) = 0; \\ 0 & otherwise. \end{cases} \quad (3)$$

การวิเคราะห์หากระจกตา (Limbus) และรูม่านตา (Pupil) ซึ่งเป็นลักษณะวงกลมสามารถกำหนดเป็น Function g โดยสามารถอธิบายตามสมการ ดังนี้

$$g(x_j, y_j, x_c, y_c, r) = (x_c - y_c)^2 + (y_j - y_c)^2 - r^2. \quad (4)$$

จุดกึ่งกลาง (Center) ของวงกลมคือ (x_c, y_c) และมีรัศมี (Radius) คือ r เมื่อ Edge point อยู่นอกวงกลมค่าของฟังก์ชันจะเท่ากับ 0 และค่าของ Function g เป็นจริงจะได้ค่าเท่ากับ 1 โดย Function h ซึ่งเป็นหลักการทำงานของ Circle Hough Transform (Bouridane, 2009 ; Proenca, 2009 ; Cherabi, 2012)

1.3 การทำเซกเม้น (Segmentation)

การทำ Segmentation ระบบจะมีการหาจุดกึ่งกลางของรูม่านตา (Iris/Pupil) แม้ว่าดวงตาจะอยู่ ณ ตำแหน่งใดของรูปภาพ ซึ่งวิเคราะห์จากความเข้มของ Pixel แล้วทำการวาดเส้นวงกลม 2 วงตามรัศมีเส้นขอบโดยอัตโนมัติ โดยเส้นแรกวาดตามขอบตาดำ และเส้นที่สองวาดก่อนถึงตาขาวตามหลักการ Daugman Algorithm ดัง Figure 2

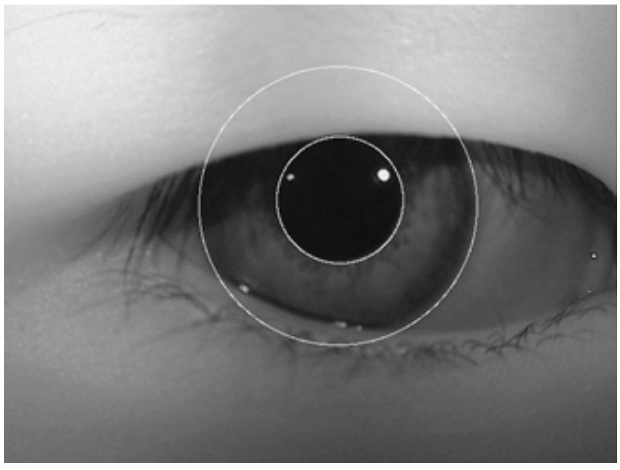


Figure 2 Segmentation Process

John Daugman ได้นำเสนอ Daugman Algorithm ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของ Iris Recognition System เพื่อการทำ Segmentation (Daug, 2009) ดังสมการที่ 5

$$Max(r, x_0, y_O) \left| \frac{\partial}{\partial r} G_\sigma(r)^* \int_{r,x,y} \frac{I(x,y)}{2\pi r} ds \right| \quad (5)$$

จากสมการที่ 5 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$I(x, y)$ กระบวนการหาความเข้มของ Pixel (x, y) จากภาพดวงตาที่ใช้ในการทดสอบ

$G_\sigma(r)$ คือ ฟังก์ชันของกระบวนการการทำให้ Smooth ขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มของภาพและหาจุดกึ่งกลางของรูม่านตาให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น

สิ่งที่ส่งผลทำให้การ Detect ของรูม่านตาที่ผิดพลาดเกิดจากสิ่งรบกวนพื้นฐาน ได้แก่ เปลือกตาบน (Upper eyelids) และเปลือกตาล่าง (Lower eyelids)

1.4 การตัดส่วนรบกวน (Noise)

ในงานวิจัยนี้มีการตัดส่วนรบกวนที่ก่อให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนหรือทำให้เกิดการ Detect ผิดพลาด จึงได้มีการตัดส่วนที่ไม่ใช่ดวงตาหรือม่านตาทิ้ง อาทิเช่น ขนตาบน (Upper Eyelid) และขนตาล่าง (Lower Eyelid) ของรูปภาพดวงตา เพราะขนตาทั้งบนและล่างถือว่าเป็นค่า Noise ทำให้การ Detect ผิดพลาดสูง (Bouridane, 2009 ; Proenca, 2009 ; Bouridane, 2009 ; Proenca, 2009 ; Cherabit *et al*., 2012) ดัง Figure 3

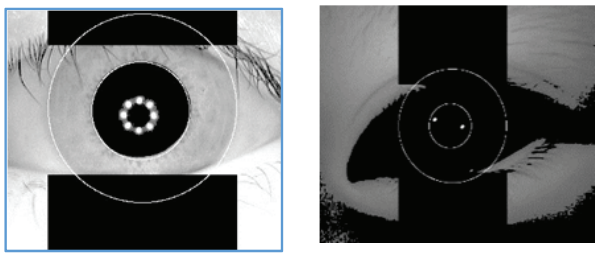


Figure 3 Noise on Eye

1.5 การทำ Normalization

โดยส่วนใหญ่การตรวจสอบ (Detect) ผิดพลาดเกิดจากการยืดหรือขยายของม่านตา (Iris) และแสงที่ส่องเข้าดวงตาระหว่างการเก็บข้อมูล และอาจจะมีเหตุผลอื่นๆ นอกเหนือจากแสงสว่าง ที่ทำให้ เปรียบเทียบ (Comparison) ไม่ตรงกัน เช่น ระยะห่างของการถ่ายภาพ การหมุนกล้องหรือมุมกล้อง การเอียงศีรษะและการหมุนของลูกตา ซึ่งการทำ Normalization ของภาพดวงตา จะช่วยเพิ่มความแตกต่างของค่าระดับสีระหว่างส่วนของตาดำและส่วนของตาขาวให้เด่นชัดมากยิ่งขึ้น (Birgale and Kokare, 2010)

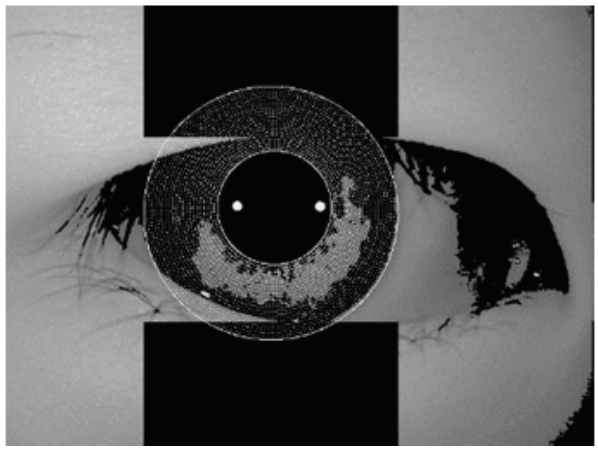


Figure 4 Normalization

1.6 การสกัดค่า (Feature Extraction) หรือการแปลงค่าออกมาเป็นข้อมูล (Encode data)

ระบบจะมีสกัดรูปภาพในพื้นที่ตรงกลางระหว่างเส้นวงกลมสองเส้น หรือที่เรียกว่าลายม่านตา ออกมาในรูปของบิต 0 และ 1 ดัง Figure 5. โดยใช้หลักการของ convolving เพื่อการ Encode ซึ่งขนาดข้อมูลจำนวน 9,600 บิต (Vatsa, 200)

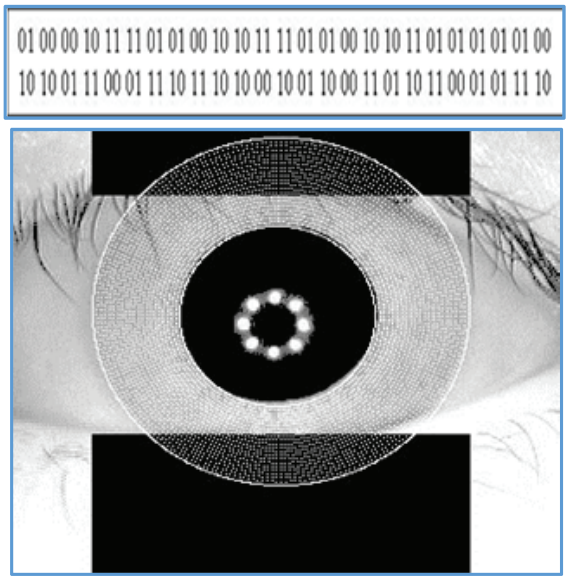


Figure 5 Create Iris Data by Convolving

2. Threshold Value

Threshold Value คือช่วงของการเปรียบเทียบ (Compare) ของข้อมูลที่ได้จากม่านตาตั้งต้น (Iris Template) และข้อมูลม่านตาทดสอบ (Iris Test) ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบบิตทีละตำแหน่ง แล้วประเมินประสิทธิภาพในค่า Genuine Acceptance Rate (GAR), ค่า False Non-Match Rate (FMRMR) และ ค่า False Acceptation Rate (FMR) ซึ่งค่า Threshold Value ต้องเป็นช่วงเหมาะสมและปลอดภัย ถ้าค่าของ Threshold Value สูงเกินจะส่งผลให้การยืนยันตัวตนมีประสิทธิภาพสูงในเรื่องของการกรองข้อมูลม่านตา แต่ข้อมูลที่ถูกต้องอาจจะถูกกรองไปด้วย และถ้าค่าของ Threshold Value ต่ำเกิน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการยอมรับของข้อมูลม่านตาที่ถูกต้องสูง แต่อาจทำให้เกิดการชนของข้อมูลม่านตาเพิ่มตามไปด้วย (Tan *et al*., 2010)

การยืนยันตัวตนด้วยระบบ Iris จะต้องมีการสกัดข้อมูลจาก Iris ตั้งต้น (Iris Template) และข้อมูลจาก Iris ที่ใช้ในการทดสอบ (Iris Test) ออกมาในรูปแบบของบิตและนำมาเปรียบเทียบกันทุกตำแหน่ง ซึ่งโอกาสที่จะตรงกันทุกตำแหน่งเป็นไปได้น้อยมาก ถึงแม้จะเป็น Iris คนเดียวกันก็ตาม (Pallav and Granorkar, 2013) การยืนยันตัวตนด้วย Biometric มีเรื่องของคุณภาพของรูปภาพ Iris นั้นๆ ที่ไม่มีคุณภาพ และไม่สม่ำเสมอ ทั้งเรื่องของแสงขณะถ่ายภาพ ภาพไม่ชัด ซึ่งมีผลต่อการตรวจสอบเพื่อสกัดออกมาเป็นข้อมูลทั้งสิ้น ทำให้การยืนยันตัวตนไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าของความคลาดเคลื่อนระหว่าง Iris Template และ Iris Test เพื่อการยืนยันตัวตน ดังนั้น การวิเคราะห์หา Threshold Value ต้องคำนึงถึงการใช้งานจริงและต้องมีความปลอดภัยควบคู่ด้วย มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาการวิเคราะห์หา Threshold เพื่อการยืนยันตัวตน งานวิจัยแรกได้ศึกษาการยืนยันตัวตนด้วยลายฝ่ามือ (Palmprint) ด้วยเทคนิค MinMax Threshold Range (MMTR) เพื่อช่วยให้เกิดความถูกต้องในการเปรียบเทียบมากขึ้น การยืนยันตัวตนด้วยเทคนิค MinMax Threshold Range (MMTR) ซึ่งประกอบด้วยการเตรียมข้อมูลรูปภาพ Palmprint และต่อจากนั้นตรวจสอบรูปภาพสกัดข้อมูลออกมา ในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของ Hamming Distance ร่วมด้วยเพื่อให้เกิดความถูกต้องมากขึ้น ซึ่ง Hamming Distance เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง 2 ข้อความที่มีความยาวเท่ากัน คือจำนวนตำแหน่งที่มีสัญลักษณ์หรืออักขระที่แตกต่างกันบางส่วน กล่าวอีกนัยหนึ่ง มันคือจำนวนน้อยที่สุดที่ต้องใช้เพื่อเปลี่ยนจากข้อความหนึ่งไปเป็นอีกข้อความหนึ่ง หรือจำนวนตัวอักษรที่คลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนจากข้อความหนึ่งไปเป็นอีกข้อความหนึ่ง หลังจากนั้นจะเข้าสู่หลักการของ Threshold ที่กำหนดไว้ ผลการวิจัยพบว่า การการยืนยันตัวตนด้วยเทคนิค Min Max Threshold Range (MMTR) ทำให้ค่า อัตราการยอมรับผิดพลาด (False Acceptance Rate - FAR) ได้ (Jan *et al*., 2013) จากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หา Threshold Value เพื่อการยืนยันตัวตน แต่ไม่สามารถใช้หลักการของ Hamming Distance เพราะผู้วิจัยต้องการข้อมูลที่ตรงกันทั้งหมดเพื่อนำมาใช้เป็นกุญแจเข้ารหัสลับ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานของงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้ Data Set โดยเป็นรูปดวงตา จากฐานข้อมูล Chinese Academy of Sciences Institute of Automation (CASIA) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเพื่อการวิจัยทางด้าน Biometric จำนวน 22,500 รูป จากอาสา สมัครจำนวน 1,650 คน ซึ่งเป็นรูปดวงตาขนาด 8 bit แบบ gray-level นามสกุล .JPEG ภายใต้การถ่ายภาพแบบอินฟราเรด (Arvacheh, 2006) แล้วนำมาเรียนรู้จำม่านตา โดยใช้เทคนิค Circle Hough Transform และประเมินประสิทธิภาพความถูกต้อง เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. การสร้าง Model เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value และ 2. การทดสอบ Model ที่ได้จากการวิเคราะห์ Threshold Value ดังกล่าว

1. Data Set ที่ใช้ในการวิเคราะห์หา Threshold Value

Data Set ที่ใช้ในการวิเคราะห์หา Threshold Value เป็นรูปดวงตาจาก CASIA V.4 เป็น Data set เพื่อการวิจัยเกี่ยวกับ Biometric ในกลุ่ม CASIA-Iris-Twins ซึ่งเป็นรูปดวงตา จำนวน 4,000 รูปของคู่แฝด จำนวน 100 คู่แฝด ทั้ง

ตาข้างซ้ายและข้างขวา เพราะนักวิจัยสนใจความคล้ายคลึงของลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงของคู่แฝดอาจจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการยืนยันตัวตนด้วย Iris ซึ่งได้จากอาสาสมัครจำนวน 200 คน (Arvacheh, 2006)

2. Data Set ที่ใช้ในการทดสอบ Threshold Value

Data Set ที่ใช้ในการทดสอบ Threshold Value ที่ได้วิเคราะห์มา ผู้วิจัยได้นำ Data Set สองกลุ่มจากฐานข้อมูล CASIA V.4 ได้แก่ กลุ่ม CASIA-Iris-Syn ซึ่งเป็น Data Set ที่สร้างขึ้นมาจากห้องทดลองของ CASIA ตามอัลกอริธึมที่สร้างขึ้นมาเลียนแบบดวงตาจริง จำนวน 2,000 รูป (Garg *et al*., 2012) Data Set กลุ่ม CASIA-Iris-Lamp ซึ่งเป็นรูปดวงตาที่อาสาสมัครเก็บข้อมูล โดยการถ่ายภาพด้วยตนเอง ซึ่งจะส่งผลให้ภาพไม่มีความคมชัดที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากการเก็บข้อมูล จากอาสาสมัคร 450 คน หรือจำนวน 900 รูป (Arvacheh, 2006) เพื่อทดสอบ Threshold Value เมื่อใช้กับ Data Set กลุ่มอื่น

3. กรอบแนวคิด (Framework)

กรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้ นำเสนอภาพรวมของงานวิจัย โดยนักวิจัยได้แบ่งการทำงานหลักๆ ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

3.1 ส่วนของการตรวจสอบรูปดวงตา ด้วยเทคนิค Circle Hough Transform และ Feature Extraction หรือ Encode data เพื่อสร้างข้อมูล

3.2 ส่วนของการวิเคราะห์หา Threshold Value ที่ปลอดภัย โดยมีการทดสอบเพื่อหา Threshold Value ซึ่งมีการกำหนดช่วงในการเปรียบเทียบระหว่าง Iris Template และ Iris Test ดังนี้ Threshold Value >=60, >=65, >=70, >=75 และ >=80 แล้วนำผลมาประเมินประสิทธิภาพ 3 ค่า ได้แก่ค่า Genuine Acceptance Rate (GAR), ค่า False Non-Match Rate (FMRMR) และค่า False Acceptation Rate (FMR) เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย โดยค่า Threshold Value จะต้องได้ค่า GAR สูง, FMRMR ต่ำ และ FMR ต่ำที่สุด ยิ่งมีค่า FMR เข้าใกล้ 0 ยิ่งดี จึงสามารถอธิบายดัง Figure. 6

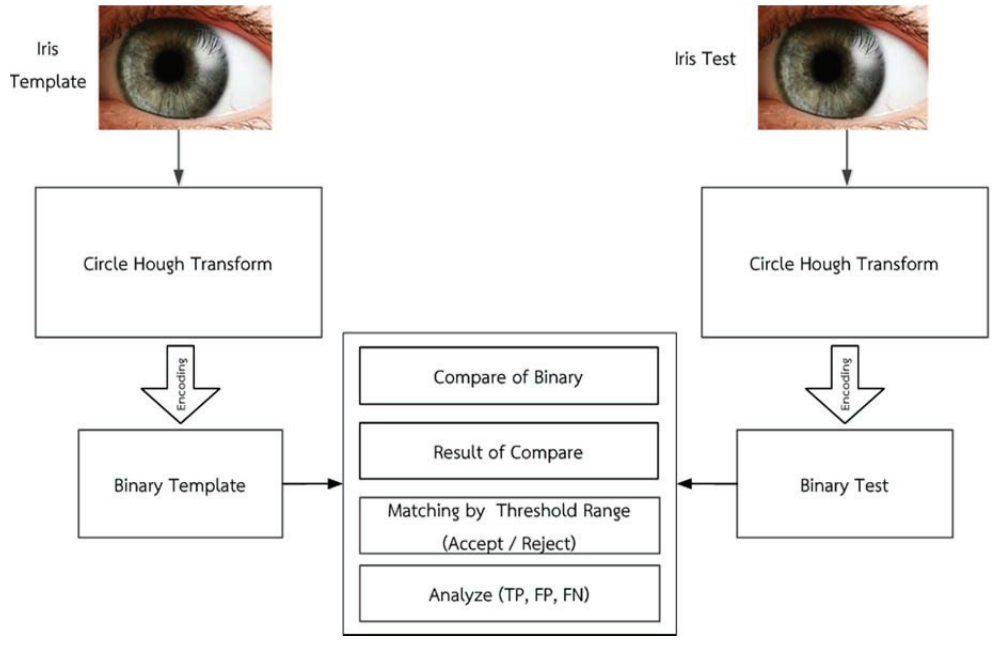


Figure 6 Framework

จาก Figure 6 แสดงการวิเคราะห์หา Threshold Value จากจุดตัดของเส้นตรงของค่า GAR และ FMRMR ด้วยสมการเส้นตรงแบบผ่านจุดสองจุด (The Two-Point Equation) โดยค่า GAR และ FMRMR เป็นค่าที่มีความสำคัญ ซึ่งต้องคำนึงถึงระดับค่าที่เหมาะสมหรือสัมพันธ์กัน ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานและความปลอดภัย โดยแทนค่า GAR=x_1, y_1 และแทนค่า FMRMR=x_2, y_2 ซึ่ง y คือพิกัด y ของจุดใดๆ บนเส้นตรง และ x คือพิกัด x ของจุดที่มีพิกัด y งานวิจัยนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพสามด้าน ได้แก่ ค่า Genuine Acceptance Rate (GAR) ค่าความถูกต้องของการยอมรับจาก Iris ที่ถูกต้อง, ค่า False Non-Match Rate (FMRMR) ค่าผิดพลาดของการยอมรับจาก Iris ที่ถูกต้อง และค่า False Match Rate (FMR) ค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจาก Iris ไม่ถูกต้อง

3.3 การเปรียบเทียบ Iris Template และ Iris Test เพื่อวิเคราะห์หาค่า Threshold Value

ขั้นตอนการเปรียบเทียบ Iris Template และ Iris Test เพื่อวิเคราะห์หาค่า Threshold Value โดยการ Compare ที่ละตำแหน่ง ทุกบิต เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละที่ตรงกัน ดังอัลกอริธึม (Algorithm)

```
Algorithm Compare
 Begin
      Read IrisTeampate
      Read IrisTest
            Rows=20, Columns=480
            TotalBitIris=Row*Column
      For i=1 to Row
          For j=1 to Colum
          IF IrisTeampate (i, j) ==IrisTest (i, j) Then
                Count=Count+1
            End IF
          End For
      End For
      Compare=Count*100/ TotalBitIris
End Compare
```

จาก Algorithm เป็นขั้นตอนการ Compare ระหว่าง Iris Template และ Iris Test โดยขนาด Data ที่อยู่ในรูปแบบบิต (Bits) ซึ่งมีขนาด Rows=20, Columns=480 และมีขนาดทั้งหมด 9,600 บิต โดยเปรียบเทียบทีละบิตและทีละตำแหน่งเพื่อหาค่าร้อยละที่ตรงกัน

ผลการวิจัย

1. การสร้าง Model เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย

ระบบการรู้จำไบโอเมตริกซ์ โดยใช้เทคนิค Circle Hough Transform เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value ที่ปลอดภัย ซึ่ง Data Set ที่ใช้ในการวิเคราะห์หา Threshold Value เป็นรูปดวงตาจาก CASIA V.4 ในกลุ่ม CASIA-Iris-Twins เพื่อวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ (Compare) ระหว่างข้อมูลม่านตาตั้งต้น (Iris Template) และข้อมูลม่านตาทดสอบ (Iris Test) แล้วนำผล Compare มาวิเคราะห์ประสิทธิภาพ 3 ด้านได้แก่ Genuine Acceptance Rate (GAR), False Non-Match Rate (FMRMR) และ False Match Rate (FMR) จาก Threshold Value ดัง Figure 7

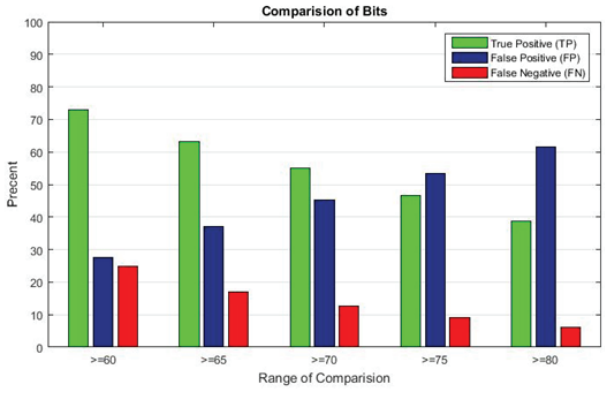


Figure 7 Percent of Value Compare

จากที่ Figure 7 แสดง Percent of Value Compare เพื่อประเมินประสิทธิภาพในด้าน GAR, FMRMR และ FMR เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย ซึ่งจะต้องพิจารณาค่า False Match Rate (FMR) เป็นค่าแรก ซึ่งค่า FMR ยิ่งต่ำมากเท่าไรยิ่งมีความปลอดภัยสูง และถ้ามองในแง่ของความถูกต้องและความพร้อมใช้งานค่า Genuine Acceptance Rate (GAR) จำเป็นต้องสูงกว่าค่า False Non-Match Rate (FMRMR) ซึ่งจาก Fig. 9 พบว่า Threshold Value ที่สามารถนำมาใช้ได้อยู่ระหว่างช่วง Compare >=70 และ >=75 ซึ่งมีค่า GAR ที่สูงกว่าค่า FMRMR และมีค่า FMR ต่ำ โดยช่วง Compare >=70 ได้ค่า GAR=54.9667, FMRMR=45.2625, FMR=12.6747 และช่วง Compare >=75 ได้ค่า GAR=46.6403, FMRMR=53.5264, FMR=9.1360

เมื่อนำผลของการ Compare จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value มาวาดกราฟเส้น เพื่อวิเคราะห์จุดตัดของเส้น Genuine Acceptance Rate (GAR) และ False Non-Match Rate (FMRMR) ด้วยสมการเส้นตรงแบบผ่านจุดสองจุด (The Two-Point Equation) พบว่า ช่วงที่สามารถนำมาใช้ได้จะอยู่ระหว่าง Compare >=70 และ >=75 จึงต้องหาค่าที่เหมาะสมระหว่างสองช่วงดังกล่าว

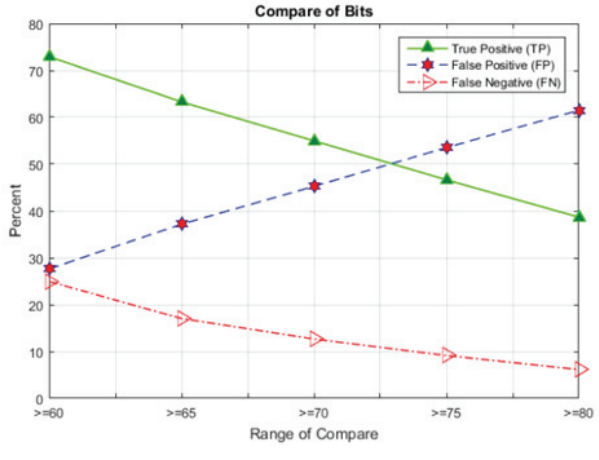


Figure 8 Percent of Value Compare

จาก Figure 8 แสดงกราฟเส้นของ Percent of Value Compare ในประเมินประสิทธิภาพค่า GAR, FMRMR และ FMR เพื่อวิเคราะห์หา Threshold Value จากการทดลอง Compare >=60, >=65, >=65, >=70 และ >=80 พบว่า Threshold Value ที่เหมาะสมและความปลอดภัย อยู่ระหว่าง Compare >=70 และ >=75 เพราะทั้งสองช่วง มีค่า GAR และ FMR ที่เหมาะสม โดยที่ค่า GAR มีค่าที่มากและ FMR ที่น้อย แต่ทั้งสองช่วงยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ จึงต้องมีการวิเคราะห์หา Threshold Value ด้วยสมการเส้นตรงแบบผ่านจุดสองจุด โดยจะได้ค่าจุดตัดแกน=70.0000,=54.9667 และ=75.0000,=46.6403 ของเส้นตรง GAR และ FMRMR เพราะช่วงที่เส้นของ GAR และ FMRMR ตัดกันเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมและปลอดภัย เพราะ ค่า GAR สูงกว่าค่า FMRMR และค่า FMR ต่ำ โดยนำมาเข้าสมการเส้นตรงแบบผ่านจุดสองจุด (The Two-Point Equation) จะได้จุดตัดที่ 72.9246 หรือ Threshold Value=72.9246 ซึ่งได้ค่า FMR น้อยกว่าร้อยละ 10 เป็นค่าที่มีความเหมาะสมและปลอดภัย เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นมีค่าความถูกต้องเพียงร้อยละ 50 เท่านั้น (Khan *et al*., 2013)

2. การทดสอบ Model Threshold Value

การทดสอบ Threshold Value เมื่อนำมาใช้กับ Data Set อื่นๆ เพราะแต่ละ Data Set จะมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ตามเงื่อนไขที่จากการเก็บข้อมูล โดยนำ Data Set สองกลุ่มจากฐานข้อมูล CASIA V.4 ได้แก่ กลุ่ม CASIA-Iris-Lamp และกลุ่ม CASIA-Iris-Syn มาทดสอบ

Data Set กลุ่ม CASIA-Iris-Syn ซึ่งเป็น Data Set ที่พัฒนามาจาก CASIA V.3 และเป็น Data Set ที่สร้างขึ้นมาเสมือนจริง ซึ่งไม่ใช่เกิดจากการเก็บข้อมูลจากการถ่ายภาพดวงตามนุษย์ ตามอัลกอริธึมของ CASIA จำนวน 10,000 รูป ดวงตาโดยแทนจากอาสาสมัคร 1,000 คน

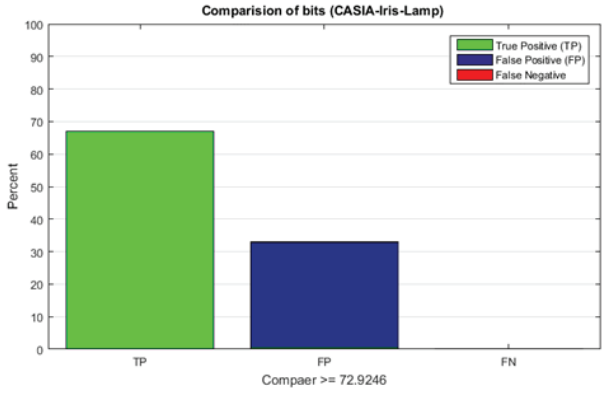


Figure 9 Compare by Threshold Value

จาก Figure 9 แสดงผลการทดสอบ Model ของ Threshold Value 72.9246 โดยนำฐานข้อมูลในกลุ่ม CASIA-Iris-Syn พบว่า ค่า GAR=67.00% ค่า FMRMR=33.00% และค่า FMR=0.00% ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสม และปลอดภัยสูง

Data Set กลุ่ม CASIA-Iris-Lamp ซึ่งเป็นรูปดวงตาที่อาสาสมัครเก็บข้อมูลโดยการใช้มือถือกล้อง ซึ่งจะส่งผลให้ภาพไม่มีความคมชัดที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากการเก็บข้อมูล จากอาสาสมัคร 450 คน หรือจำนวน 900 รูป มาทดสอบ Model

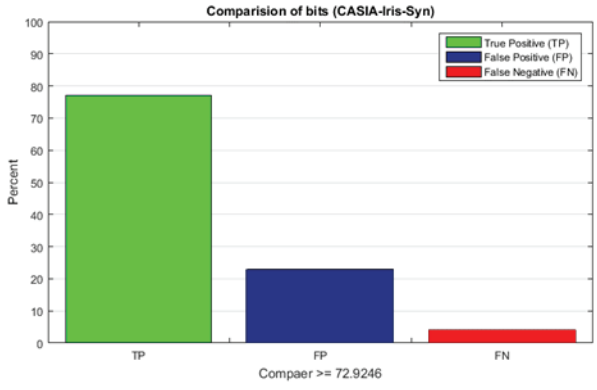


Figure 10 Compare by Threshold Value (2)

จาก Figure 10 แสดงผลการทดสอบ Model ของ Threshold Value 72.9246 เช่นเดียวกับ Data Set กลุ่ม CASIA-Iris-Syn โดยนำ Data Set จาก CASIA V.4 ในกลุ่ม CASIA-Iris-Lamp ซึ่งเป็นรูปดวงตาที่อาสาสมัครเก็บข้อมูลโดยการใช้มือถือกล้อง พบว่า ค่า GAR=77.00%, FMRMR=23.00% และ FMR=4.00%

เมื่อนำเอา Data set ทั้งสองได้แก่ CASIA-Iris-Lamp และ CASIA-Iris-Syn ที่มีเงื่อนไขในการเก็บรูปภาพของ Data set ที่ต่างกัน มาทดสอบ Threshold Value 72.9246

จากการนำ Data Set จาก Database กลุ่มอื่นมาทดสอบกับ Threshold Value 72.9246 พบว่า ถ้าพิจารณาในแง่ของความปลอดภัย ซึ่งดูจากค่า False Match Rate (FMR) คือค่าผิดพลาดของการปฏิเสธจาก Iris ที่ถูกต้อง โดยทั้งสองกลุ่มที่ใช้ทดสอบมีค่า GAR=72.00% ค่า FMRMR=28.00% และค่า FMR=2.00% ซึ่งเป็นค่าที่ Error น้อยมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Khan, Mohd Tariq, Deepak Arora, and Shashwat Shukla. ที่ได้ค่า Error อยู่ที่ 9.24% และ 23.00%

สรุปผล

ระบบการรู้จำม่านตา (Iris Recognition System) จำเป็นต้องมีค่า Threshold Value ที่เหมาะสมซึ่งถ้ากำหนด Threshold Value มากเกินไป อาจจะเกิดการ Error ที่เกิดจากการปฏิเสธ Iris ที่ถูก และถ้ากำหนด Threshold Value น้อยเกินไป จะส่งผลให้เกิด Error ที่เกิดจากการยอมรับจาก Iris ที่ผิดพลาด งานวิจัยจึงสนใจ Threshold Value ที่เหมาะสมและปลอดภัย โดยนำเสนอระบบการรู้จำไบโอเมตริกซ์ (Biometric Recognition System) ซึ่งสนใจในส่วนของ Iris Recognition System โดยใช้เทคนิค Circle Hough Transform เป็นวิธีที่มีความถูกต้องสูงในการ Detect ม่านตา (Iris) เพื่อสกัดข้อมูลม่านตาของแต่ละคนที่ไม่ซ้ำกัน และเป็นงานวิจัยที่สนใจของค่า Threshold Value เพื่อวิเคราะห์ที่เหมาะสมและปลอดภัย โดยการทดลองเพื่อการสร้าง Model ของ Threshold Value จาก Data Set ฐานข้อมูล CIASA V.4 กลุ่ม CASIA-Iris-Twins พบว่า Threshold Value จะอยู่ในช่วงระหว่าง Compare>=70 และ >=75 ซึ่งจะได้ค่าจุดตัดแกน=70.0000,=54.9667 และ =75.0000,=46.6403 เมื่อนำเข้าสูตรสมการของเส้นตรงแบบจุดสองจุด (The Two-Point Equation) จะได้จุดตัดที่ 72.9246 มีค่า GAR ที่สูงกว่าค่า FMRMR และมีค่า FMR ต่ำ

เมื่อนำ Model ที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่า Threshold Value 72.9246 ทดสอบกับ Data Set กลุ่มอื่น ได้แก่ฐานข้อมูล CIASA V.4 กลุ่ม CASIA-Iris-Lampe จำนวน 450 คน ผลการวิจัยพบว่า ค่าของการยอมรับค่าที่ถูกต้อง GAR เท่ากับ 77.00%, FMRMR เท่ากับ 23.00% และได้ค่า FMR เท่ากับ 3.00% เมื่อทดสอบกับ Data Set ของฐานข้อมูล CIASA V.4 กลุ่ม CASIA-Iris-Sys จำนวน 1,000 คน พบว่าค่า GAR เท่ากับ 67.00% และค่า FMRMR เท่ากับ 33.00% และค่า FMR เท่ากับ 0.00% ฉะนั้น และThreshold Value 72.9246 เป็นช่วงที่เหมาะสมและปลอดภัย สามารถนำไปใช้กับการยืนยันตัวตนที่ต้องการความปลอดภัยสูง

เอกสารอ้างอิง

Arvacheh, E.M. (2006). A study of segmentation and normalization for iris recognition systems. “Biometrics ideal test/CASIA Iris Image Database Version 4.0,” 23-Oct-2016.

Birgale, L., & Kokare, M. (2010). *Iris Recognition Without Iris Normalization 1*.

Bouridane, A. (2009). Recent advances in iris recognition: A multiscale approach. *Imaging for Forensics and Security*, 49-77.

Cherabit, N., Chelali, F. Z., & Djeradi, A. (2012). Circular hough transform for iris localization. *Science and Technology, 2*(5), 114-121.

Darwaish, S. F., Moradian, E., Rahmani, T., & Knauer, M. (2014). Biometric identification on android smartphones. *Procedia Computer Science, 35*, 832-841.

Illingworth, J., & Kittler, J. (1988). A survey of the Hough transform. *Computer vision, 44*(1), 87-116.

Jan, F., Usman, I., & Agha, S. (2013a). Reliable iris localization using Hough transform. *histogram-bisection, and eccentricity, 93*(1), 230-241.

Jan, F., Usman, I., Khan, S.A., & Malik, S.A. (2013b). Iris localization based on the Hough transform, a radial-gradient operator, and the gray-level intensity. *Optik, 124*(23), 5976-5985.

Jorgensen, Z., & Yu, T. (2011). On mouse dynamics as a behavioral biometric for authentication. *Computer and Communications Security* (pp. 476-482).

Leng, L., & Zhang, J. (2011). Dual-key-binding cancelable palmprint cryptosystem for palmprint protection and information security. *Network and Computer Applications, 34*(6), 1979-1989.

Min, T.H., & Park, R.H. (2009). Eyelid and eyelash detection method in the normalized iris image using the parabolic Hough model and Otsu’s thresholding method, 30(12), 1138-1143.

Miyazawa, K., Ito, K., Aoki, T., Kobayashi, K., & Nakajima, H. (2008). An effective approach for iris recognition using phase-based image matching. *pattern analysis and machine intelligence, 30*(10), 1741-1756.

Nagar, A., Nandakumar, K., & Jain, A.K. (2010). A hybrid biometric cryptosystem for securing fingerprint minutiae templates. *Pattern recognition letters, 31*(8), 733-741.

Nandakumar, K., Jain, A.K., & Pankanti, S. (2007). Fingerprint-based fuzzy vault: Implementation and performance. *information forensics and security, 2*(4),744-757.

Pallav, P.K., & Granorkar, S.R. (2013). Investigationand analysis of Hough-DCT-Hamming distance based method of iris recognition, 3(1), 181-185.

Proenca, H. (2009). Iris recognition: On the segmentation of degraded images acquired in the visible wavelength. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32*(8), 1502-1516.

Proenca, H., & Alexandre, L.A. (2006). Iris recognition: An analysis of the aliasing problem in the iris normalization stage. *Computational Intelligence and Security* (Vol. 2, pp. 1771-1774). IEEE.

Shay, R., Komanduri, S., Kelley, P.G., Leon, P.G., Mazurek, M.L., Bauer, L., & Cranor, L.F. (2010). Encountering stronger password requirements: user attitudes and behaviors. *the sixth symposium on usable privacy and security* (pp. 1-20).

Tan, T., He, Z., & Sun, Z. (2010). Efficient and robust segmentation of noisy iris images for non-cooperative iris recognition. *Image and vision computing, 28*(2), 223-230.

Vatsa, M., Singh, R., & Noore, A. (2008). Improving iris recognition performance using segmentation, quality enhancement, match score fusion, and indexing. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 38*(4), 1021-1035.

Verma, P., Dubey, M., Basu, S., & Verma, P. (2012). Hough transform method for iris recognition-A biometric approach. *International, 1*(6), 43-48.

การใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลในการวิเคราะห์สารสนเทศเพื่อการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา

Application of data mining techniques in analysis of information to develop decision support systems in selecting programs under Thai University Central Admission System

อนันต์ ปินะเต[1]
Anan Pinate[1]

Received: 3 July 2020 ; Revised: 17 August 2020 ; Accepted: 1 September 2020

บทคัดย่อ

การคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาระบบใหม่ หรือเรียกสั้นๆ ว่า TCAS เป็นนโยบายการปฏิรูปการศึกษาของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (อว.) โดยมีที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย (ทปอ.) เป็นหน่วยงานกลางในการดำเนินงาน ซึ่งมหาวิทยาลัยทุกมหาวิทยาลัยเข้าร่วมการรับสมัครระบบใหม่นี้ ซึ่งมีรูปแบบการรับสมัครคัดเลือก 5 รอบ นโยบายนี้ได้ดำเนินการตั้งแต่ปีการศึกษา 2561 เป็นต้นมา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้เข้าร่วมการคัดเลือกระบบใหม่นี้ในทุกปีการศึกษา และทุกรอบการรับสมัคร ซึ่งทุกปีการศึกษามีผู้สมัครจำนวนมากที่ไม่ผ่านการคัดเลือกในสาขาวิชาเพื่อยืนยันสิทธิ์ (Clearing house) เข้าศึกษาในระบบ TCAS ได้ จากปัญหาพบว่าผู้สมัครไม่คำนึงถึงคะแนนการสอบวิชาความถนัดทั่วไป (GAT) และคะแนนการสอบความถนัดทางวิชาการและวิชาชีพ (PAT) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการพิจารณาของสาขาวิชา โดยพฤติกรรมของผู้สมัครจะเลือกสาขาวิชาตามความรู้สึก ความชอบ และตามเพื่อน หรือผู้ปกครอง ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้นำเทคนิคเหมืองข้อมูล ด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ มาวิเคราะห์ข้อมูลและนำผลการวิจัยไปพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชา เพื่อให้ผู้สมัครได้ทดสอบการเลือกสาขาวิชาเพื่อวิเคราะห์โอกาสผ่านการคัดเลือกเข้าศึกษามากน้อยเพียงใดก่อนเลือกสมัครสาขาวิชานั้นจริง จากการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ C4.5 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.64 สามารถสร้างกฎการตัดสินใจได้ทั้งหมด 358 กฎการตัดสินใจจากทั้งหมด 84 สาขาวิชา โดยสามารถนำกฎการตัดสินใจที่ได้มาพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คำสำคัญ: ต้นไม้ตัดสินใจ การคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาระบบใหม่ (TCAS)

Abstract

Thai University Central Admission System, abbreviated to “TCAS,” is an educational reform policy under the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation (MHESI), together with the Council of University Presidents of Thailand (CUPT) as the hub of operations. All universities have joined TCAS following five admissions application rounds. This policy has been implemented since the academic year of 2018. Mahasarakham University has participated in TCAS in every academic year and all admissions application rounds. Every year numerous candidates failed admissions into programs chosen for clearing house entering the TCAS system. There are problems that candidates overlooked scores on the General Aptitude Test (GAT) and Professional and Academic Aptitude Test (PAT) as a key component in a consideration of the program chosen. The candidate’s selection behavior toward a program is typically based on his/her feelings, preferences, and peers, and parent’s determination. In this study, the Data Mining technique was adopted, and Decision Tree was used to analyze the data. A result of the analysis was further used to develop a decision support system (DSS) for the program to be chosen by the applicants to test the program selection and to

[1] นักวิชาการคอมพิวเตอร์ชำนาญการ กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[1] Computer Techinical Officer Professional Level, Division of Academic Affair, Mahasarakham University, Kantharawichai District, MahaSarakham 44150 Thailand.

analyze the opportunity to achieve before the actual selection of the respective program. The results found that the Decision Tree at C4.5 represented an accuracy of 91.64 percent, and a total of 358 decision rules can be developed across 84 programs, and decision rules can be developed as a decision support system for program selection to the TCAS of Mahasarakham University.

Keywords: Decision tree, TCAS

บทนำ

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (อว.) ได้มีนโยบายการคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาระบบใหม่ (Thai university Central Admission System: TCAS) (สมาคมที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย, 2561) ซึ่งได้ดำเนินการมาตั้งแต่ปีการศึกษา 2561 ซึ่งมีการคัดเลือกทั้งหมด 5 รอบด้วยกัน ได้แก่ รอบที่ 1 การรับด้วย Portfolio คือ การรับด้วยแฟ้มสะสมผลงานโดยไม่มีการสอบข้อเขียน กลุ่มผู้สมัครสำหรับนักเรียนทั่วไป นักเรียนที่มีความสามารถพิเศษ นักเรียนโควตา นักเรียนเครือข่าย ผู้สมัครสามารถสมัครได้ที่สถาบันอุดมศึกษา, รอบที่ 2 การรับแบบโควตาที่มีการสอบข้อเขียนหรือข้อสอบปฏิบัติ คือ การรับแบบโควตาที่มีการสอบข้อเขียนหรือข้อสอบปฏิบัติ สำหรับนักเรียนที่อยู่ในเขตพื้นที่หรือภาคโควตาโรงเรียนในเครือข่าย และโครงการความสามารถพิเศษต่าง ๆ ซึ่งสถาบันอุดมศึกษาประกาศเกณฑ์การสอบ ผู้สมัครสามารถสมัครได้ที่สถาบันอุดมศึกษาและเข้ารับการคัดเลือกตามเกณฑ์การสอบ, รอบที่ 3 การรับตรงร่วมกัน คือ การรับนักเรียนในโครงการกลุ่มสถาบันแพทยศาสตร์แห่งประเทศไทย (กสพท.) โครงการอื่นๆ และนักเรียนทั่วไปที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย (ทปอ.) เป็นหน่วยงานกลางในการรับสมัคร, รอบที่ 4 การรับกลางร่วมกัน Admission คือ การรับสำหรับนักเรียนทั่วไป ที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย เป็นหน่วยงานกลางในการรับสมัคร, รอบที่ 5 การรับตรงอิสระ คือ การรับโดยตรงด้วยวิธีการของสถาบันอุดมศึกษา และสถาบันอุดมศึกษาเป็นหน่วยงานรับสมัคร

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้เข้าร่วมการคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาระบบใหม่ (TCAS) ทั้ง 5 รอบที่ผ่านมาตั้งแต่ปีการศึกษา 2561-2563 (กองบริการการศึกษา, 2563: เว็บไซต์) ที่ผ่านมาพบว่ามีผู้จำนวนผู้สมัครจำนวนมากที่ไม่ผ่านการคัดเลือกในสาขาวิชาที่ผู้สมัครเลือกเนื่องจากมีคะแนนต่ำกว่าเกณฑ์การพิจารณาของสาขาวิชา จากรายงานสรุปผลการดำเนินงานการคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระบบ TCAS (กองบริการการศึกษา, 2563) ประจำปีการศึกษา 2562 พบว่ามีผู้สมัครทั้งหมด 5 รอบมีผู้สมัครจำนวน 35,527 คน และมีจำนวนผู้ผ่านการคัดเลือกเพื่อยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษา (Clearing House) 16,145 คน คิดเป็นร้อยละ 45.44 ของผู้ผ่านการคัดเลือก จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสมัครของกองบริการการศึกษายังพบว่าพฤติกรรมการเลือกสาขาวิชาของผู้สมัครโดยส่วนใหญ่ยังขาดประสบการณ์ในการสมัครซึ่งผู้สมัครส่วนใหญ่จะเลือกสาขาวิชาตามความชอบและสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น สมัครตามเพื่อน สมัครตามผู้ปกครองต้องการ (ชิดชนก ส่งศิริ, 2544) โดยไม่ได้คำนึงถึงความรู้ และทักษะของตนเอง เช่น ผลคะแนนการทดสอบการศึกษาระดับชาติขั้นพื้นฐาน (O-NET), ผลคะแนนการทดสอบความถนัดทั่วไป (GAT), ความถนัดทางวิชาการและวิชาชีพ (PAT) (สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ องค์การมหาชน, 2563: เว็บไซต์) และผลการทดสอบ 9 วิชาสามัญ ซึ่งคะแนนเหล่านี้คือองค์ประกอบหลักในการพิจารณาผลคัดเลือก ซึ่งส่งผลให้การสมัครคัดเลือกระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ข้อมูลการรับสมัครประจำปีการศึกษา 2562 จากรายงานสรุปผลการดำเนินงานคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในอุดมศึกษาระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีการศึกษา 2562 มีผู้ไม่ผ่านการคัดเลือกคิดเป็นร้อยละ 55.00 ของผู้สมัครทั้งหมด จากรายงานข้อมูลผู้ไม่ผ่านการคัดเลือกมีคะแนนไม่ถึงตามจำนวนสาขารับผ่านการคัดเลือก

ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data Mining) ในการวิเคราะห์สารสนเทศเพื่อการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชา โดยระบบจะให้ผู้สมัครได้ทดสอบการเลือกสาขาวิชาก่อน เพื่อให้ทราบผลคะแนนของตน ว่ามีโอกาสมากหรือน้อยเพียงใด และวิเคราะห์โอกาสที่จะผ่านการคัดเลือกในสาขาวิชาที่ต้องการสมัคร ก่อนการเลือกสาขาวิชาจริง

วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์สารสนเทศที่เกิดขึ้นจากข้อมูลการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data Mining) และนำผลการทดลองมาพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำทฤษฎีการทำเหมืองข้อมูลโดยวิธีการจำแนกข้อมูล (Data Classification) ด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้

สารสนเทศที่จะนำมาพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS รายละเอียดทฤษฎีเทคนิคเหมืองข้อมูล ดังต่อไปนี้

1. การทำเหมืองข้อมูล

เหมืองข้อมูล (Data mining) เป็นขั้นตอนทางสถิติเป็นวิธีการปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) (ฉัตรเกล้า เจริญผล, 2556) ทำการวิเคราะห์และสกัดความรู้จากข้อมูลที่จัดเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูล หรือรูปแบบข้อมูลอื่นๆ การทำเหมืองข้อมูลสามารถค้นพบความรู้ และสารสนเทศที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล หลักการทำเหมืองข้อมูล คือ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูล แนวโน้ม หรือหารูปแบบที่เกิดขึ้นจากข้อมูล และสามารถนำสารสนเทศที่ได้มาช่วยวางแผนการตัดสินใจและแก้ปัญหาด้านต่างๆ การทำเหมืองข้อมูลจะสามารถแก้ไขปัญหาได้บางปัญหาเท่านั้นขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการที่เลือกใช้เท่านั้น

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูลมีกระบวนการตามมาตรฐานที่เรียกว่า Cross-Industry Standard Process for Data mining: CRISP-DM) (สมาคมที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย (ทปอ.), 2561 ; สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ องค์การมหาชน (สทศ.), 2563) เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1996 จากบริษัท Daimler Chysler บริษัท SPSS และบริษัท NCR เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางในการทำเหมืองข้อมูลให้มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือในกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล กระบวนการ CRISP-DM รายละเอียดดัง Figure 1

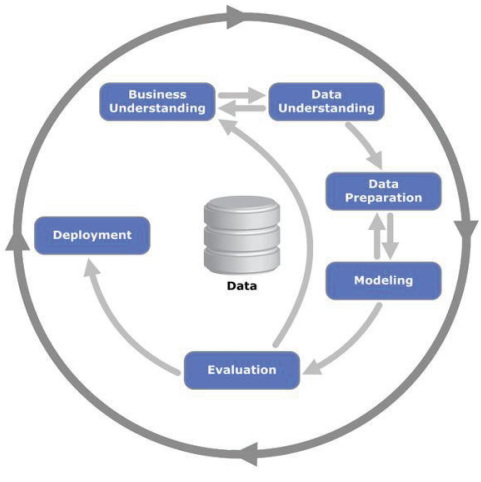


Figure 1 CRISP-DM

จาก Figure 1 แสดงกระบวนการการวิเคราะห์ข้อมูล CRISP-DM มีขั้นตอนการทำงาน 6 ขั้นตอน (Hand & Kamber, 2001) ได้แก่ 1) ขั้นตอนความเข้าใจธุรกิจ (Business Understanding) เป็นขั้นตอนการทำความเข้าใจ ปัญหาหรือโอกาสของธุรกิจ โดยทำการศึกษาปัญหาให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมในการวิเคราะห์เหมืองข้อมูล, 2) ขั้นตอนศึกษาความเข้าใจของข้อมูล (Data understanding) เป็นขั้นตอนของการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เหมืองข้อมูล ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เหมืองข้อมูล, 3) ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data preparation) เป็นขั้นตอนเตรียมข้อมูลตามรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ ได้แก่ การคัดเลือกข้อมูล การคัดกรองข้อมูล การแปลงข้อมูล ซึ่งขั้นตอนการเตรียมข้อมูลจะใช้เวลาพอสมควร, 4) ขั้นตอนการสร้างตัวแบบ (Modelling) เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งการเลือกวิธีการต้องมีความหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้สารสนเทศที่มีประสิทธิภาพ ผู้วิเคราะห์ต้องมีการประเมินความถูกต้องของวิธีการต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ, 5) ขั้นตอนการประเมินผล (Evaluation) เป็นขั้นตอนในการประเมินผลที่ได้จากการวิเคราะห์เหมืองข้อมูลในรูปแบบต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องก่อนที่จะนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้, 6) ขั้นตอนการนำไปใช้ (Deployment) เป็นขั้นตอนการนำผลลัพธ์ที่ได้มาประยุกต์ใช้งาน การนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้อาจนำมาแสดงเป็นรูปแบบรายงาน (Report) หรือพัฒนาเป็นระบบเพื่อความสะดวกต่อการใช้งานของผู้ใช้

2. การจำแนกข้อมูล

การจำแนกข้อมูล (Data Classification) (อนันต์ ปินะเต, 2559) เป็นวิธีการที่ใช้ในการค้นหาข้อมูลสารสนเทศความรู้ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลในระบบฐานข้อมูลขนาดใหญ่ การจำแนกข้อมูลมีกระบวนการสร้างแบบจำลองการจำแนกข้อมูลเพื่อทำนายหมวดหมู่ของข้อมูล (Categories/Class) เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลนักเรียนผู้สมัครเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี มีโอกาสผ่านการคัดเลือกในสาขาวิชาที่สมัครหรือไม่ การวิเคราะห์ข้อมูลจะมีการสร้างตัวจำแนกข้อมูล จากชุดข้อมูลที่เป็นอินพุต ซึ่งแต่ละเรคคอร์ดประกอบไปด้วยเซตของแอทริบิวต์ที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะของผู้สมัคร กระบวนการสร้างตัวจำแนกข้อมูลถูกเรียกว่า Learning หรือ Training ที่เกิดจากการนำเอาขั้นตอนวิธีการจำแนกข้อมูลมาดำเนินการกับข้อมูล ในชุดข้อมูลที่ทำการพิจารณาจะประกอบด้วยเซตของแอทริบิวต์ $x = (x_1, x_2,..., x_n)$ ที่บอกคุณลักษณะต่างๆ ของข้อมูลเรคคอร์ด x นอกจากนั้นเรคคอร์ด x ยังมีข้อมูลอีกหนึ่งแอทริบิวที่บ่งบอกถึงหมวดหมู่ของข้อมูล (Class lable attribute) โดยแอทริบิวต์หมวดหมู่ข้อมูลจะเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-valued) โดยชุดข้อมูลที่เป็นพุตสำหรับการสร้างตัวจำแนกข้อมูลจะถูกเรียกว่าชุดข้อมูลสำหรับสอน (Training data) การจำแนกข้อมูลลักษณะนี้เรียกว่า การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning)

3. การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ

การสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree induction) (อนันต์ ปินะเต, 2559) เป็นกระบวนการสร้างต้นไม้ขึ้นเพื่อใช้ในการตัดสินใจจากข้อมูลที่มีหมวดหมู่ข้อมูล ต้นไม้ตัดสินใจจะประกอบไปด้วย โหนดต่างๆ ซึ่งถูกใช้ในการแสดงถึงเงื่อนไขหรือแอทริบิวต์หนึ่งๆ ของข้อมูล โดยที่แต่ละกิ่งก้านของโหนดหนึ่งๆ จะหมายถึงค่าที่เป็นไปได้จากการทดสอบกับแอทริบิวต์นั้นๆ และจะประกอบไปด้วยโหนดใบ (Leaf node) ซึ่งจะมีหมวดหมู่ข้อมูลจัดเก็บอยู่ โหนดการตัดสินใจนั้นจะมีการสร้างฟังก์ชันสำหรับการทดสอบ $f_m(x)$ การทดสอบจากการส่งข้อมูลเข้าจะทดสอบตามทางเลือกไปจนถึงโหนดใบและจะได้คำตอบจากการค้นหา รายละเอียดดัง Figure 2

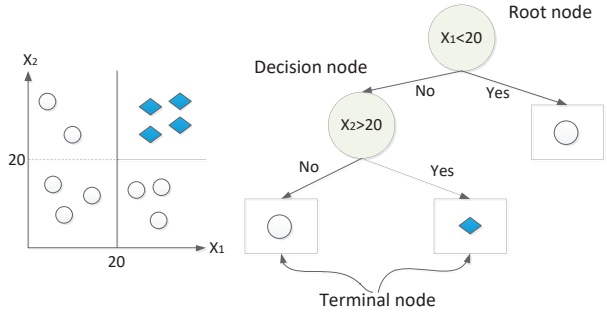


Figure 2 Tree map built from learning platform

อัลกอริทึม C4.5 (ชุติมา อุตมะมุณีย์, 2553: เว็บไซต์) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างต้นไม้ตัดสินใจ จะใช้ค่ามาตรฐานเกนในการตัดสินใจเลือกคุณสมบัติที่ใช้เป็นรากหรือโหนดในต้นไม้ โดยการคำนวณจากการเลือกคุณสมบัติที่มีค่าเกนสูงที่สุดมาเป็นโหนดรากการหาค่าเกนต้องมีการหาค่า Entropy, ค่า Information gain และค่า Split Information วิธีการหาค่ามีดังนี้

ค่า Entropy เป็นการหาค่าสารสนเทศของข้อมูล (Entropy measure) รายละเอียดดังสมการ 1

$$Entropy(S) = \sum_{i=1}^{c} -P_i \log_2 P_i \qquad (1)$$

โดย

S คือ แอทริบิวต์ที่นำมาวัดค่า

P_i คือ สัดส่วนของจำนวนสมาชิกในกลุ่ม i เท่ากับจำนวนสมาชิกทั้งหมดของกลุ่มตัวอย่าง

ค่า Information gain เป็นการหาค่าสารสนเทศก่อนนำไปใช้ในการหาค่ามาตรฐานอัตราส่วน เกน (Gain ratio) รายละเอียดดังสมการ 2

$$Gain(S, A) = Entropy(S) - \sum_{v=Values(A)} \frac{|S_v|}{|S|} Entropy(S_v) \qquad (2)$$

โดย

A คือ แอทริบิวต์ A

$|S_v|$ คือ สมาชิกของแอทริบิวต์ A

$|S|$ คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมดของกลุ่มตัวอย่าง

ค่า Split Information เป็นการหาค่าสารสนเทศของการแบ่งข้อมูลใหม่ รายละเอียดดังสมการ 3

$$Split\ Information(S, A) = -\sum_{i=1}^{n} \frac{|S_i|}{S} \log_2 \frac{|S_i|}{|S|} \qquad (3)$$

โดย

S_i คือ จำนวนของจำนวนสมาชิกในกลุ่ม i

ค่า Gain ratio เพื่อใช้ในการลดทอนความเอนเอียงลงที่เกิดจากความโน้มเอียงจากการใช้ค่าเกน รายละเอียดดังสมการ 4

$$Gain\ Ratio(S, A) = \frac{Gain(S, A)}{Split\ Information(S, A)} \qquad (4)$$

4. การวัดประสิทธิภาพ

การจำแนกข้อมูลด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ (อนันต์ ปินะเต, 2559) โดยใช้ค่าความถูกต้องของแบบจำลอง (Accuracy) ค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Precision) ค่าความระลึกของแบบจำลอง (Recall) และค่าความเหวี่ยงของแบบจำลอง (F-Measure) การวัดประสิทธิภาพของการจำแนกข้อมูลตามแนวคิดทางการค้นคืนสารสนเทศโดยอาศัยตาราง Confusion Matrix (สุพัฒน์กุล ภัคโชค, 2556) ในการคำนวณค่ารายละเอียดดัง Figure 3

		Predicted	
Actual	**Class**	**Yes**	**No**
	Yes	TP	FN
	No	FP	TN

Figure 3 Confusion Matrix

TP คือ จำนวนข้อมูลแบบจำลองการจำแนกกลุ่ม Yes และคำตอบเป็นกลุ่ม Yes

TN คือ จำนวนข้อมูลแบบจำลองการจำแนกกลุ่ม No และคำตอบเป็นกลุ่ม No

FP คือ จำนวนข้อมูลแบบจำลองการจำแนกกลุ่ม Yes และคำตอบเป็นกลุ่ม No

FN คือ จำนวนข้อมูลแบบจำลองการจำแนกกลุ่ม No และคำตอบ Yes

ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ ค่าที่บอกถึงความถูกต้องของค่าที่วัดได้ใกล้เคียงความจริง รายละเอียดดังสมการ 5

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (5)$$

ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ ค่าสัดส่วนของข้อมูลที่ถูกต้อง และตรงตามความต้องการที่ถูกค้นคืนทั้งหมด หรือเป็นค่าที่แสดงถึงการค้นคืนสารสนเทศและมีความเป็นไปได้ตรงตามความต้องการมากน้อยเพียงใด รายละเอียดดังสมการ 6

$$\Pr ecision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

ค่าความระลึก (Recall) คือ ค่าสัดส่วนของข้อมูลที่ตรงตามความต้องการที่ถูกค้นคืนกับข้อมูลที่ต้องการทั้งหมด หรือค่าที่แสดงถึงความครอบคลุมในการสืบค้นข้อมูลสารสนเทศที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่ผู้ใช้ต้องการมากที่สุด รายละเอียดดังสมการ 7

$$\Re call = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

ค่าความเหวี่ยง (F-Measure) คือ ค่าเฉลี่ยค่าความแม่นยำในการตรวจพบ และค่าความระลึกเป็นการวัดค่าความแม่นยำโดยรวม รายละเอียดดังสมการ 8

$$F - Measure = \frac{2 * \Pr ecision * \Re call}{\Pr ecision + \Re call} \quad (4)$$

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ข้อมูลการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีการศึกษา 2561-2563 โดยการใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data mining) ด้วยวิธีการจำแนกข้อมูลแบบต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) เพื่อค้นหาสารสนเทศที่ซ่อนอยู่ในข้อมูล และนำรูปแบบที่ได้มาพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS เพื่อให้นักเรียนผู้ที่สนใจเข้าศึกษา ร่วมถึงครูแนะแนวหรือผู้ปกครองสามารถทดลองใช้ระบบสนับสนุนการเลือกสาขาวิชาเพื่อให้ทราบโอกาสในการผ่านเข้าศึกษาในสาขาวิชาที่ต้องการสมัคร ก่อนการสมัครในสาขาวิชานั้นจริง ขั้นตอนการดำเนินงานและกรอบแนวคิดการวิจัยมีรายละเอียดดัง Figure 4

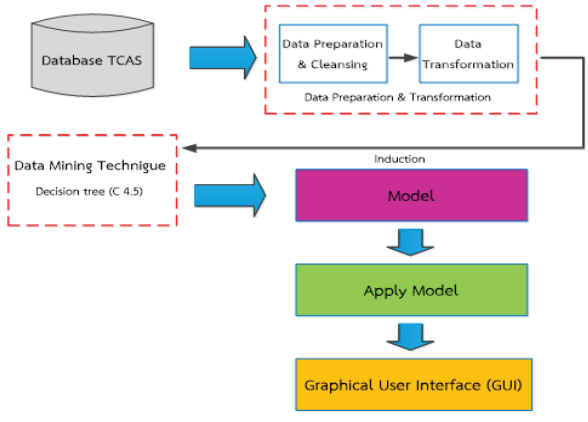


Figure 4 Conceptual framework

การวิจัยนี้ได้เลือกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาผลการผ่านการคัดเลือกเข้าศึกษาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งได้แก่ ข้อมูลผลคะแนนการทดสอบความรู้ทั่วไป (General Aptitude Test: GAT) และผลคะแนนการทดสอบความรู้ทางวิชาการและวิชาชีพ (Professional and Academic Aptitude Test: PAT) รายละเอียดผลคะแนนวิชาของการทดสอบ GAT/PAT ที่ใช้เป็นข้อมูลทดลองมีรายละเอียด ดังนี้ 1) GAT (ตอนที่ 1) คือคะแนนความสามารถในการอ่าน การเขียน การคิดวิเคราะห์ และการแก้โจทย์ปัญหา, 2) GAT (ตอนที่ 2) คือคะแนนความสามารถในการสื่อสารด้านภาษาอังกฤษ, 3) GAT (รวม) คือคะแนนรวมทั้ง 2 ตอน, 4) PAT1 คือคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์, 5) PAT2 คือคะแนนความถนัดทางวิทยาศาสตร์, 6) PAT3 คือคะแนนความถนัดทางวิศวกรรมศาสตร์, 7) PAT4 คือคะแนนความถนัดทางสถาปัตยกรรมศาสตร์, 8) PAT5 คือคะแนนความถนัดทางวิชาชีพครู, 9) PAT6 คือคะแนนความถนัดทางศิลปกรรมศาสตร์, 10) PAT7 คือคะแนนความถนัดทางภาษาต่างประเทศ และคะแนนรวม (Sum Score) คือคะแนนรวมตามองค์ประกอบของสาขาวิชา รายละเอียดตัวอย่างข้อมูล ดัง Table 1

Table 1 Data sample

GAT1	GAT2	GAT	PAT1	PAT2	PAT3	PAT4	PAT5	PAT6	PAT7	Sum Score
66.58	62.71	68.17	53.69	69.35	57.39	0.00	71.73	66.58	62.71	68.17
59.78	62.07	53.14	63.12	65.20	0.00	0.00	68.52	59.78	62.07	53.14
48.22	50.35	45.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.22	50.35	45.18
45.16	43.31	19.60	43.58	55.50	38.36	0.00	0.00	45.16	43.31	49.60
50.23	52.69	46.06	35.49	47.18	0.00	0.00	49.26	50.23	52.69	46.06
49.73	55.18	40.76	55.71	49.96	44.34	0.00	0.00	49.73	55.18	40.76
59.09	58.94	56.67	65.14	54.11	0.00	0.00	66.92	59.09	58.94	56.67
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

จาก Table 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากข้อมูลผู้วิจัยได้ทำการเตรียมข้อมูลโดยการรวมข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์และทำการเตรียมข้อมูลเพื่อให้พร้อมในการวิเคราะห์ตามอัลกอริทึมของการทำเหมืองข้อมูล วิธีต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลทศนิยมแบบต่อเนื่องและมีการกระจายของข้อมูล ซึ่งผู้วิจัยต้องทำการลดการกระจายของข้อมูลโดยการจัดทำกลุ่มข้อมูล (Binning data) โดยการแบ่งช่วงผลคะแนนเพื่อความเหมาะสมของการวิเคราะห์ข้อมูล งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการแปลงคุณลักษณะของข้อมูลแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปบบของคุณลักษณะข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อช่วยในการลดขนาดและความซับซ้อนของข้อมูล โดยใช้หลักการแบ่งช่วงข้อมูล (Discretization) โดยการแบ่งช่วงข้อมูลตามกลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 กลุ่มคะแนน GAT (ตอนที่1), GAT (ตอนที่ 2), GAT (รวม), PAT1, PAT2, PAT3, PAT4, PAT5, PAT6 และ PAT7 จากคะแนนแต่ละวิชาทำการแบ่งระดับคะแนนออกเป็น 4 ระดับได้แก่ ระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 แทนค่าเป็น (L), ระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 แทนค่าเป็น (M), ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 แทนค่าเป็น (H), ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 แทนค่าเป็น (VH) และกลุ่มที่ 2 คะแนนรวม (Sum Score) แบ่งระดับคะแนนออกเป็น 4 ระดับได้แก่ ระดับโอกาสผ่านเข้าศึกษา น้อย คะแนนรวมระหว่าง 0.00-50.58 แทนค่าเป็น (Low), ระดับโอกาสผ่านเข้าศึกษา ปานกลาง คะแนนรวมระหว่าง 50.59-65.10 แทนค่าเป็น (Moderate), ระดับโอกาสผ่านเข้าศึกษา มาก คะแนนรวมระหว่าง 65.11-79.62 แทนค่าเป็น (High), ระดับโอกาสผ่านเข้าศึกษา มากสุด คะแนนรวมระหว่าง 79.63-100 แทนค่าเป็น (Most) จากการเตรียมข้อมูล การลดการกระจายของข้อมูลโดยจัดกลุ่มข้อมูล และกำหนดระดับของคะแนนสามารถแสดงรายละเอียดดัง Table 2

Table 2 Variable sample

GAT1	GAT2	GAT	PAT1	PAT2	PAT3	PAT4	PAT5	PAT6	PAT7	Sum Score
VH	H	VH	H	VH	H	L	VH	VH	H	Most
H	H	H	H	VH	L	L	VH	H	H	High
M	M	M	L	L	L	L	L	M	H	Low
M	M	M	M	H	L	L	L	M	M	Low
M	H	M	L	M	L	L	M	M	H	Low
M	H	M	H	M	M	L	L	M	H	Moderate
H	H	H	VH	H	L	L	VH	H	H	High
VH	VH	VH	H	H	M	L	L	L	L	Moderate
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

จาก Table 2 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำแนกข้อมูลแบบวิธีต้นไม้ตัดสินใจ งานวิจัยนี้มีการวัดประสิทธิภาพผลการวิเคราะห์ซึ่งวัดประสิทธิภาพจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) การแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่มคือ ข้อมูลทดสอบ (Data testing) และข้อมูลเรียนรู้ (Data training) โดยการแบ่งข้อมูลแยกตามสาขาวิชาเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งใช้หลักการแบ่งข้อมูลแบบ Cross validation เป็นการแบ่งข้อมูลออกเป็นการตรวจสอบแบบไขว้ โดยเลือกใช้แบบ 10 ส่วน (10 fold cross validation)

ขั้นตอนทำการสร้างโหนดสำหรับข้อมูลทั้งหมดในชุดข้อมูลแอทริบิวต์ จากนั้นทำการค้นหาแอทริบิวต์ที่ใช้ในการแยกข้อมูลออกเป็นชุดย่อยๆ ด้วยการคำนวณหาค่าเกนของแต่ละแอทริบิวต์ (GAT1, GAT2, GAT, PAT1, PAT2, PAT3, PAT4, PAT5, PAT6 และ PAT7) ดังสมการ 1

ขั้นตอนการคำนวณค่าเกนความรู้ของแต่ละแอทริบิวต์ โดยทำการพิจารณาแอทริบิวต์ GAT1 ที่มีค่า 4 ค่า คือ L, M, H และ VH ตามลำดับ หลังจากคำนวณค่าเกนของ GAT1 แล้วจะทำการคำนวณค่าเกนของแอทริบิวต์อื่นทั้งหมด

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โปรแกรม Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) (Zdravko Markov, 2020: เว็บไซต์) ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปประเภทฟรีโปรแกรม การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการเลือกวิธีการจำแนก (Classify) เลือกวิธีต้นไม้ตัดสินใจ อัลกอริทึม C4.5 (J48) โปรแกรม Weka จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลและจะแสดงผลการวิเคราะห์รายละเอียดดัง Figure 5

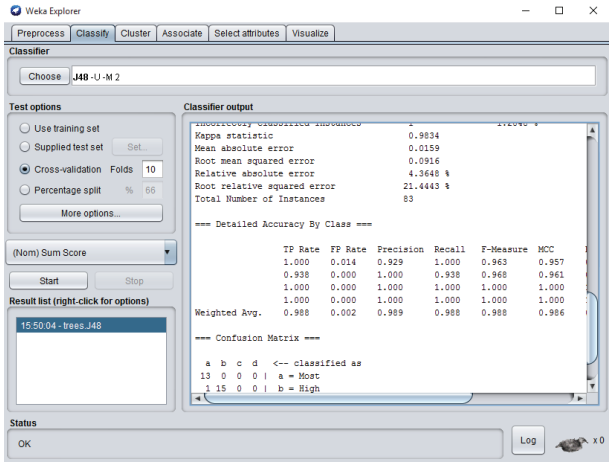


Figure 5 Analysis result

ขั้นตอนการสร้างรูปแบบการจำแนกข้อมูล (Classification model) และการนำแบบจำลองมาใช้มีรายละเอียดดัง Figure 6

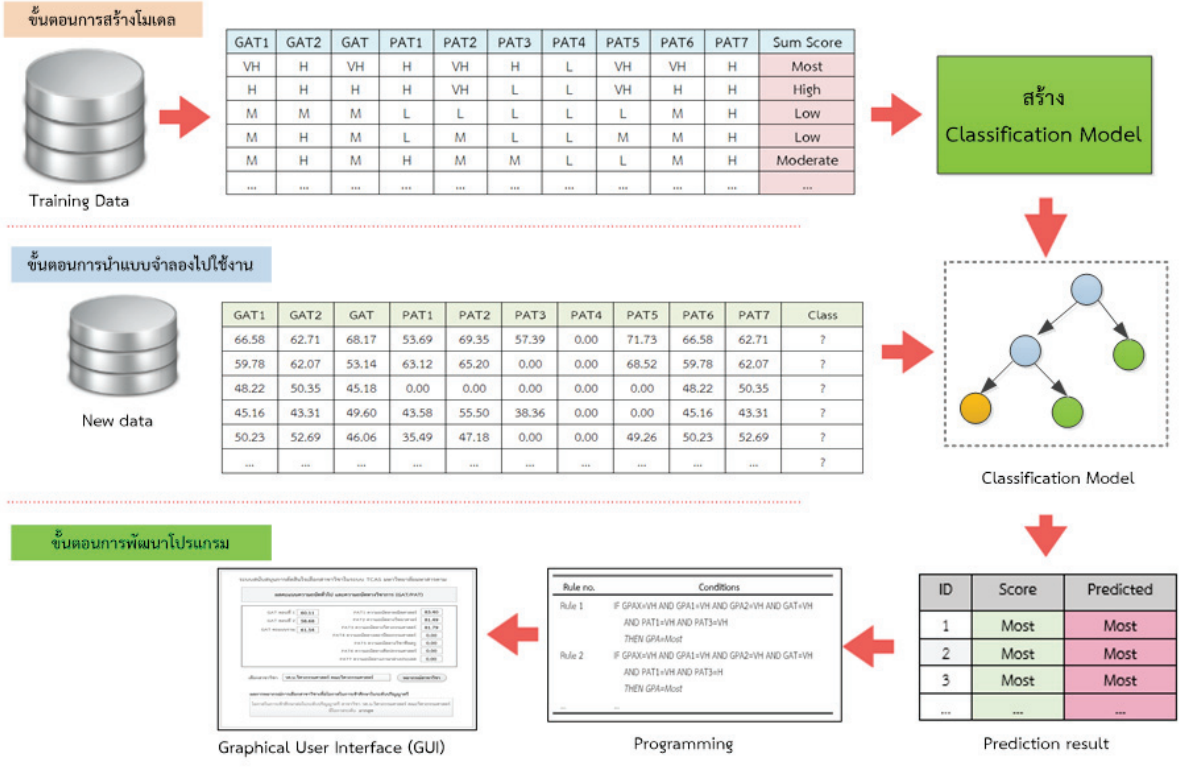


Figure 6 The Creation Classification model

ผลการศึกษาวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Weka โดยทำการวิเคราะห์ในแต่ละสาขาวิชาด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) แบบ C4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละสาขาวิชา ได้ผลการวิเคราะห์จากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าความระลึก (Recall) และค่าความเหวี่ยง (F-Measure) รายละเอียดผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละสาขาวิชาดัง Table 3

Table 3 Result

No.	Bachelor Program	Decision tree (C4.5)				
		Accuracy	Precision	Recall	F-Measure	Class
1	B.ATM. Applied Thai Traditional	87.31	0.880	0.873	0.871	High
2	B.Sc. Emergency Medicine Operation	88.10	0.885	0.881	0.877	High
3	Pharm.D. Pharmaceutical Care	74.78	0.740	0.748	0.740	High
4	B.N.S. Nursing Science	87.26	0.806	0.873	0.824	Moderate
5	B.P.H. Public Health	87.96	0.881	0.880	0.875	High
6	B.Sc. Nutritional Science Dietetics and Food Safety	90.04	0.898	0.900	0.896	Moderate
7	B.Sc. Environmental Health	90.45	0.907	0.905	0.897	Moderate
8	B.Sc. Occupational Health and Safety	91.49	0.915	0.915	0.908	Moderate
9	B.Sc. Chemistry	87.72	0.883	0.877	0.877	High
10	B.Sc. Biology	88.32	0.877	0.883	0.879	High
11	B.Sc. Physics	90.40	0.898	0.904	0.900	High
12	B.Sc. Applied Physics	82.46	0.824	0.825	0.820	High
13	B.Sc. Mathematics	86.51	0.872	0.865	0.863	High
14	B.Sc. Statistics	88.27	0.877	0.883	0.878	High
15	B.Sc. Microbiology	85.83	0.855	0.858	0.856	Moderate
16	B.Sc. Food technology and Nutrition	87.14	0.870	0.871	0.870	Moderate
17	B.Sc. Biotechnology	92.95	0.917	0.930	0.923	Moderate
18	B.Sc. Agriculture (Horticulture)	89.98	0.893	0.900	0.895	Moderate
19	B.Sc. Agriculture (Agronomy)	88.35	0.877	0.884	0.877	Moderate
20	B.Sc. Food Product Development	88.50	0.881	0.885	0.882	Moderate
21	B.Sc. Animal Science	90.52	0.904	0.905	0.904	High
22	B.Sc. Fisheries	90.73	0.909	0.907	0.901	Moderate
23	D.V.M. Veterinary Medicine	80.75	0.811	0.808	0.806	High
24	B.Sc. Environmental Technology	90.53	0.904	0.905	0.898	Moderate
25	B.Sc. Environmental and Natural Resources Management	92.19	0.915	0.922	0.918	Moderate
26	B.Sc. Environmental Education	91.05	0.922	0.911	0.911	Low
27	B.A. Information Science	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
28	B.Sc. Information Technology	82.27	0.815	0.823	0.892	Moderate
29	B.Sc. Computer Science	89.79	0.893	0.898	0.895	Moderate
30	B.Sc. Creative Media	92.27	0.930	0.923	0.923	Moderate
31	B.Sc. Geo-Informatics	96.42	0.971	0.964	0.966	High

Table 3 Result (cont.)

No.	Bachelor Program	Decision tree (C4.5)				
		Accuracy	Precision	Recall	F-Measure	Class
32	B.Com. Arts Communication Arts	99.66	0.997	0.997	0.997	Most
33	B.Eng. Engineering	89.59	0.893	0.896	0.894	Moderate
34	B.Arch. Architecture	85.88	0.866	0.859	0.850	High
35	B.Arch. Urban Architecture	89.37	0.897	0.894	0.889	Moderate
36	B.Arch. Interior Architecture	83.74	0.841	0.837	0.827	Moderate
37	B.F.A. Creative Arts	82.40	0.803	0.824	0.810	High
38	B.L.A. Landscape Architecture	77.98	0.749	0.780	0.758	Moderate
39	B.Sc. Construction Management	99.01	0.981	0.990	0.985	Most
40	B.Acc. Accountancy	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
41	B.B.A. Marketing	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
42	B.B.A. Management	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
43	B.B.A. Business Computer	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
44	B.B.A. International Business (International Program)	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
45	B.B.A. Financial Management	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
46	B.B.A. Business Information Technology	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
47	B.B.A. Human Resources Management	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
48	B.Econ. Business Economics	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
49	B.A. Tourism Management	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
50	B.A. Hotel Management	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
51	B.A. Tourism Management (English Program)	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
52	B.A. Thai Language	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
53	B.A. Language for Media Creation	99.68	0.997	0.997	0.997	Most
54	B.A. English	76.08	0.763	0.761	0.752	High
55	B.A. English for International Communication (International Program)	76.58	0.760	0.766	0.758	High
56	B.A. Business English	72.34	0.751	0.723	0.711	High
57	B.A. Chinese	79.40	0.839	0.794	0.790	Moderate
58	B.A. Japanese	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
59	B.A. French	87.77	0.894	0.878	0.880	Most
60	B.A. History	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
61	B.A. Community and Social Development	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
62	B.A. Development Geography for Resources Management	99.39	0.994	0.994	0.994	High
63	B.A. Korean	96.71	0.970	0.967	0.968	Most
64	B.A. ASEAN Languages and Cultures (Khmer Language)	97.82	0.980	0.978	0.979	High
65	B.A. ASEAN Languages and Cultures(Lao Language)	97.05	0.971	0.971	0.971	High
66	B.A. ASEAN Languages and Cultures (Vietnamese Language)	96.20	0.963	0.962	0.962	High

Table 3 Result (cont.)

No.	Bachelor Program	Decision tree (C4.5)				
		Accuracy	Precision	Recall	F-Measure	Class
67	B.Pol.Sci. Political and Government	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
68	B.Pol.Sci. Public Administration	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
69	B.Pol.Sci. international Relations	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
70	B.Ed. General Science	89.29	0.894	0.893	0.893	High
71	B.Ed. Mathematics	86.39	0.860	0.864	0.861	High
72	B.Ed. Social Studies	83.65	0.841	0.837	0.822	Moderate
73	B.Ed. English	82.04	0.814	0.820	0.817	High
74	B.Ed. Thai Language	86.33	0.858	0.863	0.854	Moderate
75	B.Ed. Early Childhood Education	79.92	0.811	0.799	0.788	Moderate
76	B.Ed. Educational Technology and Computer Education	86.93	0.865	0.869	0.860	Moderate
77	B.Sc. Psychology	93.83	0.945	0.938	0.940	Most
78	B.Sc. Sport Science	100.0	1.000	1.000	1.000	Most
79	B.F.A. Visual Arts	91.26	0.912	0.913	0.911	High
80	B.F.A. Performing Arts	96.91	0.969	0.969	0.969	Most
81	B.F.A. Product Design and Development	90.24	0.908	0.902	0.902	High
82	B.M. Music	94.31	0.941	0.943	0.941	Moderate
83	B.A. Cultural Management	100.0	1.000	1.000	1.000	High
84	L.L.B Laws	100.0	1.000	1.000	1.000	Most

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละสาขาวิชา จำนวน 84 สาขาวิชา ด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) แบบ C4.5 สามารถสร้างต้นไม้ และต้นไม้ตัดสินใจ (Decision rule) ในต้นไม้แต่ละสาขาวิชา ตัวอย่างต้นไม้ตัดสินใจ สาขาวิชา วท.บ. วิทยาการคอมพิวเตอร์ (B.Sc. Computer Science) มีลักษณะต้นไม้ตัดสินใจ ดัง Figure 7

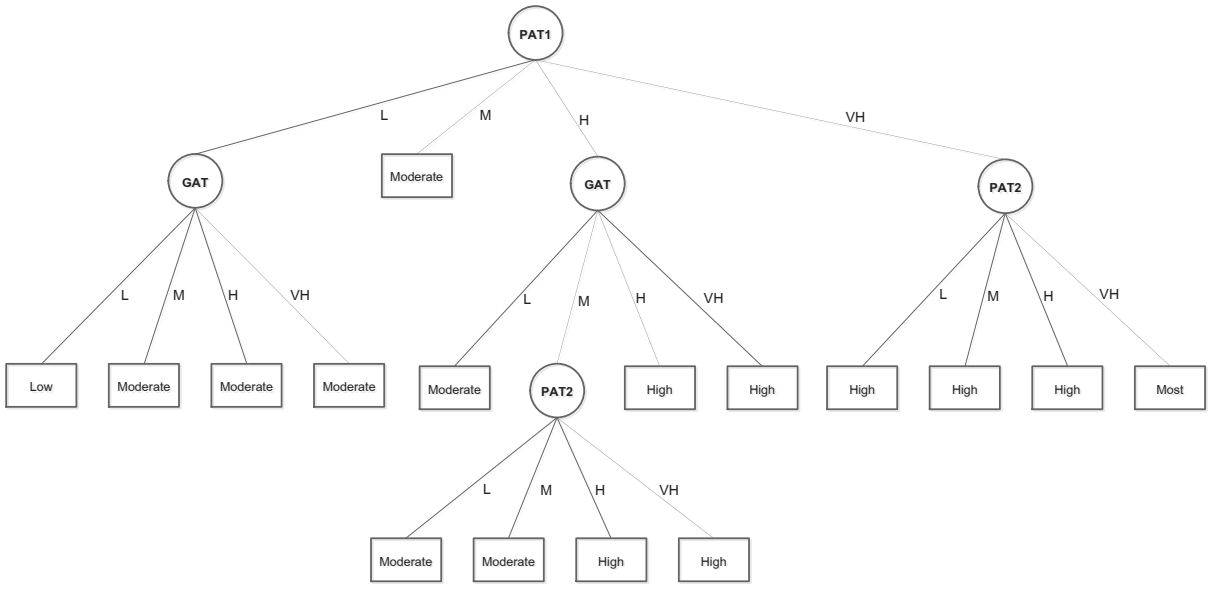


Figure 7 Example Tree

จาก Figure 7 ต้นไม้ที่ได้จากการวิเคราะห์จำแนกข้อมูลด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจของข้อมูลสาขาวิชา วท.บ. วิทยาการคอมพิวเตอร์ จากต้นไม้ตัดสินใจสร้างเป็นกฎการตัดสินใจ (Decision rule) ได้จำนวน 9 กฎ รายละเอียดกฎการตัดสินใจ ดังนี้

Rule1 **IF** PAT1=VH **AND** PAT2=VH

THEN Sum Score=Most

Rule2 **IF** PAT1=VH **AND** PAT2=(H **OR** M **OR** L)

THEN Sum Score=High

Rule3 **IF** PAT1=H **AND** GAT=(VH **OR** M)

THEN Sum Score=High

Rule4 **IF** PAT1=H **AND** GAT=M **AND** PAT2=(VH OR H)

THEN Sum Score=High

Rule5 **IF** PAT1=H **AND** GAT=M **AND** PAT2=(M OR L)

THEN Sum Score=Moderate

Rule6 **IF** PAT1=H **AND** GAT=L

THEN Sum Score=Moderate

Rule7 **IF** PAT1=M

THEN Sum Score=Moderate

Rule8 **IF** PAT1=L **AND** GAT=(VH OR H OR M)

THEN Sum Score=Moderate

Rule9 **IF** PAT1=L **AND** GAT=L

THEN Sum Score=Low

กฎข้อที่ 1 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) และคะแนนความถนัดทางวิทยาศาสตร์ (PAT 2) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) ผู้สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับมากสุด (Most)

กฎข้อที่ 2 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) และคะแนนความถนัดทางวิทยาศาสตร์ (PAT 2) ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) หรือระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) หรือระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 (L) ผู้สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับมาก (High)

กฎข้อที่ 3 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) และคะแนนความถนัดทั่วไป (GAT) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) หรือระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับมาก (High)

กฎข้อที่ 4 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) และคะแนนความถนัดทั่วไป (GAT) ระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) คะแนนความถนัดทางวิทยาศาสตร์ (PAT 2) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) หรือระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับมาก (High)

กฎข้อที่ 5 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) และคะแนนความถนัดทั่วไป (GAT) ระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) และคะแนนความถนัดทางวิทยาศาสตร์ (PAT 2) ระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) หรือระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 (L) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับปานกลาง (Moderate)

กฎข้อที่ 6 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) และคะแนนความถนัดทั่วไป (GAT) ระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 (L) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับปานกลาง (Moderate)

กฎข้อที่ 7 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับปานกลาง (Moderate)

กฎข้อที่ 8 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 (L) และคะแนนความถนัดทั่วไป (GAT) ระดับสูงมาก คะแนนระหว่าง 63.89-100 (VH) หรือระดับสูง คะแนนระหว่าง 51.49-63.88 (H) หรือระดับกลาง คะแนนระหว่าง 39.09-51.48 (M) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับปานกลาง (Moderate)

กฎข้อที่ 9 หากผู้สมัครเลือกสาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มีคะแนนความถนัดทางคณิตศาสตร์ (PAT 1) ระดับต่ำ คะแนนระหว่าง 0.00-39.08 (L) สมัครมีโอกาสผ่านการคัดเลือกระดับน้อย (Low)

กฎการตัดสินใจที่ได้ในแต่ละสาขาวิชาผู้วิจัยสามารถนำมาเขียนโปรแกรมเพื่อพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม รายละเอียดระบบสนับสนุนการตัดสินใจดัง Figure 8

Figure 8 Forecast TCAS

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระบบ TCAS โดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data mining) และผลการวิจัยมาพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

จากการวิจัย การนำเทคนิคเหมืองข้อมูล โดยการจำแนกข้อมูล (Data Classification) ด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) แบบ C4.5 ซึ่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ คือข้อมูลการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาระบบ TCAS ปีการศึกษา 2561-2563 การประเมินผลการวิจัยด้วยค่าความถูกต้อง (Accuracy) หลักการแบ่งข้อมูลในการวิเคราะห์แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือข้อมูลทดสอบ (Data testing) และข้อมูลเรียนรู้ (Data training) ใช้หลักการการตรวจสอบข้อมูลแบบไขว้ Cross validation โดยเลือกใช้แบบ 10 ส่วน (10 fold cross validation)

จากการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีต้นไม้ตัดสินใจ มีค่าความถูกต้องร้อยละ 91.64 สามารถสร้างกฎการตัดสินใจได้ทั้งหมด 358 กฎการตัดสินใจจากทั้งหมด 84 สาขาวิชา โดยสามารถนำกฎการตัดสินใจที่ได้มาพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกสาขาวิชาในระบบ TCAS มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อให้ผู้สมัครได้ทดสอบการเลือกสาขาวิชาก่อนการเลือกสาขาวิชาจริง เพื่อประเมินโอกาสในการผ่านเข้าศึกษา

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์ คือข้อมูลผลคะแนนการทดสอบความรู้ทั่วไป (GAT) และผลคะแนนการทดสอบความรู้ทางวิชาการและวิชาชีพ (PAT) โดยเป็นคะแนนที่ใช้ในการพิจารณาผลผู้ผ่านการคัดเลือกและมีสิทธิ์ในการยืนยันสิทธิ์ในระบบ TCAS โดยการรับสมัครคัดเลือกในระบบ TCAS นั้นมีการสมัคร 5 รอบ ซึ่งรอบที่ 1 นั้นการพิจารณาผลคัดเลือกไม่ได้ใช้คะแนน GAT และคะแนน PAT ซึ่งพิจารณาผลด้วยแฟ้มสะสมผลงาน (Portfolio) ซึ่งในอนาคตผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำปัจจัยด้านแฟ้มสะสมผลงานมาประกอบการวิเคราะห์เพื่อให้ครบคุมการรับสมัครคัดเลือกในระบบ TCAS ในทุกๆ รอบการรับสมัคร

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2563 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. (2563). *ระเบียบการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี*. ค้นเมื่อวันที่ 8 มกราคม 2563 จาก https://admission.msu.ac.th/

กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. (2563). *สรุปผลการดำเนินงานการรับสมัครคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี*. กองบริการการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ชิดชนก ส่งศิริ, ธนาวินท์ รักธรรมานนท์ และกฤษณะ ไวยมัย. (2544). การใช้เทคนิค Data Mining เพื่อค้นหาภาควิชาที่เหมาะสมที่สุดให้กับนิสิต. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 39* ; วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2544. กรุงเทพมหานคร: 43-50.

ชุติมา อุตมะมุณีย์ และประสงค์ ปราณีตพลกรัง. (2553). *การพัฒนาตัวแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบอัตโนมัติออนไลน์สำหรับการเลือกสาขาวิชาออนไลน์สำหรับเลือกสาขาวิชาเรียนของนักศึกษาระดับอุดมศึกษา*. ค้นเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2563 จาก https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JIST/article/download/135149/101010/

ฉัตรเกล้า เจริญผล. (2556). *เอกสารประกอบการสอนรายวิชา Introduction to Data Mining 2013*. คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

สุพัฒน์กุล ภัคโชค (2556). ตัวแบบการเลือกแผนการเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยการพิจารณาผลการเรียนรายวิชาหลัก ด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

สมาคมที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย (ทปอ.). (2561) *ประกาศกระทรวงศึกษาธิการ นโยบายการคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาระบบใหม่.*

สถาบันทดสอบทางการศึกษาแห่งชาติ องค์การมหาชน (สทศ.). (2563). *ระบบรายงานผลการสอบเพื่อการคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาระดับอุดมศึกษา TCAS*. ค้นเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2563 จาก http://escorereport.niets.or.th/

อนันต์ ปินะเต. (2559). การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกสมัครในสาขาวิชาโดยใช้เทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, *35*(4), 411-421.

Hand, J., and Kamber, M. (2001). *Data Mining Concepts and Techniques*. Retrieved January 10, 2020, from https://cs.wmich.edu/~yang/teach/cs595/han/ch01.pdf

Markov, Z. *An Introduction to the WEKA Data Mining System.* January 10, 2020, https://cs.ccsu.edu/~markov/weka-tutorial.pdf

การเปรียบเทียบประสิทธิผลการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์

Comparison of the effectiveness of application development on android operating system between visual programming of game engine on unreal engine and java on eclipse program

อิทธิศักดิ์ ศรีดำ[1*], ศักดา สาครตานันท์[1]
Idhisak Sridam[1*], Sakda Sakorntanant[1]

Received: 10 October 2019 ; Revised: 3 February 2020 ; Accepted: 26 August 2020

บทคัดย่อ

โปรแกรมอันเรียลเอนจิน เป็นการใช้คำสั่งด้วยสัญลักษณ์ กล่องข้อความ เส้นเชื่อมโยง และหน้าต่างคุณสมบัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โปรแกรมมีความง่าย ลดความซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องเขียนรหัสโปรแกรมเพื่อสั่งงานโปรแกรมประยุกต์ บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิผลการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและการใช้ภาษาจาวาผ่านโปรแกรมอีคลิปส์

การศึกษาครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง โดยให้นักพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวน 5 คน ทดลองใช้และพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน เปรียบเทียบกับการใช้ภาษาจาวาผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ หาค่าความแตกต่างโดยใช้สถิติ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการศึกษาพบว่า ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินสามารถนำมาใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้มีประสิทธิผลสูงกว่าการใช้ภาษาจาวาผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ ดังนี้ เวลาในการฝึกพัฒนาโปรแกรม (1,891$\pm$87.83 นาที) เวลาในการพัฒนาโปรแกรม (147.40+3.91 นาที) การหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรม (3.80$\pm$1.30 ครั้ง) เวลาค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต่อครั้ง (5.50$\pm$0.50 นาที) และขนาดของไฟล์โปรแกรม (1.81$\pm$0.05 เมกะไบต์) ค่าสถิติ t เท่ากับ 2,036.15 (p<0.01) 5.77 (p<0.01) 43.31 (p<0.01) 13.39 (p<0.01) และ 2.56 (p<0.01) ตามลำดับ

คำสำคัญ: โปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ เครื่องมือพัฒนาเกม

Abstract

The visual programming language is the command using symbols, links, text boxes, and property windows that is simple because of less complexity, and it does not need to code the application. This article aims to present a comparison of effectiveness for application development on Android, between visual programming language of game engine on Unreal Engine and Java in Eclipse program.

This study is experimental research that was practiced and developed an application on android with visual programming of game engine on Unreal Engine and Java in Eclipse program by five programmers. Sample t-tests, mean and standard deviation were conducted to compare the results.

---

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์และระบบสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

[1] Department of Software Engineering and Information System, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand 10330

* Corresponding author: Idhisak Sridam, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand 10330 E-mail: idhisak@pit.ac.th

The findings revealed that visual programming language of game engine on Unreal Engine is more effective than Java on Eclipse program for mobile applications development on Android as follows: time for application development training (1,891± 87.83 minute), time for application development (147.40±3.91 minute), pause for additional study during application development (3.80±1.30 times), time for additional studies during developing application (5.50±0.50 minute), and size of programming files (1.81±0.05 Mb) *T*-values are 2,036.15 (p<0.01), 5.77 (p<0.01), 43.31 (p<0.01), 13.39 (p<0.01), and 2.56 (p<0.01) respectively.

Keywords*:* Mobile Application, Visual Programming Language, Game Engine

บทนำ

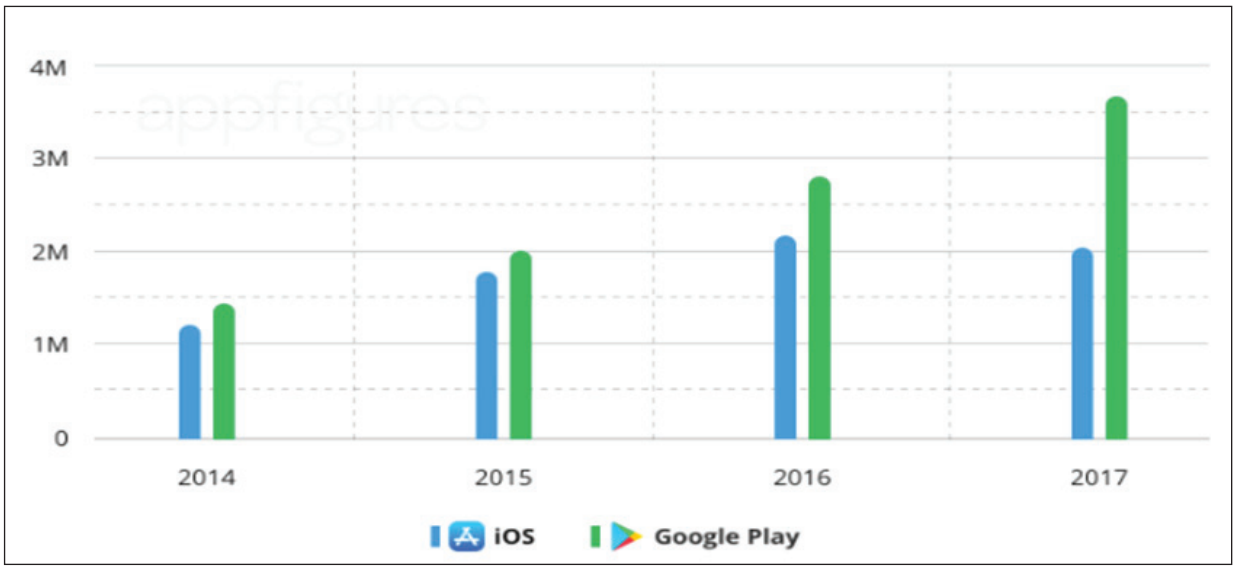


Figure 1 Mobile applications usage trend (Source: https://www.blognone.com/node/101277)

ในปัจจุบันความนิยมในการใช้งานอุปกรณ์เคลื่อนที่ (เช่น สมาร์ตโฟน แท็บเล็ต) ของผู้ใช้งานมีปริมาณสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต ส่งผลต่อการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เป็นระบบปฏิบัติการที่มีลักษณะเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซ (Open Source Software) ทำให้แนวโน้มการใช้โปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ขยายตัวสูงขึ้น (Appfigures Insights, 2019) แสดงดัง Figure 1 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตลาดอุปกรณ์เคลื่อนที่เติบโตอย่างรวดเร็ว ได้แก่การออกแบบตัวเครื่องให้ทันสมัยโดยส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน (User Interface) มีการใช้งานที่ง่ายและสะดวก (Plachaiphiromsin, 2010) การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มีความซับซ้อนและต้องใช้องค์ความรู้ในการพัฒนาในระดับที่สูง และต้องใช้ความสามารถในการเขียนโปรแกรมในระดับที่สูงเช่นกัน (Stackoverflow, 2019) โดยการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่นักพัฒนาโปรแกรมนิยมใช้ คือ โปรแกรมอีคลิปส์ (Eclipse) และโปรแกรมแอนดรอยด์ สตูดิโอ (Android Studio) โดยใช้ภาษาจาวา (Java) ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ (Soin & JanYoy, 2011)

การใช้ภาษาจาวาในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ยังมีความยาก ซับซ้อน และต้องเขียนรหัสโปรแกรม (Code) จำนวนมาก เพื่อสั่งการทำงานของโปรแกรมประยุกต์ ดังตัวอย่างการเขียนรหัสโปรแกรมเพื่อแสดงผลข้อมูลบนหน้าจออุปกรณ์เคลื่อนที่ ดังนี้

```
String dbEmployeeName=mCursor.getString (mCursor.getColumnIndex
(DatabaseEmployee.colEmployeeName)) ;
String dbDepartment=mCursor.getString (mCursor.getColumnIndex
(DatabaseEmployee.colDepartment)) ;
String dbPosition=mCursor.getString (mCursor.getColumnIndex
(DatabaseEmployee.colPosition)) ;
```

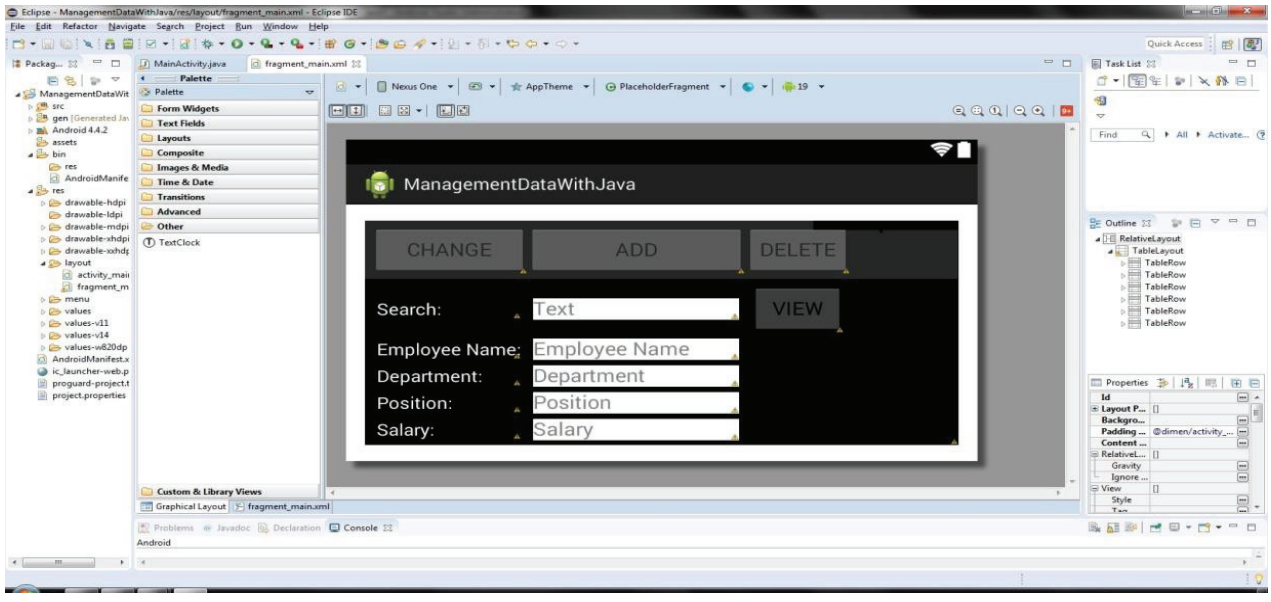


Figure 2 Example of Eclipse Program

```
String dbSalary=
mCursor.getString (mCursor.getColumnIndex
(DatabaseEmployee.colSalary)) ;
AlertDialog.Builder builder=
new AlertDialog.Builder (ViewEmployee.this) ;
builder.setTitle (“Employee Data”) ;
builder.setMessage (“Employee Name: “
+ dbEmployeeName + “\n\nDepartment:
“ + dbDepartment + “\n\nPosition: “ +
dbPosition+ “\n\nSalary: “ + dbSalary) ;
builder.setNeutralButton (“OK”, null) ;
builder.show () ;
```

จากตัวอย่างการเขียนรหัสโปรแกรมเป็นการสั่งให้โปรแกรมประยุกต์แสดงผลข้อมูลพนักงาน ได้แก่ ชื่อพนักงาน แผนก ตำแหน่งงาน และเงินเดือน ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่ส่งต่อมาจากคำสั่งเกี่ยวกับการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงผลออกทางหน้าจออุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ชี้ให้เห็นว่าจะต้องเขียนรหัสโปรแกรมจำนวนมาก ซึ่งแสดงตัวอย่าง User Interface ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ดัง Figure 2 ในส่วนของภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ (Visual Programming Language) เป็นภาษาประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อสื่อสารชุดคำสั่งให้แก่อุปกรณ์ (Device) ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์เคลื่อนที่ (เช่น สมาร์ตโฟน แท็บเล็ต เป็นต้น) ด้วยการจัดองค์ประกอบของโปรแกรมแบบแผนภาพ (Graphic) มากกว่าการใช้คำสั่งแบบข้อความ (Text[5] (Jost, Ketterl, Budde, & Leimbach, (2014)) ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์เป็นการใช้คำสั่งด้วยสัญลักษณ์ กล่องข้อความ เส้นเชื่อมโยง และหน้าต่างคุณสมบัติ (Bragg & Driskill, 1994) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้การเขียนโปรแกรมสามารถเข้าถึงได้ง่ายขึ้นสำหรับมือใหม่และสนับสนุนนักพัฒนาที่มีประสบการณ์ในการทำงานทุกระดับ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างภาพประกอบเพื่ออธิบายกระบวนการชนิดต่างๆ เป็นเทคนิคที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำงานในรูปแบบการอธิบายผ่านวิธีการทางสายตา องค์ประกอบเหล่านี้สามารถจัดการเพื่อออกแบบโปรแกรมได้โดยง่าย เป็นวิธีการเขียนโปรแกรมในลักษณะที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ง่าย (Alexander, 2017) การเขียนโปรแกรมด้วยภาพที่ชื่อว่า “พิกเมเลียน (Pygmalion)” แสดงดัง Figure 3 เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ความคิดสร้างสรรค์ตามธรรมชาติของความคิดมนุษย์ และแปลเป็นภาษาที่คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจได้ในลักษณะสื่อสารกับนักพัฒนาโปรแกรมด้วยการใช้สัญลักษณ์และกล่องข้อความ แทนขั้นตอนต่างๆ ของการสั่งให้โปรแกรมประยุกต์ทำงาน และเชื่อมโยงขั้นตอนต่างๆ ด้วยสัญลักษณ์ลูกศร (Zhang, 2010)

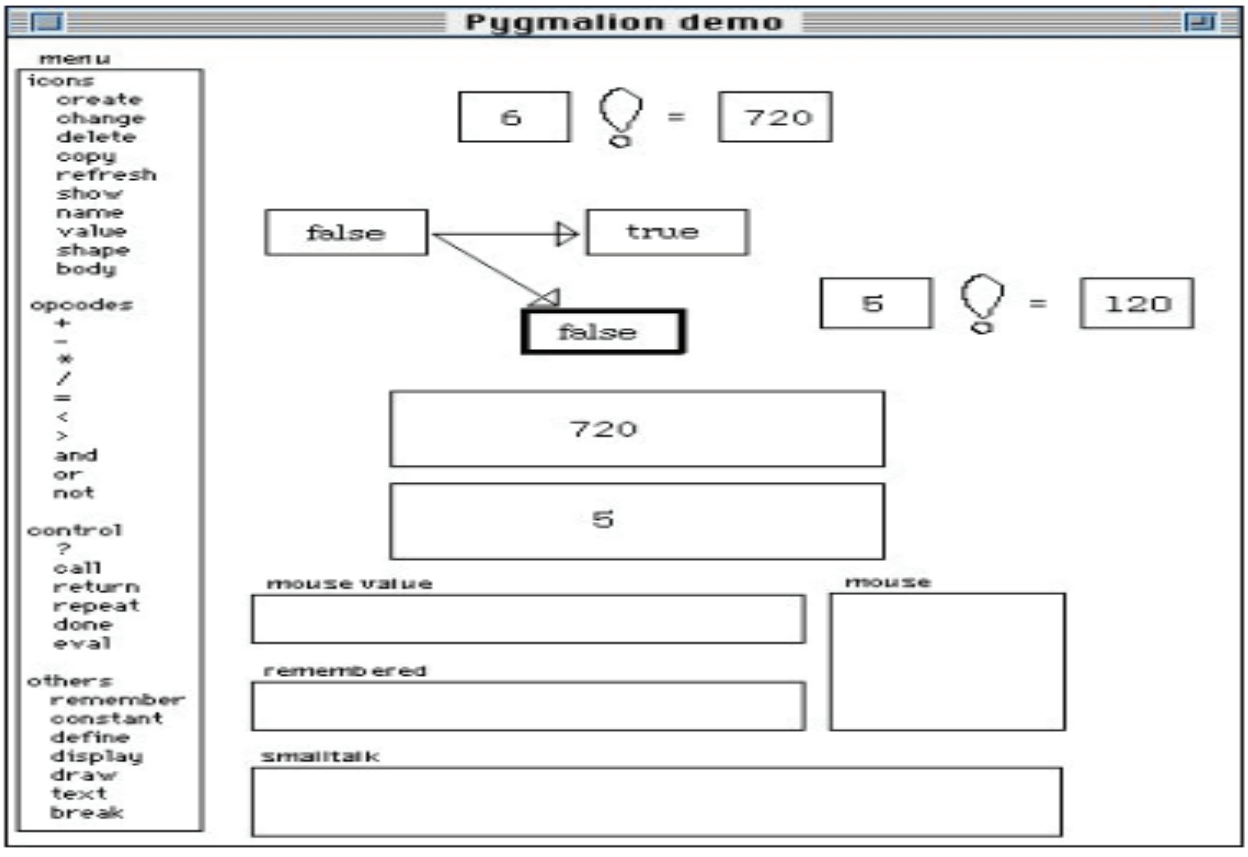


Figure 3 Example of Pygmalion Program (Source: http://worrydream.com/refs/Smith%20-%20Pygmalion.pdf)

Figure 4 Example of Unreal Engine Program

Figure 5 Example of Unity Program (Source: https://gamedev.stackexchange.com/questions/unity-ui-not-scaling-correctly-on-android)

ปัจจุบันภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์จะใช้ในลักษณะงานเฉพาะเจาะจงอย่างการพัฒนาวีดีโอเกมในเครื่องมือพัฒนาเกม (Game Engine) เป็นลักษณะรูปแบบของการเขียนสคริป (Script) (Sieprawski, 2019) บทละครของการเล่นเกมที่สมบูรณ์ตามแนวคิดของการใช้หน้าจอตอบโต้กับผู้ใช้งานแบบโหนด (Node-based Interface) ที่อยู่ในส่วนของการแสดงที่สมจริง สวยงาม มีมิติและใช้งานได้ง่าย โดยผู้พัฒนาเกมไม่ต้องมีพื้นฐานการเขียนโปรแกรมในระดับสูงก็สามารถใช้งานได้ โดยการใช้ตัวแก้ไขรหัสโปรแกรม (Code Editor) (Gregory, 2009) เครื่องมือพัฒนาเกมที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ โปรแกรมอันเรียลเอนจิน (Unreal Engine) และโปรแกรมยูนิตี (Unity) (Game Designing Organization, 2019) โปรแกรมทั้งสองนี้สามารถใช้งานเพื่อการศึกษาได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย แต่จะเสียค่าใช้จ่ายก็ต่อเมื่อมีรายได้ที่เกิดขึ้นในเชิงพาณิชย์ (Unreal Engine, 2019) ตัวอย่างโปรแกรมอันเรียลเอนจินดัง Figure 4 และตัวอย่างโปรแกรมยูนิตีดัง Figure 5 สำหรับการเขียนโปรแกรมเชิงทัศน์ใช้แนวคิดของการใช้หน้าจอตอบโต้กับผู้ใช้งานที่หน้าจอแบบมีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งาน (Game Development, 2019) เครื่องมือการแก้ไขรหัสโปรแกรมของโปรแกรมยูนิตี ได้แก่ ยูนิตีวิทโบล์ท (Unity with Bolt) (Bolt, 2019) แสดงดัง Figure 6 ส่วนเครื่องมือการแก้ไขรหัสโปรแกรมของโปรแกรมอันเรียลเอนจิน ได้แก่ อันเรียลเอนจินบลูพรินท์ (Unreal Engine Blueprint) (Portelli, 2019) แสดงดัง Figure 7

ลักษณะเด่นของโปรแกรมอันเรียลเอนจินเมื่อเปรียบเทียบกับการเขียนโปรแกรมในลักษณะข้อความ (Text-based Programming) ได้แก่ การเขียนโปรแกรมในลักษณะของการลากวาง (Drag and Drop) และ การเชื่อมต่อ (Connection) องค์ประกอบที่อยู่ในรูปแบบกล่องฟังก์ชั่นการดำเนินการ (Operation Function Box) ที่มีคุณสมบัติ (Property) ต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ การทำงานของโปรแกรมตามเหตุการณ์ (Event) ที่กำหนด ซึ่งเป็นการยกเลิกการเขียน Code ที่มีเป็นจำนวนมาก รวมถึงทำให้ง่ายและสะดวกในการพัฒนาโปรแกรม สำหรับตัวอย่างใน Figure 7 เป็นการสั่งให้โปรแกรมนำข้อมูลบางรายการที่อยู่ในตัวแปรชนิด Data Table มาใช้งานโดยกำหนดเป็นตัวแปรใหม่ชนิด Data Table ก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนถัดไป

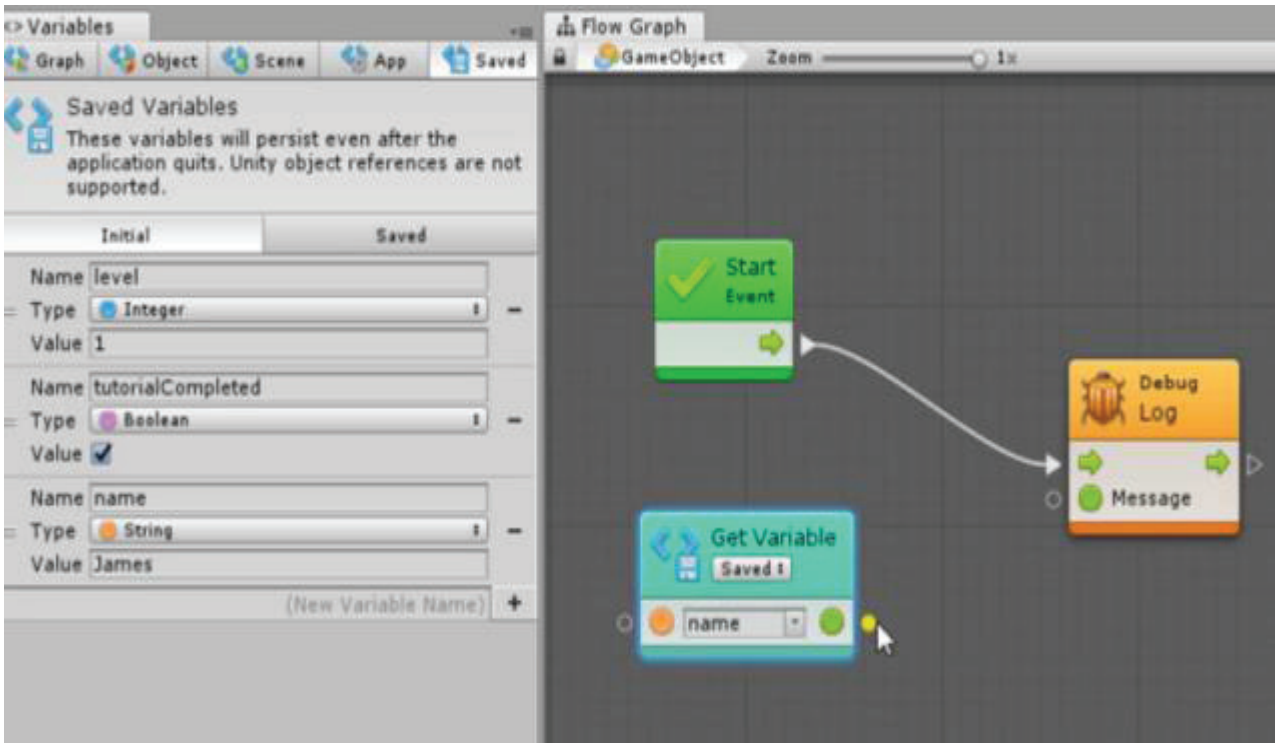


Figure 6 Example of Unity with Bolt Program (Source: https://ludiq.io/bolt)

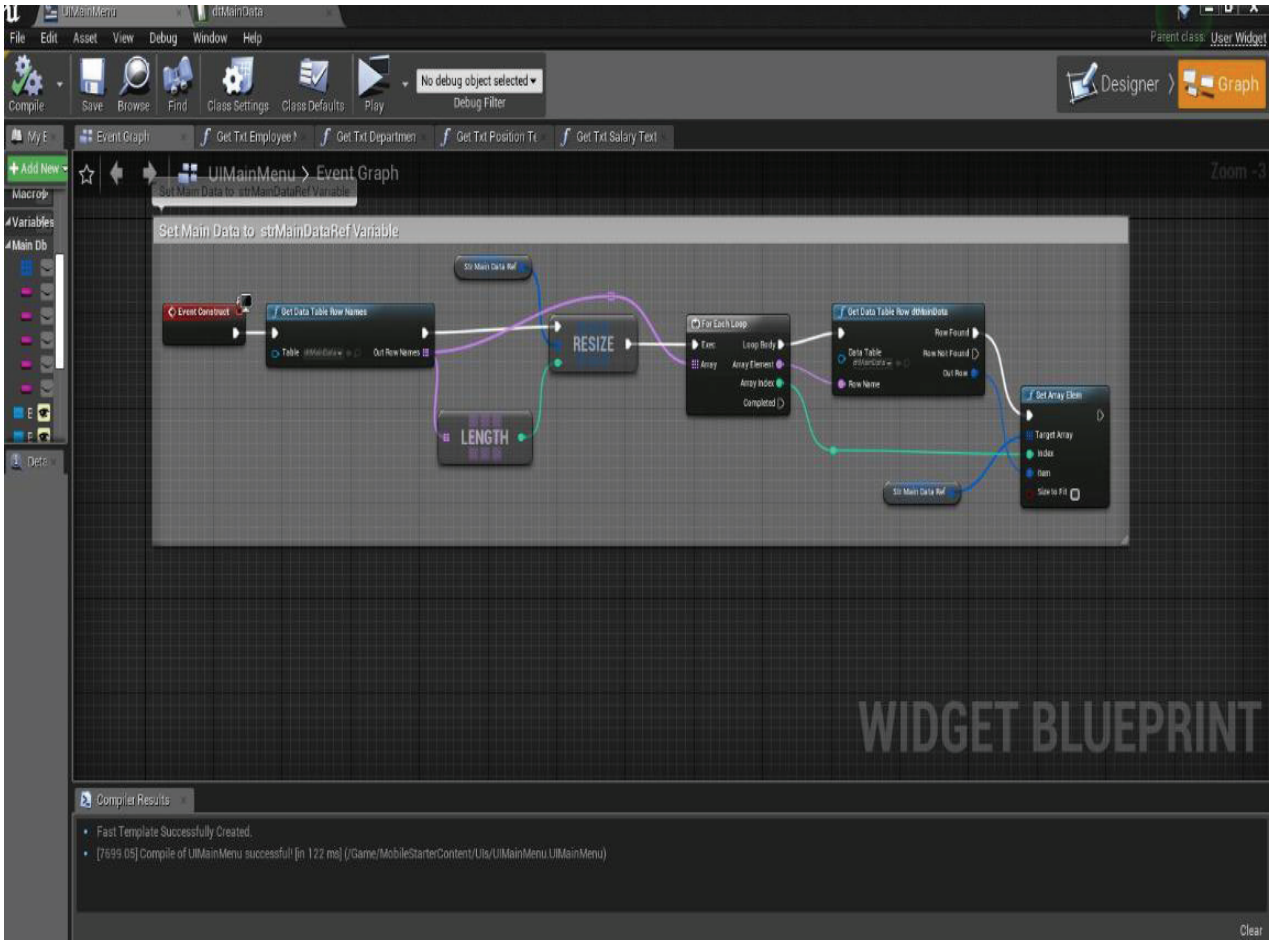


Figure 7 Example of Unreal Engine Blueprint

จากความสำคัญดังกล่าวข้างต้น การศึกษานี้จึงมีแนวความคิดว่าภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินสามารถนำมาพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ได้อย่างมีประสิทธิผลสูงกว่าการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยการใช้ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ ซึ่งมีความยาก ซับซ้อน และต้องเขียนรหัสโปรแกรมจำนวนมากในการสั่งงานโปรแกรมประยุกต์

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางสำหรับตัดสินใจในการนำเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่เหมาะสมในการใช้งาน

2. สามารถนำภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน ใช้เป็นเครื่องมือทางเลือกในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ได้

3. ผู้บริหารของสถาบันการศึกษาต่างๆ สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้อ้างอิงสำหรับ การกำหนดเป็นหลักสูตรการเรียนการสอนเกี่ยวกับ การพัฒนาโปรแกรมในอนาคตได้

การดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิผลการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์อุปกรณ์ของเคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ และทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ของอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน และการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบ ปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 5 ท่าน เข้าร่วมการทดลองแบบเจาะจงและหยุดการคัดเลือก เมื่อได้จำนวนผู้เชี่ยวชาญฯ ครบ 5 ท่าน โดยมีเกณฑ์ การคัดเข้า ได้แก่ 1) สัญชาติไทย 2) สุขภาพแข็งแรง ไม่มีโรคประจำตัว 3) ไม่เคยเข้าร่วมการทดลองนี้มาก่อน 4) ผู้เชี่ยวชาญฯ มีประสบการณ์ด้านการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 3 ปี 5) ไม่เคยมีประสบการณ์ด้าน การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวามาก่อน 6) ไม่เคยมีประสบการณ์ด้านการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์มาก่อน 7) มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านการพัฒนาโปรแกรมด้วย Visual Basic. Net เท่านั้น และ 8) มีความเต็มใจเข้าร่วมการวิจัย โดยมีเกณฑ์ยุติการทดลอง (Withdraw Criteria) 1) เข้าร่วมการทดลองไม่ครบตามกำหนด 2) ขอถอนตัวไม่เข้าร่วมการทดลอง และ 3) เจ็บป่วยขณะเข้าร่วม การทดลอง

2. การชี้แจง ประกอบด้วย การพิทักษ์สิทธิ์ คำชี้แจงการปฏิบัติการเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย และคำชี้แจงการใช้แบบทดสอบประสิทธิผลของโปรแกรมที่นำมาใช้ทดลอง

3. การให้ผู้ร่วมทดลองฝึกการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ โดยมีขอบเขตดังนี้

Table 1 Detailed books database table

ชื่อฟิลด์	ชนิดของข้อมูล	ขอบเขตข้อมูล	คำอธิบาย
ISBN	Text	13 อักษร	รหัส ISBN (เป็น Primary Key ของตาราง)
BookTypeCode	Text	2 อักษร	รหัสประเภทหนังสือ
Title	Text	250 อักษร	ชื่อหนังสือ
Detail	Text	250 อักษร	รายละเอียดหนังสือ
Price	Number	Double	ราคาหนังสือ/หน่วย
BookCost	Number	Double	ต้นทุนหนังสือ/หน่วย
BookInShop	Number	Double	จำนวนหนังสือทั้งหมดในร้าน
PictureFileName	Text	255 อักษร	พาธที่เก็บรูปหนังสือ
BookStatus	Text	1 อักษร	สถานะของหนังสือ: 0=ยกเลิกขาย 1=ขายตามปรกติ

3.1 ใช้โปรแกรมอีคลิปส์เป็นเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์

3.2 ใช้คู่มือการใช้โปรแกรมอีคลิปส์ผ่านเว็บไซต์ https://www.eclipse.org/documentation/

3.3 ฝึกการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ ใช้เวลาฝึกวันละ 3 ชั่วโมง แต่ไม่จำกัดจำนวนวันในการฝึก หยุดฝึกเมื่อ ผู้ร่วมทดลองคิดว่าฝึกสำเร็จพร้อมที่จะสามารถพัฒนาโปรแกรมได้ (บันทึกเวลาที่ใช้ในการฝึกไว้ทุกครั้งที่ ทำการฝึก)

4. การให้ผู้ร่วมทดลองพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ โดยมีขอบเขตดังนี้

4.1 เป็นการพัฒนาโปรแกรมเกี่ยวกับ การจัดการข้อมูลระบบจัดการร้านขายหนังสือในส่วนของการจัดการข้อมูลรายละเอียดหนังสือ ได้แก่ การเพิ่มข้อมูล การปรับปรุงข้อมูล การลบข้อมูล และการค้นหาข้อมูลมาแสดง โดยมีรายละเอียดของผลลัพธ์โปรแกรมที่ต้องการตามตารางฐานข้อมูลดัง Table 1

4.2 ใช้โปรแกรมอีคลิปส์เป็นเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวา

4.3 ไม่จำกัดเวลาในการใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์

5. การให้ผู้ร่วมทดลองฝึกการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน โดยมีขอบเขตดังนี้

5.1 ใช้โปรแกรมอันเรียลเอนจินเป็นเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกม

5.2 ใช้คู่มือการใช้โปรแกรมอันเรียลเอนจินที่อยู่บนเว็บไซต์ https://docs.unrealengine.com/en-US/index.html

5.3 ฝึกพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน ใช้เวลาฝึกวันละ 3 ชั่วโมง แต่ไม่จำกัดจำนวนวันในการฝึก และหยุดฝึกเมื่อผู้ร่วมทดลองคิดว่าฝึกสำเร็จพร้อมที่จะสามารถพัฒนาโปรแกรมได้ โดยบันทึกเวลาที่ใช้ในการฝึกทุกครั้ง

Table 2 Results

ประเด็นทดสอบ	ค่าเฉลี่ยการทดสอบ				t**	p***
	Unreal Engine	SD*	Eclipse	SD*		
เวลาที่ใช้ในการฝึกพัฒนาโปรแกรม (นาที)	1,891.00	87.83	3,229.60	83.67	2,036.15	<0.01
เวลาในการพัฒนาโปรแกรม (นาที)	147.40	3.91	173.80	16.48	5.77	<0.01
การหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่าง การพัฒนาโปรแกรม (ครั้ง)	3.80	1.30	5.70	1.10	43.31	<0.01
เวลาค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต่อครั้ง (นาที)	5.50	0.50	7.20	0.45	13.39	<0.01
ขนาดของไฟล์โปรแกรมสำหรับนำไปใช้งาน (เมกะไบต์)	1.81	0.05	3.10	0.42	2.56	<0.01

* *SD* ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

** *t* ค่าสถิติทดสอบ *t*

*** *p* ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติ ($p<0.01$)

6. การให้ผู้ร่วมทดลองพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน โดยมีขอบเขตดังนี้

6.1 เป็นการพัฒนาโปรแกรมเกี่ยวกับ การจัดการข้อมูลระบบจัดการร้านขายหนังสือในส่วนของการจัดการข้อมูลรายละเอียดหนังสือ ได้แก่ การเพิ่มข้อมูล การปรับปรุงข้อมูล การลบข้อมูล และการค้นหาข้อมูลมาแสดง โดยมีรายละเอียดของผลลัพธ์โปรแกรมที่ต้องการตามตารางฐานข้อมูล ดัง Table 1

6.2 ใช้โปรแกรมอันเรียลเอนจินเป็นเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบ

ปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกม

6.3 ไม่จำกัดเวลาในการใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน

7. การประเมินประสิทธิผลของเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบ ปฏิบัติการแอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียล เอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์โดยผู้เชี่ยวชาญฯ 5 ท่าน ที่เข้าร่วมการทดลอง

8. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการเปรียบเทียบคะแนนประสิทธิผลเฉลี่ยของเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์โดยใช้สถิติ การทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ย 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Paired Sample t-test) และค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) ร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.01

ผลการศึกษา

จาก Table 2 คือ ผลการเปรียบเทียบ ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการทดสอบประสิทธิผล การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ระหว่างภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินและภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ จำแนกตามประเด็นทดสอบ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการฝึกพัฒนาโปรแกรม (1,891±87.83 นาที) เวลาในการพัฒนาโปรแกรม (147.40+3.91 นาที) การหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรม (3.80±1.30 ครั้ง) เวลาค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต่อครั้ง (5.50±0.50 นาที) และขนาดของไฟล์โปรแกรมสำหรับนำไปใช้งาน (1.81±0.05 เมกะไบต์) โดยมีค่าสถิติ t เท่ากับ 2,036.15 ($p<0.01$) 5.77 ($p<0.01$) 43.31 ($p<0.01$) 13.39 ($p<0.01$) และ 2.56 ($p<0.01$) ตามลำดับ

วิจารณ์และสรุปผล

จากการศึกษา พบว่า ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียล เอนจิน สามารถนำมาใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้อย่างมีประสิทธิผลที่สูงกว่าการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ อยู่ 5 ด้าน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการฝึกพัฒนาโปรแกรม เวลาใน การพัฒนาโปรแกรม การหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรม (เช่น การศึกษาในขั้นตอน การทำงานที่ของการพัฒนาโปรแกรม การใช้งานไวยกรณ์ (Syntax) สำหรับการเขียนโปแกรมภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ คุณสมบัติของกล่องฟังก์ชั่นการดำเนินการแต่ละชนิดในโปรแกรมอันเรียลเอนจิน เป็นต้น) เวลาค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต่อครั้ง (เช่น การค้นคว้าคุณสมบัติของกล่องฟังก์ชั่นการดำเนินการแต่ละชนิดในโปรแกรมอันเรียลเอนจินต่อครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับการนำ ไปใช้งาน เป็นต้น) และขนาดของไฟล์โปรแกรมสำหรับนำไปใช้งาน สำหรับลำดับของการฝึกการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์และการฝึกการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการ แอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินจะมีผลต่อความชำนาญการพัฒนาโปรแกรมของของผู้เชี่ยวชาญที่เป็นกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เวลาในการพัฒนาโปรแกรม และการหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรม ผลการศึกษา พบว่า การใช้ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินใช้เวลาที่ใช้ในการฝึกพัฒนาโปรแกรมโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ประมาณ 1,338.60 นาที การใช้ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินใช้เวลาในการพัฒนาโปรแกรมโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรม อีคลิปส์ประมาณ 26.40 นาที การใช้ภาษาโปรแกรม เชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน ผู้พัฒนามีการหยุดค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างพัฒนาโปรแกรมโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ประมาณ 1.90 ครั้ง การใช้ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน ใช้เวลาค้นคว้าเพิ่มเติมระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต่อครั้งโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ประมาณ 1.70 นาที และการใช้ภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจิน มีขนาดของไฟล์โปรแกรมสำหรับนำไปใช้งานโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการใช้ภาษาจาวาที่ใช้ผ่านโปรแกรมอีคลิปส์ประมาณ 1.29 เมกะไบต์

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. นักพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่สนใจนำภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบ ปฏิบัติการแอนดรอยด์ ควรศึกษาคู่มือการใช้งานให้ครบถ้วนเพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการใช้งาน

2. ผู้บริหารของสถาบันการศึกษาต่างๆ ควรกำหนดนโยบายในการเพิ่มหลักสูตรที่เกี่ยวข้องกับ การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียล เอนจิน

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

1. การศึกษานี้ เป็นการศึกษาเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 5 ท่าน ที่มีประสบการณ์ด้าน การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 3 ปี แต่ไม่เคยมีประสบการณ์ด้านการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มาก่อน ควรจะศึกษาประสิทธิผลของการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ด้วยภาษาโปรแกรมเชิงทัศน์ของเครื่องมือพัฒนาเกมที่ใช้ผ่านโปรแกรมอันเรียลเอนจินในกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในช่วงอายุงานต่างๆ เพิ่มเติม

2. การศึกษานี้ ใช้การพัฒนาโปรแกรมเกี่ยวกับการจัดการข้อมูล ได้แก่ การเพิ่มข้อมูล การปรับปรุงข้อมูล การลบข้อมูล และการค้นหาข้อมูลมาแสดง เท่านั้น ควรจะศึกษาการพัฒนาโปรแกรมในลักษณะอื่นเพิ่มเติม เช่น โปรแกรมติดตามการขนส่งแบบแสดงสถานะปัจจุบัน (Real Time) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Alexander, R. (2017). Moving beyond syntax: Lessons from 20 years of blocks programing in agent sheets. *Journal of Visual Languages and Sentient Systems, 3*(1), 68-91.

Appfigures Insights. (2019). *App store growth throughout the years*. Retrieved from https://www.blognone.com/node/101277

Bolt. (2019). *Create your game without coding*. Retrieved from https://ludiq.io/bolt

Bragg, S. D., & Driskill, C. G. (1994). *Diagrammatic graphical programming languages and DoD-STD-2167A*. Anaheim, CA: IEEE.

Game Designing Organization. (2019). *Top 10 video game engines.* Retrieved from https://www.gamedesigning.org/career/video-game-engines

Game Development. (2019). *Unity-UI not scaling correctly on android.* Retrieved from https: /stack exchange. com/questions/115910/unity-ui-on-android

Gregory, J. (2009). *Game engine architecture.* Massachusetts: Wellesley.

Jost, B., Ketterl, M., Budde, R., & Leimbach, T. (2014). Graphical programming environments for educational robots: Open Roberta yet another one. *IEEE Computer Society, 1,* 381-386.

Plachaiphiromsin, S. (2010). Usage trend of mobile application. *Executive Journal, 31*(4), 110-115.

Portelli, G.A. (2019). *Simple look-at blueprint for unreal engine*. Retrieved from http://www.aclock workberry.com/asimplelookat-blueprint-for-unreal-engine

Sieprawski, B. (2019). *Unreal engine version 4.4 released: show case*. Retrieved from https://www.unrealengine.com

Soin, J., & JanYoy, P. (2011). *Basic android app development*. Bangkok: Infopress Group.

Stackoverflow. (2019). *Android SDK (Eclipse) Typing game, how to create an array*. Retrieved from http:// stackoverflow.com

Unreal Engine. (2019). *Unreal engine end user license agreement.* Retrieved from https://www. unrealengine. com/en-US/eula

Zhang, K. (2010). *Visual languages and applications*. Heidelberg: Springer Science & Business Media.

การพัฒนาสมการในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในประเทศไทย โดยวิธีวัดค่าความจุสูงสุดจากแบบจำลองการจราจร

Development of equations to estimate the capacity of two-lane rural highways in Thailand by measuring the maximum capacity using the traffic model

วุฒิไกร ไชยปัญหา[1], ปฏิภาณ แก้ววิเชียร[2]
Wuttikrai Chaipanha[1], Patiphan Kaewwichian[2]

Received: 18 May 2020 ; Revised: 14 July 2020 ; Accepted: 31 July 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบจากสัดส่วนรถจักรยานยนต์ สัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ และการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง ที่มีอิทธิพลต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร และพัฒนาแบบจำลองสมการในการประมาณค่าความจุ โดยใช้วิธีวัดค่าความจุสูงสุดจากการประมวลผลด้วยแบบจำลองสภาพการจราจร ผลการศึกษาพบว่า ทางหลวงชนบทหมายเลข ขก.2009 ซึ่งเป็นช่วงถนนตัวแทนในการศึกษานี้มีค่าความจุสูงสุด (รวมสองทิศทาง) เท่ากับ 3,648 pc/h ซึ่งสูงกว่าค่าความจุสูงสุดตามวิธีของ HCM2010 ที่ระบุไว้เท่ากับ 3,200 pc/h และสามารถพัฒนาสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นสำหรับใช้ในการประมาณค่าความจุที่ได้จากความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบดังสมการ Capacity=3400.825-57.063M-13.525H โดยสัดส่วนรถจักรยานยนต์ (M) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลและผลกระทบต่อความจุสูงสุด รองลงมาคือสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ (H) ในขณะที่การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางไม่มีนัยสำคัญทางสถิติหรือเป็นอิสระกับค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร

คำสำคัญ: ความจุ แบบจำลองสภาพการจราจร ทางหลวงชนบท สองช่องจราจร

Abstract

The objectives of this study were to evaluate the effect of motorcycle proportion, heavy vehicle proportion, and directional split of traffic volume on the capacity of DRR two-lane rural highways and to develop a mathematic model to estimate maximum capacity by using the traffic model. The results showed that DRR No.KorGor.2009, which was the model road used in this study, had the highest capacity (both directions) equaled 3,648 pc/h, and it can be seen that it was higher than the maximum capacity according to the method specified by HCM2010 which equals 3,200 pc/h. Moreover, a linear multiple regression model was developed to estimate the capacity, on the highway as Capacity=3400.825-57.063M-13.525H where the proportion of motorcycles (M) was the most influential factor affecting the capacity, followed by proportion of heavy vehicles (H), while the directional split was not statistically significant or independent from the capacity of the DRR two-lane rural highway.

Keywords: Capacity, Traffic model, DRR, two-lane, rural, highway

[1] อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 40000

[1] Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000

* Corresponding author ; Patiphan Kaewwichian, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000, Thailand. patikaew@gmail.com

บทนำ

การประมาณค่าความจุของช่วงถนนหรือทางหลวงนับเป็นข้อมูลที่สำคัญในการประเมินสภาพการจราจรในปัจจุบัน และช่วยในการตัดสินใจเพื่อปรับปรุงโครงข่ายถนนหรือทางหลวงที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การขยายช่องจราจร การปรับปรุงเครื่องมือและอุปกรณ์ควบคุมการจราจร การจัดช่องทางพิเศษ และการวางแผนเชิงนโยบายอื่นๆ เป็นต้น

โดยวิธีการหลักในการประมาณค่าความจุของทางหลวงสำหรับประเทศไทย คือ การใช้แนวทางจากคู่มือการวิเคราะห์ความจุทางหลวงหรือ Highway Capacity Manual (HCM) แต่เนื่องจากวิธี HCM เป็นคู่มือที่ถูกพัฒนาขึ้นในต่างประเทศ การประยุกต์ใช้งานโดยตรงกับทางหลวงในประเทศไทยที่มีลักษณะการจราจรเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวจะทำให้ผลการประเมินความจุของทางหลวงจากวิธี HCM ขาดความสมเหตุสมผลได้ สาเหตุหลายประการที่ทำให้วิธี HCM ไม่สามารถประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง เช่น สัดส่วนของรถจักรยานยนต์และยวดยานที่ขับเคลื่อนโดยไม่ใช้เครื่องยนต์ที่สูง (Tiwari *et al*., 2008) รวมทั้งพฤติกรรมในการขับขี่สภาพแวดล้อม และลักษณะทางกายภาพของทางหลวงที่มีความแตกต่างจากเงื่อนไขในการวิเคราะห์ของวิธี HCM เป็นต้น (ปิยวัฒน์ ทองเกรียว, 2556 ; Tanwanichkul *et al*., 2013)

หนึ่งในประเภทของทางหลวงซึ่งแบ่งตามพระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ. 2535 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติทางหลวง (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2549 คือ ทางหลวงชนบท ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท โดยทางหลวงชนบททำหน้าที่เป็นโครงข่ายรองในการสนับสนุนการคมนาคมขนส่งกับโครงข่ายถนนหลักอย่างทางหลวงแผ่นดิน สนับสนุนการท่องเที่ยว การพัฒนาชายแดน การพัฒนาเมืองอย่างบูรณาการและยั่งยืน แก้ไขปัญหาจราจร ทางเลี่ยง ทางลัด รวมทั้งเป็นทางหลวงท้องถิ่นให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (กรมทางหลวงชนบท, 2563) ปัจจุบันทางหลวงชนมีมากว่า 3,200 สายทาง ระยะทางในความรับผิดชอบรวม 48,031.391 กิโลเมตร (สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, 2563) ทั้งนี้ทางหลวงชนบทส่วนใหญ่ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำหน้าที่เชื่อมโยงการเดินทางระหว่างชุมชนและหมู่บ้าน จึงมีมาตรฐานชั้นทางที่ไม่สูงมากนักหรือเป็นเพียงถนนขนาด 2 ช่องจราจร ไหล่ทางกว้างไม่เกิน 1.0 เมตร

การประเมินประสิทธิภาพในการรองรับการจราจรที่เกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคตของโครงข่ายทางหลวงชนบทที่กล่าวมาข้างต้นนี้จึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ในการประกอบการพิจารณาขยายช่องจราจรหรือแม้กระทั่งการออกแบบแนวเส้นทางใหม่เพื่อรองรับปริมาณจราจรที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งนับวันจะมีแนวโน้มโครงการพัฒนาและปรับปรุงโครงข่ายทางหลวงชนบทให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในลักษณะเช่นนี้เพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตามด้วยพฤติกรรมการขับขี่และลักษณะการจราจรเฉพาะตัวของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพฤติกรรมการขับขี่ของรถจักรยานยนต์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลอย่างมากที่ทำให้การประมาณค่าความจุโดยใช้วิธี HCM เกิดความคลาดเคลื่อนไปจากสภาพความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจักรยานยนต์ต้องขับขี่บนทางสัญจรหลักของถนนหรือทางหลวงร่วมกับยวดยานประเภทอื่นๆ (Figure 1) เมื่อไหล่ทางมีความกว้างไม่เพียงพอให้รถจักรยานยนต์ขับขี่ได้อย่างปลอดภัย (Federal Highway Administration, 2014) ความกว้างของไหล่ทางมีผลกระทบอย่างมากต่อการให้บริการจราจรและความจุของทางหลวง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับช่วงถนนที่ใช้ความเร็วสูงซึ่งปฏิสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของไหล่ทางกับองค์ประกอบด้านเรขาคณิต และความกว้างของช่องจราจรหลักล้วนมีผลต่อการให้บริการจราจร (Hussain *et al*., 2005) ความกว้างอย่างน้อยที่ต้องการในการขับขี่บนช่องทางจักรยานยนต์อย่างปลอดภัย (Operating Space) สำหรับความเร็วเฉลี่ย 60 กม./ชม. เท่ากับ 1.3 เมตร

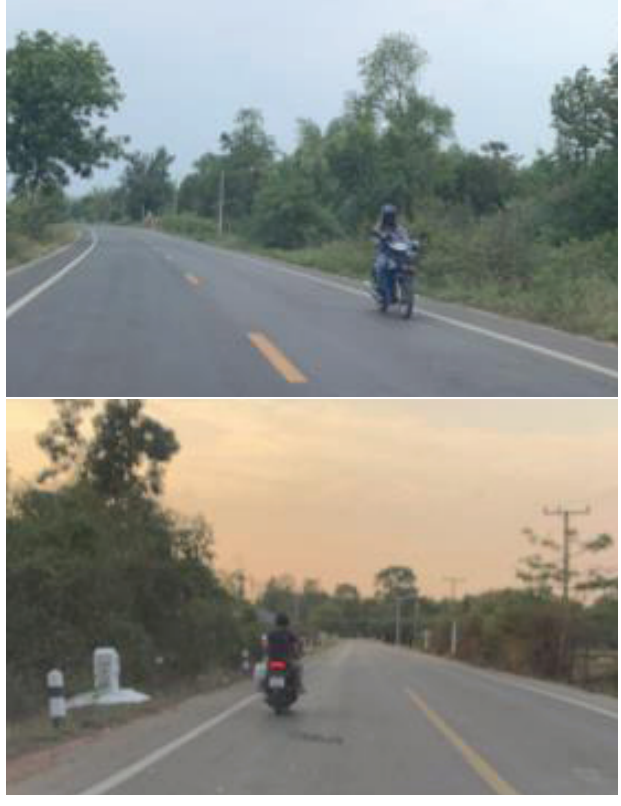


Figure 1 Motorcycle driving behavior on the carriage way

งานวิจัยนี้ได้ทำการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมือง ซึ่งมีความกว้างของไหล่ทางไม่เกิน 1.0 เมตร ด้วยวิธีการประมาณค่าความจุแบบทางอ้อม หรือ Indirect-Empirical Method ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการประมาณค่าความจุของช่วงถนน โดยเลือกใช้แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจร (Traffic Model) ซึ่งมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในการจำลองการเคลื่อนที่ของยวดยานได้อย่างละเอียด สามารถจำลองพฤติกรรมการขับขี่ได้เสมือนจริง รวมทั้งสามารถจำลองลักษณะสภาพการจราจรภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ที่ไม่สามารถสำรวจได้ในภาคสนามทดแทนการประมาณค่าความจุของถนนโดยตรงที่ทำได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติและแทบไม่มีโอกาสในการให้บริการจราจรในสภาพใกล้เต็มความจุ เพื่อนำเสนอค่าความจุสูงสุดและพัฒนาแบบจำลองสมการในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรสำหรับเป็นแนวเลือกในการนำไปใช้งานในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร และทำการพัฒนาแบบจำลองสมการในการประมาณค่าความจุ ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจร

วิธีการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะผลการศึกษาของทางหลวงชนบท 2 ช่องจราจร ความกว้างของช่องจราจร 3.0 เมตร ความกว้างของไหล่ทางทาง ไม่เกิน 1.0 เมตร ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของทางหลวงชนบทที่ให้บริการในประเทศไทยที่มีความแตกต่างจากเงื่อนไขในการวิเคราะห์ของวิธี HCM รวมทั้งมีลักษณะเฉพาะและปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลทำให้การคำนวณค่าความจุมีความคลาดเคลื่อนได้ สำหรับการศึกษานี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตในการคัดเลือกช่วงถนนทางหลวงชนบทที่อยู่ในเขตอำเภอเมืองขอนแก่นเพื่อความสะดวกในการสำรวจและรวบรวมข้อมูลภายใต้กรอบระยะเวลาและงบประมาณที่จำกัด โดยมีเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ศึกษาเบื้องต้น (Transport Research Board (TRB), 2010 ; Department of Highway, 2011 ; Sharma *et al.*, 2013) ได้แก่ มีทัศนวิสัยในการมองเห็นที่ชัดเจน ไม่มีผลกระทบจากอุบัติเหตุ/อุบัติเหตุการณ์ เป็นช่วงถนนที่ตรงความยาวอย่างน้อย 500 เมตร ไม่มีผลกระทบของทางแยกหรือมีระยะห่างระหว่างทางแยกสัญญาณไฟจราจรอย่างน้อย 3.2 กิโลเมตรขึ้นไป จากเงื่อนไขข้างต้นผู้วิจัยได้เลือกทางหลวงชนบท ขก.2009 เป็นช่วงถนนตัวแทนในการศึกษา ดังแสดงใน Figure 2

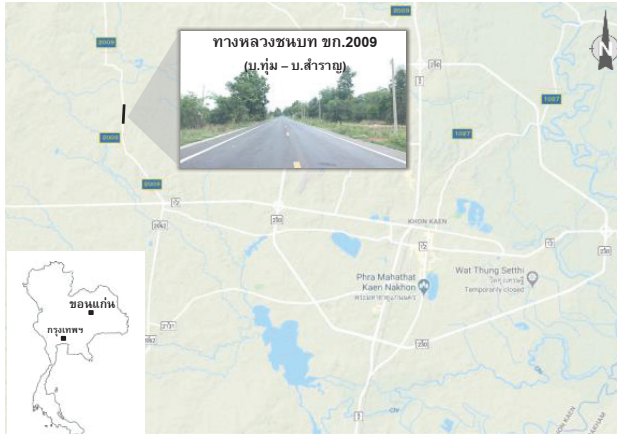
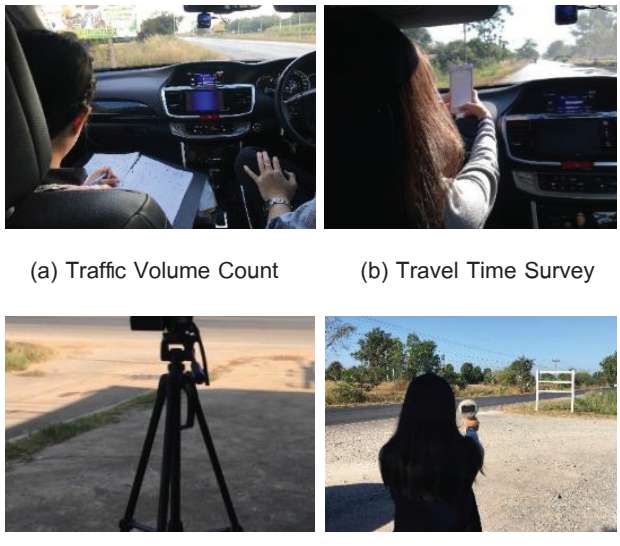


Figure 2 Location of DRR No.KorGor.2009

การสำรวจข้อมูล

การศึกษานี้ได้ทำการสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรเพื่อใช้ในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ได้แก่ (1) ข้อมูลกายภาพ ได้แก่ จำนวนช่องจราจร ความกว้าง และภาพถ่ายทางอากาศ (2) ปริมาณจราจรและสัดส่วนยานพาหนะ (รถจักรยานยนต์ รถยนต์ส่วนบุคคล และรถขนาดใหญ่) และ (3) ข้อมูลสำหรับปรับเทียบ ได้แก่ ความเร็วเฉพาะจุด เวลาในการเดินทาง ปริมาณจราจรบนช่วงถนน และเวลาห่าง ตัวอย่างภาพการสำรวจข้อมูล ดังแสดงใน Figure 3



(a) Traffic Volume Count (b) Travel Time Survey

(c) Headway Time Survey (d) Spot Speed Survey

Figure 3 Data Collection

การคัดเลือกแบบจำลอง

การคัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองสภาพการจราจรในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการทบทวนผลการศึกษาทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

ในการทำงานของแต่ละโปรแกรมที่เป็นที่นิยมและใช้ในการจำลองสภาพการจราจรอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งพบกว่าโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรเพื่อประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมืองในครั้งนี้มีหลายโปรแกรม เช่น Aimsun, Paramics และ Vissim เป็นต้น ซึ่งทุกโปรแกรมล้วนมีความสามารถและประสิทธิภาพโดยรวมไม่แตกต่างและสามารถเทียบเคียงกับโปรแกรมอื่นได้ (วุฒิไกร ไชยปัญหา, 2553) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม PTV Vissim เนื่องจากมีฟังก์ชั่นที่สำคัญที่สามารถจำลองสภาพการจราจรและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้อย่างใกล้เคียงกับสภาพจริงที่เกิดขึ้นบนทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมืองในประเทศไทย เช่น พฤติกรรมการขับขี่ไม่ตามช่องจราจรหลัก (Non-Lane Based Behavior) และการแซงบนช่องจราจรในทิศทางตรงข้าม (Has passing lane) (Planung Transport Verkehr, 2020) ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างมากในการจำลองพฤติกรรมการขับขี่บนทางหลวงชนบทสองช่องจราจรซึ่งได้รับผลกระทบจากรถจักรยานยนต์และการขับแซงยวดยานที่ขับช้ากว่าได้อย่างเสมือนจริง

การพัฒนาแบบจำลองฐาน

การพัฒนาแบบจำลองฐานโดยใช้โปรแกรม PTV VISSIM ดำเนินการโดยเริ่มต้นจากการตั้งค่าข้อมูลพื้นฐานสำหรับแบบจำลอง (Base Data for Simulation) สำหรับการศึกษานี้ เช่น

- การตั้งค่าโครงข่าย (Network Setting) กำหนด Traffic Regulation เป็น Left-side traffic หน่วยวัดเป็น Metric
- ประเภทของยานพาหนะ (Vehicle Type, Class and Category) กำหนดเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล (PC) รถจักรยานยนต์ (MC) และรถขนาดใหญ่ (HV)
- พฤติกรรมการขับขี่ (Driving Behavior) กำหนด Car Following Model เลือกใช้ Wiedemann 99 Model Parameters และ Lane Change Model เลือกใช้ Free Lane Change
- ช่วงเวลา (Time Intervals) กำหนดเป็น 6 ช่วง ๆ ละ 15 นาที (900 วินาที) ครอบคลุมช่วงเวลาที่พิจารณา 1 ชั่วโมง และเพิ่มช่วงของการ Warm-Up Period และ Cool-Down Period รวมช่วงเวลาในการประมวลผล 5,400 วินาที หรือ 90 นาที

หลังจากนั้นทำการสร้างโครงข่ายจราจร (Traffic Network Build) การตั้งค่าตัวแปรในการประมวลผล (Simulation Parameters Setting) ตั้งค่าการประเมินผลลัพธ์ของแบบจำลอง (Evaluations Configuration) ประมวลผลแบบจำลอง (Simulation Run) และการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเบื้องต้น (Error Checking) ตัวอย่างแบบจำลองฐานที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม PTV VISSIM ดังแสดงใน Figure 4

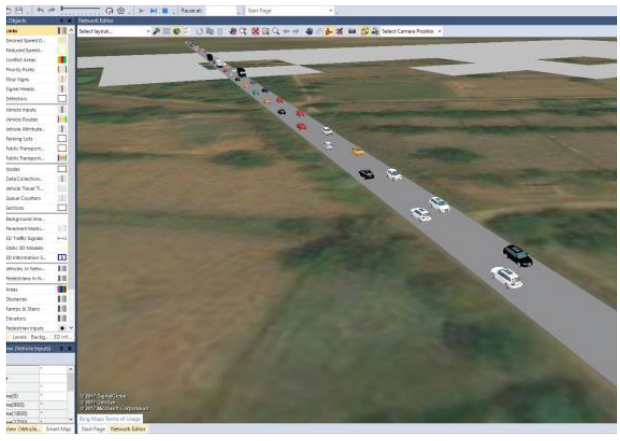


Figure 4 PTV VISSIM Base model of DRR no.ขก.2009

การปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) และการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง (Model Validation)

การปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) ดำเนินการโดยนำแบบจำลองฐานที่ถูกพัฒนาขึ้นมาประมวลผลและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลสภาพการจราจรที่สำรวจในสนามในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้า (07.30-08.30 น.) จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) ซ้ำอีกครั้ง โดยใช้ข้อมูลสภาพการจราจรที่สำรวจในสนามในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเย็น (16.00-17.00 น) โดยทั้งการปรับเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนี้ใช้ตัวชี้วัด คือ ปริมาณจราจรบนช่วงถนน และเวลาในการเดินทาง โดยผลของการปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองมีค่า GEH (Geoffrey E. Havers) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดค่าคลาดเคลื่อนในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามหลักการทางสถิติที่มีหลักการเช่นเดียวกันกับ Chi-Squared อยู่ในช่วง 0.2-0.7 (สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณจราจร GEH ไม่เกิน 5) และค่าร้อยละความแตกต่างอยู่ในช่วง 2.7-10.4 (สำหรับการเปรียบเทียบเวลาในการเดินทาง ต้องคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15) ซึ่งผ่านตามเกณฑ์การปรับเทียบแบบจำลองที่อ้างอิงจาก DMRB (Barton-Aschman Associates Inc. and Cambridge Systematics Inc., 1997) ผลการปรับเทียบแบบจำลองและการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง ดังแสดงใน Table 1 และ Table 2

Table 1 Calibration results of base model

Model Calibrations	Traffic volume (veh/h)		Travelling speed (km/h)	
	Dir. 1	Dir. 2	Dir. 1	Dir. 2
Observe	334	222	74.6	76.2
Model	338	233	69.2	68.2
%Diff.	1.20%	4.95%	-7.15%	-10.41%
GEH	0.22	0.73	-	-

Table 2 Validation results of base model

Model Validations	Traffic volume (veh/h)		Travelling speed (km/h)	
	Dir. 1	Dir. 2	Dir. 1	Dir. 2
Observe	249	305	76.6	69.1
Model	257	301	71.1	67.2
%Diff.	3.21%	-1.31%	-7.18%	-2.72%
GEH	0.50	0.23	-	-

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุในแบบจำลอง

จากการทบทวนผลการศึกษาที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่อาจจะมีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรมีหลากหลาย เช่น จำนวนทางเชื่อม ความกว้างช่องจราจร/ไหล่ทาง สภาพผิวจราจร/ไหล่ทางความลาดชัน/โค้ง การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง สัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ สัดส่วนรถจักรยานยนต์ การจอดรถและสภาพอากาศ เป็นต้น (วุฒิไกร ไชยปัญหา และคณะ, 2561) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสภาพที่เข้าใกล้อุดมคติและกำหนดลักษณะทางกายภาพที่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบและให้บริการในปัจจุบัน รวมทั้งพิจารณาเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ศึกษา สามารถกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในการศึกษานี้ได้ดังนี้

1) สัดส่วนรถจักรยานยนต์ (Percent Motorcycle) รถจักรยานยนต์ไม่ได้ถูกรวมเข้าไปในการประมาณค่าความจุหรือในขั้นตอนในการวิเคราะห์ของ HCM ใดๆ ทั้งสิ้น เนื่องจากในสหรัฐอเมริกามีสัดส่วนการจดทะเบียนรถจักรยานยนต์น้อยมาก (Tiwari *et al*., 2008) แต่สำหรับประเทศไทยรถจักรยานยนต์มีสัดส่วนการใช้ทางหลวงชนบทในบางสายทางอาจมากถึงร้อยละ 30 โดยจักรยานยนต์มีผลต่อพฤติกรรมในผู้ขับขี่และการใช้ความเร็วบนทางหลักซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความจุของช่วงถนน สัดส่วนรถจักรยานยนต์สำหรับการศึกษานี้กำหนดช่วงเป็น 0%, 10% 20% และ 30%

2) สัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ (Percent Heavy Vehicles) พิจารณาจากการกระจายของสัดส่วนบนทางหลวงชนบทตามข้อมูลปริมาณการจราจรบนทางหลวงชนบทในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงชนบทขอนแก่น (กรมทางหลวงชนบท, 2562) การศึกษานี้กำหนดช่วงสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่เป็น 0%, 5% และ 10%

3) การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (Directional Split) เมื่อปริมาณจราจรเพิ่มสูงขึ้นความต้องการในการแซงจะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ในขณะที่โอกาสและความเป็นไปได้ในแซงกลับน้อยลงเนื่องจากปริมาณจราจรในทิศทางตรงข้ามหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อความจุของทางหลวงสองช่องจราจรได้ การศึกษานี้กำหนดช่วงของการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางที่มีความเป็นไปได้ตามแนวทางของ HCM (Transport Research Board (TRB), 2010) เท่ากับ 50/50, 60/40 และ 70/30

การประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองสภาพการจราจร

การประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองสภาพการจราจร โดยการใช้แบบจำลองที่ได้ทำการปรับเทียบและทำการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว กำหนดสถานการณ์ในการจำลองปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยพร้อมกับเพิ่มปริมาณจราจรขึ้นทุกๆ 200 คัน/ชั่วโมง/ทิศทาง จนกระทั่งเกินความจุที่จะสามารถรับได้ สร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและปริมาณจราจร โดยแต่ละสถานการณ์จำลองถูกประมวลผลจำนวน 11 ครั้ง (Washington State Department of Transportation, 2014) เพื่อเป็นการสุ่มพฤติกรรมการขับขี่ให้แตกต่างกันในการประมวลผลในแต่ละครั้ง สถานการณ์จำลองสำหรับการศึกษานี้ ดังแสดงใน Figure 5

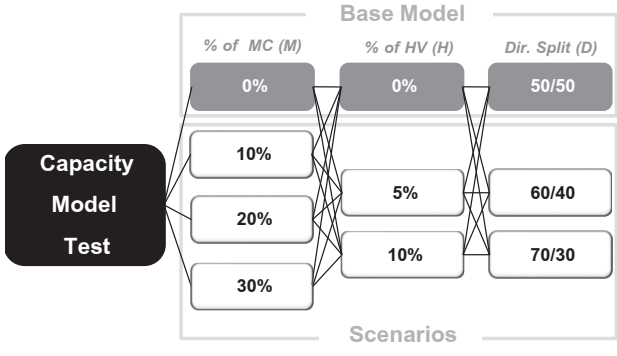


Figure 5 Scenarios test

ผลการวิจัย

การประมาณค่าความจุในสภาพพื้นฐาน (Base Condition)

ผลจากการประมาณค่าความจุสูงสุดของทางชนบทสองช่องจราจร ด้วยแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคสำหรับแบบจำลองในสภาพพื้นฐานหรืออุดมคติ (Base Condition) พบว่า มีค่าความจุสูงสุด (รวมสองทิศทาง) เท่ากับ 3,648 pc/h ซึ่งสูงกว่าค่าความจุสูงสุดตามวิธีของ HCM 2010 ที่ระบุว่า ความจุของทางหลวงสองช่องจราจรภายใต้สภาพในอุดมคติ คือ 1,700 pc/h ในทิศทางเดียว และสูงสุดที่ 3,200 pc/h รวมสองทิศทาง ผลการประมาณค่าความจุและความสัมพันธ์ระว่างความเร็วและปริมาณจราจรในสภาพพื้นฐานดังแสดงใน Figure 6

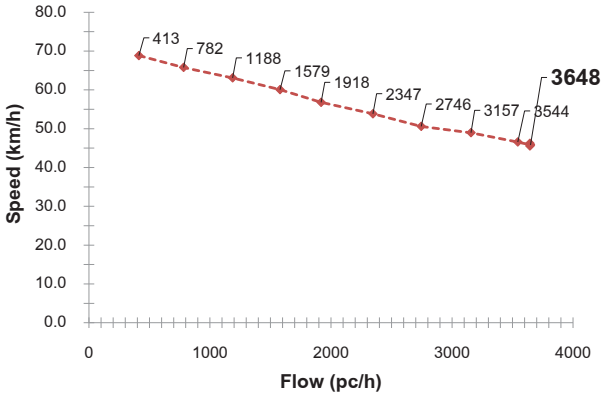


Figure 6 Speed-Flow Curve of base model

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยที่มีต่อความจุ

ผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรในการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในแต่ละปัจจัยพิจารณาดังนี้

1) สัดส่วนรถจักรยานยนต์ (Percent Motorcycle) ที่สัดส่วน 10%, 20% และ 30% ให้ค่าความจุรวมสองทิศทาง (ไม่รวมปริมาณรถจักรยานยนต์) เท่ากับ 2,601 2,206 และ 1,750 veh/h เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพพื้นฐานจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 2.87 (ในช่วง 1-10%) 1.52 (ในช่วง 11-20%) และ 2.07 (ในช่วง 21-30%) ในแต่ละระดับของสัดส่วนรถจักรยานยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1% ผลกระทบจากสัดส่วนรถจักรยานยนต์ต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรดังแสดงใน Figure 7

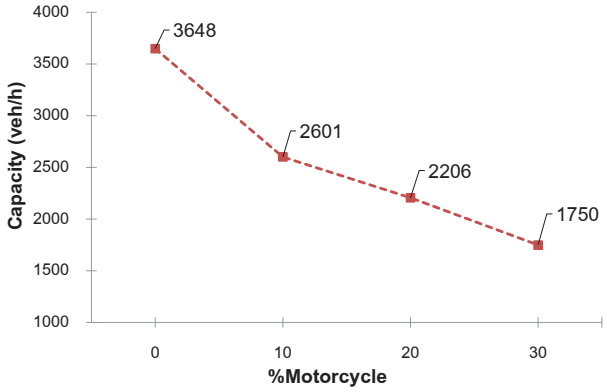


Figure 7 Impact of Motorcycles on capacity for DRR two-lane highway

2) ผลของสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ (Percent Heavy Vehicles) ที่สัดส่วน 5% และ 10% ให้ค่าความจุรวมสองทิศทางเท่ากับ 3,472 และ 3,362 veh/h เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพพื้นฐานจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.96 (ในช่วง 1-5%) และ 0.63 (ในช่วง 6-10%) ในแต่ละระดับของสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1% ซึ่งเมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยวิธี HCM2010 ผลกระทบจากสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรดังแสดงใน Figure 8

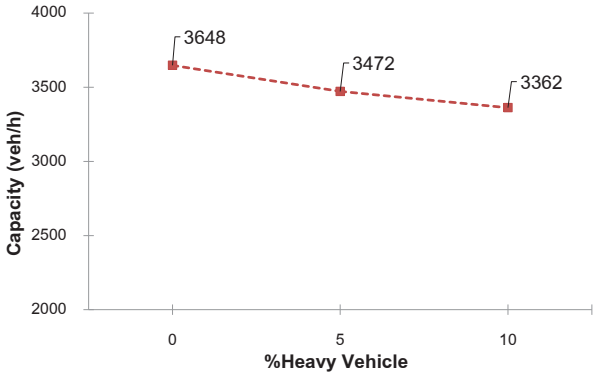


Figure 8 Impact of Heavy Vehicles on capacity for DRR two-lane highway

3) ผลของการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (Directional Split) ที่สัดส่วน 60/40 และ 70/30 ให้ค่าความจุรวมสองทิศทางเท่ากับ 3,645 และ 3,641 veh/h เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพพื้นฐานจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ผลกระทบจากการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ดังแสดงใน Figure 9

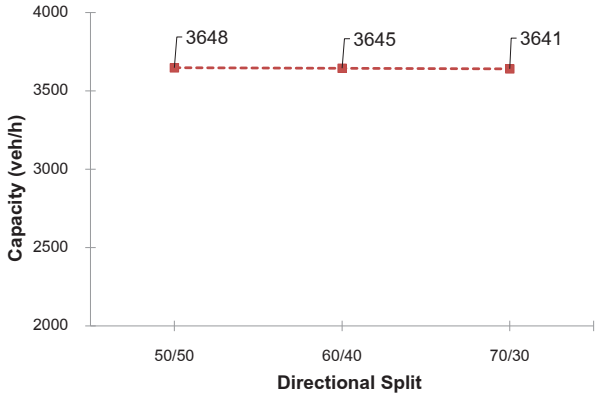


Figure 9 Impact of Directional Split on capacity for DRR two-lane highway

แบบจำลองสมการสำหรับประมาณค่าความจุทางหลวงชนบทสองช่องจราจร

จากผลการประมาณค่าความจุด้วยแบบจำลองสภาพจราจรที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุรวมทั้งสิ้น 36 สถานการณ์จำลอง สามารถพัฒนาเป็นสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple Linear Regression) สำหรับใช้ในการประมาณค่าความจุที่ได้จากความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบกับความจุ ด้วยการเลือกตัวแปรโดยวิธีนำตัวแปรเข้าทั้งหมด (Enter Regression) ในโปรแกรมทางสถิติ SPSS ดังแสดงในสมการที่ (1) (ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงใน Table 3)

Capacity=3417.075-57.063M-13.525H-0.271D (1)

เมื่อ

Capacity คือ ความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร(veh/h)

M คือ สัดส่วนรถจักรยานยนต์ (%) (ในช่วง 0-30%)

H คือ สัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ (%) (ในช่วง 0-10%)

D คือ การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (ในช่วงสัดส่วนการกระจายปริมาณจราจรบนทิศทางหลัก 50-70%)

Table 3 95%CI for coefficient estimates of DRR two-lane highway capacity (Enter Regression)

Model	B	Std.Error	Beta	Sig.
(Constant)	3417.075	201.059		.000
M	-57.063	2.355	-.970	.000
H	-13.525	6.450	-.084	.044
D	-0.271	3.225	-.003	.934

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางทางสถิติที่ช่วงระดับความเชื่อมั่น 95% จะพบว่า ตัวแปรการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (D) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า Sig > 0.05) กล่าวคือ เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลกับความจุน้อยมาก (ค่า Beta = -.003) ซึ่งอาจละทิ้งตัวแปรดังกล่าวนี้ไปได้ โดยทำการวิเคราะห์ใหม่ด้วยการเลือกตัวแปรด้วยการนำตัวแปรเข้าโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) ในโปรแกรมทางสถิติ SPSS แสดงผลลัพธ์เฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรอาจเลือกใช้สมการที่ (2) แทนได้ (ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงใน Table 4)

Capacity=3400.825-57.063M-13.525H (2)

Table 4 95%CI for coefficient estimates of DRR two-lane highway capacity (Stepwise Regression)

Model	B	Std.Error	Beta	Sig.
(Constant)	3400.825	53.776		.000
M	-57.063	2.320	-.970	.000
H	-13.525	6.352	-.084	.041

ผลการวิเคราะห์โดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอนมีนัยสำคัญทางทางสถิติที่ช่วงระดับความเชื่อมั่น 95%, R^2 = 0.946 และค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error of Estimate) = 155.599 ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีผลกระทบต่อความจุในเชิงลบ เมื่อปัจจัยมีสัดส่วนหรือปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความจุทางหลวงชนบทสองช่องจราจรลดลง โดยสัดส่วนรถจักรยานยนต์มีผลต่อความจุมากกว่าสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่

สรุป

พฤติกรรมการขับขี่และลักษณะการจราจรเฉพาะตัวของประเทศไทย เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากที่ทำให้การประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ซึ่งโดยทั่วไปใช้วิธีการของ HCM เกิดความคลาดเคลื่อนไปจากสภาพความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องขับขี่บนทางสัญจรหลักของถนนหรือทางหลวงร่วมกับยวดยานประเภทอื่นๆ เมื่อไหล่ทางมีความกว้างไม่เพียงพอให้รถจักรยานยนต์ใช้ขับขี่ได้อย่างปลอดภัย

ผลการวิเคราะห์และประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรในครั้งนี้ พบว่า การประมาณค่าความจุสูงสุดเท่ากับ 3,648 pc/h ซึ่งสูงกว่าค่าความจุสูงสุดตามวิธีของ HCM 2010 แต่สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีตของ Kim (2006) ซึ่งผลการประมาณค่าความจุของทางหลวงสองช่องจราจรอยู่ในช่วง 1850-2100 pc/h/dir หรือประมาณ 3700-4200 pc/h

จากการพัฒนาสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นสำหรับใช้ในการประมาณค่าความจุที่ได้จากความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบ ซึ่งประกอบด้วย สัดส่วนรถจักรยานยนต์ สัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง พบว่าปัจจัยทั้งหมดล้วนมีผลกระทบต่อความจุในเชิงลบหรือทำให้ความจุของทางหลวงลดลง โดยสัดส่วนรถจักรยานยนต์ปัจจัยที่มีผลกระทบสูงสุด รองลงมาคือสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ ในขณะที่การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางไม่มีนัยสำคัญทางสถิติหรือเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลกับความจุน้อยมาก สอดคล้องกับที่ระบุใน HCM2000 (Chandra and Sinha, 2001) ความจุของทางหลวงสองช่องจราจรแทบจะเป็นอิสระกับการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง อย่างไรก็ตามการศึกษานี้อยู่บนสมมติฐานการวิเคราะห์ทางด้านกายภาพและพฤติกรรมเฉพาะพื้นที่ ซึ่งการศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติมในหลายๆ พื้นที่หรือเงื่อนไขอื่นๆ จะทำให้การประมาณค่าความจุมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวงชนบท. (2562). รายงานผลการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลด้านการจราจรพร้อมการวิเคราะห์และคาดการณ์ปริมาณจราจร โครงการสำรวจออกแบบถนนสาย ขก.1011 แยก ทล.2-บ.พระยืน อ.เมือง,พระยืน จ.ขอนแก่น. กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม.

กรมทางหลวงชนบท. (2563). ขอบเขตอำนาจหน้าที่. https://drr.go.th/

ปิยวัฒน์ ทองเกรียว. (2556). การพัฒนาแบบจำลองระดับจุลภาคเพื่อหาความจุและระดับการให้บริการของถนน: กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วุฒิไกร ไชยปัญหา. (2553) การวิเคราะห์ทางเลือกของระบบการจัดการจราจร ณ บริเวณห้าแยก (ศาลเจ้าพ่อหลักเมือง) จังหวัดขอนแก่น โดยใช้โปรแกรม PARAMICS. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วุฒิไกร ไชยปัญหา, จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร และลัดดา ตันวาณิชกุล. (2561). การประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคในการประมาณค่าความจุของทางหลวงช่องจราจรนอกเมือง (เกาะกลางถนนแบบยก). *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา), 18*(2), 1-15.

สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท. (2563). โครงข่ายทางกรมทางหลวงชนบท ประจำปีงบประมาณ 2563. https://maintenance.drr.go.th/wp-content/uploads/2019/12/drr-2019-12-23_09-27-51_076997.pdf

Barton-Aschman Associates, Inc. and Cambridge Systematics, Inc. (1997). Design Manual for Roads and Bridges. U.S.Department of Transportation.

Chandra, S. & Sinha, S. (2001). Effect of directional split and slow-moving vehicles on two lane capacity. *Road and Transport Research, 10*(4), 33-41.

Department of Highway. (2011). Design guideline of road medians and road widening. Bureau of Surveying and Design, Department of Highways, ministry of transport, Thailand.

Federal Highway Administration. (2014). Highway Functional Classification: Concepts, Criteria and Procedures. https://www.fhwa.dot.gov /planning/processes/statewide/related/highway_functional_classifications/fcauab.pdf

Hussain, H., Uma, R., Ahmad, R.S., Farhan, M.S. and Dadang M.M. (2005). Key Components of A Motorcycle-Traffic System– A Study Along The Motorcycle Path In Malaysia. *IATSS research, 29*(1), 1327-1339.

Kim, J. (2006). Capacity Estimation Method for Two-Lane, Two-Way Highways Using Simulation Modeling. PhD thesis. The Pennsylvania State University.

Planung Transport Verkehr. (2020). PTV Vissim 2020 User Manual. https://usermanual.wiki/ Document/ Vissim20102020Manual.1098038624.pdf

Sharma, N., Sarkar, P.K., & Velmurugan S. (2013). Estimation of Capacity for Multi-Lane Divided Inter-Urban Highways using Videography Technique of Data Collection. Lecture notes in 6th Urban Mobility India Conference & Expo 2013.

Tanwanichkul, L., Pitaksringkarn, J., & Thongkrew, P. (2013). The study of highway cross-section design criteria from traffic volume perspective using traffic micro-simulation. *Engineering and Applied Science Research, 39*(3), 241-248. Retrieved from https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/4957

Tiwari, G., Fazio, J., Gaurav, S., & Chatteerjee, N. (2008). Continuity Equation Validation for Nonhomogeneous Traffic. *Journal of transportation engineering © ASCE, 134*(3),118-127.

Transport Research Board (TRB). (2010). Highway Capacity Manual 2010. 5th Ed., National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C, U.S.A.

Washington State Department of Transportation. (2014). Protocol for VISSIM Simulation. https://wsdot.wa.gov/sites/default/files/2010/05/10/VISSIM-Protocol.pdf

ผลของการใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต
Effect of gravel from the Mekong River as coarse aggregate to concrete properties

สิทธิรักษ์ แจ่มใส[1*], ภาคิณ ลอยเจริญ[2]
Sittiruk Jamsai[1*], Phakin Loyjaroen[2]

Received: 15 July 2020 ; Revised: 7 August 2020 ; Accepted: 10 September 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบ ผลการศึกษาคุณสมบัติของกรวดพบว่า ค่าดัชนีความแบน ค่าดัชนีความยาว และกำลังต้านทานการสึกกร่อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่ทนต่อการขัดสี ผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตพบว่า การใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรงตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวมที่ใช้กรวดต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบเพราะมีพื้นผิวที่เรียบกว่า อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบยังมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ต้องการในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตที่ไม่อัดแรงประมาณ 3 เท่า

คำสำคัญ: คอนกรีต กรวดแม่น้ำโขง มวลรวมหยาบ กำลังต้านทานแรงเฉือน

Abstract
The aim of this research was to study the properties of concrete made using the gravel from the Mekong River as a coarse aggregate. The results indicated that gravel properties ; Flakiness Index, Elongation Index and abrasion resistance of concrete were within the standards for general concrete and abrasion resistant concrete. The results of the compressive strength test of concrete showed that the use of gravel as a coarse aggregate instead of limestone causes the compressive strength of concrete to be reduced by 7% and 4% for concrete used in general structure and prestressed concrete respectively. The results of shear strength tests showed that concrete using gravel as a coarse aggregate instead of limestone reduces shear resistance by 27% and 30% for concrete used in general structure and prestressed concrete, respectively. Shear resistance from aggregates interlocking of concrete using gravel was lower than limestone used as a coarse aggregate because of a smoother surface. However, concrete using gravel as coarse aggregate has a shear strength approximately 3 times greater than concrete required in the design of non-prestressed concrete building elements.

Keywords: Concrete, Gravel from Mekong River, Coarse aggregate, Shear strength

[1] อาจารย์ สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร อ.เมือง จ.สกลนคร 47000
[1] Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Mueang District, Sakon Naknon, 47000.
* Corresponding author ; Dr. Phakin Loyjaroen, Tel: 081-393-5982, E-mail: phakinjob@gmail.com

บทนำ

งานก่อสร้างจากอดีตถึงปัจจุบันนิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอแน่น ทึบน้ำ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและแรงเสียดสีต่างๆ ได้ดี อีกทั้งมีปริมาตรค่อนข้างคงที่ หดหรือขยายตัวน้อยเมื่อสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป การเลือกส่วนผสมที่ถูกต้องจะทำให้ได้คอนกรีตที่เหมาะสมกับงานที่ได้ออกแบบไว้ การที่จะได้คอนกรีตที่มีคุณภาพนั้น มวลรวมจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปมีส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบที่นิยมใช้กันทั่วไปคือหินปูน ส่วนมวลรวมละเอียดจะใช้ทราย มวลรวมจะต้องเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ โดยปกติคอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรจะมีส่วนผสมของมวลรวมอยู่ประมาณร้อยละ 70-80 (ดนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2551) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลจากราคาของมวลรวมที่ถูกกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้

การผลิตคอนกรีตสำหรับใช้ในงานก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ริมแม่น้ำโขงส่วนใหญ่จะมีการนำกรวดแม่น้ำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบทดแทนหินปูนในส่วนผสมของคอนกรีต (สุมิตร ประทุมวงศ์ และคณะ, 2528) เนื่องจากหาได้ง่ายและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง อีกทั้งยังเป็นการนำเอาวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นมาใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีกรวดแม่น้ำในพื้นที่ดังกล่าวเป็นส่วนผสมมวลรวมหยาบแทนหินปูน เนื่องจากความสามารถในการต้านทานแรงอัดประลัยและกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีต เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดประลัยที่ดี ยังมีความคงทนและต้านทานการแตกร้าวได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่ำ (Weerheijm, 2013)

มวลรวมหยาบมีลักษณะของมวลรวมเป็นหินย่อย (หรือหินปูน) หรือกรวดแม่น้ำ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 อย่างน้อยร้อยละ 20 แต่อนุโลมให้หินที่มีขนาดตั้งแต่ 9.5-37.5 มิลลิเมตรเป็นมวลรวมประเภทนี้ด้วย (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553) โดยส่วนใหญ่มวลรวมหยาบมักจะเป็นหินย่อยที่ได้จากการระเบิดภูเขาแล้วนำมาย่อยด้วยเครื่องบดย่อยอีกครั้งหนึ่ง

ความสามารถรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญและควรคำนึงเป็นอันดับแรก ดังนั้นคุณสมบัติของมวลรวมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการศึกษา คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมประกอบด้วย กำลังและความแข็งแรงของมวลรวม (Crushing strength) ความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion resistance) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Resistance to the change in temperature) ความพรุนและการดูดซึมน้ำ (Porosity and absorption) ความคงตัวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical stability) ลักษณะรูปร่างและผิวของมวลรวม (Particle shape and surface texture) ความสะอาด (Cleanliness) และความลดหลั่นของขนาดหรือขนาดส่วนคละ (Gradation) (Neville, 1981)

ผลการศึกษาในอดีตพบว่ากรวดแม่น้ำสามารถนำมาใช้แทนหินปูนในส่วนผสมของมวลรวมหยาบในคอนกรีตได้ ทั้งคอนกรีตกำลังปกติ (อัศวิน คุณาแจ่มจรัส, 2549) และคอนกรีตกำลังสูง (รพีพัฒน์ โชควิวัฒนวนิช, 2540) และ (ธนบดี อินทรเพชร และชูชัย สุจิวรกุล, 2553) โดยการนำกรวดแม่น้ำไปใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนในจังหวัดที่มีแหล่งวัสดุกรวดอยู่แล้ว จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตได้ร้อยละ 15 (ดำรงค์ หอมดี, 2545) แต่การศึกษาผลกระทบด้านกำลังของคอนกรีตที่นำกรวดแม่น้ำมาใช้เป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาผลกระทบด้านกำลังต้านทานแรงอัด ซึ่งเป็นความสามารถหลักที่เด่นชัดของคอนกรีต แต่พฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกออกแบบในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป นอกจากค่ากำลังอัดประลัยสูงสุดแล้ว ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตก็ถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยและกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงผสมเป็นมวลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเหมาะสมด้านรูปร่างและความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำเปรียบเทียบกับหินปูน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่กรวดแม่น้ำด้อยกว่าหินปูนในการนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกรวดแม่น้ำโขงกับหินปูนในการนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงอัดและแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นส่วนผสมและเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นส่วนผสม

วิธีการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยจะเริ่มจากการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ ได้แก่ กรวดแม่น้ำโขงและหินปูน โดยจะดำเนินการทดสอบหาดัชนีความแบน (Flakiness index)

ตามมาตรฐาน BS812 *:* Section 105.1 *:* 1989 Flakiness index of coarse aggregate (British Standard Institution, 1989) และดัชนีความยาว (Elongation index) ตามมาตรฐาน BS 812*:* Section 105.2 *:* 1990 Elongation index of coarse aggregate (British Standard Institution, 1990) เพื่อให้ทราบว่ามวลรวมมีรูปทรงเหมาะสมที่จะใช้เป็นมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตหรือไม่ เนื่องจากกรวดแม่น้ำโดยทั่วไปจะมีรูปทรงผสมผสานกันหลายรูปแบบ ทั้งแบบกลม ยาว เรียว และแบนเรียบ เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบดังกล่าวจะช่วยคัดกรองคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม โดยการทดสอบหาค่าดัชนีความแบนจะทดสอบหินหรือกรวดที่ผ่านการคัดแยกขนาดที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal thickness gauge) โดยดัชนีความแบน (FI) มีค่าเท่ากับร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ผ่าน Thickness gauge ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด และการทดสอบหาค่าดัชนีความยาว จะทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบความยาว (Metal length gauge) โดยค่าดัชนีความยาว (EI) สามารถหาค่าได้จากค่าร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของตัวอย่างที่ค้าง Metal length gauge ต่อน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมด

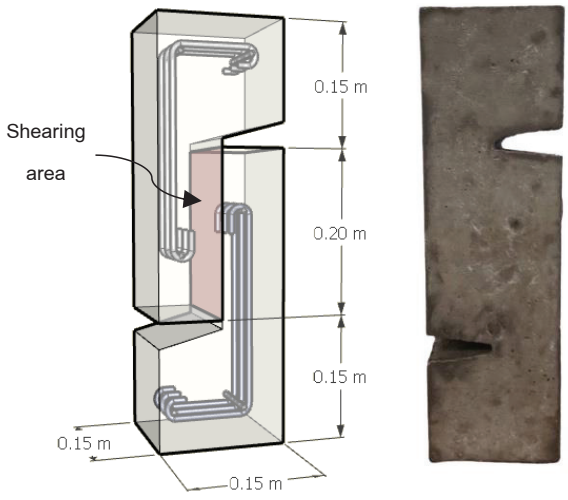
จากนั้นจะดำเนินการทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำและหินปูน ตามมาตรฐาน ASTM C 131 (Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine) (ASTM C 131, 2001) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ต่อน้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดก่อนทดสอบ ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 35 จึงจะเหมาะในการนำมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต (CPAC, 2020)

ขั้นตอนต่อไป จะเป็นการทดสอบทางกล (Mechanical tests) ของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงและหินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบ ในงานวิจัยนี้ จะดำเนินการทดสอบกำลัง (Strength) ของคอนกรีตโดยวิธีการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (Loading methods) ซึ่งจะทดสอบพฤติกรรมทางกลที่สำคัญของคอนกรีต 2 ประเภท คือ การทดสอบแรงกดอัด (Compression test) และการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบทั้งสองประเภทถูกนำไปใช้ในงานออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมากที่สุด

การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C192 Standard method of making and curing concretes test specimens in the laboratory (ASTM C 192, 2014) โดยจะทำการหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบ 6 ชุด และใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ 6 ชุด โดยคอนกรีตจะถูกออกแบบส่วนผสมตามทฤษฎีให้มีค่ากำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับเป็นตัวแทนของคอนกรีตกำลังปกติที่ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดเล็กทั่วไป และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง (นเรศ พันธราธร, 2543) หลังจากนั้นจะดำเนินการกดทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างผ่านเครื่องกดทดสอบ (Compression machine) ตามมาตรฐาน ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39, 2020)

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ออกแบบใช้สำหรับทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดประลัย สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะมีอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ปูน: ทราย: หิน) เป็น 1: 2.25*:* 3.71 และ 1: 2.67: 3.29 ตามลำดับ และสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะมีอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร (ปูน: ทราย: หิน) เป็น 1: 1.64: 3.01 และ 1: 2.67: 3.29 ตามลำดับ

การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบ เริ่มจากการออกแบบตัวอย่างทดสอบโดยใช้หลักการทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) เนื่องจากแรงเฉือนในกรณีนี้เกิดจากการกระทำโดยตรงต่อแท่งตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบให้ระนาบการเฉือนมีระนาบเดียว (Single shear) โดยให้แรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบมีระยะเยื้องศูนย์ที่น้อยที่สุด เพื่อให้แนวแรงที่กระทำตรงกับระนาบการเฉือนให้มากที่สุด เพื่อกำจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้เนื่องจากผลของแรงดัดที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ ลักษณะของตัวอย่างทดสอบแสดงดัง Figure 1(a)



(a) Direct shear test sample

(b) Direct shear test on UTM

Figure 1 Direct shear test

ตัวอย่างทดสอบถูกออกแบบโดยให้มีพื้นที่รับแรงเฉือนตรงขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร เนื่องจากถูกจำกัดที่ขนาดของแบบหล่อ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้แบบหล่อขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ลึก 50 เซนติเมตร ที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต มาใช้ในการทดสอบแทน ขนาดของพื้นที่รับแรงเฉือนจึงถูกจำกัดที่ความยาวของแบบหล่อ เพื่อป้องกันการวิบัติในบริเวณอื่นที่ไม่ใช่บริเวณพื้นที่รับแรงเฉือนที่ต้องการจึงได้ออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตแต่ละส่วนให้มีการเสริมเหล็ก โดยใช้เหล็ก 3-RB 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการวิบัติในบริเวณอื่นนอกเหนือจากบริเวณพื้นที่รับแรงเฉือน (ภาคิณ ลอยเจริญ, 2544) ดังแสดงใน Figure 1 ตัวอย่างทดสอบจะมีชุดละ 5 ตัวอย่าง ตามประเภทของมวลรวมหยาบและกำลังอัดประลัยออกแบบ

การทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่างทดสอบไปให้แรงกดโดยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ดังภาพ Figure 1(b) การติดตั้งตัวอย่างในเครื่องทดสอบ จะต้องระมัดระวังเรื่องการเยื้องศูนย์ของแรงที่จะกระทำผ่านหน้าตัดรับแรงเฉือนให้มากที่สุด โดยการจัดวางตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางแท่นกดทั้งบนและล่าง ตั้งน้ำหนักกดให้มีอัตราการกดคงที่ ประมาณ 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่าแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องกดทดสอบจะเป็นค่าแรงเฉือนประลัยของพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตจึงมีค่าเท่ากับแรงเฉือนประลัยหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน ค่าที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการทำนายกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตแบบไม่อัดแรงและไม่มีการเสริมเหล็กผ่านหน้าตัดรับแรงเฉือนจาก ACI-318 (ACI Committee 318-19, 2019) ดังสมการที่ (1)

$$V_c = 0.53 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (1)$$

เมื่อ V_c คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต (กิโลกรัม), f'_c คือกำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร), b และ d คือความกว้างและความลึกของพื้นที่หน้าตัดต้านทานแรงเฉือน (เซนติเมตร) ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกรวดแม่น้ำโขงเปรียบเทียบกับหินปูน สำหรับใช้เป็นส่วนผสมมวลรวมหยาบของคอนกรีต สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาดัชนีความแบนและดัชนีความยาว

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness index) ของกรวดแม่น้ำและหินปูนใน Table 1 พบว่ากรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนร้อยละ 22.35 หินปูนมีค่าดัชนีความแบนร้อยละ 5.53 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนสูงกว่าหินปูนร้อยละ 16.82 (ตามมาตรฐาน BS 882 กล่าวว่า หินย่อยที่มีดัชนีความแบนน้อยกว่า 40 หรือกรวดที่มีดัชนีความแบนน้อยกว่า 50 จะถือว่าเหมาะที่จะนำไปใช้ทำคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัด 200-350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (British Standards Institution, 1992) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความแบนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้

Table 1 Testing result of flakiness index for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	Mass of aggregate (g)			Flakiness index
	Retained	Passing	Total	
	A	B	A+B	%
Gravel	19375	5079	22715	22.35%
Limestone	8269	484	8753	5.53%

ดัชนีความแบนบ่งบอกถึงอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของมวลรวม การที่กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนมากกว่าหินปูนแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่าหินปูน ซึ่งมวลรวมที่มีค่าดัชนีความแบนไม่เกินร้อยละ 25 จะเหมาะในการนำไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีตปั๊มและคอนกรีตกำลังสูง (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553)

Table 2 Testing result of elongation index for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	Mass of aggregate (g)			Elongation index
	Retained	Passing	Total	
	C	D	C+D	%
Gravel	7509	16941	22709	33.07%
Limestone	1792	22002	22215	8.07%

จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีความยาว (Elongation index) ของกรวดแม่น้ำและหินปูนใน Table 2 พบว่ากรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวร้อยละ 33.07 หินปูนมีค่าดัชนีความยาวร้อยละ 8.07 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวมากกว่ากว่าหินปูนร้อยละ 25.00 (ตามมาตรฐาน BS 882 กล่าวว่า มวลรวมที่มีดัชนีความยาวไม่เกินร้อยละ 35 ถือว่าเหมาะในการนำไปเป็นส่วนผสมคอนกรีต (British Standards Institution, 1992) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความยาวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้ ดัชนีความยาวบ่งบอกถึงอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของมวลรวม การที่กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความยาวมากกว่าหินปูนแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่าหินปูน

หากเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความยาวต่อค่าดัชนีความแบน จะพบว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนมีอัตราส่วนเป็น 1.48 และ 1.46 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบส่วนใหญ่ที่พบว่าค่าดัชนีความยาวเรียวจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของดัชนีความแบน (บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา, 2553)

ผลการศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ

ผลที่ได้จากการศึกษาความต้านทานการสึกกร่อนของกรวดแม่น้ำและหินปูนโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลิสสามารถแสดงได้ดัง Table 3

Table 3 Testing result of abrasion test by Los Angeles machine for gravel and limestone

Type of coarse aggregate	% Loss (Average)
Gravel	26.1
Limestone	24.5

จากผลการทดสอบใน Table 3 พบว่า กรวดแม่น้ำมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนร้อยละ 26.1 และหินปูนมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนร้อยละ 24.5 ซึ่งกรวดแม่น้ำมีค่าร้อยละของการสึกกร่อนสูงกว่าหินปูนร้อยละ 1.6 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C33 (ASTM C 33, 2003) และ มอก. 566 (สมอ., 2562) ระบุไว้ว่า หินที่ใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องรับแรงเสียดทานมาก เช่น ถนน สนามบิน เมื่อผ่านการทดสอบโดยเครื่องลอสแองเจลิสแล้ว จะต้องมีส่วนสึกกร่อนไปไม่เกินร้อยละ 40 ของน้ำหนักเดิม จึงจะเหมาะสมกับการนำมาผสมทำคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี และไม่เกินร้อยละ 50 สำหรับงานคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความต้านทานการสึกกร่อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่นำมาใช้ในงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า กรวดแม่น้ำที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีความเหมาะสมของรูปร่างด้านความหนา ความยาว และความต้านทานการสึกกร่อนน้อยกว่าหินปูนอยู่ร้อยละ 16.82, 25.00 และ 1.6 ตามลำดับ

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบ มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จากการทดสอบตัวอย่างชุดละ 6 ตัวอย่าง แสดงใน Table 4

Table 4 Testing result of compression test for cylindrical concrete specimens

Type of coarse aggregate	Design strength (kg/cm^2)	Average compressive strength (kg/cm^2)	Compressive strength/ Design strength
GV-24	240.0	252.7	1.05
GV-32	320.0	342.3	1.07
LM-24	240.0	272.3	1.13
LM-32	320.0	356.7	1.11

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่าง GV-24 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ LM-24 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งเป็นตัวแทนผลการทดสอบคอนกรีตกำลังปกติที่ใช้สำหรับโครงสร้างทั่วไป พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีค่าร้อยละ 93 ของคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่าง GV-32 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ LM-32 (ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบและมีกำลังอัดประลัยออกแบบ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งเป็นตัวแทนคอนกรีตที่ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีค่าร้อยละ 96 ของคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า การใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต

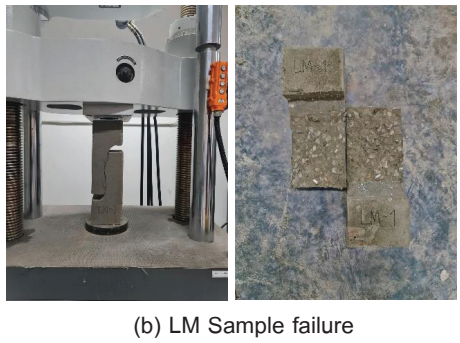
ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่มีกรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นส่วนผสมของมวลรวมหยาบจากตัวอย่างทดสอบ Direct shear test ที่มีพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือน 300 ตารางเซนติเมตร ได้ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ย จากการทดสอบตัวอย่างชุดละ 5 ตัวอย่าง ดังแสดงใน Table 5

จากผลการศึกษาใน Table 5 พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้หินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบในสัดส่วน 0.73 และ 0.70 เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตอยู่ในช่วง 250-268 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 328-340 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนมีกำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวม (Aggregate interlocking) ที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ อันเนื่องมาจากการที่กรวดแม่น้ำมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ทำให้การขัดกันของมวลรวมไม่ดีเท่าหินปูนที่มีผิวค่อนข้างขรุขระ

Table 5 Testing result of direct shear test

Type of coarse aggregate	Average compressive strength (kgf/cm^2)	Average shear strength (kgf)	Shear strength from ACI 318 (kgf)	Average shear strength / Shear strength from ACI 318
GV-24	250.0	7,047.5	2,514.0	2.8
GV-32	328.0	8,468.7	2,879.6	2.9
LM-24	268.0	9,619.1	2,602.9	3.7
LM-32	340.0	11,973.4	2,031.8	5.9

(a) GV Sample failure



(b) LM Sample failure

Figure 2 Failure on shear plane

ลักษณะการวิบัติที่สังเกตุได้จากการทดสอบจะพบว่า เมื่อแรงเฉือนเกิดขึ้นเกินพิกัดที่หน้าตัดรับแรงเฉือนจะรับได้ จะเกิดรอยแตกร้าวขึ้นในบริเวณระนาบวิกฤติสำหรับแรงเฉือนที่ถูกออกแบบไว้สำหรับตัวอย่างทดสอบแต่ละก้อน รอยร้าวจะวิ่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องระหว่างขอบบนสุดและขอบล่างสุดของระนาบการร้าวดังแสดงใน Figure 2 การขัดกันของมวลรวมหยาบในเนื้อคอนกรีตและความแกร่งของมวลรวมทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในระนาบของแรงเฉือนวิกฤติทั้งหมด และเมื่อสังเกตุระนาบการร้าวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบ (GV) ใน Figure 2(a) จะสังเกตุได้ว่าบนระนาบการแตกร้าวส่วนใหญ่จะเป็นการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีต ไม่พบการแตกร้าวที่กรวดแม่น้ำแต่พบการหลุดร่อนของกรวดแม่น้ำออกจากเนื้อคอนกรีตบางส่วน และเมื่อสังเกตุระนาบการร้าวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ (LM) จะพบว่ามีการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีตและหินปูนปะปนกัน แสดงให้เห็นว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ลดลงของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบเกิดจากความสามารถในการยึดเกาะกับคอนกรีตของกรวดแม่น้ำไม่ดีพอ อันเนื่องมาจากผิวสัมผัสที่ค่อนข้างเรียบต่างจากคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบที่สามารถยึดเกาะกับเนื้อคอนกรีตได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่คำนวณโดยสมการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ระบุใน ACI 318 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบกำลังต้านทานแรงเฉือนขององค์อาคารคอนกรีตแบบไม่อัดแรง พบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนผสมเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ ACI 318 ในสัดส่วน 2.8-2.9 เท่า และ 3.7-5.9 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบแม้จะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ แต่ยังมีค่าสูงกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 318 นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนตรงของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ระบุในมาตรฐาน ACI 318 มีความปลอดภัยเพียงพอในการต้านทานแรงเฉือนในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

สรุปผล

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำโขงเป็นมวลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับผลการศึกษาคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ จะพบว่า

ทั้งกรวดแม่น้ำและหินปูนมีค่าดัชนีความแบนและค่าดัชนีความยาวผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งแสดงว่ามีรูปร่างเหมาะสมที่สามารถนำมาเป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีตได้ โดยจากการศึกษาพบว่า กรวดแม่น้ำมีค่าดัชนีความแบนและดัชนีความยาวมากกว่าหินปูนร้อยละ 16.82 และ 25.00 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ากรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่าหินปูน และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่าหินปูน ตามลำดับ และหากเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างค่าดัชนีความยาวต่อค่าดัชนีความแบน จะพบว่า กรวดแม่น้ำและหินปูนมีอัตราส่วนเป็น 1.48 และ 1.46 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบส่วนใหญ่ที่พบว่าค่าดัชนีความยาวเรียวจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของดัชนีความแบน

กรวดแม่น้ำและหินปูนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความต้านทานการสึกกร่อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบของคอนกรีตที่ใช้สำหรับงานก่อสร้างทั่วไปและคอนกรีตสำหรับงานทนการขัดสี โดยผลการศึกษาพบว่า กรวดที่ใช้ในงานวิจัยมีความต้านทานการสึกกร่อนต่ำกว่าหินปูนร้อยละ 1.6

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า การใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลหยาบแทนหินปูนทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลงร้อยละ 7 และร้อยละ 4 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยออกแบบ 240 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำและหินปูนเป็นมวลรวมหยาบพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำผสมเป็นมวลรวมหยาบแทนหินปูนจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 30 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปและใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงต้านการเฉือนจากการขัดกันของมวลรวมที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบต่ำกว่ากรณีที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบ อันเนื่องมาจากการที่กรวดแม่น้ำมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ทำให้การขัดกันของมวลรวมไม่ดีเท่าหินปูนที่มีผิวค่อนข้างขรุขระ นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตที่ใช้กรวดแม่น้ำเป็นมวลรวมหยาบมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการของ ACI 318 ในสัดส่วน 2.8-2.9 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาโยธาและสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมโยธา ในการทดสอบวัสดุในงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ดำรงค์ หอมดี. (2545). การศึกษาคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้กรวดและหินย่อยเป็นมวลรวมหยาบ. ใน*: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8.* ขอนแก่น.

ดนุพล ตันนโยภาส, ธีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล, วัลลภ แซ่ท่อย และชิตพล เอียดปาน. (2551). อิทธิพลของชนิดมวลรวมหยาบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6* ; หน้า 68-73.

ธนบดี อินทรเพชร และชูชัย สุจิวรกุล. (2553). การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเร็วและคอนกรีตกำลังสูงสำหรับใช้งานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน. ใน: *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6*. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. หน้า 427-434.

นเรศ พันธราธร. (2543). *การออกแบบคอนกรีตอัดแรง*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ*:* ไลบรารี่ นาย.

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC). (2020). *คู่มือการทดสอบหิน ทราย และคอนกรีต*. บางซื่อ. กรุงเทพฯ.

บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา. (2553). *คุณสมบัติและพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาคิณ ลอยเจริญ. (2544). *พฤติกรรมรอยต่อแบบเปียกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

รพีพัฒน์ โชควิวัฒนวนิช. (2540). *การใช้กรวดสำหรับคอนกรีตกำลังสูง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. สำนักวิทยบริการ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุมิตร ประทุมวงศ์, ศักดิ์ศรี กลิ่นประเสริฐ และสมคเนย์ ชันชะรุ. (2528). *การสำรวจแหล่งผลิตทรายและกรวด และทดสอบคุณสมบัติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. รายงานการวิจัยปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2562). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลรวมผสมคอนกรีต มอก.* 566. กลุ่มพัฒนาระบบสารสนเทศ ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.).

อัศวิน คุณาแจ่มจรัส. (2549). *การใช้กรวดทดแทนหินในงานคอนกรีตบดอัด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C 131. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine*. West Conshohocken, United States, PA.

American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM C 33. Standard Specification for Concrete Aggregates.* West Conshohocken, United States, PA.

American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C 192. Standard method of making and curing concretes test specimens in the laboratory.* West Conshohocken, United States, PA.

American Concrete Institute. (2019). *ACI Committee 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.* West Conshohocken, United States, PA.

British Standard Institution. (1989). *Testing aggregates-Part 105: Methods for determination of particle shape-Section 105.1 Flakiness index*. UK: BSI publications.

British Standard Institution. (1990). *Testing aggregates-Part 105: Methods for determination of particle shape-Section 105.2 Elongation index of coarse aggregate*. UK: BSI publications.

British Standards Institution.(1992). *BS 882-Specification for Aggregates from natural sources for concrete*. UK: BSI publications.

Neville, A.M.(1981). *Properties of Concrete.* (3rd Edition).Singapore: Longman Singapore Publishers Pte Ltd.

Weerheijm, J. (2013). *Understanding the tensile properties of concrete*. (First Published). UK: Woodhead Publishing Limited.

การหาค่าเหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ดแบบอลวน สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันเชิงตัวเลข

Chaotic satin bowerbird optimization for improving the efficiency of numerical function optimization

ธนัชพงษ์ วังคำหาญ[1*], อนงค์นาถ โรจนกร วังคำหาญ[1]
Tanachapong Wangkhamhan[1*], Anongnart Rotjanakorn Wangkhamhan[1]

Received: 25 December 2019 ; Revised: 31 May 2020 ; Accepted: 25 August 2020

บทคัดย่อ

การเพิ่มประสิทธิภาพซาตินโบเวอร์เบิร์ด เป็นขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกที่พัฒนาเมื่อเร็วๆ นี้ ปัญหาหลักที่ขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ดเผชิญอยู่ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วอย่างชัดเจน การติดอยู่ในค่าคำตอบดีที่สุดเฉพาะที่อย่างง่ายดาย มีความแม่นยำต่ำและความเร็วในลู่เข้าแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ช้า ดังนั้นในความพยายามที่จะเพิ่มความเร็วในการลู่เข้าแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่แท้จริง และได้รับประสิทธิภาพที่ดีขึ้น บทความนี้จะนำเสนอทฤษฎีความอลวนในกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ด ตัวแปรความวุ่นวายในแมปจะถูกนำมาพิจารณาโดยการนำเสนอวิธีความอลวนกับขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ด เพื่อที่จะแทนที่ตัวแปรหลัก (α) ซึ่งช่วยในการควบคุมทั้งการสำรวจพื้นที่และการนำไปใช้ประโยชน์ของขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ด เราทดสอบความอลวนกับขั้นตอนวิธีซาตินโบเวอร์เบิร์ด ผ่านการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพฟังก์ชันตัวเลข ผลลัพธ์เชิงตัวเลขระบุว่าขั้นตอนวิธีที่เราได้นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าขั้นตอนวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพอื่นทั้ง 11 ขั้นตอนวิธี

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพซาตินโบเวอร์เบิร์ด ขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติก ทฤษฎีความอลวน แมปความอลวน

Abstract

The Satin Bowerbird Optimization (SBO) is a recently developed meta-heuristic optimization algorithm. The main problem faced by the SBO is that it has been empirically demonstrated to become easily trapped into local optimal solutions, creating low precision and slow convergence speeds. Therefore, in an effort to enhance global convergence speeds, and to obtain better performance, this paper introduces Chaos Theory into the SBO optimization process. Various chaotic maps were considered in the proposed Chaotic-SBO (CSBO) method in order to replace the main parameter's greatest step size (α), which assists in controlling both exploration and exploitation. We tested CSBO algorithms through experiments with the numerical function optimization. The numerical results indicate that the CSBO algorithm outperformed 11 other optimization algorithms.

Keywords: Satin Bowerbird Optimization, Meta-heuristic algorithm, chaos theory, chaotic map.

[1] อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอเมืองกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000
[1] Lecturer, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand.
* Corresponding author ; Tanachapong Wangkhamhan, Faculty of Management Science, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand. tanachapong.w@hotmail.com.

Introduction

The goal of the optimization problem is to search for a maximum or minimum of an objective function value in widely varied local optima, under highly complex constraints, and in a reasonable amount of time (Yang *et al*., 2014). Consequently, chaotic sequences generated by means of chaotic maps have been used in the development of global optimization techniques. The first introduction of chaos into the optimization challenge was the Chaos Optimization Algorithm (COA) in 1963, by E.N. Lorenz (Lorenz, 1963). The COA represents the bounded, unstable, dynamic behavior that exhibits sensitive dependence on its initial conditions (Yuan *et al*., 2014) named chaos optimization algorithm (COA. Uniquely characteristic of chaotic behavior, the COA carries out global exploration searches at higher speeds than stochastic ergodic searches, which are dependent on probabilities (Yuan *et al*., 2015) all individuals in the PCOA search independently without utilizing the fitness and diversity information of the population. In view of the limitation of PCOA, a novel PCOA with migration and merging operation (denoted as MMO-PCOA.

Chaos is a characteristic of several nonlinear systems as motion distributes within a specific range, as it possesses degrees of uncertainty, ergodicity, and stochasticity. Many researchers therefore use the characteristics of chaotic ergodicity to solve for the global optimal solution of complex nonlinear multi-peak problems, by weakening the randomness or constant parameters of the metaheuristic optimization algorithm (Huang *et al*., 2015) which is widely used to solve many optimization problems. However, it has been empirically demonstrated to easily get trapped into local optimal solutions and cause low precision. Therefore, in this work, we propose five modified Chaos-enhanced Cuckoo search (CCS. As a result, most current work is devoted to the improvement of global optimization algorithms to tackle the abovementioned shortcomings. Further interest has been developed in the field of hybrid algorithms, especially in typical and emerging heuristic optimization algorithms; such as the migration and merging operation (Yuan *et al*., 2015) all individuals in the PCOA search independently without utilizing the fitness and diversity information of the population. In view of the limitation of PCOA, a novel PCOA with migration and merging operation (denoted as MMO-PCOA, cuckoo search optimization algorithm (Huang *et al*., 2015)which is widely used to solve many optimization problems. However, it has been empirically demonstrated to easily get trapped into local optimal solutions and cause low precision. Therefore, in this work, we propose five modified Chaos-enhanced Cuckoo search (CCS, firefly algorithm (Gandomi *et al*., 2013), gravitational search algorithm (Mirjalili and Gandomi, 2017), whale optimization algorithm (Kaur & Arora, 2018), crow search algorithm (Problems *et al*., 2018), league championship algorithm (Wangchamhan *et al*., 2017)but the produced solution does not produce optimum clusters. This paper proposes three algorithms (i, salp swarm algorithm (Sayed *et al*., 2018), and the krill herd algorithm (Wang *et al*., 2014)Gandomi and Alavi proposed a meta-heuristic optimization algorithm, called Krill Herd (KH; all of which were hybridized with the COA. Various simulation results and applications in each of these references have proven the solution diversity and global optimization capacity of each chaos-based optimization algorithm.

The standard Satin Bowerbird Optimizer (SBO) was first proposed by S. H. Samareh Moosavi and V. Khatibi Bardsiri (Moosavi and Bardsiri, 2017)development effort estimation has become a challenging issue which must be seriously considered at the early stages of project. Insufficient information and uncertain requirements are the main reasons behind unreliable estimations in this area. Although numerous effort estimation models have been proposed during the last decade, accuracy level is not satisfying enough. This paper presents a new model based on a combination of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS in 2017, to optimize adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for the purpose of effort estimation of software development. Its algorithm was bio-inspired by Satin Bowerbirds living in the rainforests and mesic habitats of Australia. Through the breeding principle of male-attracting-female, the male bowerbird attracts the female with the construction of a specialized bower. This technique, which is population-based on a stochastic optimization algorithm (Chintam and Daniel, 2018); is very robust, straightforward, and efficient. Details of the original SBO and the literature related to its applications are presented in Sections 4 and 5.

The principle concern we faced in our research was the way to introduce the Chaotic Satin Bowerbird Optimizer (CSBO) based methods in which different chaotic systems are used to replace the critical parameters of the SBO. Through this method, we intended to enhance the global searching ability of the SBO and increase its ability to stick on a local solution. The simulation results demonstrated the improved performance of the CSBO with the application of the deterministic chaotic signals, as opposed to the constant parameters of the SBO.

The remainder of this paper is organized in six sections. Section 2 briefly describes the SBO algorithm ; Section 3 describes the chaotic maps for the SBO ; the proposed CSBO approach is detailed in Section 4 ; and comparisons of the CSBO with other optimization algorithms are found in Section 5. Our conclusions and future scope of our research are presented in Section 6.

The original SBO algorithm

The SBO algorithm starts by creating a population of random uniform distribution, through the consideration of both the lower and upper limit parameters. After that, each position is defined as a dimensional vector of the parameters, which must be optimized. The probability of such defines the attractiveness of the bower. A female satin bower bird selects a bower (nest) based on its probability and is able to calculate the probability of each population member through Eqs. (1) and (2), below.

$$\mathrm{Prob}_i = \frac{\mathrm{fit}_i}{\sum_{n=1}^{\mathrm{NB}} \mathrm{fit}_n}, \quad (1)$$

$$\mathrm{fit}_i \begin{cases} \dfrac{1}{1+f(x_i)}, f(x_i) \geq 0 \\ 1+\left|f(x_i)\right|, f(x_i) < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

where NB is the population size of the bower, is the fitness value of the i^{th} solution, and $f(x_i)$ is the fitness value of i^{th} bower. To find the position of the best bower, the SBO algorithm utilizes the concept of *elitism*, which allows the best solution to be preserved at each stage of the optimization process. The SBO algorithm replicates the concept of birds building their nests using their natural instincts. In the mating season, the male satin bower bird uses his natural instincts to build and decorate his bower, in an attempt to attract female birds. We may infer that the male birds rely upon their experience to influence their creative decisions in building their bower ; therefore, more experienced birds will build more attractive bowers (improving their fitness) than less experienced birds. In this work, the best built bower (best position) is intended as an elite iteration. Since the elite position has the highest fitness, it should be able to influence the other positions. The changes of each new bower, representing a new position determined by the position of the best fit bower (position), are calculated according to Eq.(3).

$$x_{ik}^{new} = x_{ik}^{old} + \lambda_k \left(\left(\frac{x_{jk} + x_{elite,k}}{2} \right) - x_{ik}^{old} \right), \quad (3)$$

where x_i is the i^{th} solution vector (bower), x_j is determined as the target solution among all solutions in the current iteration, j is calculated by the roulette wheel procedure, and x_{ik} is the k^{th} member of this dimensions. x_{elite} indicates the elite position (the best fitness value in the current iteration).

$$\lambda_k = \frac{\alpha}{1+p_j} \ . \quad (4)$$

In Eq. (4), λ_k represents the attraction power of the goal bower, shown at intervals of $\lambda_k \in (0, 1)$, where α is the greatest step size (constant) ; and p_j is the probability obtained through Eq.(1) employing the goal bower at intervals of $p_j \in (0, 1)$.

In the mutation process, which occurs at the completion of each iteration of the SBO, random changes are applied with a certain probability. Random changes are then applied to x_{ik} ; again, with a certain probability. The normal distribution (N) within the mutation process is employed through the average of x_{ik}^{old} and the variance of σ^2, as seen in Eqs. (5)-(7).

$$x_{ik}^{new} \sim N(x_{ik}^{old}, \sigma^2), \quad (5)$$

$$N(x_{ik}^{old}, \sigma^2) = x_{ik}^{old} + (\sigma^* N(0,1)), \quad (6)$$

$$\sigma = Z^* (\mathrm{var}_{\max} - \mathrm{var}_{\min}), \quad (7)$$

where σ is a proportion of space width, and $\mathrm{var}_{\min}$ and $\mathrm{var}_{\max}$ are the lower and upper bounds assigned to the variables, respectively. The value of the parameter is the Z percent of the difference between the lower and upper limit, which is variable. In the last of stage of each iteration, the newly formed population and the initial population are evaluated, and all populations are combined and sorted by their fitness values. A new population is then created according to the previously defined number, while the others are rejected.

Chaotic maps for the SBO

Chaos, as a kind of dynamic behavior within a nonlinear chaotic time series, has raised enormous interest in fields such as scientific applications and engineering systems; which have included numerical simulation, chaos control, synchronization, pattern recognition, optimization theory, as well as additional nonlinear sciences. In random-based optimization algorithms, methods employing *chaotic* variables rather than *random* variables are referred to as chaotic optimization algorithms (COA) (Gandomi *et al*., 2013). Due to the non-repetitiveness of chaotic behavior, the algorithm is capable of carrying out overall searches at higher speeds than stochastic searches, which are dependent upon their probabilities (Hatamlou *et al*., 2011). One-dimensional, non-invertible maps are the simplest systems capable of generating the desired chaotic motion (Xu *et al*., 2013).

The proposed CSBO approach

This section presents a novel Chaotic Satin Bowerbird Optimization algorithm called the CSBO, which replaces the main parameter and embeds chaos into the existing SBO. While SBOs possess good convergence rates, they still lack the ability to sufficiently find the global optima, which in turn affects the convergence rate of the algorithm. In order to reduce this effect and to improve its efficiency, the concept of chaos was introduced into the SBO algorithm.

Chaotic maps are imbedded into the SBO to improve the algorithm's solution quality. One of the main parameters of the SBO is the greatest step size (α), which remains a constant parameter. Here, this value (α) is replaced with chaotic maps in an attempt to improve the performance of the SBO. Upon implementation, chaotic maps are normalized between 0 and 1. Furthermore, the parameter of α, determined through Eq. (4), is modified by the chaotic maps through the following equation, Eq. (8).

$$\lambda_k = \begin{cases} \dfrac{c^{t+1}}{1+p_j} & \mathrm{mod}(t, NB-1) = 0, \\ \dfrac{\alpha}{1+p_j} & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

Where C^{t+1} represents the different chaotic variables, t is the current iteration ($t=1, 2, 3,...m$), m represents the maximum iteration number, and NB is the number of bowers. Eq. (8) produces a design point, from Eq. (3), which uses the different chaotic variables derived from the chaotic maps, with different initial values.

The pseudo-code of the CSBO algorithm is presented in Algorithm 1. In the first step, the bower population within the search space is initialized randomly. After which, the parameters of the CSBO algorithm involved in controlling the exploration and exploitation mechanisms, specifically the NB, P, Z, σ, and α ; are initialized similarly to the SBO. In the second step, the fitness function values of all bowers are initialized in the search space and evaluated using the various standard benchmark functions. The lower fitness value is assumed to be elite (the best fitness function value). The chaotic number of the chaotic map is initialized to adjust parameter α of the SBO. In the third step, the CSBO algorithm runs sequentially, in which all bowers will update their positions, resulting in the first position as the optimal solution. The value of parameter α is also updated along with the course of each iteration through Eq. (8), where $mod(t, NB\text{-}1)=0$; t ; is the current iteration, and NB is the population size (Algorithm 1, line 19). In the final step, at the end of the last iteration, the best search agent will be considered as the most optimal solution by the CSBO algorithm.

Algorithm 1 The CSBO algorithm.

1: Initialize the population size of bowers (NB), greatest step size (α), mutation probability (P), percentage of the difference between the upper and lower limits (Z), proportion of space width (σ) and NFEs=0
2: Generate the population $X_i=(i=1, 2, 3,..., N)$ of N bowers
3: **For** i=1 to N **Do**
4: Evaluate the fitness value of all bowers $f(X_i)$
5: The best bower (X_{best}) and assume it as elite
6: $NFEs=NFEs + NFEs$ that is consumed by bower
7: **End for**
// The stage of CSBO
8: Initial iterations $t=1$
9: Generate the chaotic sequences $c^t_1 \in (0,1)$, the description in Section 3 ◁ (1)
10: **While** $(NFEs \geq max_NFEs)$ **Do**
11: **For** $k=1$ to N **Do**
12: Calculate the probability (P) of bowers using Eqs. (1) and (2)
13: **End for**
14: **//Generate a new bower** (X_i^{t+1})
15: **For** $i=1$ to N **Do**
16: **For** $k=1$ to D (all element (D) of bower) **Do**
17: Select one bower (X_J^t), where (X_J^t) is random using roulette wheel selection
18: **//Calculate step size** (λ_k)
19: **If** $mod(t, N-1)=0$ **Then** ◁ (2)
20: Calculate step size (λ_k) using Eq. (8) ◁ (3)
21: **Else**
22: Calculate step size (λ_k) using Eq. (4)
23: **End if**
24: Update the position of bower (X_i^{t+1}) using Eq. (3)
25: **//Mutation**
26: **If** $rand \leq P$ **Then**
27: Update the position of bower (X_i^{t+1}) using Eq. (6)
28: **End if**
29: **End for**
30: Evaluate the fitness value of bower $f(X_i^{t+1})$, $NFEs=NFEs + 1$
31: **End for**
32: Sorted bower (X_N) and $f(X_N)$ by the fitness values
33: Update elite (X_{best}) if a bower becomes fitter than the elite
34: $t=t + 1$
35: **End while**
36: **Output** the global best fitness value of bower (X_{best})

Note: The differences between the SBO and CSBO are indicated with lines marked with the symbol ◁ (.).

Experiment results and discussion

In this paper, our experiments were coded in MATLAB R2016a, 64 bit, and run on a desktop computer with an Intel® Core™ i7-6770HQ processor, 8.00GB of RAM, 500GB of HD, and a Microsoft Windows 10 Professional 64 bit Operating System. Moreover, the average objective function values ("Avg.Obj") and standard deviation of the fitness function values ("Std. Dev") of all runs were recorded. The "Avg.Obj" and "Std. Dev" were the two performance metrics used to assess the performance of the algorithms.

In this paper, the experiment sets on optimization benchmark problems were implemented to verify the performance of the proposed meta-heuristic CSBO method. Moreover, the CEC2014 (Liang *et al.*, 2014) test suite was selected for the performance evaluation and statistical comparison of the CSBO in the experiments evaluating the performance of the proposed CSBO algorithm in comparison to other meta-heuristic algorithms. Note that all experiments were performed on the same PC, with the same specifications.

1. the performance assessment of CSBO with different chaotic maps

Within the experiment results, the CSBOs utilized the Chebyshev, Circle, Gauss/Mouse, Iterative, Logistic, Piecewise, Sine, Singer, Sinusoidal, and Tent maps (Gandomi *et al*., 2013). The CSBOs were capable of significantly improving the solution quality through the use of chaotic maps. Adjustments of the main parameter α were implemented with the various chaotic maps, as seen in Section 4. It is clear that the number of problems in which better average objective fitness values were obtained by the basic SBO combined with the Tent map, CSBO (Tent map), proving to be superior to all other algorithms. Further detailed testing is reported in Section 5.2.

2. Comparison of the CSBO with other optimization algorithms

To prove the superiority of the proposed CSBO, we conducted comparisons of benchmark problems with 11 well-known algorithms; Crow Search Algorithm (CSA) (Askarzadeh, 2016)we evaluate a novel self-adaptive and auto-constructive metaheuristic called Drone Squadron Optimization (DSO, Firefly Algorithm (FA) (Yang, 2010), Krill Herd algorithm (KH) (Hossein, 2012), Multi-Verse Optimization (MVO) (Mirjalili *et al*., 2016), Whale Optimization Algorithm (WOA) (Mirjalili and Lewis, 2016), Satin Bowerbird Optimizer (SBO), Chaotic Crow Search Algorithm (CCSA), Firefly Algorithm with Chaos (CFA), Chaotic Krill Herd algorithm (CKH), Chaotic Multi-Verse Optimization (CMVO), and Chaotic Whale Optimization Algorithm (CWOA). Thus, in this paper, SBO was considered to be the basic method. The parameter settings for each algorithm in all experiments are shown in sub Section 5.2.1.

2.1 Parameter settings for experiments

We conducted a wide range of tests on the proposed algorithm, benchmarking the performance of the CSBO. Comparisons were made of 11 existing algorithms on 30 benchmark functions, in CEC2014. With a fixed population size of 100 at each run, the benchmark function test problems were executed with 30-D and 50-D, where D is the dimension of the function for all experiments. The experiments were run more than 100 times, in which the maximum number of functions evaluated (*NFEs*) were set at 3.0E+5 and 5.0E+5, respectively. The other main parameters are presented in Table 1.

Table 1 Parameters settings.

#	Chaotic map	Parameters
CSA	-	The awareness probability of crow *AP*=0.1, and the flight length of crow *fl*=2
CCSA	Circle map	
FA	-	The light absorption coefficient=1/L, and the attractiveness coefficient=1
CFA	Sinusoidal map, Gauss/ mouse map	The light absorption coefficient=Sinusoidal map, and the attractiveness coefficient=Gauss/mouse map
KH	-	The foraging speed V_f=0.02, the maximum diffusion speed D^{max}=0.005, the maximum induced speed N^{max}=0.01
CKH	Sine map	
MVO	-	The wormhole existence probability WEP_{max}=1, WEP_{min}=0.2, r_1, r_2, r_3 and r_4 are random numbers in [0, 1], and p=6
CMVO	Circle map	
WOA	-	*A* and *C* are coefficient vectors, *a* is linearly decreased from 2 to 0, *l* is a random number in [-1, 1], and *p* is a random number in [0, 1]
CWOA	Tent map	
SBO	-	The percentage of the difference between the upper and lower limits () was considered to be 0.02, the mutation probability () was 0.05, and the greatest step size () was 0.94
CSBO	Tent map	

2.2 Numerical results and graphical analysis

In this Section, we present the numerical results, and graphical analysis and evaluation of the CSBO and other optimization algorithms based on the benchmark functions. We further classified the qualitative analyses into four function problems: the Unimodal function, the Simple multimodal function, the Hybrid function, and the Composition function. Tables 2-7 show the statistical analysis of the comparative simulation results between the CSBO and the other algorithms. The four function problems outlined are described as follows:

(a) Unimodal function (f_1-f_3): Table 2 presents the statistical analysis of the simulation results and performs a comparison between the CSBO and the other optimization algorithms. The CSBO algorithm outperformed the comparative

algorithms in our statistical tests. Within the 30-dimensional problems, the CSBO generated better simulation results in the functions f_1 and f_2. In cases of the 50-D problems, the CSBO proved superior to all other algorithms in the f_1. However, for functions f_2 and f_3, the CSBO ranked 3rd out of 12 algorithms. Summarizing the overall rank of the 30-D set, the CSBO algorithm ranked first (5.0).

(b) Simple multimodal function (f_{4}-f_{16}): In the results for the 30-D problems, shown in Table 3, the CSBO algorithm ranked first (f_4, f_{10}-f_{16}) in eight out of 13 benchmark functions. Similar results were achieved in the f_{13} functions for FA, and f_{14} functions for SBO with the CFA algorithms. In the 50-D problem cases, shown in Table 4, the CSBO algorithm was significantly better than or at least similar in f_4, f_{10}-f_{14}, and f_{16} functions in seven out of 13 benchmark functions. The overall rankings (summarized) for the 30-D set found that the CSBO algorithm ranked first (26.0).

(c) Hybrid function (f_{17}-f_{22}): Table 5, in the case of the 30-D problems, the superiority of the CSBO was lost ; and proved inferior to CKH in f_{18}, CMVO and MVO on f_{20}, and FA and CFA in f_{22}. The CSBO algorithm did, however, rank first in three out of the six benchmark functions ; f_{17}, f_{19}, and f_{21}. Within the 50-D set, the CSBO was bettered only by the CFA on f_{22}. In all other areas, the CSBO performed significantly better than the comparative algorithms, ranking first in five out of six benchmark functions (f_{17}-f_{21} benchmark functions). An overall rank summary for the 30-D problems found that the CSBO algorithm ranked first at 8.0.

(d) Composition function (f_{23}-f_{30}): Table 6, within the 30-D problem set, the CSBO ranked less than the CKH and KH on f_{23}-f_{25}, and the CFA, CMVO, MVO, FA, CWOA, and WOA algorithms on f_{28}. However, the CSBO algorithm ranked first in f_{26}, f_{27}, f_{29}, and f_{30} (four out of eight benchmark functions). Within the 50-D problem set, Table 7, the CSBO's performance was inferior to the CKH in f_{23} ; the CWOA, WOA, and CKH on f_{24} ; the CKH, CFA, KH, FA, CMVO, CWOA, and WOA in f_{25} ; the CWOA and WOA on f_{26} ; and to the CFA, CMVO, MVO, FA, CWOA, and WOA in f_{28}. The CSBO ranked first in three out of eight cases ; the f_{27}, f_{29}, and f_{30} benchmark functions). The overall rank summary for the 30-D problems ranked the CSBO algorithm ranks first (23.0), followed by the CFA algorithm (second, at 24.5), and the CKH algorithm (third, at 32.0). Within the 50-D problem set, the CSBO algorithm ranks first (27.5).

The graphical analyses, Figures 1 and 2, display the line graphs of the convergences of all the 12 optimization algorithms, and the 8 functions ($f_{1, f4, f10, f11, f17, f21, f29, f30}$) within the 30-D and 50-D problem set. The CSBO demonstrated better performance in escaping from the local optimum, as well as better search accuracy than the 11 other methods. Moreover, the other algorithms did not find their global optimal value in all of the runs. The values shown in these figures represent the average function optimum achieved from each benchmark function, Tables 2-7.

In summary, the proposed CSBO algorithm achieves better search performance, stable search ability, and a stronger ability to escape from local optimum solutions than all comparative algorithms, presented in Figures 1 and 2 and Tables 2-7. The CSBO method proved to be very efficient for numerical optimization problems. Moreover, the analyses of the non-parametric Wilcoxon's rank sum test, Section 5.2.3 and Section 5.2.4 ; and the Friedman rank test proved the performance of the CSBO algorithm to be superior to all other algorithms tested.

2.3 The non-parametric Wilcoxon's rank sum test

In order to evaluate the performance of proposed CSBO algorithm, we employed the Wilcoxon's rank sum test (Frank Wilcoxon, 1945) to determine the statistical difference of the results achieved by each algorithm. The test was conducted for the results obtained by all algorithms, shown in Tables 2-7, *N/A* indicates "not applicable", denoting the best objective function value in this current function. In the comparison of the CSBO and other optimization algorithms, it is generally considered that a *p*-Value of less than 0.05 indicates that the result achieved by the algorithm is statistically significant, and not obtained by chance. The best results are highlighted in bold face, and the *p*-Values (greater than 0.05) are underlined.

The comparison summaries of the proposed CSBO and other optimization algorithms in the underlined 30-D and 50-D test problems are presented in Tables 2-7. From these tables, it is clear that the number of problems in which better average objective fitness values were obtained by the CSBO algorithm proved it to be superior to all other algorithms. However, the CSBO results are believed to be biased.

2.4 Analysis based on the Friedman rank test

The Friedman rank analyses, present each algorithm was ranked according to their performance using an average Friedman rank competition ranking scheme. In competition ranking, algorithms are put in the same rank if their performances are the same.

Therefore, Figure 3 provides the ranks of 12 optimization algorithms and the overall rank for 30 benchmark functions (Tables 2-7) based on the cases of 30-D (Figure 3a) and 50-D (Figure 3b) mean performances. Using the overall ranks, we can note that the CSBO performs much better than the other algorithms.

Table 2 Unimodal function: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D and 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_1	Avg.Obj	1.6009E+09	2.3063E+07	2.8339E+08	5.0511E+06	3.2328E+07	2.9545E+06	9.5290E+08	4.6221E+06	1.8912E+07	3.4549E+06	2.7226E+07	**3.7548E+05**
	Std. dev.	2.3173E+08	7.5188E+06	9.1114E+07	2.0339E+05	1.4290E+07	8.6304E+05	1.9327E+08	2.4755E+06	5.5471E+06	1.4844E+06	1.1623E+07	**2.0571E+05**
	p-Value	1.7555E-06	7.5569E-10	7.5569E-10	6.6298E-10	7.5569E-10	7.4197E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	7.0	10.0	5.0	9.0	2.0	11.0	4.0	6.0	3.0	8.0	**1.0**
f_2	Avg.Obj	9.9432E+10	1.1342E+08	1.5577E+10	2.8988E+04	3.0724E+06	5.3763E+05	7.2603E+10	5.5067E+06	2.8004E+04	1.7040E+04	3.0050E+06	**1.1190E+04**
	Std. dev.	7.3771E+09	1.2290E+08	5.6399E+09	1.2094E+04	2.2802E+06	7.8532E+04	1.0275E+10	7.7335E+05	1.7478E+04	1.0766E+04	6.8454E+06	**5.4370E+03**
	p-Value	1.3371E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	9.0	10.0	4.0	7.0	5.0	11.0	8.0	3.0	2.0	6.0	**1.0**
f_3	Avg.Obj	1.1438E+05	2.4932E+04	8.2161E+04	1.1184E+03	3.7410E+04	1.1468E+04	8.9263E+04	3.4921E+03	6.0446E+04	**4.2596E+02**	3.4955E+04	3.0903E+03
	Std. dev.	1.8373E+04	4.1979E+03	2.4564E+04	3.0058E+02	2.4787E+04	6.2529E+03	2.9399E-11	1.7148E+03	1.3237E+04	**4.0623E+01**	2.2968E+04	2.9297E+03
	p-Value	1.6710E-06	7.5569E-10	1.3025E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.4669E-10	1.5375E-12	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10
	Rank	12.0	6.0	10.0	2.0	8.0	5.0	11.0	4.0	9.0	**1.0**	7.0	3.0
Overall Rank		36.0	22.0	30.0	11.0	24.0	12.0	33.0	16.0	18.0	6.0	21.0	**5.0**
50-D													
f_1	Avg.Obj	7.8524E+09	3.7362E+07	6.2050E+08	7.5993E+06	3.4749E+07	4.4682E+06	3.1273E+09	9.2384E+06	1.2528E+07	7.0843E+06	3.1180E+07	**1.3418E+06**
	Std. dev.	1.8074E+09	1.1120E+07	3.4120E+08	1.7292E+06	1.2664E+07	1.0064E+06	4.0481E+08	3.0593E+06	4.5995E+06	1.9426E+06	1.1635E+07	**3.2025E+05**
	p-Value	2.6254E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.4652E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	N/A
	Rank	12.0	9.0	10.0	4.0	8.0	2.0	11.0	5.0	6.0	3.0	7.0	**1.0**

Table 2 Unimodal function: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D and 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_2	Avg.Obj	1.9461E+11	3.0454E+09	6.3940E+10	6.8463E+04	2.0063E+07	7.8346E+06	1.7358E+11	4.8625E+06	1.9698E+05	**3.1696E+04**	1.5655E+07	1.9206E+05
	Std. dev.	1.1995E+09	1.2349E+09	1.3058E+10	1.5202E+04	1.4047E+07	7.0536E+05	1.5131E+10	4.7566E+05	1.0358E+05	**1.0989E+04**	1.1330E+07	2.7752E+04
	p-Value	1.4321E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	9.2946E-03	7.5569E-10	7.5569E-10	8.5342E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	5.9268E-06
	Rank	12.0	9.0	10.0	2.0	8.0	6.0	11.0	5.0	4.0	**1.0**	7.0	3.0
f_3	Avg.Obj	3.8902E+05	5.7112E+04	1.5358E+05	4.4193E+02	3.9203E+04	7.7316E+03	2.3116E+05	1.4767E+04	9.6525E+04	**4.2409E+02**	3.4741E+04	1.2720E+03
	Std. dev.	1.6679E+05	6.0507E+03	2.4928E+04	3.7252E+01	8.4108E+03	3.5901E+03	3.0561E+04	4.8265E+03	1.7437E+04	**3.0203E+01**	7.8181E+03	6.1448E+02
	p-Value	4.4668E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	2.9456E-04	7.5569E-10	7.3711E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10
	Rank	12.0	8.0	10.0	2.0	7.0	4.0	11.0	5.0	9.0	**1.0**	6.0	3.0
Overall rank		36.0	26.0	30.0	8.0	23.0	12.0	33.0	15.0	19.0	**5.0**	20.0	7.0

Table 3 Simple Multimodal functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_4	Avg.Obj	2.3316E+04	5.9775E+02	1.6912E+03	5.0136E+02	5.8132E+02	5.3658E+02	1.2597E+04	5.1262E+02	5.0141E+02	4.9630E+02	5.7865E+02	**4.5293E+02**
	Std. dev.	2.5274E+03	3.8802E+01	7.3894E+02	2.5362E+01	5.8743E+01	2.4539E+01	2.3726E+03	2.2069E+01	3.1247E+01	3.3965E+01	4.6182E+01	**3.5539E+01**
	p-Value	1.1101E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	7.5569E-10	7.4230E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	9.0	10.0	3.0	8.0	6.0	11.0	5.0	4.0	2.0	7.0	**1.0**
f_5	Avg.Obj	5.2098E+02	5.2094E+02	**5.2001E+02**	5.2007E+02	5.2032E+02	5.2085E+02	5.2095E+02	5.2094E+02	**5.2001E+02**	5.2005E+02	5.2020E+02	5.2004E+02
	Std. dev.	6.3737E-02	4.8568E-02	**2.9419E-03**	5.3683E-02	1.5986E-01	7.4616E-02	5.6665E-02	4.8739E-02	**5.1790E-03**	4.0495E-02	1.8728E-01	1.7613E-02
	p-Value	7.0957E-07	7.6048E-03	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	5.8601E-09	1.2009E-03	2.8109E-03	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	5.5448E-03
	Rank	12.0	9.5	**1.5**	5.0	7.0	8.0	11.0	9.5	**1.5**	4.0	6.0	3.0
f_6	Avg.Obj	6.4571E+02	6.1140E+02	6.3583E+02	6.1048E+02	6.3574E+02	6.2847E+02	6.4075E+02	**6.0684E+02**	6.2093E+02	6.1011E+02	6.3521E+02	6.1978E+02
	Std. dev.	1.4259E+00	1.9603E+00	2.2431E+00	2.0173E+00	2.7854E+00	1.2209E+00	1.1875E+00	**2.3952E+00**	3.1404E+00	2.9034E+00	3.3222E+00	1.0952E+00
	p-Value	1.1812E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.0596E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.0516E-10
	Rank	12.0	4.0	10.0	3.0	9.0	7.0	11.0	**1.0**	6.0	2.0	8.0	5.0
f_7	Avg.Obj	1.5135E+03	7.0294E+02	8.7406E+02	7.0009E+02	7.0101E+02	7.0093E+02	1.3546E+03	7.0105E+02	**7.0002E+02**	7.0008E+02	7.0090E+02	7.0007E+02
	Std. dev.	5.0219E+01	1.6586E+00	6.6743E+01	3.3399E-02	6.8074E-02	3.5790E-02	6.6157E+01	6.5845E-03	**8.9813E-03**	1.0499E-02	1.1995E-01	2.0174E-02
	p-Value	3.2718E-01	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	3.3041E-01
	Rank	12.0	9.0	10.0	4.0	7.0	6.0	11.0	8.0	**1.0**	3.0	5.0	2.0
f_8	Avg.Obj	1.1741E+03	8.5792E+02	9.5934E+02	8.8281E+02	9.8531E+02	9.4291E+02	1.1696E+03	**8.4189E+02**	9.1184E+02	8.8182E+02	9.8134E+02	8.8059E+02
	Std. dev.	8.8788E+00	8.4674E+00	2.2284E+01	2.0580E+01	3.9847E+01	2.6164E+01	1.5480E+01	**1.0384E+01**	2.3041E+01	2.0337E+01	3.7717E+01	5.0253E+00
	p-Value	6.0845E-08	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	8.8418E-03	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	2.1636E-03
	Rank	12.0	2.0	8.0	5.0	10.0	7.0	11.0	**1.0**	6.0	4.0	9.0	3.0
f_9	Avg.Obj	1.3572E+03	9.6453E+02	1.0919E+03	1.0226E+03	1.1364E+03	1.0877E+03	1.3393E+03	**9.5379E+02**	1.0218E+03	1.0206E+03	1.1238E+03	1.0177E+03
	Std. dev.	9.3912E+00	1.3016E+01	2.3571E+01	3.4674E+00	6.0934E+01	2.8292E+01	2.2771E+01	**1.6183E+01**	2.0375E+01	2.9034E+01	5.6711E+01	3.1464E-03
	p-Value	2.2503E-07	7.5569E-02	7.5569E-10	5.1059E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	8.3138E-02	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	2.1636E-03
	Rank	12.0	2.0	8.0	6.0	10.0	7.0	11.0	**1.0**	5.0	4.0	9.0	3.0

Table 3 Simple Multimodal functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

Method		CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
30-D													
f_{10}	Avg.Obj	8.6963E+03	3.2277E+03	4.7968E+03	3.9748E+03	5.0048E+03	3.8015E+03	8.1082E+03	3.1170E+03	4.4174E+03	3.9213E+03	4.9901E+03	**3.0895E+03**
	Std. dev.	3.5537E+02	5.2523E+02	6.5854E+02	6.9957E+02	6.3017E+02	4.9797E+02	3.4483E+02	5.0187E+02	7.8190E+02	7.3778E+02	6.1531E+02	**2.4836E+02**
	p-Value	2.1093E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	3.7850E-09	7.5552E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	3.0	8.0	6.0	10.0	4.0	11.0	2.0	7.0	5.0	9.0	**1.0**
f_{11}	Avg.Obj	9.4018E+03	4.0725E+03	5.4627E+03	4.3587E+03	5.9709E+03	5.0707E+03	8.5721E+03	4.0597E+03	5.0243E+03	4293.74917	5.8132E+03	**3.9633E+03**
	Std. dev.	3.4139E+02	4.0912E+02	6.7747E+02	6.5400E+02	9.5793E+02	5.8713E+02	2.5112E+02	4.8890E+02	5.3995E+02	6.7703E+02	7.3240E+02	**1.0387E+02**
	p-Value	4.2323E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	3.0	8.0	5.0	10.0	7.0	11.0	2.0	6.0	4.0	9.0	**1.0**
f_{12}	Avg.Obj	1.2034E+03	1.2025E+03	1.2007E+03	1.2003E+03	1.2016E+03	1.2002E+03	1.2027E+03	1.2003E+03	1.2003E+03	1.2003E+03	1.2016E+03	**1.2001E+03**
	Std. dev.	4.1543E-01	2.5325E-01	2.7726E-01	2.1034E-01	4.1465E-01	2.1980E-02	3.0415E-01	3.7214E-02	1.6224E-01	1.3379E-01	4.5029E-01	**5.8079E-02**
	p-Value	5.0452E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.5484E-05	2.1002E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	10.0	7.0	4.5	8.5	2.0	11.0	4.5	4.5	4.5	8.5	**1.0**
f_{13}	Avg.Obj	1.3100E+03	**1.3003E+03**	1.3036E+03	1.3004E+03	1.3005E+03	1.3005E+03	1.3071E+03	**1.3003E+03**	1.3004E+03	1.3004E+03	1.3005E+03	**1.3003E+03**
	Std. dev.	9.2056E-01	**4.7152E-02**	7.8677E-01	1.0193E-01	1.1919E-01	1.0454E-01	4.8467E-01	**3.8477E-02**	7.9592E-02	9.8132E-02	1.3845E-01	**5.2780E-02**
	p-Value	7.7397E-08	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.4702E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	**2.0**	10.0	5.0	8.0	8.0	11.0	**2.0**	5.0	5.0	8.0	**2.0**
f_{14}	Avg.Obj	1.6730E+03	1.4003E+03	1.4698E+03	1.4005E+03	1.4003E+03	**1.4002E+03**	1.6288E+03	**1.4002E+03**	1.4003E+03	1.4004E+03	1.4003E+03	**1.4002E+03**
	Std. dev.	1.1890E+01	4.1027E-02	1.8664E+01	3.0269E-01	5.9385E-02	**4.8548E-02**	2.5400E+01	**2.7460E-02**	7.7811E-02	2.9025E-01	1.0815E-01	**2.5058E-02**
	p-Value	5.2113E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	9.0681E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.5	10.0	9.0	5.5	**2.0**	11.0	**2.0**	5.5	8.0	5.5	**2.0**
f_{15}	Avg.Obj	1.2050E+06	1.5146E+03	1.5398E+03	1.5105E+03	1.5753E+03	1.5312E+03	2.7359E+05	1.5136E+03	1.5199E+03	1.5101E+03	1.5747E+03	**1.5096E+03**
	Std. dev.	5.0473E+05	1.4775E+00	7.9678E+00	1.3555E+00	2.7361E+01	5.8988E+00	8.5609E+03	2.5566E+00	5.0161E+00	1.1168E+00	2.6867E+01	**8.8795E-01**
	p-Value	1.3129E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.3878E-10	7.5569E-10	6.8129E-10	2.8249E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	8.0	3.0	10.0	7.0	11.0	4.0	6.0	2.0	9.0	**1.0**
f_{16}	Avg.Obj	1.6125E+03	1.6115E+03	1.6128E+03	1.6117E+03	1.6127E+03	1.6122E+03	1.6121E+03	1.6114E+03	1.6125E+03	1.6116E+03	1.6125E+03	**1.6113E+03**
	Std. dev.	3.3965E-01	4.2268E-01	3.9383E-01	3.4767E-01	4.3054E-01	5.8897E-01	3.0829E-01	4.5936E-13	4.2138E-01	7.1779E-01	5.4337E-01	**7.0681E-01**
	p-Value	5.7407E-09	7.5569E-10	4.3371E-10	7.5399E-10	1.8355E-04	1.2094E-09	8.0311E-10	1.5375E-12	1.9919E-06	8.0311E-10	3.3508E-06	**N/A**
	Rank	9.0	3.0	12.0	5.0	11.0	7.0	6.0	2.0	9.0	4.0	9.0	**1.0**
Overall rank		153.0	67.0	110.5	63.5	114.0	78.0	138.0	44.0	66.5	51.5	102.0	**26.0**

Table 4 Simple Multimodal functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	50-D												
f_4	Avg.Obj	5.8462E+04	1.0308E+03	1.0766E+04	5.3067E+02	6.5999E+02	5.9715E+02	4.7366E+04	5.0637E+02	5.4695E+02	5.0755E+02	6.4454E+02	**4.9020E+02**
	Std. dev.	2.1042E+03	1.3299E+02	3.3915E+03	5.1473E+00	6.5643E+01	4.4552E+01	6.7688E+03	1.7025E+01	4.4424E+01	2.8943E+01	6.3439E+01	**4.4169E+01**
	p-Value	4.2507E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	2.1636E-10	7.5569E-10	7.4584E-10	2.5085E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	9.0	10.0	4.0	8.0	6.0	11.0	2.0	5.0	3.0	7.0	**1.0**
f_5	Avg.Obj	5.2117E+02	5.2113E+02	5.2002E+02	5.2014E+02	5.2046E+02	5.2105E+02	5.2115E+02	5.2106E+02	**5.2000E+02**	5.2013E+02	5.2032E+02	5.2011E+02
	Std. dev.	3.5276E-02	3.8638E-02	3.3088E-03	7.8409E-02	1.5677E-01	3.1402E-02	3.7536E-02	4.1462E-02	**9.7675E-04**	5.1228E-02	2.1935E-01	2.2968E-13
	p-Value	3.3136E-11	7.5569E-10	5.5569E-03	4.3816E-05	7.5569E-10	7.4753E-10	2.5085E-09	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	1.5375E-05
	Rank	12.0	10.0	2.0	5.0	7.0	8.0	11.0	9.0	**1.0**	4.0	6.0	3.0
f_6	Avg.Obj	6.7940E+02	6.2784E+02	6.6640E+02	6.3434E+02	6.6549E+02	6.5601E+02	6.7380E+02	6.2730E+02	6.4440E+02	**6.2511E+02**	6.6442E+02	6.2974E+02
	Std. dev.	1.9365E+00	2.8436E+00	3.0942E+00	2.0238E+00	3.7860E+00	2.8107E+00	1.4055E+00	2.6007E+00	4.3959E+00	**4.6030E+00**	5.3037E+00	4.5936E-13
	p-Value	1.8756E-11	7.5569E-05	7.5569E-10	6.2597E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	7.5569E-10	2.9456E-05	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	1.5375E-05
	Rank	12.0	3.0	10.0	5.0	9.0	7.0	11.0	2.0	6.0	**1.0**	8.0	4.0
f_7	Avg.Obj	2.4704E+03	7.3667E+02	1.3383E+03	7.0019E+02	7.0121E+02	7.0112E+02	2.3664E+03	7.0104E+02	**7.0006E+02**	7.0011E+02	7.0118E+02	7.0043E+02
	Std. dev.	3.4407E+01	9.9674E+00	1.4886E+02	4.2986E-02	1.1989E-01	9.7072E-03	1.1796E+02	6.0621E-03	**3.0629E-02**	2.3081E-02	1.1286E-01	4.1054E-02
	p-Value	4.0100E-05	7.5569E-10	7.5569E-10	8.6929E-03	7.5569E-10	7.5569E-10	3.0382E-07	7.5569E-10	**N/A**	6.9295E-03	7.5569E-10	8.2207E-03
	Rank	12.0	9.0	10.0	3.0	8.0	6.0	11.0	5.0	**1.0**	2.0	7.0	4.0
f_8	Avg.Obj	1.5370E+03	9.5000E+02	1.1606E+03	9.6275E+02	1.1407E+03	1.0999E+03	1.4716E+03	**8.9409E+02**	1.0454E+03	9.5937E+02	1.1289E+03	1.0343E+03
	Std. dev.	2.4535E+01	1.8385E+01	3.7446E+01	3.4164E+01	6.4791E+01	3.4908E+01	1.0134E+01	**1.8626E+01**	2.9780E+01	3.9404E+01	5.9020E+01	6.0118E+00
	p-Value	4.0937E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	6.4424E-10
	Rank	12.0	2.0	10.0	4.0	9.0	7.0	11.0	**1.0**	6.0	3.0	8.0	5.0
f_9	Avg.Obj	1.7897E+03	1.0550E+03	1.3628E+03	1.2090E+03	1.3343E+03	1.3185E+03	1.7787E+03	**1.0514E+03**	1.1664E+03	1.0970E+03	1.3103E+03	1.1893E+03
	Std. dev.	6.5833E+00	2.0946E+01	3.9892E+01	2.0932E+01	7.6689E+01	3.5148E+01	4.6222E+01	**2.3337E+01**	4.0233E+01	3.9711E+01	6.6587E+01	3.4428E+00
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	3.4580E-10	7.5569E-10	7.5262E-10	1.2363E-01	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	6.2597E-10
	Rank	12.0	2.0	10.0	6.0	9.0	8.0	11.0	**1.0**	4.0	3.0	7.0	5.0
f_{10}	Avg.Obj	1.5544E+04	6.3038E+03	8.9981E+03	7.0248E+03	8.5387E+03	6.2091E+03	1.4567E+04	6.2982E+03	8.0166E+03	6.6706E+03	8.4090E+03	**5.2472E+03**
	Std. dev.	4.5485E+02	7.6119E+02	1.0347E+03	9.9581E+02	1.1006E+03	7.3454E+02	3.3691E+02	6.8874E+02	1.1391E+03	9.1759E+02	1.2410E+03	**5.0984E+02**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	4.0	10.0	6.0	9.0	2.0	11.0	3.0	7.0	5.0	8.0	**1.0**
f_{11}	Avg.Obj	1.6090E+04	6.8120E+03	9.4698E+03	7.0628E+03	1.0052E+04	8.2681E+03	1.4992E+04	6.1131E+03	7.8356E+03	6.8517E+03	9.5257E+03	**6.0896E+03**
	Std. dev.	4.1120E+02	7.7287E+02	1.1157E+03	7.8431E+02	1.2692E+03	7.8569E+02	2.8252E+02	8.1745E+02	1.0576E+03	8.4969E+02	1.3690E+03	**9.4643E+01**
	p-Value	7.6159E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	3.0	8.0	5.0	10.0	7.0	11.0	2.0	6.0	4.0	9.0	**1.0**

Table 4 Simple Multimodal functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	50-D												
f_{12}	Avg.Obj	1.2043E+03	1.2033E+03	1.2009E+03	1.2004E+03	1.2024E+03	1.2005E+03	1.2036E+03	**1.2001E+03**	1.2004E+03	1.2004E+03	1.2023E+03	**1.2001E+03**
	Std. dev.	4.2839E-01	2.9498E-01	3.6092E-01	2.2307E-01	6.0490E-01	5.2558E-02	3.4745E-01	**1.9480E-02**	2.4395E-01	1.8684E-01	5.8115E-01	**4.2965E-02**
	p-Value	1.6524E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	10.0	7.0	4.0	9.0	6.0	11.0	**1.5**	4.0	4.0	8.0	**1.5**
f_{13}	Avg.Obj	1.3097E+03	1.3005E+03	1.3053E+03	1.3006E+03	1.3006E+03	1.3006E+03	1.3091E+03	1.3005E+03	1.3005E+03	1.3006E+03	1.3005E+03	**1.3004E+03**
	Std. dev.	1.2459E-01	3.4525E-02	5.7142E-01	1.0510E-01	1.0673E-01	6.1996E-02	4.1906E-01	4.4276E-02	7.5928E-02	1.2628E-01	1.1331E-01	**5.3808E-02**
	p-Value	1.4701E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	1.2265E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	3.5	10.0	7.5	7.5	7.5	11.0	3.5	3.5	7.5	3.5	**1.0**
f_{14}	Avg.Obj	1.8370E+03	1.4004E+03	1.5483E+03	1.4006E+03	1.4004E+03	1.4003E+03	1.7646E+03	1.4003E+03	1.4003E+03	1.4006E+03	1.4003E+03	**1.4002E+03**
	Std. dev.	3.7086E+01	2.0015E-01	2.9510E+01	3.8182E-01	8.8102E-02	3.2112E-02	1.6158E+01	2.0301E-02	3.5752E-02	3.9897E-01	4.3883E-02	**2.5043E-02**
	p-Value	5.2761E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5467E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	6.5	10.0	8.5	6.5	3.5	11.0	3.5	3.5	8.5	3.5	**1.0**
f_{15}	Avg.Obj	1.6512E+07	1.5926E+03	4.2001E+03	1.5244E+03	1.7616E+03	1.5462E+03	1.1949E+07	1.5221E+03	1.5576E+03	**1.5163E+03**	1.7588E+03	1.5203E+03
	Std. dev.	1.9193E+06	2.7541E+01	1.0592E+04	3.9252E+00	7.2849E+01	6.2357E+00	4.0923E+06	2.6775E+00	1.2470E+01	**3.9272E+00**	6.8699E+01	1.0743E+00
	p-Value	3.6528E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	5.4142E-10	7.5569E-10	7.4770E-10	2.0979E-11	6.2946E-05	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	2.1636E-02
	Rank	12.0	7.0	10.0	4.0	9.0	5.0	11.0	3.0	6.0	**1.0**	8.0	2.0
f_{16}	Avg.Obj	1.6223E+03	1.6209E+03	1.6220E+03	1.6210E+03	1.6224E+03	1.6216E+03	1.6218E+03	1.6200E+03	1.6220E+03	1.6210E+03	1.6222E+03	**1.6199E+03**
	Std. dev.	3.3958E-01	7.0150E-01	4.1961E-01	6.4453E-01	5.1830E-01	7.1383E-01	3.3830E-01	2.9187E-01	3.1933E-01	6.2692E-01	4.5614E-01	**5.8796E-01**
	p-Value	1.1776E-09	9.0681E-03	2.2571E-09	1.1536E-09	2.9108E-06	1.5164E-08	7.8262E-08	5.5293E-03	9.3460E-10	1.5591E-09	5.1977E-09	**N/A**
	Rank	11.0	3.0	8.5	4.5	12.0	6.0	7.0	2.0	8.5	4.5	10.0	**1.0**
Overall rank		155.0	72.0	115.5	66.5	113.0	79.0	139.0	38.5	61.5	50.5	93.0	30.5

Table 5 Hybrid functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D and 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_{17}	Avg.Obj	2.3799E+08	3.8818E+05	1.0118E+07	2.5099E+05	3.5065E+06	8.2220E+05	3.6996E+07	3.4212E+05	1.7306E+06	2.2422E+05	2.6037E+06	**9.8969E+04**
	Std. dev.	9.4108E+07	2.6890E+05	6.7400E+06	1.4745E+05	2.3569E+06	2.7776E+05	1.0321E+07	2.0950E+05	1.2565E+06	1.4323E+05	1.4260E+06	**7.3983E+04**
	p-Value	3.2868E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.4669E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	10.0	3.0	9.0	6.0	11.0	4.0	7.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{18}	Avg.Obj	7.7705E+09	7.9165E+04	2.2474E+07	1.7227E+04	1.2282E+04	4.7063E+03	1.7846E+09	6.5200E+04	**3.0415E+03**	1.4159E+04	1.0142E+04	3.9436E+03
	Std. dev.	2.4021E+09	2.3140E+04	9.4741E+07	9.7142E+03	32335.5	3.3311E+03	5.6451E+08	1.5120E+04	**1.5712E+03**	1.0984E+04	1.8094E+04	2.6935E+03
	p-Value	5.8098E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	2.1579E-03
	Rank	12.0	9.0	10.0	7.0	5.0	3.0	11.0	8.0	**1.0**	6.0	4.0	2.0

Table 5 Hybrid functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D and 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_{19}	Avg.Obj	2.7328E+03	1.9162E+03	1.9275E+03	1.9144E+03	1.9442E+03	1.9658E+03	2.2677E+03	1.9159E+03	1.9158E+03	1.9127E+03	1.9431E+03	**1.9114E+03**
	Std. dev.	1.0448E+02	7.8577E+00	2.5256E+01	1.3954E+01	37.8	1.6300E+01	5.2296E+01	8.6308E+00	8.5975E+00	1.0784E+01	3.2127E+01	**1.8808E+00**
	p-Value	9.6052E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	6.8144E-10	7.5569E-10	7.5552E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	6.0	7.0	3.0	9.0	10.0	11.0	5.0	4.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{20}	Avg.Obj	2.6840E+06	1.0761E+04	6.3547E+04	2.3987E+03	2.5788E+04	1.6249E+04	1.7309E+05	3.4584E+03	2.4095E+04	**2.3780E+03**	2.0685E+04	3.0813E+03
	Std. dev.	1.9727E+06	3.3144E+03	4.4469E+04	1.1336E+02	1.5127E+04	7.8963E+03	9.0965E+04	1.0807E+03	1.0348E+04	**1.1426E+02**	1.2932E+04	4.3954E+02
	p-Value	3.6484E-06	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5160E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.2220E-08
	Rank	12.0	5.0	10.0	2.0	9.0	6.0	11.0	4.0	8.0	**1.0**	7.0	3.0
f_{21}	Avg.Obj	8.8824E+07	9.2658E+04	5.4296E+06	7.6027E+04	1.1376E+06	5.4364E+05	1.1684E+07	8.9538E+04	4.8133E+05	7.3129E+04	9.5673E+05	**7.2886E+04**
	Std. dev.	5.0304E+07	8.1384E+04	4.4055E+06	3.3994E+04	9.5708E+05	2.6735E+05	4.7384E+06	5.1668E+04	4.0490E+05	3.4622E+04	6.7945E+05	**4.5934E+04**
	p-Value	5.7773E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5024E-10	7.5569E-10	7.5245E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	10.0	3.0	9.0	7.0	11.0	4.0	6.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{22}	Avg.Obj	1.4461E+04	2.4501E+03	3.1466E+03	2.5714E+03	3.0278E+03	3.4264E+03	3.9432E+03	**2.4466E+03**	2.8155E+03	2.5355E+03	3.0025E+03	2.4858E+03
	Std. dev.	1.7645E+04	6.7729E+01	2.3560E+02	1.5870E+02	2.0829E+02	2.0830E+02	2.1747E+02	**7.7481E+01**	2.0854E+02	1.5982E+02	2.1972E+02	1.9248E+01
	p-Value	3.2813E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.3811E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	2.1636E-10
	Rank	12.0	2.0	9.0	5.0	8.0	10.0	11.0	**1.0**	6.0	4.0	7.0	3.0
f_{17}	Avg.Obj	9.7588E+08	8.6491E+05	4.9362E+07	6.7084E+05	1.8098E+07	1.2048E+06	2.3809E+08	8.4569E+05	2.3871E+06	5.8095E+05	1.4128E+07	**1.3032E+05**
	Std. dev.	3.0751E+08	4.3737E+05	3.5157E+07	2.4522E+05	1.0542E+07	3.3170E+05	6.1997E+07	5.0180E+05	1.2062E+06	2.3867E+05	8.5281E+06	**4.7015E+04**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	2.3585E-06	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	10.0	3.0	9.0	6.0	11.0	4.0	7.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{18}	Avg.Obj	2.6544E+10	8.4821E+04	1.3580E+09	5.9004E+03	1.0708E+04	5.7690E+03	1.0299E+10	7.4520E+04	3.5677E+03	5.2529E+03	5.3358E+03	**3.2621E+03**
	Std. dev.	4.1259E+09	1.3916E+04	1.4553E+09	2.1625E+03	8.0898E+03	1.2376E+03	1.6891E+09	1.0210E+04	1.2783E+03	2.1504E+03	2.0796E+03	**1.4043E+03**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	4.8591E-06	2.5693E-08	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	9.0	10.0	6.0	7.0	5.0	11.0	8.0	2.0	3.0	4.0	**1.0**
f_{19}	Avg.Obj	6.7867E+03	1.9555E+03	1.9828E+03	1.9242E+03	1.9863E+03	1.9681E+03	3.2330E+03	1.9528E+03	1.9479E+03	1.9239E+03	1.9822E+03	**1.9232E+03**
	Std. dev.	1.3737E+03	2.7468E+01	1.2040E+02	2.7284E+00	3.0161E+01	3.1111E+01	2.0942E+02	2.6465E+01	2.9197E+01	9.7989E+00	3.0167E+01	**8.5602E+00**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.4382E-10	7.5569E-10	7.5416E-10	7.5569E-10	7.5211E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	6.0	9.0	3.0	10.0	7.0	11.0	5.0	4.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{20}	Avg.Obj	1.4865E+06	1.1760E+04	1.1124E+05	2.7026E+03	9.5643E+04	9.8378E+03	3.9347E+05	4.1285E+03	2.8924E+04	2.6891E+03	8.2767E+04	**2.6531E+03**
	Std. dev.	7.1230E+02	2.8654E+03	6.5140E+04	1.1786E+02	9.0336E+04	4.7445E+03	1.5942E+05	8.8219E+02	9.5299E+03	1.3966E+02	6.1238E+04	**5.0937E+02**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5552E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	6.0	10.0	3.0	9.0	5.0	11.0	4.0	7.0	2.0	8.0	**1.0**
f_{21}	Avg.Obj	3.5227E+08	4.9253E+05	1.1504E+07	4.4711E+05	5.1710E+06	8.3068E+05	5.5107E+07	4.2194E+05	2.6425E+06	4.0437E+05	4.5187E+06	**9.5857E+04**
	Std. dev.	1.4564E+08	3.1941E+05	5.9151E+06	1.5025E+05	3.1599E+06	3.2473E+05	1.3778E+07	2.0779E+05	1.1071E+06	1.6968E+05	3.3718E+06	**4.1897E+04**
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5279E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	10.0	4.0	9.0	6.0	11.0	3.0	7.0	2.0	8.0	**1.0**

Table 5 Hybrid functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D and 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_{22}	Avg.Obj	4.9372E+05	2.8717E+03	4.2585E+03	3.1872E+03	4.2343E+03	4.2081E+03	8.2666E+03	**2.8188E+03**	3.6787E+03	3.1199E+03	4.0302E+03	3.0674E+03
	Std. dev.	4.8462E+05	3.1929E+02	5.3113E+02	2.5854E+02	4.9537E+02	3.2813E+02	1.6985E+03	**1.8963E+02**	3.9958E+02	3.1231E+02	4.1731E+02	2.5273E+02
	p-Value	7.5569E-10	4.2946E-03	7.5569E-10	7.3878E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	1.5375E-03
	Rank	12.0	2.0	10.0	5.0	9.0	8.0	11.0	**1.0**	6.0	4.0	7.0	3.0
Overall rank		72.0	33.0	59.0	24.0	53.0	37.0	66.0	25.0	33.0	15.0	43.0	**8.0**

Table 6 Composition functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_{23}	Avg.Obj	3.1380E+03	2.6222E+03	2.6151E+03	2.6158E+03	2.6354E+03	2.6153E+03	3.1264E+03	2.6153E+03	**2.6114E+03**	2.6157E+03	2.6337E+03	2.6152E+03
	Std. dev.	1.1085E+02	2.1393E+00	8.2920E+01	4.6064E-01	1.1729E+01	1.7565E-03	1.1083E+02	1.2428E-02	**2.2992E+01**	4.7429E-01	9.9095E+00	4.4453E-04
	p-Value	2.1108E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	1.6227E-03	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10
	Rank	12.0	8.0	2.0	7.0	10.0	4.5	11.0	4.5	**1.0**	6.0	9.0	3.0
f_{24}	Avg.Obj	2.7877E+03	2.6256E+03	2.6105E+03	2.6315E+03	2.6073E+03	2.6509E+03	2.7872E+03	2.6248E+03	**2.6018E+03**	2.6310E+03	2.6067E+03	2.6051E+03
	Std. dev.	1.6495E+01	1.2132E+00	1.0718E+01	7.8199E+00	4.5192E+00	1.7631E+01	1.9351E+01	1.1295E+00	**3.2940E+00**	6.5551E+00	5.1267E+00	2.9285E+00
	p-Value	8.0265E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5484E-10	7.5569E-10	7.4113E-10	9.5875E-02	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	3.7099E-02
	Rank	12.0	7.0	5.0	9.0	4.0	10.0	11.0	6.0	**1.0**	8.0	3.0	2.0
f_{25}	Avg.Obj	2.7698E+03	2.7049E+03	2.7058E+03	2.7054E+03	2.7242E+03	2.7361E+03	2.7666E+03	2.7048E+03	**2.7027E+03**	2.7062E+03	2.7216E+03	2.7161E+03
	Std. dev.	1.1994E+01	2.4505E+00	2.5171E+00	1.4246E+00	1.4781E+01	4.8677E+00	1.1983E+01	1.0253E+00	**3.7170E+00**	1.9780E+00	1.5410E+01	2.3908E+00
	p-Value	5.0194E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.3544E-10	7.2929E-10	2.8083E-11	7.2345E-08	**N/A**	7.5569E-10	6.8144E-10	7.3377E-10
	Rank	12.0	3.0	5.0	4.0	9.0	10.0	11.0	2.0	**1.0**	6.0	8.0	7.0
f_{26}	Avg.Obj	2.7181E+03	2.7084E+03	2.7185E+03	2.7224E+03	2.7005E+03	2.7801E+03	2.7171E+03	2.7084E+03	2.7067E+03	2.7104E+03	2.7004E+03	**2.7003E+03**
	Std. dev.	5.9360E+00	2.7304E+01	3.3277E+01	4.1849E+01	1.2530E-01	4.0301E+01	4.9389E+00	2.7310E+01	1.3534E+01	3.0311E+01	1.2952E-01	**3.0943E-02**
	p-Value	2.4540E-10	1.8586E-05	2.9010E-07	1.6881E-09	7.5569E-10	1.8607E-08	4.5325E-05	1.8586E-05	1.4172E-08	2.1913E-06	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	9.0	6.0	10.0	11.0	3.0	12.0	8.0	5.0	4.0	7.0	2.0	**1.0**
f_{27}	Avg.Obj	3.7302E+03	3.1164E+03	3.2908E+03	3.2601E+03	3.6694E+03	3.8203E+03	3.7152E+03	3.1039E+03	3.1997E+03	3.2406E+03	3.6455E+03	**3.1015E+03**
	Std. dev.	9.3888E+01	1.0523E+01	2.9260E+02	1.0986E+02	3.8912E+02	2.2162E+02	1.0250E+02	1.2863E+00	2.0826E+02	1.2823E+02	4.2561E+02	**5.2268E-01**
	p-Value	2.9643E-09	7.5569E-10	1.8648E-09	7.4719E-10	1.5171E-09	9.8073E-09	1.2659E-08	9.2946E-05	7.5569E-10	7.5569E-10	9.5875E-08	**N/A**
	Rank	11.0	3.0	7.0	6.0	9.0	12.0	10.0	2.0	4.0	5.0	8.0	**1.0**
f_{28}	Avg.Obj	7.6623E+03	4.2411E+03	7.0162E+03	3.7952E+03	4.9296E+03	7.5656E+03	7.4073E+03	**3.6514E+03**	5.9942E+03	3.7309E+03	4.9060E+03	5.7270E+03
	Std. dev.	8.2683E+02	3.5222E+02	5.4659E+02	2.0932E+02	6.0352E+02	6.8329E+02	9.2015E+02	**4.2063E+01**	8.1094E+02	1.7864E+02	4.9021E+02	1.9547E+02
	p-Value	1.9425E-09	7.5569E-10	9.1375E-08	7.5569E-10	7.5569E-10	4.5438E-11	3.7190E-11	**N/A**	1.0872E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	6.2597E-10
	Rank	12.0	4.0	9.0	3.0	6.0	11.0	10.0	**1.0**	8.0	2.0	5.0	7.0

Table 6 Composition functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 30-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	30-D												
f_{29}	Avg.Obj	1.8760E+07	1.6077E+04	7.5539E+06	7.4381E+05	4.4412E+06	2.6289E+06	1.8620E+07	6.2988E+03	1.5826E+06	2.0352E+05	4.2436E+06	**4.2314E+03**
	Std. dev.	1.3167E+07	3.4732E+03	1.2094E+07	2.4760E+06	4.9197E+06	4.5078E+06	1.6577E+07	7.1446E+02	5.4582E+06	1.3232E+06	4.8302E+06	**2.3206E+02**
	p-Value	7.2792E-09	7.5569E-10	1.3831E-09	7.5399E-10	7.4990E-10	7.4029E-10	6.9928E-08	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5279E-10	**N/A**
	Rank	12.0	3.0	10.0	5.0	9.0	7.0	11.0	2.0	6.0	4.0	8.0	**1.0**
f_{30}	Avg.Obj	1.5790E+06	2.0114E+04	4.5515E+05	9.8550E+03	9.1064E+04	6.2358E+03	1.4505E+06	5.6485E+03	6.0181E+04	9.6229E+03	9.0257E+04	**5.3403E+03**
	Std. dev.	3.8527E+05	6.6873E+03	2.6586E+05	3.7609E+03	7.3361E+04	6.1930E+02	4.5848E+05	8.7147E+02	2.9296E+04	2.3675E+03	6.1458E+04	**5.4975E+02**
	p-Value	1.1101E-09	7.5569E-10	1.2659E-08	7.5569E-10	7.5569E-10	7.0806E-10	3.3668E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	6.0	10.0	5.0	9.0	3.0	11.0	2.0	7.0	4.0	8.0	**1.0**
Overall rank		92.0	40.0	58.0	50.0	59.0	69.5	83.0	24.5	32.0	42.0	51.0	**23.0**

Table 7 Composition functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold.

	Method	CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
	50-D												
f_{23}	Avg.Obj	4.1389E+03	2.7075E+03	2.7520E+03	2.6504E+03	2.6854E+03	2.6441E+03	4.0451E+03	2.6441E+03	**2.5827E+03**	2.6485E+03	2.6839E+03	2.6440E+03
	Std. dev.	1.7899E+02	1.5485E+01	9.8725E+01	3.0814E+00	2.9707E+01	7.3895E-03	2.4907E+02	1.0667E-02	**7.4011E+01**	1.8486E+00	1.0428E+01	5.8747E-04
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-01
	Rank	12.0	9.0	10.0	6.0	8.0	3.5	11.0	3.5	**1.0**	5.0	7.0	2.0
f_{24}	Avg.Obj	3.0495E+03	2.6725E+03	2.6421E+03	2.6799E+03	**2.6003E+03**	2.7028E+03	3.0440E+03	2.6721E+03	2.6070E+03	2.6791E+03	**2.6003E+03**	2.6367E+03
	Std. dev.	4.0193E+01	2.6671E+00	2.4170E+01	3.3146E+00	**5.4160E-01**	2.6180E+01	3.4171E+01	5.1024E+00	1.4281E+01	3.6231E+00	**5.5893E-01**	2.1385E+01
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5228E-10	**N/A**	7.5484E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	1.8153E-03	7.5569E-10	**N/A**	2.1636E-03
	Rank	12.0	7.0	5.0	9.0	**1.5**	10.0	11.0	6.0	3.0	8.0	**1.5**	4.0
f_{25}	Avg.Obj	2.8819E+03	2.7119E+03	2.7104E+03	2.7314E+03	2.7168E+03	2.7634E+03	2.8797E+03	2.7065E+03	**2.7003E+03**	2.7149E+03	2.7159E+03	2.7314E+03
	Std. dev.	2.3802E+01	2.3259E+00	4.0475E+00	3.1715E+00	3.2142E+01	8.7552E+00	2.9474E+01	6.5297E+00	**2.2481E+00**	3.7768E+00	2.8957E+01	1.5111E-01
	p-Value	6.0844E-11	7.5569E-10	7.5569E-10	3.8094E-12	7.5036E-11	7.5313E-10	4.7989E-07	7.5569E-10	**N/A**	7.5569E-10	9.1357E-11	2.1636E-10
	Rank	12.0	4.0	3.0	8.5	7.0	10.0	11.0	2.0	**1.0**	5.0	6.0	8.5
f_{26}	Avg.Obj	2.7311E+03	2.7943E+03	2.7975E+03	2.7887E+03	**2.7005E+03**	2.7982E+03	2.7270E+03	2.7846E+03	2.7967E+03	2.7711E+03	**2.7005E+03**	2.7078E+03
	Std. dev.	1.4777E+01	2.3406E+01	1.8168E+01	8.4199E+01	**1.0711E-01**	1.4108E+01	1.0922E+01	3.6026E+01	1.7814E+01	9.1783E+01	**9.1350E-02**	2.1179E+01
	p-Value	7.5569E-10	1.0872E-09	9.0681E-10	7.5569E-10	**N/A**	7.9968E-10	1.6772E-03	6.3812E-09	9.0681E-10	5.0608E-04	**N/A**	1.0177E-01
	Rank	5.0	9.0	11.0	8.0	**1.5**	12.0	4.0	7.0	10.0	6.0	**1.5**	3.0
f_{27}	Avg.Obj	5.2136E+03	3.7932E+03	5.1924E+03	3.6682E+03	4.8355E+03	4.7212E+03	5.1939E+03	3.6832E+03	4.3665E+03	3.6561E+03	4.8055E+03	**3.4928E+03**
	Std. dev.	5.7171E+01	1.2750E+02	3.1406E+02	1.0880E+02	1.0442E+02	2.1927E+02	8.6634E+01	1.9267E+02	1.5245E+02	1.1728E+02	1.3498E+02	**4.8228E+02**
	p-Value	4.0620E-11	7.5569E-10	9.9615E-11	7.5228E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	2.5435E-11	7.4382E-10	7.5569E-10	6.5295E-05	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	5.0	10.0	3.0	9.0	7.0	11.0	4.0	6.0	2.0	8.0	1.0

Table 7 Composition functions: comparison of the CSBO with other optimization algorithms for 50-D problems. The best Avg.Obj results among the 12 algorithms are shown in bold. (cont.)

Method		CSA	FA	KH	MVO	WOA	SBO	CCSA	CFA	CKH	CMVO	CWOA	CSBO
50-D													
f_{28}	Avg.Obj	1.4253E+04	7.1208E+03	1.1834E+04	4.5947E+03	7.8565E+03	1.2274E+04	1.4175E+04	**4.0265E+03**	9.3555E+03	4.5181E+03	7.6341E+03	8.6528E+03
	Std. dev.	8.3188E+02	6.6624E+02	1.4449E+03	4.1304E+02	1.5909E+03	1.2712E+03	9.6319E+02	**8.0207E+01**	1.0213E+03	4.9555E+02	1.6450E+03	7.7053E+02
	p-Value	7.5569E-10	7.5569E-10	8.5342E-10	7.3878E-10	7.5569E-10	1.8648E-09	2.6731E-11	**N/A**	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	1.5375E-09
	Rank	12.0	4.0	9.0	3.0	6.0	10.0	11.0	**1.0**	8.0	2.0	5.0	7.0
f_{29}	Avg.Obj	7.9630E+07	2.8216E+04	3.4356E+08	2.7550E+06	2.9042E+07	3.7709E+06	6.0688E+07	1.0337E+04	3.1187E+07	9.3730E+05	2.4111E+07	**8.7044E+03**
	Std. dev.	5.1018E+07	4.4022E+03	2.8723E+08	1.0794E+07	2.3261E+07	1.2994E+07	3.8746E+07	1.1031E+03	1.4731E+08	6.1786E+06	2.0896E+07	**1.0284E+03**
	p-Value	4.9524E-11	7.5569E-10	2.7420E-11	7.5569E-10	5.6855E-09	7.5535E-10	6.2591E-09	7.5569E-10	3.7260E-07	7.5569E-10	7.5552E-10	**N/A**
	Rank	11.0	3.0	12.0	5.0	8.0	6.0	10.0	2.0	9.0	4.0	7.0	**1.0**
f_{30}	Avg.Obj	1.3594E+07	1.5207E+05	2.4083E+06	3.5503E+04	1.0525E+05	1.7875E+04	1.2856E+07	1.4289E+05	1.0046E+05	3.2395E+04	9.0749E+04	**1.3086E+04**
	Std. dev.	3.0940E+06	5.8782E+04	1.5522E+06	1.1145E+04	6.1549E+04	2.4934E+03	3.5440E+06	5.0709E+04	4.7341E+04	8.5506E+03	4.9049E+04	2.5788E+02
	p-Value	6.1064E-09	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5399E-10	1.1471E-10	7.5535E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	7.5569E-10	**N/A**
	Rank	12.0	9.0	10.0	4.0	7.0	2.0	11.0	8.0	6.0	3.0	5.0	**1.0**
Overall rank		88.0	50.0	70.0	46.5	48.0	60.5	80.0	33.5	44.0	35.0	41.0	**27.5**

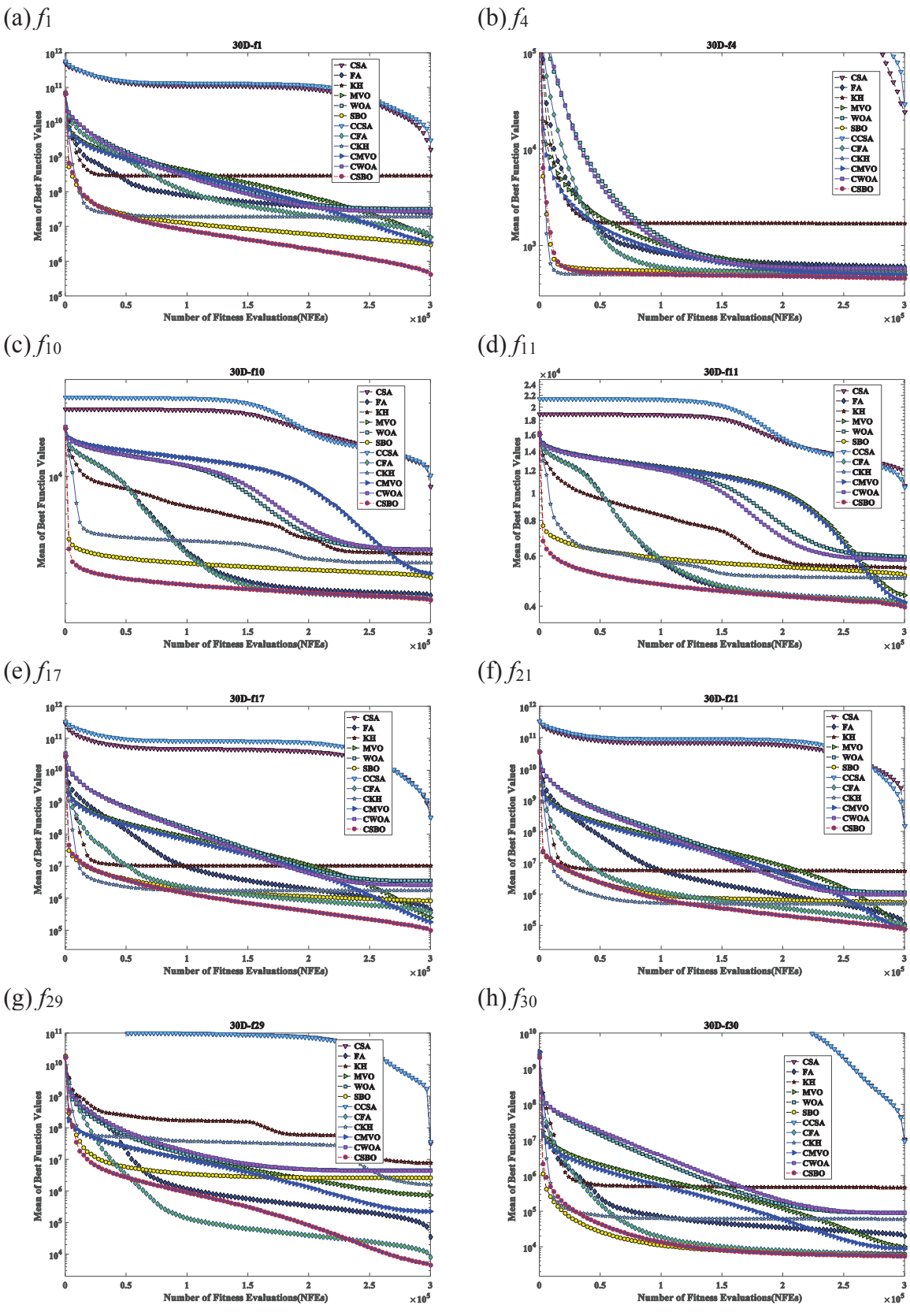


Figure 1 Convergence performance of all 12 optimization algorithms in eight benchmark functions $(f_1, f_4, f_{10}, f_{11}, f_{17}, f_{21}, f_{29}, f_{30})$ at 30-D.

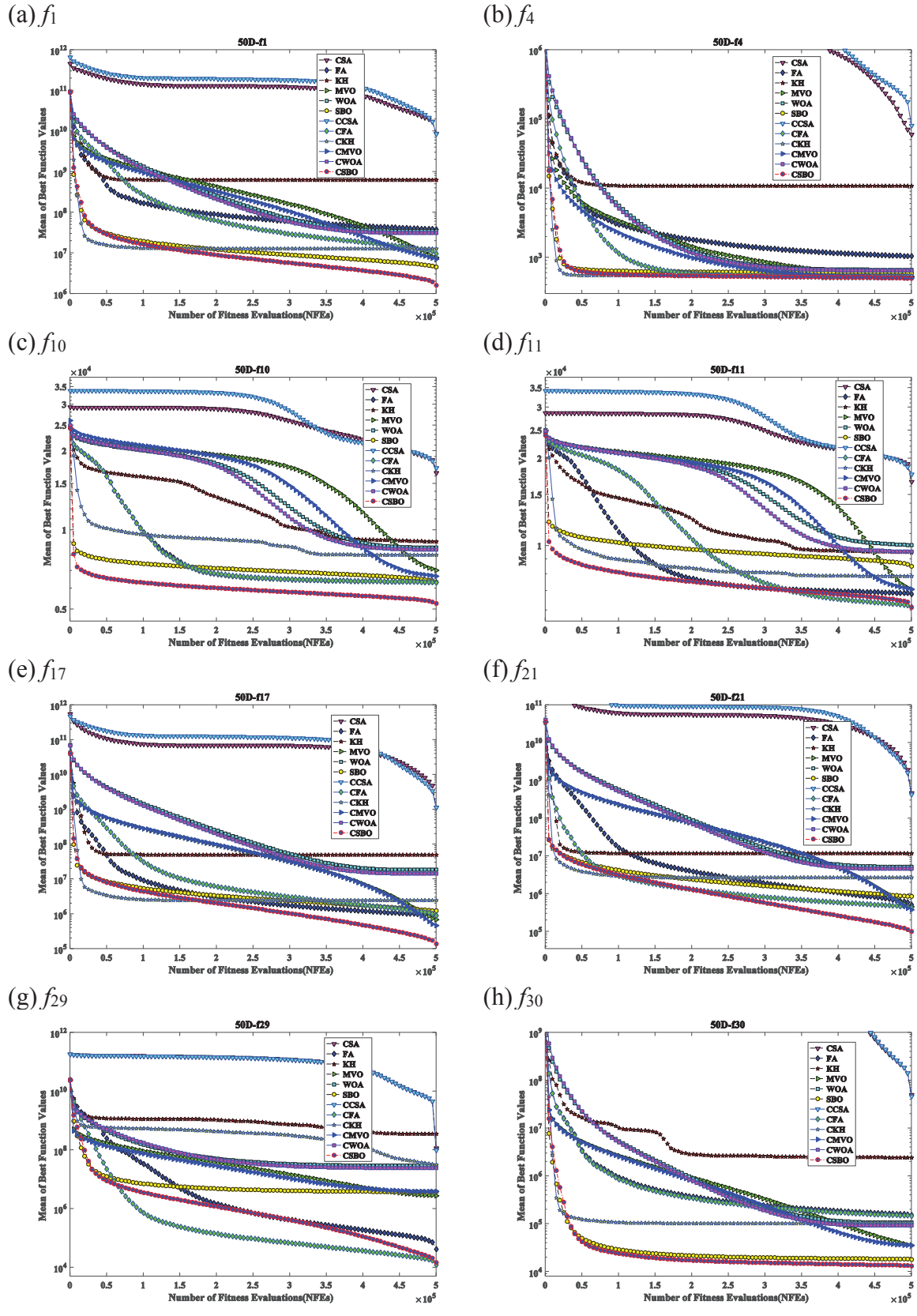


Figure 2 Convergence performance of all 12 optimization algorithms in eight benchmark functions $(f_1, f_4, f_{10}, f_{11}, f_{17}, f_{21}, f_{29}, f_{30})$ at 50-D.

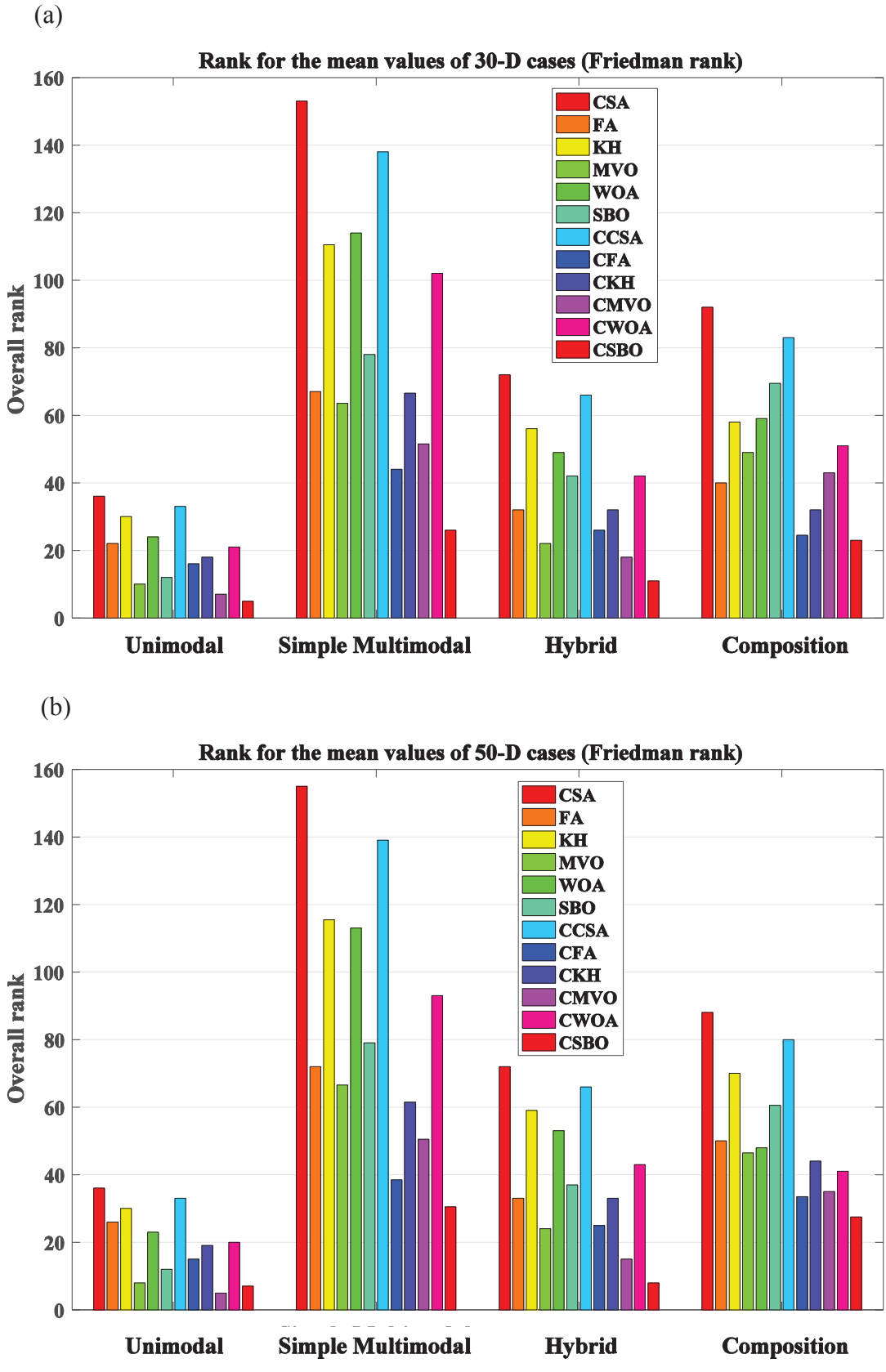


Figure 3 Rank for the mean values of 30-D and 50-D cases (Friedman rank).

Conclusions and future scope

We present a novel, improved meta-heuristic SBO using a wide variety of chaotic maps (CSBO), in which to tune the main parameter, the greatest step size (α) of the standard SBO ; in order to solve complex optimization problems. The numerical results of the experiment show that this novel Tent map chaotic algorithm can greatly enhance the performance of the basic SBO. Moreover, the tuned SBO significantly enhanced the reliability of the global optimality and the quality of the solutions (at CEC2014) of the newly formed algorithm, due to the application of deterministic chaotic signals in place of constant values. In order to evaluate the algorithm with its original (SBO) and improved (CSBO) variants, other mathematical benchmark examples were employed. The statistical results and success rates of the CSBO suggest that the tuned algorithms clearly improve the reliability of the global optimality, and further enhance the quality of the results.

The CSBO proved to be simple and easy to implement within all of our applied (and similar type) applications. In future works, we intend to investigate the further capabilities of the CSBO algorithm in solving real-world engineering problems, as well as discrete optimization problems.

References

Askarzadeh, A. (2016). A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm, *169*, 1–12.

Chintam, J., & Daniel, M. (2018). Real-Power Rescheduling of Generators for Congestion Management Using a Novel Satin Bowerbird Optimization Algorithm. *Energies*, *11*(1), 183.

Frank Wilcoxon. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, *1*(6), 80–83.

Gandomi, A.H., Yang, X.S., Talatahari, S., & Alavi, A.H. (2013). Firefly algorithm with chaos. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *18*(1), 89–98.

Hatamlou, A., Abdullah, S., & Hatamlou, M. (2011). Data Clustering Using Big Bang-Big Crunch Algorithm. *Innovative Computing Technology*, *241*, 383–388. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27337-7_36

Hossein, A. (2012). Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm, *17*, 4831–4845.

Huang, L., Ding, S., Yu, S., Wang, J., & Lu, K. (2015). Chaos-enhanced Cuckoo search optimization algorithms for global optimization. *Applied Mathematical Modelling*, *40*(5–6), 3860–3875.

Kaur, G., & Arora, S. (2018). Chaotic Whale Optimization Algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, *5*(3), 275–284.

Liang, J., Qu, B., & Suganthan, P. (2014). *Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC Special Session and Competition on Single Objective Real-parameter Numerical Optimization, Technical Report 201311,*. Singapore, 2014, pp.: Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou China and Nanyang Technological University,.

Lorenz, E.N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmospheric Sciences.*, *20 (2)*, 130–148.

Mirjalili, S., & Gandomi, A.H. (2017). Chaotic gravitational constants for the gravitational search algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, *53*, 407–419.

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, *95*, 51–67. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008

Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., & Hatamlou, A. (2016). Multi-Verse Optimizer : a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, (27), 495–513. https://doi.org/10.1007/s00521-015-1870-7

Problems, O., Hassanien, A.E., Bhattacharyya, S., & Hassanien, A.E. (2018). Chaotic Crow Search Algorithm for Fractional Optimization Problems. *Applied Soft Computing*.

Samareh Moosavi, S.H., & Khatibi Bardsiri, V. (2017). Satin bowerbird optimizer: A new optimization algorithm to optimize ANFIS for software development effort estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *60*, 1–15.

Sayed, G.I., Khoriba, G., & Haggag, M.H. (2018). A novel chaotic salp swarm algorithm for global optimization and feature selection. *Applied Intelligence*, *48*(10), 3462–3481.

Wang, G.G., Guo, L., Gandomi, A. H., Hao, G.S., & Wang, H. (2014). Chaotic Krill Herd algorithm. *Information Sciences*, *274*, 17–34.

Wangchamhan, T., Chiewchanwattana, S., & Sunat, K. (2017). Efficient algorithms based on the k-means and Chaotic League Championship Algorithm for numeric, categorical, and mixed-type data clustering. *Expert Systems with Applications*, *90*, 146–167.

Xu, Q., Wang, S., Zhang, L., & Liang, Y. (2013). A novel chaos danger model immune algorithm. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *18*(11), 3046–3060. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2013.04.017

Yang, D., Liu, Z., & Zhou, J. (2014). Chaos optimization algorithms based on chaotic maps with different probability distribution and search speed for global optimization. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, *19*, 1229–1246.

Yang, X.-S. (2010). Firefly algorithm, L´evy flights and global optimization. *In: Research and Development in Intelligent Systems XXVI (Eds M. Bramer, R. Ellis, M. Petridis), Springer London,* 209–218.

Yuan, X., Zhang, T., Xiang, Y., & Dai, X. (2015). Parallel chaos optimization algorithm with migration and merging operation. *Applied Soft Computing Journal*, *35*, 591–604.

Yuan, X., Zhao, J., Yang, Y., & Wang, Y. (2014). Hybrid parallel chaos optimization algorithm with harmony search algorithm. *Applied Soft Computing*, *17*, 12–22.

การประเมินความเสี่ยงของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน: กรณีศึกษาอาคารเก็บสารเคมี คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ.

Risk assessment of hazardous waste in a basic chemistry laboratory: The case study of a chemical storage building, Faculty of Applied Science, KMUTNB

จิตมณี พ่วงปิ่น[1], วราภรณ์ บุญโต[1], โกวิทย์ ปิยะมังคลา[2*]
Jitmanee Puangpin[1], Waraporn Boonto[1], Kowit Piyamongkala[2*]

Received: 22 January 2020 ; Revised: 31 May 2020 ; Accepted: 24 June 2020

บทคัดย่อ

ห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) มีของเสียอันตราย ส่วนใหญ่เกิดจากสารเคมี ก่อนการดำเนินงาน มีข้อบกพร่องจำนวน 31 รายการ ที่มีความเสี่ยงในระดับสูงต่อการเกิดอุบัติเหตุ การวางภาชนะบรรจุของเสียอันตรายไว้ภายในห้องน้ำ มีความเสี่ยงระดับ 4 ต้องเคลื่อนย้ายของเสียอันตรายออกจากบริเวณภายในห้องน้ำทันที ในขณะที่ การไม่มีระบบบันทึกข้อมูลของเสียอันตราย การไม่มีการแยกประเภทของเสียอันตรายอย่างชัดเจน การใช้ขวดแก้วเป็นภาชนะบรรจุของเสียอันตราย การไม่มีระบบตรวจสอบความบกพร่องของภาชนะและฉลากของเสียอันตราย ถาดรองรับของเสียอันตรายมีปริมาณไม่พอเพียง ตลอดจนการวางภาชนะบรรจุของเสียอันตรายไว้ใกล้แหล่งกำเนิดความร้อน มีความเสี่ยงอยู่ในระดับ 3 ต้องดำเนินการแก้ไข เพื่อลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน

คำสำคัญ: การประเมินความเสี่ยง ของเสียอันตราย ห้องปฏิบัติการเคมี

Abstract

The basic chemistry laboratories at the Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology, North Bangkok (KMUTNB) generates a considerable amount of hazardous chemical wastes. Before the operation, 31 items showed high risks that are prone to accidents. The bottles containing hazardous waste that were placed within the toilet vicinity were considered at risk of level 4 rating. Thus, immediate actions to remove hazardous waste must be performed. Whilst, lack of data system, default separation of hazardous waste, inappropriate use of containers, damaged labels and defective containers, a limited number of secondary containers, and hazardous wastes near a heat source scored a risk of level 3 rating. With these corrective actions and risk assessment must be employed in order to minimize the risk of accidents that can occur inside a basic chemistry laboratory.

Keywords: Risk Assessment, Hazardous Waste, Chemistry Laboratory

[1] นักศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800
[2] อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800
[1] Student, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800
[2] Instructure, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800
* Corresponding author: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th

บทนำ

กรมควบคุมมลพิษ ได้สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2561 ในส่วนของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ในรายงานกล่าวถึงของเสียอันตรายซึ่งเกิดขึ้นทั่วประเทศมีปริมาณ 22.71 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) โดยของเสียอันตรายสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้หนึ่งของเสียอันตรายจากชุมชน สองกากอุตสาหกรรม และสามมูลฝอยติดเชื้อ ของเสียอันตรายจากชุมชนมีปริมาณรวม 0.64 ล้านตัน แยกออกได้เป็นซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณ 0.42 ล้านตัน (ร้อยละ 65) และแบตเตอรี่ กระป๋องสเปรย์ และถ่านไฟฉายที่เกิดขึ้นในครัวเรือนปริมาณ 0.22 ล้านตัน (ร้อยละ 35)

ในส่วนของกากอุตสาหกรรมมีปริมาณรวม 22.02 ล้านตัน ในส่วนนี้มีกากอุตสาหกรรมปริมาณ 20.82 ล้านตัน (ร้อยละ 94.55) เป็นกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย ที่มีการดำเนินการจัดการ การบำบัดและการกำจัดอย่างถูกต้อง ในขณะที่กากอุตสาหกรรมปริมาณ 1.20 ล้านตัน (ร้อยละ 5.44) เป็นกากอุตสาหกรรมอันตราย ต้องได้รับการจัดการและการบำบัด ตลอดจนมีการกำจัดอย่างถูกต้อง ขณะที่มูลฝอยติดเชื้อที่เกิดจากโรงพยาบาลของรัฐและเอกชน มีปริมาณ 0.06 ล้านตันโรงพยาบาลขนาดใหญ่มีการจัดการ การบำบัด ตลอดจนการกำจัดอย่างถูกต้อง โดยการเผาในเตาเผามูลฝอยติดเชื้อที่อุณหภูมิสูง นึ่งหรือฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำภายในโรงพยาบาล ปริมาณ 0.05 ล้านตัน (ร้อยละ 88.33) ส่วนที่เหลือเป็นโรงพยาบาลขนาดเล็ก มีการเก็บรวบรวมและส่งให้โรงพยาบาลแม่ข่ายสำหรับนำไปกำจัดต่อไป

กรมควบคุมมลพิษได้มีการดำเนินงาน เพื่อวางแผนแม่บทในอนาคต (พ.ศ. 2559-2564) สำหรับบริหารจัดการและขับเคลื่อนปัญหาขยะมูลฝอยและของเสียอันตรายของประเทศไทยให้ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยต้องการให้ทุกภาคส่วนของประเทศ ร่วมกันอย่างจริงจัง เพื่อดำเนินการลดปริมาณขยะมูลฝอยและของเสียอันตรายที่แหล่งกำเนิด (Reduce) การคัดแยกขยะมูลฝอยและของเสียอันตรายชุมชน เพื่อนำกลับมาใช้งานซ้ำ (Reuse) และการนำขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย มาผ่านกระบวนการสำหรับการใช้งานใหม่อีกครั้ง (Recycle) (นเรศ เชื้อสุวรรณ, 2559, ไพบูลย์ แจ่มพงษ์ และศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2560) เพื่อเพิ่มศักยภาพการเก็บขน ตลอดจนกำจัดขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย โดยการดำเนินงานดังกล่าวของกรมควบคุมมลพิษได้แก่ จัดให้มีสถานที่รวบรวมและกำจัดของเสียอันตรายชุมชน วางระบบการเรียกคืนซากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียอันตรายจากชุมชนเมื่อหมดอายุการใช้งาน สร้างความรับผิดชอบและความตระหนักของทุกภาคส่วนให้มีการจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย นอกจากนั้นยังมีการออกกฎ ระเบียบประกาศที่เกี่ยวข้องกับขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานสำหรับการปฏิบัติให้ถูกต้อง มีการเร่งรัดให้มีการประกาศใช้พระราชบัญญัติการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ประสานกระทรวงอุตสาหกรรม และกระทรวงสาธารณสุข กำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล และสถานพยาบาลต่างๆ ในการกำจัดและบำบัดกากอุตสาหกรรมอันตราย และมูลฝอยติดเชื้อไม่ให้เกิดผลกระทบกับชุมชนและสิ่งแวดล้อม

การดำเนินงานเกี่ยวกับปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ในประเทศไทย มีกฎหมายอยู่หลายฉบับที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม การกำกับ การดูแลความปลอดภัยในการทำงาน และมีกฎหมายที่บังคับใช้กับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีตลอดจนถึงอาคารสถานที่ เพื่อความปลอดภัยของชีวิตและสิ่งแวดล้อม ได้แก่พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เป็นต้น นอกจากนั้นในปัจจุบันยังพบว่ามีมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization, ISO) ที่หน่วยงานเอกชนให้ความสนใจดำเนินงานกิจกรรม และผ่านการรับรอง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารงานและการจัดองค์กร เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงาน ให้มีการพัฒนาตนเองอยู่ตลอดเวลา ตลอดจนทำให้ผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของสินค้าที่ผลิตออกมาจำหน่าย ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมได้ใช้มาตรฐาน ISO 14000 ในด้านความปลอดภัยใช้มาตรฐาน ISO 18000 นอกจากนั้นยังมีคุณภาพห้องปฏิบัติการใช้มาตรฐาน ISO 17025 (อภิชาติ อิ่มยิ้ม, 2559)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2549) จำแนกของเสียอันตรายอย่างง่ายๆ ออกได้เป็น 5 ลักษณะดังต่อไปนี้ สารไวไฟ สารกัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารพิษ และสารที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอนินทรีย์อันตราย ในขณะที่พิจารณาของเสียอันตรายซึ่งเกิดจากการเรียนการสอนในสถานศึกษา พบว่ามีการจัดแบ่งที่ละเอียดมากขึ้น โดย WasteTrack ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จำแนกของเสียอันตรายออกเป็น 15 ประเภท (ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม) ศูนย์การจัดการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและอาชีวอนามัย ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จำแนกของเสียอันตรายออกเป็น 28 ประเภท (ศูนย์การจัดการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและอาชีวอนามัย)

การเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์ในระดับมหาวิทยาลัย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีทั้งภาคทฤษฎี เพื่อให้

นักศึกษาได้มีความรู้ และภาคปฏิบัติ เพื่อทำให้นักศึกษาเกิดทักษะ และเกิดความชำนาญ จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประกอบอาชีพได้ พิจารณาในส่วนการเรียนการสอนภาคปฏิบัติของนักศึกษาทางด้านเคมี ก่อนที่นักศึกษาจะลงมือปฏิบัติ ได้มีการจัดเตรียมสารเคมีขึ้นมาหลากหลายชนิด เพื่อใช้ในปฏิบัติการนั้นๆ หลังจากเสร็จสิ้นการลงมือปฏิบัติของนักศึกษา พบว่ามีของเสียอันตรายเกิดขึ้นหลากหลายชนิด และมีปริมาณมาก การไม่มีแนวทางการจัดการของเสียอันตราย หรือมีระบบการจัดการของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการแต่ทำได้ไม่ดี จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ เป็นผลทำให้สิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดในน้ำตาย มลพิษทางอากาศ เกิดกลิ่นเหม็นจากของเสียอันตราย มลพิษทางดิน เกิดการสะสมของสารเคมีที่เป็นพิษในดิน ซึ่งสามารถซึมผ่านลงไปยังแหล่งน้ำใต้ดินได้ จากผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ห้องปฏิบัติการเรียนการสอนทางด้านเคมีในมหาวิทยาลัย จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจัดการของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นอย่างเป็นระบบ เพื่อไม่ให้ของเสียอันตรายเหล่านี้ เกิดการแพร่กระจายออกสู่ภายนอก เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสี่ยงการจัดเก็บของเสียอันตราย ภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน ก่อนการนำมาตรฐาน มอก. 2677-2558 เข้ามาดำเนินการปรับปรุงให้มีความปลอดภัยเพิ่มสูงขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานของเสียอันตรายภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

การสำรวจพื้นที่ และรวบรวมข้อมูลสถานภาพปัจจุบัน

เป็นการสำรวจพื้นที่อาคารเก็บสารเคมี ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และรวบรวมข้อมูลสถานภาพปัจจุบัน เกี่ยวกับของเสียอันตรายภายในอาคารเก็บสารเคมี ที่อาจทำให้เกิดภัยอันตรายแก่บุคลากรและนักศึกษา ตลอดจนทรัพย์สิน เพื่อให้ทราบว่าของเสียอันตรายในอาคารเก็บสารเคมีนั้นมีความเสี่ยงอะไรบ้างที่ต้องป้องกันและแก้ไข โดยมีแนวทางการแก้ไขให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2677-2558 เล่มที่ 1 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4699, 2558) และเล่มที่ 2 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4700, 2558)

การชี้บ่งอันตราย

เป็นการศึกษา วิเคราะห์ ทบทวนการดำเนินงานทั้งหมด จากนั้นรวบรวมจัดทำบัญชีรายการสิ่งที่เป็นความเสี่ยงและเป็นอันตราย ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบตรวจสอบ ESPReL Checklist ระบบการจัดการของเสียอันตรายมาใช้เป็นเครื่องมือ ตรวจสอบความปลอดภัยในการดำเนินงาน จากนั้นนำผลการตรวจสอบจาก ESPReL Checklist มาชี้บ่งอันตราย เพื่อหาแนวโน้มของเสียอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากพื้นที่ การดำเนินงาน เครื่องมือ และอุปกรณ์

การวิเคราะห์อันตราย

เป็นการวิเคราะห์อันตรายของเสียอันตราย ภายในอาคารเก็บสารเคมี โดยการสังเกตลักษณะทางกายภาพ การจัดการของเสียอันตราย โดยพิจารณา 2 ประเด็นที่เกี่ยวข้องได้แก่ หนึ่งมีอะไรบ้างที่ทำให้เกิดอันตรายต่อบุคลากร และนักศึกษา หรือสิ่งที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ และสองมีอะไรบ้างที่ทำให้ทรัพย์สินเกิดความเสียหาย รวมไปถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ ได้แก่การกระทำที่ไม่ปลอดภัย สิ่งแวดล้อมในอาคารที่ไม่ปลอดภัย

การประเมินความเสี่ยง

เป็นการพิจารณาถึงโอกาสและความรุนแรงของอันตรายที่ชี้บ่งออกมาได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดเพลิงไหม้ การระเบิด การรั่วไหลของของเสียอันตราย ซึ่งการประเมินความเสี่ยงเป็นการจัดระดับความเสี่ยงน้อย ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ หรือความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการดำเนินงานควบคุมความเสี่ยง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

การสำรวจพื้นที่อาคารเก็บสารเคมี

อาคารเก็บสารเคมี ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นอาคารคอนกรีต มีขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 12x22 เมตร มีทั้งหมด 5 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอย 950 ตารางเมตร ใช้ประกอบการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการเคมีประยุกต์ ปฏิบัติการเคมีทั่วไป 1 และ 2 ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม รวมไปถึงเป็นสถานที่ทำโครงงานพิเศษ ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี และทำวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาโท และปริญญาเอก มีรายละเอียดของพื้นที่ ครุภัณฑ์ หรืออุปกรณ์ตลอดจนวัสดุซึ่งมีอยู่ภายในแต่ละชั้นดังนี้

ชั้นที่ 1 เป็นห้องสำหรับเก็บวัตถุดิบในการทำปฏิบัติการทดลองเกี่ยวกับพอลิเมอร์ และมีเครื่องมือพอลิเมอร์ ได้แก่ Injection Molding, Single-Screw Extruder, Twin Screw Extruder, Two-Roll Mill และ Compression Molding Machine

ชั้นที่ 2 มีโต๊ะสำหรับเตรียมสารเคมี เครื่องทำน้ำกลั่น ตู้ส่งงาน ห้องพักอาจารย์และนักวิทยาศาสตร์ พื้นที่สำหรับทำปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม โต๊ะปฏิบัติการทดลอง (Work Station) 1 ตัว ตู้ดูดไอสารเคมี (Laboratory Fume Hood)

3 ตัว ตู้อบ (Oven) 3 ตัว อ่างล้างมือ 2 อ่าง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ห้องน้ำ ประตูหนีไฟ (Fire Exit) และพื้นที่บางส่วนวางอุปกรณ์ที่เสียเพื่อรอการซ่อมแซม

ชั้นที่ 3 มีโต๊ะปฏิบัติการทดลอง 4 ตัว โต๊ะวางสารเคมี 2 ตัว ตู้ดูดไอสารเคมี 2 ตัว ตู้เก็บสารเคมี 2 ตู้ ตู้อบ 3 ตัว อ่างล้างมือ 4 อ่าง โต๊ะอาจารย์ 1 ตัว ห้องน้ำ และประตูหนีไฟ

ชั้นที่ 4 มีโต๊ะปฏิบัติการทดลอง 4 ตัว ตู้ดูดไอสารเคมี 2 ตัว โต๊ะวางสารเคมี 3 ตัว ตู้อบ 1 ตัว อ่างล้างมือ 4 อ่าง โต๊ะอาจารย์ 1 ตัว อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 2 เครื่อง แท็งก์น้ำ ห้องน้ำ และประตูหนีไฟ

ชั้นที่ 5 มีแท็งก์น้ำ ชั้นวางขวดสารเคมีเปล่า ห้องเรียน และประตูหนีไฟ

การจัดเก็บของเสียอันตรายภายในอาคารเก็บสารเคมี เริ่มจากสำรวจชนิดของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน สำรวจพื้นที่ในการจัดเก็บของเสียอันตราย สำรวจภาชนะบรรจุของเสียอันตราย สำรวจถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตราย และฉลากติดภาชนะบรรจุของเสียอันตราย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การสำรวจของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นภายในอาคารเก็บสารเคมี ใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 90 วัน พบว่ามีของเสียอันตรายที่เกิดจากการปฏิบัติการทดลองขั้นพื้นฐาน เป็นของเสียอันตรายที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ได้แก่ตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ปริมาณ 0.5 กิโลกรัม เศษแก้วแตก ปริมาณ 3 กิโลกรัม ขยะที่ปนเปื้อนสารเคมี ซึ่งประกอบด้วยถุงมือที่ใช้เตรียมสารเคมี ทิชชูเปื้อนสารเคมี กระดาษกรอง ปริมาณ 0.5 กิโลกรัม ของเสียอันตรายที่มีลักษณะเป็นของเหลว ได้แก่ สารละลายโลหะหนัก กรด และเบส ปริมาณ 20, 1 และ 5 ลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม พบน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณ 50 ลิตร

การสำรวจลักษณะและสภาพการจัดเก็บของเสียอันตราย มีรายละเอียด ดังนี้

ชั้นที่ 1 ไม่มีการจัดเก็บของเสียอันตราย มีเครื่องมือสำหรับปฏิบัติการทดลองทางพอลิเมอร์

ชั้นที่ 2 มีการจัดเก็บน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากการทดลองปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม ไว้ในขวดพลาสติกขนาด 2.5 ลิตร จำนวน 16 ใบ บริเวณใต้โต๊ะปฏิบัติการ มีพื้นที่จัดเก็บน้ำมันปิโตรเลียม 1.4 ตารางเมตร ดังแสดงใน Figure 1 (a) ไม่มีถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตราย มีถังขยะวางหน้าตู้ดูดไอสารเคมี ด้านในถังขยะ มีขยะทั่วไปทิ้งรวมกับขยะปนเปื้อนสารเคมี มีขวดบรรจุสารเคมี ขวดสารเคมีเปล่า และขวดบรรจุของเสียอันตรายขนาด 1-2.5 ลิตร จำนวน 20 ใบ วางรวมกันไว้บริเวณใต้ตู้ดูดไอสารเคมี พื้นที่จัดเก็บมีขนาด 1.3 ตารางเมตร โดยไม่มีถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตรายที่เพียงพอ ดังแสดงใน Figure 1 (b)

Figure 1 Area of the second floor (a) Under table experimental and (b) Under fume hood

ชั้นที่ 3 มีการจัดเก็บของเสียอันตราย แยกตามปฏิบัติการทดลองเคมีพื้นฐาน จัดเก็บของเสียอันตรายทุกปฏิบัติการทดลองไว้ในขวดแก้วขนาด 1-2.5 ลิตร จำนวน 15 ใบ วางเรียงกัน และไม่มีถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตราย ใต้ตู้ดูดไอสารเคมี ใต้โต๊ะวางตู้อบ และใต้อ่างน้ำควบคุมอุณภูมิ พื้นที่จัดเก็บ 1.7 ตารางเมตร มีถังขยะจำนวน 3 ใบ วางไว้บริเวณรอบห้องปฏิบัติการทดลอง และมีถังใส่เศษแก้วแตก จำนวน 1 ใบ วางไว้บริเวณมุมทางเดินเข้าห้องน้ำชาย ดังแสดงใน Figure 2 (a-c) ตามลำดับ

Figure 2 Area of the third floor (a) Under fume hood (b) Under table of oven and water bath and (c) In-front of gentlemen toilet

ชั้นที่ 4 มีการจัดเก็บของเสียอันตราย โดยแยกตามปฏิบัติการทดลองเคมีพื้นฐาน ของเสียอันตรายทุกปฏิบัติการวางเรียงกัน และไม่มีถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตราย จัดเก็บไว้ในขวดแก้วขนาด 2.5 ลิตร ขวดพลาสติกขนาด 5 ลิตร และถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร รวมกันมีจำนวน 25 ใบ วางบริเวณด้านในห้องน้ำหญิง และใต้ตู้ดูดไอสารเคมี พื้นที่จัดเก็บ 2.5 ตารางเมตร มีโต๊ะไม้วางกีดขวางบริเวณทางเดินเข้าห้องน้ำจำนวน 1 ตัว มีถังสำหรับใส่เศษแก้วแตกวางไว้บริเวณหน้าห้องน้ำชายจำนวน 1 ใบ มีถังขยะจำนวน 3 ใบ วางไว้บริเวณรอบห้องปฏิบัติการทดลอง ดังแสดงใน Figure 3 (a-b)

Figure 3 Area of the fourth floor (a) Within lady toilet and (b) In-front of toilet

ชั้นที่ 5 ไม่มีการจัดเก็บของเสียอันตราย มีถังขยะทั่วไปบริเวณหน้าห้องบรรยายจำนวน 1 ใบ มีชั้นวางของ และมีขวดสารเคมีเปล่า ที่ได้ล้างทำความสะอาดแล้ว สำหรับการใช้งานซ้ำ เป็นขวดบรรจุของเสียอันตราย

การสำรวจภาชนะบรรจุของเสียอันตราย พบว่าภาชนะที่บรรจุของเสียอันตรายส่วนใหญ่เป็นขวดแก้วสีชา ที่เคยเป็นขวดสารเคมีมาก่อน ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดอันตรายหากล้างไม่สะอาด อาจทำให้เกิดปฏิกิริยากับของเสียอันตรายได้ ตัวภาชนะบรรจุมีน้ำหนักมาก ทำให้เคลื่อนย้ายไม่สะดวก หยิบจับไม่ถนัดมือ เสี่ยงต่อการหล่นแตก และมองระดับปริมาณของเสียอันตรายไม่ชัดเจน

การสำรวจถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตรายและฉลากติดภาชนะบรรจุของเสียอันตราย พบว่าถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตรายมีไม่เพียงพอต่อการใช้งาน และฉลากติดภาชนะบรรจุของเสียอันตรายมีลักษณะเก่า ข้อมูลไม่ครบถ้วน ไม่มีการบอกประเภทของเสียอันตราย และไม่มีการบอกลักษณะความเป็นอันตราย ก่อให้เกิดความสับสนในการจัดเก็บ และส่งกำจัด นอกจากนั้นยังทำให้เจ้าหน้าที่ นักศึกษา และบุคคลากรที่เกี่ยวข้อง ไม่ทราบถึงความเป็นอันตราย ส่งผล

ให้ความระมัดระวังลดน้อยลง เนื่องจากไม่ทราบข้อมูลของเสียอันตรายเบื้องต้น เกิดความเสี่ยงของอุบัติเหตุสูง และมีความปลอดภัยต่ำ

การชี้บ่งอันตรายและการวิเคราะห์อันตราย

การชี้บ่งอันตรายและการวิเคราะห์อันตรายของเสียอันตราย ภายในอาคารเก็บสารเคมี ใช้ ESPReL Checklist เป็นแนวทางในการตรวจสอบ ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน 30 วัน ซึ่งมีการตรวจสอบทั้งหมด 6 หัวข้อ ประกอบด้วยการบันทึกข้อมูล การรายงานข้อมูล การใช้ประโยชน์จากข้อมูลเพื่อการบริหารจัดการ การเก็บของเสียอันตราย การลดการเกิดของเสียอันตราย ตลอดจนการบำบัดและการกำจัดของเสียอันตราย ดังแสดงใน Table 1 พบว่าข้อมูลของเสียอันตรายไม่มีการบันทึกข้อมูลของเสียอันตรายในรูปแบบเอกสาร และอิเล็กทรอนิกส์ จึงควรมีระบบบันทึกข้อมูล เพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบสามารถรายงานข้อมูลของเสียอันตรายที่เกิดขึ้น ของเสียอันตรายที่กำจัดทิ้ง มีการปรับข้อมูลให้เป็นปัจจุบันเสมอ ควรมีรูปแบบการรายงานที่ชัดเจน โดยมีหัวข้อตามที่มาตรฐาน มอก. 2677–2558 กำหนด ซึ่งจะมีประโยชน์หากต้องการใช้ข้อมูลเพื่อบริหารจัดการ การเก็บของเสียอันตราย พบว่าของเสียอันตรายที่เป็นของเหลวแยกเป็นปฏิบัติการทดลอง ซึ่งไม่มีการแบ่งประเภทของเสียอันตราย และไม่แยกขยะทั่วไปออกจากขยะที่ปนเปื้อนสารเคมี มีการทิ้งถุงมือที่ปนเปื้อนสารเคมีลงในถังขยะทั่วไป ภาชนะบรรจุของเสียอันตรายใช้ขวดแก้วสีชา ซึ่งเป็นขวดสารเคมีที่ใช้หมดแล้ว ไม่มีหูหิ้ว และการจับทำได้ไม่ถนัดมือ มีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายต่อเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน ได้แก่ขวดแก้วสีชาตกพื้นและแตก ทำให้เกิดเศษแก้ว อาจได้รับบาดเจ็บได้ การขนย้ายทำได้ไม่สะดวก เนื่องจากมีน้ำหนักมากและไม่มีหูหิ้ว มองเห็นปริมาณของเสียอันตรายไม่ชัดเจน การติดฉลากบอกข้อมูลไม่ครบถ้วน อาจส่งผลถึงการกำจัดทิ้ง และเป็นอันตรายต่อบุคคลที่มาปฏิบัติงาน ที่ไม่มีความรู้ด้านเคมี เช่น แม่บ้าน ผู้มาติดต่องานหรือประสานงาน ไม่มีการตรวจสอบภาชนะบรรจุของเสียอันตรายว่ามีความสมบูรณ์อยู่หรือไม่ หากมีภาชนะบรรจุของเสียอันตรายชำรุด แตกหรือของเสียอันตรายล้นออกมา ทำให้เกิดอันตรายได้ เช่น ของเสียอันตรายไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ ออกไปสู่แหล่งชุมชน ของเสียอันตรายไหลไปใกล้แหล่งกำเนิดไฟ ทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ไม่มีพื้นที่จัดเก็บของเสียอันตรายแยกเป็นบริเวณที่ชัดเจน ซึ่งทำให้มีภาชนะบรรจุของเสียอันตรายวางไว้รอบห้องปฏิบัติการจำนวนมาก ภาชนะบางส่วนวางใกล้แหล่งกำเนิดไฟ ซึ่งหากมีการรั่วไหลอาจก่อให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ทำให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินและเกิดอันตรายต่อบุคคลได้ ถาดรองรับภาชนะบรรจุของเสียอันตรายไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ซึ่งหากของเสียอันตรายรั่วไหลออกมาจากภาชนะบรรจุของเสียอันตราย ทำให้นักศึกษา เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานสูดดมไอระเหย เป็นอันตรายต่อร่างกายได้ การสัมผัสของเสียอันตราย อาจเกิดการระคายเคืองผิวหนัง เกิดแผลพุพองได้

Table 1 Result of the management system of hazardous waste with checklist before modify

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	ไม่เกี่ยวข้อง	ไม่ทราบ/ไม่มีข้อมูล
1. ระบบบันทึกข้อมูล				
1.1 มีการบันทึกของเสียอันตรายในรูปแบบ				
1.1.1 เอกสาร		√		
1.1.2 อิเล็กทรอนิกส์		√		
1.2 โครงสร้างของเสียอันตรายที่บันทึกประกอบด้วย				
1.2.1 ผู้รับผิดชอบ		√		
1.2.2 รหัสของภาชนะบรรจุ		√		
1.2.3 ประเภทของเสียอันตราย		√		
1.2.4 ปริมาณของเสียอันตราย		√		
1.2.5 วันที่บันทึกข้อมูล		√		
1.2.6 ห้องที่เก็บของเสียอันตราย		√		
1.2.7 อาคารที่เก็บของเสียอันตราย		√		
2. การรายงานข้อมูล				
2.1 มีการรายงานข้อมูลของเสียอันตรายที่เกิดขึ้น		√		
2.2 มีรูปแบบการรายงานที่ชัดเจน เพื่อรายงานความเคลื่อนไหว ข้อมูลใน รายงานประกอบด้วยทุกหัวข้อดังต่อไปนี้				

Table 1 Result of the management system of hazardous waste with checklist before modify (Continuous)

หัวข้อ	ใช่	ไม่ใช่	ไม่เกี่ยวข้อง	ไม่ทราบ/ไม่มีข้อมูล
2.2.1 ประเภทของเสียอันตราย		√		
2.2.2 ปริมาณของเสียอันตราย		√		
2.3 มีการรายงานข้อมูลของเสียอันตรายที่ต้องกำจัดทิ้ง		√		
2.4 มีการปรับข้อมูลเป็นปัจจุบันสม่ำเสมอ		√		
3. การใช้ประโยชน์จากข้อมูลเพื่อการบริหารจัดการ				
3.1 มีการใช้ประโยชน์จากข้อมูลของเสียอันตรายเพื่อ				
3.1.1 การประเมินความเสี่ยง	√			
3.1.2 การจัดเตรียมงบประมาณในการกำจัด	√			
4. การเก็บของเสียอันตราย				
4.1 มีการแยกของเสียอันตรายออกจากของเสียทั่วไป	√			
4.2 มีเกณฑ์ในการจำแนกของเสียอันตรายที่เหมาะสม		√		
4.3 แยกของเสียอันตรายตามเกณฑ์ที่ระบุในหัวข้อ 4.2.		√		
4.4 ใช้ภาชนะบรรจุของเสียอันตรายที่เหมาะสมตามประเภท		√		
4.5 ติดฉลากภาชนะบรรจุของเสียอันตรายทุกชนิดอย่างถูกต้องและเหมาะสม		√		
4.6 ตรวจสอบความบกพร่องภาชนะและฉลากของเสียอันตรายอย่างสม่ำเสมอ		√		
4.7 บรรจุของเสียอันตรายไม่เกินร้อยละ 80 ของความจุภาชนะ	√			
4.8 มีพื้นที่/บริเวณที่เก็บของเสียอันตรายที่แน่นอน		√		
4.9 มีภาชนะรองรับขวดของเสียอันตรายที่เหมาะสม		√		
4.10 แยกภาชนะรองรับขวดของเสียอันตรายที่เข้ากันไม่ได้	√			
4.11 ว่างภาชนะบรรจุของเสียอันตรายห่างจากบริเวณอุปกรณ์ฉุกเฉิน				√
4.12 ว่างภาชนะบรรจุของเสียอันตรายห่างจากความร้อน แหล่งกำเนิดไฟหรือ เปลวไฟ		√		
4.13 เก็บของเสียอันตรายประเภทสารไวไฟในห้องปฏิบัติการไม่เกิน 38 ลิตร ต้องจัดเก็บไว้ในตู้สำหรับเก็บสารไวไฟ		√		
4.14 กำหนดปริมาณรวมสูงสุดของของเสียอันตรายที่อนุญาตให้เก็บได้ใน ห้องปฏิบัติการ				√
4.15 กำหนดระยะเวลาเก็บของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการ	√			
5. การลดการเกิดของเสียอันตราย				
5.1 มีแนวทางปฏิบัติหรือมาตรการในการลดการเกิดของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการ		√		
5.2 ลดการใช้สารตั้งต้น		√		
5.3 ใช้สารทดแทน				√
5.4 ลดการเกิดของเสียอันตรายด้วยการ				
5.4.1 การใช้งานซ้ำ	√			
5.4.2 การนำกลับมาใช้งานใหม่		√		
6. การบำบัดและการกำจัดของเสียอันตราย				
6.1 การบำบัดของเสียอันตรายก่อนทิ้ง			√	
6.2 การบำบัดของเสียอันตรายก่อนส่งบำบัด			√	
6.3 ส่งของเสียอันตรายไปกำจัดโดยบริษัทที่ได้รับใบอนุญาต	√			

หมายเหตุ ใช่ หมายถึง ทำได้ครบถ้วนตามรายการข้อนั้น ไม่ใช่ หมายถึง ทำได้ไม่ครบถ้วนตามรายการข้อนั้น ไม่เกี่ยวข้อง หมายถึง รายการข้อนั้นไม่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ และ ไม่ทราบ/ไม่มีข้อมูล หมายถึง ไม่แน่ใจว่าใช่หรือไม่ใช่ หรือทราบว่าใช่ แต่ไม่มีข้อมูล

การประเมินความเสี่ยง

ผลการประเมินความเสี่ยงของเสียอันตรายภายในอาคารเก็บสารเคมี ประเมินความเสี่ยงของข้อมูลจากตาราง ESPReL Checklist ซึ่งใช้เวลาสำหรับการดำเนินงานในส่วนนี้อีก 15 วัน ได้ทำการประเมินความเสี่ยง พบว่าข้อบกพร่องที่ต้องรีบดำเนินการเป็นลำดับแรก เป็นการวางภาชนะบรรจุของเสียอันตรายไว้ภายในห้องน้ำ มีระดับความเสี่ยงเท่ากับ 4 หมายถึงเป็นความเสี่ยงที่ของเสียอันตรายเหล่านี้มีโอกาสแพร่กระจายปนเปื้อนไปกับน้ำล้างพื้นห้องน้ำ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้าง ต้องดำเนินการนำของเสียอันตรายซึ่งวางไว้ที่พื้นบริเวณภายในห้องน้ำออกมาทันที เพื่อป้องกันไม่ให้ผลเสียหายดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่ข้อบกพร่องที่ต้องดำเนินการเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดอันตราย ซึ่งประกอบไปด้วย การไม่ทราบข้อมูลของเสียอันตราย การเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรง นำมาซึ่งการเกิดเพลิงไหม้ การขนย้ายของเสียอันตรายทำได้ไม่สะดวก ภาชนะบรรจุของเสียอันตรายมีโอกาสชำรุดเสียหาย สัมผัสกับผู้ปฏิบัติงานหรือหกลงสู่พื้น เป็นระดับความเสี่ยงเท่ากับ 3 มีอยู่ 6 หัวข้อ ได้แก่ การไม่มีระบบบันทึกข้อมูลของเสียอันตราย การไม่แยกประเภทของเสียอันตรายอย่างชัดเจน การใช้ภาชนะบรรจุของเสียอันตรายที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุได้ง่าย การไม่มีการตรวจสอบข้อบกพร่องของภาชนะบรรจุและฉลากข้างขวดอย่างสม่ำเสมอ การมีถาดรองรับของเสียอันตรายแต่มีปริมาณไม่เพียงพอกับภาชนะบรรจุของเสียอันตรายที่มีอยู่ และการวางภาชนะบรรจุของเสียอันตรายไว้ในตำแหน่งซึ่งใกล้กับแหล่งกำเนิดความร้อนหรือเปลวไฟ นอกจากนั้นภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน ยังมีความเสี่ยงที่เกิดจากการบันทึกข้อมูลของเสียอันตรายไม่ครบถ้วน เกิดความสับสนในการบันทึกข้อมูล ฉลากที่ติดอยู่บริเวณภายนอกภาชนะบรรจุของเสียอันตรายมีข้อมูลไม่ครบถ้วน การจัดเก็บของเสียอันตรายมีการย้ายตำแหน่งไม่มีบริเวณที่ชัดเจน และการจัดเก็บของเสียอันตรายไวไฟไว้ภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐานมีปริมาณมากเกินไป เป็นความเสี่ยงอยู่ในระดับเท่ากับ 2 มีอยู่ 4 หัวข้อได้แก่ การไม่มีข้อมูลของเสียอันตรายที่ต้องมีการบันทึก การติดป้ายฉลากติดภาชนะบรรจุของเสียอันตรายมีข้อมูลเบื้องต้นไม่ครบถ้วน การจัดสรรพื้นที่สำหรับการจัดเก็บของเสียอันตราเปลี่ยนแปลงไม่มีความแน่นอน และการจัดเก็บของเสียอันตรายที่มีสมบัติไวไฟไว้ภายในห้องปฏิบัติการ มีปริมาณมากกว่า 38 ลิตร

ผลการประเมินความเสี่ยงซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้ และความเสี่ยงที่อยู่ในระดับสูง ต้องได้รับการจัดการและปรับปรุง เมื่อมีอุบัติเหตุขึ้นส่งผลให้ห้องปฏิบัติการเกิดความเสียหายต่อตัวอาคาร และเป็นอันตรายต่อนักศึกษา เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน และบุคคลที่เกี่ยวข้องภายในอาคารเก็บสารเคมี จึงต้องได้รับการแก้ไขปรับปรุง เพื่อลดการเกิดความเสี่ยงของอุบัติเหตุจากของเสียอันตรายให้อยู่ในระดับเล็กน้อย

แนวทางแก้ไขและการป้องกันความเสี่ยง

เพื่อลดระดับความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดอุบัติเหตุจากของเสียอันตราย ที่อาจเกิดขึ้นกับบุคคลที่เข้ามาใช้ห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน ชุมชนข้างเคียง สิ่งแวดล้อมโดยรอบ ตลอดจนตัวอาคาร นำมาหาแนวทางการป้องกันโดยใช้หลักการ 4T มาเป็นแนวคิดเพื่อใช้ในการจัดการความเสี่ยง (จินดาวัลย์ เพ็ชรสูงเนิน และคณะ, 2559) ซึ่งประกอบด้วย

หนึ่งการหลีกเลี่ยงความเสี่ยง (Terminate) เป็นการกำจัดความเสี่ยงออกไปหรือหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้น เป็นการเปลี่ยนให้มีสิ่งใหม่มาทดแทนของเดิม สิ่งที่ต้องดำเนินการกระทำประกอบด้วย มีการบันทึกข้อมูลของเสียอันตรายในรูปแบบของเอกสารและอิเล็กทรอนิกส์ การมีโครงสร้างข้อมูลของเสียอันตรายที่ชัดเจน การแยกประเภทของเสียอันตรายให้ชัดเจน การติดฉลากภาชนะบรรจุของเสียอันตรายให้ครบถ้วน การตรวจสอบข้อบกพร่องของภาชนะบรรจุของเสียอันตรายอย่างสม่ำเสมอ การมีถาดรองรับของเสียอันตรายอย่างเพียงพอ การนำของเสียอันตรายออกจากบริเวณห้องน้ำ และการวางของเสียอันตรายให้ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดความร้อนและเปลวไฟ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้น

สองการถ่ายโอนความเสี่ยง (Transfer) เป็นการลดโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง โดยการถ่ายโอนหรือแบ่งภาระบางส่วนให้ผู้อื่นรับผิดชอบ เป็นการหาแนวทางอื่นเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ประกอบด้วยการเลือกใช้ภาชนะบรรจุของเสียอันตรายที่มีน้ำหนักเบา และต้องมีบริเวณจัดเก็บของเสียอันตรายที่แน่นอน

สามการควบคุมความเสี่ยง (Treat) เป็นการลดโอกาสของการเกิดความเสี่ยง โดยปรับเปลี่ยนการทำงานหรือเตรียมแผนการต่าง ๆ เป็นการหลีกเลี่ยงไม่ทำในสิ่งที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยง ได้แก่ การเก็บของเหลวไวไฟที่เป็นของเสียอันตรายมากกว่า 38 ลิตร ไว้ภายในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน

สี่การยอมรับความเสี่ยง (Take) เป็นการยอมรับความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้น ไม่มีการดำเนินการใด ๆ เพื่อลดโอกาสหรือผลกระทบเนื่องจากความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ

สรุปผลการวิจัย

การสำรวจพื้นที่อาคารเก็บสารเคมี และการชี้บ่งอันตรายด้วยการประเมินความเสี่ยงของเสียอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อบุคคลและทรัพย์สิน โดยนำ ESPReL Checklist ตามมาตรฐาน มอก. 2677-2558 มาเป็นแนวทางการปฏิบัติตลอดระยะเวลา 135 วัน มีข้อบกพร่องจำนวน 31 รายการ

มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุอยู่ในระดับสูง โดยห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐานยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี การปรับปรุงโดยการรวบรวมข้อมูลการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ จำแนกประเภทของเสียอันตราย เคลื่อนย้ายและจัดหาสถานที่จัดเก็บของเสียอันตราย เปลี่ยนภาชนะบรรจุของเสียอันตราย ติดป้ายฉลากระบุประเภทของเสียอันตราย จัดทำระบบบันทึกข้อมูลของเสียอันตราย และรายงานความเคลื่อนไหวของเสียอันตรายก่อนส่งกำจัด เป็นความจำเป็นที่จะต้องกระทำเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุของนักศึกษาและเจ้าหน้าที่ จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. เลขที่สัญญา 6141106

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2562). *สรุปสถานการณ์มลพิษ ของประเทศไทย ปี 2561*. กรุงเทพมหานคร: หจก.ส.มงคลการพิมพ์.

จินดาวัลย์ เพ็ชรสูงเนิน, สาริณี ลิพันธ์, สุราณี อโณทัยรุ่งรัตน์, และโกวิทย์ ปิยะมังคลา. (2559). การชี้บ่งอันตรายในห้องปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรม. *วารสารวิจัย มสด*, *9*(1), 21-33.

นเรศ เชื้อสุวรรณ. (2559). *การจัดการขยะมูลฝอยความเข้าใจสู่การปฏิบัติ*. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4699 (พ.ศ. 2558) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ระบบการจัดการด้านความปลอดภัย ของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี เล่ม 1. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 132 ตอนพิเศษ 229 ง ลงวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2558. สืบค้นจาก https://rac.oop.cmu.ac.th/RACNews/RAC-NewsFiles/2560000052.pdf

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4700 (พ.ศ. 2558) เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี เล่ม 2. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 132 ตอนพิเศษ 229 ง ลงวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2558. สืบค้นจาก https://rac.oop.cmu.ac.th/RACNews/RACNewsFiles/2560000053.pdf

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2558. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11 ง ลงวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2549. สืบค้นจาก https://www.diw.go.th/hawk/law/00180774.PDF

ไพบูลย์ แจ่มพงษ์, และศิวพันธุ์ ชูอินทร์. (2560). *การจัดการขยะมูลฝอย*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์การจัดการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและอาชีวอนามัย. *คู่มือการจัดการของเสียอันตราย ภายใน มจธ*. สืบค้นจาก http://www.eesh.kmutt.ac.th/doc/doc_view_t.asp?doc_id=22

ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นจาก https://www.shecu.chula.ac.th/home/

อภิชาติ อิ่มยิ้ม. (2559). *การจัดทำระบบคุณภาพ ISO 17025 & GLP สำหรับห้องปฏิบัติการเคมี*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัมมันตภาพรังสีในเบริลหลังถูกปรับปรุงคุณภาพโดยการฉายด้วยลำอิเล็กตรอน
Radioactivity in improved beryl by electron irradiation

อมรา อิทธิพงษ์[1], วิชาญ เลิศลพ[2], ธนัฐ กรอบทอง[3]
Ammara Ittipongse[1], Wichan Lertlope[2], Thanat Krobtong[3]

Received: 31 August 2020 ; Revised: 14 December 2020 ; Accepted: 19 January 2021

บทคัดย่อ

จุดประสงค์งานวิจัยนี้คือศึกษาข้อมูลทางกายภาพพื้นฐานของเบริล ได้แก่ ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ ธาตุองค์ประกอบทางเคมี และศึกษากัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นในเบริลหลังผ่านการฉายอนุภาคอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 60,000 kGy (กิโลเกรย์) จากเบริล 7 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าดัชนีหักเหอยู่ระหว่าง 1.571-1.589 ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.72-2.91 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริลด้วยเครื่อง WDXRF พบสารประกอบ ได้แก่ Al_2O_3, SiO_2, Cs_2O, Rb_2O, Fe_2O_3, Cl, Na_2O, CaO และ ZnO เมื่อวัดค่ากัมมันตภาพรังสี ด้วยเครื่อง Gamma-ray Spectroscopy พบธาตุกัมมันตรังสี ได้แก่ Cs-132, Cs-134, Mn-54, Rb-84 และ Na-22 ค่ากัมมันตภาพรังสีที่วัดได้หลังผ่านไป 140 วัน ในตัวอย่างที่ 1 ถึง 7 คือ 1.03, 1.79, 1.91, 1.70, 1.50, 1.12 และ 1.69 nCi/g ค่ากัมมันตภาพรังสี ลดลง 99.85% โดยเฉลี่ย ซึ่งลดลงเหลือน้อยกว่า 2 nCi/g (นาโนคูรีต่อกรัม) เป็นค่ามาตรฐานสำหรับส่งออกอัญมณี และอยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับผู้สวมใส่จิวเวลรี่

คำสำคัญ: เบริล กัมมันตภาพรังสี การฉายอนุภาคอิเล็กตรอน

Abstract

This study focused on the investigation the basic physical data of beryl, consisting of reflective index, specific gravity and chemical composition. Additionally, also study focused on the induced radioactivity after enrichment by electrons beam of 60,000 kGy irradiating seven beryl samples. All samples show the refractive indices and the specific gravity values between 1.571-1.589, and 2.72-2.91, respectively. The result of WDXRF showed that the most common compositions in beryl were Al_2O_3, SiO_2, Cs_2O, Rb_2O, Fe_2O_3, Cl, Na_2O, CaO and ZnO. The chemical element analysis by using gamma-ray measurement found that the samples beryl consisted of radioactive nuclei, eg. Cs-132, Cs-134, Mn-54, Rb-84 and Na-22. The results of radioactive decay rate in 140 days were 1.03, 1.79, 1.91, 1.70, 1.50, 1.12 and 1.69 nCi/g on 7 beryl samples, respectively. The total radiation activity decreases 99.85% that met the standard value for export of gems. So, all beryl samples were in suitable safety level for jewelry collectors.

Keywords: beryl, radioactivity, electron irradiation

[1] รองศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
[2] ผู้ช่วยศาสตรจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
[3] อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300
[1] Assoc. Prof, Faculty of Science and technology Suan Sunandha Rajabhat University Dusit district, Bangkok 10300, Thailand
[2] Assist. Prof, Faculty of Science and technology Suan Sunandha Rajabhat University Dusit district, Bangkok 10300, Thailand
[3] Lecturer, Faculty of Science and technology Suan Sunandha Rajabhat University Dusit district, Bangkok 10300, Thailand
* Corresponding author: Ammara Ittipongse,Faculty of Science and technology Suan Sunandha Rajabhat University Dusit district, Bangkok 10300, Thailand

บทนำ

เบริล (beryl) คือ เบริลเลียม อะลูมิเนียม ไซโคลซิลิเกต (beryllium aluminium cyclosilicate) มีสูตรเคมี คือ $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$ ชื่อแร่มาจากภาษากรีกโบราณ ซึ่งหมายถึงรัตนชาติสีเขียว (green gemstone) เป็นอัญมณี หินสีที่ยอดนิยม เนื้อใส แวววาว ประกายเจิดจ้า มีสีหลากหลาย เช่น สีเหลืองทอง ฟ้า กำมะหยี่ ชมพูกุหลาบ สีพีช และสีขาว เพราะมีส่วนผสมร่วมกับหินชนิดอื่นๆ อย่าง โกเมน ทัวร์มาลีน รูปผลึกเป็นเฮกซะโกนอล (hexagonal crystals) ผลึกมีลักษณะเป็นแท่งยาว มีร่องขนานตามแนวยาว (groove) ผิวหน้ามักขรุขระ มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ แข็ง 7.5-8 ความถ่วงจำเพาะ 2.63-2.91 วาวแบบแก้ว ดัชนีหักเห 1.568-1.590 (กรมทรัพยากรธรณี, ม.ป.ป. ; Krambrock *et al*., 2002) ถ้าเป็นเบริลที่บริสุทธิ์ (pure beryl) ไม่มีธาตุอื่นปนเปื้อนจะไม่มีสี ซึ่งรู้จักกันว่าเบริลไร้สี คือ โกสชีไนต์ (goshenite) แต่ที่เราพบเบริลมีหลากหลายสี เนื่องจากมีธาตุมาเจือปน ซึ่งสีที่พบก็มี สีเขียว สีฟ้า สีเหลือง สีแดง เนื่องจากมีหลายสีจึงมีชื่อเรียกต่างๆ กัน คือ อะความารีน (aquamarine) มีสีฟ้าอ่อน และโปร่งใส มอร์แกไนต์ (morganite) หรือ โรสเบริล (rose beryl) มีสีชมพูอ่อนถึงสีกุหลาบเข้ม เอเมอรัลด์ (emerald) หรือ มรกต มีสีเขียวเข้มโปร่งใสและเบริลสีทอง (golden beryl) มีสีเหลืองทอง เบริลสีทองถูกขุดพบมาหลายร้อยปีแล้ว แต่รู้จักกันชื่อ เฮลิโอดอร์ (Heliodor) โดยผลึกที่สะอาดและประกายสวยงามด้วยขนาดประมาณ 10 กะรัต อาจทำราคาขายได้มากถึง 150 ดอลลาร์สหรัฐต่อกะรัต และถ้าขนาดมากกว่า 10 กะรัต ขึ้นไปราคาอาจสูงได้ถึง 265 ดอลลาร์สหรัฐต่อกะรัต ด้วยประกายที่เป็นเอกลักษณ์ของพลอยในตระกูลเบริล พลอยเบริลสีเหลืองทองที่มีเนื้อสะอาด และได้รับการเจียระไนที่ดีเยี่ยมจะมีประกายที่คล้ายกับเพชรแฟนซี ซึ่งเหมาะสำหรับทำเป็นเครื่องประดับ (สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), ม.ป.ป.) เบริลสีทองนี้ถูกขุดพบในประเทศมาดากัสการ์ บราซิล และไนจีเรีย นอกจากนี้ยังมีขุดพลอยในยูเครน เบริลสีทองสามารถได้มาจากโกสชีไนต์โดยการฉายรังสี โดยหลากหลายเชดสีของเบริลในกลุ่มเฮลิโอดอร์ เช่น สีเหลือง สีน้ำตาลอ่อน หรือสีทอง เกิดขึ้นเพียงแค่การฉายรังสีแกมมาหรือการฉายรังสีอิเล็กตรอนแบบสั้นๆ ก็เพียงพอแล้วที่จะทำให้เกิดสีขึ้นในโกสชีไนต์

ปัจจุบันอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง เป็นรังสีที่ถูกนำมาใช้เพิ่มคุณค่าให้กับเบริล ซึ่งเป็นอนุภาคที่ได้ จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน (linear accelerator) นิยมใช้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงถึง 10-20 MeV การฉายรังสีด้วยอนุภาคอิเล็กตรอน ทำให้เกิดความร้อนเฉพาะที่ในอัญมณีสูงมาก จึงต้องใช้น้ำเย็นผ่านอัญมณีขณะฉายรังสี เพื่อระบายความร้อน และป้องกันอัญมณีแตกได้อิเล็กตรอนจะให้โดส (ปริมาณรังสีที่ใช้ต่อครั้ง) แก่อัญมณีสูงจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีได้ดี และใช้ระยะเวลาในการฉายรังสีสั้น หลังจากฉายเสร็จ ควรเก็บอัญมณีที่ถูกฉายรังสีไว้เป็นเวลา 2-3 วัน ถึง 2-3 สัปดาห์ เนื่องจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้บ้าง จึงต้องใช้เวลาคอยให้รังสีลดลงอยู่ในระดับปลอดภัย โดยตามมาตรฐานสหพันธ์ยูโรเปียน (EU) ได้ระบุว่าการส่งอัญมณีกลับคืนสู่ลูกค้าต้องมีความแรงรังสีไม่เกิน 2 นาโนคูรีต่อกรัม (องค์การมหาชน), ม.ป.ป. ; Kitawaki, 2012 ; Krumeich, 2015)

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาคุณสมบัติของเบเริลที่เปลี่ยนไปผ่านการเพิ่มคุณค่า โดยการฉายอนุภาคอิเล็กตรอน จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนของศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) โดยใช้เทคนิคการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา (gamma-ray spectroscopy) นอกจากนี้ยังได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโกปีแบบวัดการกระจายความยาวคลื่น (wavelength dispersive X-Ray fluorescence spectroscopy, WDXRF) เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่อาจจะเกิดเป็นสารกัมมันตภาพรังสีในเบริลหลังการฉายอนุภาคอิเล็กตรอน รวมถึงยังได้ศึกษาข้อมูลทางกายภาพพื้นฐานของเบริล เช่น ค่าดัชนีหักเห และค่าความถ่วงจำเพาะ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นในเบริลที่ผ่านการเพิ่มคุณค่า โดยการฉายอนุภาคอิเล็กตรอน จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนของศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

2. เพื่อศึกษาข้อมูลทางกายภาพพื้นฐานของเบริล ได้แก่ ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และธาตุองค์ประกอบทางเคมี

ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ การวัดค่าดัชนีหักเหและค่าความถ่วงจำเพาะของเบริล การวัดปริมาณรังสี การฉายรังสีอิเล็กตรอน การศึกษาและวิเคราะห์กัมมันตภาพรังสีในเบริล วิเคราะห์ธาตุหรือองค์ประกอบเคมีของเบริล ตัวอย่างเบริลที่ใช้ในการทดลองนี้ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง จากประเทศไนจีเรีย โดยเบ-ริลทั้ง 7 ตัวอย่าง เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ฉายรังสีอัญมณีสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

1. หาข้อมูลทางการภาพของเบริล ดังนี้

1.1 วัดค่าดัชนีหักเหด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (refractometer)

1.2 วัดค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก (balance)

1.3 คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของเบริล

1.4 ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จนครบทั้ง 7 ตัวอย่างโดยการสุ่ม

2. วัดปริมาณรังสี พลังงานของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนสำหรับใช้ฉายรังสีอิเล็กตรอนให้กับเบริล ใช้พลังงาน 20 MeV ซึ่งให้ปริมาณรังสีอิเล็กตรอน 25 kGy

3. ฉายรังสีอิเล็กตรอน เพื่อปรับปรุงคุณภาพสีของเบริลให้มีสีที่ดีขึ้น โดยพลังงานของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนสำหรับใช้ฉายรังสีอิเล็กตรอนให้กับเบริล มีปริมาณรังสี 60,000 kGy

4. วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริลด้วยเครื่อง wavelength dispersive X-Ray fluorescence spectroscopy (WDXRF)

5. วัดค่ากัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างเบริลด้วยเครื่อง gamma-ray spectrometer

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาค่าดัชนีหักเหของเบริล

จากการวัดค่าดัชนีหักเหของเบริลด้วยเครื่องรีแฟคโตมิเตอร์ โดยค่าดัชนีหักเห สามารถจำแนกชนิดของอัญมณีได้ ถ้ามีการเปลี่ยนอัญมณีที่นำมาวัดค่าดัชนีหักเห มุมวิกฤตและตำแหน่งเงาบนสเกลที่แสดงก็จะเปลี่ยนไป นั่นคือค่าดัชนีหักเหที่อ่านได้ก็จะแตกต่างกันไปด้วย ในงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์เบริล ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง มีผลการทดลองดัง Table 1

Table1 The refractive index of beryl samples

	reflective index	mean
1	1.579-1.589	1.584
2	1.578-1.583	1.580
3	1.577-1.581	1.579
4	1.571-1.584	1.577
5	1.573-1.584	1.578
6	1.582-1.587	1.584
7	1.578-1.589	1.583

จาก Table 1 แสดงค่าดัชนีหักเหของเบริล จากการวัดค่าดัชนีหักเหของเบริลที่นำมาทำการทดลองทั้ง 7 ตัวอย่าง พบว่าค่าดัชนีหักเหของเบริลทั้ง 7 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 1.571-1.589 โดยทั่วไปเบริลจะมีค่าดัชนีหักเหตามเอกสารอ้างอิงอยู่ระหว่าง 1.568-1.590 (กรมทรัพยากรธรณี, ป.ป.ป. ; Fridrichova, 2018) โดยค่าดัชนีหักเหของเบริลทั้ง 7 ตัวอย่างที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.571-1.589 ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อ้างอิงไว้ ดังนั้นตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่างที่นำมาทำการวิจัยนี้ไม่มีอัญมณีชนิดอื่นปลอมปน

2. ผลการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะเบริล

การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของเบริลด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก โดยใช้หลักการของอาร์คิมีดีส (Archimedes' principle) ซึ่งเป็นการหาน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับพลอยจะเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยพลอย ซึ่งการหาค่าความถ่วงจำเพาะสามารถทดสอบหาค่าได้ง่ายโดยไม่ทำให้อัญมณีเสียหายและยังสามารถจำแนกชนิดของอัญมณีได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์เบริลทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดัง Table 2

Table 2 The specific gravity of beryl samples

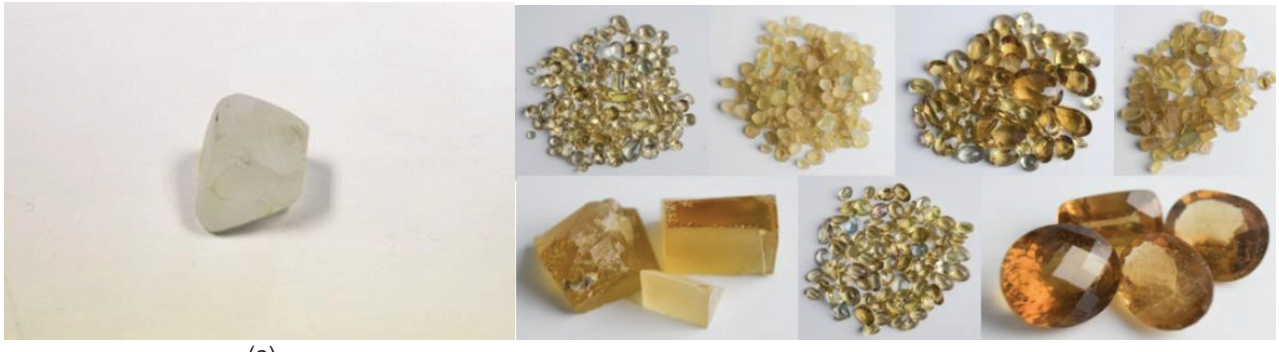
Beryl Samples	weight in air	weight in water	specific gravity
1	0.079	0.052	2.91
2	0.088	0.057	2.83
3	0.03	0.019	2.72
4	0.088	0.057	2.84
5	0.088	0.057	2.83
6	0.047	0.03	2.76
7	0.049	0.031	2.72

จาก Table 2 โดยทั่วไปเบริลจะมีค่าความถ่วงจำเพาะตามเอกสารอ้างอิงอยู่ระหว่าง 2.63-2.91 (กรมทรัพยากรธรณี, ป.ป.ป. ; Fridrichova, 2018) โดยค่าความถ่วงจำเพาะของทั้ง 7 ตัวอย่าง ที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 2.72-2.91 ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อ้างอิงไว้ ดังนั้นตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่างที่นำมาทำการวิจัยนี้ไม่มีอัญมณีชนิดอื่นปลอมปน

3. ผลการเปลี่ยนสีของเบริลจากฉายรังสีอิเล็กตรอน

การวิจัยนี้ใช้เครื่องเร่งอิเล็กตรอนซึ่งตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (มหาชน) ประเทศไทย ซึ่งใช้พลังงาน 20 MeV ในการเดินเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน และ

ฉายรังสีอิเล็กตรอนปริมาณ 60,000 kGy ไปยังเบริลตัวอย่างเบริลก่อนการฉายรังสีอิเล็กตรอนนั้นไร้สี (goshenite) หลังจากการฉายรังสีอิเล็กตรอนด้วย ปริมาณรังสี 60,000 kGy เปลี่ยนเป็นสีทอง (Golden) ดัง Figure 1



(a) (b)

Figure 1 (a) beryl before irradiation (b) beryl after irradiation

4. ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริล

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริลด้วยเครื่อง WDXRF ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโกปีแบบวัดการกระจายความยาวคลื่น สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ไม่ทำให้อัญมณีเสียหาย โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริลทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดัง Table 3

Table 3 WDXRF analysis of beryl samples in comparison with reference 1 and 2. Data are given in wt% and nd means not detection.

	beryl samples							Ref. 1 (Yellow Beryl)	Ref. 2 (Clear beryl)
	1	2	3	4	5	6	7		
Al_2O_3	17.35	16.97	17.33	17.28	19.33	15.79	15.53	20.89	18.91
BeO	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	12.49	12.83
SiO_2	66.69	67.08	56.52	56.33	44.44	62.09	54.88	63.66	64.76
Cs_2O	12.78	14.26	23.38	24.24	nd	19.1	26.91	-	-
P_2O_5	1.27	0.97	nd	nd	nd	1.2	0.98	-	-
K_2O	0.09	0.07	0.17	nd	3.16	0.06	0.06	0.05	0.23
CaO	0.31	0.26	nd	nd	15.88	0.34	0.28	-	-
Fe_2O_3	0.18	0.17	0.22	nd	0.42	0.21	0.26	0.83	-
Rb_2O	0.17	0.16	0.25	0.22	nd	0.21	0.24	-	-
Na_2O	0.75	nd	1.29	1.47	8.35	0.59	nd	0.24	1.23
ZnO	0.03	0.02	nd	0.06	nd	0.04	0.04	-	-
MnO	nd	0.03	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	-
MgO	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	-
CuO	nd	nd	nd	nd	0.03	0.02	0.02	-	-

Table 3 WDXRF analysis of beryl samples in comparison with reference 1 and 2. Data are given in wt% and nd means not detection. (Continuous)

	beryl samples							Ref. 1 (Yellow Beryl)	Ref. 2 (Clear beryl)
	1	2	3	4	5	6	7		
Ga_2O_3	nd	0.01	nd	nd	nd	0.01	0.01	-	-
La_2O_3	nd	nd	0.42	nd	nd	nd	nd	-	0.14
SO_3	0.13	nd	nd	nd	1.21	0.2	0.12	-	-
Cl	0.24	nd	nd	nd	6.76	0.14	0.08	-	-
NiO	nd	nd	nd	0.03	nd	0.01	nd	-	-
SrO	nd	nd	nd	nd	0.14	nd	nd	-	-
BrO_2	nd	nd	nd	nd	0.08	nd	nd	-	-
Total	**99.99**	**100.00**	**99.58**	**99.63**	**99.80**	**100.01**	**99.41**	**98.18**	**98.10**

โดยทั่วไปเบริลจะมีธาตุตามเอกสารอ้างอิง คือ $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$ ซึ่งธาตุ Al_2O_3 และ SiO_2 ที่พบในเบริลทั้ง 7 ตัวอย่างนั้น มีปริมาณธาตุที่ใกล้เคียงกับปริมาณธาตุที่ตรวจพบในเบริลสีเหลือง คือ Al_2O_3 20.89% และ SiO_2 63.66% และในเบริลบริสุทธิ์ คือ Al_2O_3 18.91% และ SiO_2 64.76% ตามเอกสารอ้างอิง ส่วนธาตุอื่นที่ตรวจพบในเบริลทั้ง 7 ตัวอย่างนั้นมีปริมาณแตกต่างกันไป อาจมาจากการปนเปื้อนตามแหล่งธรรมชาติหรือมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจพบได้ในเบริลแต่ละตัวอย่างต่างกันไป

5. ผลการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างเบริลด้วยเครื่อง Gamma-ray Spectroscopy

สเปกตรัมรังสีแกมมาของเบริลหลังจากฉายด้วยอิเล็กตรอนได้ถูกวัดด้วยเทคนิค Gamma-ray spectroscopy โดยใช้ชนิดหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor detector) ซึ่งอยู่ภายในเครื่องกำบังรังสี (shied) หัววัดจะเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง (multichannel analyzer: MCA) และวิเคราะห์จากส่วนที่เป็นโฟโตพีคพลังงานรังสีแกมมาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ทำการวิเคราะห์หาค่าไอโซโทปในแต่ละพลังงานที่พลังงาน 667.70 keV ของ Cs-132, 795.85 keV ของ Cs-134, 834.84 keV ของ Mn-54, 881.60 keV ของ Rb-84 และ 1274.53 keV ของ Na-22 แล้วทำการคำนวณค่ากัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างเบริล จากนั้นคำนวณหาค่าอัตราการสลายตัวของกัมมันตรังสี โดยประเมินระยะเวลาเพื่อให้กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นในเบริลลดลงเหลือในปริมาณที่ปลอดภัย โดยผู้วิจัยประเมินจากค่ากัมมันตภาพรังสี (activity) นั้นต้องลดลงเหลือต่ำกว่า 2 nCi/g ซึ่งจากการประเมินได้ระยะเวลาที่ 140 วัน จากวันที่ 12/06/2018 ถึงวันที่ 31/10/2018 เมื่อครบ 140 วัน ทำการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างเบริลด้วยเครื่อง Gamma ray Spectroscopy เพื่อตรวจสอบค่ากัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นในเบริลนั้นลดลงเหลือในปริมาณที่ปลอดภัยแล้ว ซึ่งปริมาณรังสีที่ปลอดภัยจะมีค่าต่ำกว่า 2 nCi/g ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดัง Table 4

Table 4 The radioactive decay rate after 140 days of electron irradiating.

			beryl samples						
			1	2	3	4	5	6	7
Isotope	T1/2 (d)	En (keV)	Activity (nCi/g.)						
Cs-132	6.48	667.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs-134	751.90	795.85	0.83	1.50	1.61	1.38	1.07	0.87	1.34
Mn-54	312.12	834.84	-	-	0.00	0.00	-	-	0.06
Rb-84	32.82	881.60	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na-22	949.00	1274.53	0.20	0.18	0.29	0.32	0.42	0.25	0.29
			1.03	1.79	1.91	1.70	1.50	1.12	1.69

อภิปรายผล

จากผลการตรวจสอบ ค่าดัชนีหักเหของเบริล ค่าที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง1.571-1.589 ค่าความถ่วงจำเพาะของเบริล ค่าที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง 2.72-2.91 ซึ่งเป็นไปตามที่ได้อ้างอิงไว้ที่ระบุว่า ค่าดัชนีหักเหของเบริลมีค่าอยู่ระหว่าง1.568-1.590 ค่าความถ่วงจำเพาะของเบริลมีค่าอยู่ระหว่าง 2.63-2.91 ดังนั้น เบริลทั้งหมด 7 ตัวอย่างที่นำมาทำการวิจัยนี้ไม่มีอัญมณีชนิดอื่น เมื่อฉายรังสีปริมาณ 60,000 kGy เป็นปริมาณที่กำหนดไว้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Jivanantaka (Jivanantaka, 2018) ที่กล่าวว่าปริมาณรังสีอิเล็กตรอน 60,000 kGy แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณีอย่างเห็นได้ชัด ผลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเบริล ธาตุที่พบมากซึ่งพบเกือบทุกตัวอย่างได้แก่ Al_2O_3, SiO_2, Cs_2O, Rb_2O, Fe_2O_3, Cl, Na_2O, CaO และ ZnO สอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Fridrichova (Fridrichova, 2018) ที่กล่าวว่าองค์ประกอบทางเคมีของเบริลประกอบด้วย SiO_2, BeO, TiO, Al_2O_3, Fe_2O_3, Mn_2O_3, MgO, NiO, ZnO, CaO, Na_2O, K_2O, Rb_2O และ Cs_2O โดยงานวิจัยนี้ตัวอย่างเบริลทั้ง 7 จากประเทศไนจีเรียไม่สามารถตรวจพบ BeO เหมือนกับงานวิจัยของ (Krambrock *et al*., 2002) ที่ใช้ตัวอย่างเบริลจากประเทศ อุรุกวัย (Aracuai), ไมนัส เจอเรส (Minas Gerais), และ บราซิล (Brazil) และผลการวัดค่ากัมมันตภาพรังสี ซึ่งพบธาตุกัมมันตภาพรังสี ได้แก่ Cs-132, Cs-134, Mn-54, Rb-84 และ Na-22 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี

สรุป

คุณสมบัติทางกายภาพของ 7 ตัวอย่างเบริลจากประเทศไนจีเรียพบว่ามีค่าดัชนีหักเหและค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงของค่ามาตรฐาน และเมื่อตรวจสอบธาตุองค์ประกอบทางเคมี พบว่ามีองค์ประกอบสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเบริล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า 7 ตัวอย่างเบริลจากประเทศไนจีเรียเป็นเบริลแท้ แต่อาจมีสารอื่นที่ปนเปื้อนบ้างตามแหล่งธรรมชาติ เมื่อนำมาเพิ่มคุณภาพโดยใช้การฉายอิเล็กตรอนที่ 60,000 kGy พบว่าเบริลเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองทอง และเมื่อทดสอบหาระยะเวลาปลอดภัยจากกัมมันตภาพรังสีที่ตกค้างอยู่ในเบริลที่เพิ่มคุณค่าแล้ว จากการวิจัยพบว่าต้องใช้ระยะเวลาผ่านไปแล้ว 140 วัน กัมมันตภาพรังสีในเบริลจึงลดลงเหลือในปริมาณที่ปลอดภัยที่น้อยกว่า 2 nCi/g ซึ่งเป็นปริมาณกัมมันตภาพรังสีตรงตามระดับปลอดภัย ตามมาตรฐานสหพันธ์ยูโรเปียน (EU) ของอัญมณีกลับคืนสู่ลูกค้า

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. *เบริล*. http://www.dmr.go.th/main.php?filename=beryl

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). *การเพิ่มคุณค่าของอัญมณีโดยวิธีนิวเคลียร์*. http://www.tint.or.th/gems/gems5102.html

พรวลัย กวางเส็ง และศิวพร สร้อยพลอย. (2558). *การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณรังสีที่ตกค้างในลอนดอนโทแพซที่ผ่านการอาบนิวตรอน*. เทคโนโลยีสู่สังคมไทย การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานระดับชาติ (น.13-14). สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน).

Hiroshi Kitawaki *et al*. (2012). Radioactive morganite. *Gems & Gemology*, 48, 42-44. http://doi.org/10.5741/GEMS.48.1.2

F. Krumeich. (2015). *Electrons Interactions with Matter*. https://www.microscopy.ethz.ch/downloads/Interactions.pdf

J. Fridrichova *et al*. (2018). Jahn-Teller distortion of Mn3+ occupied octahedra in red beryl from Utah indicated by optical spectroscopy. *Molecular Structure*. 1152, 79-86. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.09.081

P. Jivanantaka *et al*. (2018). *Oxidation state of Fe in irradiated sapphire samples by XAS technique*. Siam Physics Congress. Ser. 1144 012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1144/1/012016

K. Krambrock, M.V.B. Pinheiro, K.J. Guedes, S.M. Medeiros, S. Schweizer, C. Castañeda, N.F. Botelho, A.C. PedrosaSoares. (2002). *Radiation-induced centers in Cs-rich beryl studied by magnetic resonance, infrared and optical spectroscopy*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Vol. 191 (pp. 285-90). https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)00577-3

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์

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) ผู้นิพนธ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลง แก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล และนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่ละเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษรวมกับภาษาไทยในข้อความ 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 ชื่อผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt. ตัวบาง**

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้นิพนธ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้นิพนธ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ ".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. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้นิพนธ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กะทัดรัด และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช้คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้นิพนธ์ [Author(s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้นิพนธ์ไว้เป็นเชิงอรรถของหน้าแรก 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 ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods) ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งที่นำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปรผล

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อนและมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้นิพนธ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวการสำหรับการวิจัยต่อไป

ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams) ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ www.journal.msu.ac.th

เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychilogical Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). *ชื่อเรื่อง* (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒ์. (2547). *หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่*. ปิติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. *ชื่อวารสาร*, *เลขของปีที่*(เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /https://doi.org/เลขdoi

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, *18*(2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณาธิการ (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). เดลินิวส์วาไรตี้: ‘สื่อพิพิธภัณฑ์’ เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย ‘มิติใหม่’ อินเทรนด์. เดลินิวส์, 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 VYIMh1cYWzQiaNl_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 Psychilogical 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

Mahasarakham University Journal of Science and Technology

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 tehnology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership
Mahasarakham 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 Mahasarakham University
Professor Dr. Visut Baimai
Professor Dr. Vichai Boonsaeng

Editor-in-Chief
Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors
Professor Dr.Pairot Pramual
Mahasarakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Mahasarakham 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
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Mahasarakham 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
Mahasarakham University
Associate Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Chawalit Boonpok
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathsni Rajabhat University Assistant
Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Apinya Wongpiriyayothar
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Mahasarakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Mahasarakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University
Dr.Adrian R. Plant
Mahasarakham 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